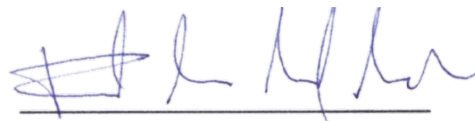


Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia no Curso de Mestrado Profissional em Segurança de Aviação e Aeronavegabilidade Continuada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica.

Pedro Henrique Fonteles Dias

**PROCESSO DE SELEÇÃO DE COMPONENTES
AERONÁUTICOS CANDIDATOS A IMPRESSÃO 3D PARA
REPAROS DE DANOS DE COMBATE EM AERONAVES**

Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão
Orientador

Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava
Pró-Reitor de Pós-Graduação

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2020

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Dias, Pedro Henrique Fonteles

Processo de seleção de componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3D para reparos de danos de combate em aeronaves / Pedro Henrique Fonteles Dias.

São José dos Campos, 2020.

77f.

Dissertação de Mestrado Profissional em Segurança da Aviação e Aeronavegabilidade Continuada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2020. Orientador: Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão.

1. Impressão tridimensional. 2. Controle de estoques 3. Manutenção de aeronaves. I. Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DIAS, Pedro Henrique Fonteles. **Processo de seleção de componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3D para reparos de danos de combate em aeronaves**. 2020. 77f. Dissertação de Mestrado Profissional em Segurança da Aviação e Aeronavegabilidade Continuada – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Pedro Henrique Fonteles Dias

TÍTULO DO TRABALHO: Processo de seleção de componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3D para reparos de danos de combate em aeronaves

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação de Mestrado Profissional / 2020

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação ou tese pode ser reproduzida sem a sua autorização (do autor).

Pedro Henrique Fonteles Dias
Rua Boa Vista, 882
CEP: 60525-555, Fortaleza – CE

**PROCESSO DE SELEÇÃO DE COMPONENTES
AERONÁUTICOS CANDIDATOS A IMPRESSÃO 3D PARA
REPAROS DE DANOS DE COMBATE EM AERONAVES**

Pedro Henrique Fonteles Dias

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão	Orientador/Presidente	ITA
Prof. Dr. Henrique Costa Marques	Membro Interno	ITA
Prof. Dr. Hugo Boreli Resende	Membro Externo	H.Br Innovation

A Eridan, Osvaldo, Diego, Sofia e Cecília, as
pessoas mais importantes da minha vida.

Agradecimentos

A toda equipe da Coordenação do *Safety*. Em especial ao Professor Donizeti, pela confiança depositada em mim, mesmo quando, em muitas vezes, não existiam fatos lógicos para isso.

Ao meu orientador, Professor Abrahão, por todo o direcionamento e paciência durante a realização desta dissertação. Também ao Professor Marques e Professor Hugo, membros da banca examinadora, que contribuíram muito com o trabalho.

A todos os professores do ITA que tive a honra de ser aluno, pelos ensinamentos dentro e fora de sala.

Ao Governo do Estado do Ceará, pela criação do programa em parceria com o ITA.

Aos amigos que fiz no mestrado, em especial João, Camila, Tarcísio e Gustavo, pela parceria de sempre.

Aos meus mentores no ambiente de trabalho, Alexandre e Karley, pelos ensinamentos práticos e conversas aleatórias sobre logística que, mesmo sem perceberem, me deram ideias que me ajudaram na dissertação.

A meus pais e irmãos, pelo amor incondicional que faz todo o esforço ter valido a pena. Espero continuar conseguindo presentear-los com muitos outros momentos de felicidade.

A minha amada Cecília, por ter estado ao meu lado nas horas boas e ruins, me incentivando a buscar meus sonhos e a nunca desistir. Esta é uma conquista sua também.

“It's like in the great stories, Mr. Frodo. The ones that really mattered. Full of darkness and danger they were. And sometimes you didn't want to know the end. Because how could the end be happy? How could the world go back to the way it was when so much bad had happened? But in the end, it's only a passing thing, this shadow. Even darkness must pass. A new day will come. And when the sun shines it will shine out the clearer. Those were the stories that stayed with you. That meant something, even if you were too small to understand why. But I think, Mr. Frodo, I do understand. I know now. Folk in those stories had lots of chances of turning back, only they didn't. They kept going, because they were holding on to something. That there is some good in this world, and it's worth fighting for.”

(Samwise Gamgee)

Resumo

Sistemas aeronáuticos de defesa são caracterizados por serem complexos, constituídos por muitos componentes com funcionalidades integradas entre si. Garantir a suportabilidade logística eficaz e eficiente durante todo o longo ciclo de vida de sistemas aeronáuticos é igualmente complexo. Com o surgimento de novas tecnologias de fabricação, surgem oportunidades de otimização neste sentido, sobretudo nas fases do ciclo de vida de operação e serviços. Para sistemas aeroespaciais de defesa, operações em tempo de guerra são, tipicamente, conduzidas a partir de bases instaladas em áreas remotas, longe de centros de manutenção, sem ferramentas e equipamentos especializados e grandes estoques de peças de reposição. Os reparos de danos de combate em aeronaves (ABDR, do inglês *Aircraft Battle Damage Repair*) visam ao retorno da aeronave danificada à condição de disponível, com algum grau de capacidade de combate relevante ao desenvolvimento do conflito. Isso significa dizer que os reparos não necessariamente retornam a aeronave às suas condições originais de aeronavegabilidade, como nas manutenções padrão em tempos de paz. Peças de reposição podem ser necessárias em ABDR, necessitando que se mantenha estoques nas bases instaladas em locais remotos. Por meio da impressão 3D, surge a possibilidade de que itens de suprimentos sejam fabricados sob demanda no local de consumo, simplificando a cadeia de suprimentos. Dentro deste contexto, a utilização da tecnologia de impressão 3D é uma alternativa para otimização da suportabilidade de sistemas complexos aeronáuticos em tempos de guerra. Redução do tempo de reparo, redução dos níveis de estoque, redução do risco de indisponibilidade, redução de custos operacionais e aumento da segurança de voo foram elencados como os potenciais impactos resultados da aplicação de impressão 3D em reparos de danos de combate em aeronaves. A principal contribuição do trabalho está na modelagem da análise com múltiplos critérios que integram aspectos tecnológicos e de logística na seleção de componentes aeronáuticos candidatos a utilizar a impressão 3D como multiplicador dos índices de disponibilidade para frotas, quando em situação de combate.

Abstract

Defense aeronautical systems are characterized by being complex, consisting of many components with integrated functionalities. Ensuring effective and efficient logistical support throughout the long life cycle of aeronautical systems is equally complex. With the emergence of new manufacturing technologies, optimization opportunities arise in this regard, especially in the in-service life cycle's phase. Wartime operations are typically conducted from bases installed in remote areas, away from maintenance centers, without specialized tools, equipment, and large spare parts stocks. Aircraft Battle Damage Repairs (ABDR) aim to return the damaged aircraft with some degree of combat capability relevant to the development of the conflict. This means that repairs do not necessarily return the aircraft to its original airworthiness conditions, as in standard peacetime maintenance. Spare parts may be needed at ABDR, requiring stocks to be maintained at bases installed in remote locations. Using 3D printing, supply items may be manufactured on demand in the consumption point. In this scope, the use of 3D printing technology is an alternative to optimize the supportability of complex aeronautical systems in wartime. Reduction of repair time, reduction of stock levels, reduction of the risk of unavailability, reduction of operational costs and increase of flight safety were listed as the potential impacts resulting from the application of 3D printing in ABDR. The main contribution of this work is the modeling of the analysis with multiple criteria that integrate technological and logistics aspects in the selection of aeronautical components candidates to use 3D printing as a multiplier of the availability indexes for fleets, when in combat situation.

Lista de Figuras

Figura 1 – Definição da suportabilidade de sistemas complexos aeroespaciais (ABRAHÃO; MATA FILHO; MESQUITA, 2019).	16
Figura 2 – Delimitação da dissertação.....	22
Figura 3 – Efeito de ABDR e <i>attrition rate</i> na disponibilidade de aeronaves em um combate simulado (SRULL; WALLICK; KAPLAN, 1991).	25
Figura 4 – Impacto de reparos rápidos na disponibilidade de tanques de guerra em um conflito simulado (SRULL; WALLICK; KAPLAN, 1991).	25
Figura 5 – Partes interessadas da cadeia de suprimentos aeronáutica (Adaptado de GHADGE <i>et al.</i> , 2018).....	31
Figura 6 – Grupos dos processos de fabricação usuais (Adaptado de KALPAKJIAN; SCHMID, 2010).....	32
Figura 7 – Processo de fabricação em impressão 3D (Adaptado de NOORANI, 2017).....	33
Figura 8 – Classificação das tecnologias de impressão 3D (NGO <i>et al.</i> , 2018; NOORANI, 2017; BORILLE, 2009).	33
Figura 9 – Modo de funcionamento das principais tecnologias de impressão 3D: (a) FDM; (b) SLA; (c) <i>powder bed fusion</i> ; (d) DED (Adaptado de DDDROP, 2018; 3D-PRINTING-EXPERT, 2019; C3 PLASTIC DESIGN, 2019; MERLIN PROJECT, 2013; NGO <i>et al.</i> , 2018).	35
Figura 10 – Compartimento do sensor de temperatura e pressão T25 (KELLNER, 2015).	38
Figura 11 – Injetor de combustível fabricado com impressão 3D (KELLNER, 2015).....	38
Figura 12 – <i>Bracket</i> de titânio fabricado com impressão 3D (ETMM, 2014).....	39
Figura 13 – Nível de criticidade versus nível de certificação requerida de componentes aeronáuticos (Adaptado de KUMAR; NAIR, 2017).	40
Figura 14 – Estrutura de fornecimento de peças de reposição em (a) modelo convencional e (b) modelo com impressão 3D (GHADGE <i>et al.</i> , 2018; KHAJAVI; PARTANEN; HOLMSTROM, 2014; KNOFIUS; HEIJDEN; ZIJM, 2016; OETTMEIER; HOFMANN, 2016).....	43
Figura 15 – Impressão 3D de peças de reposição em porta-avião (COYKENDALL, COTTETEER, <i>et al.</i> , 2014).....	44
Figura 16 – Impressão 3D de peças de reposição em instalações móveis terrestres (LOUIS; SEYMOUR; JOYCE, 2014).....	46
Figura 17 – Estrutura hierárquica de AHP.	48

Figura 18 – Publicações no <i>Web of Science</i> com “ TS = ((<i>additive_manufacturing OR 3d_printing</i>) AND (<i>aerospace OR aeronautic*</i>)) “, entre 1990-2019.....	50
Figura 19 – Processo de seleção de componentes candidatos.....	57
Figura 20 – Estrutura AHP do modelo proposto.....	60
Figura 21 – Suporte para içamento de motores a jato GE (Adaptado de NIKOL, 2016).....	62
Figura 22 – Análise de sensibilidade do nível de atratividade global da impressão 3D variando o critério “tempo de atendimento”.....	67
Figura 23 – Análise de sensibilidade do nível de atratividade global da impressão 3D variando o critério “nível de restauração”.....	67
Figura 24 – Análise de sensibilidade do nível de atratividade global da impressão 3D variando o critério “custo de atendimento”.....	68
Figura 25 – Variação dos níveis de preferência locais e global com a distância de atendimento.....	69
Figura 26 – Variação dos níveis de preferência global por impressão 3D em diferentes modais de atendimento.....	70

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Fases do ciclo de vida (Adaptado de ASD/AIA, 2018).....	16
Tabela 2 – Integração entre ILS, ciclo de vida e engenharia de sistemas (Adaptado de ABRAHÃO; MATA FILHO; MESQUITA, 2019).....	18
Tabela 3 – Sumário de materiais, aplicações, vantagens e desvantagens dos principais métodos de impressão 3D (Adaptado de NGO <i>et al.</i> , 2018).....	36
Tabela 4 – Escala fundamental de julgamentos (Adaptado de SAATY, 1987; SAATY, 1990).	49
Tabela 5 – <i>Random Index</i> (SAATY, 1987).	50
Tabela 6 – Pesquisa do subtema de apoio a decisão no <i>Web of Science</i>	51
Tabela 7 – Nível de relação das publicações de apoio a decisão com a dissertação.	51
Tabela 8 – Características técnicas do componente (Adaptado de ZAMAN, RIVETTE, <i>et al.</i> , 2018; MANCANARES, ZANCUL, <i>et al.</i> , 2015; BORILLE, 2009; KNOFIUS, HEIJDEN e ZIJM, 2016).....	57
Tabela 9 – Características técnicas da máquina de impressão 3D (adaptado de ZAMAN <i>et al.</i> , 2018; MANCANARES <i>et al.</i> , 2015; BORILLE, 2009; KNOFIUS; HEIJDEN; ZIJM, 2016).	58
Tabela 10 – Escala de importância relativa da metodologia AHP simplificada (Adaptado de SAATY, 1987; SAATY, 1990).	60
Tabela 11 – Características técnicas do suporte para içamento.....	62
Tabela 12 – Características técnicas da máquina de impressão 3D (EOS, 2019).	63
Tabela 13 – Escala de importância dos critérios.	63
Tabela 14 – Tempo de atendimento e parâmetros.	64
Tabela 15 – Nível de preferência no critério “tempo de atendimento”.	64
Tabela 16 – Nível de preferência no critério “nível de restauração”.....	64
Tabela 17 – Custo total de atendimento por impressão 3D e processo convencional.....	65
Tabela 18 – Nível de preferência no critério “custo”.	65
Tabela 19 – Agregação global de preferências.....	65
Tabela 20 – Custo total de atendimento por impressão 3D e processo convencional.....	70

Lista de Abreviaturas e Siglas

3DP	<i>3D Printing</i>
ABDR	<i>Aircraft Battle Damage Repair</i>
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AIA	<i>Aerospace Industries Association of America</i>
ASD	<i>AeroSpace and Defense Industries Association of Europe</i>
CI	<i>Consistency Index</i>
CR	<i>Consistency Ratio</i>
DED	<i>Direct Energy Deposition</i>
EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency</i>
EOQ	<i>Economical Order Quantity</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FAB	Força Aérea Brasileira
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
GE	<i>General Electric</i>
IAF	<i>Israeli Air Force</i>
ILS	<i>Integrated Logistics Support</i>
JIT	<i>Just In Time</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
MRO	<i>Maintenance, Repair and Overhaul</i>

MRP	<i>Materials Requirements Planning</i>
DRP	<i>Distribution Requirements Planning</i>
MMAD	Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
RI	<i>Random Index</i>
ROP	<i>Replenishment Order Point</i>
SLA	Stereolithography
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
USAF	<i>United States Air Force</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Hipótese	21
1.2	Objetivos.....	21
1.3	Delimitação da Dissertação.....	22
1.4	Estrutura da Dissertação	22
2	REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1	Reparos de Danos de Combate em Aeronaves.....	23
2.2	Gerenciamento de Estoques.....	26
2.2.1	Abordagem Geral	26
2.2.2	Cadeia de Suprimentos na Indústria Aeronáutica	29
2.3	Tecnologia de Impressão 3D.....	31
2.3.1	Abordagem Geral	31
2.3.2	Impressão 3D na Indústria Aeroespacial	36
2.3.3	Certificação Aeronáutica	40
2.3.4	Impressão 3D no Gerenciamento de Estoques	41
2.4	Método AHP.....	47
2.5	Seleção de Componentes Candidatos.....	50
3	METODOLOGIA.....	54
3.1	Análise Preliminar	56
3.2	Análise Detalhada	58
4	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	61
4.1	Estudo de Caso.....	61
4.2	Discussão dos Resultados	66
5	CONCLUSÃO.....	71
5.1	Propostas de Desenvolvimentos Futuros	72
	REFERÊNCIAS	74

1 Introdução

Sistemas aeroespaciais são caracterizados por serem complexos, constituídos por muitos componentes com funcionalidades integradas entre si. Garantir a suportabilidade logística eficaz e eficiente durante todo o longo ciclo de vida de sistemas aeroespaciais é igualmente complexo. Embora as questões relacionadas à suportabilidade de sistemas complexos sejam tratadas com menor importância pela comunidade aeroespacial dentro da concepção e desenvolvimento, o suporte logístico é de suma importância para a maturidade operacional do sistema. Além disso, o conhecimento gerado neste tema dentro da academia, indústria e governo é relativamente menor e menos divulgado, quando comparado à engenharia aeronáutica voltados para o desempenho operacional (SINGAMNENI *et al.*, 2019). A suportabilidade logística de sistemas complexos aeroespaciais pode ser entendida através da integração de quatro componentes principais (Figura 1).

O ciclo de vida descreve a vida de um sistema complexo desde sua concepção até sua disposição final em um modelo baseado em cinco fases distintas. Embora existam diferentes referências e abordagens que caracterizam o ciclo de vida de um sistema complexo, o modelo apresentado no “SX000i *International guide for the use of the S-Series Integrated Logistics Support (ILS) specifications*” pela ASD (*AeroSpace and Defense Industries Association of Europe*) e AIA (*Aerospace Industries Association of America*) é recente (2018/19) e define bem o ciclo de vida para um sistema complexo de defesa e o que é esperado que aconteça em cada fase (Tabela 1). Apesar de ser bem definido cada fase, sobreposições de fases para um mesmo sistema podem ocorrer. Por exemplo, para um sistema complexo com três configurações diferentes, uma configuração pode estar na fase de desenvolvimento, enquanto as outras duas já estarem em produção e em serviço.



