



Luiz Antonio Girianelli Félix

**Potencial disruptivo da manufatura aditiva -
Influência nas cadeias de suprimentos e uma aplicação na
Marinha do Brasil**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Engenharia de Produção (opção profissional).

Orientadores: Prof. Antônio Márcio Tavares Thomé
Prof. José Roberto de Souza Blaschek

Rio de Janeiro
Abril de 2017



Luiz Antonio Girianelli Félix

**Potencial disruptivo da manufatura aditiva -
Influência nas cadeias de suprimentos e uma aplicação na
Marinha do Brasil**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de mestre pelo programa de Pós-
graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo
assinada.

Prof. Antônio Márcio Tavares Thomé

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. José Roberto de Souza Blaschek

Co-orientador

Coordenação Central de Extensão

Prof. José Eugênio Leal

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Profa. Soeli Teresinha Fiorini

Departamento de Informática - PUC-Rio

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico-Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de abril de 2017

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Luiz Antonio Girianelli Félix

Graduou-se em Ciências Navais na Escola Naval em 2004. Concluiu o Curso de Aperfeiçoamento em Intendência para Oficiais em 2007. Foi assistente do Diretor do *Logistics Support Center - San Diego*, entre 2011 e 2013. Foi encarregado do Escritório de ligação do Abastecimento com a Esquadra entre 2013 e 2015 e ativou o Escritório de ligação do Abastecimento com a Saúde em 2015. Cursou logística e mobilização nacional na Escola Superior de Guerra em 2016, em nível de MBA. Atualmente, é Gerente da Cadeia de Suprimentos de Sobressalentes no Sistema de Abastecimento da Marinha

Ficha Catalográfica

Félix, Luiz Antonio Girianelli

Potencial disruptivo da manufatura aditiva: influência nas cadeias de suprimentos e uma aplicação na Marinha do Brasil / Luiz Antonio Girianelli Félix; orientadores: Antônio Márcio Tavares Thomé, José Roberto de Souza Blaschek. – 2017.

116 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Manufatura aditiva. 3. Cadeia de suprimentos. 4. Sobressalentes. I. Thomé, Antônio Márcio Tavares. II. Blaschek, José Roberto de Souza. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

Agradecimento

A Deus, que me dá livre arbítrio para escolher os caminhos que quero seguir, bem como me concede os dons que me permitem crescer a cada dia.

À minha esposa e aos meus filhos, pela paciência e pela compreensão com relação aos momentos nos quais estive ausente, por força dos estudos.

À Marinha do Brasil, porque, além das oportunidades que já me concedeu, me proporcionou a chance de realizar este mestrado profissional em logística.

Ao meu orientador, o Professor Antônio Márcio Tavares Thomé, por me emprestar seus conselhos e pela confiança depositada neste trabalho.

Ao meu co-orientador, o Professor José Roberto de Souza Blaschek, pelas instruções; por aceitar o desafio desta pesquisa e por compartilhar comigo suas experiências.

Aos meus pais, por todos os sacrifícios passados em nome de me oferecer um estudo, pela educação que me deram dentro de casa e pela base religiosa.

Aos professores que aceitaram a tarefa de compor a banca examinadora.

A todos os professores do Mestrado Profissional em Logística, pelos ensinamentos proporcionados.

A todos os meus amigos que me apoiaram e motivaram nesta jornada, aureada com a presente dissertação.

Resumo

Félix, Luiz Antonio Girianelli; Thomé, Antônio Márcio Tavares; Blaschek, José Roberto de Souza. **Potencial disruptivo da manufatura aditiva – influência nas cadeias de suprimentos e uma aplicação na Marinha do Brasil.** Rio de Janeiro, 2017. 116 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O dinamismo dos mercados vem se intensificando, em face da globalização, dos avanços tecnológicos e das mudanças sociais. Consequentemente, as empresas necessitam se adaptar tempestivamente para se manter competitivas, ou podem vir a desaparecer. Neste contexto, inovações disruptivas são cada vez mais frequentes. Assim é o caso da manufatura aditiva, conhecida popularmente por impressão 3D. Tratam-se de tecnologias com potencial disruptivo que vai além do paradigma de produção, influenciando a logística, a sociedade, os mercados e múltiplos setores, tais quais o de saúde, o de defesa, o automotivo, o de construção civil e até mesmo o de alimentos. Nesta vertente, o presente trabalho busca verificar o potencial disruptivo das tecnologias de manufatura aditiva, iniciando pelo aprofundamento no conhecimento sobre estas tecnologias. Em seguida, é feita análise sobre a gestão das cadeias de suprimentos atual e as implicações das tecnologias de manufatura aditiva sobre a gestão das cadeias de suprimentos. Por fim, o estudo confronta o potencial disruptivo da manufatura aditiva com a cadeia de suprimentos de sobressalentes da Marinha do Brasil, no intuito de aprimorar aquela cadeia de suprimentos, buscando, naquelas tecnologias, solução para as dificuldades enfrentadas pela Esquadra do Brasil.

Palavras-chave

Manufatura aditiva; cadeia de suprimentos; sobressalentes.

Abstract

Félix, Luiz Antonio Girianelli; Thomé, Antônio Márcio Tavares (Advisor); Blaschek, José Roberto de Souza (Co-advisor). **Disruptive potential of additive manufacturing – influence on supply chains and an application in the Brazilian Navy.** Rio de Janeiro, 2017. 116 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The dynamism of markets has been intensifying by the globalization, the technological advances and the social changes. Consequently, companies need to adapt timely to remain competitive, or may disappear. In this context, disruptive innovations are becoming more frequent. This is the case of additive manufacturing, popularly known as 3D printing. These are technologies with disruptive potential that goes beyond the production paradigm, influencing logistics, society, markets and multiple sectors, such as health, defense, automotive, civil construction and even food. From this point, this work seeks to verify the disruptive potential of additive manufacturing technologies, starting with the deepening of the knowledge about these technologies. Next, it is analyzed the management of current supply chains and the implications of additive manufacturing technologies on supply chain management. Finally, the study confronts the disruptive potential of additive manufacturing with the Brazilian Navy's supply chain of spare parts, in order to improve that supply chain, searching solutions to the difficulties faced by the Brazilian Fleet in those technologies.

Keywords

Additive manufacturing; supply chain; spare parts.

Sumário

1. Introdução	12
1.1 Marinha do Brasil	13
1.2 Questões e objetivos	14
1.3 Metodologia e desenvolvimento	15
1.4 Resultados esperados	17
2. Manufatura aditiva	18
2.1 Introdução	18
2.2 Antecedentes	19
2.3 Definições	27
2.4 Categorias e tecnologias de manufatura aditiva	31
2.5 Estado atual e aplicações	34
2.5.1 Marinha Norte Americana (<i>US Navy</i>)	37
2.5.2 Exército Norte Americano (<i>US Army</i>)	38
2.5.3 Força Aérea Norte Americanas (<i>US Air Force</i>)	39
2.5.4 <i>Rapid tooling</i> (RT) e prototipagem rápida (<i>rapid prototyping</i>)	39
2.5.5 Boeing	40
2.5.6 GE turbinas	40
2.5.7 Airbus	41
2.5.8 Indústria automotiva	42
2.5.9 Medicina	42
2.5.10 Construção Civil	43
2.6 Conclusões sobre manufatura aditiva	44
3. Cadeia de Suprimentos (Supply Chain)	45
3.1 Introdução	45
3.2 Conceitos de cadeia de suprimentos	45
3.3 <i>Demand Supply Chain</i>	48
3.4 Estratégias dentro da cadeia de suprimentos	52
3.4.1 <i>Lean</i> ou estratégia de cadeia enxuta	52

3.4.2 <i>Agile</i> ou estratégia de cadeia ágil	54
3.4.3 <i>Leagile</i>	55
3.5 Outras características modernas das cadeias de suprimentos	57
3.5.1 Postergação	57
3.5.2 <i>Risk pooling</i>	58
3.5.3 <i>Green Operations</i> e logística sustentável	59
3.6 Conclusões sobre cadeia de suprimentos	61
4. Manufatura aditiva (AM) e gestão da cadeia de suprimentos	62
4.1 Introdução	62
4.2 Potencial disruptivo da manufatura aditiva	62
4.3 Implicações em cadeias enxutas	65
4.4 Implicações em cadeias ágeis	67
4.5 Implicações em cadeias <i>leagile</i>	69
4.6 Implicações no meio ambiente	70
4.7 Outras implicações em cadeias de suprimentos	72
4.8 <i>Maker movement (hobbyists)</i>	74
4.9 Conclusões acerca da AM sobre as cadeias de suprimentos	76
5. Manufatura Aditiva na Marinha do Brasil	77
5.1 Introdução	77
5.2 Cadeias de suprimentos de sobressalentes	77
5.3 Cadeia de suprimentos de sobressalentes na Marinha do Brasil	80
5.3.1 Processo de fornecimento de sobressalentes	82
5.3.2 Processo de compra de sobressalentes	83
5.4 AM aplicada em sobressalentes na Marinha do Brasil	84
5.4.1 Critérios para aplicação da AM	85
5.4.2 Outros requisitos para aplicação da AM na Marinha	89
5.4.3 Estratégia de Implantação da AM na Marinha do Brasil	91
5.5 Conclusões sobre a aplicação da AM na Marinha do Brasil	93
6. Conclusões	94
7. Referências Bibliográficas	97

Apêndice	106
1 <i>Binder Jetting</i>	106
2 <i>Directed Energy Deposition</i>	107
3 <i>Material Extrusion</i>	108
4 <i>Material Jetting</i>	110
5 <i>Powder Bed Fusion</i>	111
6 <i>Sheet Lamination</i>	113
7 <i>Vat Photopolymerization</i>	115

Lista de figuras

Figura 1 - Alte. Farragut no laboratório de fotoscultura de Willème	20
Figura 2 - Fotos usadas na técnica de Willème	20
Figura 3 - Ilustração esquemática da patente de Blather	21
Figura 4 - Objetos construídos de material fundido por Ralph Baker	22
Figura 5 - Representação do sistema fotopolímero de Munz	23
Figura 6 - Foto esquemática do sistema de Ciraud	24
Figura 7 - Ilustração do processo proposto por Hull	25
Figura 8 - Veículo para teste de túnel de vento fabricado por SLS	26
Figura 9 - Ilustração do aparato FDM de Crump	27
Figura 10 - Ilustração do processo geral de AM	29
Figura 11 - Modelo 3d em CAD de um propulsor de navio	30
Figura 12 - Peça fabricada por AM no MV-22b e vôo teste	38
Figura 13 - Pistola fabricada por manufatura aditiva	40
Figura 14 - Componentes aditivamente manufaturados da GE	41
Figura 15 - Rim, orelhas e osso de dedo gerados por AM	43
Figura 16 - Ponte construída por AM	43
Figura 17 - Evolução dos conceitos logísticos	48
Figura 18 - Secionamento da gestão da cadeia de suprimentos	49
Figura 19 - Gráfico <i>Lean / Agile</i>	56
Figura 20 - Áreas revolucionadas pela manufatura aditiva	64
Figura 21 - Vendas de impressoras 3D nos Estados Unidos	75
Figura 22 - Modelo conceitual para obtenção	86
Figura 23 - Modelo <i>Binder Jetting</i>	107
Figura 24 - Modelo <i>Laser Engineered Net Shaping</i>	108
Figura 25 - Modelo <i>Fused Deposition Modeling</i>	109
Figura 26 - Modelo <i>Material Jetting</i>	110
Figura 27 - Modelo <i>Selective Laser Sintering</i>	111
Figura 28 - Modelo <i>Electron Beam Melting</i>	112
Figura 29 - Modelo <i>Laminated Object Manufacturing</i>	114
Figura 30 - Modelo básico de <i>Ultrasonic Consolidation</i>	114
Figura 31 - Modelo de estereolitografia	115

Lista de tabelas

Tabela 1 - Categorias de Manufatura Aditiva	32
Tabela 2 - Tecnologias AM	33
Tabela 3 - Tecnologias AM	33
Tabela 4 - Principais fabricantes de equipamentos AM	35
Tabela 5 - Empresas no Brasil que disponibilizam tecnologia AM	36
Tabela 6 - Aplicações da manufatura aditiva na <i>US Navy</i>	37

1. Introdução

A globalização, a era empresarial da competitividade e do conhecimento, os avanços na tecnologia industrial, os anseios sociais por produtos e serviços cada vez mais modernos e customizados, a velocidade das comunicações com a internet, as questões da produção sustentável defrontam as empresas e despertam o desafio pela perseguição contumaz da redução de custos de fabricação, da elevação da capacidade de adaptação ao mercado e da maior eficiência nos processos produtivos e logísticos (Lastres e Albagli, 1999; Santos, 2016).

O dinamismo do mercado, no qual a demanda está em constante transformação, muito bem se traduz na frase do autor Chris Anderson (2011), que em seu livro intitulado “*Makers: the New Industrial Revolution*” menciona que “a beleza da internet é a democratização dos meios de invenção e produção” (Anderson, 2011 apudi Silva e Vales, 2015).

Diante de tal realidade, muitas transformações vêm ocorrendo em termos de métodos complexos e combinados para previsão de demanda, de inovações em processos produtivos, de otimização na utilização de espaços de armazenagem, de modelagens avançadas para distribuição da produção, de aprimoramento nas comunicações entre os diferentes elementos da Cadeia de Suprimentos (CS), almejando a maior integração dentro da CS e tornando-a mais eficiente.

Mais além, o desenvolvimento da tecnologia de produção ultrapassou os limites do próprio “chão de fábrica”, transformando todos os elos da CS por onde fluem produtos e informações do mercado, alcançando mesmo o ambiente cotidiano do consumidor final.

Em um dado momento da história, o consumidor passou a se aproximar dos seus fornecedores (varejistas) por meio de encomendas feitas via telefone e não mais por visita à loja. Grande foi depois a revolução com a internet e a consolidação do *e-commerce*, permitindo aos consumidores pesquisarem os produtos; melhor identificar suas especificações; verificar disponibilidade e prazos de entrega (*lead-time*); encomendar e efetuar o pagamento; acompanhar o produto comprado no seu deslocamento desde o depósito onde estava estocado até o endereço de entrega. Esta revolução mudou totalmente a maneira de fazer negócios.

Hoje, observa-se uma nova tecnologia que poderia ser capaz de mudar mais uma vez o relacionamento do consumidor final com seus fornecedores. Neste momento a transformação não se daria na modernização do processo de comunicação entre estes dois entes, mas sim na possibilidade de deslocar temporalmente e geograficamente a produção, permitindo inclusive ao consumidor produzir o que deseja, por meio da impressão tridimensional ou manufatura aditiva.

De tal modo, imagine-se que a tecnologia de manufatura aditiva disponha de capacidade disruptiva que, modificando as relações comerciais, provoque nas corporações a supressão da necessidade de previsão de demanda, bastando armazenar modelos em 3D nos seus servidores de arquivos; a redução sensível na utilização de meios de transporte para distribuição da produção; a elevação do grau de satisfação do cliente em termos de agilidade de atendimento e customização de bens; e a redução de custos por simplificação de processos.

No prisma do consumidor final, as possibilidades são também atrativas ao passo que abarcam inúmeras possibilidades: disponibilidade incondicional dos itens desejados, redução nos tempos de espera, customização e participação criativa.

1.1 Marinha do Brasil

No cumprimento de sua missão institucional de preparar e empregar o Poder Naval, a fim de contribuir para a salvaguarda dos interesses nacionais, a Marinha do Brasil (MB), entre outras atividades, executa perenemente um programa de manutenção dos seus meios operativos, de modo a manter elevado o grau de prontidão da Força, sua disponibilidade para atender aos interesses da nação.

Esta Função Logística de Manutenção, conforme é definida nos manuais militares, demanda uma capacidade de busca e de aquisição de sobressalentes, no mercado, para os diversos equipamentos e sistemas presentes nos navios da MB.

Contudo, em face do diminuto grau de nacionalização dos navios, associado com um elevado grau de obsolescência por força da idade da frota, observa-se que os processos de compra de peças sobressalentes para os sistemas e equipamentos dos navios demandam prolongados períodos de tempo e, por vezes, não se consegue adquirir o sobressalente demandado, implicando em maiores atrasos com buscas por substitutos ou adaptações.

Diante do cenário em exposição, a atividade de manutenção dos meios da MB sofre com elevados custos financeiros, bem como com mau aproveitamento de recursos de toda ordem, associados à manutenção dos meios, dos quais podemos citar: mão de obra especializada, disponibilidade de espaços, disponibilidade de ferramentas especializadas e, de maneira finalística, a própria prontidão dos meios operativos.

Considerando a concepção inicial feita sobre a manufatura aditiva, vislumbra-se a possibilidade de que a manufatura aditiva, neste contexto, possa proporcionar à Marinha do Brasil a capacidade de produção de seus sobressalentes, ou parte deles, permitindo dispor deles a qualquer momento e sem, contudo, enfrentar as dificuldades de compra supracitadas, conforme os navios os demandem para reparos esporádicos ou emergenciais, ou ainda durante seus períodos de manutenção programada.

1.2 Questões e Objetivos

Defini-se manufatura aditiva como um processo de junção de materiais para produção de itens, a partir de dados de um modelo 3D, camada a camada, ao contrário dos métodos tradicionais subtrativos (ISO/ASTM 52900, 2015).

O principal objetivo desta pesquisa é identificar as potencialidades das tecnologias de manufatura aditiva e a influência sobre a gestão das CS, verificando se tais tecnologias teriam capacidade disruptiva em relação ao atual paradigma das estratégias nas cadeias de suprimentos.

Verificado o potencial disruptivo das tecnologias em questão, um objetivo secundário da pesquisa, voltado para a aplicação da manufatura aditiva, pousaria sobre a avaliação da viabilidade e da utilidade da implantação e da operação de um sistema de produção de sobressalentes para os navios da Marinha do Brasil, por meio da utilização de equipamentos de manufatura aditiva.

Um dos aspectos relevantes no caso a ser tratado se reflete sobre o *trade off* da substituição dos processos de compra atualmente aplicados pela Marinha, por meio do estabelecimento de uma capacidade própria de fabricação de peças sobressalentes, utilizando a tecnologia de *additive manufacturing*, já disponível no mercado.

Observe-se ainda a relevância para a Marinha de se manter um elevado grau de prontidão da Força, com fulcro no cumprimento de sua missão constitucional e

no atendimento dos interesses nacionais, consubstanciando assim mais um aspecto de interesse deste estudo, qual seja, a geração de capacidade produtiva para a Marinha visando à manutenção dos seus meios, priorizando a sustentação da capacidade operativa da Esquadra Brasileira.

1.3 Metodologia e desenvolvimento

A pesquisa se inicia com a verificação na literatura e em textos digitais de jornais, de revistas e de sites de centros de pesquisa, acerca do atual estado de desenvolvimento da tecnologia de manufatura aditiva, identificando métodos de aplicação da tecnologia, materiais e equipamentos utilizados, nichos de mercado onde tal tecnologia já é presente e demais informações que possam propiciar a avaliação das potencialidades de tais tecnologias.

Durante a pesquisa na literatura foi observado que há poucos documentos produzidos no Brasil que tratam sobre o assunto e menor ainda é a quantidade dos documentos de origem nacional que incluem uma análise dentro do contexto da cadeia de suprimentos. Diante do exposto, o capítulo 2, que trata especificamente sobre manufatura aditiva, apresenta um maior detalhamento da tecnologia, com figuras e tabelas, além de um apêndice ao trabalho apresentando as categorias de manufatura aditiva.

Aspectos financeiros da pesquisa se limitam a dados obtidos na literatura sobre o tema, uma vez que não foram identificados grandes investimentos no Brasil. A Marinha do Brasil ainda não dispõe de projeto para implantação de um sistema de manufatura aditiva e uma vez que os recursos da Marinha seguem a sistemática do orçamento anual da União, não há disponibilidade de recursos para testes de aplicação da tecnologia em pauta, ao que se pretende propor o devido estudo, depois de verificada a aplicabilidade e a vantagem na implantação de tais tecnologias.

No que tange à cadeia de suprimentos, neste trabalho verifica-se, na literatura acadêmica, como está se desenvolvendo o gerenciamento das cadeias de suprimentos nos mercados, distinguindo as estratégias adotadas para gestão das cadeias, bem como outros aspectos modernos que vêm influenciando a gestão das cadeias e que podem ser transformados pela aplicação da manufatura aditiva.

No que concerne à Marinha do Brasil, força militar para a qual se pretende validar a utilidade da tecnologia de manufatura aditiva, a fim de minimizar os

desafios enfrentados, intenciona-se confrontar as experiências vividas por este autor, na área de sobressalentes para os maiores da Marinha, com a pesquisa da literatura e com os documentos normativos da Marinha, em especial os que tratam sobre gestão de suprimentos, a fim de verificar o quão vantajoso é e o grau de aplicabilidade da implantação das tecnologias de manufatura aditiva na Força.

Ainda considerando o cenário da marinha, vislumbrada a aplicabilidade das tecnologias de manufatura aditiva, pretende-se estabelecer uma estratégia de implantação da manufatura aditiva, incluindo uma proposta de identificação dos sobressalentes a serem fabricados por meio de tais tecnologias.

Em face do exposto, este trabalho se desenvolve em 6 capítulos:

- Capítulo 1 - Introdução, no qual se apresenta o tema da pesquisa e os aspectos motivadores;
- Capítulo 2 - Manufatura aditiva, apontando a evolução da tecnologia de produção de objetos tridimensionais, os principais conceitos relacionados com as tecnologias de manufatura aditiva, estado atual de modernidade das tecnologias correlatas e as aplicações modernas da manufatura aditiva;
- Capítulo 3 - Cadeia de suprimentos, onde se apresenta uma breve evolução das cadeias de suprimentos, até culminar no dinamismo dos mercados atuais, seguida de uma apresentação das estratégias de gestão das cadeias de suprimentos e outros conceitos que influenciam na gestão moderna das cadeias de suprimentos;
- Capítulo 4 - Manufatura aditiva e gestão da cadeia de suprimentos, denotando as potencialidades da manufatura aditiva que a propiciam a capacidade disruptiva, confrontando tais capacidades com as estratégias de gestão das cadeias de suprimentos, bem como com outras características dos mercados modernos, de forma a concluir que a tecnologia congrega a capacidade disruptiva proposta no estudo;
- Capítulo 5 - Manufatura aditiva e Marinha do Brasil, momento no qual se pretende examinar as cadeias de suprimentos de sobressalentes da Marinha e verificar a possibilidade, assim também as vantagens, da aplicação da manufatura aditiva na Marinha do Brasil, propondo sua implementação;
- Capítulo 6 - Conclusões, para apresentação das considerações finais do estudo, bem como propor outros estudos dentro desta área da tecnologia.

1.4 Resultados Esperados

Com a conclusão da pesquisa proposta espera-se validar a tese de que a tecnologia em estudo possa gerar modificações no mercado e nas formas de produção, bem como influenciar transformações nas cadeias de suprimentos.

Enseja-se ainda confirmar que é vantajosa a sua aplicação na Marinha, ante ao atual cenário no qual se encontra a cadeia de suprimentos de sobressalentes daquela Força, no que tange a disponibilidade de peças sobressalentes para os seus navios.

2. Manufatura aditiva

2.1 Introdução

Novas abordagens aos modernos métodos de produção vêm despontando com o advento da manufatura aditiva (*Additive Manufacturing* - AM), nos últimos anos (Almeida e Williams, 2010). Esta tecnologia vem, cada vez mais, ganhando visibilidade não apenas nas indústrias, mas nos mercados e em todas as áreas da sociedade (Mohr e Khan, 2015).

O potencial de transformação que se tem perspectiva, oriundo da tecnologia de AM, é tamanho que diferentes autores vêm mergulhando nesta questão, em diversas áreas da indústria, da construção, do comércio e até da sociedade.

A afirmação acima se torna mais consistente quando, ao procurar pela literatura associada ao tema, encontra-se o seguinte título de artigo publicado pela revista *Business Horizons*, “*3-D printing: The new industrial revolution*” (Berman, 2012). Outros autores apontam para a mudança de paradigma que traz em seu âmago a própria Terceira Revolução Industrial (Gebler et al, 2014; Huang et al, 2013; Pandolfell, 2012). Pode ser a própria entrada para uma nova era, tão disruptiva para o setor manufatureiro como o foi a primeira Revolução Industrial (Petrick e Simpson, 2013); com potencial tão considerável que poderia revolucionar os princípios estabelecidos por aquela Revolução (Manners-Bell e Lyon, 2012). Outros estudos associam a AM com Tecnologias de Nivelamento Radical (*Radical Leveling Technology*) que, conforme descrevem os estudos, são tecnologias que não apenas são disruptivas sobre um mercado específico ou uma determinada tecnologia, mas têm capacidade de romper e transformar um amplo leque de processos e tecnologias, enquanto, significativamente, impactam sobre a sociedade e a cultura (Snow, 2015).

É possível perceber ao menos três características presentes na AM que são encontradas em uma tecnologia emergente: a grande velocidade na qual a tecnologia se desenvolve, no caso da AM, notoriamente na última década e em termos de capacidade e sofisticação. A tecnologia possui um baixo preço de entrada, uma vez que conforme vai ganhando popularidade e mais refinamentos são feitos, aumentam as opções para desenvolvimento de equipamentos mais baratos. Existência de *stakeholders* atuando simultaneamente em diferentes indústrias e nichos de mercado, identificando-se implicações da AM na indústria,

no sistema legal (questão dos direitos autorais, que não faz parte do escopo deste trabalho), no comércio para usuários finais ou outras empresas, área médica e até na área da segurança nacional (Windle, 2015).

Mais além, o próprio presidente dos Estados Unidos, Barack Obama, em seu discurso de 15 minutos sobre o Estado da União, em 2013, menciona que a manufatura aditiva tem potencial para mudar a maneira como fazemos quase tudo (Cunningham et al, 2015; Paben e Stephens, 2015).

Diante do exposto, o presente capítulo inicia com um relato histórico, desde as primeiras réplicas 3D até os equipamentos de manufatura aditiva. Em seguida, são apresentadas definições e características da AM, bem como as categorias e tecnologias de AM. Ao final, são expostas diversas aplicações da AM na atualidade.

2.2 Antecedentes

Nesta seção pretende-se graduar temporalmente eventos e acontecimentos correlacionados com a evolução da tecnologia de manufatura aditiva até a grande disparada no seu desenvolvimento, a partir dos anos 80.

Por mais recente que seja a expansão tecnológica, com o boom exponencial mencionado pela Lei de Moore (Ray, 2013), os primeiros registros que se tem sobre a utilização de técnicas para criação de objetos por meio da tecnologia tridimensional remontam à segunda metade do século XIX, em conformidade com as escriturações constantes na revisão da literatura de registros de patentes nos Estados Unidos (Bourell et al, 2009; Bourell, 2016; Zhai et al, 2014).

Os ensaios iniciais na criação de réplicas de objetos em três dimensões foram conduzidos pelo artista francês François Willème, que demonstrou sua técnica, com certo sucesso para a época, em Paris, no ano de 1860, desenvolvendo a fotoscultura.

Willème combinou a então recém inventada fotografia, com princípios de ótica e escultura, criando réplicas tridimensionais exatas de objetos e até pessoas. Em uma câmara circular ele acomodava um objeto em uma plataforma circular cercada por 24 câmeras fotográficas, dispostas, de maneira equânime, a cada 15° da sala, perfazendo uma cobertura de 360° (Zhai et al, 2014). Eram efetuadas as 24 fotografias simultaneamente e os perfis observados em cada foto eram convertidos em silhuetas cilíndricas, esculpidas por um artesão, cada uma

representando 1/24 do objeto replicado, e que então eram ajuntadas para formar a réplica 3D do objeto (Bourell et al, 2009; Bourell, 2016).



Figura 1 - Almirante David Farragut, herói da Guerra Civil Norte Americana, posando no laboratório de fotoscultura de François Willème, em 1860 (Bourell, 2016).



Figura 2 - Fotos de diferentes ângulos usadas na técnica de Willème (Friedell, 2016).

Nesta mesma vertente de desenvolvimento de réplicas tridimensionais, porém naquele momento utilizando o princípio de sobreposição de camadas, embora antiquado para os padrões atuais, em abril de 1890 e patenteado em maio de 1892, Joseph E. Blather concebeu uma aplicação *layer-by-layer* para a elaboração de mapas topográficos em alto relevo (Bechthold et al, 2015; Cunningham et al, 2015).

A invenção de Blather consistia na criação de ferramentas 3D que convertiam fotos aéreas em moldes para mapas topográficos em alto relevo, por meio de corte e empilhamento (Bourell, 2016). Era feito por meio da impressão de linhas de contorno topográfico, retiradas de fotos aéreas, sobre placas de cera, de acordo com cada linha de igual elevação topográfica. Depois de desenhadas, as placas eram cortadas no formato dos contornos, empilhadas e ajustadas, de modo a formar seções de moldes tridimensionais de cera da superfície positiva (macho) e da superfície negativa (fêmea) do relevo indicado pelos contornos. Concluídos ambos os moldes, pressionava-se papel de impressão entre os dois moldes, macho e fêmea, para gerar o mapa em alto relevo (Baldock, 2016).

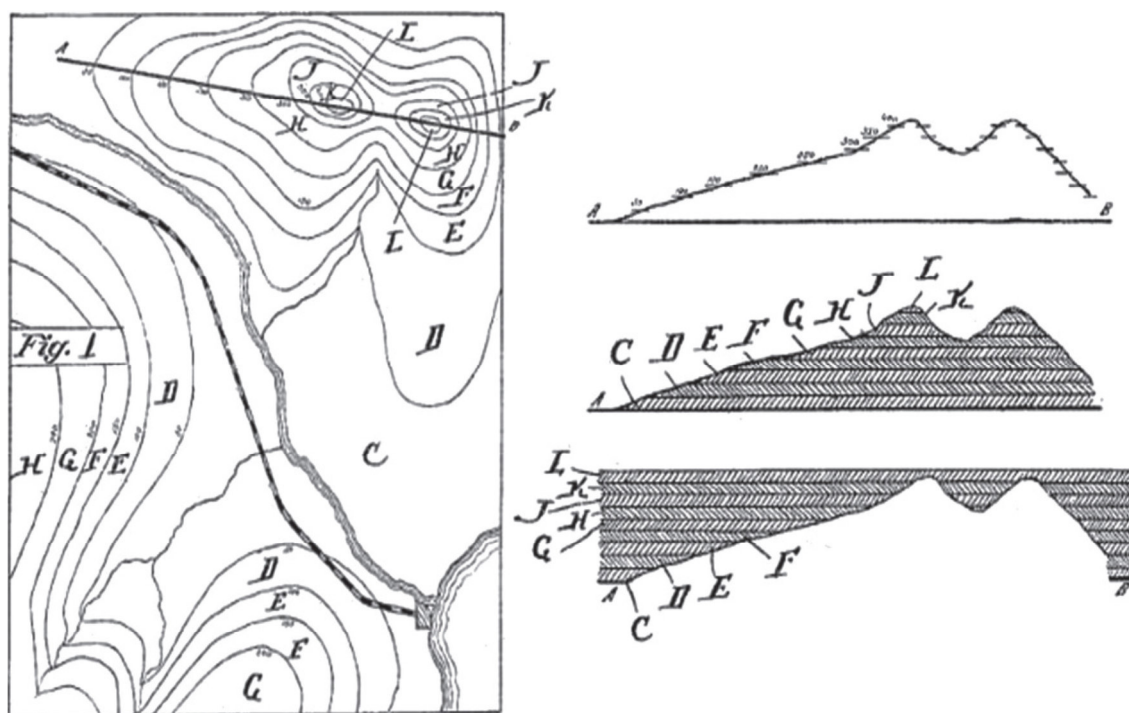


Figura 3 - Ilustração esquemática da patente de Blather. À esquerda um mapa topográfico plano e à direita o mapa em alto relevo e os modelos de cera (macho e fêmea) utilizados para sua confecção (Bourell, 2016).

