

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO - UNINOVE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

ALBERTO MENDONÇA DE ALMEIDA

**PRINCIPAIS BARREIRAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA MANUFATURA
ADITIVA NO BRASIL**

**SÃO PAULO
2019**

ALBERTO MENDONÇA DE ALMEIDA

**PRINCIPAIS BARREIRAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA MANUFATURA
ADITIVA NO BRASIL**

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Prof. Wagner Cezar Lucato, Dr. - Orientador

**SÃO PAULO
2019**

Almeida, Alberto Mendonça de.

Principais barreiras para a implementação da manufatura aditiva no Brasil. / Alberto Mendonça de Almeida. 2020.

83 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2020.

Orientador (a): Prof. Dr. Wagner Cezar Lucato.

1. Manufatura aditiva. 2. Impressão 3D. 3. Indústria 4.0.

I. Lucato, Wagner Cezar. II. Título

CDU 658.5



PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

DE

Alberto Mendonça de Almeida

Título da Dissertação: Principais Barreiras para a Implementação da Manufatura Aditiva no Brasil.

A Comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o(a) candidato(a) Alberto Mendonça de Almeida Aprovado.

São Paulo, 18 de fevereiro de 2020.

Prof(a). Dr(a). Wagner Cezar Lucato (UNINOVE / PPGE) - Orientador

Prof(a). Dr(a). Luiz Antonio Negro Martin Lopez (CTMSP) - Membro Externo

Prof(a). Dr(a). Rosângela Maria Vanalle (UNINOVE / PPGE) – Membro Interno

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e a Nossa Senhora da Conceição Aparecida pela proteção, força e orientação nos momentos difíceis, por terem guiado meus passos e conduzindo-me sob suas guardas até aqui. Em certos momentos somente a crença e a fé dão a força e o direcionamento necessário para prosseguir.

Em segundo lugar a minha família, especialmente à minha querida esposa Angela que me deu força e incentivo nos momentos de fraqueza e à minha amada filha Fernanda, fonte de inspiração nos momentos de desânimo e cansaço, vê-la estudando aos finais de semana, motivava-me a prosseguir nessa dura jornada. Perdoem, minhas queridas, pela prolongada ausência e por ter sacrificado momentos de lazer e convivência familiar ao lado de vocês.

Aos meus queridos pais, Armando e Ivalda, pelo exemplo de vida e construção de uma sólida base familiar que guiou meus passos, orientou meus caminhos e me ensinou a seguir em frente com muita garra e perseverança.

Ao meu orientador, professor Prof. Dr. Wagner Cezar Lucato, pelo direcionamento técnico, organização na orientação, cordialidade, respeito, postura ética e profissional na condução deste trabalho, identificando e ajudando a solucionar, com excelência didática, as naturais dificuldades do orientado. Muito obrigado, professor!

Aos mestres que fizeram e ainda fazem parte deste programa e ajudaram muito nesta caminhada. Por terem transmitido, com excelência e boa vontade, um conjunto de conhecimentos duramente adquiridos ao longo de suas vidas.

Aos amigos e companheiros de caminhada, o grupo dos “Humildes” e “Renegados”, Marcos Geraldo Gomes, Agatha Martins Monteiro e Fábio Soares Arantes pela amizade, companheirismo e ajuda nas dificuldades.

À Ana Carolina Castro Foganholo, sempre ao meu lado nos e-mails e ligações, zelando com muito profissionalismo e gentileza para que nada prejudicasse o andamento no programa.

Finalmente à UNINOVE pela oportunidade que ofereceu, possibilitando a continuidade dos meus estudos. O profissionalismo de seus dirigentes e colaboradores foi fundamental para meu aperfeiçoamento pessoal e profissional.

RESUMO

A Manufatura Aditiva (MA) teve um desenvolvimento substancial a partir da década de 1980. Essa é uma moderna técnica de manufatura, considerada tecnologia disruptiva, que é perfeitamente adaptada ao inovador e moderno conceito da crescente indústria 4.0, empregando métodos de adição de material e contrapondo-se ao método tradicional de retirada de material. Toda essa modernidade traz em seu bojo substanciais benefícios, tanto econômicos e financeiros quanto ambientais. Contudo, a literatura que trata o tema demonstra que a adoção dessa tecnologia de maneira mais ampla tem encontrado diversas barreiras nos locais onde foram ou poderiam ser implementadas. Genericamente, essas barreiras foram relacionadas à energia, materiais, mão de obra, maquinários, regulamentação e processos de fabricação. O Brasil não poderia ficar fora deste novo e revolucionário processo tecnológico e nem tampouco se abster de atravessar as mesmas dificuldades identificadas em outras localidades. Por isso, este estudo teve como objetivo fazer o levantamento bibliográfico exploratório das barreiras para a adoção da manufatura aditiva encontradas na literatura e, em seguida, por meio de estudo de caso, identificar quais são os principais desafios para a implementação da tecnologia de MA no Brasil. Os resultados encontrados preencheram uma lacuna na literatura na medida em que não há estudos sobre o tema desenvolvidos no Brasil e servirão de base para que a indústria possa se balizar e se preparar adequadamente para este imenso desafio que, inevitavelmente, o Brasil terá que atravessar.

Palavras chave: Manufatura Aditiva; Impressão 3D; Indústria 4.0.

ABSTRACT

Additive manufacturing (MA) had a huge development since the 1980s. This is considered a modern and disruptive technology of manufacturing technique, which is perfectly adapted to the innovative and new concept of the growing 4.0 industry, which are employing methods of adding material, instead of traditional method that consists of removing material out of a metal parte. All this modernity brings substantial benefits such as economic, financial and environmental. However, the literature review demonstrates that the adoption of this technology has found several barriers where they were implemented. Generically, these barriers were related to energy, materials, labor, machinery, regulation and manufacturing processes. Brazil could not be out of this revolutionary new technological process, neither avoid going through the same difficulties identified in other locations. Therefore, this study aimed to do the exploratory bibliographic survey of barriers for adopting additive manufacturing found in the literature and then, through a case study, identify which are the main barriers and challenges for the implementation of MA technology in Brazil. The results found will fill a gap in the literature because no studies were made before about this subject in Brazil. This will work as a guide for industry to be able to make appropriate preparation for this huge challenge that inevitably is coming soon for Brazil.

Keywords: Additive manufacturing; 3D printing; 4.0 Industry.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Estrutura do trabalho.....	17
FIGURA 2 – Tecnologia SLA e SLS/SLM.....	18
FIGURA 3 – Tecnologia DLP/FTI.....	19
FIGURA 4 – Tecnologia FDM/DMD/DDM.....	19
FIGURA 5 – Tecnologia MJM e 3DP.....	20
FIGURA 6 – Tecnologia LOM.....	20
FIGURA 7 – Processo binder jetting (aglutinante).....	21
FIGURA 8 – Processo directed energy deposition (depos de energia direcionada)..	21
FIGURA 9 – Processo material extrusion (extrusão de material).....	22
FIGURA 10 – Processo material jetting (jateamento de material).....	22
FIGURA 11 – Processo powder bed fusion (cama de fusão de pó).....	23
FIGURA 12 – Processo sheet lamination (laminação de chapas).....	23
FIGURA 13 – Processo Vat photopolymerization (fotopolimerização em tanque).....	24
FIGURA 14 – Gráfico Custo por volume de produção.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Barreiras identificadas na literatura agrupadas por termos semelhantes em cada categoria.....	42
Tabela 2. Barreiras mais relevantes identificadas na literatura agrupadas por termos semelhantes em cada categoria.....	43
Tabela 3. Barreiras mais relevantes consideradas citações por autor.....	44
Tabela 4. Barreiras identificadas no estudo de caso.....	71
Tabela 5. Tabela comparativa literatura e estudo de caso.....	73

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Geral.....	14
1.2.2 Específicos.....	14
1.3 JUSTIFICATIVAS PARA ESTUDO DO TEMA.....	15
1.4 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....	15
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 TECNOLOGIAS DE MA DISPONÍVEIS.....	18
2.2 IDENTIFICAÇÃO DAS BARREIRAS PARA A ADOÇÃO DA MA.....	27
2.3. A SELEÇÃO DAS BARREIRAS MAIS RELEVANTES.....	42
3. MÉTODOS	47
3.1. CRITÉRIOS PARA REALIZAÇÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	47
3.2. A SELEÇÃO DO MÉTODO.....	50
3.3. A SELEÇÃO DAS EMPRESAS PARA DESENVOLVER OS ESTUDOS DE CASO.....	51
3.4. A TÉCNICA DE COLETA DE DADOS.....	52
4. RESULTADOS	55
4.1 ANÁLISES INTRACASOS.....	55
4.1.1 Empresa A.....	55
4.1.2 Empresa B.....	58
4.1.3 Empresa C.....	61
4.1.4 Empresa D.....	63
4.1.5 Empresa E.....	67
4.2 ANÁLISE ENTRE CASOS.....	70
5. CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
APÊNDICE 1	81

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, o homem, em seu caminho para dominar o mundo, teve a necessidade de utilizar ferramentas para que seus objetivos fossem atingidos. Essas ferramentas tiveram a finalidade de facilitar, e por vezes permitirem, que esses objetivos fossem atingidos.

Contudo, na maioria das vezes, elas não existiam prontas na natureza e deveriam ser produzidas a partir de um material bruto que tinha suas características físicas e/ou químicas modificadas para que fossem moldadas e conformadas visando a adequar a finalidade a que se destinava.

As maneiras tradicionais de produção dessas ferramentas, até recentemente, eram técnicas de fundição, conformação mecânica ou retirada de material, sendo essas, apesar de funcionais e eficientes, de alguma forma produziam grande quantidade de lixo, resíduos ou gastos excessivos de materiais, dispendendo energia, recursos e produzindo contaminantes para o meio ambiente. (THOMPSON et al., 2015)

Vartanian e McDonald (2016) afirmaram que a partir da década de 80, novas pesquisas cresceram drasticamente e acabaram incorporadas ao processo produtivo, desta vez com a possibilidade de ganhos significativos sobre os métodos tradicionais de produção o que adicionou benefícios onde antes havia deficiências; especialmente na redução de material utilizado na produção, melhoria na possibilidade de customização e redução de tempo para disponibilização do produto ao mercado. Essa tecnologia foi chamada de Manufatura Aditiva (MA), consistindo de um processo no qual o material constituinte é aglutinado e depositado em camadas baseado em processos construtivos desenvolvidos previamente em plataforma de software (CHUA; AHN; MOON, 2017).

Este novo conceito de tecnologia disruptiva é totalmente inovador, quebrou antigos paradigmas produtivos e introduziu novas tecnologias e conceitos. Segundo Gao et al. (2015), ela provoca uma revolução à maneira como os produtos são desenhados, manufaturados e distribuídos para o usuário. Weller, Kleer e Piller (2015) afirmaram que a MA é a estrela da nova revolução industrial, permitindo a customização de produtos com custos mais baixos e sem a necessidade de moldes

e ferramental dedicado, além de contribuir nos processos da cadeia de suprimento (KHAJAVI; HOLMSTRÖM; PARTANEN, 2018).

Gao et al. (2015) demonstraram que a tecnologia de MA pode ser aplicada nas mais diversas áreas do conhecimento em nanoescala (biogenética), microescala (eletrônicos), macroescala (produtos personalizados, automotivo, construção) e escala gigantesca (aeroespacial e defesa).

A revisão da literatura apontou que estes novos conceitos, por ser um rompimento com o tradicional, não foram de fácil implementação. Nesse sentido, a revisão da literatura permitiu identificar diversas barreiras, entre elas, o consumo elevado de energia citado por Chan et al. (2018) e o custo de energia conforme Kianian, Tavassoli e Larsson (2015).

O material utilizado também foi identificado como uma importante barreira citada por vários autores, tanto em relação ao custo conforme Heiden et al. (2019); Pinkerton (2016), quanto em relação à dificuldade de se encontrar o material adequado para se especificar segundo Shukla, Todorov, Kapletia (2018); Kretzschmar et al. (2018).

A mão de obra pouco qualificada também foi considerada uma barreira relevante para a implementação da MA por Stavropoulos et al. (2018); Vartanian, McDonald (2016), assim como a resistência à mudança identificada por Pinkerton (2016); Ali et al. (2012); Chan et al. (2018), a segurança ocupacional foi citada por Pinkerton (2016); Vaezi et al. (2013) e por último o custo de qualificação da mão de obra considerado por Mani, Lyons, Gupta (2014).

Outra dificuldade identificada foi em relação às máquinas que apresentavam importantes limitações quanto ao tamanho da câmara de produção citado por Khajavi, Holmström, Partanen (2018); Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017) e ao custo elevado da própria máquina mostrado por Woodson, Alcantara, Do Nascimento (2019); Pinkerton (2016).

Todos esses fatores limitantes também foram associados a uma regulamentação pouco padronizada descrita por Pinkerton (2016); Weller, Kleer e Piller (2015), de elevado custo segundo Woodson, Alcantara, Do Nascimento (2019), com dificuldades para patentear citada por Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017); Shukla, Todorov, Kapletia (2018), e aspectos ambientais citados por Pinkerton (2016); Mani, Lyons e Gupta (2014) o que provoca uma demora substancial para a efetivação do processo legal de acordo com Vartanian e McDonald (2016).

Por outro lado, o processo produtivo também apresentou desafios nos mais diversos aspectos, como o custo do processo conforme H. Khajavi, Holmström, Partanen (2018); Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017), falta de definição dos parâmetros para produção das peças citado por Kretzschmar et al. (2018); Heiden et al. (2019) o que gerou um problema na qualidade final do produto relatado por Thomas-Seale et al. (2018); Durach, Kurpjuweit, Wagner (2017) por deficiências no acabamento superficial e necessidade de retrabalhos para ajustes de tolerâncias e propriedades mecânicas. Isso impactou diretamente na escala de produção apontado por H. Khajavi, Holmström, Partanen (2018); Stavropoulos et al. (2018), limitando-a a protótipos e produtos customizados e também no desenvolvimento e adequação dos softwares para as novas necessidades conforme discutido por Shukla, Todorov, Kapletia (2018); Kretzschmar et al. (2018).

Apesar das barreiras citadas, Chua, Ahn e Moon (2017) afirmam que a MA é uma das mais promissoras tecnologias de manufatura nas áreas de defesa e aeroespacial apresentando, entre outras vantagens, a possibilidade de se produzir peças geometricamente complicadas e customizadas em tempos reduzidos com o uso na fabricação livre e em reparos.

Mesmo com a identificação de todas as barreiras na extensa análise da literatura, não foram verificadas publicações que tratassem desses aspectos na indústria brasileira, razão pela qual tal fato torna-se a lacuna de pesquisa a ser estudada por este trabalho.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Como se pôde observar, a indústria tem buscado tecnologias inovadoras mais adaptadas aos novos conceitos, especialmente aquelas necessárias à indústria 4.0. Deste modo, a chamada Manufatura Aditiva, que é um dos pilares da nova revolução industrial, veio contribuir na melhoria dos processos, no aumento da produtividade, bem como na adequação às crescentes necessidades de customização dos produtos.

No entanto, verificou-se que existem diversos desafios a serem ultrapassados e identificá-los é o primeiro passo para se medir as dificuldades que serão enfrentadas na transição dos métodos tradicionais de produção para os novos

processos, uma vez que haverá impactos na cadeia produtiva, na distribuição e também no tratamento de resíduos depois de expirada a vida útil do produto.

Sendo assim, este trabalho propõe investigar, como ponto central de seu desenvolvimento, a seguinte questão até então não resolvida:

Quais as principais barreiras para a implementação da Manufatura Aditiva no Brasil?

1.2 OBJETIVOS

Para responder à questão acima os seguintes objetivos geral e específicos serão considerados:

1.2.1 Geral

Esta dissertação tem como objetivo geral investigar e definir quais as principais barreiras para a implementação da Manufatura Aditiva no Brasil.

1.2.2 Específicos

Como objetivos específicos, esta dissertação trata dos seguintes pontos conforme abaixo:

- Identificação das principais barreiras observadas na literatura pelas empresas que implementaram a MA;
- Categorização das barreiras identificadas por grau de afinidade temática;
- Seleção das barreiras mais relevantes, de acordo com o levantamento da literatura, com base no número de citações;
- Estabelecimento de um modelo teórico composto pelo conjunto de barreiras mais relevantes;
- Verificação da adequabilidade deste modelo teórico às indústrias brasileiras.

1.3 JUSTIFICATIVAS PARA ESTUDO DO TEMA

Com as necessidades das empresas evoluírem para o conceito de indústria 4.0 e se ajustarem aos novos pilares do processo produtivo, especificamente na manufatura de produtos por métodos tradicionais foi verificada a existência de espaço para o desenvolvimento de uma metodologia inovadora, especialmente nos métodos relacionados à cadeia de suprimento, produção, distribuição e destinação final após a vida útil do produto.

A obrigatória redução de custos em todos os setores da produção e as responsabilidades com o meio ambiente têm obrigado ao desenvolvimento de tecnologias que suportem essa nova realidade.

Contudo, foi identificada uma lacuna na literatura, visto que não foram levantadas as principais dificuldades enfrentadas pelas empresas brasileiras que implementaram a MA e utilizam esta tecnologia nos seus processos ou em parte da cadeia produtiva.

Desta forma, por ser uma tecnologia relativamente recente e ainda em desenvolvimento, é importante apresentar para a comunidade acadêmica e industriais quais são os desafios que enfrentarão, uma vez que, a MA já é uma realidade nos conceitos e no contexto da indústria 4.0.