Figura 1 – Definição da suportabilidade de sistemas complexos aeroespaciais (ABRAHÃO; MATA FILHO; MESQUITA, 2019).

Tabela 1 – Fases do ciclo de vida (Adaptado de ASD/AIA, 2018).

Preparação	Desenvolvimento	Produção	Em serviço	Disposição
<ul style="list-style-type: none"> • Identificar as necessidades dos usuários • Desenvolver os requerimentos do produto • Avaliar possíveis soluções para materiais • Identificar e reduzir os riscos tecnológicos • Estabelecer casos comerciais, incluindo análise de alternativas e custo no ciclo de vida 	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolver o produto de acordo com os requisitos do usuário que possam ser produzidos, testados, avaliados, operados, suportados e desligados • Desenvolver um processo de fabricação acessível • Garantir a suportabilidade operacional com solução de compromisso logística 	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricar o produto • Testar o produto • Conduzir a aceitação do produto para confirmar que o produto atende os requisitos 	<ul style="list-style-type: none"> • Operar o produto • Atender os serviços requeridos continuamente com eficácia operacional e em custo • Avaliar e decidir sobre modificações e melhorias • Avaliar continuamente a eficácia e eficiência do produto • Fornecer o suporte para a operação contínua e sustentável do produto 	<ul style="list-style-type: none"> • Desmilitarizar e dispor de acordo com os requerimentos regulatórios e legais

Continuando com os elos da Figura 1, tem-se o Suporte Logística Integrado (ILS, do inglês *Integrated Logistics Support*), também referenciado como Suporte Integrado ao Produto (IPS, do inglês *Integrated Product Support*) em algumas abordagens. O ILS/IPS procura desenvolver soluções que otimiza a suportabilidade e os custos para que o sistema atenda aos

requisitos de desempenho exigidos durante todo seu ciclo de vida. Para isso, são definidos conceitos, metodologias, ferramentas, tarefas e requisitos que sejam convenientes para cada fase de vida do sistema. O ILS/IPS é constituído de 12 elementos, explicados resumidamente a seguir (ASD;AIA, 2018; ABRAHÃO; MATA FILHO; MESQUITA *apud* BLANCHARD, 1981):

- Manutenção. Envolve os conceitos e requisitos necessários para garantir a melhor capacidade e disponibilidade possíveis do sistema quando for demandando, com responsabilidade de custo;
- Suporte de Fornecimento. Envolve as ações para adquirir e catalogar todos os itens e equipamentos necessários para a melhor capacidade e disponibilidade do sistema quando for demandado, no menor custo possível;
- Pessoal. Envolve o pessoal especializado para operar o equipamento, completar as tarefas de manutenção e garantir a melhor capacidade e disponibilidade possível do sistema;
- Treinamento. Envolve o treinamento do pessoal para aumentar a efetividade e eficiência na operação/manutenção/suporte do sistema;
- Recursos computacionais. Envolve toda a parte de tecnologia da informação necessária para planejar e gerenciar os sistemas de *hardware* e *software* de sistemas complexos;
- Dados técnicos. Envolve o gerenciamento das ações para adquirir, desenvolver e produzir informação e publicações para operar/manter/treinar;
- Equipamentos de suporte. Envolve o gerenciamento das ações para adquirir e suportar os equipamentos de suporte requeridos para operação do sistema;
- Instalações & Infraestrutura. Envolve as instalações que permitam o treinamento, manutenção e armazenamento necessários para a suportabilidade do sistema;
- Embalagem, Manuseio, Armazenamento & Transporte. Envolve as ações relacionadas a embalagem, manuseio, armazenamento e transporte requeridos para a máxima disponibilidade e usabilidade dos materiais necessários no suporte do sistema;

- Interface de projeto. Participar no processo de engenharia de sistemas e contribuir no projeto desde sua concepção, facilitando a suportabilidade para maximizar a disponibilidade, eficiência e capacidade do sistema, com menor custo possível;
- Engenharia de suporte. Suportar o sistema em serviço em seu ambiente operacional para garantir a operação e manutenção do sistema;
- Gerenciamento de suporte ao produto. Planejar e gerenciar o custo, o desempenho e o suporte ao produto do sistema complexo através de todos os elementos IPS.

O terceiro componente da Figura 1 é a Engenharia de Sistemas. A Engenharia de Sistemas é uma abordagem multidisciplinar que busca transformar as necessidades do usuário em soluções na forma de produtos e serviços, incorporada desde o início do ciclo de vida. Requisitos de suporte são definidos, analisados e soluções são desenvolvidas, implementadas, integradas, testadas e validadas. Colocando-se as três perspectivas de ciclo de vida, ILS/IPS e Engenharia de Sistemas juntas como na Tabela 2, mostra-se o conjunto completo de atividades e interações que devem ser consideradas para o suporte de sistemas complexos aeroespaciais.

Tabela 2 – Integração entre ILS, ciclo de vida e engenharia de sistemas (Adaptado de ABRAHÃO; MATA FILHO; MESQUITA, 2019).

Elementos ILS	Preparação	Desenvolvimento	Produção	Em serviço	Disposição
Manutenção					
Fornecimento					
Pessoal					
Treinamento					
Equipamento de apoio					
Dados técnicos					
Recursos computacionais	Conceitos, metodologias, ferramentas, tarefas, requisitos de acordo com as peculiaridades de cada fase do ciclo de vida				
Instalações & Infraestrutura					
Embalagem, Manuseio, Armazenamento & Transporte					
Interface de projeto					
Engenharia de suporte					
Gerenciamento de suporte ao produto					

O último componente da Figura 1 se refere a combinação entre confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança, os quais constituem uma metodologia que fornece as métricas pelas quais os sistemas complexos podem ser propriamente projetados e analisados. O uso do conceito de RAMS (do inglês *Reliability, Availability, Maintainability, and Safety*) vem sendo explorado nas últimas décadas no desenvolvimento e análises de desempenho de sistemas complexos, em integração com as perspectivas de ciclo de vida, ILS/IPS e Engenharia de Sistemas. A definição dos fatores RAMS é dada resumidamente a seguir (STAPELBERG, 2009):

- Confiabilidade. A probabilidade de sucesso operacional de sistemas e seus componentes, com mínimo risco de perda ou falha do sistema. Projetar para confiabilidade requer a análise dos efeitos de falhas dos sistemas e equipamentos inerentes. A confiabilidade permite que a aeronave cumpra a missão sem problemas;
- Disponibilidade. A probabilidade de um item estar utilizável em um período de tempo. Projetar para disponibilidade requer a análise das consequências da falha do sistema e os esforços necessários para restaurá-lo. A disponibilidade permite que a aeronave esteja pronta para iniciar a missão;
- Manutenibilidade. A probabilidade de que o item danificado possa ser reparado para uma condição efetiva operacional em um dado período de tempo. Projetar para manutenibilidade requer a análise da acessibilidade e “reparabilidade” dos sistemas e seus componentes. A manutenibilidade permite que a confiabilidade e disponibilidade para que a aeronave cumpra a missão;
- Segurança. Estado no qual o risco de danos às pessoas, aos equipamentos e ao meio ambiente é reduzido para um nível aceitável por meio de um processo contínuo de identificação de ameaças e gerenciamento do risco. Projetar para segurança é inerente de projetar para confiabilidade e manutenibilidade. A segurança operacional permite que a aeronave cumpra a missão sem danos a tripulação ou aos equipamentos presentes.

Em ambiente de combate, as particularidades inerentes da operação exigem que a suportabilidade dos sistemas aeronáuticos possua requisitos diferenciados quando comparados com as operações normais em tempos de paz. Dentro de um conflito, garantir os fatores RAMS, principalmente a segurança e disponibilidade, dos sistemas é essencial para o desenvolvimento do combate. Formas não usuais de manutenção são geralmente necessárias devido as condições

adversas nas quais o reparo é realizado. Os reparos de danos de combate em aeronaves (ABDR, do inglês *Aircraft Battle Damage Repair*) tem como principal objetivo o retorno da aeronave a sua mais alta capacidade operacional possível, dentro de condições aceitáveis para o cumprimento da missão, em um tempo curto o suficiente que seja relevante ao desenvolvimento do combate. De forma prática, não importa o que ocasionou o dano, podendo ser um choque com um pássaro ou a perfuração da fuselagem por um projétil, o sistema é restaurado conforme mencionado. Normalmente, as forças aéreas mais desenvolvidas ao redor do mundo desenvolvem de forma isolada suas melhores práticas acerca de reparos de combate e incorporam dentro de um programa de ABDR próprio. Cada força aérea tem um programa de ABDR que foi desenvolvido para atender suas particularidades de combate (ABRAHÃO, 1998; HOLCOMB, 1994).

Um dos grandes desafios logísticos enfrentados em qualquer operação está relacionado ao gerenciamento de estoques. Em ABDR, estoques de peças de reposição são necessários para que os reparos possam ser realizados. O gerenciamento de tais estoques em condições de combate se torna mais complexo devido a imprevisibilidade maior da demanda e instalações pequenas e austeras localizadas remotamente serem normalmente utilizadas. A probabilidade de erros de planejamento de fornecimento ocasionarem falta de itens no estoque, impossibilitando a restauração e consequente indisponibilidade do sistema sob tais condições é mais alta. Além das consequências tangíveis de custos com o sistema indisponível em um ambiente de combate, a falta de estoque pode gerar consequências quanto ao desenvolvimento do combate. O conhecido provérbio chinês “por causa de um prego perdeu-se [...] a guerra” pode se tornar realidade.

Com o rápido desenvolvimento presenciado nas tecnologias de impressão 3D nas últimas décadas, surgem oportunidades ainda a serem exploradas de que seu uso em ABDR gerem melhorias na suportabilidade de sistemas complexos aeronáuticos em combate, sobretudo quando se fala de gerenciamento de estoques. As características inerentes à impressão 3D apresentam oportunidades de fabricação de componentes que podem simplificar a cadeia de suprimentos de peças de reposição, otimizando a suportabilidade logística dos sistemas aeronáuticos em combate (FELDMANN; PUMPE, 2017). Esta dissertação se baseia nestas afirmações que são melhores exploradas no decorrer dos demais capítulos.

Entre os passos iniciais para avaliar a viabilidade do uso da impressão 3D em ABDR está a identificação dos componentes aeronáuticos que são candidatos a impressão 3D. Publicações sobre metodologias de seleção de candidatos a impressão 3D vêm sendo

desenvolvidas na literatura, ainda que poucas, quando comparado às publicações sobre engenharia de fabricação e processos industriais. Trabalhos neste sentido que abordam a indústria aeroespacial e aspectos de suportabilidade logística na seleção de componentes é ainda mais escasso. A menor importância dada a suportabilidade logística de sistemas complexos nas fases iniciais do ciclo de vida resultam em maturidade tardia do sistema em termos dos indicadores RAMS, exacerbando ainda mais a necessidade de que a suportabilidade logística esteja presente também em metodologias de suporte a decisão de componentes candidatos a impressão 3D em ABDR.

1.1 Hipótese

Nesta dissertação, duas hipóteses são exploradas:

- A utilização da tecnologia de impressão 3D contribui na otimização do suporte logístico de aeronaves de combate em tempo de guerra, devido seus potenciais impactos em gerenciamento de estoques;
- A utilização de uma análise multicritério que integra aspectos tecnológicos e de suportabilidade logística apresenta-se como uma solução para a seleção de componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3D em situação de combate.

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é avaliar a pertinência de se utilizar 3D pra ABDR e propor um modelo de análise multicritério que possa identificar componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3D no contexto de ABDR. Para tal, os seguintes objetivos específicos são estabelecidos:

- Explorar os conceitos fundamentais sobre impressão 3D e sua presença na Indústria Aeronáutica;
- Explorar os conceitos fundamentais de gerenciamento de estoques e o impacto da impressão 3D na suportabilidade aeronáutica;
- Modelar um processo de seleção de componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3D no contexto de ABDR;
- Realizar a aplicação do processo proposto em um estudo de caso.

1.3 Delimitação da Dissertação

Esta dissertação se limita em investigar um método para identificação de componentes aeronáuticos candidatos a serem fabricados por impressão 3D, no que se refere a otimização de gerenciamento de estoques, no contexto de ABDR (Figura 2).

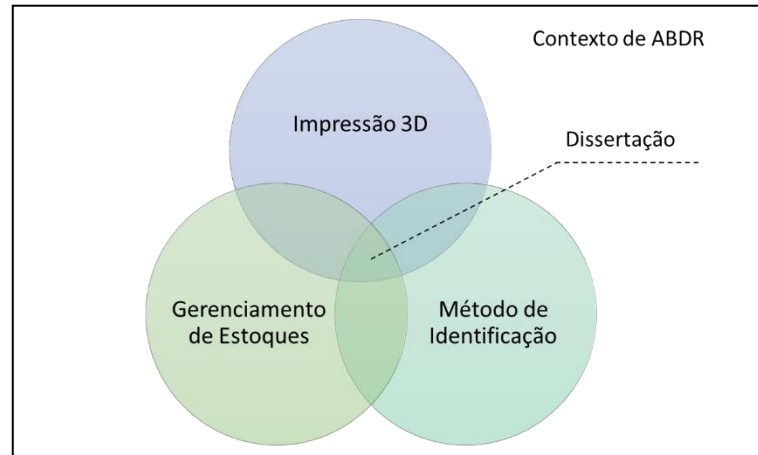


Figura 2 – Delimitação da dissertação.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é constituída por 5 Capítulos. No Capítulo 1 é apresentado a contextualização, a identificação do problema, o estabelecimento dos objetivos, o escopo e a organização do trabalho. Em ordem, no Capítulo 2 é apresentado: uma abordagem geral sobre ABDR e sua importância; conceitos acerca de gerenciamento de estoques e as características principais da cadeia de suprimentos na indústria aeronáutica; uma introdução sobre impressão 3D, sua presença na indústria aeroespacial e potenciais impactos no gerenciamento de estoques; uma introdução ao método AHP (do inglês *Analytic Hierarchy Process*); e uma revisão da literatura das publicações sobre seleção de componentes candidatos a impressão 3D. No Capítulo 3 é apresentado a metodologia proposta neste trabalho. No Capítulo 4 é apresentado a aplicação da metodologia em um estudo de caso e feita a discussão dos resultados. No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e a conclusão do trabalho.

2 Revisão da Literatura

2.1 Reparos de Danos de Combate em Aeronaves

Em tempos de paz, os reparos nas aeronaves danificadas são realizados seguindo-se as ordens técnicas condensadas em extensos manuais de manutenção escritos pelas OEM. As tarefas realizadas seguindo tais manuais visam o retorno do sistema aeronáutico à suas condições originais especificadas nos projetos. Reparos deste tipo podem ser demorados e necessitar de um estoque com várias peças de reposição, além de utilizar ferramentas e equipamentos especializados que permitam acessar e reparar o sistema (HOLCOMB, 1994).

No entanto, operações em tempo de guerra tipicamente são conduzidas a partir de bases instaladas em áreas remotas, longe de centros de manutenção com ferramentas e equipamentos especializados e grandes estoques de peças de reposição. Durante o conflito, a pressão imposta em manter a aeronave com capacidades de combate, mesmo que mínimas, requer que, quando danificada, a aeronave retorne rapidamente e não comprometa o desenvolvimento do combate. Outro fator crítico está no número limitado de técnicos em manutenção disponíveis. Essas são as principais diferenças entre as operações em tempo de paz e de guerra que indicam a necessidade de que reparos em combate sejam desempenhados diferentemente (HOLCOMB, 1994).

Os reparos sob a filosofia de ABDR visa ao retorno da aeronave danificada com algum grau de capacidade operacional relevante ao desenvolvimento do combate. Isso significa dizer que os reparos não necessariamente retornam a aeronave às suas condições originais de aeronavegabilidade, como nas manutenções padrão em tempos de paz. Geralmente, estes reparos buscam, primariamente, restaurar estruturas para que a aeronave cumpra a missão, com possibilidade de deficiência em aerodinâmica e estética. Quando não é possível a continuidade da aeronave no combate devido a gravidade do dano, um reparo em ABDR pode ter como objetivo permitir mais algumas horas de voo para que a aeronave retorne à um centro de manutenção e prossiga com reparos permanentes (HOLCOMB, 1994; ABRAHÃO, 1998; SRULL; WALLICK; KAPLAN, 1991).

Historicamente, reparos de danos de batalha em aeronaves são realizados desde os primeiros combates aéreos. O registro mais antigo de atividades de ABDR datam do período da Primeira Guerra Mundial, quando máquinas de fazendas na França eram canibalizadas para se conseguir peças que pudessem serem utilizadas em reparos das aeronaves. Porém, o

desenvolvimento formal de programas de ABDR nas forças aéreas somente aconteceram pós Segunda Guerra Mundial. Dentre os programas de ABDR mais modernos se encontram os da USAF (*United States Air Force*) e da IAF (*Israeli Air Force*). Um fato em comum é que os programas destas forças aéreas foram impulsionados por envolvimento em conflitos passados (HOLCOMB, 1994; ABRAHÃO, 1998).

No caso da USAF, o significativo efeito negativo das perdas de aeronaves durante a Guerra do Vietnã demonstrou a dificuldade das forças americanas de reparar rapidamente as aeronaves danificadas em combate. Além disso, o desenvolvimento do projeto do avião de combate A-10 *Thunderbolt* também foi determinante para o amadurecimento do programa de ABDR da USAF (HOLCOMB, 1994).