Anos à frente, em 1925, observou-se a implementação de uma nova técnica para desenvolvimento de objetos tridimensionais por manufatura aditiva. Esta técnica baseava-se no depósito de materiais, tendo sido primeiramente patenteada por Ralph Baker (Bourell, 2016).

Genericamente, o princípio desta técnica calcava-se na utilização de um aparelho aplicador para depositar algum tipo de material moldável, maleável, a uma taxa constante, e na movimentação do próprio aparelho ou do objeto sendo moldado, de modo a criar componentes tridimensionais. Especificamente no caso

do processo desenvolvido e patenteado por Baker, ele utilizava uma cabeça de soldagem móvel para criar componentes de metal fundido (Bourell, 2016). Para fabricar receptáculos ou contentores com formatos ornamentais ou para utilidades em geral, ele identificou que o metal derivado de um eletrodo de metal fundível, pela passagem de uma corrente elétrica, poderia ser depositado em camadas superpostas de modo a formar objetos para os mais diversos fins. Para tanto, sua invenção englobava a cabeça de soldagem, incluindo o eletrodo fundível, um equipamento de manipulação para movimentar a cabeça de soldagem com precisão e uma base não aderente, onde era depositado o material fundido que daria forma aos objetos a serem produzidos (Baker, 1925).

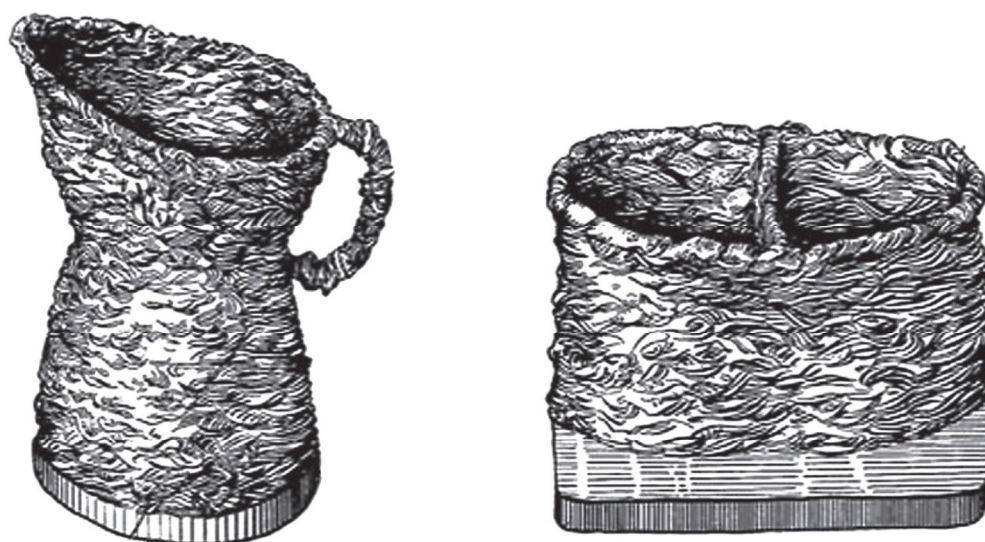


Figura 4 - Objetos metálicos construídos sobre pratos por meio de depósito de material fundido desenvolvido por Ralph Baker (Bourell, 2016).

A topografia tridimensional e a fotoscultura voltaram a destaque em 1935, no Japão, por meio de um método que combinava ambas as técnicas, desenvolvido por Morioka (Baldock, 2016; Bourell et al, 2009). Este método usava faixas de luz branca e de luz preta, estruturados de tal forma que criavam linhas de contorno nos objetos, fotograficamente. Organizando as linhas em folhas de papel era possível fazer o corte e empilhamento para formar o objeto desejado ou poderiam ser projetadas sobre material apropriado para que o objeto copiado fosse esculpido.

Propondo um sistema de foto emulsão com capacidade de produzir artigos tridimensionais, a partir do escaneamento transversal de objetos, camada a camada, em 1951, Munz introduziu o princípio da estereolitografia moderna (Monteiro, 2015; Paben e Stephens, 2015). Conforme inscrito na patente, seu

equipamento era descrito como um foto gravador de fenômenos, representáveis em três dimensões (Munz, 1956). O ponto de partida do funcionamento do sistema era a aplicação de um fotopolímero transparente em um molde representativo de uma seção reta de um objeto escaneado. Era então comprimido por um mecanismo pistão, juntamente com a adição de um agente solidificador. Com a aplicação de uma nova camada de fotopolímero transparente, repetindo o ciclo supracitado, era sequencialmente criada cada camada do objeto, até a sua conclusão em estado bruto, que então poderia ser manualmente esculpido ou fotoquimicamente lapidado para corrigir as pequenas imperfeições.

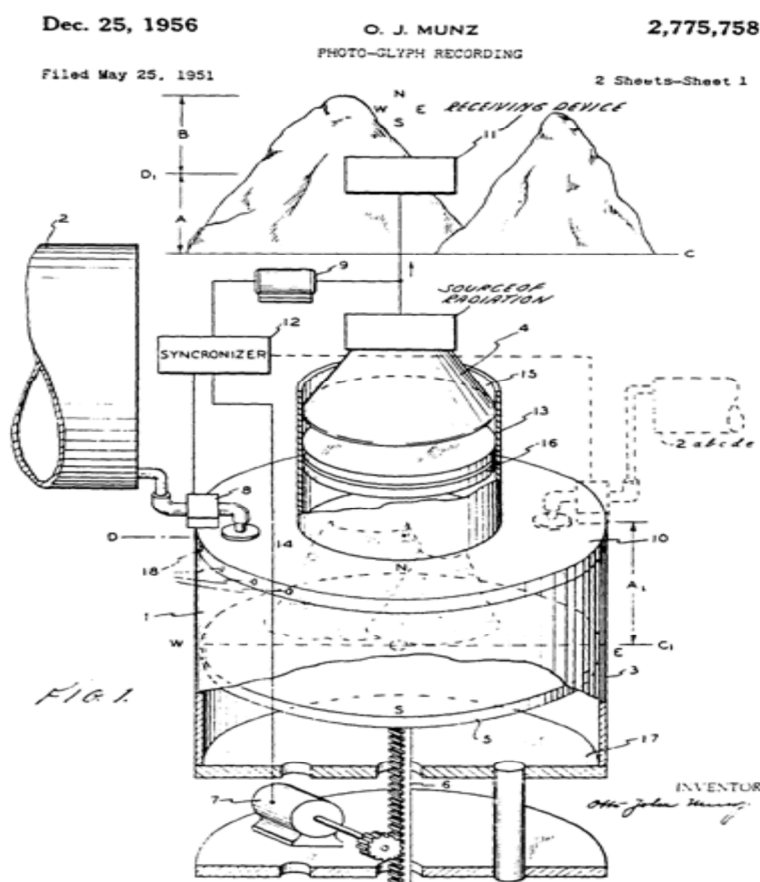


Figura 5 - Representação esquemática do sistema fotopolímero patenteado por Munz (Baldock, 2016)

Anos depois, em 1972, na França, surgiu uma nova tecnologia apresentada por Ciraud, sendo ele o primeiro a fabricar objetos tridimensionais utilizando material pulverizado, que poderia ao menos ser parcialmente derretido, por meio de uma fonte de calor (um laser, um canhão de elétrons ou um canhão de plasma) (Zhai et al, 2014). Foi a origem do processo moderno de Depósito Direto de Material (Bourell et al, 2009). Para consecução do método de Ciraud, sobre uma

plataforma, pequenas partículas de material, em forma de pó, eram aplicadas em uma base matriz, por meio da gravidade, de força magnética ou eletrostática, ou até mesmo, por meio de um bico aplicador. Ao mesmo tempo em que eram depositadas sobre a matriz, tais partículas eram submetidas a descargas de energia de origem laser, ou de feixe de elétrons, ou raios de plasma, e eram derretidas por meio do calor. Derretendo, os materiais aderiam uns aos outros, formando as camadas do objeto, que se faziam sobrepostas de acordo com o movimento descendente da plataforma onde estava a matriz.

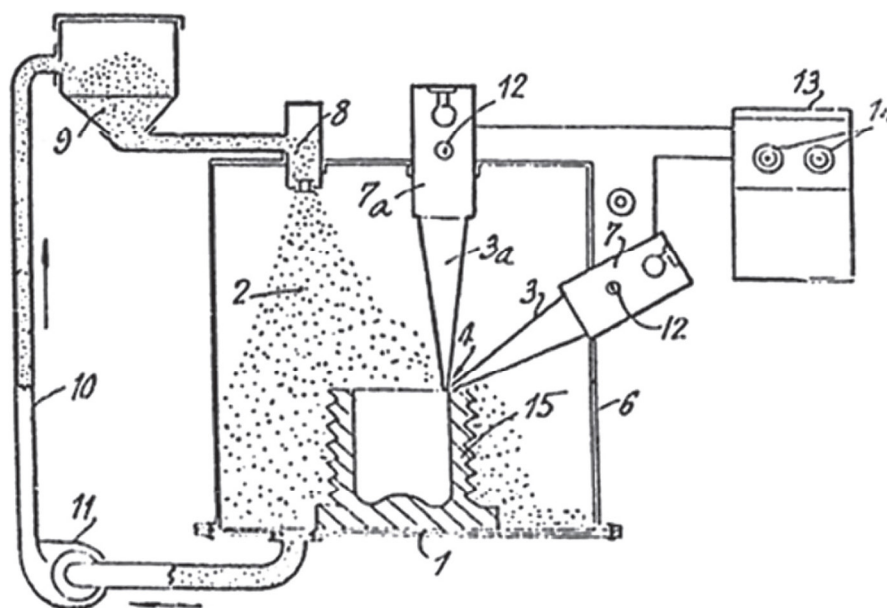


Figura 6 - Foto esquemática do sistema baseado em pó e laser de Ciraud (Baldock, 2016)

Nos anos 80, computadores, lasers, placas controladoras e muitas outras tecnologias haviam atingido um grau de sofisticação tal que passou a ser possível criar equipamentos capazes de concretizar os modelos dos anos anteriores de forma física (O'Connor, 2014). Embora Hideo Kodama tenha publicado o primeiro artigo sobre um sistema de prototipagem rápida por fotopolímero em 1981 (Bechthold et al, 2015), as primeiras patentes de manufatura aditiva foram preenchidas na França, no Japão e nos Estados Unidos em 1984 (O'Connor, 2014).

A grande impulsão para a manufatura aditiva veio em 1986, com a publicação da patente (aplicada em 1984) da primeira tecnologia para comercialização, o equipamento de estereolitografia (*Stereolitography Aparatus* - SLA), desenvolvido por Charles W. Hull, que também fundou a Companhia 3D Systems, visando à produção desse novo equipamento (Baldock, 2016; Bechthold

et al, 2015; Huang et al, 2013; Klein et al, 2015; Mackley, 2014; Maxwell, 2012; O'Connor, 2014; Paben e Stephens, 2015; Ray, 2013; Zhai et al, 2014). Este momento é considerado como o início da AM como é conhecida modernamente, tendo sido o primeiro equipamento de estereolitografia comercializado em 1988 (Marquardt e Zheng, 2016).

A estereolitografia patenteada por Hull, seguindo princípios de Munz (1956), usava um sistema laser ultravioleta para seletivamente endurecer uma camada de plástico em um vasilhame contendo o material fotopolímero em sua forma líquida. O feixe laser ultravioleta traçava a forma da seção reta de um objeto contido em um arquivo de computador do tipo *computer aided design* (CAD), na superfície líquida do fotopolímero, solidificando-a por sobre uma estrutura de plataforma base, mergulhada no fotopolímero líquido. A plataforma suavemente mergulhava para cobrir totalmente a superfície solidificada e então era levantada para que lâminas pudessem limpar o excesso de material e garantir uma camada adicional precisa sobre o objeto em formação. O objeto era novamente mergulhado para prosseguir com o mesmo processo até a sua conclusão.

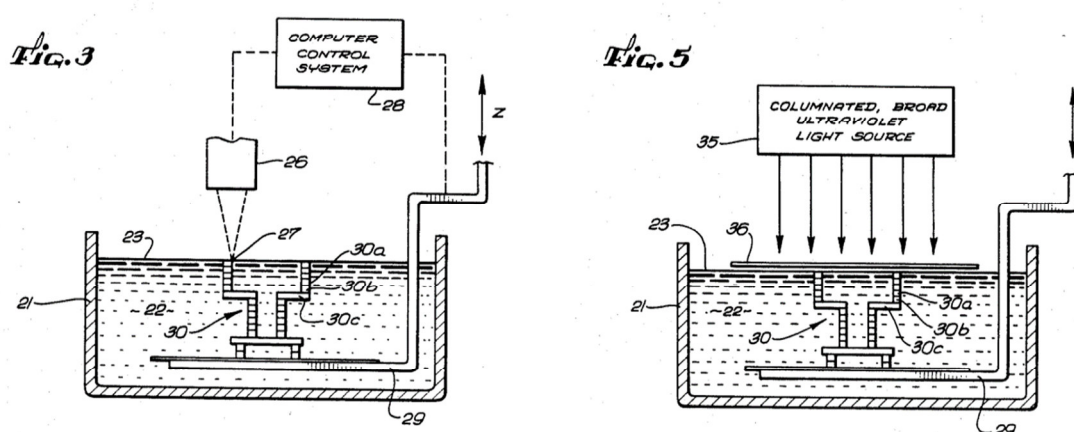


Figura 7 - Ilustração do processo proposto por Hull em sua patente (Hull, 1986)

Concomitante à estereolitografia de Hull, Carl R. Deckard, graduando da universidade do Texas, apresentou ao mundo sua tecnologia *Selective Laser Sintering* (SLS), que se tornaria em uma das principais tecnologias de AM até os dias atuais (Paben e Stephens, 2015). Deckard preencheu em 1986 sua patente intitulada: “Método e equipamento para produção de peças por sinterização seletiva”, tecnologia que permitiu o uso na AM de materiais que não apenas

polímeros, tais quais metais, termoplásticos, cerâmicas, além de poder utilizar, também, polímeros de diversas naturezas (Bechthold et al, 2015; Deckard, 1989; Mackley, 2014; Strickland, 2016). Adotando fundamentos similares aos da tecnologia de Ciraud (1972), o equipamento incluía um computador controlando os movimentos de uma fonte de laser, de modo a direcionar a energia sobre material pulverizado acomodado em um contentor, sinterizando-o em camadas, no formato do objeto desejado. Deckard fundou a empresa Nova Automation, que logo seria renomeada para DTM Corporation, em alusão ao termo *desktop manufacturing* (Bechthold et al, 2015). Os primeiros modelos foram disponibilizados ao mercado entre 1989 e 1992 pela DTM, que em 2001 foi comprada pela 3D Systems (Santos et al, 2006).

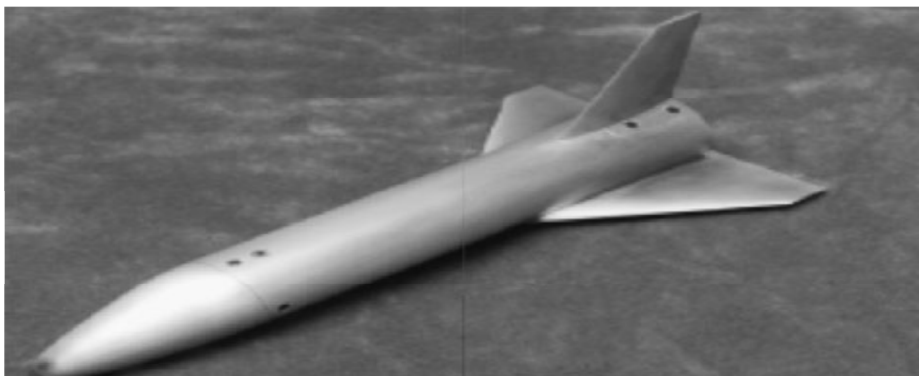


Figura 8 - Veículo para teste de túnel de vento fabricado por SLS (Guo e Leu, 2013)

Finalmente, em outubro de 1989, S. Scott Crump, por meio da empresa Stratasys, apresenta ao mundo seu equipamento de impressão tridimensional que, a partir de um desenho em arquivo CAD, usava uma cabeça dispensadora com mobilidade em três eixos, alimentada com material líquido que solidifica à determinada temperatura (Crump, 1992). A aparência desse aparato era similar ao de uma pistola de cola quente, computadorizadamente automatizada, presa a um braço mecânico.

Tratava-se da tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM), uma das mais proeminentes nos dias atuais (Marquardt e Zheng, 2016), trazendo conceitos já introduzidos por Baker (1925), complementados com o uso de tecnologias mais avançadas, como a computação e a arte de desenho 3D digital.

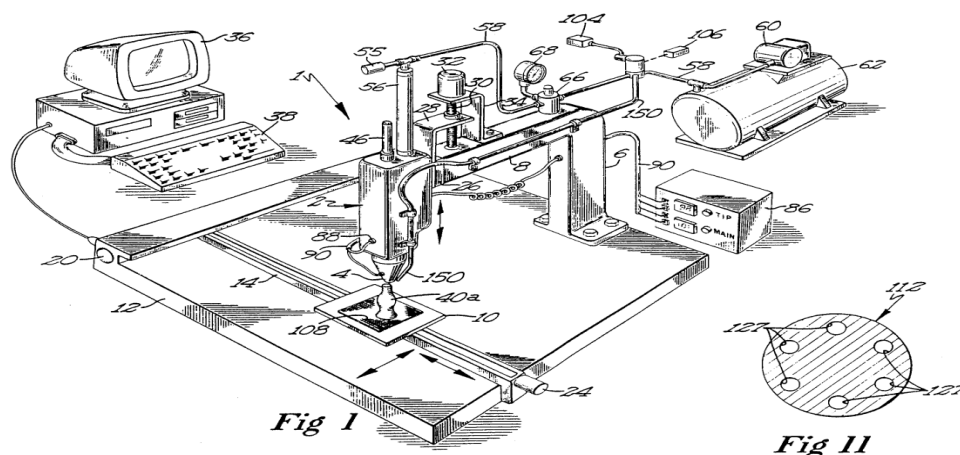


Figura 9 - Ilustração do aparato FDM desenvolvido por Crump em sua patente (Crump, 1992)

2.3 Definições

Nos seus primórdios, a tecnologia de manufatura aditiva era vista como sendo aquela desenvolvida por meio de grandes máquinas industriais, enquanto a impressão tridimensional era feita em menores escalas (Marquardt e Zheng, 2016). Na literatura atual os autores muitas vezes consideram que os dois termos se tratam de palavras intercambiáveis ou substituíveis entre si, uma vez que, na sua essência, não há diferença significativa nos princípios associados à tecnologia envolvida (Cotteleer, 2014; Cunningham et al, 2015). Para efeitos do presente estudo, o termo “manufatura aditiva” será empregado genericamente para as tecnologias em questão. Outrossim, nos momentos nos quais venha a ser relevante a denominação distinta de cada um dos termos, considerando o ambiente onde sejam criados objetos por meio das tecnologias abarcadas na pesquisa, serão adotados os conceitos de que a impressão tridimensional, coloquialmente tratada como impressão 3D, é aquela realizada pelo usuário final, normalmente em nível doméstico, ao passo que manufatura aditiva é aquela desenvolvida pelas empresas e corporações nas suas atividades produtivas, passível de ser empregada para atendimento a pedidos de clientes ou em seus processos internos.

Manufatura aditiva (AM) pode ser entendida como sendo uma tecnologia que usa um processo aditivo, para fabricar objetos tridimensionais, a partir de um modelo digital (Nyman e Sarlin, 2014). Releva apontar que, a AM descreve alguma tecnologia que constrói objetos 3D, pela adição de camada sobre camada, considerando a possibilidade de emprego de diversos tipos de materiais, tais quais plásticos, metais, híbridos de metais, concretos, gessos, resinas, vidros, polímeros,

cerâmicas, areia, tecidos, madeira, papéis ou até mesmo alimentos e tecidos humanos (Amazing'sadditivemanufacturing.com (a); Appleton, 2014; Sin, 2016; Zhai et al, 2014). Finalmente, AM não se limita a uma única tecnologia, mas a uma diversidade de tecnologias que convertem dados digitais de modelagem 3D em produtos físicos, camada a camada, com certa rapidez e facilidade; operando em diferentes velocidades, espessuras de camadas, variedade de materiais, acurácia e custos (Morgan e Prentiss, 2014).

Considerando que existe um sortimento de tecnologias que podem ser consideradas como AM, observa-se que tal classificação depende de três especificidades para ser apropriada: o equipamento deve ter capacidade própria de produzir objetos tridimensionais; utilizar um modelo 3D digital, normalmente STL oriundo de CAD (explicação a diante), como referência para a produção dos objetos; e a fabricação deve ser realizada por camadas consecutivas.

As tecnologias AM modernas, então, precisam dispor de quatro recursos para consecução da criação do objeto tridimensional: um sistema computadorizado, um software de edição de *designs* tridimensionais, um equipamento com a capacidade de impressão por camadas e o insumo apropriado para formar as camadas do objeto a ser criado.

Não obstante as especificidades e recursos recém citados, os princípios centrais da AM são os mesmos em todas as tecnologias (Sin, 2016). O início de todo processo está na utilização de modelos digitais tridimensionais, editados a partir de escaneamento de objetos reais ou criados e editados por meio de *softwares* específicos para tal finalidade. As informações sobre cada camada do objeto e ser produzido são enviadas para o equipamento de impressão, a uma resolução medida pela espessura de cada camada. O equipamento realiza a impressão das camadas sequencialmente, utilizando insumos líquidos, laminados, em forma de arame ou pulverizados. Para trabalhar os insumos, os equipamentos são providos de uma fonte de energia térmica ou de um reagente químico que atue no insumo e viabilize fundir as camadas sucessivas (Nyman e Sarlin, 2014).

Ressalta-se que não há necessidade de reconfiguração do equipamento para cada produção, uma vez que basta que o modelo digital seja modificado para que seja possível imprimir novos itens.

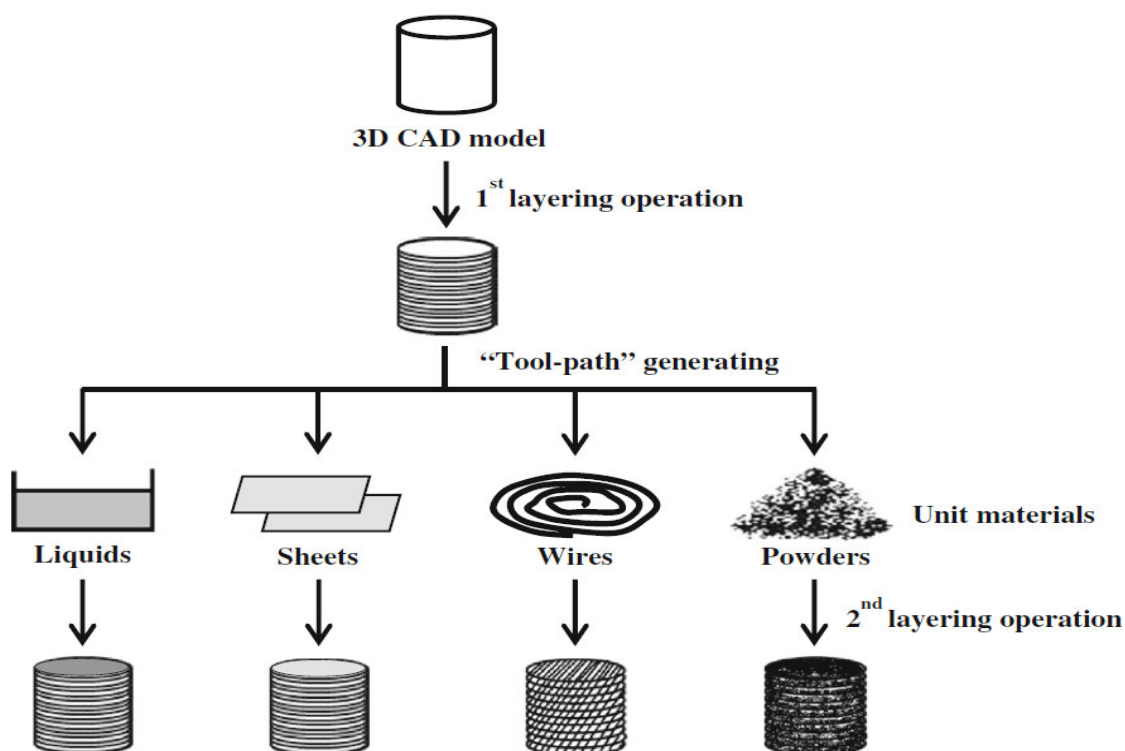


Figura 10 - Ilustração do processo geral de AM (Zhai et al, 2014).

A modelagem tridimensional computadorizada é feita com o uso de arquivos do tipo *Computer Aided Design* (CAD). CAD é uma aplicação que tem capacidade de representar produtos físicos através de representações triangulares, com o intuito de localizar e replicar formas reais, seja em duas ou em três dimensões (Kenney, 2013). Em função de permitir que o objeto seja rotacionado em diferentes eixos e que seja visualizado por diferentes ângulos de visada, a modelagem 3D em CAD possibilita o aperfeiçoamento da qualidade do desenho, reduzindo custos e tempos de desenvolvimento, resultando em modelos precisos, fáceis de serem replicados.

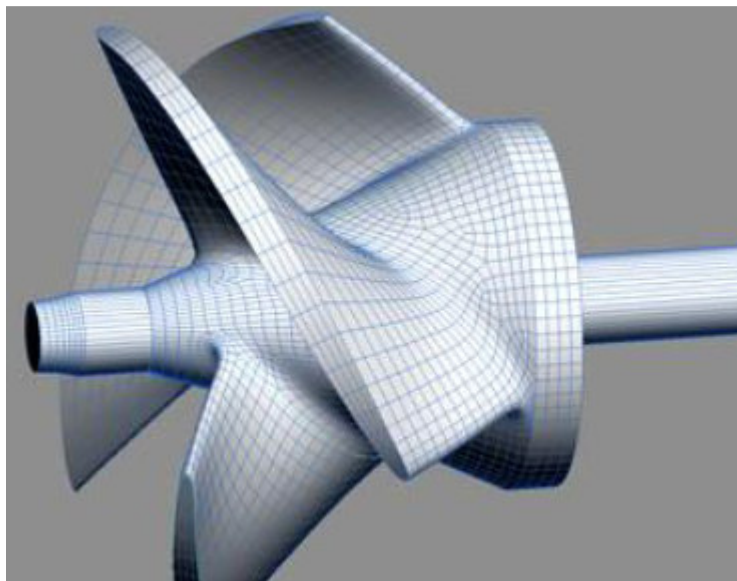


Figura 11 - Modelo 3d em CAD de um propulsor de navio (Kenney, 2013)

O modelo CAD é então convertido em um arquivo do tipo STL, que significa *stereolithography*, *Standard Triangulation Language* ou *Standard Tessellation Language*, e que foi desenvolvido em 1987 pela empresa 3D Systems, para servir de base para os processos de estereolitografia (Wong e Hernandez, 2012). A importância de se utilizar um arquivo STL na AM é que neste formato o modelo 3D é fatiado em inúmeras camadas, por sobre sua superfície, através de sua seção reta, permitindo a impressão de cada uma. Por esta propriedade, o formato STL é o formato padrão para praticamente todas as tecnologias de manufatura aditiva (O'Connor, 2014; Wong e Hernandez, 2012). Note-se que, mesmo sendo usado pela maioria das tecnologias AM, o formato STL nunca foi reconhecido como um padrão oficial por qualquer organização de padronização (ISO/ASTM 52900, 2015).

As primeiras aplicações modernas da AM, a partir dos anos 80, foram direcionadas para prototipagem rápida de produtos e foram apenas em materiais plásticos. Desde então as tecnologias de manufatura aditiva vêm se desenvolvendo para diferentes finalidades e aspectos, em especial no que tange aos métodos de fabricação empregados (mantendo-se os princípios já citados) e ao tipo de material empregado (Khajavi et al, 2014).

De tal modo, identificam-se diversos tipos de tecnologias diferentes de AM, dentre diferentes categorias de processos. Há casos nos quais a mesma tecnologia é tratada por diferentes nomes no mercado. Por exemplo: a empresa Stratasys define sua tecnologia AM como *Fused Deposition Modeling* (FDM); já

a RepRap Project denomina a mesma tecnologia por *Fused Filament Fabrication* (FFF); ao passo que a 3D Systems usa o termo *Plastic Jet Printing* (PJP) (Cunningham et al, 2015). Por vezes estas denominações diferentes para o mesmo tipo de tecnologia têm fundo comercial, uma vez que empresas alegam ter desenvolvido a respectiva tecnologia, buscando angariar patentes, bem como evitar custos com *royalties* para outras empresas.

Por consequência, estudos associados aos nichos de mercado que utilizavam as tecnologias AM acabavam por ser mais complicados de se concretizarem, tamanha variedade de conceitos para tecnologias iguais ou semelhantes.

Diante disso, buscando padronizar as nomenclaturas aplicadas a AM, a ASTM International, em 2012, publicou uma lista de termos chamada *Standard for Additive Manufacturing Technologies*, no qual definiu “termos, nomenclaturas e abreviaturas associados com tecnologias de manufatura aditiva em um esforço de padronizar a terminologia usada por usuários, produtores, pesquisadores, educadores, imprensa e outros” (ASTM F2792 12a, 2012).

Dentro das categorias definidas pela ASTM, o equipamento a ser utilizado e o tipo de insumo a ser trabalhado vão diferir conforme as tecnologias empregadas, que serão descritas a diante.

2.4 Categorias e tecnologias de manufatura aditiva

Conforme já mencionado, a ASTM, por meio do seu comitê ASTM F-42 definiu terminologias padrões para as tecnologias associadas com AM. Foi estipulado que estas terminologias devem ser revisadas em uma base trienal (ASTM F2792 12a, 2012), tendo sido a última revisão concluída em dezembro de 2015, por um trabalho realizado combinadamente pela ASTM e pela *International Organization for Standardization* (ISO), que gerou a publicação *Additive manufacturing - General principles - Terminology* (ISO/ASTM 52900:2015).

Ambas as normas, ASTM F2792 12a e ISO/ASTM 52900:2015, contemplam as mesmas categorias de processos AM, que são enumeradas na tabela 1 desta dissertação de mestrado.

Tabela 1 - Categorias de Manufatura Aditiva (Appleton, 2014)

ASTM Additive Manufacturing Process Categories	
Category	Short Description
Binder Jetting	Liquid bonding agent is selectively deposited to join powder materials
Directed energy deposition	Focused thermal energy is used to fuse materials by melting as they are deposited
Material extrusion	Material is selectively dispensed through a nozzle or orifice
Material jetting	Droplets of build material are selectively deposited
Powder bed fusion	Thermal energy selectively fuses regions of a powder bed
Sheet lamination	Sheets of material are bonded to form an object
Vat photopolymerization	Liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization

A norma ISO/ASTM (2015) enumera categorias de processos AM, contudo não lista as tecnologias atuais, enquadradas em cada categoria, tampouco os materiais passíveis de serem aplicados em cada processo, o que efetivamente depende da tecnologia aplicada.