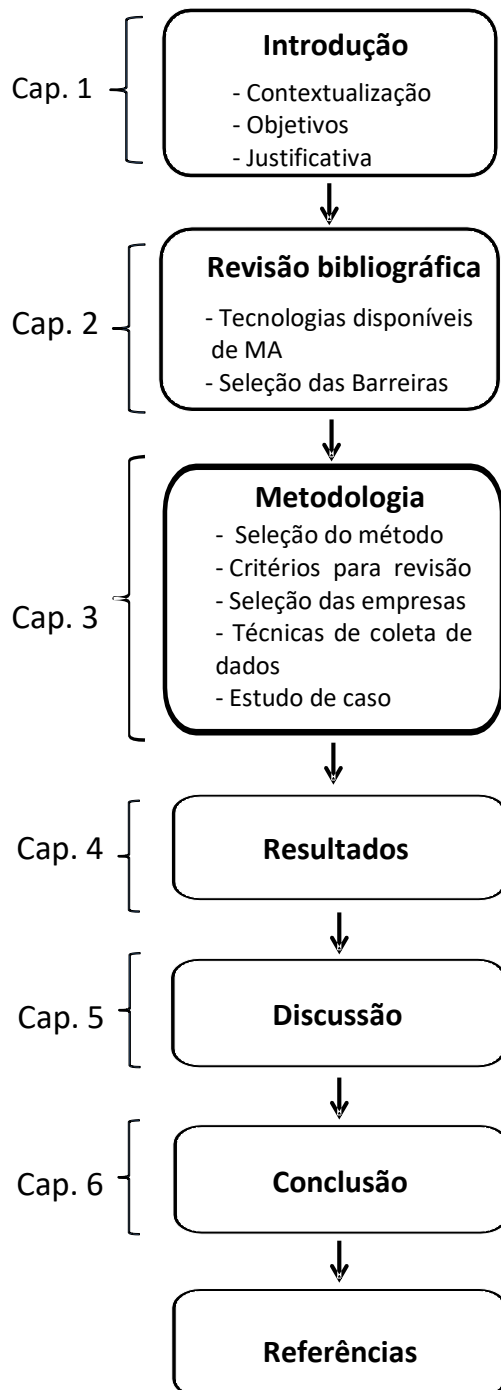
1.4 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

O presente trabalho limitou-se a verificar a adequação do modelo teórico, mais especificamente no setor automotivo brasileiro e em alguns setores específicos do segmento da saúde, uma vez que, essas áreas são as mais impactadas e interessadas nesta tecnologia devido às suas características produtivas, por isso há necessidade de se conduzir estudos para a implementação de novas tecnologias com o objetivo de se tornarem mais ágeis na produção, reduzir os custos e, em determinados casos, de se produzir produtos com elevada carga de customização, sendo estas características perfeitamente ajustadas à tecnologia da MA.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos, este trabalho apresenta seis capítulos, dos quais, o primeiro é esta introdução. No segundo capítulo, faz-se uma revisão bibliográfica, que tem por objetivo identificar o estado da arte, estabelecer os fundamentos teóricos necessários e levantar as lacunas existentes na literatura, o que justifica esta oportunidade de pesquisa. Ainda no capítulo dois, foi realizado um breve histórico das tecnologias disponíveis de MA para a contextualização visando à equalização dos conhecimentos. No terceiro capítulo, é apresentado de forma detalhada o método e o procedimento utilizado a fim de analisar as barreiras para a implementação da MA, bem como estabelecer um grau de comparação e importância para a implementação no Brasil. No capítulo quatro, são apresentados os resultados, os quais foram coletados durante os estudos de caso. Em seguida, no capítulo cinco, é realizada a discussão com o objetivo de comparar os resultados obtidos por meio da revisão da literatura com aqueles resultados levantados no estudo de casos das empresas selecionadas. E, finalmente no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões com suas respectivas contribuições para a teoria literária e a prática, assim como a indicação de suas limitações e sugestões para trabalhos futuros, contribuindo de forma significativa para o avanço da pesquisa e do conhecimento. A Figura 1 elucida, resumidamente, a estrutura desta dissertação.

Figura 1 – Estrutura da dissertação



2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

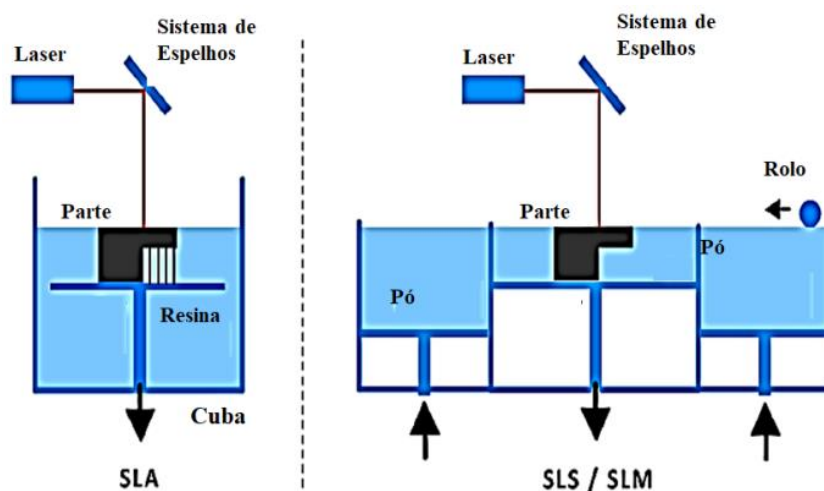
Tendo em vista que a MA é uma tecnologia desenvolvida recentemente e que possui diferentes formas de interações tanto com materiais, quanto com fontes de calor e maneiras de se construir o produto final, são apresentados neste item as diversas tecnologias de MA disponíveis atualmente.

2.1 TECNOLOGIAS DE MA DISPONÍVEIS

Gardan (2016) cita que existem diversas formas de classificação da MA considerando a maneira de endurecimento ou tecnologia da fonte de calor utilizada para fusão:

- a) Tecnologia Laser (Stereolithography - SLA): um feixe de laser incide sobre uma superfície de fotopolímero; Selective Laser Melting - SLM: uma camada de pó é espalhada por um rolo na mesa e o feixe de laser funde o pó conforme projeto CAD e a mesa é abaixada para a próxima camada; *Selective Laser Sintering* - SLS: similar ao processo anterior, porém no processo de sinterização o pó não é derretido completamente, mas aquecido até o ponto em que o pó possa se fundir em um nível molecular.

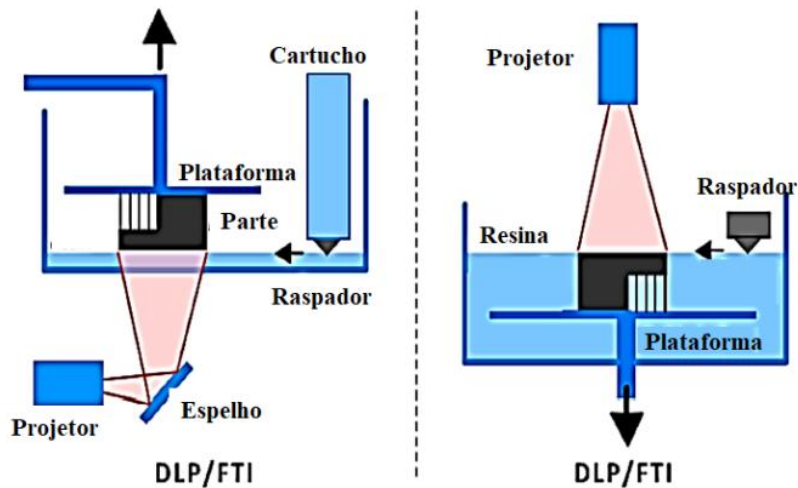
Figura 2 - Tecnologia SLA e SLS/SLM.



Fonte: Adaptado de Gardan (2016)

- b) Tecnologia Piscante: fonte de luz piscante (*Digital Light Processing* - DLP, *Film Transfer Imaging* - FTI): Uma fina camada de filme é curada por um flash de luz ultravioleta (UV) projetada e formando fatia por fatia o produto.

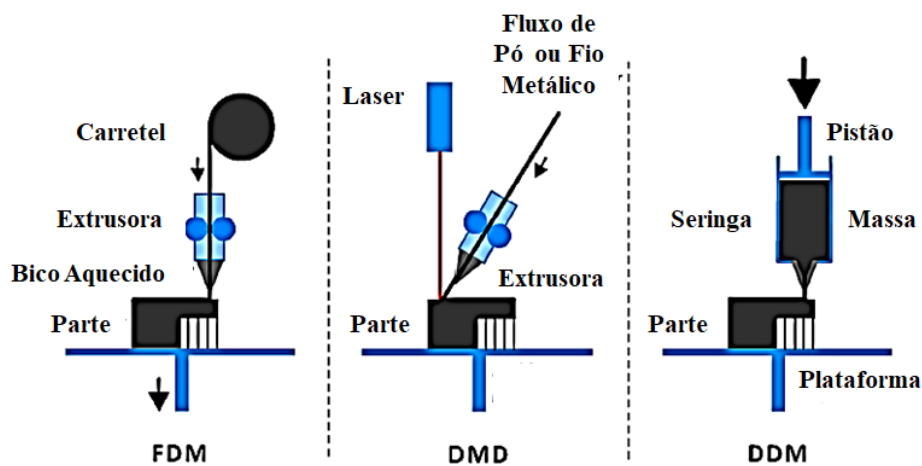
Figura 3 - Tecnologia DLP/FTI.



Fonte: Adaptado de Gardan (2016)

c) Tecnologia de extrusão: um filamento é extrudado através de uma cabeça de injeção formando o objeto por deposição de camadas e em seguida movendo-se verticalmente para repetir o processo. Podem ser *Fused Deposition Modeling - FDM*, *Directed Energy Deposition - DED* que abrange diversas denominações como *Laser Engineered Net Shaping - LENS*, *directed light fabrication - Ion Fusion Formation - IFF*, *Direct Metal Deposition - DMD*, *3D laser cladding* e ainda *Dough Deposition Modeling - DDM*.

Figura 4 - Tecnologia FDM/DMD/DDM.

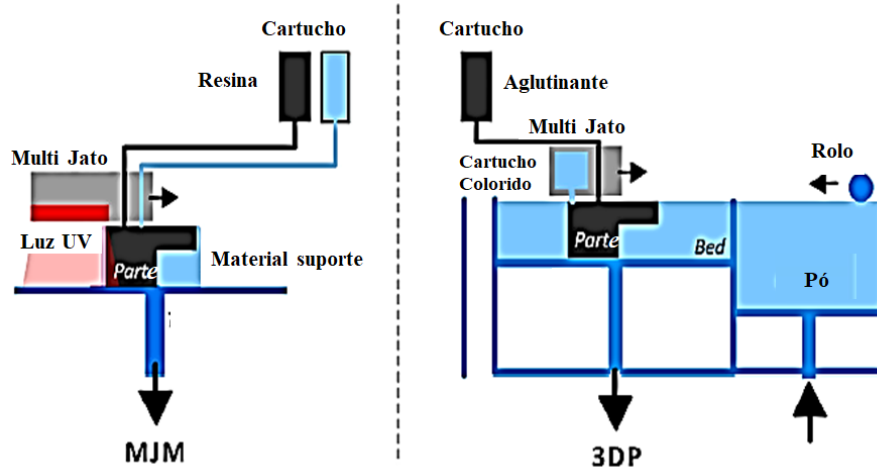


Fonte: Adaptado de Gardan (2016)

d) Tecnologia de Injeção: gotículas de materiais (foto polímeros) são depositadas por múltiplos jatos em uma plataforma formando camadas

ultrafinas que são curadas por luz UV até finalizar a peça (*Multi Jet Modeling - MJM*) ou por um processo de aglutinação por meio de um material aderente (cola) e adição de pó formando as camadas (*three-dimensional printing - 3DP* também chamada de *Colour Jet Printing - CJP*, *Liquid Metal Jetting - LMJ*).

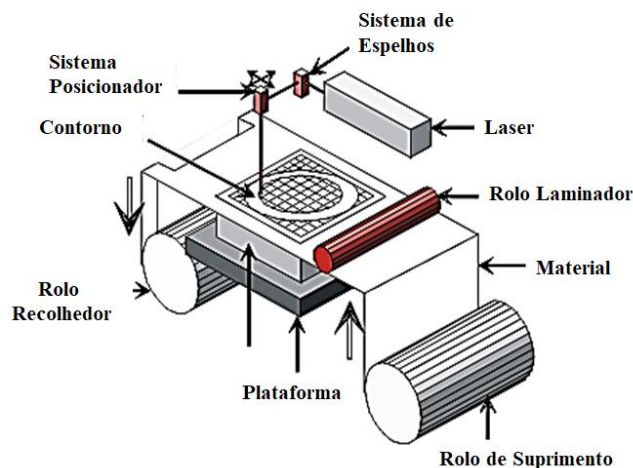
Figura 5 - Tecnologia MJM e 3DP.



Fonte: Adaptado de Gardan (2016)

e) Tecnologia de laminação e tecnologias de corte: o objeto é formado de maneira sequencial pela montagem de camadas de papel aderidas e padronizadas por corte a laser. (*Laminated Objet Manufacturing - LOM*, *Stratoconception*).

Figura 6 - Tecnologia LOM.

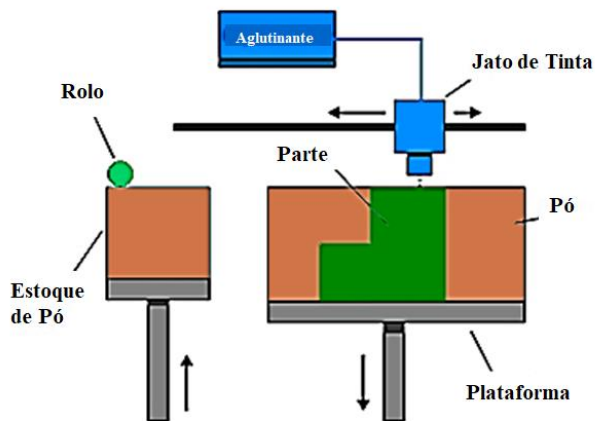


Fonte: Adaptado de <https://kylestetzerp.wordpress.com/2009/05/20/laminated-object>

Já a ASTM (2012) classifica os processos de MA em sete categorias, diferenciadas pelos tipos de máquinas empregadas, o que facilitou a discussão em vez de se explicar por variações de metodologia de processo.

a) *Binder jetting* (aglutinante): um processo de MA no qual um agente de ligação líquida é depositado seletivamente para juntarem-se materiais em pó.

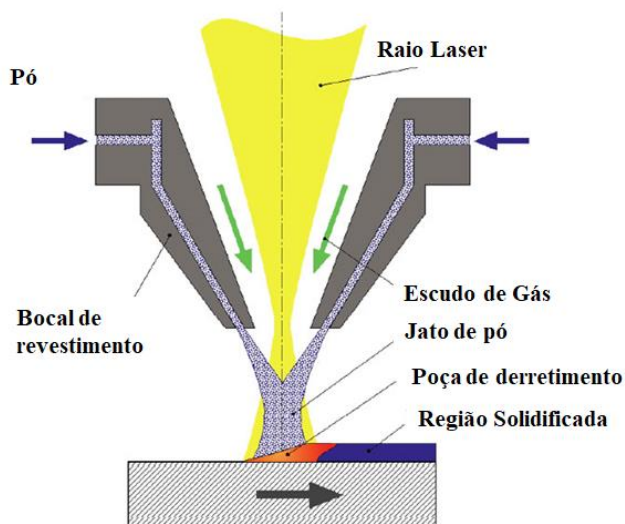
Figura 7 - Processo *binder jetting* (aglutinante).



Fonte: Adaptado de <https://www.engineersgarage.com/articles/3d-printing>

b) *Directed energy deposition* (deposição de energia direcionada): processo de MA em que o foco de energia térmica é usado para fundir materiais derretendo enquanto estão sendo depositados. O foco térmico significa uma fonte de energia, por exemplo, laser, feixe de elétrons ou arco de plasma.

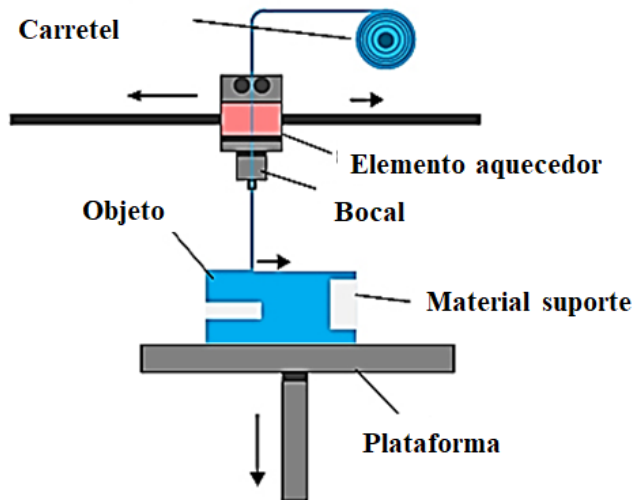
Figura 8 - Processo *directed energy deposition* (deposição de energia direcionada).



Fonte: Adaptado de <https://www.3diligent.com/3d-printing-service/directed-energy-deposit>

c) *Material extrusion* (extrusão de material): um processo de MA em que o material é depositado seletivamente através de um bico ou orifício.

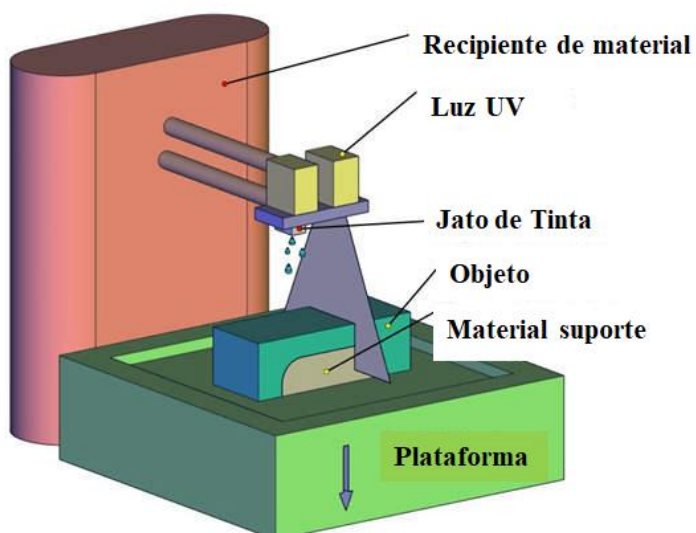
Figura 9 - Processo *material extrusion* (extrusão de material).



Fonte: Adaptado de <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditive>

d) *Material jetting* (jateamento de material): um processo de MA em que gotículas de material são seletivamente depositadas. Exemplos de materiais incluem foto polímero e cera.

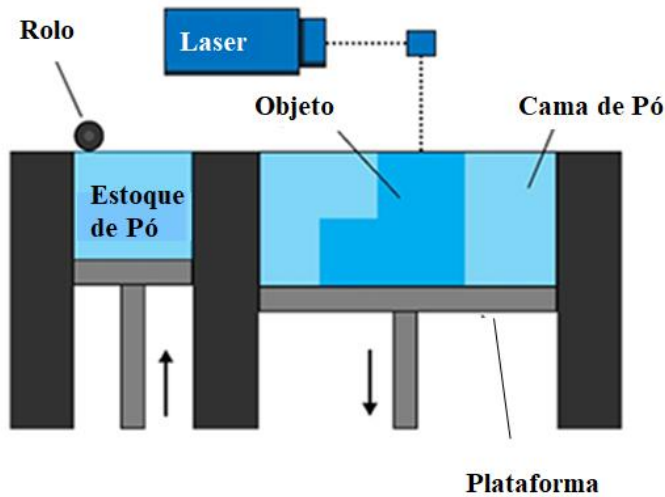
Figura 10 - Processo *material jetting* (jateamento de material).



Fonte: Adaptado de <https://www.tanerxun.com/principle-of-3d-printing-mj/.html>

e) *Powder bed fusion* (cama de fusão de pó): um processo MA em que a energia térmica combina seletivamente regiões de uma camada de pó depositada.

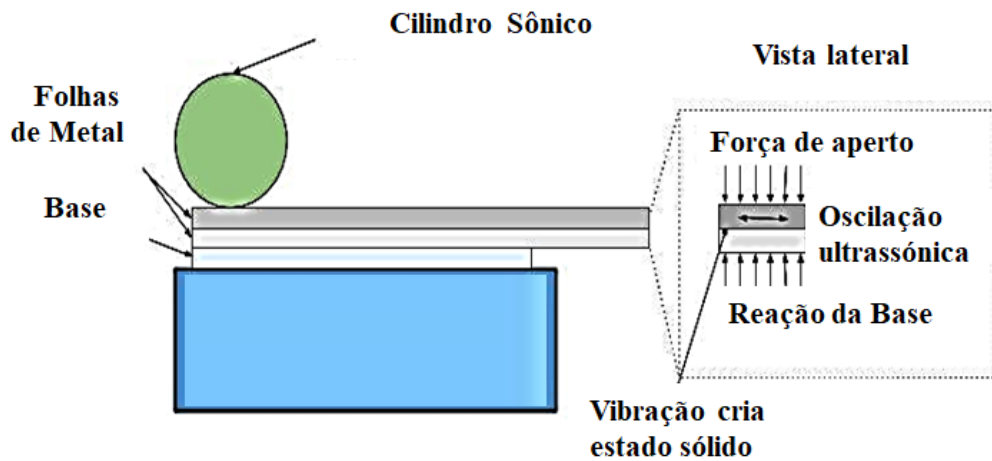
Figura 11 - Processo *powder bed fusion* (cama de fusão de pó).