Israel é um país que vive em constante estado de alerta devido a ameaça de guerra iminente com seus vizinhos no Oriente Médio. As forças de defesa israelenses consistem de um pequeno contingente de prontidão e uma grande força treinada reserva. A resposta inicial à um ataque é crucial para Israel; o contingente de prontidão deve frear a frente inimiga até que as forças reservas de apoio cheguem. Além disso, a peculiar condição geográfica, limitação física e política militar motivaram o Estado de Israel a desenvolverem seu programa de ABDR. O reparo rápido de aeronaves e tanques para o combate foi significativo para a vitória de Israel na Guerra de Yom Kippur; aproximadamente $\frac{3}{4}$ das aeronaves israelenses danificadas retornaram ao combate em 24 horas ou menos (HOLCOMB, 1994; ABRAHÃO, 1998). Srull, Wallick e Kaplan (1991) falam, sobre a Guerra de Yom Kippur, que “sem reparos rápidos e efetivos, a IAF estaria fora do jogo por volta do oitavo dia de conflito” (tradução do autor).

Além dos acontecimentos históricos, pesquisas desenvolvidas ajudam a justificar a importância e impulsionam o desenvolvimento de programas de ABDR nas forças aéreas. Em um conflito simulado com 70 aeronaves disponíveis, Srull, Wallick e Kaplan (1991) mostraram que uma capacidade excelente de reparos (definido como 50% das aeronaves danificadas retornando em 24h e 80% retornando em 48h) pode quadruplicar a quantidade de aeronaves disponíveis ao final de 10 dias (Figura 3). Em outra simulação similar, mas agora utilizando 100 tanques de guerra, Srull, Wallick e Kaplan (1991) mostraram que, ao final de 10 dias de conflito: sem reparos rápidos e sem substituição, todos os tanques estariam indisponíveis em 3 dias; somente com substituição, 5 a 10% dos tanques estariam disponíveis; com reparos rápidos e substituição, 60 a 80% dos tanques estariam disponíveis (Figura 4).

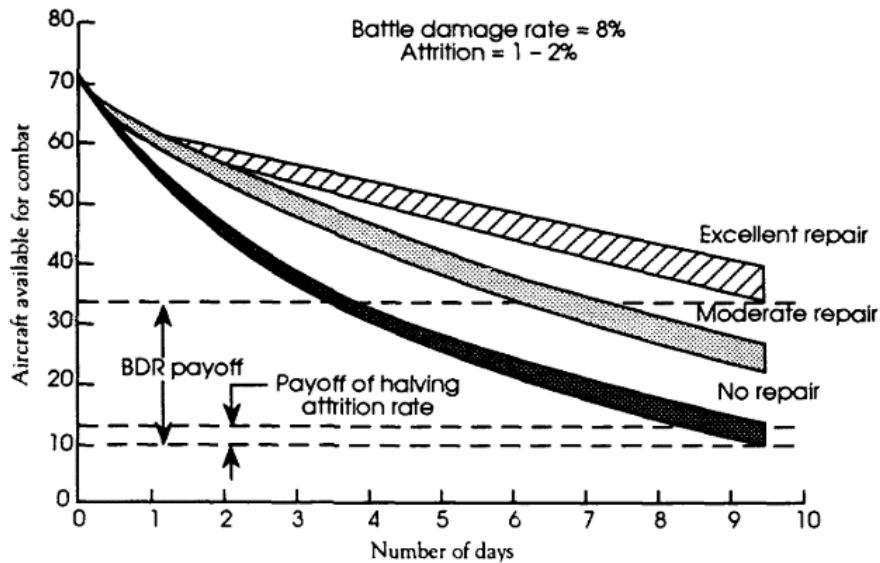


Figura 3 – Efeito de ABDR e *attrition rate* na disponibilidade de aeronaves em um combate simulado (SRULL; WALLICK; KAPLAN, 1991).

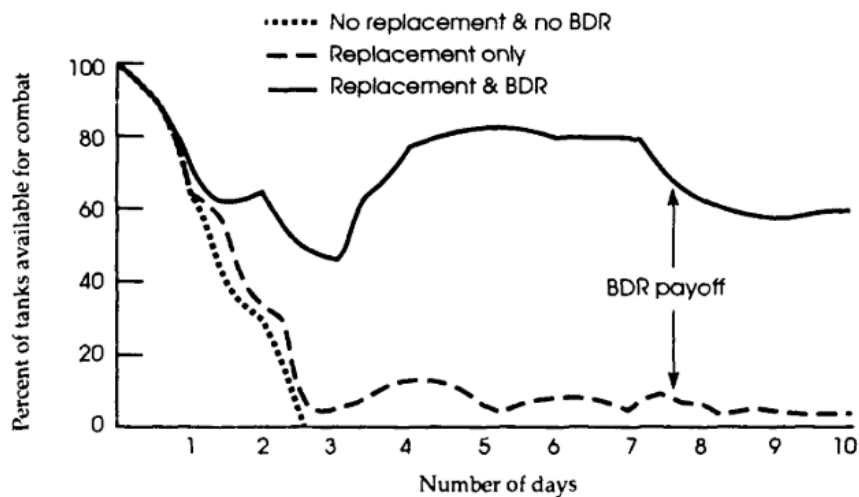


Figura 4 – Impacto de reparos rápidos na disponibilidade de tanques de guerra em um conflito simulado (SRULL; WALLICK; KAPLAN, 1991).

Em ABDR, o gerenciamento de estoques eficaz e eficiente é essencial durante a operação em ambiente de combate. Manter um alto nível de serviço no atendimento das demandas contribui para que os reparos sejam realizados rapidamente e para que a aeronave opere dentro de métricas RAMS aceitáveis, com responsabilidade de custo. Por isso, entender os conceitos básicos sobre gerenciamento de estoques e as características da cadeia de suprimentos na indústria aeronáutica é importante dentro do contexto da dissertação. Estes dois tópicos são explorados na seção a seguir.

2.2 Gerenciamento de Estoques

2.2.1 Abordagem Geral

O gerenciamento correto de estoques é essencial para uma boa gestão da cadeia de suprimento em qualquer organização devido ao grande investimento de capital despendidos. Mantê-los nos níveis mais baixos possíveis de maneira consistente para o negócio não é uma tarefa tão simples, sendo este o desafio constante de qualquer gerente de logística/ suprimentos. A escolha da política de estoque a ser utilizada depende da definição de características como: tipo de estoques, nível de serviço, custos operacionais, filosofia de gerenciamento, tipo de controle de estoque e natureza da demanda. Estes conceitos básicos são apresentados brevemente nesta subseção e servem como referencial teórico para o trabalho.

Para Ballou (2009, p. 274), os estoques situam em cinco categorias diferentes:

- Canal. São estoques em trânsitos situados entre os elos da cadeia de suprimentos;
- Especulação. São estoques estratégicos de oportunidade decorrentes da variação futura de preços de aquisição/venda.
- Regular. São estoques mantidos para atender a demanda média durante o tempo entre reabastecimentos;
- Segurança. São estoques extras mantidos para suprir as variações aleatórias na demanda e nos prazos de reposição;
- Obsoleto. São estoques avariados, perdidos, roubados ou que se tornaram ultrapassadas e sem utilização.

O objetivo principal do gerenciamento de estoques é encontrar a solução de compromisso entre a disponibilidade de produto para atendimento da demanda e custos operacionais. O grau de disponibilidade é medido através do indicador nível de serviço, em um período específico, geralmente para um mês ou ano específico (BALLOU, 2009).

$$\text{Nível de Serviço} = 1 - \frac{\text{Número esperado de unidades faltantes}}{\text{Demanda total}} \quad (1)$$

Os custos operacionais de estoques podem ser classificados em três principais categorias (BALLOU, 2009, p. 280):

- Custos de aquisição. São todos os custos para aquisição de produto para reposição de estoques. Aqui se incluem: o preço do produto, ou custos de fabricação; o custo de preparação do processo de produção; o custo do processamento do pedido; o custo de transporte em compras com fretes de responsabilidade do comprador; e os custos de manuseio no ponto de recepção;
- Custos de manutenção. São os custos referentes ao armazenamento do produto. Aqui se incluem: o custo para manutenção do espaço alugado, ou próprio; o custo do capital imobilizado na forma de produtos estocados. O custo de capital representa cerca de 80% dos custos de manutenção e são difíceis de medir devido serem extremamente intangíveis e subjetivos (*apud* LANDEROS e LYTH, 1989); o custo de serviço de estocagem (seguros e impostos); o custo do risco de estocagem, que está relacionado com avarias, roubos ou obsolescência no estoque;
- Custos de falta de estoque. São os custos que ocorrem quando a demanda não pode ser atendida pela falta do produto em estoque. Assim como o custo de capital, é difícil de se medir por ser bastante intangível, subjetivo e dependente da situação. O mesmo produto pode faltar em duas situações diferentes e ter consequências completamente distintas.

Há basicamente duas filosofias de gestão que podem ser empregadas aos estoques (BALLOU, 2009, p.275):

- Filosofia empurrada. Os estoques são alocados baseados em projeções de necessidades em cada local, espaço disponível ou algum outro tipo de critério. As decisões são tomadas coletivamente, levando-se em conta os efeitos sobre as economias da fábrica de origem. Nesta filosofia a produção ou as aquisições exercem força dominante na decisão de ressuprimento. Assim, este é uma metodologia adequada para organizações em que a produção ou as aquisições superam as necessidades de curto prazo dos estoques. Em outras palavras, a produção ou a aquisição “empurra” estoques para os pontos de armazenagem;
- Filosofia puxada. Os locais de consumo são considerados independentes entre si e a decisão de ressuprimento é baseada na previsão de demanda de cada local. A adoção desta filosofia resulta em níveis reduzidos nos pontos de armazenagem pelo fato da demanda “puxar” os estoques para os pontos de armazenagem. Assim, esta é uma

metodologia adequada quando a demanda exerce força dominante na decisão de ressuprimento.

O último conceito elementar para definir uma política de estoque é a escolha de qual método de controle é utilizado. Em ambas as filosofias de gerenciamento há diferentes métodos de controle que se adequam a maturidade na qual o sistema de gestão da organização se encontra. O controle do estoque existe para se responder a duas perguntas que devem ser respondidas em qualquer planejamento de cadeia de suprimentos.

Qual a quantidade ideal de produto um pedido de reposição deve ter? A forma mais simples de determinar a quantidade ótima do pedido de reposição é através da equação da quantidade econômica de pedido (EOQ, do inglês *Economical Order Quantity*). A quantidade ótima é que minimiza o custo total, igualando-se o custo de aquisição e custo de manutenção de estoque (BALLOU, 2009, p. 284, *apud* HARRIS, 1913).

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{IC}} \quad (2)$$

Onde:

Q^* - Quantidade econômica de pedido;

D - Demanda em uma taxa determinada e constante no tempo, unidades/ano;

S - Custo de aquisição, \$/pedido;

I - Valor da manutenção do item no estoque, \$/item;

C - Custo de manutenção como porcentagem do valor do item, %/ano.

Quando um novo pedido de reposição deve ser feito? O ressuprimento de estoque não é instantâneo. O tempo de espera de reposição e a taxa temporal da demanda são as variáveis principais para o cálculo do ponto de reposição do pedido (ROP, do inglês *Replenishment Order Point*) (BALLOU, 2009, p. 285). O tempo de reposição pode ser o tempo de fabricação de um novo lote para abastecimento do armazém da fábrica ou todo o tempo de processamento de pedido e tempo de trânsito até a entrega final do pedido no ponto de consumo, por exemplo.

$$ROP = (d)(LT) \quad (3)$$

Onde:

ROP - Ponto de reposição do pedido;

d - Taxa de demanda, quantidade/ unidade de tempo;

LT- Tempo de atendimento da demanda, unidade de tempo.

As equações definidas acima para EOQ e ROP são simplificadas e ideais, em que se sabe com 100% de exatidão o comportamento da demanda e os prazos de entrega. No entanto, no mundo real isto é impossível, sobretudo para operações logísticas complexas. A fim de superar esta limitação e garantir a disponibilidade de produto em estoque, planeja-se um estoque de segurança adicional além do necessário para a demanda regular. Quanto mais aleatório for a demanda pelo item, menor é a assertividade nas previsões de demanda e maior é a quantidade necessária na forma de estoque de segurança. Nas equações de EOQ e ROP, para este controle avançado de estoque são adicionados fatores de segurança.

Todo este processo para o atendimento da demanda é formalizado no planejamento de necessidades de materiais (MRP, em inglês). Analogamente, este planejamento pode ser realizado no canal de distribuição, gerando o planejamento de necessidades de distribuição (DRP, em inglês). A combinação do MRP e DRP para programação de necessidades fornece uma solução de gerenciamento integrado de estoques para atendimento da demanda (BALLOU, 2009, p. 346).

Por fim, outra metodologia de gerenciar o canal de suprimentos que ficou bastante popularizada pelos japoneses é a programação *just in time* (JIT). Diferentemente do MRP e DRP, os estoques na programação JIT atendem apenas as necessidades imediatas. Como consequência, a minimização dos estoques no canal de suprimentos e de distribuição é esperada. Ao mesmo tempo que a minimização dos estoques representa uma maior eficiência operacional, níveis extremamente reduzidos de estoque também resultam em maior risco de rupturas na cadeia. Neste sentido, para o sucesso da programação JIT é necessário mitigar as incertezas ao longo de toda a cadeia de suprimentos e garantir a mínima variabilidade possível no processo.

2.2.2 Cadeia de Suprimentos na Indústria Aeronáutica

O gerenciamento de estoques é de fundamental importância para garantir a eficiência operacional da aeronave quando em serviço até sua disposição final. De maneira geral, os estoques de peças de reposição na indústria aeronáutica têm como objetivo suprir a demanda por sobressalentes nas atividades de MRO (do inglês *Maintenance, Repair and Overhaul*). Na aviação civil, atingir elevados níveis de serviço com mínimos estoques é um diferencial estratégico para sobreviver no mercado competitivo de transporte de passageiros e de carga.

No setor de defesa, garantir a disponibilidade dos sistemas complexos aeronáuticos com eficiência na utilização de recursos financeiros é cada vez mais uma realidade devido ao

encolhimento dos orçamentos de defesa que as forças aéreas vêm enfrentando desde o final da Guerra Fria (ABRAHÃO, 1998). Desde o final da Segunda Guerra Mundial, aeronaves militares estão cada vez mais avançadas tecnologicamente, as tornando sistemas cada vez mais complexos e versáteis de dezenas de milhões de dólares. Como resultado, a quantidade de aeronaves necessárias vem diminuindo nas frotas das forças aéreas ao redor do mundo (HOLCOMB, 1994). Neste sentido, garantir os fatores RAMS da aeronave com responsabilidade em custos é uma premissa nas forças aéreas, sobretudo quando em conflitos.

Sistemas complexos aeronáuticos são caracterizados por uma extensa quantidade de componentes diferentes, cada um com seu próprio comportamento de falhas. Este comportamento deve ser espelhado na previsão da demanda para planejamento de necessidades. A aleatoriedade nas taxas de falhas, sobretudo para componentes eletrônicos e aviônicos, resulta em alta imprevisibilidade na demanda. Produtos recém-lançados que não tem disponível ainda dados sobre suas taxas de falhas contribuem para a difícil tarefa de prever a demanda de sistemas complexos (GHADGE *et al.*, 2018; KHAJAVI; PARTANEN; HOLMSTROM, 2014). Planejar a necessidade de cada item neste cenário pode ser extremamente complicado. Métodos para controle agregado de itens em estoque (por exemplo, classificação ABC) podem ser utilizados como simplificação para o planejamento de necessidades. Neste sentido, surge a necessidade de se manter estoques de segurança para amortecer os efeitos da imprevisibilidade na demanda. Outro ponto é que itens de elevado valor agregado e raramente utilizados podem ser tratados como estoques de especulação. A compra antecipada destes itens pode ser estrategicamente favorável devido seu aumento futuro no preço de aquisição.

A cadeia de suprimentos na indústria aeronáutica é formada por várias partes interessadas que interagem entre si direta ou indiretamente, que vão desde fornecedores de insumos elementares para as indústrias até os clientes finais (Figura 5). O risco na fabricação e operação é compartilhado entre as partes interessadas. A partir de estudos mercadológicos a fim de identificar as tendências, as OEM definem as especificações de projeto e realizam a montagem e integração de sistemas da aeronave. O risco de fabricação é compartilhado com os fornecedores primários, os quais fornecem os sistemas principais da aeronave. Analogamente, fornecedores secundários suportam a operação dos fornecedores primários. Nas fases de operação e disposição final, a OEM tem papel de suportar as operações de MRO, fornecendo peças sobressalentes, ferramentas especiais e manuais técnicos necessários.