Citações às diversas tecnologias são encontradas nas diferentes literaturas, fazendo seu enquadramento nas categorias padronizadas pela norma ISO/ASTM (2015).

Tabela 2 - Tecnologias AM (Cunningham et al, 2015; Paben e Stephens, 2015)

Technology	AM process	Typical materials
Stereolithography	Vat polymerization	Liquid photopolymer, composites
Digital light processing	Vat polymerization	Liquid photopolymer
Multi-jet modeling (MJM)	Material jetting	Photopolymers, wax
Fused deposition modeling	Material extrusion	Thermoplastics
Electron beam melting	Powder bed fusion	Titanium powder, cobalt chrome
Selective laser sintering	Powder bed fusion	Paper, plastic, metal, glass, ceramic, composites
Selective heat sintering	Powder bed fusion	Thermoplastic powder
Direct metal laser sintering	Powder bed fusion	Stainless steel, cobalt chrome, nickel alloy
Powder bed and inkjet head printing	Binder jetting	Ceramic powders, metal laminates, acrylic, sand, composites
Plaster-based 3D printing	Binder jetting	Bonded plaster, plaster composites
Laminated object manufacturing	Sheet lamination	Paper, plastic, metal laminates, ceramics, composites
Ultrasonic consolidation	Sheet lamination	Metal and metal alloys
Laser metal deposition	Directed energy deposition	Metals and metal alloys

Tabela 3 - Tecnologias AM (Poulsen, 2015)

METAL/POLYMER	
Powder Bed Processes	
1) Powder Bed Fusion AM process in which thermal energy selectively fuses regions of successive layers of powdered raw material <ul style="list-style-type: none"> • Laser Processes <ul style="list-style-type: none"> ◦ Selective Laser Melting (SLM) METAL ◦ Selective Laser Sintering (SLS) POLYMER ◦ Selective Mask Sintering (SMS) METAL • Electron Beam Melting (EBM) METAL 	
2) Binder Jetting AM process in which a liquid bonding agent is selectively deposited to join powdered raw materials <ul style="list-style-type: none"> • Powder Bed Binder Jetting (POLYMER) • 3DPrinting (METAL) 	
3) Directed-Energy Deposition AM process in which focused thermal energy fuses raw materials by melting as they are being deposited <ul style="list-style-type: none"> • Powder Feed (METAL) • Wire Feed (METAL) 	
POLYMER	
4) Vat Photopolymerization AM process in which a liquid raw material in a vat is selectively cured by light activated polymerization <ul style="list-style-type: none"> • Stereolithography (SLA) • Flash Curing • Film Transfer Imaging (FTI) 	
5) Material Extrusion AM process in which raw material is selectively dispensed through a nozzle or orifice <ul style="list-style-type: none"> • Fused Deposition Modeling (FDM) 	
6) Material Jetting AM process in which droplets of raw material are selectively deposited <ul style="list-style-type: none"> • Drop-on-Demand (DoD) • Multijet Modeling 	
OTHER (typically paper, sometimes metal or polymer)	
7) Sheet Lamination AM process in which sheets of raw material are bonded to form an object. <ul style="list-style-type: none"> • Ultrasonic Consolidation (UC) • Adhesive Bonding 	

Uma descrição mais detalhada de cada categoria de processo de manufatura aditiva, bem como apresentação de algumas das principais tecnologias aplicadas em cada uma delas, está disponível no apêndice a esta dissertação.

2.5 Estado atual e aplicações

Desde os anos de 1980, quando ganhou grande impulso, até os dias atuais, a manufatura aditiva deixou de ser apenas uma ferramenta para prototipagem rápida e vem passando a fazer parte de inúmeras atividades do dia a dia, sendo aplicada em diversos e variados nichos de mercado.

AM vem angariando cada vez mais força na indústria, para produção de componentes; salvando vidas pela produção de implantes e próteses; tornando-se cada vez mais disponível, podendo ser encontrada no comércio regular; enfrentando questões de direitos autorais (o que não faz parte do escopo deste estudo, que se concentra no potencial disruptivo da tecnologia em pauta); incrementando sua presença em estudos e literatura científica enquanto os preços continuam em queda (Windle, 2015).

De acordo com o relatório 2016 da Wohlers Associates, reconhecida como uma das empresas de consultoria líder em manufatura aditiva no mundo, a indústria AM cresceu mais de um bilhão de dólares ao longo do ano de 2015, atingido um valor global de mais de 5.1 bilhões de dólares (Amazing'sadditivemanufacturing.com(b)).

A lista de materiais já utilizados em manufatura aditiva encontra-se consideravelmente volumosa, contra a visão de que apenas plásticos e polímeros poderiam ser trabalhados por AM. Uma das citações mais completas é a que foi apresentada no Additive Manufacturing SYMPOSIUM 2014 que inclui: poliestireno, ABS (plástico), aço, alumínio, cobre, níquel, cerâmicas, alumina, zircônio, papel, titânio, ligas de cromo cobalto, poliuretanos, náilon, areia, epóxis, policarbonatos, concretos, comida, vidro, argila, fibras de carbono e até células vivas (Cotteleer, 2014).

Muitas empresas fabricantes de equipamentos AM surgiram e desenvolveram diferentes tecnologias de manufatura aditiva, conforme já apresentado nas seções anteriores.

A tabela 4 apresenta uma relação das principais empresas fabricantes, na atualidade, de equipamentos com tecnologia AM, dentro das categorias de processos da ISO/ASTM 52900:2015.

Tabela 4 - Principais fabricantes de equipamentos AM (traduzido de KENNEY, 2013)

Processo	Companhias	Materiais	Nicho
Vat photopolymerization	Photopolymerization 3D Systems (EUA)	fotopolímeros	prototipagem
	Envisiontec (Alemanha)		
Material jetting	Objet (Israel)	polímeros	prototipagem
	3D Systems (EUA)	ceras	moldagem
	SolidScape (EUA)		
Binder jetting	3D Systems (EUA)	polímeros e metais	prototipagem
	ExOne (EUA)	areia para fusão	moldagem
	Voxeljet (Alemanha)		peças
Material extrusion	Stratasys (EUA)	polímeros	prototipagem
	Bits From Bytes (Reino Unido)		
	RepRap Polymers (EUA)		
	EOS (Alemanha)		
Powder bed fusion	3D Systems (EUA)	polímeros e metais	prototipagem
	Arcam (Suécia)		peças
Sheet lamination	Fabrisonic (EUA)	papel e metais	prototipagem
	Mcor (Irlanda)		peças
Directed energy deposition	Optomec (EUA)	metais	reparos e peças
	POM (EUA)		

No Brasil existe um certo número de empresas que disponibilizam sistemas de manufatura aditiva e impressão tridimensional. Na tabela 5 apresenta-se uma relação das principais empresas no Brasil que oferecem sistemas AM, bem como os tipos de tecnologias dos equipamentos que disponibilizam.

Após a tabela 5, são denotadas algumas das principais aplicações modernas da tecnologia de manufatura aditiva.

Tabela 5 - Principais empresas no Brasil disponibilizando tecnologia AM (Gorni, 2013)

Empresa	Telefone	E-mail ou site	Fornecer equipamentos	Prestar serviços	Manufatura aditiva/impressão 3D:							Dimensões máximas dos protótipos (mm)	Condição de fornecimento rápido:		Dimensões máximas do ferramental (mm)	Outras técnicas	Materiais			
					Sinterização seletiva a laser (1)	Esterolitografia (2)	Manufatura de objetos em lâminas (3)	Modelagem por deposição de material fundido (4)	Por jato/extrusão de resina (5)	Outra sólida na base (6)	Conformação próxima do formato final via laser (7)		Estampagem incremental para peças metálicas	Vazamento a vácuo (Vacuum casting) (8)			Rapid tooling por SLS (9)	Polímeros	Cerâmicas	Metais
AMS Brasil	(47) 3423-2125	www.amsbrasil.com.br	■	■									700 x 380 x 580	■	250 x 250 x 325	■	■	■	■	
Anacom	(11) 3422-4200	www.anacom.com.br	■	■					■	■			1.000 x 800 x 500	■	1.000 x 800 x 500	■	■		■	
Axson	(11) 5687-7331	www.axson.com.br	■										2.680 x 1.000 x 650	■	2.680 x 1.000 x 650	■				
E-TEC	(35) 3431-1525	www.e-tecbrasil.com		■	■								380 x 380 x 660	■	250 x 250 x 250	■	■	■	■	
EXADP	(19) 2121-6231	www.exadp.com.br		■	■								400 x 400 x 350		250 x 250 x 250	■			■	
Fabrica de Imagens	(11) 3392-1201	www.fabricaimagens.com.br		■					■				200 x 250 x 350		200 x 250 x 350	■				
Fabrica de Protótipos	(11) 2894-6676	www.fabricadeprototipos.com.br		■	■				■	■	■	■	600 x 500 x 500	■	1.000 x 500 x 500	■	■	■	■	
Fast Parts	(47) 2101-7777	www.fastparts.com.br		■	■				■			■	330 x 250 x 200			■	■	■	■	
HEO 3D PRINTER	(11) 95889-0664	www.heo3dprinter.com.br	■	■					■				200 x 200 x 90				■			
Imprimale	(11) 3384-9793	www.imprimale.com.br		■					■	■			500 x 500 x 500			■	■		■	
LWT	(11) 3232-0532	vtor@lwtsoftware.com.br		■	■				■				294 x 192 x 148 (10)				■			
				■	■				■				1.000 x 800 x 500 (11)				■			
Metamáquina	(11) 3666-4899	www.metamaquina.com.br	■						■				20 x 20 x 15			■				
Movtech	(11) 2464-7890	movtech.cnc@gmail.com	■	■					■				190 x 190 x 110							
Objeto Impresso	(11) 2359-3933	contato@objetoimpresso.com.br		■	■				■				200 x 200 x 150 (12)	■	340 x 340 x 620		■	■	■	
				■	■				■				340 x 340 x 620 (13)	■	340 x 340 x 620		■	■	■	
Pro Model	(11) 99979-4366	www.promodel.com.br		■		■					■		300 x 400 x 600	■	300 x 400 x 600	■	■	■	■	
Protótipos 3D	(51) 3433-5156	www.prototipos3d.com.br		■					■				200 x 200 x 300				■			
Robtec	(11) 3318-5100	www.robtec.com	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	5.000 x 5.000 x 5.000	■	3.000 x 3.000 x 3.000	■	■		■	
SEACAM	(11) 5575-5737	www.gruposea.com.br	■	■		■			■							■	■	■	■	
Solidtec Brasil	(19) 3262-0013	fabiano@solidtecbrasil.com.br		■					■				600 x 700 x 450				■			
Stratasys	(11) 2626-9229	www.stratasys.com/br	■						■	■			914 x 610 x 914				■			
SYCAD Systems	(11) 5541-3300	www.sycad.com.br	■	■					■	■			200 x 200 x 200				■		■	
Tato Equipamentos	(11) 5506-5335	tatoee@gmail.com	■						■				250 x 280 x 200				■			
UP 3D Brasil	(11) 3715-1090	www.up3dbrasil.com.br	■	■					■				140 x 140 x 140	■	140 x 140 x 140	■				

Notas: (1) SLS, selective laser sintering; (2) SLA, stereolithography; (3) LOM, laminated object manufacturing; (4) FDM, fused deposition modeling; (5) MJM, multi jet modeling; (6) SGC, solid ground curing; (7) LENS, laser engineered net shaping; (8) Em molde de silicone feito a partir de modelo em SLA; (9) Usando grânulos de aço e polímero; (10) Execução de protótipos; (11) Capacidade dos equipamentos comercializados; (12) Para FDM; (13) para SLS.

2.5.1 Marinha Norte Americana (*US Navy*)

Para uma Força Naval com atuação global, que tem necessidade de manter elevado grau de prontidão operativa em lugares, muitas vezes, extremamente distantes de suas bases, dispor de maior capacidade de manutenção a pronto uso é fundamental. Quando um navio está viajando em missão em uma área de operações, apenas pode contar com seus próprios equipamentos e suprimentos, incluindo peças sobressalentes. Caso o navio não disponha de estoque de uma determinada peça crítica, há que esperar até a entrega desta peça no próximo porto da rota; aguardar que o próximo navio logístico possa trazer e entregar; ou, pior cenário, ter de continuar a missão sem dispor da peça a bordo, o que pode vir a comprometer seu desempenho e o próprio cumprimento da missão (Sin, 2016).

Este cenário não se configura apenas para o navio e seus equipamentos, mas por todos os meios empregados combinadamente com ele; tais quais aeronaves, embarcações de desembarque de toda ordem, veículos aéreos não tripulados (VANT), entre outros.

Neste viés, a Marinha dos Estados Unidos vem investindo muito na implementação da manufatura aditiva em seus sistemas, especialmente no tocante a peças sobressalentes para equipamentos e meios operativos.

O quadro da tabela 6 ilustra as tecnologias de AM que estão sendo desenvolvidas nos diferentes setores da Marinha Norte Americana.

Tabela 6 - Aplicações da manufatura aditiva na *US Navy* (O'Connor 2014)

	AM modality	Uses	Obstacles
Aviation (NAVAIR, FRCs and NAWC)	<ul style="list-style-type: none"> FDM Jetting Binder Jetting 	<ul style="list-style-type: none"> Rapid prototyping Rapid tooling Custom parts Templates 	<ul style="list-style-type: none"> Flight critical certification Data rights and IP
Surface (NAVSEA, NSWC)	<ul style="list-style-type: none"> FDM PBF Binder Jetting SLA 	<ul style="list-style-type: none"> Ship models Seakeeping prototypes Working prototypes Shipboard testing Visual aids End use parts 	<ul style="list-style-type: none"> At sea testing (PTF) Flame/smoke/toxicity qualifications
Subsurface (NAVSEA, NUWC)	<ul style="list-style-type: none"> SLA SLS FDM Binder Jetting 	<ul style="list-style-type: none"> Sand casting molds Rapid prototyping Metal repair End use parts Industrial tooling 	<ul style="list-style-type: none"> HAZMAT handling Flame/smoke/toxicity qualifications
Medical (BUMED)	<ul style="list-style-type: none"> SLA Jetting Binder Jetting FDM Lamination 	<ul style="list-style-type: none"> Custom medical tooling Prosthesis Cranial implants Surgical guides 	<ul style="list-style-type: none"> Training with medical personnel

Hoje, a Marinha dos Estados Unidos já dispõe de capacidade de fabricação de peças sobressalentes, por meio de manufatura aditiva, em seus Centros de Reparos de Esquadra (*Fleet Repair Centers*) e já iniciaram pesquisas para instalação e utilização de impressoras tridimensionais a bordo dos navios em alto mar (Appleton, 2014).

O emprego da tecnologia AM vem sendo bem sucedida, ao passo que em 29 de julho de 2016, o *Naval Air Systems Command* (NAVAIR), setor da Marinha Norte Americana responsável por todos os assuntos atinentes à aviação naval daquele país, efetuou um voo de demonstração com a aeronave MV-22B Osprey, equipada com componentes fabricados por meio de um aparato AM. O item fabricado por AM foi a ligação de titânio de um dos acoplamentos da caixa de rotor à estrutura primária da asa do MV-22B (NAVAIR, 2016).



Figura 12 - Instalação da peça fabricada por AM no MV-22b e voo teste (NAVAIR, 2016)

2.5.2 Exército Norte Americano (*US Army*)

Situação similar à da Marinha, o Exército dos Estados Unidos também tem uma dependência por suprimentos para suas tropas espalhadas pelo globo.

Já nos anos de 1990, o Exército começou com as pesquisas sobre a aplicação da AM, analisando a estereolitografia (Zimmerman e Allen III, 2013).

Atualmente aquele exército desenvolveu uma estrutura móvel de suporte chamada *Expeditionary Labs* (Ex Labs), como componente da Força *Army's*

Rapid Equipping Force. A Ex Labs contem equipamentos de AM, bem como equipamentos de reparos e de manufatura tradicional, além de dispor de uma estrutura para deslocamento rápido, visando a prover as forças em locais de operação com serviços de engenharia customizados e *rapid tooling* (Appleton, 2014; Poulsen, 2015).

2.5.3 Força Aérea Norte Americanas (US Air Force)

Embalado pelo anseio por um instituto de AM, a Força Aérea dos Estados Unidos, já recebeu milhões de dólares do governo americano, somando 60 milhões até 2013 (Brown et al, 2014).

Atualmente, a Força Aérea vem desenvolvendo pesquisas na aplicação da AM, que já utiliza para interação de *designs*, prototipagem, *rapid tooling* e reparos de peças não críticas para aeronaves. Possui ainda um contrato de pesquisa e de produção de peças para o F-35 Lightning II, um dos mais modernos caça multipropósito do mundo, com a 3D Systems, que também é signatária de um outro contrato para fabricação de peças de turbinas de foguetes (Poulsen, 2015).

2.5.4 Rapid tooling (RT) e prototipagem rápida (rapid prototyping)

Rapid tooling pode ser descrito como a fabricação por AM de produtos acabados, muitas vezes para serem usados na produção de equipamentos ou sistemas, como por exemplo ferramentas, peças, moldes, matrizes (Atzeni e Salmi, 2012; Berman, 2012; Guo e Leu, 2013). O termo prototipagem rápida foi muito utilizado no começo da AM, em função de sua aplicação inicial para desenvolvimento de protótipos de produtos. Hoje, por vezes, tais termos são usados como sinônimos, não obstante a sutil diferença de conceitos.

Segue o caso de um teste conduzido pela empresa Solid Concepts, uma pistola Caliber M1911, calibre 0.45, teve todos os seus componentes fabricados por meio de AM e com ela foram realizados mais de dois mil disparos. As peças “impressas” foram feitas de aço inox ou de liga de níquel e cromo. Como consequência da demanda gerada após o teste, a empresa ofereceu cem cópias da pistola ao público ao valor de US\$ 11.900,00 (Appleton, 2014).



Figura 13 - Pistola fabricada por manufatura aditiva (Appleton, 2014)

2.5.5 Boeing

A empresa Boeing, já uma das líderes do mercado de aeronaves, além de pioneira, vem crescendo na liderança da produção utilizando AM, tanto para seus aviões, quanto para seus sistemas, tendo patentado em 2015 um sistema para atendimento de pedidos por peças sobressalentes, integrado a uma solução de manufatura aditiva (Cunningham et al, 2015).

Em seu catálogo, a Boeing conta com mais de 300 peças fabricadas por AM, aplicadas em pelo menos 10 modelos de aeronaves distintos, tendo disponibilizado ao mercado mais de 22.000 componentes individuais para aeronaves (Cunningham et al, 2015; Huang et al, 2013; Zimmerman e Allen III, 2013).

Um dos resultados mais expressivos da empresa em termos de aplicação da AM está na produção dos caças a jato F-18 Super Hornet, usados pela Marinha e pelos Fuzileiros Navais Norte Americanos. O caça possui cerca de cem peças do seu sistema de condutos de resfriamento produzidas por manufatura aditiva. Graças à produção inovadora por AM, as peças utilizadas são mais leves e fortes que as convencionais e podem ser produzidas conforme sejam demandadas (Kenney, 2013; Khajavi et al, 2014).

Hoje a empresa vem utilizando a tecnologia AM na construção de um de seus projetos de maior vulto dos últimos anos, a conclusão do Boeing B787 *Dreamliner*.

2.5.6 GE turbinas

Por meio do General Electric Global Research Center, a GE vem dedicando um laboratório inteiro para a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias AM

para produção de componentes para seus sistemas de propulsão de aeronaves. Combinando os resultados com outras tecnologias, os engenheiros da GE conseguiram reduzir o peso de motores de sistemas de propulsão em mais de 400Kg (Morgan e Prentiss, 2014).

Adicionalmente, a empresa vem absorvendo empresas para incrementar seu potencial no tocante à utilização da AM, ao que se pode citar o exemplo da Morris Technologies, empresa detentora de considerável capacidade implantada na produção de peças por SLS (Brown et al, 2014).

Recentemente, em 2015, a empresa lançou um motor de turbina totalmente fabricado por meio de AM, medindo de 20 por 30 cm e com capacidade de 33.000 RPM. A tecnologia empregada foi a *Direct Laser Metal Melting*, semelhante à SLS, porém utilizando energia laser de altíssima potência (Sin, 2016).



Figura 14 - Componentes aditivamente manufaturados do motor de turbina da GE (SIN, 2016)

2.5.7 Airbus

O grupo Airbus desenvolve experimentos com tecnologia de manufatura aditiva desde 1993, quando a tecnologia ainda estava surgindo, mas apenas a partir de 2003 a empresa começou a utilizar tal tecnologia para produção de componentes para aeronaves comerciais e militares (Wimmer, 2015).

Em 2011, Airbus e a Universidade de Exeter, na Inglaterra, criaram uma parceria para criação de um centro de pesquisa em manufatura aditiva ao custo de 2.6 milhões de Euros (Brown et al, 2014).

Grande destaque pode ser atribuído a dois casos relacionados com a empresa.

Primeiro é o projeto do A350 XWB, para o qual estão sendo produzidas mais de mil peças por manufatura aditiva, utilizando a tecnologia FDM. As peças são mais fortes e leves, de baixo tempo e custo de produção e, por serem de uma

resina especial, possuem propriedades antichama, de não emissão de fumaça e atóxica, que implicam em maior segurança aeronáutica (Stratasys, 2015).

O segundo caso trata do modelo mini-avião Thor, apresentado pela empresa no salão aéreo de Berlim em 2016. Este drone pesa cerca 21 Kg, mede menos que 4 metros e se destaca por ter sido todo fabricado por AM, exceto os seus componentes elétricos (Exame.com, 2016) .

2.5.8 Indústria automotiva

Diversas empresas do setor automotivo já utilizam tecnologias de AM em seus sistemas de produção, em especial para prototipagem, como por exemplo: GM, BMW, Lamborghini, Hyundai, Land Rover (Kenney, 2013). Exemplo recente de caso de prototipagem nesta linha foi o do Chevrolet Malibu 2014.

Em março de 2013, durante a Atlanta Auto Show 2013, a Ford apresentou seu carro híbrido, do qual o eixo, a transmissão e outros componentes chaves foram produzidos com tecnologia AM (Brown et al, 2014).

A AM vem efetivamente transformando o setor não apenas em termos de insumos e peças, mas até em termos de toda gestão da fábrica, conforme se observa na *Tesla Factory* em Fremont, na Califórnia. A fábrica tem capacidade de customizar a produção de series de carros ininterruptamente (24 horas por dia), sem necessidade de reconfiguração da produção. Isto é feito pela combinação de AM com tecnologia robótica avançada. Mais além, a fábrica pode ser programada em minutos para mudar a produção de carros para computadores ou até peças aeroespaciais (Snow, 2015).

2.5.9 Medicina

Aplicações na medicina já são frequentes há algum tempo, normalmente voltadas para implantes e próteses.

Na odontologia, com o advento da radiografia digital, que vem viabilizando o escaneamento orofacial de pacientes fraturados, em três dimensões, a AM vem permitindo a produção de implantes e próteses precisamente adaptadas aos pacientes. Além de proporcionar maior rapidez na disponibilização das próteses e implantes, a AM viabiliza aos cirurgiões dentistas maior precisão e segurança nas cirurgias, pela customização precisa das peças, que podem ser produzidas com metais (Zimmerman e Allen III, 2013).

Em outros ramos da saúde, a AM vem sendo muito aplicada para produção de implantes e próteses. Contudo, esta aplicação está cedendo vez para um novo ramo na saúde, o dos transplantes de órgãos.

No Instituto *Wake Forest Institute for Regenerative Medicine*, estão sendo desenvolvidos equipamentos de AM para replicar e gerar tecidos e órgãos humanos a serem transplantados em pacientes (Morgan e Prentiss, 2014).



Figura 15 - Rim, orelhas e osso de dedo gerados por AM (Morgan e Prentiss, 2014)

2.5.10 Construção Civil

Em Amsterdã, engenheiros da empresa holandesa MX3D demonstraram para o mundo a capacidade da manufatura aditiva em revolucionar a construção civil ao erguerem uma ponte de aço sobre o canal Oudezijds Achterburgwal, no famoso Distrito Red Light da cidade, usando a tecnologia AM.

O sistema de construção é baseado no emprego de braços robóticos articulados em eixos, contendo equipamentos AM e que, atuando simultaneamente, conseguem construir estruturas entrelaçadas em aço e resina, no meio do ar, sem necessidade de suportes e independente de restrições de tamanho. Para garantir a resistência da estrutura construída, o metal é aquecido a 2700 graus fahrenheit de modo a ser fundido integralmente e permitindo suportar intempéries climáticas e pesos (Molitch-hou, 2015).



Figura 16 - Ponte construída por AM (Molitch-hou, 2015)

2.6 Conclusões sobre manufatura aditiva

Desde o século XIX que o homem vem tentando recriar o mundo tridimensionalmente, com as próprias mãos. Naquele momento, com o uso de técnicas para confecção de réplicas tridimensionais, hoje, com o auxílio de equipamentos de impressão por manufatura aditiva.

As tecnologias de AM são uma realidade que efetivamente está transformando diversos setores da sociedade e têm potencial para modificar sensivelmente a maneira como vivemos.

Estas transformações tendem a impactar não apenas a gestão da produção, como também toda a logística das empresas dentro das cadeias de suprimento. Logo, no próximo capítulo será abordada a gestão da cadeia de suprimentos, que virá a ser influenciada pela evolução da AM.

3. Cadeia de Suprimentos (Supply Chain)

3.1 Introdução

O presente capítulo busca permitir um melhor entendimento dos conceitos de gestão da cadeia de suprimentos a serem confrontados com o potencial disruptivo das tecnologias de AM.

De tal modo, o capítulo se inicia com a apresentação do conceito de cadeia de suprimentos e sua evolução, seguido do conceito de *Demand Supply Chain*. Em sequência são abordadas as estratégias de gestão dentro das cadeias de suprimentos com suas características principais. Enfim, são apresentados outros conceitos correlacionados com as cadeias de suprimentos modernas.

3.2 Conceitos de cadeia de suprimentos

De acordo com o *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP), cadeia de suprimentos é a interligação existente entre diversas empresas, tomando por ponto de partida as matérias-primas ainda não processadas e encerrando-se nos bens acabados usados pelos consumidores. Mais precisamente, cadeia de suprimentos engloba todos os materiais e informações trocados dentro do processo logístico, que se alonga desde a extração de matérias-primas na natureza, até a entrega de produtos acabados aos usuários finais, incluindo neste fluxo todos os fornecedores, prestadores de serviços e consumidores (CSCMP, 2013).

Diante desta definição de cadeia de suprimentos, o CSCMP descreve que a gestão da cadeia de suprimentos é a harmonização entre o planejamento e o gerenciamento de todas as atividades envolvidas na busca de fontes fornecedoras, e respectiva compra; na conversão de insumos em produtos e em todas as atividades de gestão logística. Ainda destaca que gestão de cadeia também inclui coordenação e colaboração com os parceiros que participam deste fluxo, que podem ser fornecedores, intermediários, provedores terceirizados de serviços e consumidores. Neste íterim, gestão da cadeia de suprimentos integra o gerenciamento de suprimentos e de demanda dentro das companhias e entre elas (CSCMP, 2013).

Já o *International Institute of Management* estabelece que a gestão da cadeia de suprimentos trata-se da consolidação dos processos de negócios chave, desde

os usuários finais até os fornecedores originais, que provê produtos, serviços e informações, que adicionam valor para consumidores e outros *stakeholders*, cabendo aos setores de logística o planejamento, a implementação e o controle de um eficiente e efetivo fluxo e estoque de bens, fluxo de serviços e de informações correlatas, dos seus pontos de origem até os respectivos pontos de consumo, no intuito de atingir os requisitos dos consumidores (Perumal, 2006).

Releva destacar que, em ambos os conceitos, o ponto culminante do processo de gestão da cadeia de suprimentos está na entrega ao consumidor final daquilo que ele anseia receber, seja em forma de produtos, ou de serviços, ou até de informações.

Enfim, gestão da cadeia de suprimentos é uma função de agregação com a responsabilidade primordial de vincular as principais funções de negócios e os processos de negócios dentro das empresas e entre as empresas, em um modelo de gestão coeso e de alto desempenho. Inclui todas as atividades de gerenciamento de logística, bem como operações de manufatura, e conduz a coordenação de processos e de atividades internamente e cruzadamente entre os setores de marketing, de vendas, de *design* de produto, de finanças e de tecnologia da informação (CSCMP, 2013).

Dado que engloba inúmeras atividades e diferentes setores dentro das empresas e entre empresas, como delinear as características necessárias para sua condução precisa, de forma a gerar o melhor retorno para as empresas?

O *International Institute of Management* enumera algumas características de fundamental importância, que devem estar presentes no gerenciamento da cadeia de suprimentos, para que a cadeia como um todo possa ser considerada uma cadeia de excelência: fornecer elevado grau de qualidade no atendimento aos clientes; eficientemente converter *inputs* em *outputs* e aprimorar a utilização dos ativos (Perumal, 2006).

Desde modo, uma cadeia de suprimentos efetiva implicaria em uma necessidade constante por capacidade de produção ativa, ou seja, a empresa deve garantir a “lubrificação constante de todo o maquinário e suas peças”, enquanto se mantém e se atualiza nas melhores práticas de gestão (Ady, 2015). As implicações de tão elevado nível de serviço são custos demasiados e uma falha simples pode gerar o desperdício de recursos, de tempo, de energia e da própria credibilidade da empresa, até o restabelecimento da condição de excelência.

Não obstante o desafio de se manter o grau de excelência dentro da cadeia de suprimentos, observa-se um emergente padrão de rede de suprimentos, seguindo um novo modelo, no qual os fabricantes atuam proativamente no sentido de mudar a dinâmica do mercado, onde pode ser citado o exemplo da Dell, que adotou o modelo *make-to-order* para atendimento dos pedidos de PC e laptops para seus clientes, por meio da internet. Em um setor onde o custo dos componentes e o risco de obsolescência são elevados, como era o caso da Dell, este modelo de demanda puxada foi muito conveniente para a empresa (Maccarthy et al, 2016).

Por outro lado, o próprio mercado se mostrou mais uma vez dinâmico, mutável, trazendo à Dell a necessidade de proativamente modificar mais uma vez seu modelo, adaptando-o ao dinamismo do mercado, quando a empresa percebeu que estava perdendo o mercado de PC domésticos, porque os clientes não mais estavam interessados em customizar o laptop, mas sim a buscar laptops de última geração em lojas, de modo que fosse possível a retirada junto com a compra. A disponibilidade passou a ser mais relevante para o serviço logístico neste nicho do que a customização.

Neste sentido, observou-se cronologicamente autores que percebendo uma evolução do conceito de logística para o conceito de compreensão e de gestão da cadeia de suprimentos e, aproximadamente a partir da década de 2000, os profissionais de logística começaram a destacar cadeias de suprimentos que apresentam comportamentos específicos e que podem ser melhor gerenciadas, não mais como um canal onde corre um fluxo de materiais e informações entre produtores e usuários finais, mas como um movimento, em tempo real, de informações dos consumidores, do mercado, o que na literatura pode ser encontrado com o nome de *Demand Supply Chain* (Deshmukh e Mohan, 2016).