Fonte: Adaptado de <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditive>

f) *Sheet lamination* (laminação de chapas): um processo MA em que folhas de material são ligadas para formar um objeto.

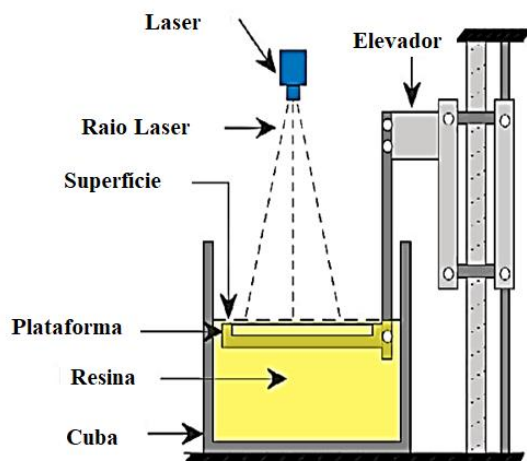
Figura 12 - Processo *sheet lamination* (laminação de chapas).



Fonte: Adaptado de <https://mechguru.com/how-products-are-made/7-important-3d->

g) *Vat photopolymerization* (fotopolimerização em tanque): um processo MA em que o foto polímero líquido em um tanque é seletivamente polimerizado por ativação de luz.

Figura 13 - Processo *Vat photopolymerization* (fotopolimerização em tanque).



Fonte: Adaptado de https://www.engineersgarage.com/article_page/3d-printing-processes

Segundo Herzog et al. (2016) das tecnologias disponíveis, apenas algumas podem produzir peças metálicas que respeitam os requisitos das aplicações industriais. Desta forma, a relação entre processo, microestrutura e propriedades devem ser estudas para as três tecnologias de MA empregando o feixe de laser como fonte de calor para fusão, sendo estas o *Laser Beam Melting* (LBM).

Electron Beam Melting (EBM) e *Laser Metal Deposition* (LMD). Essas tecnologias utilizam, na maior parte das vezes, pó como fonte alimentadora de material e, mais raramente, um arame para ser completamente derretido pela fonte de calor do laser ou raio de elétrons, sendo depositada camada por camada até a conformação final. Embora haja variações de nomes para essas tecnologias, muitas são referências comerciais dos fabricantes das máquinas de manufatura e todas têm como base a produção a partir de um desenho em CAD, gerado por um método de imagem ou por engenharia reversa em que as peças são divididas em partes, e depois, construídas pela adição das finas camadas depositadas.

O processo de LBM é conhecido igualmente como a Fusão Seletiva a Laser (SLM), Sinterização Direta do Metal a Laser (DMLS), *Laser CUSING*, Fusão do Metal a Laser (LMF) ou Impressão 3D Industrial. Outros sinônimos para a descrição

do processo LMD são: Deposição Direta de Metal (DMD), Projeto de Modelagem por Rede a Laser (LENS) e Revestimento a Laser ou Deposição de Solda a Laser. De uma forma ou outra, é a fonte calorífica do laser que permite Deposição Direta a Laser (DLD), direta ou indiretamente, e pode afetar a qualidade, a integridade estrutural do material adicionado, a solidificação térmica e a evolução microestrutural (HERZOG 2016).

Thompson et al. (2015) afirmaram que devido as suas peculiaridades, a DLD, uma forma de DED, está sendo muito estudada pelo elevado potencial nas áreas de prototipagem rápida de peças metálicas, produção de peças complexas e exclusivas, revestimento, reparo de peças e componentes metálicos de elevado custo e fabricação ou reparo de partes em locais remotos ou de logística dificultosa.

Shamsaei et al. (2015) relataram que o processo DLD é o mais indicado para fabricar partes metálicas funcionais de metal puro e ideal para a execução de revestimento ou reparo. Afirmaram também que o comportamento mecânico, a confiabilidade e durabilidade ainda são pouco estudados e conhecidos afetando a adoção desse processo para utilização industrial em larga escala. Isso acontece devido ao grande número de variedade de desenhos e parâmetros de processos existentes, como por exemplo, o poder do laser, a velocidade de avanço, a taxa de alimentação do pó, a espessura da camada, o passo de sobreposição de linhas, a padronização de testes, entre outros.

Por outro lado, Klocke et al. (2017) afirmaram que a MA comparada ao método tradicional de fabricação tem ganhos significativos reduzindo o material utilizado, o tempo para a colocação do produto no mercado, o que melhora a funcionalidade e permite a personalização da peça e a fabricação desta à distância por mecanismos de rede. Também confirmaram a limitação deste processo para escala comercial em virtude do grande número de possibilidades e complicadores do processo.

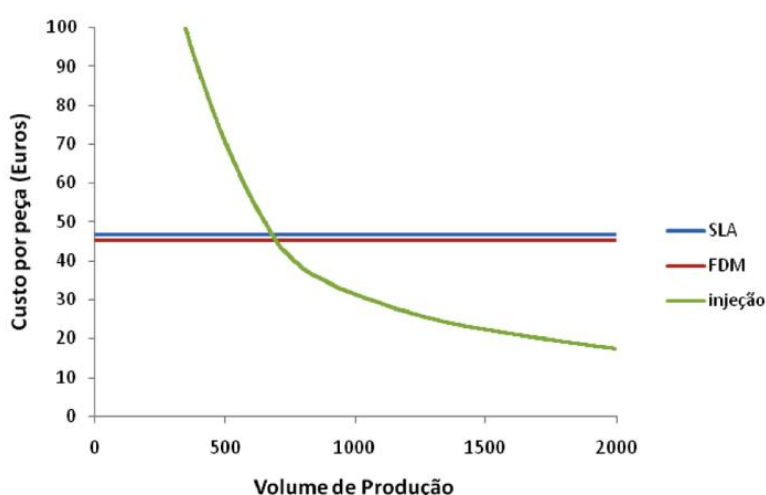
Contudo, os métodos convencionais utilizados para produção, como a fundição, refusão por arco a vácuo (VAR) e metalurgia do pó (MP), apesar de usados para produzir aços para trabalho a quente, apresentam alguns problemas críticos, pois podem gerar uma microestrutura grosseira e indesejável quando se buscam as melhores propriedades do material. Desta forma, Klocke et al. (2017) buscaram demonstrar que as aplicações com LAM são uma alternativa para se

fabricar ou reparar ferramenta em aço para trabalho em altas temperaturas com aplicações na produção ou reparo de peças.

Os elevados custos dos equipamentos e de materiais utilizados são, conforme Hopkinson e Dickens (2003), os grandes entraves para o crescimento e aplicação ampla destas tecnologias. No futuro, com o ganho de escala nos equipamentos, fornecedores e concorrência, certamente, ocorrerá redução nos custos. Além disso, comparando os métodos tradicionais de injeção de plástico com a tecnologia SLA ou FDM, seria viável a MA para uma produção de até 700 unidades. Também identificaram que a MA não apresenta variação de preços mesmo sendo produzidas pequenas ou grandes quantidades. A Figura 14 representa esquematicamente esta afirmação.

Já Giordano, De Senzi Zancul e Rodrigues (2016) concluíram que existe uma pequena diferença de custos entre uma encomenda de uma única peça e um lote de cinco peças produzidas por MA, atribuindo a isso ao tempo de ajuste da máquina, ao ajuste do modelo digital e também ao tempo de utilização da máquina. No entanto, os custos de produção para grande escala usando a metodologia tradicional são incomparavelmente mais baratos.

Figura 14 - Gráfico Custo por volume de produção.



Fonte: Adaptado de Hopkinson e Dickens (2003)

Em relação às aplicações da MA, na literatura analisada, Soodi, H. Masood e Brandt (2014) consideraram-na ideal para a produção de peças para veículos espaciais, componentes de motores aeroespaciais e vasos de pressão. Ghosal,

Majumder, e Chattopadhyay (2018) afirmaram que a MA pode ser aplicada em áreas automotivas, aeroespaciais, biomédicas entre outras, já Caiazzo (2018), citou usos nas indústrias aeroespacial e automobilística auxiliando principalmente na redução de custos tanto na fabricação, quanto no reparo de partes. Abdulrahman, Akinlabi e Mahamood (2018) destacaram a aplicação no desenvolvimento de estruturas leves empregadas nas áreas aeroespacial, médica, odontológica, cirúrgica, automotiva, de petróleo e gás.

Finalmente, Zancul (2018) citou as quatro principais aplicações de MA como realidade já em curso. Com a possibilidade do barateamento dos equipamentos no mercado, o consumidor poderá produzir objetos pessoais de sua necessidade em sua própria casa, ou ainda solicitar projetos customizados encomendados via internet com apoio técnico do fornecedor. Outra facilidade é a de se produzir protótipos de peças ainda em desenvolvimento ou fabricadas em pequenas escalas ainda não disponibilizadas com finalidade industrial e por último, a integração da MA em processos tradicionais e em fases intermediárias como na preparação de moldes de fundição.

2.2 IDENTIFICAÇÃO DAS BARREIRAS PARA A ADOÇÃO DA MA

Shukla, Todorov e Kapletia (2018) fizeram estudos buscando identificar barreiras para a aplicação de impressoras 3D, identificaram 11 delas e determinaram a inter-relação de influência entre cada uma delas separadas em cinco níveis.

As barreiras identificadas no nível um foram as pequenas dimensões dos objetos que podem ser impressos, fazendo com que apenas pequenas peças de reposição possam ser fabricadas e influenciadas por barreiras de níveis abaixo. No nível dois, a baixa velocidade limita o emprego em produção customizada e em massa devido a pequena disponibilidade de matéria prima. No nível três, o custo das impressoras e da matéria prima obrigam os fabricantes a utilizar diversos tipos de impressora na produção para obter uma melhor variedade de produtos o que encarece o investimento. No nível quatro, custos adicionais são citados por advir de um nível de precisão inferior aos obtidos nos processos subtrativos convencionais, o que leva a uma redução na precisão superficial e à necessidade de um pós-processamento para finalização. Ainda neste nível identificou que a rigidez estrutural

de objetos impressos tem sido bastante criticada pelos pesquisadores. No nível cinco, identificou-se como barreira a existência de pequenas quantidades de escolas resultando numa baixa formação de mão de obra especializada, inclusive para os processos de manutenção das impressoras utilizadas. No nível seis, foi verificada que a complexidade do uso do CAD tem impactado na existência de mão de obra especializada para este fim e também influenciado nos riscos com relação à violação dos direitos de propriedades autorais.

Em relação ao consumo da energia, citado por Pinkerton (2016), a demora na produção do produto fez com que o consumo de energia na MA fosse maior do que para a mesma peça produzida por processos convencionais. Afirmou ainda que a utilização do processo de SLS e impressão 3D, em baixos volumes, é menos eficiente que a injeção por moldes.

Sobre o custo de material, afirmou que se torna mais elevado devido ao preço mais alto da matéria prima comparado aos custos dos processos convencionais, podendo ser até dez vezes mais altos para se produzir uma peça, considerando a utilização de liga de alumínio, por exemplo.

Material representa o primeiro fator de peso na formação do preço final do produto. Pinkerton (2016) relatou que o custo unitário de um produto manufaturado por MA tem em sua composição de um a três quartos do seu valor devido ao custo do maquinário, o que representa o segundo maior custo na composição do preço, atrás apenas do custo do material.

A resistência à mudança também é uma barreira, pois a sua inclusão na maneira de interação entre as empresas atuantes em mercados competitivos, faz com que a MA seja vista como uma ameaça, uma vez que haverá a necessidade de uma reorganização da empresa e modificações dos processos tradicionais para os novos e as consequentes reformulações na cultura organizacional.

Pinkerton (2016) relatou, ainda, que a falta de normas regulatórias do setor, o longo tempo para certificação, a ausência de padronização da tecnologia e a falta de garantia de qualidade têm permitido desvios e fabricação ilegal de produtos perigosos como, por exemplo, armas que são vendidas ilegalmente. Não existe também nenhum tipo de garantia para eventuais falhas do produto, além de não haver nenhuma garantia dos direitos relativos às patentes pela nova tecnologia desenvolvida.

Em relação a parâmetros do processo, afirmou que a utilização combinada de diferentes tecnologias de MA, de novos métodos para reduzir a espessura das camadas e a combinação de diferentes tipos de materiais têm sido propostos para melhorar o acabamento superficial, minimizando a necessidade de pós-processamentos complementares, produzindo formas mais próximas das finais. Esse conjunto favorece a capacidade de repetitividade com a redução dos custos de preparação e pós-processamento, uma vez que representam o terceiro componente na composição final dos custos.

Vartanian e McDonald (2016) afirmaram que diversos fatores impactaram na adoção da MA e citaram, entre outros, o custo do sistema atribuindo-lhe maior peso, problemas com mão de obra, controle dos processos produtivos e dificuldade e demora nos processos governamentais de certificação.

Afirmaram também que alguma redução nos custos foi obtida através da adoção de tecnologias híbridas, empregando máquinas de MA combinadas com processos subtrativos convencionais controlados por CNC. Levantaram que as máquinas de MA têm um custo muito mais elevado devido à quantidade de vendas, uma vez que são comercializadas em quantidades menores que as de manufatura subtrativa de material, além disso, existe uma limitação considerada em relação aos tipos e tamanhos dos equipamentos oferecidos. Destacaram que sistemas de controle fechado de parâmetros do processo provocam um melhor controle de temperatura e, conseqüentemente, uma uniformidade da microestrutura resultando melhores propriedades mecânicas do produto final.

Khajavi, Holmström e Partanen (2018) levantaram que com a utilização das técnicas de MA a barreira do custo do material seria reduzida, uma vez que será utilizada menor quantidade de matéria prima pela própria técnica de adição e não de retirada do material de um bloco. Também admitem serem barreiras a quantidade e a variedade de materiais disponíveis para a especificação e utilização em conjunto com a tecnologia da MA.

Afirmaram que com a expiração das patentes de algumas tecnologias de MA, as barreiras do custo da máquina e produção limitada poderão ser superadas e, inclusive, viabilizar a descentralização da produção e melhorar as cadeias de distribuição.

Relataram também que, além do custo do processo, existem dificuldades com o software, com a máquina, com a taxa de transferência de material e com as

limitações nas dimensões da câmara de produção o que impacta na velocidade da produção e no acabamento do produto, afetando os níveis de segurança dos estoques e o tempo de inatividade das máquinas. Novos equipamentos foram criados com tecnologia de MA após o vencimento das patentes, isso melhorou as taxas de transferências de materiais e consequente redução dos custos.

Também houve a possibilidade de descentralizar os centros de produção, otimizando a distribuição de peças de reposição, especialmente no setor da aviação onde os custos são extremamente elevados.

Os estudos de Weller, Kleer e Piller (2015), quando discutiram as implicações econômicas da impressão 3D, levantaram que o custo de produção pode ser majorado principalmente pelo custo elevado da matéria prima e da quantidade de energia utilizada no processo produtivo, entretanto, a chegada de novos fornecedores ao mercado pode minimizar esta barreira.

Em relação à mão de obra qualificada afirmaram haver a necessidade de grandes esforços para treinamento da mão de obra laboral uma vez que será exigida larga experiência para a adoção da MA devido à especificidade e customização dos projetos.

Quanto aos direitos de propriedade, levantaram que a facilidade de se produzir por engenharia reversa a tecnologia que originou o produto, coloca em risco os direitos à propriedade, pois é muito simples partir do produto final para se obter a tecnologia original, apresentando grande impacto econômico na adoção da MA.

Segundo Weller, Kleer e Piller (2015) os problemas com padrão de qualidade, a perda de resistência por influências do meio ambiente, a falta de padronização de ferramentas de desenho e de diretrizes padronizadas limitam a reprodutibilidade das partes e são fatores que determinam a necessidade de pós-processamento tornando o preço final mais elevado, quando comparado aos meios tradicionais de produção.

Afirmaram que a baixa velocidade de produção, especialmente quando levada em consideração a possibilidade do produto customizado, comparada ao modelo tradicional é uma barreira que prejudica a produção em escala maior, eleva o custo e inviabiliza a economia de escala.

Conforme afirmado por Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017), os altos custos para implementação da MA são consequências do elevado preço do material, custo de aquisição do maquinário, manutenção e implementação, sendo importantes barreira para o desenvolvimento da MA.

Levantaram que, como as novas tecnologias e automação implicam uma aparente redução da mão de obra utilizada, faltam trabalhadores capacitados. A necessidade de novos aprendizados e treinamentos modificando os conhecimentos que foram adquiridos durante anos, compõem uma natural resistência a aceitação da MA.

Uma mudança de atitude e adequação aos novos processos por parte dos desenhistas também serão necessários para o sucesso deste novo conceito, apesar de ser uma das barreiras detectadas no processo, complementaram que existem algumas dificuldades relacionadas à variedade de materiais que dificultam a escolha e a especificação por parte dos desenhistas.

Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017) discutiram que a falta de alinhamento das informações compromete a implementação da MA, pois influencia diretamente na produção, na confiabilidade do processo e na capacidade de utilização sem regras claras e objetivas reduzindo os investimentos em MA.

Destacaram que a pirataria e o compartilhamento ilegal de cópias são facilitados pela própria tecnologia digital por serem facilmente transferidos e revendidos. A reprodução de produtos originais é facilitada pela tecnologia e além de se perder dinheiro nos ganhos diretos, existe a perda indireta por meio do comprometimento da reputação. Uma padronização unificada pelos governos dos requisitos sobre propriedade intelectual e uma análise combinada dos riscos por infrações poderiam aprimorar o desenvolvimento do mercado. A ausência de suporte governamental e limitações tecnológicas foram classificadas como as mais críticas barreiras verificadas, seguidas pela proteção da propriedade intelectual. Nestes aspectos, a atuação governamental é fundamental na proteção da propriedade intelectual, redução das taxas para maquinários e materiais, promoção da educação e treinamento da força de trabalho.

Em relação ao processo produtivo levantaram que devido às forças internas resultantes, relacionados aos fatores envolvidos para a obtenção da peça, é comum a necessidade de atividades de pós-processamento incluindo acabamentos superficiais e até mesmo tratamentos térmicos para alívios de tensões. Além disso, a taxa de deposição e velocidade de produção apresentam piores resultados quando comparados àqueles obtidos com a manufatura convencional.

Stavropoulos et al. (2018) levantaram que custo do maquinário e materiais são entidades isoladas na fábrica e sem integração na linha de produção, não produz um algo totalmente acabado e eleva o tempo total de produção.

Citaram em seu trabalho que a necessidade de mão de obra especializada e seu custo associado também são importantes barreiras para a adoção da MA nas indústrias, especialmente a de materiais metálicos. A velocidade e volume de produção devido à necessidade de pós-processamento, consequência da baixa qualidade e do aparecimento de defeitos imprevisíveis nos produtos finais, ainda são uma barreira para a aplicação industrial da MA.