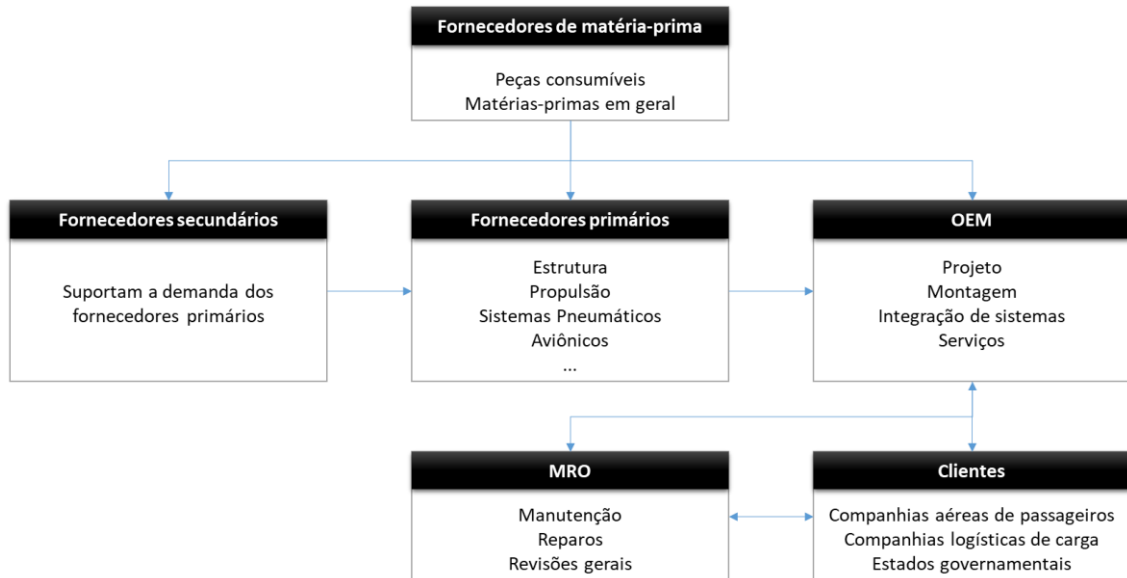


Figura 5 – Partes interessadas da cadeia de suprimentos aeronáutica (Adaptado de GHADGE *et al.*, 2018).

Por definição, estoques são aglomerações de matérias-primas ou produtos acabados que surgem entre os diversos canais na cadeia de suprimentos. Estoques utilizados em ABDR são constituídos basicamente por peças de reposição, ferramentas e materiais consumíveis. Mesmo com o avançado sistema de gerenciamento logístico presente nas forças aéreas, a evolução nos processos de produção faz com que ainda existam oportunidades de otimização. Neste sentido, a impressão 3D apresenta-se como uma tecnologia que tem potencial de gerar impactos positivos no gerenciamento de estoques. Na próxima seção é introduzido os conceitos fundamentais acerca de impressão 3D e como esta tecnologia vem ganhando cada vez mais relevância dentro da indústria aeroespacial e seus potenciais impactos no gerenciamento de estoques.

2.3 Tecnologia de Impressão 3D

2.3.1 Abordagem Geral

Desde os tempos mais antigos a humanidade desenvolve técnicas de fabricar os mais diversos componentes, ferramentas e máquinas para suprir suas necessidades. Em poucas palavras, fabricação pode ser definido como o processo de transformar matérias-primas em produtos acabados. Para tal, muitas são as tecnologias que podem ser utilizadas para fazer produtos. Normalmente mais de um processo de fabricação é utilizado até se chegar no produto final, os quais podem ser classificados em grupos de tecnologias (Figura 6). Nesta dissertação,

“processos tradicionais de fabricação”, ou variações deste, é o termo utilizado para englobar todos os processos diferentes da impressão 3D.

Na literatura é comumente utilizado o termo Manufatura Aditiva para se referir à tecnologia de impressão 3D. No entanto, Manufatura Aditiva são todos os métodos de fabricação os quais o componente desejado é feito através da adição de material, diferentemente dos processos tradicionais subtrativos. Porém, não somente a impressão 3D tem esta característica. Componentes compósitos também são fabricados através da adição de material utilizando outros métodos que não a deposição característica da impressão 3D. Por isto, nesta dissertação, define-se impressão 3D como a fabricação de um componente sólido tridimensional de forma arbitrária diretamente a partir de um modelo computacional 3D, através da deposição de material camada-por-camada de forma automática (NOORANI, 2017; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

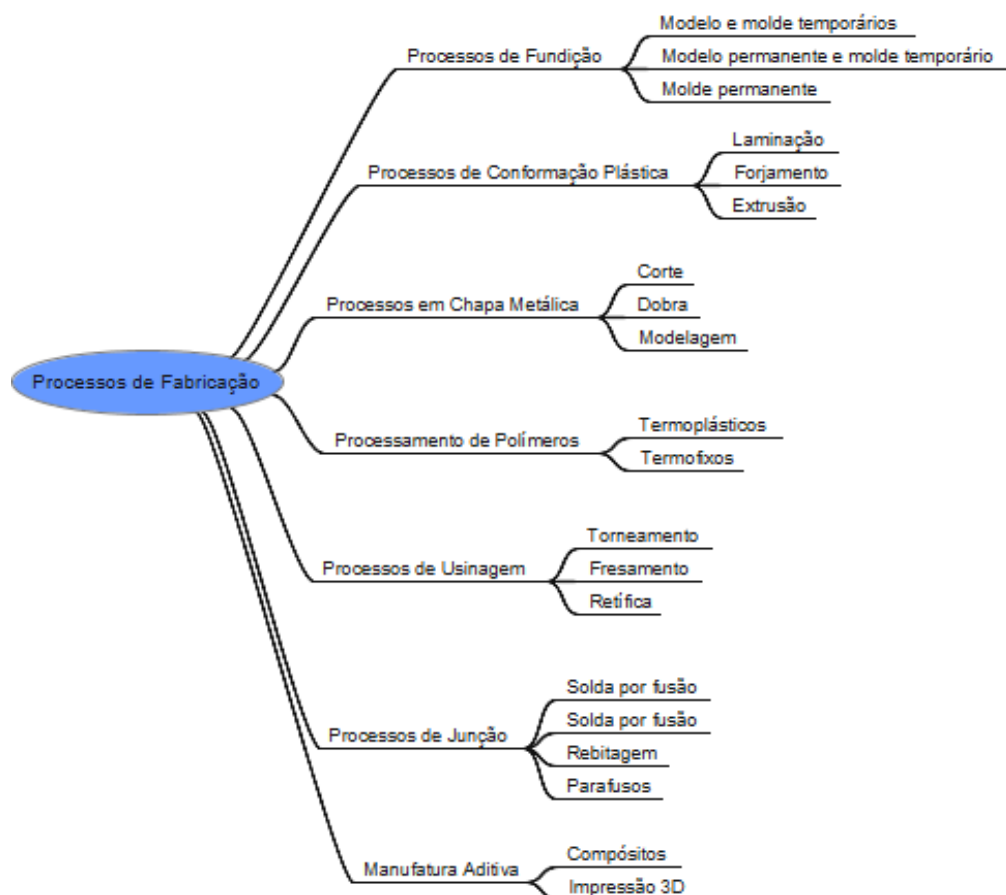


Figura 6 – Grupos dos processos de fabricação usuais (Adaptado de KALPAKJIAN; SCHMID, 2010).

O processo padrão de fabricação com impressão 3D pode ser esquematizado em cinco passos básicos (Figura 7). Primeiramente, um modelo sólido é projetado em algum software de

desenho. A partir do modelo sólido, o arquivo é convertido para o formato STL. Este foi o primeiro formato criado especificamente para este uso. O arquivo STL discretiza a superfície do modelo em vários triângulos conectados. O próximo passo é utilizar algum software específico para realizar a divisão em camadas do modelo sólido, processo conhecido como fatiamento (ou *slicing*, do inglês). A qualidade superficial e estrutural do componente impresso depende fortemente da configuração de qualidade da discretização superficial e em camadas do modelo, limitados pela capacidade máxima de resolução da máquina de impressão 3D. Após esses processos, a impressora está pronta para fabricar camada-por-camada o componente. Por fim, é realizado, quando necessário, tarefas de pós-processamento, tais como limpeza, remoção de material suporte (quando existe), cura e acabamento em geral (NOORANI, 2017).



Figura 7 – Processo de fabricação em impressão 3D (Adaptado de NOORANI, 2017).

Dentre as muitas formas que se pode classificar as tecnologias de impressão 3D, a mais utilizada é através do estado físico da matéria-prima: estado sólido na forma de filamento, estado líquido e estado sólido na forma de pó (Figura 8).

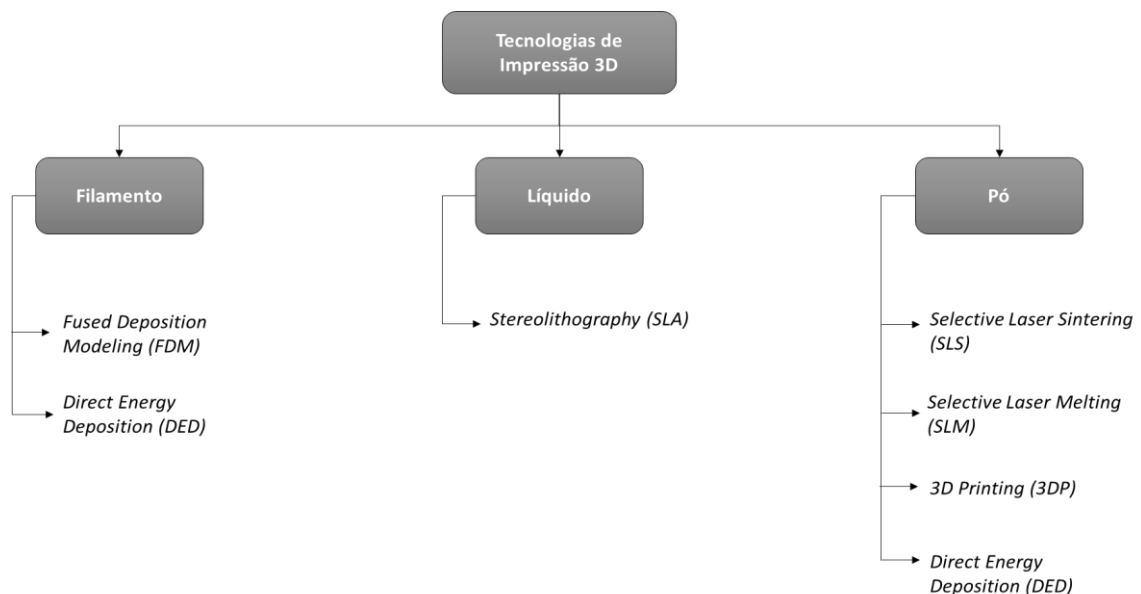


Figura 8 – Classificação das tecnologias de impressão 3D (NGO *et al.*, 2018; NOORANI, 2017; BORILLE, 2009).

O modo de funcionamento das tecnologias de impressão 3D mostrados é descrito abaixo (NGO *et al.*, 2018; NOORANI, 2017; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015):

- *Fused Deposition Modeling (FDM)*. O método FDM utiliza um filamento de polímero termoplástico como matéria-prima na fabricação camada-por-camada do componente. Hoje é o método mais comumente encontrado para uso geral que utiliza filamentos de polímeros. O filamento é aquecido até atingir um estado semilíquido e, em seguida, é depositado sobre a plataforma ou camada previamente impressa. Um segundo bocal é utilizado para depositar o material para suporte estrutural enquanto a peça é fabricada, o qual é removido em procedimentos de pós-processamento (Figura 9a);
- *Estereolitografia*. Este método utiliza um laser UV para polimerizar um leito com solução de resinas ou monômeros fotossensíveis. O laser UV inicia reações em cadeia, resultando em solidificação na resina exatamente onde o feixe do laser está sendo concentrado. Após a polimerização de uma fina camada de resina, a plataforma move verticalmente para que a próxima camada possa ser construída. Processos de cura podem ser requeridos para se conseguir melhores propriedades mecânicas (Figura 9b);
- *Powder bed fusion*. Neste método é utilizado material em pó para imprimir camadas finas. O pó em cada camada é fundido por meio de um feixe de laser ou um ligante especial. Após a construção da camada, um rolo deposita uma nova camada fina de pó que é fundido e criado uma nova camada, até que o componente final tenha sido fabricado. O laser somente pode ser usado para materiais em pó de baixo ponto de fusão ou de sinterização. Materiais com pontos de fusão mais elevados é utilizado ligantes líquidos para juntar as camadas. As tecnologias de fusão em leito poroso são divididas em três métodos principais: *Selective Laser Sintering (SLS)*, *Selective Laser Melting (SLM)* e *Three-Dimensional Printing (3DP)*. No processo SLS o laser não funde totalmente o pó, mas eleva localmente a temperatura na superfície dos grãos resultando em fusão em nível molecular. Já no método SLM o laser funde totalmente o material pulverizado, resultando em melhores propriedades mecânicas. Finalmente, no método 3DP um ligante líquido é utilizado para juntar o material em pó na construção do componente camada-por-camada (Figura 9c).
- *Direct Energy Deposition*. O método DED utiliza uma fonte de energia (laser ou um feixe de elétrons) diretamente em uma pequena região do substrato e é também

utilizado para fundir e depositar a matéria prima para construção da camada. O material depositado (inicialmente na forma de pó ou arame) é solidificado à temperatura ambiente no substrato finalizando a impressão de uma camada. Esta tecnologia é comumente utilizada com titânio, aço inoxidável, alumínio e outras ligas em diversas aplicações na indústria aeroespacial. A principal diferença entre os métodos DED e SLM é que em DED o material de alimentação é fundido antes de deposita-lo no substrato, similar ao método FDM. A tecnologia DED apresenta alta taxa de deposição e grande envelope operacional (próximos de 6m x 1,4m x 1,4m). Por outro lado, apresenta baixa precisão e qualidade superficial, podendo necessitar de processos posteriores de usinagem. Devido à estas características únicas, o método DED pode ser utilizado também em processos de reparos como preenchimento de fissuras e reconstrução de componentes danificados (Figura 9d).

Assim como nos processos tradicionais de fabricação, a seleção da tecnologia que melhor se adeque na fabricação de um componente deve ser analisado junto às características de cada método a fim de que se possa encontrar a melhor solução de compromisso. A Tabela 3 resume as características principais de cada método de impressão 3D explorado.

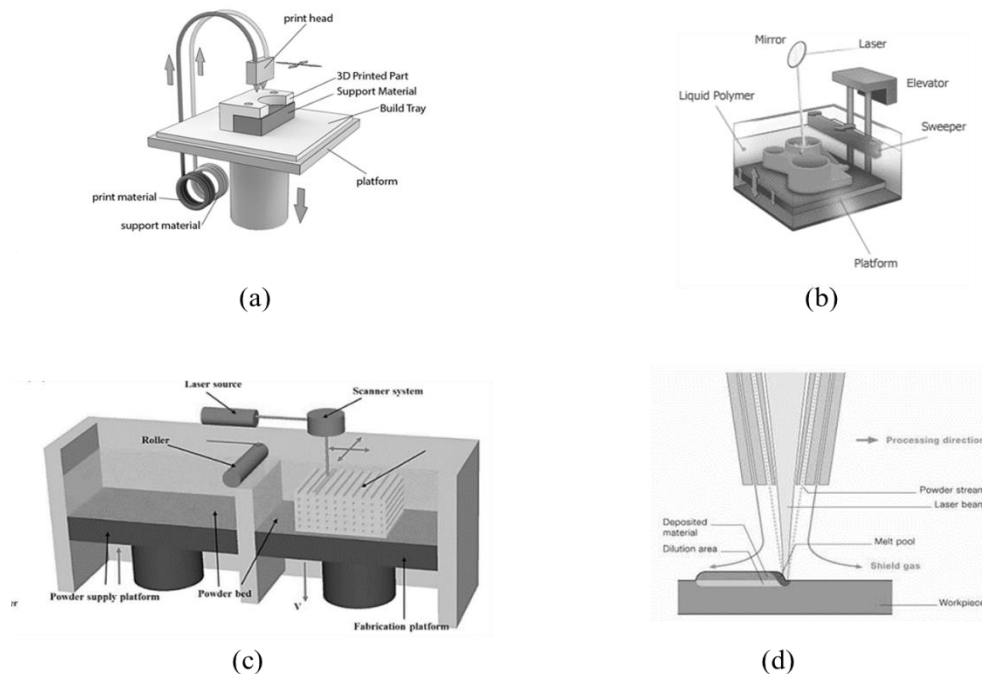


Figura 9 – Modo de funcionamento das principais tecnologias de impressão 3D: (a) FDM; (b) SLA; (c) *powder bed fusion*; (d) DED (Adaptado de DDDROP, 2018; 3D-PRINTING-EXPERT, 2019; C3 PLASTIC DESIGN, 2019; MERLIN PROJECT, 2013; NGO *et al.*, 2018).

Tabela 3 – Sumário de materiais, aplicações, vantagens e desvantagens dos principais métodos de impressão 3D (Adaptado de NGO *et al.*, 2018).