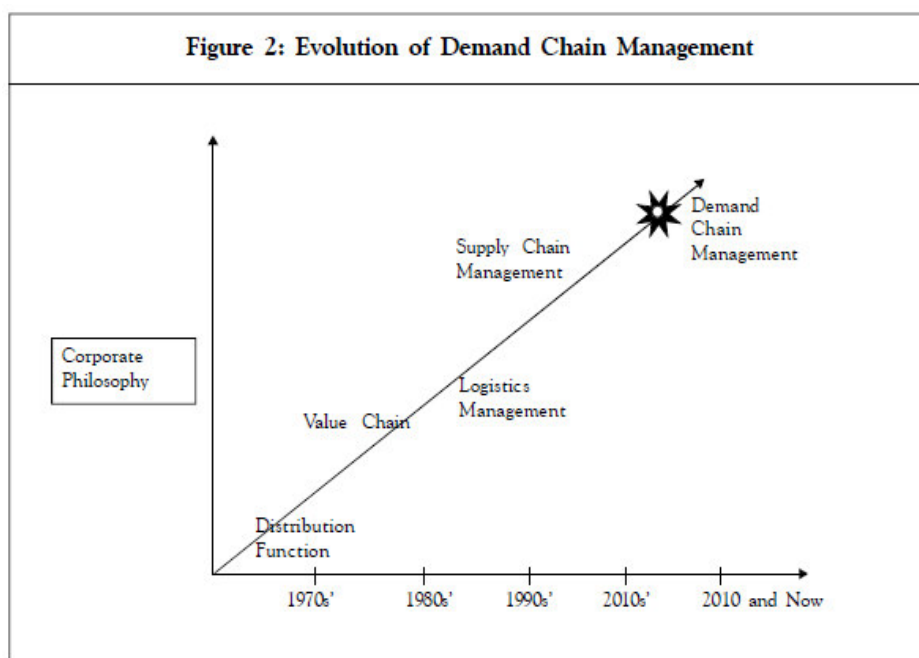


Figura 17 - Evolução dos conceitos logísticos (Deshmukh e Mohan, 2016)

3.3 Demand Supply Chain

A partir da definição de gestão da cadeia de suprimentos proposta pelo CSCMP, sobressalta-se a relevância de dois aspectos chave, responsáveis pelo sucesso das iniciativas de gestão da cadeia de suprimentos em companhias de manufatura e de serviços: gestão de suprimentos (produção) e gestão da demanda (mercado) (Mendes, 2010).

Dentre as duas vertentes destacadas, gerenciar seus fornecedores, sua produção e a distribuição de seus produtos e serviços é algo tangível e controlável, de certa forma, pela empresa, atuando por meio de seus elementos operacionais e níveis gerenciais. Já no que tange ao gerenciamento da demanda, que aqui deve ser entendido como uma questão mercadológica e não de se relacionar com clientes, além de não ser possível à empresa controlar a demanda, tendo que se subordinar a acompanhá-la e tentar prevê-la; na atualidade ela é extremamente mutável, como no exemplo da Dell.

De tal modo, percebe-se que muitas iniciativas de gestão de cadeia de suprimento foram focadas no ajuste da produção, impulsionadas pelos profissionais de logística das empresas, que conseguiam demonstrar os resultados de seus trabalhos por meio de números, tal qual redução de custos de todas as ordens, aumento de vendas, aumento de áreas de cobertura. Já o aspecto do conhecimento mercadológico acabou sendo direcionado para os setores de

marketing das empresas, que também terminaram por serem requeridos para atividades de previsão de demanda, de pesquisa de opinião, propaganda e, até, de vendas. Provável que as questões supramencionadas tenham acabado por distanciar, de algum modo, as atividades de logística e de marketing por algum tempo.

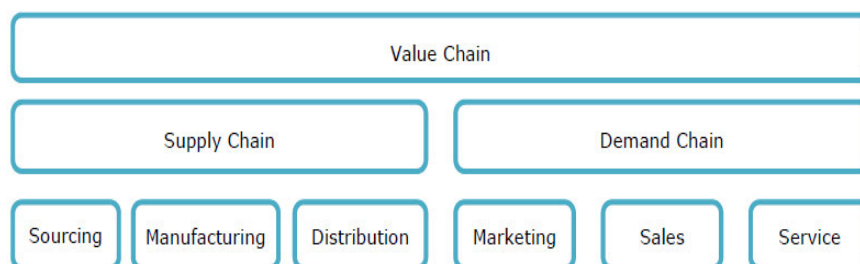


Figura 18 - Secionamento da gestão da cadeia de suprimentos (Ye et al, 2014)

A grande mudança de visão entre a cadeia de suprimentos, como vem sendo definida, e a *Demand Supply Chain* está na mudança do ponto focal: enquanto na primeira considera-se que a produção impulsiona a cadeia, na segunda há a percepção de que a demanda tem o poder de atrair para si a cadeia (Christopher e Ryals, 2014).

A *Demand Supply Chain* objetiva oferecer soluções integradas e customizadas para os consumidores através de uma rede colaborativa altamente dinâmica e abarcando duas dimensões, a dos suprimentos e a do consumo. A dimensão dos suprimentos vai englobar processos como *design*, procura, manufatura e entregas; consignando as interações entre os elos da cadeia. A dimensão do consumo contempla os processos relacionados com o uso dos produtos e serviços pelo consumidor; evidenciando a interação entre empresas e consumidores para criação de um valor em comum (Rasouli et al, 2015).

Diante da variabilidade do mercado, os requerimentos para a gestão da cadeia de suprimentos vão variando também com o tempo. Esta imprescindibilidade de conhecer melhor e acompanhar efetivamente o mercado, para aperfeiçoar a gestão da cadeia de suprimentos, fez crescer a essencialidade da integração de elementos chave de gestão de cadeia de suprimentos, tal qual atendimento de demanda de clientes com foco em eficiência; com aspectos de marketing, como por exemplo, levantamento de demanda com foco em capacidade de resposta; acarretando o surgimento do conceito de *Demand Supply Chain* (Mahmood e Kess, 2015).

As concepções do marketing devem então ser inseridas na base da definição de *Demand Supply Chain*. Nelas está incluída a orientação de que as empresas devem planejar suas produções focalizando as vontades e necessidades dos consumidores e não apenas considerando as capacidades de produção. Ou seja, o foco da cadeia deve estar no consumidor. Estas concepções do marketing mudam drasticamente a orientação por vendas agressivas para uma centralidade no consumidor. De tal modo, as atividades logísticas das empresas precisam se adaptar em direção a um modelo de negócios guiado pela demanda, com foco no consumo (Deshmukh e Mohan, 2016).

Salienta distinguir que não se trata de direcionar os esforços nos clientes, uma vez que cliente é o elemento subsequente da cadeia, aquele que compra de uma empresa. O foco deve estar no consumidor, que é o elemento final da cadeia; que usufrui dos produtos, serviços ou informações prestadas; e que somado aos demais consumidores vai formar o mercado.

A gestão da *Demand Supply Chain* deve prevalecer como um paradigma efetivo, construído por sobre a concepção de alinhamento de conexões em rede, que requer não somente uma integração da força do marketing empresarial com as capacidades da cadeia de suprimentos, mas também uma apropriada configuração de cultura organizacional e estilo de liderança que permita conciliar a empresa com o mercado (Ye et al, 2014).

Mendes chega a pontuar esta conversão de conceito de cadeia para redes, o que explicita uma substituição da visão bidirecional, ascendente ou descendente na cadeia, para um cenário dinâmico, multidirecional (Mendes, 2010).

A integração entre suprimentos e demanda, dentro desta rede, deve ser balanceada pelas informações de mercado e por inteligência de negócios, por meio de processos integrados de gerenciamento de conhecimento; norteando as ações dentro da empresa de modo que as atividades de gestão da demanda e dos suprimentos possam estrategicamente criar um valor superior para o consumidor (Mahmood e Kess, 2015).

Vale atentar para o fato de que em um mundo de recursos escassos, ciclos tecnológicos cada vez mais rápidos, “*big data*” e “internet das coisas”, é necessário efetivamente o foco no consumo e no mercado. Outrossim, o desperdício dos recursos disponíveis é ainda um problema mais severo do que a própria escassez dos recursos. Exemplo está na produção de alimentos, da qual

metade é desperdiçada. Denota-se um foco no mero suprimento de materiais, contra a orientação pela dinâmica do mercado, que busca a efetividade da cadeia de suprimentos. Em um mundo sustentável, a rede de produtos e serviços deve estar desenhada nas necessidades dos consumidores, fazendo-se responsiva às demandas do mercado e reduzindo desperdícios e retornos/devoluções (Christopher e Ryals, 2014).

Esta mudança fundamental de foco para a rede de consumo está sendo impulsionada pelas forças de mercado e de redes sociais, bem como pelas inovações tecnológicas e avanços nas comunicações. Estes elementos viabilizam que os consumidores possam comprar o que quiserem, de qualquer parte do globo. Assim, este mundo atual turbulento e este ambiente de negócios imprevisível implicam nas empresas tenderem a utilizar novas técnicas de manufatura e fluxos ampliados de informação, para operarem com inventários mais baixos, buscando menores custos, e com curtos tempos de resposta à demanda; incorporando flexibilidade e capacidade de resposta a mudanças (Christopher e Ryals, 2014).

Este ambiente mercadológico turbulento e dinâmico traz ainda algumas outras características relevantes. A globalização e a internacionalização aproximam consumidores de culturas distintas; fazem com que as empresas tenham que estar preparadas a todo momento, para atender um cliente peculiar, de qualquer parte do mundo, aumentando a mutabilidade dos cenários encarados pelas empresas, a todo momento. Uma menor tolerância a falhas pelo mercado, exigindo precisão e capacidade de resposta rápida das empresas. Questões ambientais e a necessidade de redução na emissão de gases poluidores trazem novos desafios por aprimoramentos nos processos e melhor utilização das fontes de energia e redução de desperdícios (Abrahamsson et al, 2015).

Todas estas transformações ampliam ainda mais o espectro da *Demand Supply Chain*, trazendo autores a incluírem o conceito de *Dynamic Supply Chain*, que enfatizaria a atuação de recursos humanos e aplicação de uma administração de negócios simples e objetiva, para promover a criação de valor pela cadeia de suprimentos (Ye et al, 2014).

Mais importante do que se concentrar no conceito supracitado, é analisar a rede por meio de uma perspectiva das capacidades dinâmicas. Fugindo da visão estática do ambiente de negócios, a capacidade dinâmica almeja alinhar um sistema com respeito às mudanças no ambiente. Capacidade dinâmica é então a

habilidade de integrar, construir e reconfigurar competências internas e externas, em prol de permitir à empresa enfrentar ambientes de mudança rápida. Ela vai governar a taxa de mudança da capacidade operacional da companhia. Esta perspectiva pode assim prover uma relevante base para explorar as capacidades requeridas para a gestão da *Demand Supply Chain* (Rasouli et al, 2015).

Redução de inventários; resposta rápida à demanda; redução de desperdícios e de obsolescências são capacidades que as companhias devem perseguir para conseguir se adaptarem ao dinamismo do ambiente de mercado atual, no qual elas não podem empurrar uma demanda ao menos que ela possa ser absorvida (Christopher e Ryals, 2014).

Há assim o incremento das estratégias de cadeia com características “*leagile*”, ou seja, tanto *lean* quanto *agile*.

3.4 Estratégias dentro da cadeia de suprimentos

A implementação de estratégias dentro das cadeias de suprimentos tem a intenção de orientar e organizar as capacidades organizacionais embutidas nos recursos humanos das empresas, os processos e conhecimentos institucionais e as ações dos componentes da cadeia, no sentido de gerar maior valor ao consumidor e às empresas componentes da cadeia ou rede. Serão transcorridas nas próximas seções deste trabalho as características das principais estratégias adotadas pelas empresas nas cadeias de suprimentos.

3.4.1 Lean ou estratégia de cadeia enxuta

Lean pode ser definido como a filosofia de gestão de negócios que considera que o consumo de recursos para outros propósitos que não a criação de valor para o consumidor final se trata de desperdícios que devem então ser eliminados (CSCMP, 2013). Pode-se também definir *lean* como sendo uma abordagem sistemática que parte do princípio que os desperdícios podem ser eliminados por meio do melhoramento contínuo dos processos de produção, identificando-se o que gera ou não valor para o consumidor final (Silva e Vales, 2015).

Estratégias de cadeia enxuta foram desenvolvidas, bem como difundidas, em consonância com a consolidação do sistema Toyota de Produção, que dentre outros aspectos trazia forte ênfase na eliminação de desperdícios como núcleo das

operações, reduzindo custos (Nyman e Sarlin, 2014; Senna et al, 2016).

Com seu grande ponto central fixado na redução de desperdícios que não agregam valor aos consumidores, as estratégias *lean* elencam oito principais desperdícios a serem evitados pelas empresas, a saber: esperas entre etapas de produção; excessos de inventários de produtos, sejam itens em processo ou produtos acabados; movimentação desnecessária de pessoas e equipamentos; transporte de produtos que não estão sendo processados; correções de defeitos na produção; excesso de processamentos que não agregam valor, normalmente ligados a retrabalhos; produção excedente, acima da quantidade de pedidos já existentes; subutilização da intelectualidade, ou seja, o mau aproveitamento das habilidades cognitivas, de criatividade e experiências dos componentes da equipe (Mendes, 2010; Nyman e Sarlin, 2014; Silva e Vales, 2015).

Partindo de alguns dos desperdícios listados, configura-se o conceito de *on-demand*, que se caracteriza pela consecução do trabalho quando já existe um pedido que o demande. Normalmente são produtos que são manufaturados ou montados unicamente após o momento em que um cliente emite um pedido por produto (CSCMP, 2013).

A redução de excessos, desperdícios, vai implicar em redução de custos de operação para a empresa e resulta em redução de preços dos produtos ao consumidor, ampliando a competitividade. Em verdade, eliminando desperdícios a empresa simplifica sua operação e libera capacidade para atendimento de demandas mais complexas dos consumidores (Nyman e Sarlin, 2014).

Por outro lado, este tipo de metodologia é mais ajustado para ambientes de mercado nos quais a flutuabilidade da demanda seja pequena, relativamente estável, com certa previsibilidade e com pouca variedade (Nyman e Sarlin, 2014; Senna et al, 2016). Não obstante a competitividade e mutabilidade dos mercados como um todo, este tipo de estratégia vai se moldar em mercados nos quais os consumidores esperam eficiência e consistência no atendimento aos seus pedidos e não há grandes espaços para diferenciação de valor dos produtos senão pela confiabilidade do recebimento do produto corretamente (Takahashia et al, 2015).

Para sua implementação, a estratégia *lean* propõe um programa de trabalho em “6 S”: *sort*, separar o que é necessário para as operações; *systemize*, organizar a área de trabalho, facilitando localizar o que é necessário; *shine*, manter a área de trabalho limpa; *standardize*, padronizar procedimentos tanto de preparação das

áreas de trabalho quanto de execução dos serviços; *sustain*, criar mecanismos que mantenham os ganhos, envolvendo as pessoas por meio de integração, medição de desempenho, disciplina e reconhecimento; *safety*, manter a segurança das pessoas na realização dos processos (CSCMP, 2013).

A *Demand Supply Chain* traz em si muitas mudanças das condições que causam a variação dos desperdícios de produção e isso é o fundamento para a implementação dos princípios de uma cadeia de suprimentos *lean*, estabelecendo operações de baixo custo para as empresas e disponibilizando capacidade operacional (Mendes, 2010).

3.4.2 Agile ou estratégia de cadeia ágil

No turbulento ambiente de mercado, onde as companhias precisam incrementar valor ao cliente para manter competitividade; para atingir o sucesso faz-se necessário dispor de agilidade para responder velozmente à mutabilidade da demanda dos consumidores (Abrahamsson et al, 2015).

Agilidade, neste contexto, é a habilidade de rapidamente e eficientemente, em termos de custos, se adaptar às mudanças do mercado sem impactos negativos significantes na qualidade ou na confiabilidade (CSCMP, 2013). De maneira mais direta, agilidade pode ser definida como a capacidade de uma cadeia de se tornar flexível (Maia e Gomes, 2016).

De tal modo, estratégia de cadeia ágil abarca ferramentas, técnicas e iniciativas que viabilizam a uma fábrica ou a uma companhia prosperar sob condições de mudanças imprevisíveis. Uma produção ágil não apenas permite atingir a capacidade de rapidamente responder às necessidades dos clientes, mas inclui a habilidade de rapidamente reconfigurar operações e parcerias estratégicas para responder com presteza a mudanças no ambiente de mercado (CSCMP, 2013). Não se limita a aspectos operacionais; agilidade na cadeia incorpora também a capacidade de usar conhecimento de mercado, inteligência de negócios e uma corporação virtual para explorar oportunidades lucrativas em um ambiente de transformações (Senna et al, 2016).

As empresas devem trazer em seu bojo uma característica fundamental, serem sensíveis ao mercado (*market sensitive*), que significa que a cadeia de suprimentos é capaz de ler, interpretar e responder à demanda em tempo real, ou seja, serem dirigidas pela demanda. A grande questão é a dependência por

sistemas de informação que consigam garimpar e avaliar dados em profundidade, dentro dos requisitos dos consumidores (Mendes, 2010).

Alguns fatores intrínsecos à estratégia *agile*: a estratégia de toda a cadeia deve estar alinhada com a agilidade; necessidade de colaboração organizacional interna e entre os membros da cadeia; monitoramento contínuo da cadeia e do mercado, por meio de compartilhamento de informações e uso intensivo de tecnologia da informação e comunicação (Senna et al, 2016).

Contextualizando, a estratégia ágil induz a resultados mais efetivos em cadeias de produtos de curto ciclo de vida, volumes baixos e margens unitárias altas, bem como cadeias de alta variedade de produtos, com demanda pouco previsível, sendo considerada um atributo fundamental para todas as organizações inseridas em ambientes de negócios sujeitos a grandes incertezas (Maia e Gomes, 2016; Senna et al, 2016).

A estratégia ágil entranha-se à conjuntura da *Demand Supply Chain*. Gera uma capacidade de negócio que envolve estruturas organizacionais, sistemas de informação e processos logísticos, se tornando flexível às transformações dos consumidores no mercado, envolvendo-se com características como redução de *lead time*, responsividade ao mercado, introdução de novos produtos (Mendes, 2010).

3.4.3 Leagile

A abordagem *lean* propõe-se a aumentar a capacidade de competição das companhias, enfocando em fazer mais com menos, pela eliminação dos desperdícios presentes nos processos da companhia, que não geram valor ao consumidor, por exemplo, estoques excessivos, reduzindo custos de operação. Já a abordagem *agile* preconiza que, para se manter competitiva no mercado, as companhias devem dispor de sensibilidade de mercado e de capacidade de resposta rápida às mudanças de volumes ou de variedades da demanda, mantendo um elevado nível de serviço para conseguir explorar oportunidades lucrativas (Mendes, 2010; Rodrigues, 2015).

A principal diferença observada entre as abordagens se enraíza na característica dos produtos ou serviços, inseridos no mercado: em mercados onde a demanda é mais estável, previsível, a estratégia *lean* é mais apropriada, ao passo que em mercados onde a demanda é mais mutável, a melhor abordagem é da

estratégia *agile* (Mendes, 2010; Rodrigues, 2015; Senna et al, 2016).

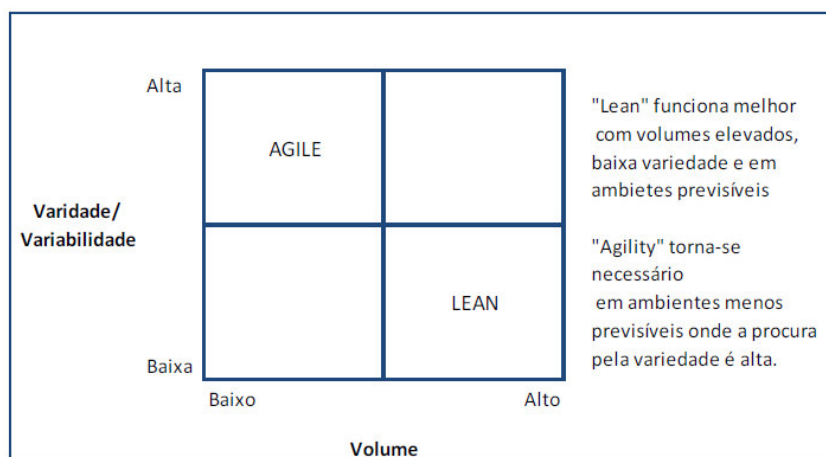


Figura 19 - Gráfico *Lean / Agile* (Rodrigues, 2015)

Por outro lado, ambas as estratégias tem objetivos muito similares, aumentar capacidade competitiva por meio de agregação de valor ao consumidor, de tal modo que a eliminação de desperdícios pode ser parte da agilidade e vice versa. Entretanto, há elementos da estratégia enxuta que são antagônicos com a estratégia ágil, exemplos: nível de estoques e excesso de capacidade. Logo, o ideal é a combinação de características operativas de ambas as estratégias, *lean* e *agile*, para alcançar o balanço adequado entre eficiência de custos e responsividade, no modelo batizado de “*leagile*” (Nyman e Sarlin, 2014).

Na realidade de um mundo em ampla transformação tecnológica e social, transfigurando a *Demand Supply Chain*, identifica-se assim a precisa definição do *trade-off* logístico, qual seja, o equilíbrio entre custos e nível de serviço. A maneira de atingir este equilíbrio seria pela sinergia dos princípios das estratégias enxuta e ágil, consolidando a estratégia *leagile*.

A maneira mais comum de aplicar uma estratégia *leagile* é pela atribuição de um ponto de desacoplamento para os pedidos. Este ponto de desacoplamento separa a parte da produção que é realizada com base em previsões e a parte na qual a produção é feita orientada pelos pedidos dos clientes. Assim, princípios de *lean* são aplicados na porção da cadeia de suprimentos que vem antes do ponto de desacoplamento, enquanto se adotam técnicas de manufatura ágil para a produção em atendimento aos pedidos dos clientes após o ponto de desacoplamento. (Nyman e Sarlin, 2014; Senna et al, 2016).

Outro método para se adotar uma estratégia *leagile* é separar os processos por diferentes produtos, conforme suas características de mercado, ou ainda adotar

uma separação de demanda básica e demanda flexível para o mesmo produto. Na primeira abordagem, os produtos com demanda regular seguem estratégia *lean* e produtos com demanda variável, *agile*. Já na segunda, uma demanda mínima prevista é executada sob a égide *lean*, enquanto uma capacidade *agile* é mantida para cobrir demandas inesperadas do mesmo produto (Nyman e Sarlin, 2014).

A combinação dos princípios *lean* e *agile*, independente da forma de aplicação, requer um pronto acesso a competências e a pessoas qualificadas de forma a prover as companhias com habilidade de desenvolver capacidades dinâmicas na medida em que são necessárias (Abrahamsson et al, 2015).

3.5 Outras características modernas das cadeias de suprimentos

3.5.1 Postergação

A utilização do ponto de desacoplamento, citado na estratégia *leagile*, essencialmente coincide com a noção de postergação (Nyman e Sarlin, 2014).

A definição de postergação de acordo com o CSCMP é o atraso das atividades finais até o último momento possível, uma estratégia para eliminar excessos de inventários de produtos acabados que podem ser empacotados em diferentes configurações para maximizar a oportunidade de prover um produto final customizado ao consumidor (CSCMP, 2013). Outra proposição defende que postergação é uma estratégia que intencionalmente protela a execução de uma tarefa, ao invés de começá-la com uma informação incompleta ou não confiável (Yeung et al, 2007). Há ainda autores que declaram que postergação envolve os processos de adiamento da configuração final do produto ao mercado até que os requisitos atuais dos pedidos sejam especificados pelos consumidores (Hassan e Ramachandran, 2015).

A prática do postergação vai implicar assim no retardamento da configuração final de um produto para que ele seja montado ou mesmo customizado apenas quando um pedido é recebido e se conhece com precisão os requisitos do cliente, de maneira a atender precisamente tais requisitos e diferenciar o produto (Nyman e Sarlin, 2014).

Neste contexto, vem o conceito de diferenciação, que diz respeito ao ponto no qual um produto final assume características únicas que o proporcionam peculiaridade, bem como competitividade no mercado, através da configuração da sua montagem final ou seu empacotamento (CSCMP, 2013).

A formação de estoques de produtos semiacabados proporciona às companhias maior flexibilidade e customização dos produtos finais, enquanto gera capacidade de resposta mais rápida às demandas no mercado. Esta técnica vai englobar marketing, design e desenvolvimento de configurações de produtos que podem ser diferenciados rapidamente e com custos adicionais inexpressivos. Assim postergação é concluir a produção com a certeza do pedido do cliente, ao invés de estimar e antecipar os pedidos (Hassan e Ramachandran, 2015; Maia e Gomes, 2016; Rodrigues, 2015).

O potencial de competitividade do postergação foi percebido quando da mudança de filosofia de produção em massa para customização em massa, como uma ferramenta pragmática para atingir esta última filosofia. Traz concomitantemente o potencial de combinação entre *lean* (evitar estoques de produtos acabados) e de *agile* (rápida resposta a mudanças no mercado), sendo apropriado para a moderna *Demand Supply Chain* (Yeung et al, 2007).

A estrutura de produto ideal para adoção desta ferramenta deve ser baseada em módulos, ou seja, o produto final deve ser composto de diferentes unidades a serem acopladas de acordo com as preferências do cliente. A composição por módulos favorece ainda mais a customização em massa, pois se alterando os módulos se pode oferecer uma variedade maior de produtos, possibilitando ainda aproveitar algum benefício da produção em massa (Nyman e Sarlin, 2014).

O conceito de postergação não se limita apenas à montagem ou ao empacotamento dos produtos pós-confirmação dos pedidos dos consumidores. Outras modalidades abrangem a espera, tanto quanto possível, para deslocar os bens avante na cadeia de operações, que caracteriza um postergação de tempo; a guarda de produtos em armazéns centrais antes de sua distribuição, postergação de lugar; aguardo para fabricação completa de produtos sob encomenda, *make-to-order* (Yeung et al, 2007).

3.5.2 Risk pooling

Dentre os benefícios gerados pelo postergação, há a redução dos riscos associados aos inventários de produtos acabados e à variabilidade do mercado (Hassan e Ramachandran, 2015). Esta concepção de redução de risco está fortemente associada com o conceito de *risk pooling*.

O significado de *risk pooling* indica que a variabilidade da demanda, e consequentemente a probabilidade de se errar uma estimativa, reduz-se conforme os produtos são agregados em categorias mais amplas, por exemplo, é mais preciso estimar a demanda por bebidas em geral do que se estimar a demanda por uma bebida específica. A granularidade aumenta a variabilidade da demanda (Maia e Gomes, 2016).

Conforme observado no postergação, produtos semiacabados, categoria menos específica, terão menor probabilidade de sofrerem com a variabilidade do mercado do que produtos acabados, sendo menos ariscado seu inventário.

Por outro prisma, o efeito do *risk pooling* é mais perceptível quando o inventário é mantido em uma localização central, o que permite que a variação de demanda dos clientes da próxima camada da cadeia seja combinada, resultando em um custo esperado menor (Taki et al, 2016).

Em um mercado com crescente competitividade e redução de ciclos de vida dos produtos as demandas dos produtos estão cercada por elevado grau de incerteza. Neste cenário, uma estratégia de inventários centralizados proporciona os benefícios do *risk pooling* e diminui os custos esperados, quando comparada com uma estratégia de inventários descentralizados. Logo, há a necessidade de centralizar inventários de itens de mesma categoria em centros de distribuição (Schmitt et al, 2015; Taki et al, 2016).

3.5.3 Green Operations e logística sustentável

Os atuais métodos de manufatura resultam em um considerável consumo de energia, em termos de combustíveis fósseis custosos e matérias primas escassas, o que vem gerando normas ambientais rígidas e grande pressão sobre as indústrias para que adotem políticas “verdes” e reduzam a emissão de gás carbônico na atmosfera (Mokasdar, 2012).

Configurando como mais uma transformação dinâmica do mundo (do mercado), o tema sustentabilidade vem se tornando uma tendência, causando grande impacto nas atividades logísticas e na gestão de cadeias de suprimentos (Takahashia et al, 2015).

A gestão sustentável de cadeias de suprimentos, estratégia verde ou operações verdes refere-se aos planos de gestão e às ações empreendidas pelas empresas, com o objetivo de tornar a cadeia de suprimentos mais sustentável, com

o objetivo final de atingir um apropriado nível de sustentabilidade ambiental e econômica. Ampliando o conceito, se define sustentabilidade corporativa como os esforços de uma companhia em conduzir seus negócios com comportamento responsável ambientalmente e socialmente; incluindo neste conjunto de ações e posturas: desenvolvimento sustentável, responsabilidade social corporativa, conscientização de parceiros de negócios (*stakeholders*), comprometimento corporativo, compras levando em conta princípios verdes, produção ou gerenciamento de materiais ambientalmente corretos, rotulagem ambiental e logística reversa (CSCMP, 2013; Takahashia et al, 2015).

Logo, sustentabilidade vai implicar em que os fluxos de materiais, de recursos financeiros e de informações estejam norteados não unicamente pela ótica mercantilista do resultado econômico que geram, mas em paralelo devem ser considerados os valores ambientais e sociais que também devem ser gerados (Takahashia et al, 2015).

Alinhar a sustentabilidade com as estratégias na cadeia de suprimentos passa a ser um fator de relevância para as companhias, o que, em verdade, não é conflitante.

Pesquisas avaliando a correlação entre estratégias enxutas e operações verdes apontam que existem muitas semelhanças entre ambas; o que é bastante perceptível considerando-se que redução de desperdícios gera redução de consumo de materiais e de emissão de carbono e logo é uma atividade favorável à sustentabilidade ambiental (Nyman e Sarlin, 2014).

Relata-se ainda que muitos aspectos que contribuem para as operações verdes também produzem como resultados uma flexibilidade correlacionada com o ponto de desacoplamento, o que induz a deduzir que também favorecem a adoção de cadeias de suprimento ágeis e também *leagile* (Nyman e Sarlin, 2014).

Contudo, se observa que é um grande desafio gerenciar conceitos de operações verdes em cadeias ágeis. Por exemplo, capacidades operacionais ociosas, por vezes necessárias para atendimento tempestivo a variações repentinas de demanda, são muito comumente associadas à deterioração dos desempenhos ambientais das companhias (Takahashia et al, 2015).

Finalmente, observa-se que em mercados dinâmicos e mutáveis, como se configura a sociedade atual, a implantação de estratégias dinâmicas, flexíveis (ágeis) e com reduzidos custos (enxutas) é mandatório para as empresas manterem

sua capacidade competitiva e permanecerem existindo. Para tanto, além da gestão logística, as companhias deverão buscar as melhores maneiras de combinar a isso o aspecto chave do presente milênio, tal qual citam Lastres e Albagli, estratégias sócio-político-ambientais mais sustentáveis (Lastres e Albagli, 1999).

3.6 Conclusões sobre cadeia de suprimentos

No mercado global, onde as transformações dos desejos dos consumidores são progressivamente mais rápidas e estes se tornam mais exigentes, caracterizando a *Demand Supply Chain*, possuir uma estrutura de custos competitiva e uma capacidade de resposta rápida às mudanças é fundamental para a sobrevivência das companhias.