A garantia da qualidade na MA, de acordo com o declarado por Al-Meslehi, Anwer e Mathieu (2018), é a principal barreira para uma integração ampliada dos processos. Identificando os parâmetros que influem no processo e os controlando, pode-se evitar o retrabalho, reparo, problemas ligados à qualidade além de monitoramentos caros. Estes chamados parâmetros-chave foram identificados como: sistema de escaneamento do laser, sistema de deposição de pó, estratégia de deposição, formação das camadas e poça de derretimento ligado à interação entre pó e laser.

Com o controle destes parâmetros, são atingidos os objetivos como redução do tempo de manufatura, redução no uso de material, redução nos custos da manufatura que é composto pelo do material, da energia e os indiretos (custo da mão de obra e máquina). As consequências são o aumento da funcionalidade do produto por meio do aumento do tempo de utilização do produto e melhoria do valor estético através da personalização da forma. Por meio do acompanhamento destes parâmetros-chave se poderão resolver a maior parte dos problemas ligados à qualidade.

Conforme relataram Thompson et al. (2015), o entendimento das propriedades mecânicas dos produtos obtidos é uma barreira e ainda pouco conhecido. A qualidade e integridade estrutural resultante têm relação direta com a quantidade de calor transferida nos processos utilizando o laser como fonte de calor, principalmente pela influência deste parâmetro na aglutinação das camadas que formarão a estrutura. Isso tem impacto direto na poça de derretimento que formará a microestrutura resultante que, dependendo das condições, pode haver o aparecimento de tensões internas adicionais ao final do processo.

Desta forma diversos esforços estão direcionados para estudos ligados a esta importante barreira conhecida como parâmetros dos processos que podem ser a potência do laser, velocidade de avanço, fluxo de material adicionado, entre outros, visando prever o resultado final pelo conhecimento e controle dos parâmetros do processo. O resultado será uma combinação bem sucedida de alimentação de matéria prima com transferência ideal de energia, permitindo uma perfeita aglutinação de material para o produto final.

Huang et al. (2016) citaram que devido à baixa taxa de transferência de material, uma das características da MA ligada diretamente aos parâmetros do processo, faz com que essa se torne inadequada para produções em grande escala.

Também levantaram problemas relacionados à repetitividade do processo, ao aparecimento de rugosidades que determinavam uma baixa qualidade superficial, exigindo trabalhos finais de acabamento e também ao surgimento de problemas de resistência à fadiga.

As limitações das máquinas relacionadas ao tamanho da câmara de produção, local onde as peças são fabricadas, e a necessidade de um pós-processamento para acabamento são os grandes desafios da MA citados por Kretschmar et al. (2018). O custo da peça pode ser reduzido quando se consegue produzir uma maior quantidade de peças numa única impressão e, neste aspecto, a influência do tamanho da câmara de produção é vantajosa, pois permite a produção de uma maior quantidade de partes simultaneamente.

Já a necessidade de retrabalho está vinculada aos problemas ligados à falta de padronizações dos parâmetros do processo que provocam interações adversas, limitando a repetitividade, comprometendo uma melhor qualidade final do produto, além de elevar o tempo de produção. Devido a flutuações mecânicas, surgem como subprodutos do processo, tensões internas, rugosidades e o conseqüente não cumprimento de tolerâncias.

Citaram também problemas relacionados à pequena disponibilidade de materiais para serem especificados, principalmente porque estes, por vezes, são obtidos da combinação de vários outros para produção da peça sem que sejam disponibilizados pelos provedores para a utilização na impressão 3D.

Foram citados custos elevados devido à utilização da MA quando comparados aos métodos tradicionais de obtenção de peças, especialmente quando há a necessidade de se produzir um grande lote, uma vez que a MA é mais

adequada para pequenos lotes de produtos com características de alta complexidade.

O elevado investimento para a implementação da MA no processo produtivo foi considerado muito alto por Kretzschmar et al. (2018), especialmente quando se faz a comparação entre empresas médias e grandes. Também citaram a falta de mão de obra especializada como uma importante barreira, contudo este impacto é maior nas pequenas e médias empresas, uma vez que, as grandes empresas têm melhores condições para contratar esta mão de obra melhor qualificada.

No estudo realizado, foram anotados desafios relacionados à tecnologia de informação (TI) necessária para aplicar os conceitos de MA, especialmente devido aos sistemas exigidos para o trânsito de uma imensa quantidade de dados. No entanto, este aspecto se torna menos significativo nas grandes corporações, pois estas possuem melhores recursos de TI disponíveis.

Heiden et al. (2019) afirmaram que as mais importantes barreiras para o desenvolvimento e a adoção da MA são os defeitos apresentados após a confecção dos produtos, comprometendo a qualidade devido ao aparecimento de porosidades, fraturas, rugosidades e regiões malformadas ao final do processo. A otimização dos parâmetros do processo é o maior desafio para a solução destes problemas. Parâmetros como a potência do laser, razão de deposição, espaçamento e disposição entre linhas de deposição, largura das camadas, condições ambientais (atmosfera) e temperatura do pó são os fatores apontados como influenciadores nos resultados finais. Além destes citam o elevado custo do material e a falta de estabilidade no processo de alimentação do pó, necessários para a MA, o que pode provocar variações no processo e comprometer o resultado final.

Segundo Woodson, Alcantara e Do Nascimento (2019), uma das mais desafiadoras barreiras para a MA é o custo da tecnologia, especialmente porque esta é influenciada por imposição de pesadas taxas aos equipamentos importados, elevando o custo e dificultando a difusão desta tecnologia de forma mais inclusiva.

Aliado a isso, além do alto custo do equipamento, por vezes, se torna difícil encontrar peças sobressalentes para a construção e reparo dos equipamentos de MA, o que é um importante limitante para que seja implementada esta nova tecnologia e são também fatores de dificuldade para que a MA se torne uma tecnologia mais inclusiva.

Schmidt et al. (2017) levantaram que alguns processos de MA apresentam baixa qualidade superficial exigindo trabalhos de pós-processamento para que se atinjam as características de acuracidade geométricas especificadas. Esses retrabalhos também podem ser constituídos de tratamento térmico, visando melhorar a densidade, aliviar as tensões internas e melhorar a aparência final.

Além disso, na MA, são identificados problemas de qualidade ligados à tolerância dimensional, a propriedades superficiais, aos aparecimentos de defeitos internos e às conseqüentes relações com as propriedades mecânicas. Relataram que, para uma larga utilização da MA, seria necessária uma padronização internacional das regras do gerenciamento do sistema de qualidade, para que de forma mandatória, a MA pudesse ser utilizada em aplicações industriais de alta qualidade.

Esses mesmos autores citaram que os processos de produção com a utilização de MA são mais lentos quando comparados aos métodos tradicionais de produção e relataram a existência de barreiras econômicas que viabilizariam a utilização somente em pequenos lotes ou em produtos com elevada complexidade. Neste caso haveria a perda de competitividade com as técnicas mais antigas na medida em que se aumenta a quantidade da produção.

Afirmaram que, de aproximadamente 100 processos de MA, somente uma pequena parte pôde ser utilizada para aplicações industriais devido à influência dos parâmetros de processo e a correlação desses com os defeitos, exigindo um aprofundamento nos estudos para a melhoria dos processos de monitoramento e para o desenvolvimento da MA. Além disso, o desafio do desenvolvimento de novas ligas e especificações materiais para aplicações industriais são necessários para garantir menor peso e melhores propriedades mecânicas.

Limitações nas dimensões da câmara de produção da máquina reduzem a possibilidade de construção de grandes desenhos, além de influenciar na orientação e na distribuição das camadas. A qualidade final das partes resultantes depende dos parâmetros de processo como temperatura, alimentação do pó, largura da camada depositada, velocidade de alimentação, potência e foco do laser, velocidade de deposição, largura dos cordões de deposição, número e disposição dos cordões, tempo de deposição entre camadas, largura das paredes, razão de aquecimento e resfriamento. Além desses, a especificação física e química do material/pó como temperatura, umidade, forma e distribuição da partícula, entre outros também

influem na qualidade do produto final. Todos esses fatores são apontados como limitantes e pré-requisitos para a repetitividade e confiabilidade dos processos.

Amini e Chang (2018) afirmaram que as principais barreiras para a aplicação da MA na indústria de metal é a garantia da qualidade e o monitoramento do processo na obtenção do produto. Isso se torna mais relevante nas indústrias aeroespacial e de produtos para a medicina devido à alta confiabilidade e qualidade requeridas. Alguns processos de MA, especialmente aqueles que utilizam metal, necessitam do controle de mais de 50 parâmetros que podem estar relacionados diretamente com a qualidade do produto obtido implicando na confiabilidade do processo e na garantia de reprodutibilidade, permitindo que a MA seja aplicada em escala econômica.

Citaram que as principais variáveis do processo que devem ser monitoradas em relação à matéria prima são: o tamanho e qualidade do pó; em relação à máquina são a precisão, funcionalidade e rigidez; em relação ao ambiente da câmara de impressão são a atmosfera e o diâmetro da cabeça de impressão; e, em relação ao laser são a potência, velocidade de escaneamento, espaço entre deposições e espessura das camadas. Todos esses parâmetros afetam a qualidade do produto obtido.

Argumentado por Vaezi et al. (2013), melhorias ainda são necessárias nas tecnologias de MA visando incrementar a qualidade e desempenho dos produtos obtidos em comparação aos métodos de manufatura tradicionais. Citaram algumas barreiras como baixa precisão dimensional, baixa resistência mecânica, degradação por delaminação em razão do reduzido poder de adesão, aparecimento de porosidades, baixa qualidade superficial e baixa razão de deposição. Alguns desses fatores exigem retrabalhos por meio de outros maquinários para a finalização do produto.

Em algumas tecnologias é necessário controlar o ambiente na câmara de deposição por meio de um escudo de gás inerte, para evitar a contaminação. Especialmente em processos de MA com multimateriais são necessárias maiores áreas de instalações para operar o processo e maiores tempos para troca de materiais, elevando a complexidade das máquinas e o conseqüente custo tanto de produção quanto da manutenção. Nos processos de MA com multimateriais, visando evitar a contaminação durante as trocas de tipos de materiais, conseqüência do

processo de bombeamento e limpeza, ocorre um aumento nos tempos de setup da máquina com uma significativa elevação do desperdício de material.

Vaezi et al. (2013) afirmaram que alguns processos de MA dependem das características do pó como forma, tamanho, distribuição das partículas, razão de fluxo de pó e dos parâmetros do processo como fonte e força da energia, tamanho da cabeça de impressão, velocidade de escaneamento, distância entre linhas de deposição e largura da camada.

Chua, Ahn e Moon (2017) apontaram que o grande desafio para a adoção da MA, especialmente com a utilização de metais na indústria aeroespacial, é a garantia da qualidade, o controle por meio da implementação de um processo de monitoramento e um sistema de inspeção das partes produzidas. As ausências desses fatores afetam diretamente a qualidade e a repetitividade e somente serão corrigidas após a implementação de um rígido sistema de controle de qualidade para a detecção de falhas, de garantia de qualidade e de padronização sistemática do fornecimento de produtos e serviços. Isso evitaria a necessidade de pós-processamento com acabamentos superficiais e tratamentos térmicos antes do teste final de qualidade.

No entanto, defeitos internos como porosidades e vazios continuam a ser um desafio. Esses problemas poderão ser resolvidos quando for entendida a relação entre os parâmetros do processo, divididos em quatro categorias, como características do material, do laser, do escaneamento e do ambiente de produção e a consequente qualidade final do produto obtido por MA.

Quanto à garantia da qualidade, Everton et al. (2016) afirmaram que é uma das barreiras tecnológicas que influenciaram na adoção da MA como método de produção, principalmente em aplicações de alto valor agregado, em que é maior a falta de tolerância com falhas. Isso é conseguido com o desenvolvimento de melhores controles de processos de fabricação resultando em um melhor acabamento superficial, melhores propriedades mecânicas, redução nas variações construtivas e nos problemas de descontinuidades.

Em seus estudos citaram que foram identificados mais de 50 parâmetros de processo que influenciam nos resultados, a maior parte deles ligados aos efeitos da densidade de energia, velocidade de deposição e espaçamento entre linhas de deposição.

Klocke et al. (2017) levantaram que, para uma ampla aplicação da MA, é necessário se ultrapassar os desafios do levantamento de uma maior gama de materiais adequados para especificação, ajustar a produção para partes e produtos maiores e mais complexos, preparar mão de obra especializada, melhorar as medições dos custos de modo que sejam mais efetivas, aumentar a precisão e a confiabilidade do processo.

Visando à melhoria na produtividade, sem perda da qualidade, executar estudo dos principais parâmetros que influenciam no processo tais como o sistema de deposição, tipo de pó utilizado, mecanismo de modelagem CAD/CAM, sistema de laser, câmara de trabalho, tipos de alimentação de materiais (pó ou fio, por exemplo) ou a combinação de um ou mais tipos.

Tudo isso deve passar, primeiramente, por validação, demonstração e padronização da base de dados, uma vez que há desafios como restrições na variedade de materiais disponíveis, processo inadequado para uma larga escala produtiva e baixa padronização; e ainda, problemas com aspectos legais e de patentes bem como a inadequada e eticamente condenada produção de armas e artefatos perigosos.

De acordo com Mani, Lyons e Gupta (2014), a MA possui grandes desafios para ultrapassar tais como problemas com a seleção de material e a falta de padronização dos parâmetros de processos o que impede o emprego amplo da tecnologia, uma vez que esses têm impacto na consistência, precisão e na qualidade final dos produtos.

Citaram barreiras relacionadas com os custos da matéria prima; as que envolvem problemas com propriedade intelectual; qualificação e certificação de componentes (especialmente da indústria aeroespacial e automotiva); a falta de dados relacionados ao consumo, custo e disponibilidade de energia; cadeia de suprimentos e distribuição dos produtos; e de consequências ambientais como poluição e impacto ao final da vida útil. Esses ainda carecem de mais estudos, pois a maior parte tem impacto direto na competitividade e custo final.

Ali et al. (2012) afirmaram que o custo da máquina, dos materiais e manutenção são obstáculos para um emprego amplo das tecnologias de MA devido à falta de recursos. Além dos problemas citados, há também os relacionados à mão de obra em termos de treinamento, cultura e problemas com desempenho, consequências da aceitação, educação, qualificação profissional e resistência à

mudança principalmente nas pequenas e médias indústrias. Outra importante barreira levantada está relacionada a limitações do processo de MA devido a problemas de tecnologia e interesses que dificultam a inovação.

Foram apontadas por Thomas-Seale et al. (2018) dezoito importantes barreiras relacionadas à MA, entre elas a educação da força de trabalho, por vezes não compreendida por se tratar de uma metodologia diferente. Custos de processos, equipamentos, consumíveis e cadeias de suprimento devem ser considerados nos estágios de redesenho e desenvolvimento.

O CAD não está totalmente adaptado às novas metodologias de MA e por vezes não é eficiente em todas as características necessárias para a manufatura necessitando da combinação de diferentes softwares. O tamanho das câmaras de construção acaba levando a problemas de escala de produção devido à limitação de suas plataformas o que influencia a quantidade e tamanho das peças produzidas.

O monitoramento do processo, rastreabilidade e padronização de parâmetros são a garantia de que o processo está fluindo dentro dos intervalos de confiança especificados. As dificuldades nestes aspectos levam a problemas de controle de qualidade uma vez que a qualidade do pó, as variações dos parâmetros como potência do laser e larguras das camadas provocam uma mudança na estabilidade da poça de derretimento levando a porosidade e rugosidade superficial do produto final. Como este conhecimento não é amplamente divulgado e carece de regulamentação, está passível ao surgimento de problemas relacionados à propriedade intelectual.

Chan et al. (2018) afirmaram que problemas de propriedade intelectual e integração com cadeias de suprimento constituem obstáculos para a aplicação em massa da MA elevando o consumo de energia que é um problema, principalmente quando se leva em consideração a sustentabilidade.

A desconfiança da indústria em relação às novas tecnologias de MA; especialmente as de alto valor agregado, como a médica e automobilística, tem provocado um atraso no reconhecimento e na adoção do processo de MA na manufatura e apesar de o custo do processo na MA ser mais elevado que os métodos tradicionais, foi constatado que este pode ser compensado com a redução de estoques e armazenamentos.

Problemas com a padronização de licenças digitais, propriedades intelectuais, direitos autorais, patentes e regulamentação também foram citados, especialmente

devido a facilidades tecnológicas de cópia, reprodução e a possibilidade de se fabricar produtos copiados ilegalmente ou obtidos por engenharia reversa por digitalização ou também ilegais, como armas, podem ocasionar transtornos à segurança em geral.

Foram identificadas por Durach, Kurpjuweit e Wagner (2017), em suas pesquisas, quinze barreiras para adoção da MA. Destacaram que a limitada variedade para especificação e desenvolvimento de novos materiais e a baixa qualidade das peças produzidas foram as principais barreiras para o emprego amplo da tecnologia. Além disso, os altos custos para produção em larga escala, a baixa velocidade de produção, limitação de tamanho das câmaras de produção e problemas com propriedades mecânicas como baixa precisão, resistência mecânica e baixa resistência ao calor foram identificadas nas pesquisas efetuadas.

Os custos diretos da tecnologia como os da manufatura, os para a aquisição do maquinário e desenvolvimento de sistemas customizados de CAD foram considerados. Contudo apresentados com menor relevância quando comparado aos custos indiretos relacionados à qualidade, precisão e confiabilidade. Algumas barreiras apresentadas como menos significativas, mas não menos importantes e de conhecimento dos engenheiros são a compatibilidade dos processos de MA, regulamentação relativa aos materiais e conscientização e aceitação por parte dos clientes.

Gao et al. (2015) afirmaram que devido ao rápido crescimento e grande número de tecnologias de MA ainda existem alguns problemas com a garantia da propriedade intelectual, a padronização de desenhos, a especificação de processos de manufatura e guia de boas práticas. Destacaram ainda que há uma limitada gama de materiais disponíveis para serem especificados de modo a se construir uma estrutura confiável, com menores problemas de acabamento superficial e melhores tolerâncias geométricas.

A existência de diversas técnicas de manufatura, tipos de material, técnica de construção, ferramentas de desenho e computação são grandes desafios para as tecnologias de MA. Essas são mais adequadas aos produtos com elevado grau de customização e elevada complexidade geométrica o que mostra ser mais ajustada para baixa escala de produção.

O tempo para se produzir também é elevado, uma vez que para se conseguir melhor acabamento superficial é preciso pequena espessura de camada depositada.

A padronização dos parâmetros dos processos, das máquinas, das especificações para MA é fundamental para garantir a qualidade, repetitividade e otimização da produção, evitando a necessidade de pós-processamento e retrabalho.

Tootell et al. (2013) pesquisaram que três tipos de barreiras se apresentavam para a integração da MA: barreiras técnicas, financeiras e relacionais. Em relação às barreiras técnicas citaram desenho, restrições de equipamento e restrições de materiais. As mais significativas relacionadas ao financeiro eram a viabilidade do projeto e os recursos disponíveis para investimentos em inovação, uma vez que a grande competição no mercado provoca baixas margens e restrição de recursos para investimentos. Nas relacionais, destacaram: comunicação, confiança, comprometimento, entendimento, resistência à mudança, preparo, experiência e entrada de novos integrantes.