	Materiais	Aplicações	Vantagens	Desvantagens
<i>Fused Deposition Modeling</i>	<ul style="list-style-type: none"> Filamentos contínuos de polímeros termoplásticos (ABS, PC, PLA) 	<ul style="list-style-type: none"> Prototipagem Rápida 	<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo Alta velocidade Simplicidade 	<ul style="list-style-type: none"> Propriedades mecânicas Materiais limitados
<i>Estereolitografia</i>	<ul style="list-style-type: none"> Resina com monômeros foto-ativados por luz UV 	<ul style="list-style-type: none"> Biomedicina Prototipagem 	<ul style="list-style-type: none"> Alta resolução e acuracidade dimensional 	<ul style="list-style-type: none"> Poucos materiais Baixa velocidade de impressão Relativamente mais caro
<i>Powder Bed Fusion</i>	<ul style="list-style-type: none"> Ligas de alumínio, ligas de aço, alguns poucos polímeros (SLS e SLM) 	<ul style="list-style-type: none"> Biomedicina Eletrônicos Indústria aeroespacial Estruturas leves 	<ul style="list-style-type: none"> Alta resolução e acuracidade dimensional 	<ul style="list-style-type: none"> Baixa velocidade de impressão Relativamente mais caro
<i>Direct Energy Deposition</i>	<ul style="list-style-type: none"> Ligas de metais na forma de pó ou arame 	<ul style="list-style-type: none"> Indústria aeroespacial Modernização Manutenção Biomedicina 	<ul style="list-style-type: none"> Custos e tempos de fabricação reduzidos Propriedades mecânicas excelentes Controle da microestrutura Excelente para reparos e modernização 	<ul style="list-style-type: none"> Baixa resolução e acuracidade dimensional Limitação para imprimir formas complexas com detalhes finos

2.3.2 Impressão 3D na Indústria Aeroespacial

Analisando-se no âmbito da produção, os componentes aeronáuticos possuem características que fazem com que a impressão 3D seja uma alternativa nos processos

produtivos industriais, tais como (NGO *et al.*, 2018 *apud* KUMAR; NAIR, 2017; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015; SINGAMNENI, *et al.*, 2019):

- Geometrias complexas. Componentes aeronáuticos normalmente apresentam alto desempenho com integração de funcionalidades (estrutural, aerodinâmica, dissipação de calor etc.) e devem ser leves. Para isso, geometrias complexas são desenvolvidas, muitas vezes baseadas em simulações computacionais. A impressão 3D proporciona maior liberdade de design para os projetistas empregarem geometrias complexas que não são possíveis ou viáveis de serem fabricadas por processos tradicionais de fabricação;
- Fabricação de pequenos lotes. Devido aos longos anos de ciclo de vida das aeronaves, muitos itens têm baixa demanda. Mudar a configuração de produção para produzir estes itens significam ineficiências no processo. Pelo fato de não se utilizar ferramentas diferentes no processo de fabricação, a impressão 3D proporciona vantagens neste sentido, reduzindo o tempo de preparação e podendo o lote mínimo de produção ser reduzido a uma unidade;
- Buy to fly ratio. Esta razão se refere a relação entre o peso do componente final e o peso da matéria-prima inicial necessária. A indústria aeronáutica utiliza ligas metálicas especiais de alto valor, as quais são processadas por métodos tradicionais de fabricação, geralmente subtrativos, e apresentam mais de 95% de desperdício de material. Isso quer dizer, por exemplo, se um componente final de liga de titânio tiver 5kg, foi necessário um bloco de 100kg para sua fabricação. A impressão 3D, por ser um processo aditivo com deposição de material camada-por-camada, proporciona menor geração de resíduos durante o processo.

A GE Aviation foi uma das pioneiras em buscar a inserção de componentes impressos na indústria aeronáutica. Atualmente, há uma divisão de pesquisa e manufatura focada no desenvolvimento desta tecnologia. O primeiro componente impresso 3D certificado pela FAA (*Federal Aviation Administration*) foi desenvolvido pela GE Aviation, o qual é seu o projeto em impressão 3D mais conhecido por ter sido um marco para a indústria aeronáutica (Figura 10). No momento, a GE Aviation está trabalhando na modernização de mais de 400 motores em operação utilizando impressão 3D. Outro projeto de renome que está sendo realizado pela GE Aviation é o desenvolvimento do injetor de combustível impresso 3D para equipar a próxima geração de motores chamados de LEAP (Figura 11). Este componente era fabricado

originalmente através da compra de 18 partes diferentes de vários fornecedores e então montados. Com impressão 3D, a GE Aviation consegue fabricar o mesmo componente em peça única, resultando em redução de 25% em peso, aumento de durabilidade e redução de custos de produção (KELLNER, 2015).

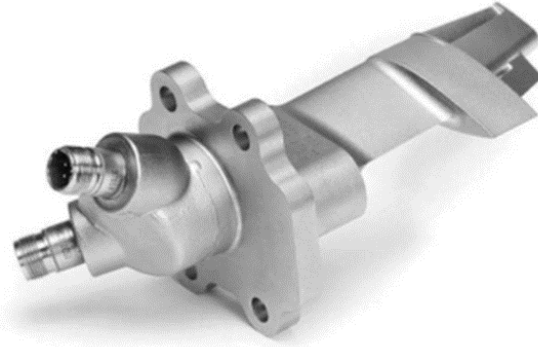


Figura 10 – Compartimento do sensor de temperatura e pressão T25 (KELLNER, 2015).



Figura 11 – Injetor de combustível fabricado com impressão 3D (KELLNER, 2015).

Outro exemplo de componente reprojeto são os *brackets* de titânio do avião A350 XWB. Antes, este componente era fabricado em alumínio. A redução de peso foi cerca de 30%. Estima-se que tenha milhares destas peças dentro do avião, resultando em um ganho significativo de desempenho (ETMM, 2014). Outro ponto importante neste projeto é a melhoria da *buy to fly ratio* da liga de titânio, que possui elevado valor agregado. Devido suas excelentes propriedades e baixo peso, as ligas de titânio são largamente utilizadas em aeronaves avançadas de defesa. Aproximadamente 39% do peso total do caça F-22 Raptor é liga de titânio, sendo o material mais presente, seguido dos compósitos que representam aproximadamente 25% (GLOBAL SECURITY, 2016). Para efeitos de comparação, esta proporção é mais que o dobro

quando comparado com um avião comercial de última geração, como o Boeing 787, que apresenta 15% do seu peso em liga de titânio e 50% em compósitos (BOEING, 2010). Apesar da proporção em peso nas aeronaves não parecer muito, a indústria aeroespacial consome cerca de 75% de toda produção mundial de liga de titânio, sendo a liga Ti-6Al-4V a mais utilizada (SILVA, 2016 *apud* Oliveira *et al.*; 2009).

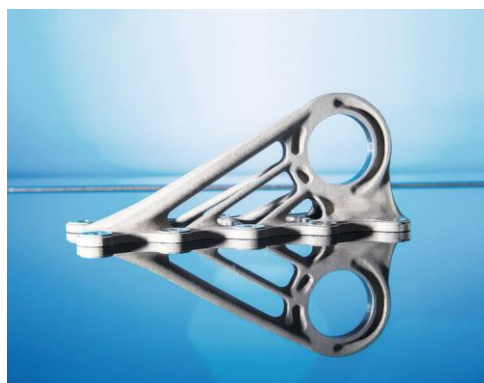


Figura 12 – *Bracket* de titânio fabricado com impressão 3D (ETMM, 2014).

Partindo para o ambiente espacial também é encontrado aplicações que utilizam impressão 3D. As condições no espaço requerem componentes confiáveis que passam por rigorosos testes. O programa Orion da NASA em parceria com Lockheed Martin tem como missão enviar para o espaço distante além da Lua uma espaçonave tripulada. O programa prevê o lançamento de um primeiro protótipo não-tripulado e em seguida um outro tripulado. O primeiro protótipo tem mais de 100 peças impressas através do método FDM (STRATASYS, 2018). Fazendo parte de um outro programa da NASA chamado Desert RATS (*Research and Technology Studies*), um *rover* está sendo desenvolvido para trabalhar em condições espaciais extremas e vencer terrenos irregulares. Também utilizando o método FDM, cerca de 70 componentes diferentes foram impressos 3D, em grande maioria peças internas da cabine. Em ambos os programas mencionados, a impressão 3D proporcionou redução de custos de desenvolvimento e encurtamento de cronogramas de projeto (STRATASYS, 2015). A capacidade de fabricação sob demanda com impressão 3D é um ponto importante para aplicações espaciais. Peças de reposição utilizados em veículos espaciais e estações em órbita foram fabricados tradicionalmente por métodos convencionais aqui na Terra. Quando um componente mais crítico vem a falhar no espaço, a única solução é enviar um novo componente para que a troca seja realizada. Isso é demorado e custa caro. Com a impressão 3D, surge a possibilidade do novo componente ser impresso no espaço. A NASA em parceria com o grupo

Made in Space já conduzem testes de impressão 3D em microgravidade. A ideia é de que a implementação primeiro aconteça com os astronautas na Estação Espacial Internacional podendo imprimir ferramentas e componentes sob demanda (NOORANI, 2017, p. 25).

2.3.3 Certificação Aeronáutica

Uma característica peculiar da indústria aeronáutica é a presença de massivas regulações rigorosas para certificação de produtos aeronáuticos afim de garantir a segurança de voo e aeronavegabilidade continuada. A campanha de certificação de um processo de produção envolve, principalmente, demonstrar para autoridade certificadora que o componente apresente os requisitos de qualidade e consistência esperados, assim como a repetitividade do processo produtivo. Esta é uma das maiores barreiras que a tecnologia de impressão 3D deve ultrapassar para se firmar como um método revolucionário dentro da comunidade aeroespacial, tanto no âmbito da produção industrial como na digitalização de peças de reposição. Quanto maior a criticidade do componente, maior são as exigências de qualidade (Figura 13). A falha de tais componentes pode levar à eventos catastróficos e conseqüentes perdas de vidas e de bens. O mesmo se aplica em processos de manutenção com impressão 3D, seja pela reconstrução da peça danificada, construção de remendos emergenciais ou fabricação de um componente novo.

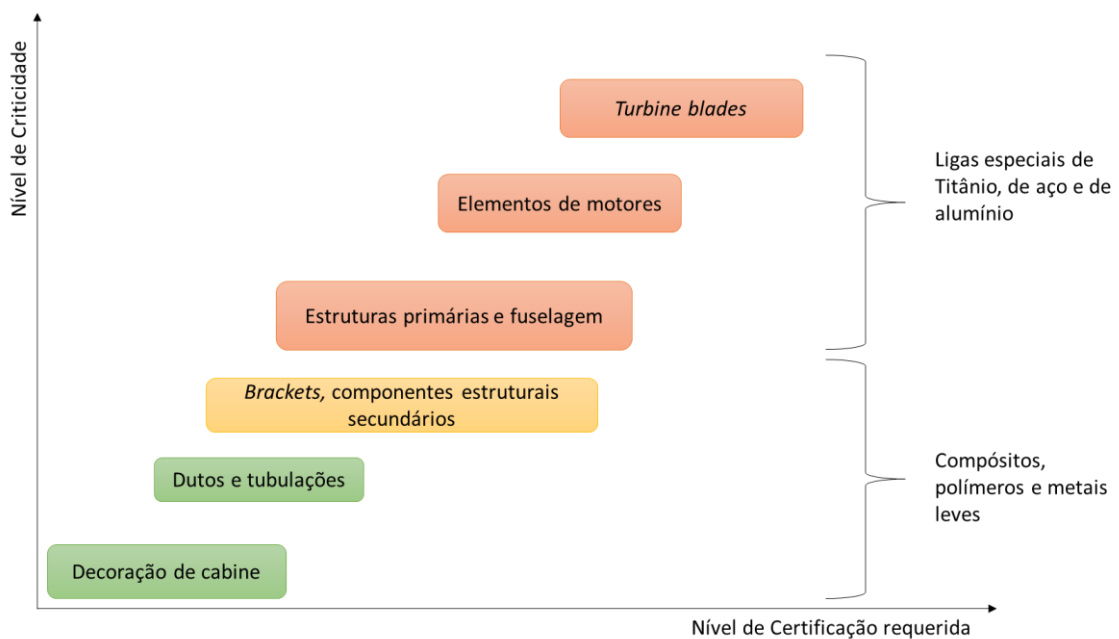


Figura 13 – Nível de criticidade versus nível de certificação requerida de componentes aeronáuticos (Adaptado de KUMAR; NAIR, 2017).

A FAA, por meio da circular nº 8900:391, aprovou a utilização de impressão 3D para a fabricação de componentes de baixa criticidade já certificados por processos de fabricação convencionais, sem a necessidade de certificar novamente o componente/ processo. A principal exigência é de que seja apresentado testes com resultados similares às propriedades químicas e físicas do componente original. Esta circular foi emitida em 30 de novembro de 2016, porém foi cancelada em 30 de novembro de 2017. Através de buscas com as palavras chave “*additive manufacturing*” e “*3D printing*” nos *websites* da FAA e EASA (*European Union Aviation Safety*) não foi encontrado nenhuma nova orientação oficial neste sentido (UNITED STATES, 2016; EASA, 2019; UNITED STATES, 2019).

2.3.4 Impressão 3D no Gerenciamento de Estoques

Assim como no âmbito da produção, a utilização da impressão 3D também impacta o gerenciamento de estoques de peças de reposição na indústria aeronáutica.

Uma estrutura de fornecimento de peças de reposição tradicional na indústria aeronáutica é formada, simplificada, pela OEM, centros de distribuição regionais, centros de distribuição locais, as instalações ou bases instaladas e pelas oficinas de MRO (Figura 14a). A quantidade de centros regionais e locais de distribuição depende de muitos fatores, sendo um dos mais importantes as extensões territoriais que a operação deve atender. (SINGAMNENI *et al.*, 2019; GHADGE *et al.*, 2018). A impressão 3D é comumente mencionada na literatura como uma tecnologia disruptiva no gerenciamento da cadeia de suprimentos devido, entre outros fatores, sua capacidade de simplificação na estrutura de suportabilidade de sistemas complexos (Figura 14b).

Destaca-se como características principais da estrutura logística com impressão 3D (KHAJAVI; PARTANEN; HOLMSTROM, 2014; NGO *et al.*, 2018; OETTMEIER; HOFMANN, 2016; GHADGE *et al.*, 2018; KNOFIUS; HEIJDEN; ZIJM, 2016; SILVA, 2016):

- Produção distribuída. Com a impressão 3D, os locais de produção e consumos coincidem, ou seja, o fator distância é eliminado, ou, pelo menos, é drasticamente reduzido. As OEM devem atender a demanda por peças de reposição em escala global. Utilizando-se métodos convencionais de fabricação, as longas distâncias entre produção e consumo são vencidas através de modais de transporte, os quais resultam custos significativos com frete e aumentam o prazo de entrega. Para se reduzir o prazo de entrega, as OEM distribuem a produção para centros de entrega mais próximos dos pontos de consumo. Com os componentes sendo fabricados por

impressão 3D no local de consumo, os custos com transporte são bruscamente reduzidos ou eliminados. O avanço das máquinas de impressão 3D está resultando em tempos de fabricação cada vez menores, isto resulta em tempos de atendimento menores, favorecendo para que o nível de serviço utilizando impressão 3D tenda a ser melhor;

- Produção sob demanda. Como visto, manter estoques gera elevados custos nas organizações, sobretudo de capital imobilizado. Os riscos de falta de estoque inerentes à imprevisibilidade da demanda obrigam à manutenção de estoques de segurança adicionais aos estoques regulares. A impressão 3D diminui o risco de falta de estoque e reduz a necessidade de manter grandes estoques por meio da produção sob demanda de componentes. Neste sentido, o sistema produtivo passa de “fazer para estocar”, com métodos tradicionais de fabricação, para *just in time*. Como visto, a metodologia JIT se caracteriza pelo atendimento no momento em que a demanda surge, reduzindo os níveis de estoques à valores mínimos, ou até mesmo elimina-los para certos itens.
- Produção customizada. A capacidade de se fabricar componentes exclusivos para interiores, ferramentas especiais, ou qualquer outra peça que se deseje com liberdade de *design* é uma característica da impressão 3D. Mudanças de configuração de produção e preparação da máquina são extremamente reduzidos quando comparado com métodos convencionais de fabricação. Esta é uma característica que torna a operação mais flexível e fornece exclusividade nos produtos de seus clientes, fator explorado em clientes de aviação privada.

Como dito, aeronaves são sistemas complexos que operam em ciclos de vidas que podem durar dezenas de anos. Não é incomum que um operador possua em sua frota aeronaves/sistemas de gerações anteriores e modelos novos. Manter a suportabilidade de sistemas de diferentes gerações é uma dificuldade para os fornecedores de peças de reposição, uma vez que muitos itens possuem alto valor agregado e são infrequentemente comprados, resultando em um grande risco de obsolescência em seus estoques. A possibilidade de fabricação sob demanda e customizada com impressão 3D simplifica a continuidade no fornecimento de peças de reposição para aeronaves/sistemas de gerações anteriores, além de reduzir o risco de obsolescência de estoques para componentes que possam ser fabricados por impressão 3D (KNOFIUS; HEIJDEN; ZIJM, 2016; GHADGE *et al.*, 2018).