Sob este desafio, as companhias vêm pesquisando e aperfeiçoando a gestão das estratégias nas suas cadeias de suprimentos.

No próximo capítulo, então, são expostas as potencialidades da manufatura aditiva que não apenas viabilizam às empresas abarcar custos reduzidos e responsividade ao cliente, como também transformar o paradigma atual, de maneira a incorporar as novas realidades do mercado e da sociedade.

4. Manufatura aditiva (AM) e gestão da cadeia de suprimentos

4.1 Introdução

Abarcados os conhecimentos sobre o que é a manufatura aditiva e como está sendo aplicada na atualidade (capítulo 2) e sobre as tendências na cadeia de suprimentos (capítulo 3), cabe neste momento analisar comparativamente os impactos da AM sobre a cadeia de suprimentos, destacando seu potencial disruptivo.

Neste ínterim, este capítulo apresenta os potenciais disruptivos das tecnologias AM, seguido de uma comparação das características da AM com as estratégias na cadeia de suprimentos. São então apresentadas outras implicações que a AM pode gerar sobre as cadeias de suprimentos, bem como sobre o meio ambiente para, em fim, serem apresentados os conceitos e impactos da impressão 3D feita pelos consumidores finais.

4.2 Potencial disruptivo da manufatura aditiva

Envoltos pela era da competitividade, casos de inovações disruptivas vem se tornando cada vez mais frequentes, em função das incessáveis buscas por inovações, que oportunizam às empresas um diferencial competitivo, tais quais: a “internet das coisas”, as máquinas autônomas e a alta tecnologia de sensores, que vêm se desenvolvendo em ritmo acelerado e sendo aplicadas em uma vasta gama de setores (Mohr e Khan, 2015).

Uma tecnologia nova que, inesperadamente, substitua e dispense uma tecnologia que já estava bem estabelecida no mercado é considerada disruptiva. Esta transformação deve trazer em si não uma série de processos mais complexos, com maior dispêndio de recursos, mas sim processos mais produtivos, mais eficazes, mais “inteligentes” (Cunningham et al, 2015). Uma tecnologia disruptiva deve, assim, modificar completamente a maneira como as indústrias, o comércio, os mercados são operados. Mais precisamente, tecnologias disruptivas são descobertas científicas que subjugam as capacidades tecnológicas e de produção usuais e propiciam o alicerce para um novo paradigma de produção (Poulsen, 2015).

A manufatura aditiva é uma inovação tecnológica que incorpora

capacidades que a permite ser considerada uma tecnologia disruptiva, podendo mudar padrões sociais fundamentais na economia e nas operações tradicionais de engenharia e de produção, considerando em especial três aspectos: trata-se de um novo processo, que modifica o paradigma manufatureiro tradicional; abarca implicações geopolíticas, econômicas e sociais de longa duração; e incorpora relevantes benefícios ao meio ambiente (Cunningham et al, 2015; Mohr e Khan, 2015; Poulsen, 2015).

É possível identificar diversas demonstrações de como a AM vem provocando saltos de desenvolvimento em variados campos do cotidiano. Em primeiro lugar, a tecnologia rompeu o paradigma de prototipagem, desenvolvendo a prototipagem rápida, combinada com as tecnologias de escaneamento 3D, tendo sido a primeira aplicação da AM, mas tendo em pouco tempo deixado de ser a única. Em 2013 a tecnologia AM ganhou destaque no cenário internacional em função da fabricação do primeiro revolver de plástico, “impresso” em 3D. No ano de 2014 já se construíam casas na China por AM, com capacidade de 10 casas por dia; nos Estados Unidos a empresa Solid Concepts passou a vender armas de metal “impressas” em 3D, via internet. Já em 2015, a AM causou inquietação no campo da medicina ao proporcionar a fabricação dos primeiros implantes sob medida para reposição de ossos; desenvolvimento de capilares e de tecidos de rins, valendo-se de equipamentos de AM; e transplante de pele confeccionada por AM, a partir de culturas de células dos próprios pacientes. A empresa norte americana Local Motors, atualmente, produz automóveis por manufatura aditiva, podendo completar uma unidade em 24 horas, englobando em uma única impressão até cerca de 75% do veículo e permitindo aos seus clientes personalizá-los e, em alguns casos, até construí-los. A *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), concluiu com sucesso a produção de itens na Estação Espacial Internacional, em gravidade zero, utilizando tecnologia AM, abrindo o caminho para desenvolvimento de viagens de longa duração, sem dependência de estoques de peças sobressalentes a bordo das naves (Cunningham et al, 2015; Garrett, 2014; Mohr e Khan, 2015; Snow, 2015).

Há ainda como exemplos: outras empresas, tanto nos Estados Unidos quanto em outros países, como a China, que estão abarcando o mercado de carros por AM, assim como em outros mercados, como no de produção de drones, de peças de aeronaves, de infraestruturas, de casas, de armas, de comidas, entre

outros, alguns citados no capítulo 2 desta pesquisa, que vêm estimulando este impacto torrencial da AM no mercado e na sociedade.

A convergência entre a manufatura aditiva, outras inovações tecnológicas e a criatividade irrestrita dos usuários, vem resultando em um cenário que tende para transformações com efeitos de longo prazo e mudanças culturais na sociedade em diversos campos (Snow, 2015).

Neste contexto, o gráfico abaixo aponta um estudo divulgado pela *Computer Science Corporation*, no seu relatório “3D Printing and the Future of Manufacturing”, no qual ilustra evolução de diversas áreas em função da AM (Snow, 2015).

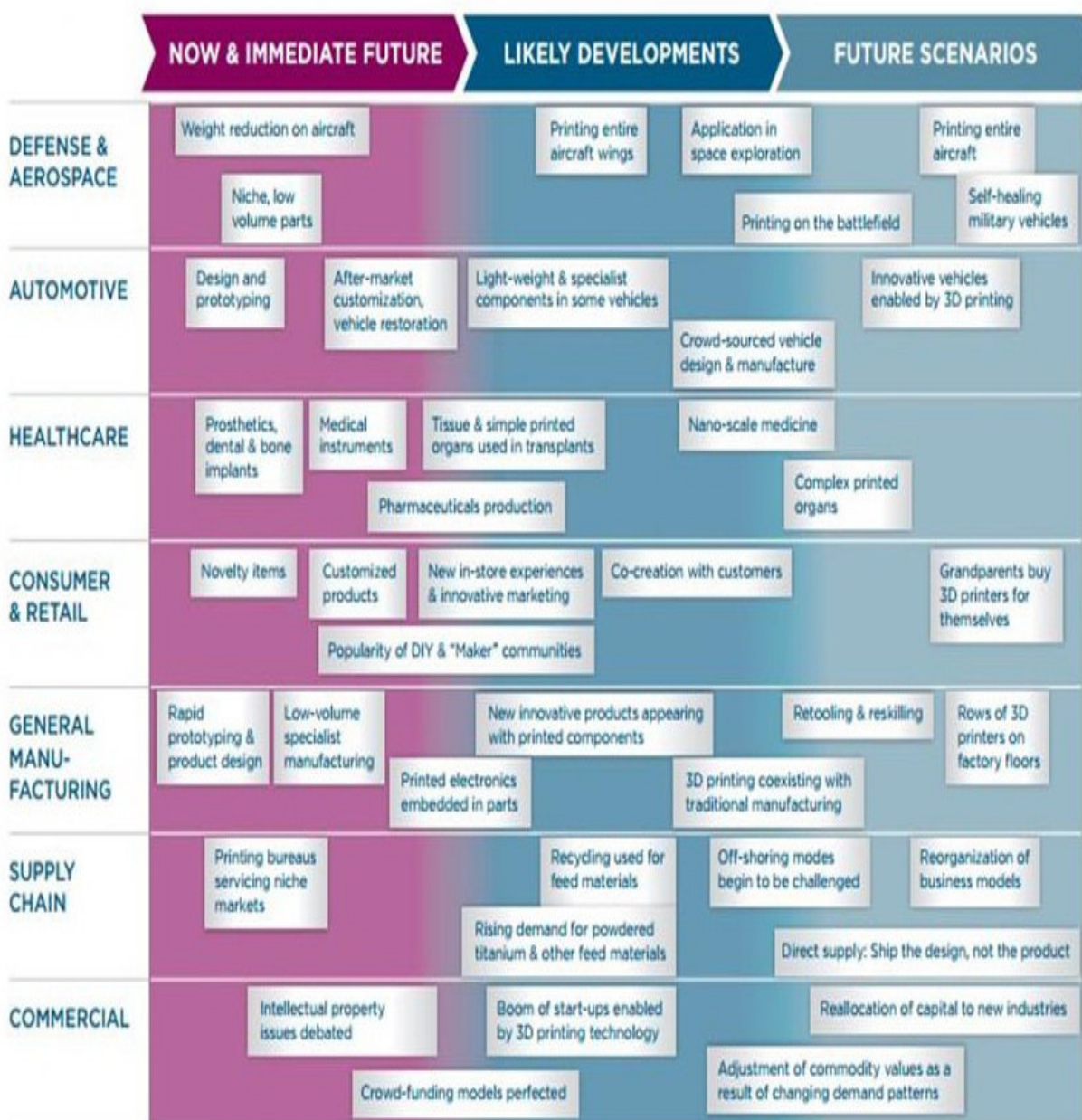


Figura 20 - Áreas revolucionadas pela manufatura aditiva (Snow, 2015).

Há diversas capacidades inovadoras intrínsecas à AM, mas as que mais vêm influenciando sua crescente utilização no mundo são o *design* digital e os equipamentos de impressão. Com a utilização dos arquivos digitais, como o CAD, os aparatos de manufatura aditiva conseguem instantaneamente estar prontos para fabricar qualquer item diferente. Esta combinação de *hardware* e *software* propicia à AM potencial de produzir qualquer coisa imaginável, convertida em desenho digital tridimensional. Assim, uma diferença crucial entre AM e a manufatura tradicional mora na desnecessidade de ferramental específico e reconfigurações de maquinário de produção (Nyman e Sarlin, 2014; Petrick e Simpson, 2013; Snow, 2015).

A abordagem ao aspecto transformador manufactureiro direciona também às implicações adaptativas necessárias na gestão da cadeia de suprimentos, dinâmica, transformada em *Demand Supply Chain*, coadunada com a maior digitalização da produção e da localização dos processos (Gebler et al, 2014). O impacto na cadeia de suprimentos pode ser tão significativo para alguns produtos, que venha a drasticamente reduzir, ou até eliminar, a cadeia e a linha de montagem (Garrett, 2014).

Considerando as estratégias desenvolvidas nas cadeias de suprimentos e outras tendências atuais, conforme consta no capítulo 3 deste estudo, a partir deste ponto são apresentadas as características da manufatura aditiva, associadas às respectivas implicações, que a concedem a capacidade de transmutar a gestão da cadeia de suprimentos.

4.3 Implicações em cadeias enxutas

Conforme já apresentado no capítulo 3 deste trabalho, a principal filosofia das estratégias de cadeia de suprimentos enxutas está no direcionamento de esforços para se eliminar ou reduzir desperdícios de recursos com atividades, itens, ou processos que não agregam valor aos clientes, consumidores.

A primeira característica marcante da manufatura aditiva, que pode ser correlacionada com as estratégias enxutas, é redução no consumo (desperdício) de materiais. Nos processos de manufatura tradicionais, cerca de 90% do material original é desaproveitado. Tamanho percentual de desperdício decorre não apenas da remoção de material da peça bruta, característica da fabricação subtrativa, mas

também das sucessivas movimentações de materiais entre setores, dos desgastes nos inventários de produtos semiacabados, do somatório de perdas em função dos processamentos consecutivos e das montagens de produtos até se atingir o produto final, das perdas com defeitos em diferentes momentos da produção. Em especial, em linhas de produção que utilizam insumos onerosos como o caso do titânio, este tipo de perda se torna o *driver* de custo majoritário, o que é invertido e passa a ser um custo ínfimo com o emprego de AM. Como a produção por AM é feita por camadas precisas, adicionadas uma a uma, conforme a criação do objeto, a quantidade de resíduos é mínima, tendendo a não gerar resíduos. Há estudos que apontam que o percentual de redução de desperdício de material, por meio da aplicação da manufatura aditiva, encontra-se na ordem de 40% a 63%. Além disso, o uso de desenhos digitais, para os protótipos (prototipagem rápida) permite a redução do consumo de materiais, em termos de eliminação de protótipos em desenvolvimento, até o atingimento dos requisitos do mercado, bem como evitar produção em massa de mal sucedidas inovações de produtos. Mais além, a sobra de insumos de uma fabricação por AM normalmente pode ser utilizada para fabricação do produto seguinte (Appleton, 2014; Bechthold et al, 2015; Berman, 2012; Huang et al, 2013; Nyman e Sarlin, 2014).

A utilização de tecnologias de manufatura aditiva possibilita que sejam produzidos, de forma simples e rápida, itens de estrutura complexa, na sua forma final, ou semiacabada, por meio de uma única operação de “impressão”. Esta característica viabiliza eliminar diversos dos desperdícios enumerados dentro das estratégias enxutas. A minimização na necessidade de geração de estoques, tanto de produtos finais quanto de itens intermediários, uma vez que se produz com presteza, reduz sensivelmente os custos de excessos de inventários e os de superprodução. Com a redução da quantidade de processos, das configurações e reconfigurações de maquinário e das montagens de componentes, entre o tratamento inicial dos insumos e a finalização dos produtos acabados, os custos abatidos são os de tempo de espera e os de movimentações desnecessárias dos produtos. Dado que a produção ocorre de maneira simples e automatizada, se minimizam os custos de falhas de processamento ou processamentos excessivos e os de defeitos de produção (Bechthold et al, 2015; Huang et al, 2013; Zimmerman e Allen III, 2013).

Uma vez que o único requisito físico para a produção por AM limita-se à

disponibilidade da “impressora”, cujo único requisito para produzir é dispor do desenho tridimensional do item desejado, o processo de fabricação não sofre influência do local onde o equipamento está situado (Mackley, 2014). A utilização da atual tecnologia de comunicação viabiliza a possibilidade de melhor localizar o equipamento, em conformidade com os requisitos de mercado, desde que se ajuste a produção, por meio de um sistema com acessibilidade a modelos 3D (desenvolvidos por engenheiros especializados em criação e desenvolvimento de produtos, localizados em qualquer lugar do mundo) e uma infraestrutura mínima para a realização das rotinas de manutenção da “impressora”, onde ela estiver localizada (Friedell, 2016). A realocação dos centros de produção para próximo dos clientes, associado com uma produção *just in time*, encaminha para uma redução significativa dos custos de excesso de inventários e, principalmente, custos de transporte de produtos acabados, um dos mais relevantes na logística, por meio da simplificação da cadeia de produção e distribuição, inclusive reduzindo a dependência por serviços de transporte e de armazenagem realizados por operadores logísticos terceirizados (Khajavi et al, 2014; Wimmer, 2015).

4.4 Implicações em cadeias ágeis

Estratégias de cadeia de suprimentos ágeis são focadas no desenvolvimento de capacidade dentro da cadeia para responder rapidamente às transformações do mercado, tanto em termos de quantidade, quanto de qualidade, de serviços agregados aos produtos ou até de anseio por novos produtos.

A manufatura aditiva proporciona níveis de flexibilidade e agilidade elevados às estratégias de cadeia ágeis, viabilizando a adoção de uma produção por encomenda, sem riscos de ruptura de estoque, que possam comprometer o nível de serviço da empresa, em termos de responsividade aos seus clientes (Huang et al, 2013).

Diante dos requisitos exclusivos que cada cliente almeja nos produtos que adquire, a manufatura aditiva possibilita que a produção seja altamente customizada, por meio da simples adaptação do *design* digital aos requisitos apresentados por cada cliente. A fabricação pode incorporar características únicas, para que o item seja precisamente ajustado à finalidade para a qual seja fabricado. Serve como exemplo, na área da saúde, os implantes produzidos por AM, que são feitos nas medidas exatas do paciente, a partir da respectiva radiografia 3D, caso

no qual, a pressão do mercado é severa, não apenas por força da mutabilidade do mercado, mas em especial pelo impacto psicológico que uma delonga na disponibilização do item pode criar. Enfim, a AM viabiliza a produção de variações de cada item no ato da solicitação do cliente, proporcionando às empresas alta capacidade de resposta à demanda, sem necessidade de aplicação de técnicas como postergação e produção modular, que normalmente provocam um considerável acréscimo nos custos (Appleton, 2014; Bechthold et al, 2015).

Para atingir uma capacidade razoável de flexibilidade com o objetivo de conseguir uma massiva customização da sua produção, ao ritmo do mercado, as cadeias de suprimentos ágeis demandam um elevado trabalho em equipe, oneroso e de difícil coordenação, em especial nos níveis mais próximos aos consumidores finais. A automatização conferida pela AM reduz a necessidade de uma estrutura avolumada e onerosa para se conseguir atingir o nível de flexibilidade necessário, demandando apenas a descentralização da produção, localizando os aparatos de AM mais próximos aos consumidores (Berman, 2012).

No tocante à localização, uma vez que a manufatura aditiva demanda apenas os equipamentos AM e os insumos brutos para produzir, torna-se simples posicionar os centros de produção próximo aos clientes. Localizar os centros de produção sob esta ótica evita os tempos de transporte dos produtos entre fábrica e consumidores, reduzindo sensivelmente o *lead time*. Permite ainda aprimorar a capacidade de resposta da cadeia, no tempo do mercado, reagindo rapidamente às mudanças da demanda, em especial para atendimento de pedidos de pequenos volumes e ainda em linhas de produtos que requerem elevadas especificações tecnológicas (Huang et al, 2013; Mohr e Khan, 2015).

Oportuniza-se às companhias simplificar a cadeia de suprimentos por meio da AM, encurtando os *lead times* e reduzindo estoques, o que ocasiona, em especial para cadeias de estratégia ágil, a liberação de capacidade administrativa e gerencial para melhor enfrentar as oscilações do mercado (Khajavi et al, 2014).

A proximidade aos clientes e a simplificação da cadeia, combinadas, propiciam às empresas uma maior capacidade de gerenciamento dos clientes, possibilitando envolvê-los nas atividades de desenho dos produtos e produção, por meio de um sistema de encomendas customizadas. Aproveitando-se da capacidade da AM de redesenhar facilmente o produto, apenas modificando o modelo digital e galgando fabricar objetos com formas complexas em uma única peça, a

companhia consegue adotar uma postura *make-to-order* que atende aos anseios dos clientes, permite uma rápida captação de informações sobre a variação do mercado e possibilita à companhia receber os pagamentos antes de incorrer nos custos efetivos da fabricação do produto, aumentando seu potencial competitivo (Berman, 2012; Mohr e Khan, 2015; Mokasdar, 2012; Oettmeier e Hofmann, 2016).

4.5 Implicações em cadeias *leagile*

Estratégias de cadeia de suprimentos *leagile* perseguem a redução dos custos de operação, por meio da eliminação dos desperdícios, ao mesmo tempo em que tentam aproveitar oportunidades do mercado em transformação, valendo-se de maior agilidade e flexibilidade, combinando as estratégias enxuta e ágil em uma cadeia de suprimentos total, sendo a estratégia *leagile* a que mais se adapta à *demand supply chain* (Rodrigues, 2015).

Diante do exposto, todos os impactos que a manufatura aditiva exerce sobre as cadeias enxutas e sobre as cadeias ágeis também refletem sobre as cadeias *leagile*.

De fato, a AM consegue empurrar o momento de início da produção em direção aos consumidores, com seu potencial de resposta rápida ao cliente. Combinando tal aspecto com a capacidade da AM de reduzir desperdícios de diversas ordens, em especial com a redução de inventários, observa-se a convergência da essência da estratégia *leagile*, abarcando a melhor gestão da *demand supply chain* (Christopher e Ryals, 2014).

Como consequência direta sobre a estratégia *leagile*, conforme supracitado, a AM desloca o ponto de desacoplamento até o limite, sobrando unicamente a gestão de insumos para produção por AM, que incorporaria a porção enxuta da estratégia, antes do ponto de desacoplamento. Neste nível, a AM permite às estratégias *leagile* se valerem da redução de riscos oportunizada pela técnica de postergação, combinada com técnica de *risk pooling*, perceptível na gestão dos insumos aplicados na AM, uma vez que, por estarem em sua forma bruta, se configuram como a forma mais agregada, menos granulada, de material.

Maiores detalhes sobre as técnicas de postergação e *risk pooling* constam, respectivamente, nas seções 3.5.1 e 3.5.2 da presente dissertação.

4.6 Implicações no meio ambiente

A primeira grande influência da manufatura aditiva no sentido de conservação do meio ambiente está no seu potencial de reduzir o consumo de materiais. Em virtude de sua característica de adição de camadas sucessivas na produção, AM reduz o consumo direto de insumos na fabricação, comparada com os métodos subtrativos, que descartam o material retirado das peças. Mais além, a AM reduz a quantidade de estágios na produção, fabricando peças finais o mais inteiras possível, diretamente dos materiais brutos, reduzindo as perdas de material nos processos intermediários. Exemplo de redução de consumo está no setor de produção aeroespacial, no qual a quantidade de insumos empregada para a construção de peças é de cerca de vinte vezes a quantidade de material que compõe as peças finais; com o uso das tecnologias de AM esta taxa cai significativamente, aproximando-se da proporção de 1 para 1. Os estudos sobre AM apontam que a base de redução de consumo de material é de 40% com o emprego deste tipo de tecnologia, sendo identificada também uma capacidade de reaproveitamento do material não consumido em cada “impressão” 3D de até 98%. Inclusive nos casos das tecnologias AM que utilizam material de suporte para os objetos fabricados, verifica-se a possibilidade de reaproveitamento deste material de suporte para novas “impressões” (Bechthold et al, 2015; Frazier, 2014; Gebler et al, 2014; Mohr e Khan, 2015).

Denota-se a potencialidade da AM em induzir o reaproveitamento das matérias-primas, em função da taxa de reaproveitamento de até 98%, incentivando a criação de uma cultura de reciclagem que favorece a proteção ambiental.

Releva apontar, ainda, que as fontes de recursos materiais naturais vêm gradativamente se reduzindo em todo o mundo, logo há um apelo crescente pela utilização de tecnologias com consumo eficiente de insumos, tal qual a AM (Mokasdar, 2012).

Ainda em termos de materiais, a AM elimina, ou reduz sensivelmente, a liberação de produtos tóxicos no meio ambiente, provenientes da produção tradicional. Nos métodos convencionais de produção, para se moldar e até cortar as matérias-primas brutas são necessários diversos produtos químicos potencialmente perigosos ao meio ambiente: resfriadores, solventes, líquidos cortantes, ácidos, catalisadores. Não apenas diretamente nos produtos em fabricação, mas os equipamentos também utilizam materiais poluidores, tais como

resfriadores, óleos lubrificantes e solventes de limpeza. Dado que a AM não necessita empregar componentes químicos adicionais na produção, que não os próprios insumos ou, quanto muito, material de suporte; não consome água para produzir e mesmo a manutenção dos equipamentos não demanda produtos químicos pesados, a tecnologia não causa contaminação do solo, dos ambientes aquáticos ou da atmosfera (Bechthold et al, 2015; Gebler et al, 2014; Huang et al, 2013; Mokasdar, 2012).

No tocante à atmosfera, a AM reduz a emissão de gás carbônico no ambiente. Com a redução de estágios ao longo da produção, além da redução de emissão de CO₂ pelos processos intermediários, há a redução da emissão daquele gás em função do transporte de produtos semiacabados. Permeando o aspecto transportes e observando que as tecnologias AM permitem que a fabricação dos bens possa ser realizada próxima aos consumidores finais, a consequência é a redução no número de viagens e na distância percorrida pelos veículos, o que combinado ao aspecto de que a AM permite desenvolver produtos mais leves, já que reduz a necessidade de junções entre peças do produto e facilita desenvolvimento de *designs* de baixo peso, produz como resultado uma redução considerável na emissão de gás carbônico no transporte dos itens. Relativo às características dos veículos, em especial nos setores automotivo e aeroespacial, a manufatura aditiva capacita a fabricação de peças mais leves que permitem a redução dos pesos das aeronaves e veículos terrestres, reduzindo consumo de combustível e, conseqüentemente, emissão de CO₂ ao longo da vida útil do veículo. Há estudos que apontam que a redução de emissão de CO₂ na produção de peças estruturais de aviões por meio de AM pode chegar a 75%, enquanto um avião construído com peças leves, fabricadas por AM, pode ter a emissão daquele gás reduzida cerca de 63% em operação, ao longo da sua vida útil. Para se dimensionar este aspecto, a redução de 100Kg no peso de um avião de longo alcance atenua sua emissão de gases em 1,3 MtCO₂, ou equivalente a 1,3 toneladas métricas de CO₂, ao longo de sua vida útil (Bechthold et al, 2015; Frazier, 2014; Gebler et al, 2014; Mohr e Khan, 2015; Mokasdar, 2012).

A adoção da manufatura aditiva favorece a redução do consumo de energia na linha de produção. Semelhante à questão de emissão de gás carbônico no ambiente, a redução de processos intermediários de produção, a maior eficiência na utilização de insumos proporciona à AM capacidade para reduzir os custos no

consumo de energia em cerca de 50%, além de permitir a construção de veículos que consomem menos energia, seguindo a mesma explicação para a redução de emissão de gases supracitada. De fato, a maior parte da energia consumida nos processos de AM é para diretamente fabricar o produto completo ou muito próximo da sua versão final, sem maiores esforços adicionais como *setup* e preparação de produção (Bechthold et al, 2015; Gebler et al, 2014).

Ainda no tocante ao consumo de energia, a combinação dos equipamentos AM, com baixo consumo energético, com equipamentos que produzem energia a partir de fontes alternativas é uma opção viável para intensificar a manutenção do meio ambiente. Pode-se citar o exemplo do projeto *Solar Sinter*, desenvolvido por um assistente de pesquisas da *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). O equipamento desenvolvido no projeto mescla lentes de bolas de vidro, capazes de converter raios solares em laser; um sistema para de automatização e um equipamento de SLS. Ativando todo o aparato em um deserto, ele consegue utilizar os raios solares e a areia do deserto para criar objetos tridimensionais de vidro, de maneira semiautomática, por meio de processo SLS (Bechthold et al, 2015; Kaiser, 2011).

4.7 Outras implicações em cadeias de suprimentos

Uma grande transformação que a manufatura aditiva pode trazer em termos de cadeias de suprimentos e economias globais é o potencial de “desglobalização” da produção. No século XX, o desenvolvimento das comunicações e tecnologias de informação dotou as empresas da capacidade de planejar e controlar suas produções além das fronteiras, deslocando as fábricas para países com custos menores de produção, “plataformas de produção”, tal qual os casos de China, Tailândia e Taiwan. A AM congrega um potencial de quebrar este paradigma, em face da possibilidade de que os produtos sejam fabricados em locais mais próximos aos consumidores, com baixos custos, considerando especialmente a desnecessidade de utilização de mão de obra intensiva. Neste sentido, a produção pode ser deslocada dos países grandes exportadores, retornando para países grandes consumidores, como os da Europa, com a aplicação da AM, o que proporcionaria a redução no fluxo de bens em todo o mundo e consequente redução e necessidade de adaptação das atuais rotas de transporte de cargas (Garrett, 2014; Rehnberg, 2016).

O deslocamento das unidades produtoras para próximo dos consumidores; a capacidade de produzir automaticamente, com diminuto *lead time*, bem como de alterar facilmente as características da produção, afiançam à AM a oportunidade de aproximar a quantidade de oferta e a quantidade de demanda dos mercados a um ponto de nivelamento quase harmonioso, implicando na transformação das relações de negociação entre fornecedores e compradores (Garrett, 2014).

A disponibilidade produtiva gerada pela AM tende ainda a provocar uma pressão nos próprios produtos, que passam a incorporar mais diferenciais competitivos em seus *designs* e suas composições e menos nos serviços associados.

Restrições de *design* constantemente foram desafios para a produção. Com a possibilidade de suplantar esta barreira, por meio da AM, que permite a fabricação de itens com designs mais complexos, amplia-se a diversidade de itens passíveis de serem produzidos, intensificando a concorrência no mercado, através da disponibilização de produtos com maior atratividade, praticidade e funcionalidade (Klein et al, 2015; Appleton, 2014; Snow, 2015).

No que tange à composição dos produtos fabricados por AM, a tecnologia permite que sejam produzidos itens mais leves e resistentes, consumindo menos insumos e incorporando características mais sofisticadas. Para conseguir características mais ajustadas às demandas do mercado, materiais distintos podem ser combinados por meio da AM. As combinações podem ser realizadas entre metais e cerâmicas, fibras de carbono e plásticos e até diferentes metais, formando ligas metálicas novas. Todas estas características vão ampliar ainda mais a competitividade por permitir incutir propriedades diferenciais nos produtos fabricados (Joesbury, 2015; Rehnberg, 2016; Wimmer, 2015; Wong e Hernandez, 2012).

Na verdade, é plausível perceber que a manufatura aditiva detém a habilidade de modificar todo o cotidiano da sociedade e não apenas os métodos de produção, as cadeias de suprimentos e os negócios (Cunningham et al, 2015). Tal afirmativa ganha mais força quando se considera que a tecnologia torna a fabricação de um item tão simples, que viabiliza a consumidores finais também dispor de equipamentos AM e fabricar seus próprios itens, em suas residências, com seus *designs* personalizados.

4.8 *Maker movement (hobbyists)*

A expansão da manufatura aditiva nos mercado, bem como no cotidiano das pessoas, é um fenômeno que vem acontecendo fora do controle dos governos e desenvolvendo-se em dois sentidos: “*top down*”, incentivado por empresas, universidades, centros de pesquisa e até mesmo governos; e “*botton up*”, sendo desenvolvido por milhares de pessoas amadoras, seguindo uma postura de “faça você mesmo”, que se empenham na tecnologia por hobby (Garrett, 2014).

O crescimento no número e na expressão desses amadores trouxe à tona o chamado “*maker movement*”. Trata-se da considerável influência que vem provocando este grupo de artífices e inventores que, motivados mais pela satisfação pessoal de explorar a tecnologia do que por ganhos financeiros, de dentro de suas residências procuram soluções tecnológicas para dificuldades encontradas no dia a dia (Appleton, 2014).

Não obstante os *makers* não buscarem primordialmente lucros financeiros, o movimento vem gerando alguma rentabilidade e criando empregos nas economias locais de pequenas cidades dos Estados Unidos, o que vem ampliando sua importância em relação ao tema AM (Ady, 2015).

As evoluções tecnológicas normalmente atraem a atenção do mercado, incentivando iniciativas de empreendedorismo. No caso do uso doméstico da AM, por meio das impressoras 3D para *desktop*, observa-se uma série de fatores que criaram o ambiente para a sua ascensão. Primeiramente, quando as primeiras patentes expiraram, foi possível que novas empresas passassem a desenvolver e, principalmente, a comercializar as tecnologias AM. Em algum tempo, a tecnologia AM, que antes era adstrita a indústrias e empresas, passou a estar disponível para usuários finais, quando surgiram as primeiras impressoras 3D, por volta da década de 2000, principalmente utilizando a tecnologia FDM. Impulsionadas pela disponibilidade de programas de fonte aberta para edição de modelos digitais tridimensionais, de equipamentos computacionais modernos e pela redução dos preços, as vendas de impressoras 3D expandiram consideravelmente nos Estados Unidos, a partir do ano de 2008, conforme pode se observar no gráfico abaixo (Ady, 2015; Appleton, 2014; Campbell et al, 2011; Wong e Hernandez, 2012).