As tecnologias de MA permitem, de acordo com Kianian, Tavassoli e Larsson (2015), que produtos sejam fabricados de maneira menos trabalhosa, contudo, há a necessidade de um completo redesenho para que este objetivo possa ser atingido, uma vez que o desenho deve conter especificidades para que os produtos sejam produzidos por MA. Entretanto, mesmo com estes ajustes o processo de MA adotado será mais adequado para produções em baixa escala, diferente dos métodos tradicionais de produção. Fizeram considerações também sobre os processos de controle de qualidade de modo a garantir não só a qualidade como também a repetitividade. E levantaram que a deficiência no processo educacional e de treinamento nas tecnologias de MA obrigam as empresas a desenvolver seus treinamentos em âmbito interno.

Hu e Mahadevan (2017) declararam que os problemas de variação da qualidade são uma das maiores barreiras para as técnicas de MA. A qualidade é fortemente influenciada pelos parâmetros do processo como potência, velocidade de escaneamento, diâmetro e tipo do laser, tipo de material, diâmetro das partículas de pó, largura e orientação dos cordões de deposições, espessura das camadas, temperatura do pó, entre outros parâmetros que, com pequenas variações, podem influenciar não só o resultado do produto final como também a quantidade de energia necessária para a produção, mas para o controle de todos esses aspectos ainda serão exigidos estudos mais aprofundados.

2.3. A SELEÇÃO DAS BARREIRAS MAIS RELEVANTES

As barreiras mais relevantes foram agrupadas segundo critérios que estão descritos no Capítulo 3 Métodos.

Tabela 1. Barreiras identificadas na literatura agrupadas por termos semelhantes em cada categoria

CATEGORIA	BARREIRA	AUTOR																	TOTAL												
		Pinkerton (2016)	Vartanian; McDonald (2016)	H. Khajavi; Holmström; Partanen (2018)	Stavropoulos et al., 2018	Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017)	Thompson et al. (2015)	Shukla; Todorov; Kapletia (2018)	Weller; Kleer; Piller (2015)	Huang et al. (2016)	Al-Meslem; Anwer; Mathieu (2018)	Kretschmar et al. (2018)	Heiden et al. (2019)	Woodson; Alcantara; Do Nascimento (2019)	Schmidt et al. (2017)	Amini; Chang (2018)	Vaezi et al. (2013)	Chua; Ahn; Moon (2017)		Tootell et al. (2013)	Everton et al. (2016)	Klocke et al. (2017)	Mani; Lyons; Gupta (2014)	Ali et al. (2012)	Thomas-Seale et al. (2018)	Chan et al. (2018)	Durach; Kurpluweit; Wagner (2017)	Gao et al. (2015)	Kianian; Tavassoli; Larsson (2015)	Hu; Mahadevan (2017)	
1. Energia	1.1 Consumo de energia	x																		x	x				x					x	5
	1.2 Custo da energia							x																						x	2
2. Material	2.1 Custo do material	x	x	x	x	x	x	x				x									x	x			x	x					12
	2.2 Especificação do material			x		x		x				x			x		x				x				x		x				11
3. Mão de obra	3.1 Custo da qualificação da MO																					x								1	
	3.2 Disponibilidade de mão de obra qualificada		x		x	x		x	x			x								x	x			x	x	x		x			12
	3.3 Resistência a mudança	x				x																		x		x	x				6
	3.4 Segurança ocupacional	x															x														2
4. Máquina	4.1 Custo	x	x	x	x	x		x					x			x								x			x				10
	4.2 Manutenção					x		x						x																	5
	4.3 Limitação da máquina		x	x		x						x				x									x		x				10
	4.4 Configuração da máquina (Setup)															x															1
5. Regulamentação	5.1 Padronização	x						x						x							x	x			x	x	x	x			9
	5.2 Custo	x											x																		3
	5.3 Demora	x	x																												2
	5.4 Patente e aspectos legais	x				x		x	x													x				x	x				7
	5.5 Meio ambiente	x																													2
6. Processo	6.1 Custo do processo			x		x					x			x	x										x	x	x				9
	6.2 Parâmetros do processo	x	x	x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x				x	x	x		x			x	x		20
	6.3 Qualidade do processo	x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x		x		x	x			21
	6.4 Escala de produção			x	x	x			x	x				x												x	x	x	x		12
	6.5 Distribuição									x																	x				3
	6.6 Software																										x	x			5
																															170

Fonte: Autor (2019)

pelo menos quatro vezes. Dessa forma, eliminando-se as barreiras que foram citadas uma, duas ou três vezes chega-se à Tabela 2 que apresenta as mais relevantes encontradas neste estudo.

Como resultado, as barreiras mais relevantes para a implementação da MA segundo a literatura pesquisada, foram ordenadas por ordem de importância segundo o número total de citações conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Barreiras mais relevantes consideradas as citações por autor

BARREIRA	AUTORES	NÚMERO DE CITAÇÕES
Qualidade do processo	Pinkerton (2016); H. Khajavi, Holmström, Partanen (2018); Stavropoulos et al.(2018); Thompson et al. (2015); Shukla, Todorov, Kapletia (2018); Weller, Kleer, Piller (2015); Huang et al. (2016); Al-Mesleml, Anwer, Mathieu (2018); Kretschmar et al. (2018); Heiden et al. (2019); Schmidt et al. (2017); Amini, Chang (2018); Vaezi et al. (2013); Chua, Ahn, Moon (2017); Everton et al. (2016); Klocke et al. (2017); Mani, Lyons, Gupta (2014); Thomas-Seale et al. (2018); Durach, Kurpjuweit, Wagner (2017); Gao et al. (2015); Hu, Mahadevan (2017);	21
Parâmetros do processo	Pinkerton (2016); Vartanian, McDonald (2016); H. Khajavi, Holmström, Partanen (2018); Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017); Thompson et al. (2015); Shukla, Todorov, Kapletia (2018); Weller, Kleer, Piller (2015)Huang et al. (2016); Kretschmar et al. (2018); Heiden et al. (2019); Schmidt et al. (2017); Amini, Chang (2018); Vaezi et al. (2013); Chua, Ahn, Moon (2017); Everton et al. (2016); Klocke et al. (2017); Mani, Lyons, Gupta (2014); Thomas-Seale et al. (2018); Gao et al. (2015); Hu, Mahadevan (2017);	20
Custo do material	Pinkerton (2016); Vartanian, McDonald (2016); H. Khajavi, Holmström, Partanen (2018); Stavropoulos et al. (2018); Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017); Shukla, Todorov, Kapletia (2018); Weller, Kleer, Piller (2015); Heiden et al. (2019); Mani, Lyons, Gupta (2014); Ali et al. (2012); Chan et al. (2018); Durach, Kurpjuweit, Wagner (2017);	12
Disponibilidade de mão de obra qualificada	Vartanian, McDonald (2016); Stavropoulos et al. (2018); Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017); Shukla, Todorov, Kapletia (2018); Weller, Kleer, Piller (2015); Kretschmar et al. (2018); Tootell et al. (2013); Klocke et al. (2017); Ali et al. (2012); Thomas-Seale et al. (2018); Durach, Kurpjuweit, Wagner (2017); Kianian, Tavassoli, Larsson (2015);	12
Escala de produção	H. Khajavi, Holmström, Partanen (2018); Stavropoulos et al. (2018); Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017); Weller, Kleer, Piller (2015); Huang et al. (2016); Kretschmar et al. (2018); Schmidt et al. (2017); Klocke et al. (2017); Thomas-Seale et al. (2018); Durach, Kurpjuweit, Wagner (2017); Gao et al. (2015); Kianian, Tavassoli, Larsson (2015);	12
Especificação do material	H. Khajavi, Holmström, Partanen (2018); Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017); Shukla, Todorov, Kapletia (2018); Kretschmar et al. (2018); Schmidt et al. (2017); Vaezi et al. (2013); Tootell et al. (2013); Klocke et al. (2017); Thomas-Seale et al. (2018); Durach, Kurpjuweit, Wagner (2017); Gao et al. (2015);	11
Custo da máquina	Pinkerton (2016); Vartanian, McDonald (2016); H. Khajavi, Holmström, Partanen (2018); Stavropoulos et al. (2018); Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017); Shukla, Todorov, Kapletia (2018); Woodson, Alcantara, Do Nascimento (2019)Vaezi et al. (2013); Ali et al. (2012); Durach, Kurpjuweit, Wagner (2017);	10
Limitação da máquina	Vartanian, McDonald (2016); H. Khajavi, Holmström, Partanen (2018); Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017); Kretschmar et al. (2018); Schmidt et al. (2017); Vaezi et al. (2013); Tootell et al. (2013); Klocke et al. (2017); Thomas-Seale et al. (2018); Durach, Kurpjuweit, Wagner (2017);	10
Padronização	Pinkerton (2016); Weller, Kleer, Piller (2015)Schmidt et al. (2017); Klocke et al. (2017); Mani, Lyons, Gupta (2014); Thomas-Seale et al. (2018); Chan et al. (2018); Durach, Kurpjuweit, Wagner (2017); Gao et al. (2015);	9
Custo do processo	H. Khajavi, Holmström, Partanen (2018); Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017); Al-Mesleml, Anwer, Mathieu (2018); Woodson, Alcantara, Do Nascimento (2019); Schmidt et al. (2017); Mani, Lyons, Gupta (2014); Thomas-Seale et al. (2018); Chan et al. (2018); Durach, Kurpjuweit, Wagner (2017);	9
Patente e aspectos legais	Pinkerton (2016); Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017); Shukla, Todorov, Kapletia (2018); Weller, Kleer, Piller (2015); Klocke et al. (2017); Thomas-Seale et al. (2018); Chan et al. (2018);	7
Resistência a mudança	Pinkerton (2016); Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017); Tootell et al. (2013); Ali et al. (2012); Chan et al. (2018); Durach, Kurpjuweit, Wagner (2017);	6
Consumo de energia	Pinkerton (2016); Klocke et al. (2017); Mani, Lyons, Gupta (2014); Chan et al. (2018); Hu, Mahadevan (2017);	5
Manutenção	Dwivedi, Srivastava e Srivastava (2017); Shukla, Todorov, Kapletia (2018); Woodson, Alcantara, Do Nascimento (2019); Vaezi et al. (2013); Ali et al. (2012);	5
Software	H. Khajavi, Holmström, Partanen (2018); Shukla, Todorov, Kapletia (2018); Kretschmar et al. (2018); Thomas-Seale et al. (2018); Durach, Kurpjuweit, Wagner (2017);	5

Fonte: Autor (2019)

Portanto, resumidamente as barreiras mais relevantes identificadas foram:

- Qualidade do processo: é a capacidade de se atender aos requisitos de conformidade atendendo às especificações pré-estabelecidas permitindo a reprodutibilidade, confiabilidade e atendimento aos requisitos de acuracidade geométrica, tolerância dimensional e de acabamento superficial;
- Parâmetros do processo: basicamente é a calibração do maquinário em termos de potência do laser, velocidade de deposição, técnica de sobreposição de camadas taxa de transferência de material;
- Custo do material: trata do valor disponibilizado para aquisição da matéria prima que será empregada na linha produtiva;
- Disponibilidade de mão de obra qualificada: representando a escassez de mão-de-obra com capacidade para a execução da tarefa, resultando na dificuldade de recrutamento, seleção e grandes esforços para treinamento da mão de obra laboral;
- Escala de produção: é uma limitação ligada à produtividade e à quantidade de peças produzidas;
- Especificação do material: a quantidade e variedade de materiais disponíveis para serem utilizados no processo de fabricação;
- Custo da máquina: representa o valor empregado na aquisição do equipamento para emprego em MA;
- Limitação da máquina: são as dificuldades relacionadas com o tamanho da câmara de produção, que é local onde as peças são produzidas, representadas pela indisponibilidade de espaço para se produzir grandes peças ou grande quantidade delas de uma só vez e também relacionadas ao tamanho da cabeça de impressão;
- Padronização: é a equalização de requisitos técnicos, normativos e quando necessário, de certificação que permitam segurança técnica e legal na execução dos processos;
- Custo do processo: são gastos que estão relacionados ao processo de fabricação dos bens que a empresa precisa para produzir um produto, podendo ser custo direto ou indiretamente;
- Patente e aspectos legais: representam as barreiras legais relacionados à propriedade intelectual e os problemas resultantes da violação dos direitos de propriedades autorais;

- Resistência à mudança: representa a reação adversa em relação à nova tecnologia devido diversos motivos, quer seja, por desconhecimento, receio do novo, comodismo ou pela necessidade de requalificação ou treinamento;
- Consumo de energia: representando a quantidade dispendida de energia necessária para a produção de uma peça;
- Manutenção: barreira impactada pela dificuldade de encontrar peças sobressalentes para a recuperação e reparo de equipamentos com vistas a conservação e bom funcionamento;
- Software: é uma limitação ligada aos sistemas de apoio, suporte tecnológico e demais recursos de TI necessários para a produção da peça e para as demais atividades necessárias ao processo produtivo.

3. MÉTODOS

Abaixo será apresentada a metodologia utilizada para o levantamento na literatura das principais barreiras citadas pelos autores, bem como a separação e classificação destas barreiras por assunto similares e em seguida será estabelecido o ponto de corte, tendo como base o número de citações.

3.1. CRITÉRIOS PARA REALIZAÇÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com vistas ao desenvolvimento inicial da pesquisa e ao estabelecimento de uma linha de ação na busca de um método para identificar as principais barreiras levantadas na literatura internacional para a implementação da Manufatura Aditiva, o projeto teve início com a definição de barreira que, conforme De Holanda Ferreira, Ferreira, Dos Anjos (2010) significa [...]"Qualquer coisa que dificulte ou impeça a realização ou a obtenção de algo; estorvo, impedimento, obstáculo."...]. Em seguida foi realizada a tradução literal destes termos para o inglês para realizar a busca científica nas bases e para que o significado se ajustasse ao objetivo da pesquisa, ficou estabelecido que os termos de busca seriam "barreira" e "obstáculo".

Em relação ao termo Manufatura Aditiva, havia a necessidade de se adequar não somente os sinônimos do termo, mas também o conceito, definições, descrições, nomenclaturas e acrônimos desta nova tecnologia, por se tratar de uma técnica para a produção de objeto e, em alguns casos, fabricação final de dispositivos acabados.

Desta forma o conceito de barreiras e seus respectivos termos cognatos foram combinados com o conceito ampliado de Manufatura Aditiva para que se pudesse fazer a busca nas bases científicas.

Assim, para uma ampla padronização e a bem do melhor entendimento por meio da delimitação do tema, foi utilizado o conceito adotado pela ASTM International (American Society for Testing and Materials) que é uma organização estadunidense para a normatização e publicação de normas técnicas relativas a serviços, produtos, materiais e sistemas com sede em West Conshohocken, Pensilvânia. A ASTM (2012) adotou critérios que visavam pacificar todos estes conceitos e assim definiu que manufatura aditiva teria os seguintes significados e usos [...]"additive manufacturing, additive fabrication, additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing, and freeform

fabrication.”...] e para um melhor conjunto de buscas foram acrescentadas mais três denominações por terem sido termos comumente empregados como sinônimos nos artigos pesquisados: rapid prototyping, rapid manufacturing, 3D printing.

Para que os objetivos da pesquisa fossem atingidos e com a necessidade de delimitação do tema aos objetivos específicos, foram estabelecidas as seguintes combinações de palavras de buscas ligadas ao conceito MA: “additive fabrication, additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing, and freeform fabrication” em conjunto com os termos “barriers e obstacles”.

Esses termos foram combinados para pesquisa primeiramente em conjunto de três palavras, e como os resultados da busca nas bases, considerando Título, Resumo e Palavra Chaves não foram considerados muito produtivos, foi realizada uma busca com um conjunto de cruzamentos compostos apenas por duas palavras e, desta maneira, foram obtidos melhores resultados em termos dos números de publicações. As principais bases científicas consultadas foram: Science Direct, Emerald, Scopus, Taylor & Francis, Wiley Library, Ebsco e Proquest e os filtros utilizados, quando disponíveis, foram artigos publicados na área de engenharia de produção. A Tabela 1, apresentada na página 41, mostra os resultados obtidos.

A combinação de Manufatura Aditiva e seus cognatos com o conjunto barreiras e obstáculos simultaneamente não se mostrou muito produtiva, localizando um total de 58 artigos. Após a aplicação de filtros e desconsiderados os artigos repetidos restaram apenas 17 artigos na área de engenharia de produção. Por este motivo, e em benefício ao objetivo da pesquisa, foram realizadas combinações individuais dos termos cognatos de manufatura aditiva com os de barreiras e obstáculos tomados dois a dois. Desta maneira foram identificados um total de 4523 publicações, com 71 repetidos e quando aplicados o filtro para artigos acadêmicos de engenharia restaram 514 das mais diversas áreas da engenharia de produção.

Destes, após uma leitura realizada no resumo, foram baixados para uma leitura mais aprofundada do conteúdo 206 e os demais descartados por se tratar de assuntos não ligados à área de interesse na indústria, estando voltados à área médica, alimentos entre outras. Da leitura destes 206 foram selecionados 34 para levantamento dos dados de interesse de acordo com os objetivos do estudo visando identificar as barreiras relevantes que foram levantadas e estudadas para a implantação da manufatura aditiva nos mais diversos países.

No entanto, a leitura mais pormenorizada mostrou que havia repetição de artigos com títulos parecidos, sendo quatro artigos nesta situação e dois que não citavam nenhuma barreira em seu conteúdo e, portanto, foram descartados. Como resultado final, foram realmente considerados relevantes e completamente aplicáveis, por estarem totalmente ajustados ao tema e aos objetivos propostos, 28 artigos tratando especificamente das barreiras citadas na literatura pelos autores das publicações que fizeram estudos sobre as dificuldades encontradas para a implementação da MA.

Após a exploração destes 28 artigos selecionados, foi estabelecido um mapa de trabalho por meio de uma planilha de dados onde se listavam todas as barreiras citadas pelos autores. Como resultados foram apontadas 330 barreiras nas mais diversas áreas e em seguida separadas em seis categorias por afinidade de tema e significado: Material, Máquina, Energia, Processo, Mão de Obra e Regulamentação.

Essas seis categorias foram subdivididas por critério de similaridade com o objetivo de se classificar, em ordem de importância, os principais grupos de barreira que impactaram na implementação da MA.

- Grupo 1 - ENERGIA: com dois assuntos específicos divididos em Custo da Energia e Consumo de Energia.
- Grupo 2 - MATERIAL: com dois assuntos divididos também em Custo do Material e Especificação do Material.
- Grupo 3 - MÃO DE OBRA: com quatro assuntos específicos divididos em Custo da Qualificação da Mão de Obra, Disponibilidade de Mão de Obra Qualificada, Resistência à Mudança e Segurança Ocupacional.
- Grupo 4 - MÁQUINA: com quatro assuntos específicos divididos em Custo do Maquinário, Manutenção, Limitação da Máquina e Configuração da Máquina (Setup).
- Grupo 5 - REGULAMENTAÇÃO: com cinco assuntos específicos divididos em Padronização, Custo da Regulamentação, Demora na regulamentação, Patentes e Aspectos Legais e Meio ambiente.
- Grupo 6 - PROCESSO: com seis assuntos específicos divididos em Custo do Processo, Parâmetros do Processo, Qualidade do Processo, Escala de Produção, Distribuição e Software.