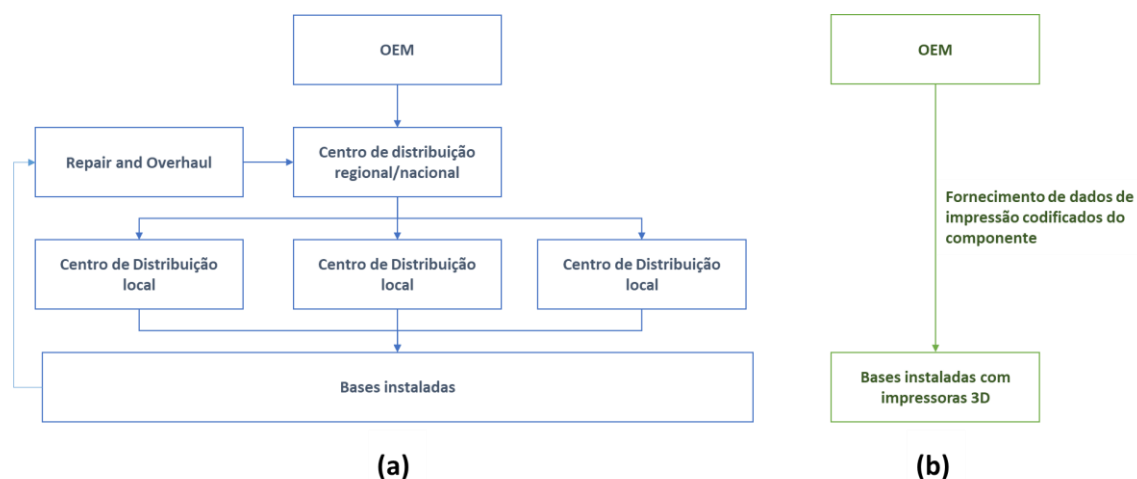


Figura 14 – Estrutura de fornecimento de peças de reposição em (a) modelo convencional e (b) modelo com impressão 3D (GHADGE *et al.*, 2018; KHAJAVI; PARTANEN; HOLMSTROM, 2014; KNOFIUS; HEIJDEN; ZIJM, 2016; OETTMEIER; HOFMANN, 2016).

Por fim, a digitalização do fornecimento de peças de reposição faz com que as OEM distribuam dados em vez de componentes físicos. Neste sentido, há questões legais em relação à direitos autorais e segurança de dados que não são abordadas neste trabalho, mas tem grande importância para a comercialização futura de soluções com impressão 3D. Formas de que os dados necessários para se imprimir cópias no ponto de consumo estejam embarcados no próprio componente vêm sendo exploradas a fim de uma maior velocidade na transmissão de informação entre fornecedor e cliente. Para isso, as alternativas podem ir desde a utilização de etiquetas de identificação por radiofrequência (RFID, em inglês) até métodos que estão no estado da arte deste tópico, como codificar dentro do componente impresso os dados de seu “DNA” (GEHRKE, 2019).

Neste sentido, a implementação das tecnologias de fabricação por impressão 3D nos programas de ABDR podem agregar avanços importantes. A capacidade de se produção distribuída, sob demanda e customizada da impressão 3D cria a possibilidade de que peças de reposição, ferramentas especiais ou componentes de diversos formatos para reparos customizados sejam feitos nas bases de apoio instaladas longe de grandes centros de manutenção e estoques. As máquinas de impressão 3D podem ser instaladas tanto em oficinas de manutenção sofisticadas de porta-aviões em alto mar (Figura 15), como em carretas de caminhão facilmente deslocadas no campo de batalha (Figura 16).

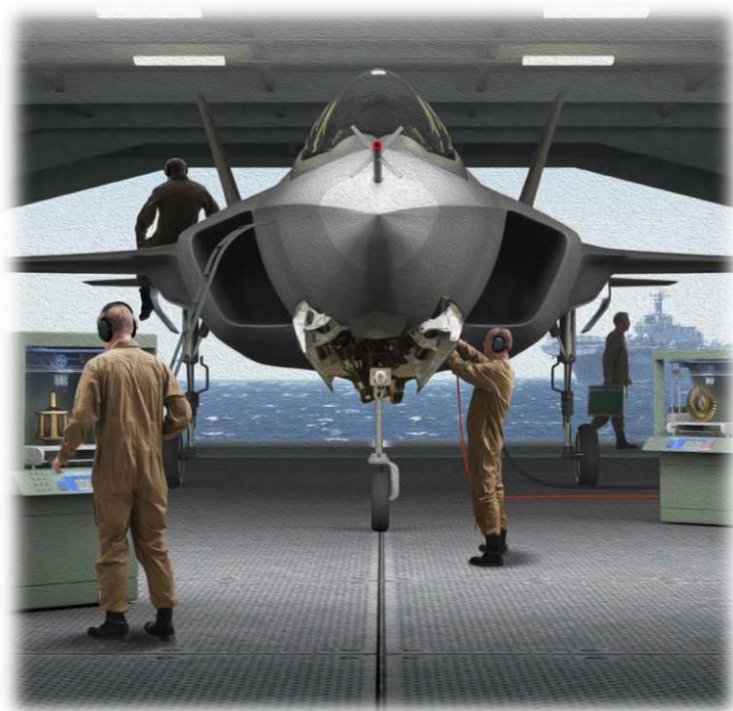


Figura 15 – Impressão 3D de peças de reposição em porta-avião (COYKENDALL *et al.*, 2014).

A partir das capacidades técnicas de impressão 3D e de suas consequências no gerenciamento de estoques infere-se que a utilização desta tecnologia em ABDR resulta em cinco impactos principais, como segue:

- Tempo de reparo. Retornar a aeronave danificada em tempo relevante ao combate é uma premissa para as operações de ABDR. Com a impressão 3D, os tempos de reparos podem ser reduzidos pela fabricação customizada de peças ou remendos de formas difíceis de serem feitas pelos métodos convencionais. No caso de falta de uma peça de reposição no estoque, a capacidade de produção sob demanda e distribuída da impressão 3D reduz o tempo de atendimento de uma nova peça de reposição. Em uma logística convencional, um pedido de uma nova peça à central administrativa seria realizado, a qual seria responsável de enviar a nova peça do centro de distribuição mais próximo que a tenha em estoque. Isso tudo leva tempo. Ainda tem a possibilidade de que a peça não tenha em nenhum estoque da força aérea e seja necessário que um pedido de compra junto ao fornecedor seja feito, aumentando ainda mais o tempo de atendimento. Com a digitalização do fornecimento de peças de reposição, o novo componente pode ser fabricado no local

de consumo, sendo agora o tempo de atendimento somente o tempo de fabricação do componente pela máquina de impressão 3D;

- Níveis de estoques. Como visto, a manutenção de estoques resulta em capital imobilizado e custos extras para a organização, porém são necessários para o atendimento da demanda regular e incertezas. Devido a capacidade de produção sob demanda e distribuída da impressão 3D, para componentes que possam ser fabricados com esta tecnologia não há necessidade de mantê-los em estoque, mudando sua estratégia de atendimento para uma programação JIT. Isto é útil em tempos de guerra já que os suprimentos necessários para levar e manter na base remota são menores. No entanto, é necessário a manutenção de estoques de matéria prima para impressão, os quais podem ter cuidados especiais quanto ao armazenamento. Alguns tipos de compósitos devem ser armazenados em local refrigerado, sendo, assim, necessário o uso de uma carreta adicional com sistema de refrigeração e geradores elétricos a diesel, por exemplo;
- Risco de indisponibilidade. Manter a aeronave disponível com capacidades mínimas de combate para o cumprimento da missão é um objetivo primário em ABDR. A falta de um item em estoque pode ter consequências tangíveis e intangíveis. O custo tangível da indisponibilidade pode ser a não diluição do custo de aquisição na fase de serviço da aeronave. Porém, ter a aeronave indisponível em meio a uma guerra pode significar graves consequências para o desenvolvimento do combate. Com a impressão 3D, o risco de indisponibilidade de itens que possam ser fabricados com esta tecnologia seria extremamente reduzido, devido à fabricação JIT do componente. Isso significa dizer que a operação se torna mais resiliente e responsiva frente às incertezas na demanda, simplificando o uso de sofisticados modelos probabilísticos para previsão de demanda destes itens;
- Custos. A redução dos custos operacionais com a utilização de impressão 3D é uma consequência da redução dos níveis de estoques e risco de indisponibilidade. Em suma, os custos de manutenção e aquisição de itens que possam ser impressos 3D podem ser reduzidos, em comparação aos métodos tradicionais de fabricação e distribuição;
- Segurança de voo. Por último, mas não menos importante, tem-se a possibilidade de otimização da segurança de voo com o aumento da confiabilidade dos reparos sendo

realizado com impressão 3D. Devido a capacidade de fabricação com mais facilidade de geometrias e superfícies complexas da impressão 3D, reparos customizados (remendos na fuselagem ou reconstrução de estruturas secundárias, por exemplo) podem ser de mais qualidade, retornando a parte danificada para mais próximo de suas condições originais e resultando em menor interferência na aerodinâmica e controle da aeronave. Vale lembrar que estes tipos de reparos são utilizados em situações extremas, somente quando realmente for necessário, não sendo recomendável como prática usual.



Figura 16 – Impressão 3D de peças de reposição em instalações móveis terrestres (LOUIS; SEYMOUR; JOYCE, 2014).

Ainda que primeiramente desenvolvidas a pouco tempo, as tecnologias de impressão 3D vêm revolucionando os processos produtivos em muitos setores. A indústria aeroespacial está na vanguarda na aplicação de impressão 3D em seus processos produtivos. Com o avanço das capacidades operacionais das máquinas de impressão e aplicação de novos materiais, a tendência é que a impressão 3D esteja cada vez mais presente na indústria aeroespacial. Uma das maiores barreiras que deve ser vencida é a certificação de componentes impressos 3D para uso aeronáutico. Apesar de que muitos componentes impressos 3D já conseguirem resultados similares de propriedades químicas e físicas quando comparados aos métodos tradicionais de fabricação, o seu uso ainda é restrito às peças de baixa criticidade, principalmente devido à falta de orientações oficialmente definidas pelas autoridades aeronáuticas especificamente.

Dentro do suporte logístico de sistemas complexos, o gerenciamento de estoques é importante para se atingir uma solução de compromisso entre RAMS e custos operacionais. Níveis de serviços elevados significam disponibilidade de produto para atendimento da demanda. Este é um dos principais motivos para se ter estoques. Para isso, produtos são mantidos armazenados para atendimento de demandas regulares e de incertezas existentes. O que é justificável. Os críticos aos estoques consideram os estoques como desperdício, pois absorvem capital que teria utilização para investimentos na organização, além de não agregarem diretamente valor ao produto, apesar de armazenarem valor. No entanto, na vida real é muito mais fácil defender-se de críticas pela manutenção de estoques em excesso do que ser pego de surpresa com falta de estoque. A impressão 3D pode simplificar a gestão por meio da digitalização do fornecimento de peças de reposição através da produção distribuída, sob demanda e customizável de componentes. Com isso, surge a possibilidade do uso de impressão 3D como otimizador de programas de ABDR das forças aéreas ao redor do mundo. Impactos quanto à redução no tempo de reparo, de níveis de estoques, de risco de indisponibilidade, de custos e melhorias em segurança de voo estão entre os potenciais impactos.

Identificar os componentes candidatos a serem impressos está entre os primeiros passos para avaliar a viabilidade do uso de impressão 3D em ABDR. Para isso, é necessário que seja utilizado um método estruturado para escolher corretamente por onde começar. Na Seção 2.4 é introduzido o método AHP, largamente difundido no meio acadêmico e profissional, usado como base para a metodologia proposta nesta dissertação. Por fim, na Seção 2.5 é apresentado um levantamento das publicações que tenham ligação com o tema abordado neste trabalho.

2.4 Método AHP

Desenvolvido nos anos 1970 por T.L. Saaty, o método AHP é uma teoria de medição utilizada para se obter taxas de proporcionalidade de preferência entre critérios ou alternativas com grandezas quantitativas ou qualitativas a partir de comparações em pares. O método AHP é utilizado em diversas aplicações em teorias de decisão, planejamento e resolução de conflitos em diversas áreas do conhecimento, tais como política, economia, medicina e engenharia (SAATY, 1987; VARGAS, 1990). Para aplicações de tomada de decisão, o método AHP é realizado em duas fases: construção da hierarquia e avaliação.

A árvore hierárquica mostra a interação entre o objetivo da análise, os critérios, subcritérios e alternativas analisadas de forma esquematizada (Figura 17). A hierarquia proposta por um decisor ou grupo não é uma verdade absoluta. É normalmente esperado que

dois decisores ou grupos desenhem estruturas diferentes. Organizar o objetivo, critérios, subcritérios e alternativas em uma hierarquia fornece uma visão geral dos complexos relacionamentos inerentes e ajuda o decisor a avaliar se as questões em cada nível são de mesma ordem de magnitude. Cada nível representa uma profundidade diferente para o problema. (SAATY, 1990; VARGAS, 1990).

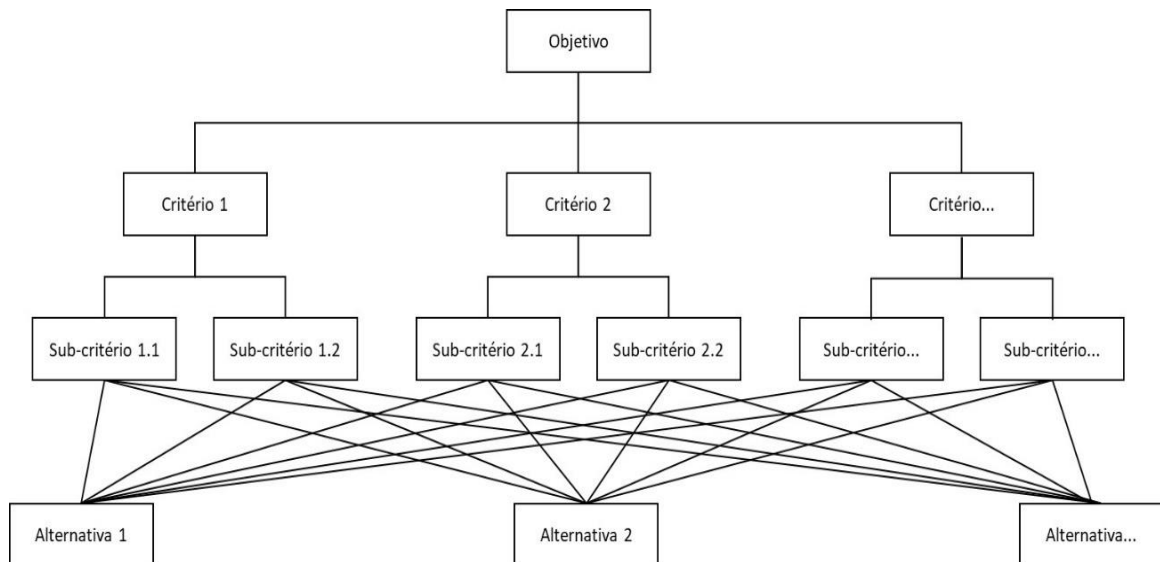


Figura 17 – Estrutura hierárquica de AHP.

Após ter construído a estrutura hierárquica, a próxima fase é a avaliação dos elementos por meio de uma comparação em pares. Nesta fase, dois elementos são comparados com respeito ao elemento imediatamente superior até se chegar na matriz de comparações A .

$$A = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

A matriz de comparações A é uma matriz recíproca, ou seja, $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Cada elemento w_i/w_j representa quanto o critério i é mais importante que j , seguindo uma escala fundamental de julgamentos proposta por Saaty e reproduzida na Tabela 4.

Tabela 4 – Escala fundamental de julgamentos (Adaptado de SAATY, 1987; SAATY, 1990).

Intensidade da importância	Definição	Descrição
1	Igual importância	Dois critérios contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada de um sobre outro	Experiência e julgamento fortemente a favor de um critério sobre outro
5	Importância forte ou essencial	Experiência e julgamento fortemente a favor de um critério sobre outro
7	Importância muito forte	Um critério é fortemente favorecido e sua dominância demonstrada em prática
9	Importância extrema	A evidência favorece um critério sobre outro em sua maior ordem possível de afirmação
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	Quando é necessário compromisso
Recíprocos	Se o critério i tem um dos números acima quando comparado com j , então j tem o valor recíproco quando comparado com i	
Racionais	Relações decorrentes das escalas	Se a consistência fosse forçada obtendo n valores numéricos para abranger a matriz

A atratividade dos critérios, subcritérios e alternativas é medida através do vetor de prioridades, que nada mais é que o autovetor associado à matriz de comparações A . Uma maneira fácil de se conseguir um valor aproximado para os vetores de prioridades é normalizar as médias geométricas em cada linha de A . Este resultado coincide com o autovetor para $n \leq 3$ (SAATY, 1987).

Os julgamentos qualitativos realizados na construção de A devem ser os mais assertivos possíveis. Para que se tenha uma condição de consistência ideal na matriz A é necessário que o autovalor principal seja igual a ordem n . No entanto, julgamentos intangíveis, tais como os que expressam sentimentos ou experiências do indivíduo, podem afetar a consistência da matriz de comparações. Para mensurar a consistência de uma matriz de julgamentos A real é utilizado dois parâmetros: *Consistency Index* (CI) e *Consistency Ratio* (CR), onde

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

A razão de consistência CR é a razão entre CI e o mesmo índice obtido através da média de um grande número de matrizes também recíprocas de mesma ordem com julgamentos aleatórios *RI* (Tabela 5). Se CR é menor que 10%, os julgamentos realizados em *A* são aceitos como consistentes (SAATY, 1990).

Tabela 5 – *Random Index* (SAATY, 1987).

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>RI</i>	0	0	0,52	0,89	1,11	1,15	1,35	1,40	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57	1,58

Para julgamentos das alternativas em critérios quantitativos, a análise é mais simples. Para critérios em que quanto maior o valor é melhor, o grau de atratividade das alternativas é medido através da normalização dos resultados das alternativas. Para critérios em que quanto menor o valor é melhor, antes de normalizar é preciso harmonizar os resultados primeiro.

O último passo do processo é realizar a agregação global dos resultados encontrados e se obter a pontuação final de cada alternativa para o objetivo inicialmente estipulado, por meio de uma soma ponderada pelos pesos calculados nos vetores de prioridades de cada matriz de julgamentos em cada nível da hierarquia.