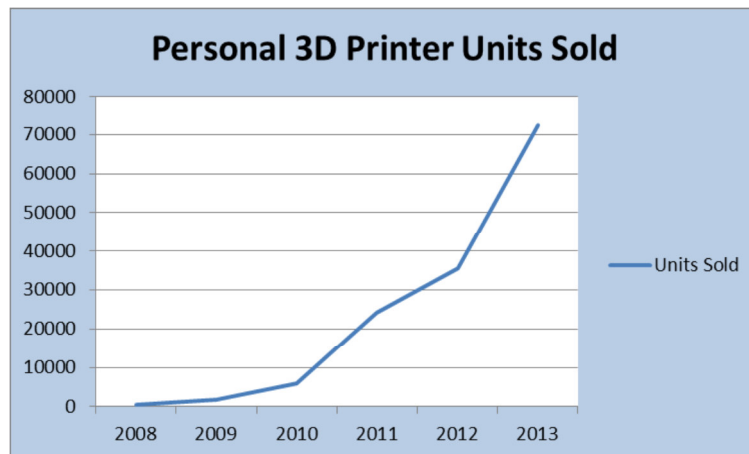


Figura 21 - Vendas de impressoras 3D nos Estados Unidos (Appleton, 2014)

Este mercado de impressoras 3D vem ganhando mais força. Em 2011 tiveram início feiras de *makers*, que acontecem com frequência, nas quais os *makers* expõem seus trabalhos em 3D, compartilhando seus projetos com outros *makers*. Em 2013 observou-se um incremento significativo no movimento, quando foi divulgada a fabricação de uma arma de fogo de plástico por meio de AM. Diante do avanço da tecnologia e do movimento de *makers*, um grupo da *Michigan Technological University* vem trabalhando no desenvolvimento de uma impressora doméstica para fabricação de objetos metálicos em 3D. Atualmente um impacto dessa expansão do movimento está sendo o crescimento dos pequenos negócios de família com base em impressoras 3D, conforme supramencionado (Appleton, 2014; Snow, 2015).

Por outro lado, um dos principais impactos e influências da impressão 3D doméstica vem sendo na área de desenvolvimento de *designs* de produtos. Programas CAD que normalmente eram usados por engenheiros já podem ser acessados por qualquer pessoa. Inclusive há empresas de software que já vendem versões simplificadas de seus programas de edição 3D, com foco nos usuários domésticos. Em um mercado moderno, consideravelmente mutável, os *makers* introduzem novos desenhos de produtos e até processos, revolucionando o mercado de tal modo que atraem atenção de empresas como a GE, que presta suporte a grupos de *makers* (Bechthold et al, 2015; Petrick e Simpson, 2013; Windle, 2015; Wong e Hernandez, 2012).

Novos produtos, por meio de *designs* desenvolvidos por *makers*; novos concorrentes, amadores domésticos que podem fabricar em casa, por AM, itens que venham a necessitar; estas são transformações que a AM também traz para a

cadeia de suprimentos e que implicam em necessidade de adaptações das companhias para manter-se ativas no mercado (Campbell et al, 2011; Petrick e Simpson, 2013).

4.9 Conclusões acerca da AM sobre as cadeias de suprimentos

Diante do dinamismo do mercado, o surgimento de tecnologias e processos disruptivos vem se tornando mais rotineiro na realidade dos mercados.

Este fato vem exigindo cada vez mais das companhias capacidade para inovar e rapidamente se adaptar às novas realidades, aprimorando suas estratégias de gestão das cadeias de suprimentos.

As tecnologias de manufatura aditiva trazem em seu bojo o potencial de, disruptivamente, transformar a maneira como as pessoas vivem suas vidas diariamente, em diferentes áreas do cotidiano, tal qual alimentação, saúde, construção, indústria, comércio (Cunningham et al, 2015).

Envolto pela competitividade do mercado, incluindo as pressões geradas pelos *makers*, a adoção da AM pelas companhias, visando mudar seus paradigmas e aprimorar suas cadeias de suprimento, aproveitando o potencial da tecnologia de redução de custos e de agilidade de resposta, torna-se uma questão fundamental para a manutenção da companhia no mercado.

Não apenas para as companhias, outras instituições também devem aproveitar do potencial da AM para aprimoramento próprio e até solução de problemas internos. Seria o caso, por exemplo, da Marinha do Brasil, em termos de sua cadeia de suprimentos de sobressalentes, o que é abordado no próximo capítulo desta dissertação.

5. Manufatura Aditiva na Marinha do Brasil

5.1 Introdução

Em termos de capacidade de atendimento às necessidades da Força, um dos maiores desafios do Sistema de Abastecimento da Marinha (SAbM) é manter um elevado nível de serviço no fornecimento de sobressalentes às organizações militares, suas clientes.

Neste sentido, o termo sobressalente é utilizado na Marinha do Brasil para designar qualquer peça de reposição utilizada para realizar a manutenção, corretiva ou preventiva, de equipamentos, de máquinas, de veículos ou de outros acessórios que compõem os meios navais, aeronavais e de fuzileiros navais. Assim também será usado neste capítulo.

Orientado pela perspectiva de implementação das tecnologias de AM na Marinha do Brasil, o presente capítulo contempla quatro grandes tópicos: o primeiro tópico analisa as características específicas das cadeias de suprimento de sobressalentes de um modo geral; o segundo tópico aborda particularidades que são percebidas na cadeia de suprimentos de sobressalentes da Marinha, apresentando os processos de fornecimento e de compra dos sobressalentes; o tópico seguinte aborda as questões da implantação da AM na cadeia de suprimentos de sobressalentes da Marinha e, finalmente, são apresentadas algumas conclusões a cerca da implantação da AM.

5.2 Cadeias de suprimentos de sobressalentes

Uma definição razoavelmente objetiva, dentro do ramo empresarial, para sobressalente é todo componente mantido em estoque, para ser utilizado na substituição de outro semelhante, quando do reparo ou manutenção de uma unidade quebrada (Tziantopoulos et al, 2016).

Uma das grandes questões das cadeias de suprimentos de sobressalentes é que a falta de um sobressalente para atender a um pedido de um cliente pode interromper toda a produção do cliente, podendo levá-lo a uma situação crítica e até afastá-lo do fornecedor que permitiu a falta ocorrer.

A despeito do que possa talvez aparentar, o mercado de sobressalentes é um dos setores mais rentáveis em um considerável número de indústrias, movimentando faturamentos de cerca de centenas de bilhões de dólares em todo o

mundo. No setor automotivo, por exemplo, onde 30% das receitas advêm da área de sobressalentes, cerca de 50% dos lucros também estão associados a esta área. (Augustsson e Becevic, 2015; Tziantopoulos et al, 2016).

De tal modo, características como promover resposta de alta qualidade ao cliente; converter eficientemente insumos em produtos finais e maximizar a utilização dos ativos são de suma importância para cadeias de suprimentos de excelência, mas fundamentais para cadeias de suprimentos de sobressalentes (Khajavi et al, 2014).

Empresas fornecedoras de sistemas e equipamentos, consequentemente fornecedoras de sobressalentes, vêm incrementando esforços para garantir uma elevada disponibilidade de sobressalentes e a satisfação dos seus clientes, por meio de diferentes estratégias que possam conceder-lhes vantagem competitiva; melhorando o gerenciamento dos serviços pós-vendas e a gestão de estoques de sobressalentes para fornecimento (Augustsson e Becevic, 2015).

Contudo as cadeias de suprimentos de sobressalentes apresentam grandes desafios para sua gestão, contando com 3 características peculiares, que as diferenciam dos demais setores: ciclos de vida estendidos, incremento regular de itens e demanda pouco previsível (Tziantopoulos et al, 2016).

O giro de sobressalentes normalmente é muito baixo, uma vez que peças que compõem equipamentos e sistemas possuem uma longa vida útil. Em alguns equipamentos a substituição das peças pelos respectivos sobressalentes pode delongar anos. Há casos nos quais os sobressalentes são projetados para ter uma durabilidade até maior do que a dos componentes para os quais são substitutos, para garantir sua eficiência, mesmo após permanecerem estocados por um certo período de tempo, antes de serem utilizados. A empresa Caterpillar, por exemplo, em 2015 produziu mais que 300 máquinas, que dispõem de sobressalentes cuja vida útil gira em torno de 40 anos (Tziantopoulos et al, 2016). Mais além, equipamentos fora de funcionamento por necessidade de substituição de peças geram custos demasiadamente elevados, de tal modo que os equipamentos devem dispor de capacidade para permanecer produzindo por longos períodos.

Com as atualizações das tecnologias, os equipamentos e sistemas são atualizados rotineiramente, para manter seu potencial competitivo. De maneira similar, a cada atualização, novos sobressalentes são inclusos nos sistemas, gerando um crescimento na quantidade de itens, *stock keeping unit* (SKU), que

devem ser gerenciados pela empresa fornecedora dos sobressalentes. Importa em um desafio prover suporte de sobressalentes para novos produtos e para produtos de gerações passadas. No caso da Caterpillar, anualmente a empresa distribui cerca de 18 milhões de SKU em 190 países diferentes. Tamanha diversidade de itens implica em uma maior complexidade na manutenção de nível de serviço nos serviços pós-venda de fornecimento de sobressalentes, implicando em acréscimo de custos. Em termos militares, ao final do ano de 2009, as forças armadas dos Estados Unidos dispunham de cerca de 4,6 milhões de SKU em estoque para aplicação em seus equipamentos, veículos e sistemas (Augustsson e Becevic, 2015; Khajavi et al, 2014; Tziantopoulos et al, 2016).

Questão de relevância crucial é a variabilidade da demanda, uma vez que a demanda por sobressalentes é instável, inviabilizando o estabelecimento de padrões. Mesmo conhecendo-se a agenda de manutenções preventivas dos equipamentos, ou seja, a programação prévia de sobressalentes a serem utilizados, é comum que serviços de manutenção programados demandem uma quantidade razoavelmente superior de sobressalentes do que o planejado. Mais além, é inviável estipular o momento em que uma peça sofrerá um caso fortuito de avaria, que implique na necessidade de sua substituição, ou seja, consumo de um sobressalente. A convergência de tais incertezas impulsiona as empresas a manter um elevado nível de estoques dos diferentes SKU, na tentativa de manter um apropriado nível de atendimento aos seus clientes (Augustsson e Becevic, 2015; Tziantopoulos et al, 2016).

Em face da necessidade de manter elevado nível de serviço aos clientes e a variabilidade da demanda, observa-se um cenário típico para emprego de uma estratégia ágil na cadeia. Por outro lado, a grande diversidade de SKU e o baixo giro dos estoques geram custos de oportunidade relevantes com material imobilizado, implicando na necessidade de uma gestão para redução de custos, o que impõe a adoção de uma estratégia *leagile* na cadeia, o que favorece a aplicação da AM (Christopher e Ryals, 2014; Nyman e Sarlin, 2014).

Incorporando as tecnologias de manufatura aditiva, as empresas podem conservar os modelos digitais de sobressalentes em computador e manter apenas estoques de matérias-primas, contra manter inventários de itens acabados, que possuem características tão desafiadoras. Uma outra vantagem é a redução dos custos de oportunidade de se manter em estoque itens com possibilidade

considerável de se tornarem obsoletos antes de serem vendidos e fornecidos aos usuários finais. Resguardam-se ainda de delongas nas entregas, uma vez que eliminam a necessidade por procura em armazém, com centenas de milhares de SKU, e respectivo manuseio e transporte dos sobressalentes para os clientes (Bechthold et al, 2015; Garrett, 2014).

5.3 Cadeia de suprimentos de sobressalentes na Marinha do Brasil

A definição precisa de sobressalente, pelas normas para o Abastecimento na Marinha, estabelece que é um item de suprimento cuja finalidade é substituir outro item igual ou semelhante, no caso de uma eventual necessidade de reposição em equipamento ou em unidade, por força de extravio, desgaste, avaria ou prevenção de avaria (SGM-201, 2009).

Para gestão dos sobressalentes e de todos os demais itens fornecidos por meio do SAbM, a Marinha utiliza um Sistema de Informações Gerenciais do Abastecimento (SINGRA), pelo qual é possível controlar e acompanhar níveis de estoques; verificar as características de catalogação dos itens; promover o início de processos de compra; processar e acompanhar requisições de materiais feitas pelos usuários do sistema, entre outras funcionalidades.

Atuando presentemente como Gerente da Cadeia de Suprimentos de Sobressalentes no SAbM e tendo sido Encarregado do Escritório de Ligação do Abastecimento com a Esquadra, entre novembro de 2013 e agosto de 2015, foi possível, para este autor, observar inúmeras ocasiões nas quais um pedido de um navio por sobressalentes não logrou êxito, após dispêndio de recursos e de tempo, com consultas a diversos fornecedores no exterior, que informaram que o item não era mais fabricado ou havia sido substituído por um novo item, em suma, que o item tornara-se obsoleto.

De tal modo, a Marinha do Brasil se vê obrigada, tal qual um distribuidor, a manter um elevado nível de inventário de sobressalentes, na busca de manter elevada sua capacidade de resposta às demandas dos seus meios, uma vez que a falta de um sobressalente não implica na paralisação de uma linha de produção, mas sim na deterioração, ou até restrição, dos maiores navais, impactando na capacidade de prontidão da Força, em defesa dos interesses nacionais.

Esta tarefa vem se tornando um grande desafio ao longo dos anos, por questões de diminutas disponibilidades de recursos orçamentários para aquisição

de sobressalentes e, conforme mencionado acima, em função da dificuldade de se concluir a compra de sobressalentes.

A convergência destes dois fatos acarreta a ausência da reposição dos estoques de sobressalentes de grande giro, bem como gera um excedente dos estoques de sobressalentes que, apesar de essenciais para os meios, não possuem movimentação rotineira.

Além de comportar as peculiaridades de uma cadeia de suprimentos de sobressalentes, supracitadas, a gestão de sobressalentes na Marinha do Brasil possui duas características específicas, que a tornam de difícil gerenciamento: a idade dos meios e o percentual de itens não fabricados no Brasil.

O primeiro marco na vida de um navio é seu batimento de quilha, momento no qual a base da estrutura de seu casco está concluída, sobre a sua “espinha dorsal”, sua quilha, e ele já pode começar a receber os diversos equipamentos e sistemas que o comporão. O marco seguinte é seu lançamento, acontecimento que marca a conclusão da instalação de todos os equipamentos e sistemas do navio, deixando-o pronto para operar, ou por vezes faltando apenas ajustes finais.

Uma vez que o presente estudo trata de sobressalentes, a data relevante para considerar a idade dos navios é o seu lançamento, quando os equipamentos e sistemas já estão em funcionamento e contando tempo de utilização para realização de manutenções.

A Esquadra da Marinha do Brasil atualmente é composta por 28 navios, incluindo 1 navio aeródromo, 12 navios de combate, 5 submarinos, 8 navios de apoio e 2 navios de instrução e representação (Marinha do Brasil, 2017).

Observando que, para a Marinha do Brasil, considera-se que a vida útil de um navio de guerra é de 30 anos, em conformidade com os dados existentes no SINGRA, a maior parte dos nossos navios já ultrapassou a vida útil esperada. Adotando como base de referência as datas de lançamento de cada navio, pode-se verificar que 60,7% dos navios já possuem mais do que 30 anos (Saunders, 2009).

Estas idades dos meios navais implicam em um elevado grau de obsolescência dos principais equipamentos e sistemas de bordo, ocasionando situações nas quais, defronte a necessidade de executar uma manutenção em um navio, o sobressalente necessário não se encontra disponível no mercado, ou sua disponibilidade depende de fabricação específica para atendimento da Marinha do Brasil, onerando e delongando o processo de aquisição.

Outro aspecto relevante é a questão da origem dos meios navais. Cerca de 53,6% dos navios da Esquadra brasileira foram construídos fora do país. Adicionalmente, 17,8% dos navios, mesmo tendo sido construídos no Brasil, utilizaram projetos desenvolvidos em países estrangeiros e 28,6% dos navios foi efetivamente projetado e construído no país (Saunders, 2009). Mais além, em função da existência de poucas empresas nacionais que desenvolvem e produzem equipamentos e sistemas para navios, mesmo os navios construídos no Brasil utilizam uma quantidade considerável de componentes fabricados fora do país.

A análise na base de dados do SINGRA, sistema ERP desenvolvido pela Marinha para gestão logística do material, revela que somente cerca de 5,9% dos sobressalentes utilizados pelos navios da Marinha são nacionalizados. De tal modo, o cenário exposto determina que a maior parte das aquisições de sobressalentes para os navios da Marinha seja realizada no exterior, tornando mais complexo, oneroso e prolongado o processo de compra.

5.3.1 Processo de fornecimento de sobressalentes

A presente seção e a seção seguinte tratam das especificidades da gestão da cadeia de suprimentos de sobressalentes na Marinha do Brasil, assunto que é regido pela norma SGM-201 (2009). Desse modo, as informações contidas em ambas as seções foram extraídas da citada norma.

Dentro da sistemática do SAbM, no início de cada período fiscal, ou seja, a cada ano, os meios navais são providos com um limite financeiro, crédito, no SINGRA, para solicitação de sobressalentes.

Os meios que necessitarem de sobressalentes, seja por ocasião dos períodos de manutenção ou nos casos de uma necessidade de manutenção inesperada, podem inserir uma requisição de material do SINGRA, preenchendo um formulário padrão no sistema, que vai permitir a identificação correta do sobressalente desejado.

Depois de inserida, a requisição é direcionada para Centros de Intendência Regionais, distribuídos pelo país, ou para a Gerência da Cadeia de Suprimentos de Sobressalentes do SAbM, localizada no Centro de Controle de Inventários da Marinha (CCIM), no Rio de Janeiro, conforme a localização do meio solicitante. Estes órgãos analisam como a requisição será atendida.

Caso exista estoque do sobressalente disponível na região do meio

solicitante, a requisição é liberada para fornecimento e o sobressalente é fornecido ao meio. Na situação em que o sobressalente somente esteja disponível em região distinta daquela na qual o meio se situa, pode ser solicitada a transferência entre regiões para atendimento do meio, considerando-se a conveniência para tal, em termos financeiros, de tempo e operativos. Quando o sobressalente está indisponível nos estoques da Marinha, ou quando é mais apropriado à Marinha que seja feita a sua aquisição, o CCIM pode determinar que seja executada a sua compra no mercado, para atendimento à necessidade do meio solicitante.

Atualmente, seguindo a sistemática acima, o SAbM apresenta um nível de serviço para a cadeia de suprimentos de sobressalentes de cerca de 24,14%, conforme consulta ao banco de dados do SINGRA, realizada no dia 13/02/2017. Isso significa que menos de um quarto das requisições de sobressalentes inseridas pelos meios navais conseguem ser atendidas em menos de 30 dias.

5.3.2 Processo de compra de sobressalentes

Não obstante o regramento jurídico estabelecido pela lei nº 8.666/1993, a Marinha dispõe de norma própria para estabelecer procedimentos para aquisição de materiais dentro do SAbM, de modo a comportar as especificidades da Força, sem afrontar o regramento jurídico supracitado.

As compras de sobressalentes pelo SAbM são promovidas pelo CCIM, unidade militar dentro do SAbM, que é responsável pela determinação macro das necessidades de sobressalentes da Marinha, considerando a previsão de manutenções planejadas para o ano seguinte e a estimativa de necessidades eventuais ao longo do ano corrente.

Esta particularidade de centralizar todas as compras de sobressalentes em uma única organização militar permite à Marinha buscar reduzir as falhas de previsão de demanda para sobressalentes, na tentativa de minimizar os custos de oportunidade, por meio de *riskpooling* com os recursos orçamentários para aquisição de sobressalentes, defronte os desafios específicos desta cadeia de suprimentos.

Por outro lado, uma das consequências das especificidades da cadeia de suprimentos de sobressalentes da Marinha é que cerca de 95% das aquisições são realizadas por processos de compra no exterior, que demandam processo de licitação, frete para o Brasil, desembaraço alfandegário, entre outros trâmites

burocráticos específicos, o que implica em uma delonga média de 6 meses até a disponibilização do sobressalente ao meio naval ou, no pior caso, até o processo ser frustrado por questão da obsolescência do item, conforme observação feita no SINGRA, realizada no dia 13/02/2017.

5.4 AM aplicada em sobressalentes na Marinha do Brasil

Diante dos desafios apresentados nas seções anteriores deste capítulo, na busca por uma solução que forneça à Marinha capacidade de resposta apropriada às necessidades por sobressalentes dos navios, a fim de manter um elevado nível de prontidão dos seus meios navais, observa-se nas tecnologias de manufatura aditiva um potencial adequado ao desenvolvimento de uma autonomia almejada pela Força.

Inicialmente, a característica da AM de não necessitar de maquinários e configurações complexas para produzir peças, lhe atribui a possibilidade de produzir pequenas quantidades de um determinado item, com custos reduzidos e com agilidade. Associado com a utilização de modelos 3D, é viável produzir uma única unidade de qualquer item que se disponha do respectivo modelo, ou que seja viável desenhá-lo com programas de desenho em 3D. Por conseguinte, sobressalentes descontinuados, obsoletos, deixariam de se apresentar como desafios para aquisição, demandando tão somente o desenvolvimento ou a compra do desenho digital do sobressalente, por exemplo, utilizando equipamentos de escaneamento tridimensional, e sua “impressão” com o equipamento de AM apropriado (Wimmer, 2015).

Avaliando o aspecto do processo de compras de sobressalentes na Marinha do Brasil, a adoção da AM provocaria a redução das necessidades por processos de compra de sobressalentes fora do país. Por conseguinte os tempos de aquisição de sobressalentes seriam significativamente reduzidos, proporcionando um atendimento eficaz e mais eficiente às requisições de materiais dos meios navais, permitindo que permaneçam em melhor estado de prontidão. Com a redução do número de processos no exterior também traria redução de custos na cadeia de suprimentos, evitando-se os custos de processamento no exterior, bem como fretes e desembaraços alfandegários. Mais além, um menor quantitativo de processos no exterior permite melhor utilizar os recursos de pessoal e de infraestrutura disponíveis no exterior, reduzindo mesmo os tempos e custos de processamento

das compras que porventura ainda tiverem que ser realizadas fora do país.

Outra vantagem relevante da aplicação da AM é a troca de estoques de sobressalentes, com elevados riscos de obsolescência e cuja cadeia de suprimentos apresenta os desafios citados nas seções 5.2 e 5.3 deste capítulo, por estoques de matérias-primas para fabricação de sobressalentes por meio de AM. Tal troca permite incorporar de maneira apropriada a estratégia *leagile* na cadeia de suprimentos de sobressalentes, estabelecendo o ponto de desacoplamento no momento da produção por AM (Sin, 2016).

Quando abarca-se a questão de tempos, não obstante os tempos de fabricação por AM variarem em função de vários fatores, tais quais, tamanho do objeto, tipo de tecnologia, potência do equipamento de AM, conforme já mencionado neste trabalho é possível construir um automóvel completo em até 24 horas utilizando tecnologias de AM. Considerando que os processos de compra no exterior delongam cerca de 6 meses, conforme apresentado na seção 5.3.2 deste trabalho, a adoção da AM permitiria considerável redução no tempo de espera para atendimento às solicitações por sobressalentes dos meios navais.

Em termos de custos, não é viável fazer uma análise de custo/benefício da implantação da AM na Marinha do Brasil neste momento, uma vez que depende de diversos aspectos, conforme será detalhado adiante no trabalho. Contudo, identificam-se estudos realizados dentro da Marinha Norte Americana que concluíram que a aplicação das tecnologias de AM podem gerar reduções de custos significativas. Testes realizados por engenheiros de Port Hueneme, com sobressalentes de radares, demonstraram uma economia de 1,6 milhões de dólares em 4 anos de testes (Kenney, 2013). Já nos testes realizados em San Diego, com a utilização de escaneamento 3D a laser e FDM, para produção de peças de caças F-18, foi estimado um potencial de economia de recursos na faixa de cerca de 1,5 milhões de dólares ao ano (Mackley, 2014).

5.4.1 Critérios para aplicação da AM

Uma vez que o tipo de item a ser fabricado, principalmente no que tange ao material empregado, impacta na escolha da tecnologia AM a ser adotada, torna-se relevante determinar quais sobressalentes devem ser submetidos a este tipo de produção.

Um modelo para avaliação dos sobressalentes a serem fabricados por meio

de AM foi proposto por um grupo da *Naval Postgraduated School*, em Monterey, em um trabalho intitulado “*Make or Buy: An Analysis of the Impacts of 3D Printing Operations, 3D Laser Scanning Technology, and Collaborative Product Life-Cycle Management on Ship Maintenance and Modernization Cost Savings*”. Naquele estudo, foram avaliadas combinadamente 3 tecnologias, levando-se em consideração um modelo conceitual baseado na especificidade dos sobressalentes e na frequência da demanda pelos sobressalentes, para definir como obtê-los (Ford et al, 2015), muito semelhante ao modelo da Teoria da Economia dos Custos de Transação, que avalia quando e como se terceirizar uma atividade na empresa (Neves, 2009).

O estudo apresentado em Monterey concluiu que a utilização da AM para fabricação de sobressalentes se apresentava vantajosa e deveria ser investigada, bem como as outras duas; que os testes deveriam começar por itens complexos de pequeno volume; que o planejamento para incremento da escala de produção deveria vir após um desenvolvimento do processo, com o devido registro que justifique o incremento; e que, então, se buscasse mudar as regulações e procedimentos para obtenção de sobressalentes (Ford et al, 2015).

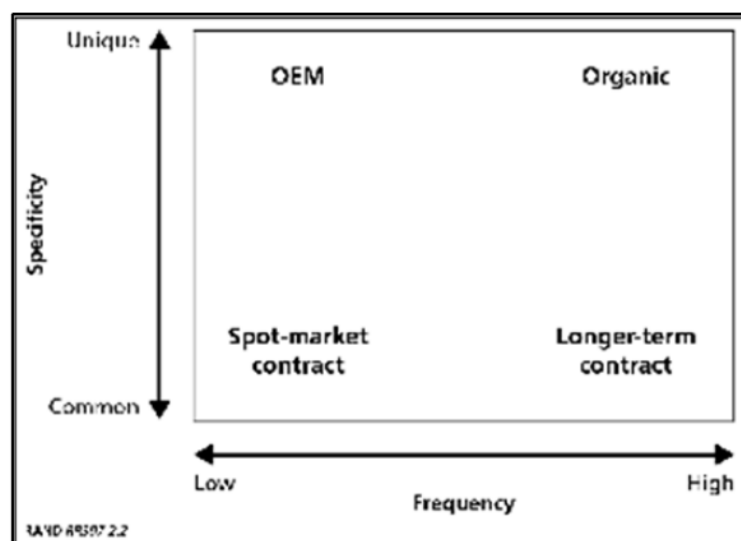


Figura 22 – Modelo conceitual para obtenção (Drew et al, 2013 apudi Ford et al, 2015)

Não obstante as conclusões do estudo apresentado pelos pesquisadores da *Naval Postgraduated School*, o modelo trabalhado por aquele grupo não poderia ser diretamente aplicado na realidade da Marinha do Brasil, uma vez que, voltado para uma cadeia de sobressalentes de aeronaves, não releva a questão da obsolescência dos sistemas e equipamentos, bem como não abarca as necessidades

específicas da cadeia de suprimentos de sobressalentes da Marinha do Brasil.

Outro modelo para escolha de itens a serem fabricados por AM foi apresentado no estudo de uma equipe da *Aristotle University of Thessaloniki*, Grécia. Neste estudo são citados 5 parâmetros para avaliar os sobressalentes: criticidade, preço, demanda esperada, *lead time* e tamanho da ordem de compra (Tziantopoulos et al, 2016). Contudo, tal modelo também não abarca as questões críticas da cadeia de suprimentos de sobressalentes da Marinha, o que vem a inviabilizar a sua aplicação na Marinha do Brasil.

Confrontando as necessidades específicas da cadeia de suprimentos de sobressalentes da marinha brasileira, o modelo proposto no *Additive Manufacturing Implementation Plan* do Departamento de Marinha Norte Americano (DON) se apresenta como opção mais apropriada.

Conforme é descrito nos próximos 4 parágrafos, o modelo apresentado no plano de implementação do DON, estabelece 4 critérios a serem considerados para determinar se um item deve ser ou não produzido por manufatura aditiva, concentrado nos desafios específicos para a obtenção dos sobressalentes no mercado ou nas características específicas de cada item (DON, 2016).

O primeiro critério apresentado naquele documento é a versatilidade de materiais. Trata-se de verificação para a identificação de sobressalentes que, durante seu funcionamento regular, não precisam suportar qualquer pressão ou a pressão que suportam é insignificante, de modo a permitir que seja averiguada a possibilidade de emprego de um sobressalente semelhante feito de material alternativo. Neste caso, a intenção seria de substituir um sobressalente danificado por um intercambiável, fabricado por AM, enquanto se espera a chegada do sobressalente original, oriundo do respectivo fabricante.

O critério seguinte é a abordagem sobre risco de obsolescência e questões envolvendo o processo de registro de ocorrências com os sobressalentes. O foco está na investigação e identificação, por meio do devido registro em banco de dados apropriado, de sobressalentes cujo risco de descontinuidade possa acarretar em necessidade de fabricação ou de aquisição muito específica, que implique em elevados custos. A pretensão neste íterim é incrementar o potencial de resposta na cadeia de suprimentos, ao passo que se produza por AM um sobressalente com capacidade de operar normalmente, atingindo os requisitos de performance do sobressalente original.

O penúltimo critério abrange sobressalentes de grande demanda e baixa densidade no mercado, cujos *lead times* de obtenção são demasiadamente longos e que possuem um limitado número de fornecedores no mercado. Neste caso, busca-se aplicar a AM como fonte alternativa ao fabricante do sobressalente quando este estiver indisponível ou requerer um considerável tempo de espera logístico, mantendo os equipamentos disponíveis, no sentido operativo, ao mesmo tempo em que aprimora e provê suporte ao sistema dentro da cadeia de suprimentos.

No último critério constante do plano do DON, é sugerido abordar peças, sistemas e equipamentos que conhecidamente apresentam falhas com uma frequência considerável. Neste contexto, o emprego da AM estaria balizado no histórico de avarias da peça, no sistema ou no equipamento, o que deve estar corretamente documentado em registro próprio. De tal maneira, almeja-se que a AM, além de disponibilizar o sobressalente, viabilize o aperfeiçoamento do sobressalente, buscando mitigar a característica que provoca a falha, por meio de ajustes no modelo digital do sobressalente.

Na busca de melhor aplicar o modelo do DON à Marinha do Brasil, é apropriado adicionar 2 critérios: um relacionado com a criticidade dos sobressalentes, pelo qual itens mais críticos teriam prioridade para a fabricação por AM; e outro ligado com seu grau de nacionalização, balizado pela primazia de aplicar a AM para sobressalentes que possuam somente referências de obtenção fora do Brasil. Tais critérios seriam de aplicação simples no modelo, uma vez que os respectivos dados já se encontram disponíveis no SINGRA.