Ao final desse agrupamento por semelhança e em seguida por afinidade de tema resultaram 170 citações, classificadas em seis categorias e 23 barreiras. Algumas citadas por apenas um autor e outras citadas por 21 autores, de um total de 28 autores considerados.

Com o objetivo de se determinar as barreiras mais relevantes, foi adotado um critério de corte para aquelas citadas por, no mínimo, cinco autores, determinando a importância desta barreira para o estudo. Desconsideradas as barreiras menos citadas, ou seja, quatro citações ou menos, após a adoção do critério de corte, resultaram 154 citações traduzidas em seis categorias com as 15 barreiras mais relevantes que foram demonstradas na revisão bibliográfica, conforme Tabela 2.

3.2. A SELEÇÃO DO MÉTODO

Para poder atender ao objetivo proposto por este estudo, procedeu-se a escolha do método de pesquisa a ser utilizado, que segundo Yin (2009) está relacionado ao tipo de questão que se procura responder. As questões que tratam da ocorrência de certos fenômenos e envolvem dúvidas do tipo “como” e “porque”, o estudo de caso é o método de pesquisa mais adotado, segundo o autor.

Ainda, Yin (2009) refere-se ao estudo de caso como um estudo de caráter empírico, em que se investiga um fenômeno atual, inserido no contexto da realidade e cujos limites entre o fenômeno e o contexto em que estão inseridos não estão claramente definidos, o que é exatamente a situação aqui estudada. Além disso, com a adoção de múltiplos casos obtêm-se maior abrangência na avaliação dos resultados, porém, à medida que o número de casos cresce, corre-se o risco de obter uma menor profundidade na avaliação e a atenção reduzida em cada um deles.

Para a definição da quantidade de casos a serem analisados, Yin (2009) propõe duas estratégias, sendo elas:

- Para os casos estudados que assumam resultados semelhantes é recomendada a replicação literal, desta maneira seria suficiente o estudo de dois ou três casos.

- Se os casos estudados assumirem resultados contrários, mesmo antes da realização do estudo, é recomendada a replicação teórica, neste cenário mais de quatro casos deverão ser considerados.

No presente estudo, como não é possível se prever, inicialmente, se os resultados que se pretende avaliar serão semelhantes ou contrários, a estratégia mais adequada, por conservadorismo, é a replicação teórica, desta maneira, determinou-se o estudo de cinco casos.

Com base nas considerações apresentadas, podemos concluir que se trata de uma pesquisa de natureza exploratória do ponto de vista metodológico, caracterizada como uma mescla de revisão bibliográfica e estudo de caso.

3.3. A SELEÇÃO DAS EMPRESAS PARA DESENVOLVER OS ESTUDOS DE CASO

Para selecionar as empresas consideradas nos estudos de caso, Patton (1990) recomenda a utilização de amostras com conteúdo (*purposeful sampling*), isto é, casos dos quais o pesquisador possa extrair quantidade significativa de informações relevantes sobre os temas centrais em estudo. Dentre as várias estratégias sugeridas por Patton (1990), para selecionar as amostras com conteúdo este estudo considera a amostragem de casos típicos nos quais as empresas a serem selecionadas para análise devem ter implementado alguma das tecnologias de MA.

Em linha com essa abordagem foram estabelecidos três critérios para a seleção das empresas que comporiam os estudos de caso:

- a) como afirmado, a empresa deve ter implementado e estar utilizando de forma contínua uma das tecnologias disponíveis para a MA;
- b) permitir acesso ao profissional da empresa responsável pela implementação da MA na empresa;
- c) ter por parte desse profissional, disposição para uma entrevista com o pesquisador discutindo as dificuldades encontradas na implantação da MA na empresa.

Como decorrência da aplicação desses critérios, as seguintes empresas foram selecionadas para embasar esta pesquisa:

- Empresa A – É uma empresa japonesa, com filial em Manaus, produtora de motocicletas, quadriciclos e motores para barcos.
- Empresa B – Empresa de São Bernardo do Campo, de atuação global sendo a maior planta fora da Alemanha. Produz caminhões, chassis de ônibus, cabinas e agregados, como motores, câmbios e eixos.
- Empresa C – Empresa de presença global que tem seus centros de operações e tecnologia estrategicamente localizados em todo o mundo com presença no México, Estados Unidos da América, Argentina, Brasil e Tailândia com soluções de componentes estruturais para veículos leves e pesados.
- Empresa D – Laboratório de Ortodontia servindo desde o atendimento, planejamento, confecção e logística para próteses, aparelhos ortodônticos, ortopédicos, estéticos, para apneia, dispositivos para mini implantes, alinhadores estéticos, guia de braquete, prototipagem e aparelhos desenhados em CAD.
- Empresa E – Empresa de desenvolvimento, formação de mão de obra especializada, treinamento e emprego das tecnologias de MA na área da odontologia.

3.4. A TÉCNICA DE COLETA DE DADOS

De acordo com Marconi e Lakatos (2010), entrevista é um encontro entre duas pessoas, a fim de que uma delas obtenha informações a respeito de determinado assunto, mediante uma conversação de natureza profissional. A entrevista pode ser padronizada ou estruturada, ou seja, o entrevistador segue um roteiro previamente estabelecido com perguntas pré-determinadas que sejam seguidas à risca durante a entrevista e sem a possibilidade de adaptações nas perguntas, ajustes a situações, alterar a ordem das questões ou fazer novas perguntas.

A entrevista não padronizada ou não estruturada é aquela em que o entrevistador tem a liberdade para desenvolver cada situação em qualquer direção que considere adequada. A semiestruturada é aquela em que o entrevistador elabora um roteiro com as questões que vai abordar, mas tem a liberdade de caminhar no sentido que for mais conveniente para o tema em discussão.

Desta maneira, a fim de validar e complementar as informações recebidas sobre as barreiras apresentadas e avaliadas pelos entrevistados no preenchimento do formulário, foi realizada a coleta de dados por meio de entrevista semiestruturada com questionário composto por um roteiro de apoio formado por um conjunto de questões que orientam, mas não restringem a condução do pesquisador junto ao entrevistado e possibilita a anotação das observações e percepções passadas na entrevista, visando obter mais detalhes das barreiras que foram enfrentadas antes, durante e depois do processo de implementação.

Das cinco entrevistas realizadas, quatro foram conduzidas presencialmente e uma, devido à distância e à impossibilidade de deslocamento até o local, foi por meio de videoconferência. Foram através de conversa com os entrevistados, que em alguns casos, estavam acompanhados por assessores e técnicos da área de MA.

O entrevistador fazia as perguntas e preenchia o protocolo de pesquisa mostrado na íntegra no Apêndice 1, tendo por base as informações recebidas ou coletadas do entrevistado. As entrevistas tiveram uma duração média de 4 horas e em seguida foram realizadas visitas aos setores de MA para eventuais retiradas de dúvidas e seção de fotos, quando autorizada, exceto na entrevista realizada por videoconferência, onde as imagens coletadas foram enviadas por mensagem eletrônica. Em todos os casos, as imagens coletadas foram anexadas ao relatório de entrevistas.

Um aspecto importante destacado por Nakano (2012), é que cabe ao entrevistador poder esclarecer e sanar dúvidas das considerações apresentadas, permitindo ainda elucidar possíveis discordâncias e registrando todas as percepções no roteiro.

A escolha dos tipos e quantidade de questões utilizadas na criação do roteiro foi determinada com base na revisão bibliográfica que determinou o mapa de trabalho focado nas barreiras apontadas na implementação da MA.

Para a coleta dos dados do entrevistado, as questões foram inseridas no roteiro em suas respectivas seções, conforme entendido pelo pesquisador no ato da entrevista. Ocasionalmente o pesquisador adicionou o seu parecer e interpretação, enriquecendo o levantamento da pesquisa com a sua percepção e observação.

4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados das pesquisas de campo realizadas como parte deste trabalho.

4.1 ANÁLISES INTRACASOS

Abaixo serão apresentados os conteúdos dos relatórios das entrevistas que foram marcadas com os responsáveis pelas áreas de MA nas empresas pesquisadas.

4.1.1 Empresa A

É uma empresa japonesa produtora de motocicletas, quadriciclos e motores para barcos, entre outros. Faz parte de uma grande corporação de atuação mundial e atua no polo de duas rodas de Manaus produzindo motocicletas, motores de popa sendo fabricante e montadora destes equipamentos. O entrevistado é o Especialista de Engenharia Industrial responsável por este setor na empresa que utiliza a tecnologia utilizada de MA conhecida como FDM. Esta tecnologia está sendo utilizada para prototipagem, dispositivos de montagem e gabaritos nas etapas iniciais e anteriores a execução final dos dispositivos pela ferramentaria. A entrevista foi conduzida via videoconferência seguindo o protocolo estabelecido previamente com o orientador.

O consumo de energia, com reflexo no custo, foi uma preocupação por parte da empresa, contudo foi realizada pesquisa de mercado e identificadas impressoras com baixo consumo de energia. O entrevistado afirmou que este custo é muito baixo quando comparado ao consumo da energia das máquinas tradicionais de ferramentaria, demonstrando ser muito vantajoso para as futuras pretensões da empresa.

O custo do material também foi uma preocupação inicial, já que utilizariam uma impressora da marca STRATASYS e o material utilizado por esta impressora tinha um custo muito elevado. Desta forma, com o objetivo de reduzir os custos finais, a empresa determinou pesquisas mais aprofundadas que atendessem as

suas necessidades e conseguiu encontrar impressoras que utilizavam materiais comumente adquiridos no mercado aberto e isto facilitou a implementação do processo.

A especificação do material utilizado foi uma grande preocupação, tanto que foram feitos diversos testes com vários materiais como ABS, PLA, TRITAN e FLEXIVEL. Os melhores resultados obtidos foram com o material ABS para as aplicações da empresa e, além disso, possuía um custo muito melhor quando comparado aos demais, desta forma foi adotado o material ABS que é utilizado atualmente na empresa.

Em relação à mão de obra qualificada a preocupação foi significativa, pois não se identificou na cidade de Manaus qualquer possibilidade de contratar mão de obra que tivesse o conhecimento e a experiência requeridos para a utilização da tecnologia. Isso obrigou a empresa a recorrer às redes sociais e redes de contratação para identificar potenciais candidatos que foram encontrados fora da região e algumas contratações provenientes até do exterior. Desta forma a resistência à mudança não foi notada no grupo de trabalho, pois seria um processo novo, introduzido na montagem dos conjuntos e sem prejuízo aos demais cargos e serviços, que continuariam existindo. Hoje a tecnologia MA está perfeitamente integrada à linha de produção tendo em vista as vantagens apresentadas no processo.

Os parâmetros do processo foram uma preocupação, especialmente por ser algo novo e que demandaria um conjunto de estudos, pesquisa e adaptação às necessidades e emprego na linha de produção. Houve um estudo e aprendizado inicial e hoje se chegou a parâmetros bem mais refinados que atendem totalmente as necessidades da empresa.

O custo do processo foi uma preocupação inicial, mas os cálculos demonstraram que os números relacionados com consumo de material, depreciação e energia demonstraram a viabilidade da utilização da tecnologia na área em que seria utilizada. Foi constatada a vantagem, havendo uma redução nos custos existentes no método tradicional de obtenção de protótipos de dispositivos de montagem e gabaritos.

A qualidade do processo foi uma grande preocupação, pois haveria a necessidade de se garantir a qualidade da peça prototipada e dos dispositivos entregues aos setores de engenharia e produção. A análise dos produtos e métodos determinaria se a nova tecnologia seria ou não empregada, se houve melhoria e ganhos para a execução global do processo na área de montagem e também na garantia da qualidade final do produto entregue.

A escala de produção foi uma preocupação devido à demora natural que esta tecnologia apresentava, no entanto, foram identificados ganhos globais no conjunto do processo e tomadas medidas que viabilizariam a utilização da MA nas áreas pretendidas. Isso permitiu a incorporação da MA nos processos da empresa por se tornarem mais rápido, no conjunto total, ao se comparar com o tradicional processo de ferramentaria.

O custo inicial da máquina foi uma grande preocupação, especialmente nos orçamentos iniciais, uma vez que não se sabia qual tipo de equipamento atenderia as necessidades da empresa. Foi identificada que não seria preciso um equipamento de alta tecnologia e por isso foi adquirida uma impressora no mercado com custo mais baixo, mas com a qualidade e as características necessárias para que os objetivos fossem atingidos com um custo-benefício bem mais ajustado e adequado.

A limitação do tamanho da máquina não foi uma preocupação, pois foi constatada a possibilidade de se dividir a peça em partes menores ainda no projeto do dispositivo e, em seguida, fazer a montagem do conjunto final sem prejuízo para a qualidade do produto. Desta forma foi possível conduzir a montagem do projeto e viabilizar sua utilização até o momento com atendimento total às necessidades da empresa.

A manutenção foi uma preocupação inicial, contudo foram feitos acordos com os fabricantes que garantiram o suporte técnico necessário para continuidade do processo sem a perda da qualidade. No entanto, ao final do tempo de garantia serão necessários contratos de manutenção para os equipamentos que serão calculados e incorporados ao projeto.

Não houve grandes preocupações com a regulamentação, uma vez que estaria ligada à máquina de impressão. A máquina utilizada estaria disponível à

venda no mercado, considerada um produto de prateleira e nenhuma limitação de regulamentação seria considerada. No mais, a utilização seria interna e sujeita a normas da empresa, logo não haveria motivo algum para que isto se tornasse empecilho para a aplicação da MA nos processos da empresa.

As patentes e os aspectos legais não foram problemas, pois nem a máquina, nem os produtos finais estavam sujeitos às restrições por serem de domínio público e livremente utilizados.

Os recursos de TI foram uma preocupação; não pela impressora, mas pela necessidade técnica e legal em relação ao software de fatiamento, que não é de utilização aberta, tem o preço elevado e requer uma qualificação para sua utilização. Não foi necessária a implantação de nenhum tipo de sistema que a empresa não dispusesse desde o início do projeto.

4.1.2 Empresa B

Empresa de São Bernardo do Campo de atuação global, inaugurada em 1956, sendo a maior planta fora da Alemanha. Produz caminhões, chassis de ônibus, cabinas e agregados, como motores, câmbios e eixos. É o centro mundial de competência para desenvolvimento e produção de chassis de ônibus, sendo ainda pioneira nos testes com o uso de combustíveis alternativos como diesel de cana e biodiesel. O entrevistado foi o engenheiro responsável pela fabricação de protótipos e customização de caminhões na empresa que estava ao lado do técnico responsável pela operação e desenvolvimento da MA na empresa. A tecnologia utilizada atualmente é FDM e Polijet e a utilização é na fabricação de protótipos e customização de caminhões.

O consumo da energia neste nível de aplicação não é significativo, tendo em vista que as aplicações de prototipagem pelos métodos tradicionais, considerando erros, acertos e necessidades de modificações do projeto chegam a custar até 10 vezes mais. Apesar da necessidade de dezenas de horas para se construir um protótipo em tamanho natural, mesmo considerando a possibilidade de interrupção do processo, parada da máquina por falta de energia ou alguma necessidade de ajuste, ainda assim, em relação ao gasto de energia, este custo é desconsiderado.

A especificação do material foi uma preocupação, contudo atualmente existem materiais para as mais diversas aplicações e necessidades, especialmente com origem de Israel e Estados Unidos da América com grande variedade e de fácil obtenção e acesso.

A disponibilidade de mão de obra está ligada à área de atuação. Na parte de programação há a necessidade de uma mão de obra com alto conhecimento, mas de modo geral o fabricante do equipamento disponibiliza o treinamento necessário. Na operação do equipamento não há a necessidade de uma mão de obra especializada, ao contrário da área de manutenção, em que o serviço é extremamente complexo, requerendo muito treinamento e especialização. Novamente os grandes fabricantes já estão se organizando e melhorando estes aspectos em que eram deficientes no passado.

Na área de prototipagem não tem sido verificada uma grande resistência à mudança, especialmente pelos desafios percebidos na busca pela nova tecnologia e novos conhecimentos. Existe uma natural vontade de aprender e de se desenvolver, no entanto, tal comportamento não é verificado nos antigos fornecedores de serviço que ainda utilizam a metodologia tradicional. Nestes locais poderá haver ainda muita resistência à mudança devido ao fechamento de postos de trabalho, já que o cliente atingiu um grau de autossuficiência.

O custo do processo não é uma barreira para a prototipagem visto que a maioria dos processos consiste em uma programação simples e o envio para o equipamento que produzirá o protótipo, havendo somente o consumo do material especificado que normalmente é de baixo custo. A finalidade principal do projeto não é observar o objeto em ritmo de trabalho, mas apenas verificar a montagem, os ajustes e encaixes. Além disso, quanto mais complexo o projeto, mais fácil para se viabilizar economicamente a prototipagem, pois o método tradicional poderá custar infinitamente mais, conforme citado anteriormente.

Os parâmetros do processo são uma preocupação, pois, apesar do protótipo não ser analisado em trabalho, há a necessidade de se ter alguma resistência à fixação, para suportar a adição de outros componentes. Essa resistência terá influência direta dos parâmetros utilizados e do direcionamento da deposição das camadas.

A qualidade final do processo também preocupa, pois, o produto poderá ser exposto, demonstrado ao cliente ou para algum setor da indústria, sendo eventualmente necessário um pós-processamento para preparação de superfícies ou retirada de suportes que foram adicionados para possibilitar a impressão da peça.

No caso em tela, a escala de produção não é uma preocupação, visto que a produção é limitada a poucas peças com características próprias e que não serão fornecidas ao consumidor final, geralmente tendo uma vida útil de pequena duração.

Inicialmente o custo da máquina foi uma grande preocupação devido ao elevado investimento inicial, todavia a utilização em aplicações especiais demonstrou um retorno do investimento que foi na casa dos milhões em menos de um ano.

A limitação do tamanho da máquina foi uma preocupação, especialmente para as necessidades de aplicação com metal, uma vez que este está sujeito a uma grande retração, o que dificulta o acabamento e produz uma grande instabilidade dimensional havendo a necessidade de um retrabalho ao final.

A inexistência de regulamentação tem causado alguns transtornos, principalmente com as matérias primas importadas, pois existem problemas com a emissão das FISPQ - Ficha de Informação de Segurança para Produtos Químicos resultando em problemas alfandegários. Patente não é uma grande preocupação, já que está mais ligada às máquinas e não aos processos.

Em relação aos recursos de TI, não houve grandes necessidades de investimentos para a implantação dos processos, e o treinamento para utilização do software e da máquina foi fornecido pelo fabricante do equipamento que se responsabilizou pelo treinamento inicial, não havendo, até o momento, necessidade de expansão de mão de obra.

Foram identificadas algumas barreiras que são características próprias e consequências de novas dificuldades enfrentadas no Brasil e que não foram citadas na literatura, mas foram consideradas relevantes. O entrevistado relatou problemas com a desvalorização da moeda (câmbio); problemas com descarte de material, já que não existem normas para o tratamento de produtos oriundos do processo de fabricação, neste caso, a empresa resolveu descartar os rejeitos com os mesmos

cuidados adotados para os produtos químicos. E por fim, reportou problemas relacionados à qualidade da energia recebida pela empresa, informando que ela não é adequada e houve a necessidade de se criar meios para o fornecimento de uma energia estabilizada e com recursos de armazenamento temporário, pois no processo MA com tecnologia FDM, não pode haver interrupção.