2.5 Seleção de Componentes Candidatos

As publicações sobre impressão 3D na indústria aeroespacial têm apresentado um crescimento exponencial nas últimas décadas; geograficamente se concentrando na América do Norte, China e Europa Ocidental (Figura 18). No entanto, o subtema de apoio a decisão tem mostrado, relativamente, ter sido menos explorado, sobretudo em aplicações dentro do contexto aeroespacial.

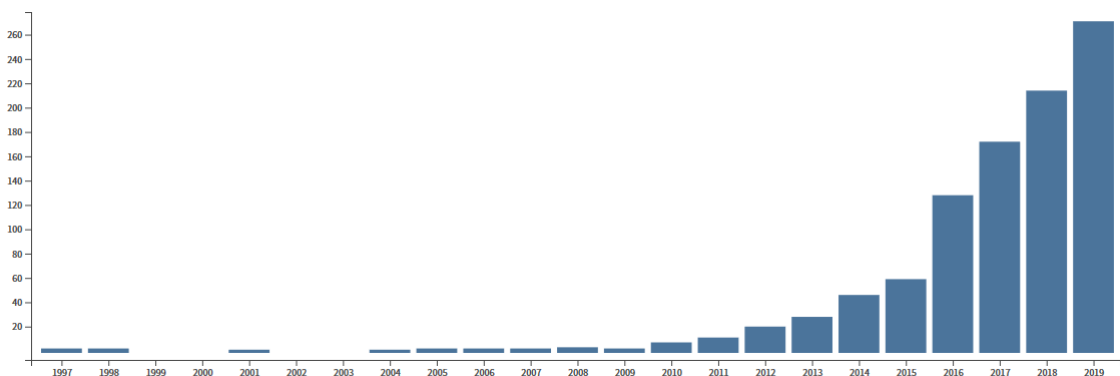


Figura 18 – Publicações no *Web of Science* com “TS = ((*additive_manufacturing OR 3d_printing*) AND (*aerospace OR aeronautic**))”, entre 1990-2019.

Para identificar as publicações com o subtema de apoio a decisão no contexto da dissertação foram utilizadas duas pesquisas no *Web of Science* (Tabela 6). Fazendo-se uma análise crítica qualitativa dos resumos das publicações da Tabela 6 chegou-se em 16 publicações que são realmente relacionadas à apoio a decisão e seu nível de relação com a dissertação (Tabela 7).

Tabela 6 – Pesquisa do subtema de apoio a decisão no *Web of Science*.

Pesquisa avançada no <i>Web of Science</i>	Total de publicações
TI=((<i>additive_manufacturing OR 3d_printing</i>) AND <i>decision</i>)	25
TI=((<i>additive_manufacturing OR 3d_printing</i>) AND <i>select*</i> AND (<i>part*</i> OR <i>candidate*</i> OR <i>component*</i>))	36

Tabela 7 – Nível de relação das publicações de apoio a decisão com a dissertação.

Título	Autores	Aspectos de			Nível de relação com a dissertação
		Logística	Produção	Seleção multicritério	
Environmentally Sustainable Management of 3D Printing Network: Decision Support for 3D Printing Work Allocation	Ma, Jungmok (2019)		✓		Baixa
Understanding the decision rules for 3D printing adoption	Tsai, Cheng-An; Yeh, Ching-Chiang (2019)		✓		Baixa
The use of 3D printing in shared decision making for a juvenile aggressive ossifying fibroma in a pediatric patient	Lee, Andrew Y.; Patel, Neha A.; Kurtz, Kenneth; Edelman, Morris; Koral, Korgun; Kamdar, Dev; Goldstein, Todd (2019)		✓		Baixa
An Analytics Framework for Structuring 3D Printing Deployment Decisions	Davis, Ericson R.; Eckhause, Jeremy M.; Peterson, David K.; Volovoi, Vitali (2019)	✓	✓		Moderada
A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption	Watson, J. K.; Taminger, K. M. B. (2018)		✓		Baixa

Integrated product-process design: Material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making	Zaman, Uzair Khaleeq uz; Rivette, Mickael; Siadat, Ali; Mousavi, Seyed Meysam (2018)		✓	✓	Moderada
A decision support system for additive manufacturing process selection using a hybrid multiple criteria decision-making method	Wang, Yuanbin; Zhong, Ray Y.; Xu, Xun (2018)		✓	✓	Moderada
Decision methods application to compare conventional manufacturing process with metal additive manufacturing process in the aerospace industry	Cruz, Marcio Fernando; Borille, Anderson Vicente (2017)		✓	✓	Moderada
A holistic decision framework for 3D printing investments in global supply chains	Feldmann, Carsten; Pumpe, Andreas (2017)	✓	✓		Moderada
Selecting parts for additive manufacturing in service logistics	Knofius, Nils; van der Heijden, Matthieu C.; Zijm, W. H. M. (2016)	✓	✓	✓	Alta
Decision support for additive manufacturing deployment in remote or austere environments	Meisel, Nicholas A.; Williams, Christopher B.; Ellis, Kimberly P.; Taylor, Don (2016)	✓	✓	✓	Alta
Approach towards a decision support system for additive manufacturing	Eddy, Douglas; Calderara, Justin; Price, Mark; Krishnamurty, Sundar; Grosse, Ian (2016)		✓	✓	Moderada
Towards a sustainable and economic selection of part candidates for additive manufacturing	Lindemann, Christian; Reiher, Thomas; Jahnke, Ulrich; Koch, Rainer (2015)		✓	✓	Moderada
Additive manufacturing process selection based on parts' selection criteria	Mancanares, Caue G.; Zancul, Eduardo de S.; da Silva, Juliana Cavalcante; Cauchick Miguel, Paulo A. (2015)		✓	✓	Moderada

Apesar de se ter uma quantidade razoável de publicações sobre apoio a decisão e impressão 3D, a maioria foca em aspectos de produção. Somente duas publicações encontradas abordam em suas análises multicritério uma visão mais holística com aspectos de logística e de produção, evidenciando a menor atenção dada às questões de suportabilidade para este tipo de tomada de decisão. Um fato em comum em várias publicações da Tabela 7 é o uso do método AHP, ou leves variações deste, como metodologia de decisão.

3 Metodologia

A partir do que foi explorado, infere-se que a seleção de componentes candidatos a impressão 3D em ABDR deve ser feita a partir de alguma metodologia de análise multicritério. Há uma diversidade de metodologias destinadas a tomadas/apoio de decisão. Entre os principais métodos estão a árvore de decisão, metodologia multicritério de apoio à decisão e AHP. Assim como a maioria das publicações encontradas no *Web of Science*, esta dissertação utiliza o método AHP como parte do processo de decisão, por entender-se que a que melhor se encaixa no contexto da dissertação. As características principais das outras duas metodologias são brevemente exploradas a seguir:

- Árvore de decisão. A metodologia de árvore de decisão vem sendo extensivamente utilizadas no campo da ciência da computação em aplicações de aprendizado de máquinas e inteligência artificial. A identificação de padrões e classificação de características para tomadas de decisão e modelagem de previsões é feita através da análise de bancos de dados (MYLES, FEUDALE, *et al.*, 2004). Devido a limitação de acesso de bancos de dados com informações sobre taxas de falhas, dimensões, material, preço de aquisição, entre outras, de componentes aeronáuticos, a metodologia de árvore de decisão não é utilizada nesta dissertação;
- Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão (MMAD). As metodologias destinadas ao apoio à decisão adotam o paradigma construtivista em sua modelagem. Diferentemente do paradigma racionalista, o qual é utilizado na Pesquisa Operacional, a tomada de decisão no construtivismo é um processo ao longo do tempo envolvendo a interação entre as partes interessadas. Para o paradigma racionalista, a tomada de decisão é o momento em que ocorre a escolha da solução ótima. As MMAD são indicadas em modelagens subjetivas em que os valores dos decisores devem ser levados em conta, fazendo-se com o problema a ser resolvido seja um problema construído (cada decisor constrói seu próprio problema). O resultado final na MMAD é prover recomendações que visam atender aos valores dos decisores, diferentemente do clássico paradigma racionalista em que fornece uma solução ótima (ENSSLIN; MONTIBELLER; NORONHA, 2001, p. 36). O problema de seleção de componentes aeronáuticos a impressão 3D em ABDR é real e objetivo, em que o resultado final é a solução da comparação entre atender a demanda por impressão 3D ou por processos convencionais. Por este motivo, o

paradigma construtivista não é escolhido para a modelagem da seleção de componentes nesta dissertação.

O modelo proposto para seleção de candidatos é constituído por um processo dividido em duas partes principais: análise preliminar e análise detalhada (Figura 19). Porém, qual componente pode ser um possível candidato para se testar no processo proposto? Esta é uma pergunta válida já que uma aeronave pode ter milhares de itens em seus sistemas e testar todos estas peças pode não ser viável. O primeiro filtro de quais componentes são possíveis candidatos e que serão testados pelo processo de seleção pode ser baseada em três aspectos sobre a peça:

- Comportamento da demanda. Uma das limitações da impressão 3D é a produção em série de componentes, devido a fabricação ser geralmente mais lenta quando comparados aos processos convencionais. Por causa da capacidade de produção sob demanda e customizada da impressão 3D, infere-se que itens com alta incerteza de previsão de demanda, demanda intermitente e raramente solicitados são mais candidatos. Nestes itens, pode-se enquadrar também os remendos emergenciais que tem demanda extremamente aleatória;
- Nível de criticidade. Ainda não se tem definido com clareza quais componentes podem ou não ser fabricados com impressão 3D, no sentido de certificação aeronáutica. Tendo como base a circular nº 8900:391 da FAA, recomenda-se que a impressão 3D não seja aplicada na fabricação de componentes de sistemas considerados de alta criticidade (estruturas primárias, peças de motores, hélices etc.) devido aos riscos à segurança;
- Complexidade geométrica. Sabendo-se da maior dificuldade de produção de componentes de geometrias complexas nos processos convencionais de fabricação quando comparado à impressão 3D, infere-se que componentes/montagens de geometrias complexas são mais candidatos. Uma forma de quantificar a complexidade geométrica do componente utilizada por Cruz e Borille (2017) e Borille (2009) é associa-la a quantidade de cavaco gerado em sua usinagem. Em outras palavras, quanto menor a *buy to fly ratio*, maior a complexidade de geometria do componente/montagem.

3.1 Análise Preliminar

Devido às limitações tecnológicas das máquinas de impressão 3D, muitos itens não podem ser fabricados por esta tecnologia. Logo, não tem porque avaliar estes itens em uma análise AHP aprofundada, já que não é possível sua fabricação por impressão 3D de qualquer maneira. A análise preliminar funciona como um filtro de identificação de itens que são viáveis tecnologicamente serem fabricados por impressão 3D. Para os componentes que forem reprovados nesta análise, conclui-se que não são candidatos a impressão 3D em ABDR.

Inicialmente, é necessário o levantamento das características técnicas do componente a ser avaliado e da máquina de impressão 3D escolhida para a análise. Estas informações são utilizadas também na análise detalhada. As características técnicas do componente incluem suas dimensões, propriedades mecânicas e custos de aquisição de material (Tabela 8). Em seguida, faz-se a escolha de qual processo e de qual máquina de impressão 3D é utilizado na análise preliminar e detalhada. Pode ser que um componente possa ser fabricado por mais de um método de impressão 3D. As principais características da máquina de impressão 3D incluem método de fabricação, fabricante, modelo, precisão, entre outros (Tabela 9).

Concluindo a análise preliminar, o componente é avaliado em dois critérios. A máquina de impressão 3D deve ser capaz de fabricar o tamanho do componente (volume de impressão) no material especificado em projeto. Caso um destes dois critérios não sejam atendidos, o componente não é um candidato a impressão 3D, conforme mostrado na Figura 19.

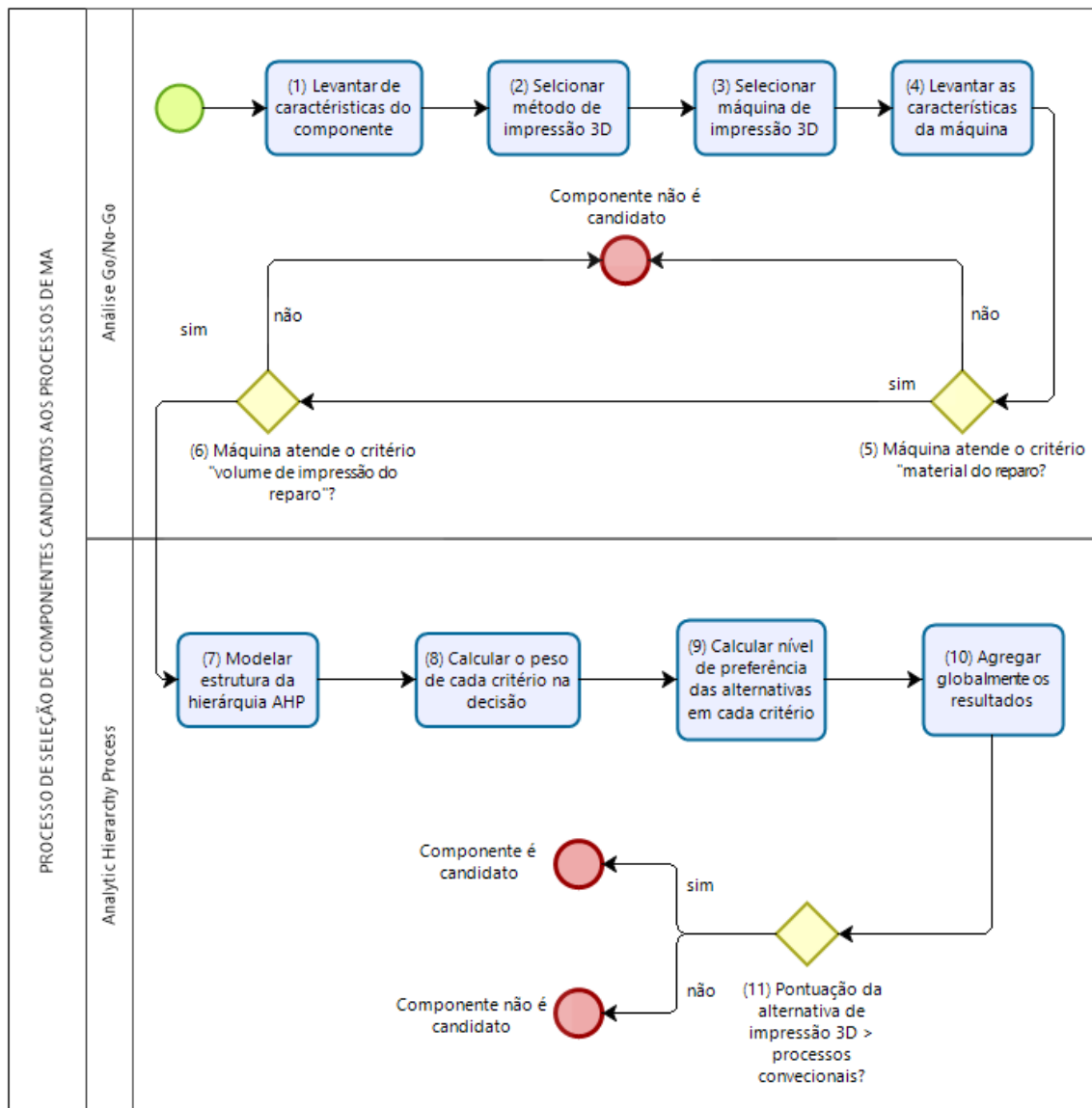


Figura 19 – Processo de seleção de componentes candidatos.

Tabela 8 – Características técnicas do componente (Adaptado de ZAMAN *et al.*, 2018; MANCANARES *et al.*, 2015; BORILLE, 2009; KNOFIUS; HEIJDEN; ZIJM, 2016).

Característica	Un.	Descrição
Material	-	Tipo de material
Densidade	g/mm ³	Densidade do material
Volume de impressão	mm ³	Volume do componente
Peso	kg	Peso do componente

Tabela 9 – Características técnicas da máquina de impressão 3D (Adaptado de ZAMAN *et al.*, 2018; MANCANARES *et al.*, 2015; BORILLE, 2009; KNOFIUS; HEIJDEN; ZIJM, 2016).