A metodologia de processo hierárquico analítico (*analytical hierarchical process* - AHP) é uma ferramenta que viabiliza pontuar e classificar os sobressalentes, dentro dos critérios apontados acima, de modo a permitir a tomada de decisão sobre quais sobressalentes apresentam maior potencial para que sejam fabricados por AM. Para tanto, faz-se mister definir os pesos dos critérios, com base nas opiniões de especialistas, com competência técnica na Marinha com relação aos sobressalentes, para aplicação dos critérios propostos (Augustsson e Becevic, 2015). Cada especialista, deve decidir o grau de importância de cada critério e pontuando em uma escala de 0 a 10 cada um, o que vai permitir efetuar os cálculos devidos para definir os pesos entre os 6 critérios. Os graus dentro dos critérios teriam de ser debatidos entre os especialistas, de modo que, em conjunto, estabelecessem as respectivas faixas de pontuação e permitir a aplicação do

método.

Em verdade, um projeto para aplicação da manufatura aditiva na Marinha do Brasil, seguindo o modelo proposto acima, demandaria atuação de diversos setores da Marinha: o setor de manutenção e o setor operativo, que dispõem dos dados acerca de falhas dos sobressalentes; o setor de engenharia, que é investido de competência para avaliar as características físicas e estruturais, dos sobressalentes; e o setor do abastecimento, que é responsável pela logística de materiais na Marinha.

Dentro da profundidade do presente estudo não foi realizada a pontuação e classificação dos sobressalentes a serem fabricados por AM, o que demanda o trabalho conjunto mencionado no parágrafo anterior e será fruto de proposta dentro do escopo de pesquisas futuras acerca da implantação das tecnologias AM na Marinha.

5.4.2 Outros requisitos para aplicação da AM na Marinha

A implantação da manufatura aditiva em uma cadeia de suprimentos não se limita a aspectos técnicos, de engenharia de materiais ou de localização, ligados diretamente a fabricação em si. Há outros requisitos que devem ser atendidos durante a implantação da AM e que podem impactar negativamente, de modo significativo, a utilização das tecnologias AM na Marinha, ou mesmo em outras organizações e instituições.

O primeiro aspecto fundamental a ser trabalhado na implantação de AM é a questão dos recursos humanos. Não se percebe uma quantidade expressiva de profissionais no mercado brasileiro com proficiência na utilização das tecnologias de AM. Quando a análise fica restrita ao espaço amostral da Marinha do Brasil, nota-se que a disponibilidade de especialistas nestas tecnologias é ainda menos significativa. As pessoas que compõem a instituição, Marinha, precisam ser preparadas, treinadas, para poder operar com os equipamentos e matérias-primas brutas ligados com a tecnologia a fim de permitir a sua implantação (Appleton, 2014). Mais especificamente no contexto militar, o aspecto da promoção de treinamento tem um caráter motivacional marcante, que associado com as bases da hierarquia e disciplina propiciaria à Marinha uma capacidade de rapidamente absorver as tecnologias de AM. De fato, a promoção do treinamento seria desejável, mesmo antes da decisão pela implantação, uma vez que congrega

atualização do pessoal da organização com relação às tecnologias modernas.

Faz-se relevante apontar que a operação de equipamentos AM é menos complexa que a de maquinários industriais, o que demonstra uma menor necessidade de treinamento para os operadores em relação ao paradigma anterior (Nyman e Sarlin, 2014). No caso da Marinha o treinamento é fundamental por conta da mudança de paradigma que a AM traria para a instituição.

Outro aspecto ligado aos recursos humanos está associado à cultura organizacional e resistência a mudanças. Em organizações tradicionais como as forças armadas, implantação de mudanças de paradigmas normalmente enfrentam forte pressão das pessoas, em especial com relação às pessoas nos altos cargos, que normalmente são as que possuem maior tempo na organização, logo têm o antigo paradigma mais arraigado em seus hábitos (Appleton, 2014). Neste ínterim, a realização de *workshops* e palestras a cerca da AM, bem como divulgação de informações relevantes sobre o tema, por meio de boletins de ordens e informativos internos, permitiria maior familiarização dos profissionais, criando um ambiente favorável à implantação da tecnologia.

Um requisito operacional crítico, voltado para o aspecto da performance dos sobressalentes finais produzidos por AM, é a confiabilidade do material. Uma vez que os sobressalentes passem a ser fabricados pelo próprio usuário final, a Marinha, e não pelo fabricante original, que provê garantia para os seus produtos, haverá a necessidade de se certificar de que os itens “impressos” apresentem as propriedades indispensáveis à operação segura e eficaz dos meios navais. Duas ações são apropriadas para evitar esta adversidade. Primeiramente, a implantação deve ser realizada gradualmente, por meio de experimentações, testes e verificações de confiabilidade, tal qual vem sendo realizado pela marinha dos Estados Unidos. A segunda ferramenta para aprimorar a confiabilidade dos sobressalentes é a certificação dos fornecedores de equipamentos de AM e de modelos digitais, bem como dos modelos digitais que venham a ser criados pelo pessoal da própria Marinha, com base nos requisitos operacionais da Força, capacidade já existente para os itens que são comprados atualmente, realizada pelas Diretorias Especializadas da Marinha do Brasil (NAVAIR, 2016; O'Connor, 2014; SGM-201, 2009).

Enveredando pelos aspectos legais, em termos de propriedades intelectuais dos processos de AM, a maior parte das patentes associadas com as tecnologias e

equipamentos de AM já foram expiradas, não sendo um impeditivo à aplicação das tecnologias na Marinha. Já no tocante aos sobressalentes a serem fabricados por AM, há a necessidade de se verificar, item a item, as patentes que estão em vigor e demandam a negociação com seus proprietários para autorização legal para fabricação por AM. Contudo, dado que uma das principais questões da cadeia de suprimentos de sobressalentes da Marinha, a ser suplantada pela AM, trata-se dos sobressalentes descontinuados, questões legais de propriedade intelectual não causariam transtornos relevantes para a Força. Para os casos de sobressalentes não obsoletos e que estejam cingidos por patentes, inclusive internacionais, um trabalho a ser realizado pelas Diretorias Especializadas junto aos portadores das patentes seria necessário no sentido da promoção de contratos de permissão de uso (Appleton, 2014; Paben e Stephens, 2015).

Ainda no tocante legal, mas focado na questão fiscal, não há que questionar quanto a recolhimento de impostos de industrialização de produtos, já que trata-se de fabricação de itens por ente da Administração Pública Federal, para uso próprio, para atendimento dos interesses nacionais.

5.4.3 Estratégia de Implantação da AM na Marinha do Brasil

Diante dos requisitos supramencionados e do potencial da AM, conclui-se que, em termos técnicos, a implantação da AM na Marinha do Brasil aparenta ser possível, talvez até desejável, em especial para o atendimento das necessidades específicas da cadeia de suprimentos de sobressalentes. Cabe então, definir uma estratégia que viabilize a implementação dessas tecnologias.

Em termos de sistema informatizado, não vislumbra-se necessidade de adaptações relevantes ao SINGRA, uma vez que, em se incorporando um processo de fabricação por AM, basta que a Marinha do Brasil seja catalogada como fornecedor do item a ser fabricado por AM para distingui-lo dos demais. Ou seja, na prática a Marinha passará a constar como um possível fabricante do item.

Em sendo a Diretoria de Abastecimento da Marinha o Órgão de Direção Gerencial do SAbM, vislumbra-se que seja adequado atribuir àquela diretoria a coordenação da implantação da AM na Marinha (SGM-201, 2009).

Na primeira fase do projeto piloto, deve ser estabelecida a classificação dos sobressalentes, com base no processo AHP. Uma amostra de relevância para o projeto piloto é selecionar, dentre os 20% mais bem classificados como

sobressalentes candidatos para fabricação por AM, todos os que são utilizados por meios que operam na missão de paz no Líbano, missão na qual a Marinha do Brasil exerce comando das operações.

Como os meios da Esquadra Brasileira estão sediados no Rio de Janeiro, o projeto piloto deve ser executado nesta cidade, onde também está sediada a Diretoria de Abastecimento da Marinha, corroborando com a sua escolha como coordenadora do projeto.

Também na cidade do Rio de Janeiro, a Marinha possui um Depósito de Sobressalentes, unidade militar responsável pelo estoque e distribuição dos sobressalentes fornecidos por meio do SAbM naquela cidade. Esta unidade é então a organização mais apropriada para receber a infraestrutura de AM dentro do projeto piloto, uma vez que será impactada diretamente, em termos de estoques, com a implantação da AM no Rio de Janeiro.

Logo, com base nos itens classificados na fase anterior, na segunda fase do projeto piloto, deve(m) ser definida(s) a(s) tecnologia(s) AM adequada(s) para fabricar os itens selecionados e deve ser montada a infraestrutura, conforme acima mencionado. Simultaneamente deve ser realizado o processo de digitalização tridimensional dos sobressalentes selecionados na fase inicial.

Concluindo-se o processo de digitalização tridimensional dos sobressalentes e de instalação da infraestrutura, inicia-se uma nova fase do projeto piloto, na qual as primeiras peças devem ser fabricadas e testadas em órgãos de certificação da própria Marinha, tal qual já é feito com itens comprados no mercado.

Após aferida a qualidade dos itens fabricados por AM, com base na sua certificação devida, uma fase de teste inicial deve ser começada, designando como piloto o primeiro navio que, englobado pelo projeto piloto, inicie um período de manutenção programada.

Finalmente, alcançando uma fase de avaliação dos resultados, os sobressalentes fabricados por AM e aplicados na manutenção do navio no projeto piloto devem ser relacionados em um registro específico para o navio, onde deve constar: o equipamento onde foi instalado; o tempo decorrido entre a solicitação e a disponibilização do sobressalente ao navio; dificuldades encontradas ou facilidades percebidas na sua instalação; observação de falhas de operação do sobressalente; outros aspectos percebidos pelo pessoal do navio, visando permitir

à Diretoria de Abastecimento da Marinha concluir quanto à validade do emprego das tecnologias AM na cadeia de suprimentos de sobressalentes.

5.5 Conclusões sobre a aplicação da AM na Marinha do Brasil

As tecnologias de manufatura aditiva demonstram que possuem potencial para, disruptivamente, transformar os paradigmas de produção atuais, conforme foi apresentado no capítulo 4 deste trabalho.

Considerando a aplicação deste potencial disruptivo na busca do aprimoramento da cadeia de sobressalentes da Marinha do Brasil, pode-se depreender que as tecnologias de AM não apenas podem transformar a gestão da cadeia de suprimentos, em especial no que tange ao processo de compra de sobressalentes, mas principalmente sobrepondo aos dois principais desafios enfrentados por esta cadeia, a obsolescência dos sistemas e o reduzido grau de nacionalização dos meios navais.

Por fim, há considerável número de estudos sobre os dilemas de implantação de processos inovadores. No caso das tecnologias de AM, foram identificados poucos estudos sobre sua aplicação em cadeias de suprimentos de sobressalentes no Brasil. A implantação das tecnologias AM não deve se ater a um simples processo de decisão de se aplicar ou não como solução às dificuldades existentes. A adoção da AM é imperiosa, mesmo que venha a não conseguir abarcar a solução de dificuldades, pois não provocará danos à Marinha do Brasil. Ao contrário, conduzirá a Marinha, ao menos, a um avanço tecnológico, atestado pela tecnologia disruptiva (O'Connor, 2014).

6. Conclusões

Percebe-se na manufatura aditiva um considerável potencial disruptivo, não apenas no que tange aos métodos de produção, mas sobre a economia, como um todo, e até em termos sociais.

Este novo paradigma manufatureiro traz alterações nos requisitos para se produzir algum item, simplificando o processo à existência ou à criação do correspondente modelo digital tridimensional, à disponibilidade de matéria-prima bruta e ao equipamento AM.

Embalado pela simplicidade supracitada e pela potencialidade de desenvolvimento ainda não explorada, as aplicações de AM vêm se expandindo para múltiplos setores, como o de saúde, o de defesa, o automotivo e até mesmo o de alimentos. Este tipo de tecnologia vem recebendo considerável aderência do público e tende a se tornar presente no dia a dia das pessoas (Cunningham et al, 2015).

Do ponto de vista social, entre as implicações consequentes do uso e do desenvolvimento das tecnologias de AM, está a redução da necessidade de mão de obra na produção, haja vista o exemplo da *Tesla Factory*, na Califórnia, Estados Unidos. Mais além, com a redução de processos intermediários na fabricação; de estoques de produtos semiacabados e de necessidade de transporte de produtos, o uso de mão de obra tende a ser reduzido ainda mais.

Não obstante a potencial disruptivo que as tecnologias de AM apresentam, não foi possível observar uma quantidade relevante de trabalhos brasileiros sobre o tema. De tal modo, uma das contribuições que se espera advir do presente trabalho é disponibilizar conteúdo para futuras pesquisas no Brasil, favorecendo e facilitando os estudos de outros pesquisadores, em prol do desenvolvimento das tecnologias de AM no país.

Avaliando pela vertente da gestão das cadeias de suprimentos, envoltas por mercados cujos anseios são cada vez mais exigentes e dinâmicos, as companhias são compelidas a buscar soluções inovadoras para se adaptar à tamanha mutabilidade da demanda. Neste sentido, o emprego das tecnologias de AM nas linhas de produção e nas cadeias de suprimentos é mais do que desejável, podendo mesmo se tornar em um requisito para conseguir capacidade de responsividade, simultaneamente com uma estrutura reduzida de custos.

Outro aspecto que surgiu com o advento da AM e que implica em consequências na gestão das cadeias de suprimentos é o surgimento do movimento dos *makers*. A popularização das tecnologias de AM, em meio aos amadores empreendedores, gera uma pressão adicional sobre a mutabilidade da demanda, bem como amplia a concorrência do mercado.

Quanto à Marinha do Brasil, as tecnologias de AM podem viabilizar para a Força não apenas mudar disruptivamente a gestão das suas cadeias de suprimentos de sobressalentes, modificando a gestão das compras desse tipo de item de suprimentos, mas também solucionar dificuldades enfrentadas por ela, no atendimento das demandas por sobressalentes dos meios navais.

Juntamente com a implantação da AM e de modo a facilitar tal implantação, a Marinha do Brasil pode incorporar equipamentos de escaneamento tridimensional, com o intuito de facilitar a digitalização 3D dos sobressalentes a serem produzidos por AM. De fato, o escaneamento pode auxiliar não apenas a incorporação da AM nas atividades de suprimentos da Marinha, mas viabilizar análise de avaria em equipamentos, digitalmente, favorecendo as atividades de manutenção dos meios. Logo, sugere-se para estudos futuros a verificação da viabilidade e da utilidade efetiva da incorporação de tecnologias de escaneamento tridimensional para a Marinha do Brasil.

A mensuração do valor de se manter um elevado nível de prontidão da Força, em termos econômicos, não é uma tarefa simples, em função dos diversos fatores subjetivos que envolve. Porém, dentro de uma conjuntura de recursos financeiros escassos, dentro do orçamento da União, um projeto de implantação de uma nova tecnologia manufatureira na Marinha, ou em qualquer força armada, ganha aceitabilidade perante as autoridades orçamentárias e legitimidade perante a sociedade caso se consiga demonstrar vantagens econômicas com sua concretização. De tal modo, após o levantamento dos sobressalentes candidatos a serem fabricados por AM, na Marinha, momento no qual vai ser possível definir as tecnologias apropriadas a serem adquiridas e, por conseguinte, o custo de implantação, sugere-se fazer um estudo de custo-benefício da implantação da AM na Marinha.

Em suma, estão sendo propostos dois temas para estudos futuros:

- Avaliar a viabilidade e a utilidade de se empregar tecnologias de escaneamento 3D na Marinha do Brasil; e

- Efetuar uma análise de custo / benefício da implantação das tecnologias de manufatura aditiva na Marinha do Brasil, após definidos e classificados os sobressalentes a serem produzidos por este tipo de tecnologias.

Por fim, os governos devem estar atentos para os impactos disruptivos advindos das tecnologias de AM. A preparação deve começar por ações voltadas para a economia, para o mercado de trabalho, para a geopolítica, entre outras áreas. Políticas de incentivo à pesquisa que viabilizem o desenvolvimento interno das tecnologias são aconselháveis, para uso na indústria nacional, bem como para emprego nas instituições governamentais. Para países que são grandes exportadores de *comodities*, como o Brasil, o desenvolvimento das tecnologias AM internamente propicia a utilização dessas *comodities* para fortalecimento da economia nacional e progresso tecnológico. Finalmente, o incentivo ao uso das tecnologias AM oportuniza a redução da emissão de poluentes na atmosfera e o aprimoramento de um sistema sustentável de prosperidade (Garrett, 2014).

Referências bibliográficas

ABRAHAMSSON, M.; CHRISTOPHER, M.; STENSSON, B. Mastering Supply Chain Management in an era of uncertainty at SKF. *Global Business and Organizational Excellence*, v. 34, n. 6, p. 6-17, 2015.

ADY, J. A digitally disruptive supply chain. *Design Management Review*, v. 26, n. 4, p. 6-8, 2015.

ALMEIDA, P. M. S.; WILLIAMS, S. Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT). *Proceedings of the Twenty-first Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA. 2010.

AMAZING'S ADDITIVEMANUFACTURING.COM(a). AM Basics. Disponível em: <<http://additivemanufacturing.com/basics/>>. Acesso em 30/11/2016.

AMAZING'S ADDITIVEMANUFACTURING.COM(b). Wohlers Report 2016 published: additive manufacturing industry surpassed \$5.1 billion. Disponível em: <<http://additivemanufacturing.com/2016/04/05/wohlers-report-2016-published-additive-manufacturing-industry-surpassed-5-1-billion/>>. Acesso em 23/12/2016.

AMRG LOUGHBOROUGH UNIVERSITY (Additive Manufacturing Research Group). The seven categories of additive manufacturing. Disponível em: <<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>>. Acesso em 17/12/2016.

APPLETON, R. W. Additive manufacturing overview for the United States Marine Corps. RWApleton & Company, Inc, 2014.

ASTM F2792 12a, Standard, 2012. Standard terminology for additive manufacturing technologies. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, West Conshohocken, PA, USA.

ATZENI, E.; SALMI, A. Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 62, n. 9-12, p. 1147-1155, 2012.

AUGUSTSSON, R.; BECEVIC, D. Implementing Additive Manufacturing for Spare Parts in the Automotive Industry. 2015. Tese de Mestrado. Gothenburg: Chalmers University of Technology.

BAKER, R. 1920. Method of making decorative articles. U.S. Patent n. 1.533.300, 14 de abril de 1925.

BALDOCK, J. K. Design and fabrication of a new class of cutting tool material using additive manufacturing. 2016. Tese de mestrado. School of Applied Sciences, College of Science Engineering and Health, RMIT University

BECHTHOLD, L. et al. 3D printing - a qualitative assessment of applications, recent trends and the technology's future potential. Studien zum deutschen innovations system. EFI, Berlin, 2015.

BERMAN, B. 3-D printing: The new industrial revolution. Business horizons, v. 55, n. 2, p. 155-162, 2012.

BOURELL, D. L. Perspectives on Additive Manufacturing. Annual Review of Materials Research, n. 0, 2016.

BOURELL, D. L. et al. A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. Proceedings of RapidTech, p. 24-25, 2009.

BROWN, R. et al. 3D printing – how much will it improve the DoD supply chain of the future? Revista Defense AT&L, p. 6-10, mai-jun. 2014

CAMPBELL, T. et al. Could 3D printing change the world? Technologies, potential, and implications of additive manufacturing. Atlantic Council, Washington, DC, out. 2011.

CHRISTOPHER, M.; RYALS, L. J. The supply chain becomes the demand chain. Journal of Business Logistics, v. 35, n. 1, p. 29-35, 2014.

COTTELEER, M. 3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth. Deloitte Review, Additive Manufacturing Symposium, v. 14, 2014.

COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS (CSCMP). Supply chain management terms and glossary. 2013. Disponível em: http://cscmp.org/imis0/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx. Acesso em 26/12/2016.

CRUMP, S. 1989. Apparatus and method for creating three-dimensional objects. US Patent n. 5121329, 09 de junho de 1992.

CUNNINGHAM, V.; YOUNG, J. T.; SCHRADER, C. A. Navy additive manufacturing: adding parts, subtracting steps. 2015. Tese de Mestrado. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

DECKARD, C. R. 1986. Method and apparatus for producing parts by selective sintering. US Patent n.4863538, 05 de setembro de 1989.

DEPARTMENT OF NAVY (DON). Candidate Part Demonstration Criteria. In: Additive Manufacturing Implementation Plan. Mai, 2016. Disponível em:

<http://www.mcwl.marines.mil/Portals/34/Documents/S_T/am2/Guidance%20from%20Higher.pdf?ver=2016-09-21-123239-587>. Acesso em 13/02/2017.

DESHMUKH, A. K.; MOHAN, A. Demand chain management: the marketing and supply chain interface redefined. IUP Journal of Supply Chain Management, v. 13, n. 1, p. 20, 2016.

EXAME.COM, equipe de redação da revista online. Airbus apresenta avião em miniatura feito com impressora 3D. Publicado em 06/06/2016. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/tecnologia/airbusapresentaaviaoemminiaturafeitocomimpressora3d/>>. Acesso em 25/12/2016.

FORD, D. N. et al. Make or buy: an analysis of the impacts of 3d printing operations, 3d laser scanning technology, and collaborative product life-cycle management on ship maintenance and modernization cost savings. Naval Postgraduate School, Monterey CA, Proceedings of the Twelfth Annual Acquisition Research Symposium, 2015.

FRAZIER, W. E. Metal additive manufacturing: a review. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 23, n. 6, p. 1917-1928, 2014.

FRIEDEL, M. D. Additive manufacturing (AM) in expeditionary operations: current needs, technical challenges, and opportunities. 2016. Tese de Mestrado. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

GARRETT, B. 3D printing: new economic paradigms and strategic shifts. Global Policy, v. 5, n. 1, p. 70-75, fev. 2014.

GEBLER, M.; UITERKAMP, A. J. M. S.; VISSER, C. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. Energy Policy, v. 74, p. 158-167, 2014.

GORNI, A. A. GUIA I - prototipagem rápida, a revolução 3D. Revista Plástico Industrial, p. 24-35, nov. 2013.

GUO, N.; LEU, M. C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. Frontiers of Mechanical Engineering, v. 8, n. 3, p. 215-243, 2013.

HASSAN, Z.; RAMACHANDRAN, K. K. Enhancing flexible marketing postponement strategy and customer related performance: the role of new technology and innovation. Journal of Management, v. 6, n. 9, p. 67-84, set. 2015.

HUANG, S. H. et al. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 67, n. 5-8, p. 1191-1203, 2013.

HULL, C. W. 1984. Apparatus for production of threedimensional objects by stereolithography. US Patent n. 4575330, 11 de março de 1986.

ISO/ASTM 52900:2015, Standard, 2015. Additive manufacturing - general principles – terminology. International Organization for Standardization (ISO). ISO Central Secretariat, Geneva, Switzerland.

JOESBURY, A. M. New approaches to composite metal joining. 2015. Tese de Doutorado. Cranfield, Bedfordshire: Cranfield University, School of Aerospace, Transport and Manufacturing.

KAISER, M. Solar Sinter. 2011. Disponível em: <<http://www.markuskayser.com/work/solarsinter/>>. Acesso em 22/01/2017.

KENNEY, M. E. Cost Reduction through the Use of Additive Manufacturing (3D Printing) and Collaborative Product Lifecycle Management Technologies to Enhance the Navy's Maintenance Programs. 2013. Tese de Mestrado. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

KHAJAVI, S. H.; PARTANEN, J.; HOLMSTRÖM, J. Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in Industry*, v. 65, n. 1, p. 50-63, 2014.

KLEIN, J. et al. Additive manufacturing of optically transparent glass. *3D Printing and Additive Manufacturing*, v. 2, n. 3, p. 92-105, 2015.

LASTRES, H. M. M.; ALBAGLI, S. Informação e globalização na era do conhecimento. Rio de Janeiro: Campus, p. 163, 1999.

MACCARTHY, B. et al. Supply chain evolution - theory, concepts and science. *International Journal of Operations and Production Management*, abr. 2016.

MACKLEY, C. J. Reducing costs and increasing productivity in ship maintenance using product lifecycle management, 3d laser scanning and printing. 2014. Tese de Mestrado. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

MAHMOOD, S.; KESS, P. An assessment of the organization of demand supply chains in the fashion industry. *Managing Intellectual Capital and Innovation for Sustainable and Inclusive Society; Proceedings of the MakeLearn and TIIM Joint International Conference 2015*. Bari, Italy, 2015. p. 487-498.

MAIA, G. R.; GOMES, H. da R. Proposta de soluções para redução dos atrasos nas entregas de produtos acabados para um grupo da indústria de moda. 2016. Trabalho de conclusão de curso. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MANNERS-BELL, J.; LYON, K. The implications of 3D printing for the global logistics industry. *Transport Intelligence*, p. 1-5, 2012.

MARINHA DO BRASIL. Navios. 2017. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/content/navios>>. Acesso em 09/02/2017.

MARQUARDT, T.; ZHENG, E. History of 3D Printing. 2016. Lawrence University Interdisciplinary Makerspace for Engaged Learning. Disponível em: <<https://blogs.lawrence.edu/makerspace/history/>>. Acesso em 30/11/2016.

MAXWELL, C. 3D printing: taking business to another dimension. *The Director Journal*, June 2012, Vol. 65 Issue 10, p60-63. 4p. 10 Color Photographs.

MENDES, P. A framework for assessing and guiding progress towards a demand driven supply chain (DDSC). 2010. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro, RJ: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

MOHR, S.; KHAN, O. 3D printing and its disruptive impacts on supply chains of the future. *Technology Innovation Management Review*, v. 5, n. 11, p. 20, 2015.

MOKASDAR, A. S. A quantitative study of the impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain. 2012. Tese de Mestrado. Ohio: University of Cincinnati.

MOLITCH-HOU, M. Construction of world's 1st 3d printed bridge begins in Amsterdam. *3DPrintingIndustry.com*. Publicado em 16/10/2015. Disponível em: <<https://3dprintingindustry.com/news/constructionofworlds1st3dprintedbridgebeginsinamsterdam60110/>>. Acesso em 25/12/2016.

MONTEIRO, M. T. F. A impressão 3D no meio produtivo e o design: um estudo na fabricação de joias. 2015. Tese de Mestrado. Escola de Design da Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MORGAN, J. A.; PRENTISS, J. M. An analysis of item identification for additive manufacturing (3-D printing) within the naval supply chain. 2014. Tese de Mestrado. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

MUNZ, O. J. 1951. Photo-glyph recording. US Patent n. 2775758, 25 de dezembro de 1956.

MURR, L. E. et al. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 28, n. 1, p. 1-14, 2012.

NAVAL AIR SYSTEMS COMMAND (NAVAIR) Public Affairs. NAVAIR marks first flight with 3-D printed, safety-critical parts. History Number: NNS160729-25. Publicado em 29/07/2016. Disponível em: <http://www.navy.mil/submit/display.asp?story_id=95948>. Acesso em 25/12/2016.

NEVES, L. Fazer ou Comprar: uma análise sob a perspectiva das teorias da Economia dos Custos de Transação e da Visão Baseada nos Recursos. 2009. Tese de Doutorado. PUC-Rio

NYMAN, H. J.; SARLIN, P. From bits to atoms: 3D printing in the context of supply chain strategies. In: 2014, 47th Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE, 2014. p. 4190-4199.

O'CONNOR, C. Navy additive manufacturing: policy analysis for future DLA material support. 2014. Tese de Mestrado. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

OETTMEIER, K.; HOFMANN, E. 3D-printing: how additive manufacturing impacts supply chain business processes and management components. 28th Annual Nordic Logistics Research Network (NOFOMA) Conference, p. 444-460, jun. 2016.

PABEN, C.; STEPHENS, W. K. Additive manufacturing: an analysis of intellectual property rights on Navy acquisition. 2015. Tese de Mestrado. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

PANDOLFELL, V. C. Editorial, *Revista da Associação Brasileira de Cerâmica* (online), São Paulo, vol. 58 n. 347, p. 279, Jul/Set. 2012.

PERUMAL, H. Improving supply chain in your business. International Institute of Management, 2006.

PETRICK, I. J.; SIMPSON, T. W. 3D printing disrupts manufacturing: how economies of one create new rules of competition. *Research-Technology Management*, v. 56, n. 6, p. 12-16, 2013.

POULSEN, S. N. A delphi study of additive manufacturing applicability for united states air force civil engineer contingency operations. 2015. Tese de Mestrado. Ohio: Graduate school of Engineering and Management, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base.

RASOULI, M. R. et al. A dynamic capabilities perspective on service - orientation in demand - supply chains. *Procedia CIRP*, v. 30, p. 396-401, 2015.

RAY, J. T. The 3D printed supply chain: stronger, faster, and more flexible. *Defense Transportation Journal*, October 2013, p14-24.

REHNBERG, M. 3D printing and global value chains - how new technology is restructuring production in the 21st Century. 2016. Tese de Mestrado. Frederiksberg: Copenhagen Business School.

RODRIGUES, J. B. M. Avaliação dos modelos de supply chain lean, agile e leagile: uma abordagem empírica. 2015. Tese de Mestrado. Ponta Delgada: Universidade dos Açores.

SANTOS, E. C. et al. Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, n. 12, p. 1459-1468, 2006.

SANTOS, F. dos. Estratégica, qualidade da informação. 2016. Tese de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.

SAUNDERS, S. (Ed.). *Jane's Fighting Ships*, 2009-2010 2009/2010. Jane's Information Group, 2009.

SCHMITT, A. J. et al. Centralization versus decentralization: risk pooling, risk diversification, and supply chain disruptions. *Omega*, v. 52, p. 201-212, 2015.

SECRETARIA GERAL DE MARINHA (SGM). SGM-201: Normas para execução do abastecimento (6ª Revisão), 2009.

SENNA, P. et al. Estudo analítico sobre os conceitos Lean, Agile e Leagile aplicados às cadeias de suprimentos: Uma revisão de literatura. *Journal of Lean Systems*, v. 1, n. 2, p. 40-56, 2016.

SHULMAN, H.; SPRADLING, D.; HOAG, C. Introduction to additive manufacturing. *Ceramic Industry*, v. 162, n. 12, p. 15-19, 2012.

SILVA, C. P. de A.; VALES, M. D. Produzindo com impressora 3d: mapeamento do fluxo de valor de um microempreendedor. 2015. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SIN, M. L. Achieving ship's mission flexibility through designing, printing and operating unmanned systems with additive manufacturing and delayed differentiation. 2016. Tese de Mestrado. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

SNOW, J. J. Entering the matrix: the challenge of regulating radical leveling technologies. 2015. Tese de Mestrado. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

STRATASYS, blog website. Stratasy's additive manufacturing chosen by airbus to produce 3d printed flight parts for its A350 XWB aircraft. Publicado em 06/05/2015. Disponível em: <<http://blog.stratasys.com/2015/05/06/airbus-3d-printing/>>. Acesso em 25/12/2016.

STRICKLAND, J. D. Applications of additive manufacturing in the marine industry. Proceedings of PRADS2016, v. 4, p. 8th, 2016.

TAKAHASHIA, A. R. G. et al. Projeto de cadeia de suprimentos ágeis e verdes: estudos exploratórios em uma empresa de bens de consumo não duráveis. Production, v. 25, n. 4, p. 971-987, out./dez. 2015.