4.1.3 Empresa C

Empresa de presença global, tem seus centros de operações e tecnologia estrategicamente localizados no México, Estados Unidos da América, Argentina, Brasil e Tailândia, possui aproximadamente 13.500 funcionários. Além de fornecer estruturas metálicas à indústria automotiva de caminhões, ônibus e carros, oferece soluções de componentes estruturais para veículos pesados e leves, tanques de combustível, discos de freio, para-choques, chassis, longarinas, componentes de segurança para carros leves entre outros produtos.

O entrevistado foi o Gerente de Engenharia de Processo e Qualidade, acompanhado do técnico responsável pela área de MA, que relatou ser utilizadas três impressoras 3D, com a tecnologia FDM, para a confecção de máscaras de recorte a plasma, gabaritos de medição e protótipos de produtos utilizando filamentos plásticos e afins. A empresa mantém um laboratório próprio que realiza testes, pesquisas e desenvolvimento de produtos para aplicação da tecnologia de MA internamente na sua linha de produção.

O consumo de energia não foi uma barreira para a implementação da MA na empresa, todavia constituirá uma preocupação caso seja ampliado o espectro de utilização desta tecnologia na empresa, pois para se utilizar materiais ABS, é preciso aquecer a mesa de trabalho da impressora e, conseqüentemente, haverá um aumento no consumo de energia o que provocará a necessidade de expansão no conjunto de suporte elétrico da empresa.

Já o custo de material preocupa, pois, a aplicação de cada tipo de material está diretamente ligada à finalidade, especialmente quanto aos aspectos de resistência à temperatura. Na empresa, os materiais utilizados têm custo de R\$ 80/kg se utilizado o APS, R\$ 1100/kg se utilizado o PLA e R\$ 240/kg se utilizado o Triton.

Essa diferenciação também é preocupante em relação à especificação do material, pois o ABS é mais resistente, o PLA é mais flexível enquanto o Triton apresenta maior resistência à abrasão e temperatura.

A disponibilidade de mão de obra qualificada é considerada tanto na busca por pessoas já qualificadas no mercado, o que é mais raro e difícil, quanto no processo interno de qualificação do pessoal existente. Hoje esta área, nova e em crescimento, depende muito mais da empolgação e motivação pessoal do que da necessidade da empresa, pois o funcionário tem que continuar utilizando os métodos tradicionais na fábrica e, em paralelo, buscar um processo de pesquisa e qualificação para utilizar uma tecnologia que ainda não está totalmente sedimentada e em condições de ser utilizada na empresa.

A combinação de todos esses fatores acaba gerando uma resistência à mudança, já que esta disruptiva tecnologia tem que vir acompanhada de uma mudança cultural, não só nos processos internos da empresa, mas também na quebra de paradigmas consolidados nas áreas da produção, compras e venda. Hoje, dentro da própria empresa existem áreas que possibilitam a expansão da MA, contudo a mão de obra ainda não aderiu aos novos processos por necessitar de capacitação, motivação para uso e entendimento da tecnologia e isso aumenta a complexidade e muda a maneira produtiva tradicional.

Na opinião do gerente, haverá uma redução significativa do custo do processo, com ganhos em tempo e agilidade, mas somente nas aplicações específicas e em quantidades reduzidas.

Os parâmetros do processo são uma preocupação contínua, pois carecem de ser desenvolvidos. É um processo de tentativa e erro onde cada usuário terá que produzir soluções tecnológicas específicas às suas necessidades.

A qualidade é uma preocupação em todos os aspectos e está diretamente influenciada pelos parâmetros do processo, mas nesta área, a qualidade é inversamente proporcional ao tempo o que impede a aplicação ampla da MA como fornecimento de produto final. Desta forma, a tecnologia de MA, com os recursos e conhecimentos atuais, não é escalável, isto é, ela é inadequada à produção em grande escala.

Já o custo da máquina, para as aplicações e tecnologias utilizadas pela empresa atualmente, não incomoda, pois são utilizadas técnicas ligadas ao plástico. Entretanto, quando se trata de futuras pretensões, com aplicação em metal, outros custos deverão ser envolvidos.

Atualmente a manutenção é um fator de peso, pois depende de mão de obra especializada e treinada, além disso, existem os custos das peças de reposição que invariavelmente são importadas.

O tamanho da câmara de produção não mais preocupa e, em alguns casos, já foram fabricadas impressoras com capacidade para se produzir barcos e casas. Há, ainda, a possibilidade de se construir impressoras com capacidade personalizada e, logicamente, a qualidade será proporcional ao tempo, tecnologia e volume produzido.

A falta de padronização das normas e processos não é problema, uma vez que tudo tem de ser desenvolvido e criado de acordo com as necessidades internas e específicas. Patentes também não são fatores limitantes, pois atualmente tudo se encontra na internet e existem *sites* especializados com depósitos de projetos. A patente, na maioria dos casos, está na tecnologia das máquinas de MA, todavia as utilizadas pela empresa já foram quebradas e estão disponíveis em *kits* de montagem.

Os recursos de TI são uma preocupação, especialmente devido à complexidade dos *softwares* conhecidos como fatiadores. Esses fazem a interface entre o projeto do CAD e a impressora visando à fabricação da peça e ajustam os parâmetros estabelecendo a relação necessária de camadas e demais recursos de impressão para se obter um produto na qualidade desejada.

4.1.4 Empresa D

A empresa é um Laboratório de Ortodontia que faz desde o planejamento até a logística necessária para a confecção de próteses, aparelhos ortodônticos, ortopédicos, estéticos e para a correção de apneia. Possui uma linha de trabalho para individualização da biomecânica, principalmente em dispositivos de mini-implantes, alinhadores estéticos, guia de braquete (colagem virtual indireta), prototipagem e aparelhos, a partir de um desenho em CAD. Está há 30 anos no

mercado de próteses e, desde 2015, trabalha comercialmente com processos 3D, utilizando diversas máquinas de MA com tecnologia de SLA, DLP e FDM. O laboratório tem atuação nacional e internacional e a entrevistada foi a proprietária que é a fundadora e atual diretora da empresa.

O consumo de energia não é uma preocupação porque entra no cálculo do valor do produto e é repassado ao valor de venda. Entretanto há um problema muito sério quanto à qualidade da energia entregue, pois o processo pode sofrer interrupção e precisa ser reiniciado. Além disso, na partida das máquinas, o pico de energia é muito elevado o que compromete o fornecimento da região, havendo a necessidade de um elevado investimento em sistema para a estabilização da energia.

O custo do material é um fator de peso porque a maior parte é importada e deve se levar em consideração a variação cambial desfavorável. Da mesma forma, a especificação do material preocupa, pois além das exigências de biocompatibilidades necessárias para o uso humano, conforme exigências da ANVISA, os produtos similares nacionais não oferecem a mesma qualidade e causam muitos defeitos ao produto final o que leva a repetições e a retrabalhos. Outro problema com a especificação do material está ligado à dificuldade encontrada para que as autoridades de saúde aprovem a importação de determinados materiais, especialmente o pó metálico utilizado na produção. Isso tem atrasado os testes e desenvolvimento de novas tecnologias que poderiam ser utilizadas nesta área.

Em relação à mão de obra qualificada, a preocupação inicial ainda permanece, pois para se utilizar esta tecnologia há a exigência de mão de obra específica. Como as escolas de formação ainda não estão adaptadas ao novo processo, a empresa foi obrigada a criar seus próprios padrões internos de qualidade e treinamento. Quanto aos antigos funcionários, não houve resistência à mudança porque continuaram exercendo as atividades nos mesmos moldes anteriores; a MA veio apenas para complementar o processo e permitir um ganho de qualidade e precisão. Foram contratados funcionários para as novas atividades e, de acordo com o interesse e desempenho, algumas migrações internas ocorreram naturalmente.

Os custos do processo foram, e ainda são, fatores preocupantes. A introdução de novos conceitos em uma área que existe há anos provocou o aparecimento de outros custos, tanto que o novo setor da empresa ainda não apresenta rendimento sustentável, sendo necessária a injeção financeira para que ele se sustente. Mesmo assim, o ganho na qualidade do produto final, após a implementação das tecnologias de MA, trouxe um retorno global que compensou o investimento no conjunto do trabalho. Em relação aos parâmetros do processo, como se trata de uma área nova, não existe nada especificado, e isso obrigou a empresa a desenvolver parâmetros próprios, tanto para a fabricação do produto quanto para a calibração das máquinas e desenvolvimento dos requisitos técnicos.

A qualidade do processo foi uma exigência inicial que permanece até o momento, pois a mudança só se justificaria se apresentassem ganhos significativos na qualidade como melhoria na precisão, menos repetições e retrabalhos, especialmente por serem produtos pequenos, normalmente encaixados em uma peça pré-fabricada, de dimensões bem definidas e havendo a obrigatoriedade de uma grande precisão, no caso, a arcada dentária de um cliente.

A escala de produção preocupou inicialmente, pois já se tinha conhecimento de que o processo de MA possuía uma velocidade mais baixa para a produção, contudo foi constatado que a precisão deste novo processo, em comparação com o antigo, compensava o tempo que era gasto com repetições e retrabalhos. Isso fez com que a empresa percebesse a necessidade de se investir em uma quantidade maior de equipamentos de MA com vistas à expansão e ao possível incremento da produção.

O custo inicial do maquinário foi outra preocupação relevante devido, principalmente, à exigência de equipamentos com melhor tecnologia e precisão. A redução dos custos das máquinas, ao longo dos anos, está sendo somente para aquelas de uso doméstico e até hoje as impressoras específicas apresentam custo alto e com grande tendência de elevação tão logo sejam desenvolvidas impressoras para trabalho com metais.

Por se tratarem de equipamentos com alto grau de complexidade, a mão de obra deve ser muito especializada. A princípio, as parcerias com os fornecedores e vendedores dos equipamentos têm atendido às necessidades da empresa, mas com

o passar do tempo e com o final das garantias haverá um aumento substancial nos custos relacionados a este item.

A limitação do tamanho da máquina nunca foi considerada um problema, pois as peças produzidas, apesar de muito específicas e praticamente exclusivas, estão limitadas ao tamanho de uma boca, cujas dimensões são relativamente pequenas.

A ausência da padronização e regulamentação não foram problemas porque a empresa está à frente neste aspecto e muitas vezes os padrões e referências são criados por ela própria, o que tem ajudado as autoridades de saúde a comporem o arcabouço jurídico que inevitavelmente será formado com a expansão e popularização da tecnologia. A empresa, inclusive, tem desenvolvido e mantido cursos para que isso seja difundido.

Em relação às patentes e aos aspectos legais, o processo flui de forma tranquila, uma vez que as patentes estão mais relacionadas às máquinas e, com o passar do tempo, estão expirando e se tornando de domínio público. Quanto aos processos produtivos e produtos, não existem patentes, há somente a necessidade de se respeitar os requisitos da autoridade de saúde que se encontram mais relacionados aos materiais utilizados e à sua manipulação do que ao produto final.

Os recursos de TI foram um grande desafio pela necessidade de se criar um setor específico que fizesse a ligação entre a área de saúde e a área de engenharia visando instruir o profissional da saúde na utilização das novas tecnologias e propiciar o entendimento da interface da saúde com a engenharia. Isso fez com que fosse criado um setor especializado, composto por uma equipe de profissionais capazes não só de desenvolver o *software*, mas também treinar adequadamente todos os profissionais envolvidos.

A entrevistada relatou que, além das dificuldades apresentadas e levantadas pela literatura, algumas barreiras, que são específicas do setor, dificultam o desenvolvimento e a utilização ampla das tecnologias de MA como a qualidade da energia entregue pela concessionária, os problemas de desvalorização da moeda (variação cambial), as barreiras alfandegárias relacionadas à importação de matéria prima e as autorizações das autoridades sanitárias.

4.1.5 Empresa E

Empresa de desenvolvimento, formação de mão de obra especializada, treinamento e emprego das tecnologias de MA na área da odontologia. A entrevistada é doutora pelo Departamento de Prótese da Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo, Pós-graduação na Orofacial Pain Clinic - University of Kentucky - USA, Graduada pela Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo (2006) e Mestre em Patologia Bucal pela Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo (2009). Possui Habilitação em Laser pelo CFO (Formação no Laboratório Especial de Laser em Odontologia - LELO-FOUSP), é membro do corpo clínico do Centro de Oclusão, DTM e Dor Orofacial (CODD - FOUSP), desde 2005. E também palestrante no tema Tecnologia 3D em Odontologia em congressos nacionais e internacionais.

Atualmente emprega MA no consultório, entregando produtos para o consumidor final e, como pesquisadora, a utiliza para a formação e capacitação de professores e profissionais com objetivo de aumentar o número de usuários da tecnologia, visando melhoria do conhecimento e emprego tanto em nível universitário quanto para usuários finais. As técnicas de MA utilizadas são SLA e DLP com aplicação em resina para a construção de próteses dentárias, confecção de placas, modelos, provisórios e guias.

Os custos tecnologia da Impressão 3D não são fixos e estão diretamente relacionados com as técnicas e materiais utilizados, podendo variar de R\$ 40.000,00 para a utilização em resinas até R\$ 1.000.000,00 para as aplicações em cerâmica.

O consumo de energia não foi uma preocupação inicial e não foi notada mudança na conta de energia depois de implementada a impressora 3D. Em relação ao setor de pesquisa, por ser uma área de aplicação específica, o custo da energia não foi um fator relevante, uma vez que a atividade não tem fins lucrativos e os gestores não se interessaram em medir o custo desta barreira.

O custo do material é uma preocupação relevante, pois é invariavelmente alto e na maioria das vezes são importados, com forte impacto devido à variação cambial. Existem alguns fornecedores no Brasil, entretanto ainda estão sujeitos à validação relativa ao aspecto da qualidade e apresentam algumas deficiências neste quesito.

Quanto à especificação do material, não existem materiais disponíveis para toda a gama de aplicação na área odontológica, tanto em pesquisa quanto para a utilização no produto entregue ao usuário final. Existem materiais para alguns tipos de aplicação, contudo não apresentam muitas variedades para uma mesma finalidade, há algumas dificuldades para se encontrar o material adequado e neste aspecto tem-se um grande campo para estudos e desenvolvimento. As possibilidades são muito amplas e existe ainda muito a se conhecer, especialmente na área de materiais e compostos e ligas metálicas, pois as pesquisas precisam melhorar e ser ampliadas, especialmente por ser uma aplicação na área da saúde onde os materiais precisam ser biocompatíveis.

A disponibilidade de mão de obra é uma preocupação, uma vez que esta área é nova e em desenvolvimento. Este fato é tão relevante que provocou a preocupação no profissional entrevistado a ponto de desenvolver pesquisas universitárias para a formação e qualificação de mão de obra, capacitando-os nestas novas tecnologias e qualificando-os para que sejam elementos multiplicadores de conhecimento.

Quando a resistência à mudança, a entrevistada afirmou que o emprego da MA nesta área foi de fácil aceitação uma vez que esta é uma tecnologia relativamente nova e deve ser empregada diretamente pelo profissional odontologista que viu a necessidade de evoluir seus conhecimentos. Como esta é uma disciplina que não fez parte do conteúdo escolar dos tempos da universidade, é necessária uma atualização e também um desenvolvimento das habilidades na gestão dos novos conceitos de engenharia, projetos e informática aplicados na área. Isso tem causado algum tipo de resistência e dificuldades para ajustes e mudanças no mapa mental e conceitual do profissional, no entanto existe uma consciência de que este é um caminho sem volta. Na opinião da entrevistada, nos antigos prestadores de serviço de laboratório para os dentistas haverá muita resistência, pois ocorrerá a redução na quantidade de empregos, uma vez que o procedimento de programação e digitalização irá dinamizar o conjunto do processo e reduzirá a necessidade de mão de obra. Além disso, irá requerer desses profissionais antigos, uma atualização técnica, pessoal e de equipamentos com elevados investimentos e demora na qualificação. Na área de pesquisa e desenvolvimento, a MA não encontra

resistências, pois diferentemente da aplicação cotidiana, o interessado está procurando se desenvolver e conhecer este novo direcionamento da área.

O custo do processo é uma preocupação para a aplicação como produto final, especialmente por ser novos processos com características distintas dos métodos tradicionais. Os problemas começam com a aquisição de novas máquinas e tecnologias, passando por problemas relacionados aos valores dos bens com consequências na segurança e necessidade de aquisição de seguros entre outros. Tudo isto tem que ser levado em conta, pois deve haver a transferência destes custos para o usuário final, existindo dúvidas até que ponto isto poderá ser incorporado à rotina diária de um consultório ou em que nível de profundidade, carecendo de maiores estudos da viabilidade econômica, da seleção da tecnologia e também em quais procedimentos poderiam ser utilizados. Neste caso, haveria a dependência da mudança e adaptação dos laboratórios e dos fornecedores.

Não existem ainda protocolos publicados relativos aos parâmetros do processo, mesmo porque é uma área em desenvolvimento e, com certeza, haverá a necessidade de uma certificação do processo e dos parâmetros para que sejam validados e liberados para a utilização mais ampla.

Nesta área a qualidade é fundamental, tanto em termos de produto final quanto de consequências para a saúde do paciente. Não só a precisão é importante, mas é necessário se considerar a individualidade e especificidade de cada paciente sem se abrir mão da necessária agilidade e flexibilidade. O comportamento dos materiais e a qualidade obtida com o correr dos anos é uma preocupação e há a necessidade de se desenvolver maiores estudos nesses aspectos.

A escala de produção não é uma preocupação, pois esta é uma área em que o produto final é individual e customizado para uma necessidade específica, não existindo uma produção seriada. Cada produto é projetado, produzido e aplicado de forma única e direcionada para uma determinada finalidade, mesmo em uma segunda aplicação, no mesmo paciente, haveria a necessidade de nova customização.

O custo da máquina é uma preocupação, visto que é uma nova tecnologia que tem o custo inicial elevado, contudo as patentes estão sendo quebradas e isto tende a reduzir o custo para a utilização no usuário final. A diversidade de tipos de

máquinas e tecnologias são grandes e dificultam a introdução deste novo conceito na área.

O custo da manutenção não é uma preocupação, pois os fabricantes fornecem o suporte inicial, todavia com o correr do tempo, este suporte não será mais oferecido e o impacto do custo da mão de obra especializada em manutenção será maior, mesmo porque no mercado ainda não existe mão de obra especializada para manutenção desses equipamentos específicos.

O tamanho da câmara de produção não é uma preocupação, uma vez que as aplicações são de pequeno porte, normalmente individualizadas e customizadas.

A falta de padronização da regulamentação é uma preocupação principalmente pela ausência de protocolos específicos para que a MA seja utilizada. Aqui no Brasil as Agências Reguladoras INPI, ANVISA e IMETRO estão trabalhando e buscando estabelecer parâmetros regulatórios para que a tecnologia possa ser aplicada com segurança jurídica e técnica para todos os envolvidos.

A questão das patentes não é uma preocupação para esta área, pois estas estão mais voltadas para a máquina e não para o processo utilizado. A técnica de aplicação depende da necessidade do paciente e da habilidade do profissional, não havendo restrição legal para esta segunda consideração.

Os recursos de TI são uma preocupação por requererem novas habilidades dos profissionais, já que essas não fizeram parte da formação e das competências, havendo a necessidade de uma adaptação, de se adquirir novos conhecimentos e novas habilidades. Além disso, os novos recursos tecnológicos não são amigáveis e não basta somente a natural vontade de aprender, mas existe a necessidade de uma elevada carga de dedicação e paciência para o ingresso neste novo e desafiador mundo.