TAKI, P.; BARZINPOUR, F.; TEIMOURY, E. Risk-pooling strategy, lead time, delivery reliability and inventory control decisions in a stochastic multi-objective supply chain network design. Annals of Operations Research, p. 619-646, fev.2016.

TZIANTOPOULOS, K.; VLACHOS, D.; IAKOVOU, E. Additive manufacturing: a decision support system for spare parts inventory management. 11th MIBES Conference, Heraklion, Crete, Greece, p. 521-5218, jun. 2016.

VAEZI, M.; SEITZ, H.; YANG, S. A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 67, n. 5-8, p. 1721-1754, 2013.

WIMMER, F. Application cases and integration of additive manufacturing processes into conventional process chains by the example of tool repair using the controlled metal build-up process. 2015. Tese de mestrado. Aachen, Germany: Fraunhofer Institute for Production Technology.

WINDLE, W. A. Additive manufacturing: preparing for the reality of science fiction. 2015. Tese de Mestrado. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A review of additive manufacturing. ISRN Mechanical Engineering, v. 2012, 2012. Article ID 208760, 10 pages. DOI:10.5402/2012/208760.

YANG, S.; ZHAO, Y. F. Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 80, n. 1-4, p. 327-342, 2015.

YE, N. Y.; LAU, K. H.; TEO, L. K. Y. Evolution of demand supply network alignment and its implementation - a literature review. In: ISL2014: Designing Responsible and Innovative Global Supply Chains. University of Nottingham, 2014. p. 424-431.

YEUNG, J. H. Y. et al. Postponement strategy from a supply chain perspective: cases from China. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v. 37, n. 4, p. 331-356, fev.2007.

ZHAI, Y.; LADOS, D. A.; LAGOY, J. L. Additive manufacturing: making imagination the major limitation. *JOM*, v. 66, n. 5, p. 808-816, 2014.

ZIMMERMAN, B. A.; ALLEN III, E. E. Analysis of the potential impact of additive manufacturing on Army logistics. 2013. Tese de Mestrado. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

Apêndice

Categorias e tecnologias de manufatura aditiva

1 *Binder Jetting*

Processo no qual um agente líquido de fixação é seletivamente depositado para ser juntado a um matéria-prima pulverizada (ISO/ASTM 52900, 2015). De tal modo, este processo depende de pelo menos dois materiais, o fixador (aderente) e o material base em pó (AMRG Loughborough University).

Este tipo de processo foi desenvolvido inicialmente no início dos anos 1990, por componentes do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), sob a forma da tecnologia *powder bed binder jetting*, tendo sido batizada de 3D Printing e licenciada para algumas companhias da época (Bourell, 2016; Shulman et al, 2012).

A produção, conforme descrita por esta tecnologia, começa com uma fina camada do material pulverizado, deitada sobre uma plataforma de fabricação ou uma caixa. Por meio de cabeças de impressão, semelhantes às das impressoras de jato de tinta, partículas de fixador são aplicadas sobre o pó, horizontalmente, linha por linha, seguindo o formato da seção reta do objeto desejado, até a conclusão da camada. Uma vez polimerizada a primeira camada, um pistão desce a plataforma ou caixa de construção, ao equivalente à altura da camada produzida, enquanto outro pistão e um rolo alimentam o sistema, cobrindo a camada recém concluída com mais pó.

Praticamente todo tipo de material pode ser empregado para produção por meio do processo *Binder Jetting* (Bourell, 2016), o que é uma das principais vantagens deste tipo de processo. Os tipos de materiais utilizados mais comumente como base, nas tecnologias atuais, são metais, polímeros, cerâmicas, areia (vidros).

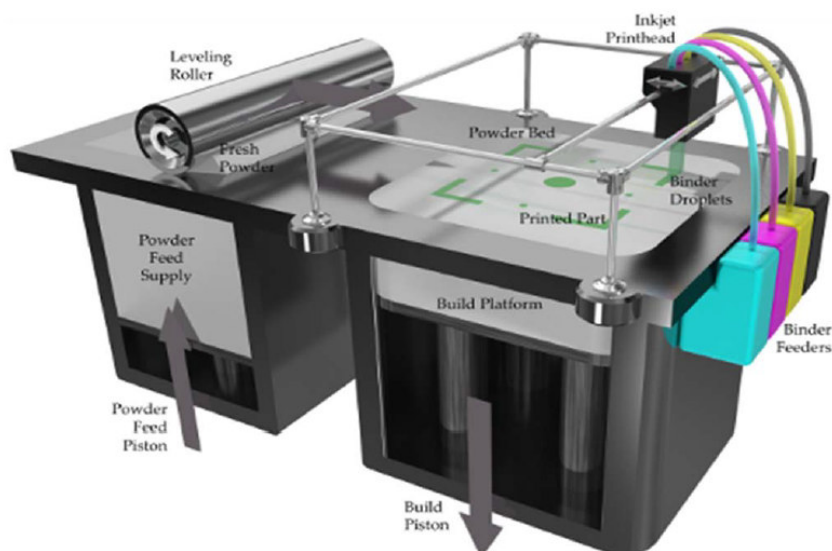


Figura 23 - Modelo *Binder Jetting* (Cunningham et al, 2015)

Outras características desta tecnologia incluem a possibilidade de utilizar fixadores coloridos, permitindo dar maior variedade aos objetos produzidos; baixos custos de operação; altas velocidades de fabricação; não necessidade de estruturas de suporte para o objeto gerado, uma vez que a estrutura se auto-sustenta, permitindo a produção de vários objetos simultaneamente; e os objetos fabricados não são homogêneos, já que são formados por no mínimo dois materiais distintos (Poulsen, 2015; Shulman et al, 2012).

2 Directed Energy Deposition

É um processo AM baseado na utilização de uma fonte de energia térmica, exemplo um laser, para fundir matérias-primas brutas, por meio do seu derretimento, no local onde estão sendo despejados (Sin, 2016).

As matérias-primas brutas utilizadas normalmente são compostos de metais, na forma pulverizada ou na forma de arame, contudo é possível se utilizar polímeros ou cerâmicas. Esta matéria-prima bruta é despejada por meio de bicos (pó) ou aplicadores (arame) sobre um feixe de energia laser, raio de elétrons ou canhão de plasma, que o derrete sobre uma superfície de produção e formando as sucessivas camadas, após seu resfriamento (Poulsen, 2015).

A primeira tecnologia com base neste tipo de processo a ser comercializada foi a *Laser Engineered Net Shape* (LENS), desenvolvida nos *Sandia National Laboratories*, no final dos anos 1990 e licenciada para a empresa Optomec Inc. em 1997 (Bourell, 2016; Huang et al, 2013).

A produção por meio de LENS é realizada dentro de uma câmara fechada, com gás argônio, onde metal pulverizado é injetado diretamente sobre um feixe de laser de ultra potência, que o derrete. O laser é direcionado para o ponto onde deve ocorrer a fundição. A injeção de metal é feita por meio de bicos instalados em braços com movimento em múltiplos eixos. Após derreter, o material é depositado sobre uma superfície de produção, se for a primeira camada, ou sobre o objeto desejado, onde se resfria e se solidifica, formando a nova camada.

Este tipo de produção permite não apenas a criação de novos objetos, mas permite inclusive encobrir objetos danificados, no intuito de repará-los (Huang et al, 2013; Poulsen, 2015).

Outra peculiaridade é a possibilidade de se utilizar diferentes bicos de injeção de metal para combinar diferentes tipos de metais, permitindo formar ligas de metais com propriedades específicas para atender a diferentes usos (Wong e Hernandez, 2012).

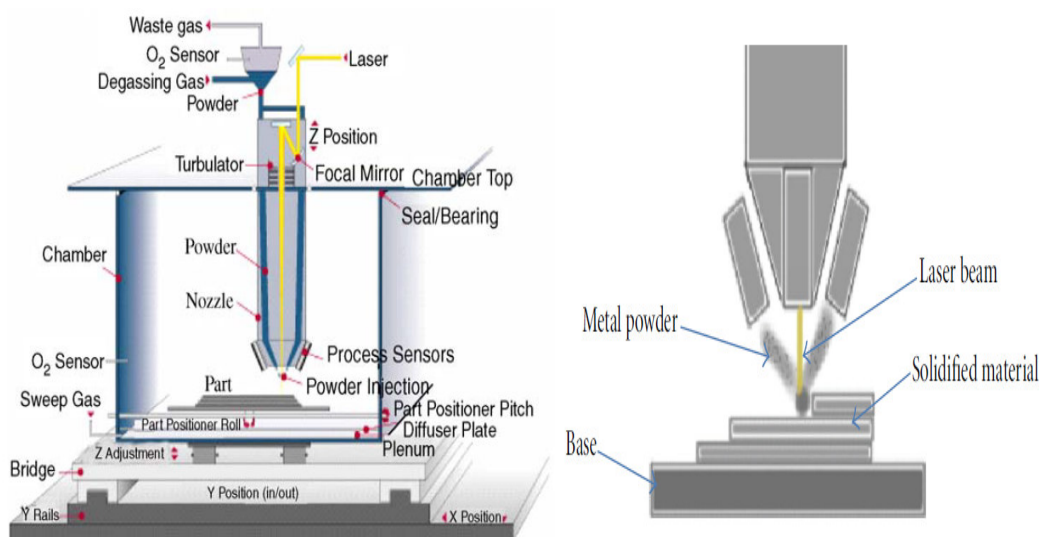


Figura 24 - Modelo *Laser Engineered Net Shaping* (Santos et al, 2006; Wong e Hernandez, 2012)

3 Material Extrusion

Esta categoria de processos contempla tecnologias que utilizam bocais injetores controlados por computador para, seletivamente, depositarem material moldável, em um fluxo contínuo (Vaezi et al, 2013), normalmente polímeros ou material a base de polímeros, para criar objetos tridimensionais (Bourell 2016).

A criação da tecnologia FDM por Crump no final dos anos 1980, conforme citado na seção 2.2 deste trabalho, foi o marco inicial desta classe de processos e ainda hoje é a tecnologia mais comum neste nicho, sendo base para a maioria das

máquinas AM para desktops, proporcionando impressão tridimensional aos usuários finais (Poulsen, 2015).

A FDM se processa, basicamente, pela extrusão de material, através de um bocal semelhante a uma pistola de cola quente e com movimentos horizontais, de modo a imprimir uma camada com o formato da seção reta do objeto, por sobre uma plataforma de fabricação. Para conseguir expelir o material a compor o objeto, o bocal possui aquecedores que derretem o material. O material é depositado e endurece quando em contato com a camada anterior ou a base da plataforma, grudando em si e montando a camada. Ao final da conclusão de cada camada, a plataforma de fabricação desce o equivalente à espessura de uma camada, para permitir a impressão da camada seguinte.

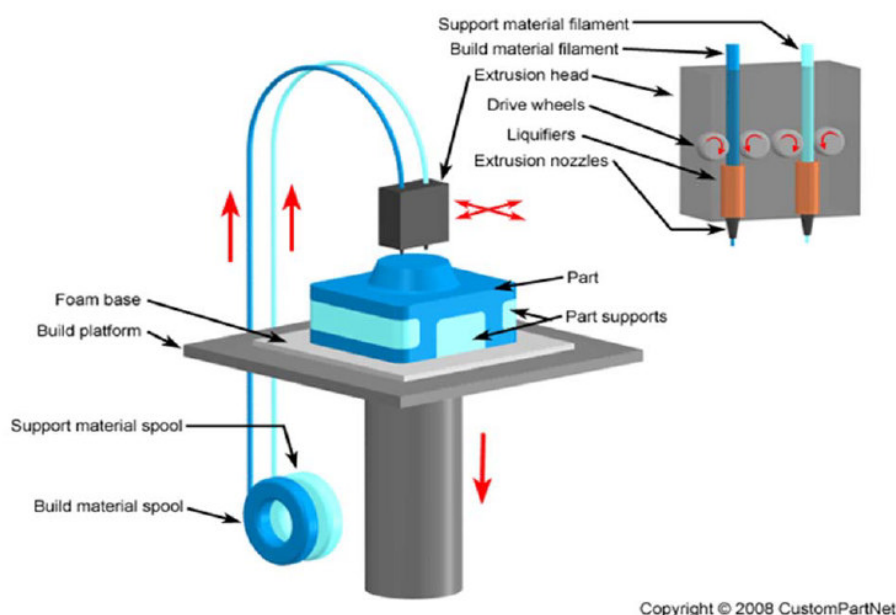


Figura 25 - Modelo *Fused Deposition Modeling* (Zimmerman e Allen III, 2013)

Além de polímeros, há muitas aplicações desta tecnologia em cerâmicas e, também, comidas, como glacês e massas de biscoitos ou bolos (Shulman et al, 2012).

A característica que popularizou esta tecnologia é o fato de que os custos dos equipamentos e dos materiais são relativamente baratos (Bourell, 2016).

Por outro lado, muitas vezes os objetos fabricados por meio deste tipo de tecnologia dependem de uma estrutura de suporte, que são criados de outro material e devem ser removidos ao final do processo de fabricação (Poulsen, 2015).

4 Material Jetting

Processo no qual partículas de material são seletivamente depositadas sobre uma plataforma de produção (ISO/ASTM 52900, 2015).

O equipamento utilizado possui cabeças de impressão semelhantes às de impressoras jato de tinta, porém é utilizado como material de fabricação ou cera ou fotopolímeros que, após serem aplicados são curados por meio de luz ultravioleta (Poulsen, 2015; Cunningham et al, 2015).

De tal modo, o processo *material jetting* segue os mesmos princípios básicos da impressão jato de tinta convencional (AMRG Loughborough University; Friedell, 2016). As cabeças de impressão são posicionadas sobre a plataforma e se movimentam nos eixos x e y, depositando as partículas do material de fabricação, juntamente com material de suporte, ao mesmo tempo em que são solidificadas pela ação da luz UV. Ao final de cada camada, as cabeças de impressão são deslocadas verticalmente para permitir a fabricação da nova camada.

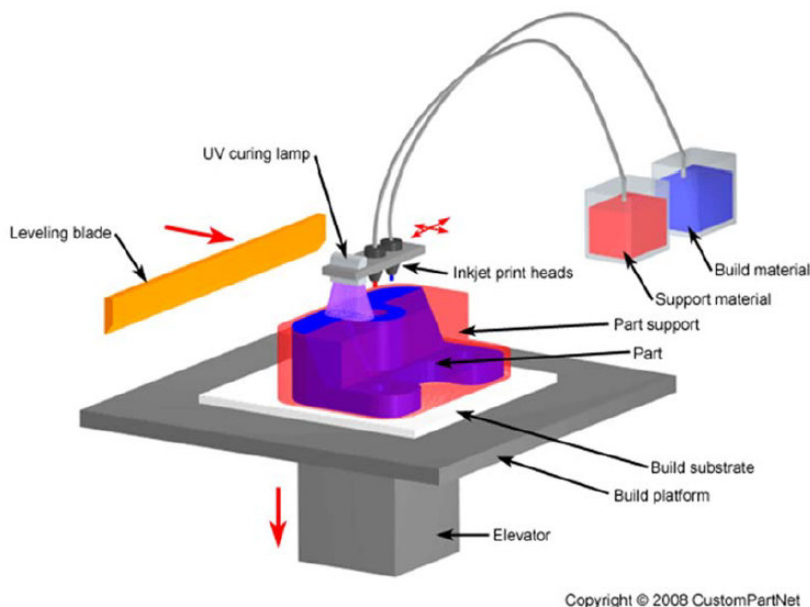


Figura 26 - Esquema básico de *Material Jetting* (AMRG Loughborough University)

Este tipo de processo permite a combinação de diversos materiais, em um único objeto, ao mesmo tempo, permitindo formar peças totalmente montadas ou circuitos eletrônicos, com uma única “impressão” (Cunningham et al, 2015; Friedell, 2016).

A tecnologia mais conhecida é a *multijet modeling*, que começou a ser disponibilizada no mercado pela empresa Objet Geometries, fundada em 1998, e foi estruturada com base no trabalho de um inventor chamado Gothait (Bourell, 2016).

5 Powder Bed Fusion

Nesta categoria de processo estão incluídas tecnologias que usam um berço preenchido com material pulverizado - sejam metais, plásticos ou outros materiais com características apropriadas - que é fundido de maneira seletiva, por meio de uma fonte de energia térmica (Friedell, 2016; ISO/ASTM 52900, 2015).

A primeira tecnologia representante desta categoria foi a *Selective Laser Sintering* (SLS) criada e patenteada por Deckard no final dos anos de 1980 e as primeiras máquinas comercializadas pela então DTM Corporation, tendo sido uma das primeiras tecnologias de manufatura aditiva comercializadas no mundo, conforme já mencionado na seção 2.2, sobre antecedentes, desta dissertação.

Na técnica da SLS, uma camada inicial de material pulverizado é devidamente acomodada sobre uma plataforma de fabricação, por meio de um rolo que desliza por sobre toda a plataforma. Esta camada é muito fina, ficando na espessura de cerca de 0,1 mm. Uma fonte de laser é programada de modo a focar sobre a superfície da camada inicial e direcionar a energia que vai sinterizar as partículas da camada de pó, no formato da seção reta do objeto pretendido. Após a solidificação do material sinterizado, a plataforma é descida; o rolo acomoda uma nova camada de pó sobre a camada concluída e o laser é novamente ativado, traçando o contorno de uma nova camada. Este processo se repete tantas quantas vezes sejam necessárias até a conclusão do objeto tridimensional (Frazier, 2014; O'Connor, 2014; Strickland, 2016; Zimmerman e Allen III, 2013).

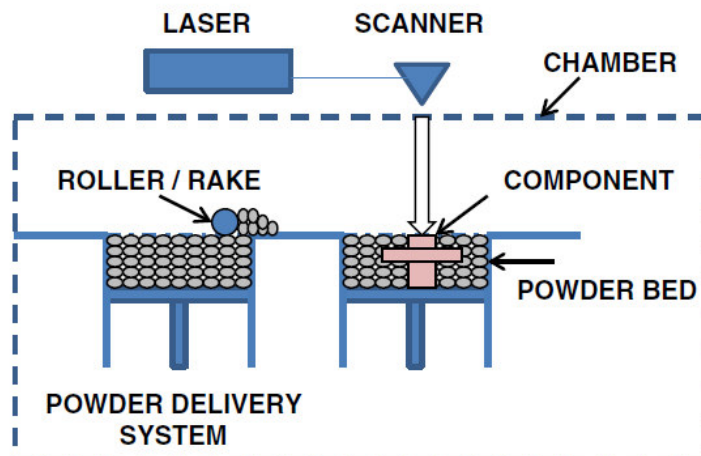


Figura 27 - Modelo *Selective Laser Sintering* (Frazier, 2014)

Outra tecnologia de relevância nesta categoria é a *Electron Beam Melting* (EBM), tecnologia que começou a ser comercializada pela Arcam AB, por volta de 2005, na Suécia (Guo e Leu, 2013; Murr et al, 2012).

O processamento para fabricação pela tecnologia de EBM é muito similar ao método da técnica de SLS, diferindo basicamente pela utilização de um canhão de raios de elétrons ao invés de laser, o que permite derreter efetivamente a matéria-prima, de maneira que o processamento se torna mais eficiente e mais rápido (Guo e Leu, 2013; O'Connor, 2014; Poulsen, 2015).

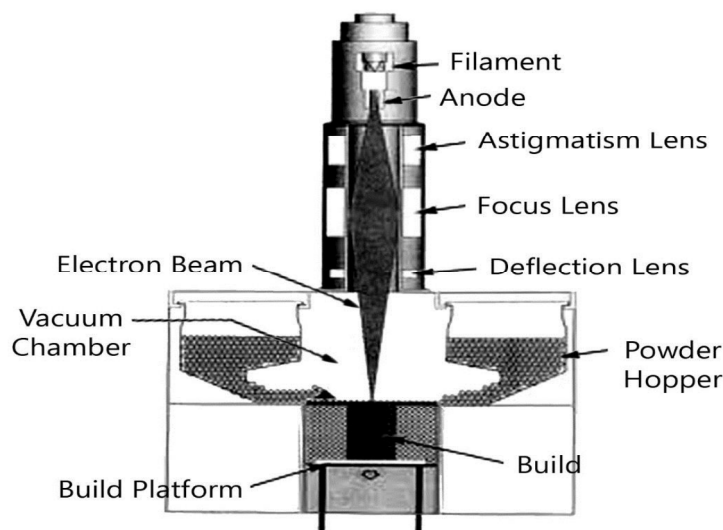


Figura 28 - Modelo *Electron Beam Melting* (BALDOCK, 2016)

Ambas as tecnologias citadas não necessitam de material de suporte para as peças formadas, uma vez que o material não sinterizado / derretido pode sustentar a peça (Friedell, 2016; Strickland, 2016).

Outra peculiaridade neste tipo de processo é a necessidade de que a fabricação seja conduzida em um ambiente a vácuo controlado, em função das elevadas temperaturas para sinterização ou derretimento do material bruto, e por causa da elevada reatividade das partículas pulverizadas à umidade e à oxidação (O'Connor, 2014; Poulsen, 2015; Vaezi et al, 2013). Como consequência, os objetos produzidos apresentam menor grau de impureza, maior resistência e são totalmente densos (Baldock, 2016; Guo e Leu, 2013; Poulsen, 2015).

Semelhante à tecnologia LENS, a EBM permite formar ligas de metais com especificidades para diferentes usos (Murr et al, 2012).

Releva fazer uma consideração no tocante entre sinterização e derretimento: sinterização é um estágio anterior ao derretimento, no qual as partículas começam a se unir. A principal diferença entre sistemas de sinterização e sistemas de derretimento é basicamente as temperaturas de operação mais elevadas, que vão permitir maior consistência nos produtos finais, porém vão implicar em elevado consumo energético além de maior necessidade de controle ao longo do processo (Baldock, 2016; Frazier, 2014).

6 Sheet Lamination

Categoria de processos cujo princípio é utilizar folhas sólidas de matéria-prima, que são fixadas uma a uma para formar objetos tridimensionais (ISO/ASTM 52900, 2015; Poulsen, 2015).

Tecnologias que compõem esta categoria de processos são normalmente compostas por um sistema de alimentação, que avança uma folha do material de fabricação por sobre uma plataforma de construção; um sistema de fixação, que vai fixar cada folha, como por exemplo um rolo aquecido pressionado sobre as folhas; e um sistema de corte, que vai traçar o contorno da camada na folha e cortar o excesso, exemplo um laser (Cunningham et al, 2015).

Por outro lado, as tecnologias incluídas nesta categoria combinam técnicas de manufatura aditiva e de produção subtrativa, ou seja, por processo de produção tradicional, pelo qual os itens são produzidos se removendo porções da matéria-prima até se atingir o formato desejado. Tal aspecto não vem a comprometer sua classificação como tecnologias de manufatura aditiva (Wong e Hernandez, 2012).

De tal modo, em termos de materiais a serem utilizados, há a possibilidade de se formar objetos por meio de colagem de camadas de papéis ou de plásticos;

por meio do derretimento de camadas de plástico; ou pela soldagem de camadas de metal (Poulsen, 2015).

Não obstante utilizar princípios da tecnologia que Blather inventou no século XIX, a primeira tecnologia moderna a usar este conceito de processos foi a *Laminated Object Manufacturing* (LOM), lançado pela Helisys of Torrance Inc., atualmente chamada Cubic Corporation, em 1991 (Baldock, 2016; Cunningham et al, 2015).

Na tecnologia LOM, seguindo o princípio básico de “empilha e corta”, uma folha de papel ou de plástico é posicionada sobre a plataforma de construção. Em seguida ela é cortada por um laser, acompanhando o formato da silueta da seção reta da peça a ser fabricada. A plataforma desce, o excedente da folha é retirado e uma nova folha é colocada sobre a primeira camada, quando a plataforma volta a subir e as folhas são prensadas uma contra a outra, por meio de um rolo aquecido. O laser recorta a segunda folha no formato da silueta da seção reta devida e novamente a plataforma de construção é descida para prosseguir com a fabricação da peça (Cunningham et al, 2015; Guo e Leu, 2013, Vaezi et al, 2013).

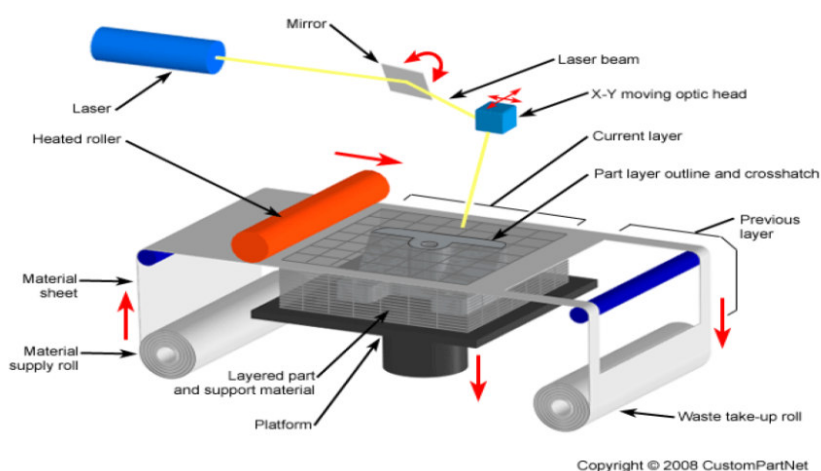


Figura 29 - Modelo *Laminated Object Manufacturing* (Cunningham et al, 2015)

Outra técnica que serve como exemplo de *Sheet Lamination* é a *Ultrasonic Consolidation*, que foi concebida por Dawn White, em 1999, e comercializada pela empresa Solidica Inc (Cunningham et al, 2015).

Na técnica de consolidação ultrassônica folhas ou tiras de metais são fixadas umas às outras por meio de vibrações mecânicas de frequência ultrassônica, emitidas por um rolo que pressiona as folhas empilhadas (Joesbury, 2015).

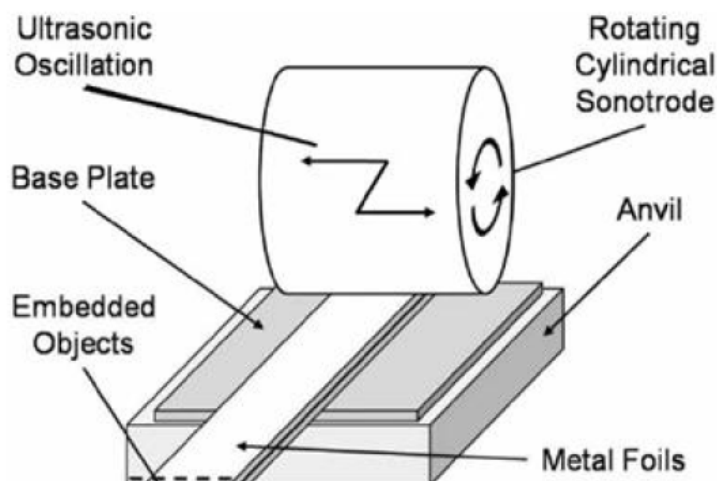


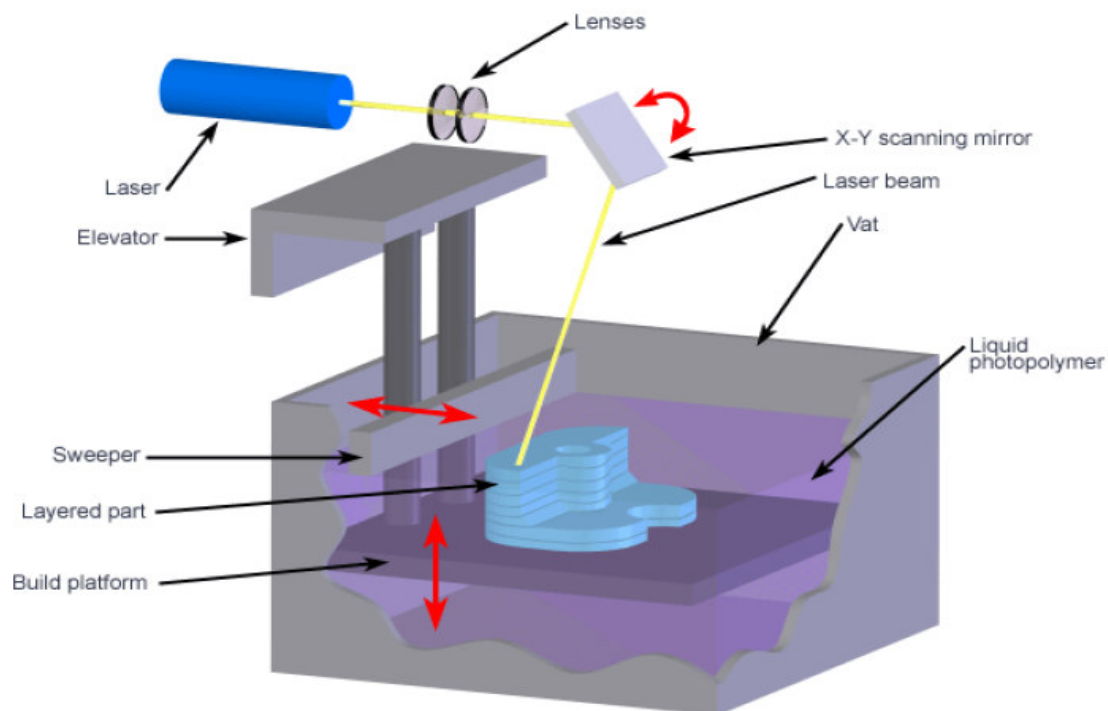
Figura 30 - Modelo básico de *Ultrasonic Consolidation* (Joesbury, 2015)

7 Vat Photopolymerization

A fotopolimerização em tonel é uma classificação de processos de AM na qual é feito uso de plásticos líquidos, resinas solidificáveis, ou fotopolímeros, que são endurecidos por meio de uma reação química, ativada pela ação da radiação de luz ultravioleta (Poulsen, 2015; Strickland, 2016).

A principal tecnologia englobada por esta categoria é a estereolitografia (SLA), tendo sido a primeira tecnologia comercializável de manufatura aditiva, criada por Charles Hull em 1984 e produzida pela empresa 3D Systems, conforme apresentado na seção 2.2 desta dissertação, onde também foi apresentado o princípio de funcionamento da técnica.

Nos métodos modernos de estereolitografia, a solidificação do material pode ocorrer na parte superior do líquido ou na parte inferior do líquido, dependendo da posição na qual o projetor UV seja instalado, implicando na plataforma de construção ser inicializada na superfície do líquido, descendo, ou no fundo do líquido, subindo, respectivamente (Friedell, 2016).



Copyright © 2008 CustomPartNet

Figura 31 - Modelo de estereolitografia (Zimmerman e Allen III, 2013)

A tecnologia de estereolitografia permite a fabricação com grande acurácia, criando objetos com melhor acabamento, formas mais suaves e arredondadas (O'Connor 2014; Poulsen, 2015).

Outros aspectos podem ser apontados, considerando que o objeto tridimensional é formado mergulhado em um líquido: primeiro o líquido não endurecido em uma produção pode ser reutilizado para uma seguinte. Por outro lado, há necessidade de se formar estruturas de apoio para produzir objetos com formatos mais complexos, demandando ação de limpeza de excessos ao final da formação do objeto (AMRG Loughborough University ; O'Connor 2014; Poulsen, 2015).