4.2 ANÁLISE ENTRE CASOS

A Tabela 4, mostrada abaixo, apresenta uma síntese das barreiras identificadas pelos responsáveis pelo setor de MA nas empresas que foram selecionadas para o estudo de caso e mostra o quantitativo de citações das barreiras consideradas relevantes.

Foram identificadas algumas barreiras adicionais que não faziam parte do levantamento literário. Essas estão ligadas aos aspectos mais diretamente relacionados com a realidade brasileira e são consequências das condições encontradas nos locais onde as empresas estão instaladas.

Tabela 4. Barreiras identificadas no estudo de caso

CATEGORIA	BARREIRA	EMPRESA A	EMPRESA B	EMPRESA C	EMPRESA D	EMPRESA E	
1. Energia	1.1 Consumo de energia	x					1
2. Material	2.1 Custo do material	x		x	x	x	4
	2.2 Especificação do material	x	x	x	x	x	5
3. Mão de obra	3.1 Disponibilidade de mão de obra qualificada	x		x	x	x	4
	3.2 Resistência a mudança			x			1
4. Máquina	4.1 Custo da máquina	x	x	x	x	x	5
	4.2 Manutenção	x	x	x	x		4
	4.3 Limitação da máquina		x				1
5. Regulamentação	5.1 Padronização		x			x	2
	5.2 Patente e aspectos legais						0
6. Processo	6.1 Custo do processo	x		x	x	x	4
	6.2 Parâmetros do processo	x	x	x			3
	6.3 Qualidade do processo	x	x	x	x	x	5
	6.4 Escala de produção	x		x	x		3
	6.5 Software	x		x	x	x	4
7. Barreiras que não constavam da revisão literária	7.1 Câmbio (relação de troca de moeda)		x		x		2
	7.2 Descarte de material		x				1
	7.3 Qualidade da energia		x		x		2
	7.4 Barreiras alfandegárias				x		1

Fonte: Autor (2019)

Observa-se a grande relevância e destaque dado pelos entrevistados que citaram as barreiras especificação do material, custo da máquina e qualidade do processo por cinco vezes, e desta forma as classificaram como as mais relevantes e significativas neste estudo de casos.

As barreiras relacionadas com custo do material, disponibilidade de mão de obra qualificada, manutenção, custo do processo e software também foram consideradas significativas e relevantes, pois foram citadas por quatro dos entrevistados.

Nesta mesma linha, parâmetros do processo e escala de produção também podem ser consideradas significativas e relevantes por ter sido citada por três dos entrevistados, desta forma, evidenciando a importância dos aspectos ligados ao processo.

A barreira relacionada com a ausência de padronização foi citada duas vezes pelos entrevistados e, apesar de ter sido apontada no levantamento literário, por uma questão de critério de corte, não foram consideradas significativas e relevantes.

Nestes números de duas citações aparecem algumas que foram apontadas nas entrevistas e não estavam presentes no levantamento da literatura. Uma delas está relacionada à questão cambial, que representa a desvalorização da moeda corrente em relação às moedas mais fortes; certamente este não era um problema afeto aos países onde as pesquisas foram realizadas. A outra barreira levantada é uma questão ligada aos problemas com a estabilidade da energia, aparentando ser uma situação localizada e característica do sistema de distribuição brasileiro. Essas duas citações são de importante conhecimento por ser fatores locais e limitantes, requerendo providências iniciais na implantação dos projetos para que os processos e seus respectivos resultados na qualidade não sejam impactados e inviabilizem a instalação e a manutenção da MA na indústria.

Algumas barreiras levantadas na literatura foram consideradas de pequeno impacto pelos entrevistados como consumo de energia, resistência à mudança e limitação da máquina. Isso não significa que são de pequena importância, mas apenas que, na opinião dos entrevistados, ofereceram pequena dificuldade na implementação da MA em seus processos produtivos.

Com apenas uma citação, as barreiras alfandegárias, resultantes das dificuldades encontradas para importação dos materiais e o descarte de material, resultantes de uma nova situação sem normatização técnica e legal para o descarte, devem ter a importância majorada, por ser barreiras levantadas sem constarem do levantamento literário e ter sido citadas espontaneamente, sem que constassem do protocolo de pesquisas.

Patentes e aspectos legais não foram citados como barreiras significativas, pois os entrevistados consideram que as restrições atuais não estão nos processos, mas nas tecnologias utilizadas nas máquinas e ainda serão necessários futuros

estudos e definições por parte das autoridades e órgãos reguladores para a regulamentação destes requisitos.

A Tabela 5, abaixo, faz uma comparação entre o número de citações das barreiras consideradas significativas no levantamento literário, após a adoção do critério de corte que foi de cinco ou mais, e o número de barreiras adotadas como significativas segundo o número de citações, considerando três ou mais referências dos entrevistados.

Tabela 5. Tabela comparativa literatura e estudo de caso

CATEGORIA	BARREIRA	LITERATURA	ESTUDO DE CASO
1. Energia	1.1 Consumo de energia	x	
2. Material	2.1 Custo do material	x	x
	2.2 Especificação do material	x	x
3. Mão de obra	3.1 Disponibilidade de mão de obra qualificada	x	x
	3.2 Resistência a mudança	x	
4. Máquina	4.1 Custo da máquina	x	x
	4.2 Manutenção	x	x
	4.3 Limitação da máquina	x	
5. Regulamentação	5.1 Padronização	x	
	5.2 Patente e aspectos legais	x	
6. Processo	6.1 Custo do processo	x	x
	6.2 Parâmetros do processo	x	x
	6.3 Qualidade do processo	x	x
	6.4 Escala de produção	x	x
	6.5 Software	x	x
7. Barreiras que não constavam da revisão literária	7.1 Câmbio (relação de troca de moeda)		
	7.2 Descarte de material		
	7.3 Qualidade da energia		
	7.4 Barreiras alfandegárias		

Fonte: Autor (2019)

5. CONCLUSÃO

Como conclusão geral deste trabalho, foi verificado que, devido às suas peculiares características e especificidades, no Brasil, as barreiras relevantes para a implantação da MA não são as mesmas citadas na literatura. Algumas como consumo de energia, resistência a mudança, limitação de máquina, padronização, patentes e aspectos legais não foram citadas pela maioria dos entrevistados. Mesmo em relação às barreiras que não constavam do levantamento bibliográfico e foram citadas como barreiras próprias, não houve concordância entre os entrevistados e não constituíram maioria das citações, como por exemplo, problemas cambiais, descarte de material, qualidade da energia e barreiras alfandegárias.

Desta forma foi possível concluir que, no Brasil, os mais relevantes obstáculos para a implantação da MA são a especificação do material, o custo da máquina, a qualidade do processo, o custo de material, a disponibilidade de mão de obra qualificada, a manutenção, o custo do processo, o software, os parâmetros do processo e a escala de produção.

Este estudo apresentou significativa contribuição para a teoria, uma vez que foi identificada uma lacuna na literatura na qual não se verificou nenhuma publicação relevante sobre a identificação das barreiras para a implantação da MA no Brasil. Logo a apresentação do presente estudo irá preencher esta lacuna na literatura contribuindo para a teoria e acrescentando conhecimento à ciência.

Os resultados deste trabalho contribuirão para a prática na medida em que permitirão aos gestores e profissionais da indústria conhecer, de antemão, as dificuldades relevantes que enfrentarão ao decidir iniciar a utilização da MA na linha de produção, podendo assim tomar ações preventivas que minimizem estas dificuldades, facilitando a implementação desta nova tecnologia.

Algumas limitações deste trabalho devem ser destacadas, pois as conclusões se baseiam em apenas cinco estudos de caso e não podem ser generalizadas, uma vez que nenhuma das empresas pesquisadas utilizava MA com deposição de metal, indicando que esta ainda é uma tecnologia de uso restrito no Brasil; as empresas pesquisadas pertencem a dois setores industriais específicos, o automotivo e odontologia; além disso, a maioria das empresas pesquisadas está com o uso de

MA em estágio embrionário, na fase de pesquisa e desenvolvimento, e não fornecem nenhum produto acabado ao consumidor final, empregando a MA para a fabricação de dispositivos intermediários de apoio a montagem e à fabricação de produtos.

Como sugestão de pesquisa futura, para que os resultados possam ser generalizados, sugere-se a realização de uma pesquisa do tipo *Survey*, com ampla amostragem, aleatória e com tratamento estatístico dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULRAHMAN, Kamardeen O.; AKINLABI, Esther T.; MAHAMOOD, Rasheedat M. Laser metal deposition technique: sustainability and environmental impact. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 109-116, 2018.

ACTIVE STANDARD, A. S. T. M. F2792 Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. **West Conshohocken: ASTM Int**, 2012.

ALI, Romouzy et al. The Barriers that Hinder Rapid Prototyping Deployment within Small and Medium-Sized Enterprises: Which Should Come First?. **International Journal of Knowledge, Culture & Change in Organizations: Annual Review**, v. 12, 2012.

AL-MESLEMI, Yahya; ANWER, Nabil; MATHIEU, Luc. Environmental Performance and Key Characteristics in Additive Manufacturing: A Literature Review. **Procedia CIRP**, v. 69, n. 1, p. 148-153, 2018.

AMINI, Mohammadhossein; CHANG, Shing I. MLCPM: A process monitoring framework for 3D metal printing in industrial scale. **Computers & Industrial Engineering**, v. 124, p.322-330, 2018.

CAIAZZO, Fabrizia. Laser-aided Directed Metal Deposition of Ni-based superalloy powder. **Optics & Laser Technology**, v. 103, p. 193-198, 2018.

CHAN, Hing Kai et al. The impact of 3D Printing Technology on the supply chain: Manufacturing and legal perspectives. **International Journal of Production Economics**, v. 205, p. 156-162, 2018.

CHUA, Zhong Yang; AHN, Il Hyuk; MOON, Seung Ki. Process monitoring and inspection systems in metal additive manufacturing: Status and applications. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 4, n. 2, p. 235-245, 2017.

DE HOLANDA FERREIRA, Aurélio Buarque; FERREIRA, Marina Baird; DOS ANJOS, Margarida. **Dicionário Aurélio da língua portuguesa**. Editora Positivo, 2010.

DURACH, Christian F.; KURPJUWEIT, Stefan; WAGNER, Stephan M. The impact of additive manufacturing on supply chains. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 47, n. 10, p. 954-971, 2017.

DWIVEDI, Gourav; SRIVASTAVA, Samir K.; SRIVASTAVA, Rajiv K. Analysis of barriers to implement additive manufacturing technology in the Indian automotive sector. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 47, n. 10, p. 972-991, 2017.

EVERTON, Sarah K. et al. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. **Materials & Design**, v. 95, p. 431-445, 2016.

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

GARDAN, Julien. Additive manufacturing technologies: state of the art and trends. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 10, p. 3118-3132, 2016.

GIORDANO, Caio Mezzeti; DE SENZI ZANCUL, Eduardo; RODRIGUES, Vinícius Picanço. Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais. **Revista Produção Online**, v. 16, n. 2, p. 499-523, 2016.

HEIDEN, Michael J. et al. Evolution of 316L stainless steel feedstock due to laser powder bed fusion process. **Additive Manufacturing**, v. 25, p. 84-103, 2019.

HERZOG, Dirk et al. Additive manufacturing of metals. **Acta Materialia**, v. 117, p. 371-392, 2016.

H. KHAJAVI, Siavash; HOLMSTRÖM, Jan; PARTANEN, Jouni. Additive manufacturing in the spare parts supply chain: hub configuration and technology maturity. **Rapid Prototyping Journal**, v. 24, n. 7, p. 1178-1192, 2018.

HOPKINSON, N.; DICKENS, P. M. Analysis of rapid manufacturing - Using layer manufacturing processes for production. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, **Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, London, p.31–39, 2003.

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

HUANG, Runze et al. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 1559-1570, 2016.

KIANIAN, Babak; TAVASSOLI, Sam; LARSSON, Tobias C. The Role of Additive Manufacturing Technology in job creation: an exploratory case study of suppliers of Additive Manufacturing in Sweden. **Procedia CIRP**, v. 26, p. 93-98, 2015.

KLOCKE, Fritz et al. State of the art laser additive manufacturing for hot-work tool steels. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 58-63, 2017.

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

MANI, Mahesh; LYONS, Kevin W.; GUPTA, S. K. Sustainability characterization for additive manufacturing. **Journal of research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 119, p. 419, 2014.

MARCONI, M.A.; LAKATOS, E.M. **Fundamentos de metodologia científica** . 7. ed. São Paulo, Atlas, 2010.

NAKANO, D. **Métodos de pesquisa adotados na Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. In: CAUCHICK MIGUEL, P.A. (Coord.). **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2. ed. São Paulo: Elsevier, 2012.

PATTON, Michael Q. **Qualitative evaluation and research methods**. Newbury park, CA, Sage, 1990.

PINKERTON, Andrew J. Lasers in additive manufacturing. **Optics & Laser Technology**, v. 78, p. 25-32, 2016.

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

SHAMSAEI, Nima et al. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. **Additive Manufacturing**, v. 8, p. 12-35, 2015.

SHUKLA, Manish; TODOROV, Ivan; KAPLETIA, Dharm. Application of additive manufacturing for mass customisation: understanding the interaction of critical barriers. **Production Planning & Control**, v. 29, n. 10, p. 814-825, 2018.

SOODI, Mehdi; MASOOD, Syed; BRANDT, Milan. Tensile strength of functionally graded and wafer layered structures produced by direct metal deposition. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 5, p. 360-368, 2014.

STAVROPOULOS, Panagiotis et al. Addressing the challenges for the industrial application of additive manufacturing: Towards a hybrid solution. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, v. 1, n. 3, p. 157-168, 2018

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

THOMPSON, Scott M. et al. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. **Additive Manufacturing**, v. 8, p. 36-62, 2015.

TOOTELL, Adrian et al. Relationship initiation between universities and manufacturing: a new perspective. In: ISPIM Innovation Symposium. **The International Society for Professional Innovation Management (ISPIM)**, p. 1, 2013.

VAEZI, Mohammad et al. Multiple material additive manufacturing–Part 1: a review: this review paper covers a decade of research on multiple material additive manufacturing technologies which can produce complex geometry parts with different materials. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 8, n. 1, p. 19-50, 2013.

VARTANIAN, Kenneth; MCDONALD, Tom. Accelerating industrial adoption of metal additive manufacturing technology. **JOM**, v. 68, n. 3, p. 806-810, 2016.

WELLER, Christian; KLEER, Robin; PILLER, Frank T. Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. **International Journal of Production Economics**, v. 164, p. 43-56, 2015.

WOODSON, Thomas; ALCANTARA, Julia Torres; DO NASCIMENTO, Milena Silva. Is 3D printing an inclusive innovation?: An examination of 3D printing in Brazil. **Technovation**, v. 80, p. 54-62, 2019.

YIN, R. K. **Case study research: design and methods**. 4th ed. Newbury Park: Sage, 2009.

ZANCUL, Eduardo; <https://vanzolini.org.br/weblog/2015/04/15/manufatura-aditiva-ja-e-realidade/>, Fonte: Revista Em Foco: acesso em 10/12/2018.

APÊNDICE 1

Principais barreiras para implementação da Manufatura Aditiva no Brasil

Protocolo de Entrevista

A – Informações Gerais da Empresa

1. Nome da empresa:
2. Endereço:
3. Origem e estrutura social da empresa (Ltda, S.A, outra):
4. Breve descrição do setor no qual a empresa atua.
5. Perfil da empresa (produtos, mercado, faturamento, número de funcionários, etc.)
6. Nome do entrevistado (Nome, e-mail, posição na empresa).

B – Identificação das barreiras para implementação da MA

1. A empresa possui atualmente MA em funcionamento?

Qual a tecnologia utilizada?

Para que a MA está sendo usada?

2. O consumo da energia seria / foi uma preocupação para a adoção da MA?

Consumo de energia, representando a quantidade dispendida de energia necessária para a produção de uma peça.

3. O custo do material seria / foi uma preocupação para a adoção da MA?

Custo do material trata do valor disponibilizado para aquisição da matéria prima que será empregada na linha produtiva.

4. A especificação do material utilizado seria / foi uma preocupação para a adoção da MA?

Especificação do material a quantidade e variedade de materiais disponíveis para serem utilizados no processo de fabricação.

5. A disponibilidade de MO qualificada seria / foi uma preocupação para a adoção da MA?

Disponibilidade de mão de obra qualificada representando a escassez de mão-de-obra com capacidade para a execução da tarefa, resultando na dificuldade de recrutamento, seleção e grandes esforços para treinamento da mão de obra laboral.

6. A resistência à mudança seria / foi uma preocupação para a adoção da MA?

Resistência à mudança representa a reação adversa em relação à nova tecnologia devido diversos motivos, quer seja, por desconhecimento, receio do novo, comodismo ou pela necessidade de requalificação ou treinamento.

7. O custo do processo seria / foi uma preocupação para a adoção da MA?

Custo do processo são gastos que estão relacionados ao processo de fabricação dos bens que a empresa precisa para produzir um produto, podendo ser custo direto ou indiretamente.

8. Os parâmetros do processo seriam / foram uma preocupação para a adoção da MA?

Parâmetros do processo basicamente é a calibração do maquinário em termos de potência do laser, velocidade de deposição, técnica de sobreposição de camadas taxa de transferência de material.

9. A qualidade de processo seria / foi uma preocupação para a adoção da MA?

Qualidade do processo é a capacidade de se atender aos requisitos de conformidade atendendo às especificações pré-estabelecidas permitindo a reprodutibilidade, confiabilidade e atendimento aos requisitos de acuracidade geométrica, tolerância dimensional e de acabamento superficial.

10. A escala de produção seria / foi uma preocupação para a adoção da MA?

Escala de produção é uma limitação ligada à produtividade e à quantidade de peças produzidas.

11. O custo da máquina seria / foi uma preocupação para a adoção da MA?

Custo da máquina representa o valor empregado na aquisição do equipamento para emprego em MA.

12. A manutenção da máquina seria / foi uma preocupação para a adoção da MA?

Manutenção barreira impactada pela dificuldade de encontrar peças sobressalentes para a recuperação e reparo de equipamentos com vistas a conservação e bom funcionamento.

13. A limitação do tamanho da máquina seria / foi uma preocupação para a adoção da MA?

Limitação da máquina são as dificuldades relacionadas com o tamanho da câmara de produção, que é local onde as peças são produzidas, representadas pela indisponibilidade de espaço para se produzir grandes peças ou grande quantidade delas de uma só vez e também relacionadas ao tamanho da cabeça de impressão.

14. A falta de padronização da regulamentação seria / foi uma preocupação para a adoção da MA?

Padronização é a equalização de requisitos técnicos, normativos e quando necessário, de certificação que permitam segurança técnica e legal na execução dos processos.

15. A questão de patente ou de aspectos legais seria / foi uma preocupação para a adoção da MA?

Patente e aspectos legais representam as barreiras legais relacionados à propriedade intelectual e os problemas resultantes da violação dos direitos de propriedades autorais.

16. Os recursos de TI seriam / foram uma preocupação para a adoção da MA?

Software é uma limitação ligada aos sistemas de apoio, suporte tecnológico e demais recursos de TI necessários para a produção da peça e para as demais atividades necessárias ao processo produtivo.

17. Algum comentário ou observação a acrescentar.