Característica	Un.	Descrição
Método	-	Processo de fabricação de impressão 3D
Fabricante	-	Nome do fabricante
Modelo	-	Nome do modelo da máquina
Materiais compatíveis	-	Lista de materiais compatíveis
Potência	W	Potência elétrica utilizada na impressão
Volume de impressão	mm ³	Envelope de impressão da máquina

3.2 Análise Detalhada

Após o componente ter sido aprovado nos critérios da análise preliminar, é aplicado o método AHP para uma análise mais detalhada. Para que o componente seja um candidato, não basta somente ser possível sua fabricação por impressão 3D. Em diversos casos, pode ser que a melhor solução de compromisso seja que o componente seja fabricado por processos convencionais. O objetivo da análise detalhada é concluir se, para o componente avaliado, a impressão 3D fornece uma solução de atendimento em ABDR mais vantajosa que os processos convencionais. Para isto, três critérios são utilizados que buscam descrever dentro de um escopo RAMS a seleção, como segue:

- Tempo de atendimento. A ênfase em velocidade e retornar rapidamente a aeronave ao combate são valores primários dentro da filosofia de ABDR. Comparar o tempo de atendimento da demanda por uma peça de reposição é relevante na seleção de candidatos. O tempo de atendimento na impressão 3D é o tempo de fabricação do componente, já que o componente é fabricado no local de consumo. Para os processos tradicionais, o memorial de cálculo vai depender da situação. Caso seja um reparo temporário em que o remendo emergencial é feito no local também com processos de estamaria, por exemplo, o tempo de atendimento também é somente o tempo de fabricação. No entanto, no cenário de falta de um item no estoque da base instalada em local remoto, o tempo de atendimento compreende o período total desde o processamento do pedido, tempo de trânsito até a entrega do item no local de consumo;
- Nível de restauração. De acordo com a filosofia de ABDR, reparos temporários podem ser aplicados, não retornando o sistema danificado à sua capacidade original

de combate. Com a maior facilidade de customização da produção com a impressão 3D, infere-se a possibilidade de que reparos temporários se aproximem mais em restaurar à capacidade original do que em processos convencionais, gerando ganhos em relação à segurança de voo. Esta lógica se aplica principalmente quando se faz necessário a fabricação de remendos emergenciais na fuselagem, por exemplo, que foi atingida por um projétil. Em reparos em que ocorre a substituição do componente danificado por um novo, infere-se que o nível de restauração é 100%, já que a capacidade original do sistema é atingida. Neste último caso, este critério tem igual importância relativa entre processos de impressão 3D e convencionais de fabricação.

- Custo de atendimento. A lógica para o custo de atendimento é análoga ao tempo de atendimento. Na impressão 3D, o custo de atendimento é o custo total de fabricação do componente. Nos processos tradicionais novamente vai depender a situação. Em caso de falta de item no estoque, o custo de atendimento compreende o custo total deste o processamento do pedido, custo de aquisição e frete até o local de consumo.

A estrutura hierárquica AHP do modelo proposto é formada pelo nível de critérios e de alternativas (Figura 20). Os julgamentos para definição de preferências entre critérios e alternativas é realizada *top to down* na estrutura AHP (no caso da Figura 20, da esquerda para direita). Primeiro é medido a importância relativa dos critérios em relação ao objetivo da análise para definição do peso de cada critério na decisão. Em seguida, a importância relativa das alternativas em relação a cada critério é feita. Os julgamentos consistem de comparações sempre realizadas em pares seguindo a escala relativa de importância (Tabela 4), simplificada na Tabela 10. Após ter sido calculado localmente a importância relativa de cada critério e alternativa, é feita a agregação global dos resultados por meio de uma multiplicação de matrizes.

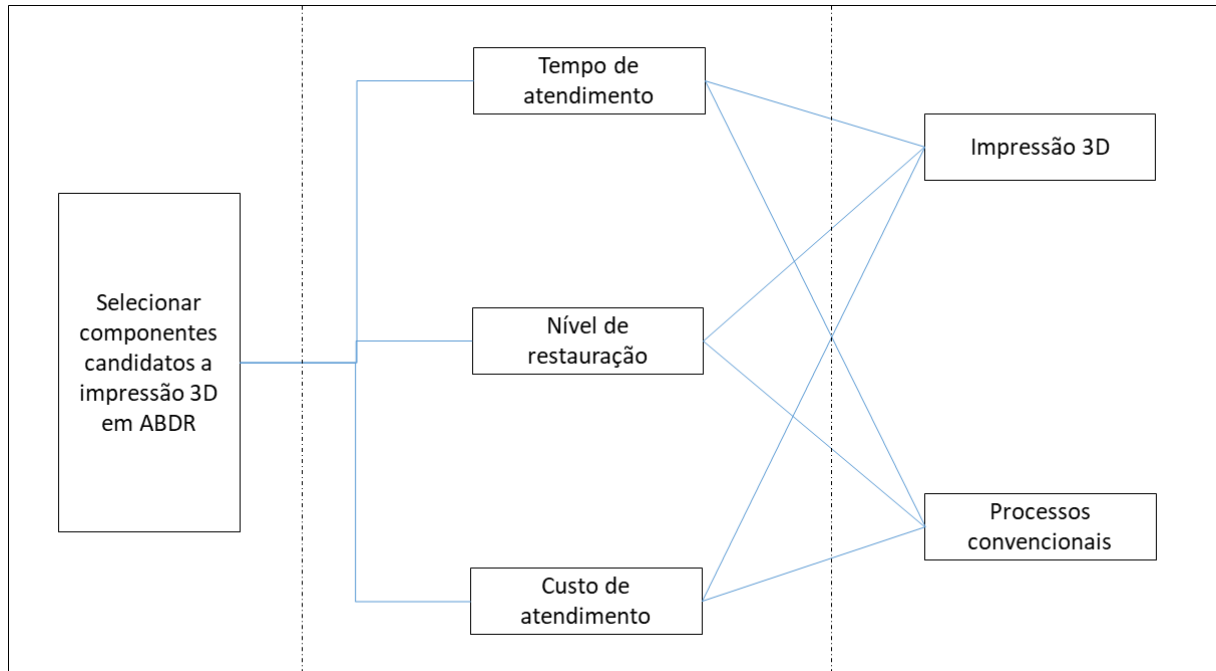


Figura 20 – Estrutura AHP do modelo proposto.

Tabela 10 – Escala de importância relativa da metodologia AHP simplificada (Adaptado de SAATY, 1987; SAATY, 1990).

Escala de preferência	Escala absoluta	Recíproco
Extrema	9	1/9
Muito forte	7	1/7
Forte	5	1/5
Moderada	3	1/3
Igualdade	1	1
Valores intermediários	8,6,4,2	1/8, 1/6, 1/4, 1/2

4 Aplicação da Metodologia

Este Capítulo aplica a metodologia proposta em estudos de caso de hipotético e explora os resultados encontrados. Os julgamentos e considerações utilizadas são do próprio autor. O objetivo principal deste Capítulo é demonstrar o funcionamento do processo. Devido às restrições e dificuldades de acesso as informações, não foi possível encontrar dados de componentes aeronáuticos de aeronaves militares para aplicar a metodologia.

4.1 Estudo de Caso

Como considerações iniciais para análise, tem-se:

- A peça analisada é o suporte para içamento de motores da GE, também conhecido como *bearing bracket*. Apesar de não ser um componente de uma aeronave de combate, o suporte é considerado aqui como peça fictícia para ABDR para que possa ser utilizada como estudo de caso para demonstrar a metodologia. Além disso, modelos CAD são disponibilizados na internet, possibilitando o acesso aos dados para a análise;
- O ponto de consumo se encontra em uma base instalada a 500 km de distância do centro de distribuição mais próximo, com acesso rodoviário em estrada não-pavimentada;
- Não se tem este item no estoque da base instalada remotamente;
- Na alternativa de processos convencionais, o suprimento do item é realizado pelo envio do item pelo centro de distribuição mais próximo por meio de caminhão;
- Há uma impressora 3D instalada no posto avançado, em que a peça é fabricada localmente e sob demanda.

Seguindo-se o processo da Figura 19, tem-se:

- 1) Levantar as características do componente. As dimensões do componente analisado estão mostradas na Figura 21. Na Tabela 11 é descrito os parâmetros do componente necessários para a análise preliminar e detalhada. O custo por quilograma do material foi estimado através de cotações encontradas na internet;

- 2) Selecionar método de impressão 3D. O método de impressão 3D escolhido é o SLM, compatível para fabricação do componente analisado;
- 3) Selecionar máquina de impressão 3D. Para a máquina de impressão 3D foi escolhida o modelo M 290 da fabricante EOS;
- 4) Levantar as características da máquina. As características técnicas da máquina de impressão 3D EOS M 290 são descritas na Tabela 12;
- 5) Máquina atende ao critério “material do reparo”? Segundo o fabricante EOS, o modelo M290 consegue fabricar componentes na liga de titânio Ti-6Al-4V. Logo, a máquina atende ao critério “material do componente”;
- 6) Máquina atende ao critério “volume de impressão do reparo”? Analisando as dimensões máximas do componente mostradas na Figura 21 e o volume de impressão da máquina na Tabela 12, infere-se que a impressora 3D consegue fabricar componentes deste tamanho;

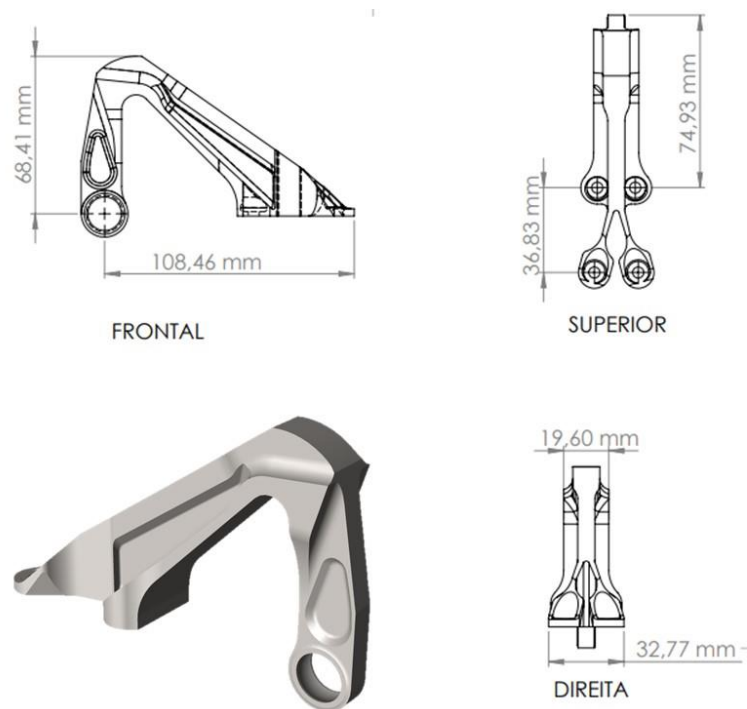


Figura 21 – Suporte para içamento de motores a jato GE (Adaptado de NIKOL, 2016).

Tabela 11 – Características técnicas do suporte para içamento.

Característica	Un.	Descrição
Material	-	Ti-6Al-4V
Densidade	g/mm ³	0,00443
Volume de impressão	mm ³	28.084
Peso	kg	0,1244

Tabela 12 – Características técnicas da máquina de impressão 3D (EOS, 2019).

Característica	Un.	Descrição
Método	-	SLM
Fabricante	-	EOS
Modelo	-	M290
Materiais compatíveis	-	Ligas de alumínio, titânio, aço
Potência	W	400
Volume de impressão	mm ³	(250 x 250 x 325)

- 7) Modelar estrutura da hierarquia AHP. Ver Figura 20;
- 8) Calcular o peso de cada critério. Os pesos dos critérios foram mensurados baseando-se na consideração de que o tempo de atendimento tem maior relevância, seguido do nível de restauração e custo de atendimento, respectivamente. Os julgamentos qualitativos foram realizados seguindo-se a escala padrão (Tabela 10). Na Tabela 13 estão descritos os julgamentos realizados e a escala de importância de cada critério.

Tabela 13 – Escala de importância dos critérios.

	Tempo de atendimento	Nível de restauração	Custo de atendimento	Autovetor Normalizado
Tempo de atendimento	1	3	5	0,64
Nível de restauração	1/3	1	3	0,26
Custo de atendimento	1/5	1/3	1	0,10
	$\lambda_{\max} = 3,04$	CI = 0,02	CR = 4%	

- 9) Calcular nível de preferência localmente em cada critério.

a. Tempo de atendimento.

O tempo de atendimento para a impressão 3D é o tempo de fabricação do componente mais o material de suporte pela EOS M290. Para a alternativa convencional, o tempo de atendimento é o tempo de processamento do pedido mais o tempo mais o tempo de entrega pelo centro de distribuição mais próximo. Os parâmetros e resultados estão descritos na. Para ambas alternativas, o tempo de substituição da peça danificada pela nova é considerado o mesmo, não sendo, assim, uma variável para o problema.

O tempo de fabricação da impressora 3D foi simulado através do software “Netfabb – student version”. O tempo de fabricação simulado foi de aproximadamente 8 horas e 28

minutos. Para o cálculo do tempo de atendimento pelo processo convencional, é arbitrado que o caminhão que faz a entrega viaja a uma velocidade média de 40 km/h, devido as condições da via. O tempo de processamento é arbitrado em 2h, correspondendo desde o instante em que o posto avançado solicita o item até o centro de distribuição embarcar o item (Tabela 14).

Tabela 14 – Tempo de atendimento e parâmetros.

EOS M290			Processo convencional		
Tempo de fabricação	08,47	h	Tempo de processamento (arbitrado)	2,0	h
Potência do laser	400	W	Tempo trânsito	12,5	h
Diâmetro do laser	0,1	mm	Tempo de atendimento	14,5	h
Espessura da camada	0,1	mm	Velocidade média do caminhão (arbitrado)	40	km/h
Velocidade do laser	1500	mm/s	Distância	500	km

Tabela 15 – Nível de preferência no critério “tempo de atendimento”.

Tempo de atendimento	Tempo total	Harmonização	Normalização
EOS M290	8,47	2,71	0,63
Processo convencional	14,50	1,58	0,37

b. Nível de restauração

Devido à subjetividade de como se mensurar o nível de restauração, este se torna um critério difícil de ser avaliado. Para fins demonstrativos, faz-se a consideração de que a peça fabricada por processos convencionais possui uma preferência relativa moderada em relação à EOS M290, acerca do critério nível de restauração (Tabela 16).

Tabela 16 – Nível de preferência no critério “nível de restauração”.

Nível de restauração	EOS M290	Processo convencional	Autovetor Normalizado
EOS M290	1	1/3	0,25
Processo convencional	3	1	0,75
	$\lambda_{\max} = 2,0$	CI = 0	CR = 0%

c. Custo de atendimento

De forma análoga ao realizado no critério “tempo de atendimento” é feita a comparação dos custos de atendimento por impressão 3D e processos convencionais dentro do cenário considerado. Para atendimento da demanda pela EOS M290, o custo total é considerado como sendo somente os custos variáveis de fabricação do componente. Para o atendimento por processo convencional, o custo total é o custo unitário de aquisição da peça somado com os custos com transporte para se entregar o componente no ponto de consumo.

O custo de fabricação pela EOS M290 é aproximado em R\$ 6.300,00. Este é o valor encontrado pela fabricação experimental de um *bracket* semelhante no trabalho de Silva (2016). De forma semelhante, Silva (2016) estimou que o custo da fabricação do componente por usinagem é de aproximadamente R\$ 3.600,00.

Para o cálculo do custo com transporte, considera-se que o custo com combustível representa 40% do valor total do frete. Esta é uma consideração prática na indústria de transporte rodoviário para base inicial de negociações de tarifas. Os cálculos de custos totais para cada alternativa são mostrados na Tabela 17, enquanto o nível de preferência do critério é mostrado na Tabela 18

Tabela 17 – Custo total de atendimento por impressão 3D e processo convencional.

	Un.	Descrição
Premissas		
Preço do diesel S10	R\$/l	3,67 (ANP, 2020)
Consumo caminhão	km/l	3,67 (arbitrado)
Distância	km	500
Peso do diesel no custo total de frete	%	40% (arbitrado)
EOS M290		
Custo de fabricação	R\$	6.300,00
Processo convencional		
Custo de fabricação	R\$	3.600,00
Custo com frete	R\$	1.541,67
Custo total	R\$	5.141,67

Tabela 18 – Nível de preferência no critério “custo”.

Custo	Custo total	Harmonização	Normalização
EOS M290	R\$ 6.300,00	1,82	0,45
Processo convencional	R\$ 5.141,67	2,26	0,55

10) Calcular nível de preferência global.

A agregação global dos resultados é feita pela multiplicação de matrizes entre o autovetor normalizado dos critérios pela matriz formada pelos níveis de preferências locais dos critérios, resultando no vetor decisão (Tabela 19).

Tabela 19 – Agregação global de preferências.

Peso do Critério	0,64	0,26	0,10	
	Tempo de atendimento	Nível de restauração	Custo de atendimento	Vetor decisão
EOS M290	0,63	0,25	0,45	0,51
Processo Convencional	0,37	0,75	0,55	0,49

11) Pontuação da alternativa de impressão 3D maior que processos convencionais?

A partir da agregação global de preferências, conclui-se que, apesar do resultado próximo, a impressão 3D do componente avaliado para atendimento dentro do cenário idealizado é mais preferível que por processos convencionais.

4.2 Discussão dos Resultados

A aplicação da metodologia no estudo de caso hipotético demonstra a importância de se levar em conta aspectos de logística na análise. Os três critérios escolhidos na hierarquia AHP buscaram avaliar a potencialidade do candidato ser fabricado por impressão 3D, sob uma ótica de RAMS. A matriz de julgamentos para a definição dos pesos de cada critério foi construída baseado nas características principais de ABDR: retornar a aeronave rapidamente ao cumprimento das missões com a máxima capacidade de combate possível. O custo, apesar de importante e limitador em muitos casos, foi considerado em menor importância na análise. O resultado de CR igual a 4% indica que os julgamentos de dominância entre os critérios foram consistentes. Caso o resultado tivesse sido maior que 10%, indicaria inconsistência na matriz de julgamentos.

No estudo de caso é considerado que a máquinas de impressão 3D fabrique o material original do componente. No entanto, isso não é uma obrigatoriedade dentro de um contexto de ABDR. Imagine a situação em que o projétil atinja o dorso da fuselagem da aeronave e deixando vulnerável os sistemas internos e afetando a aerodinâmica e que tenha uma máquina de impressão 3D com o método FDM na base. Nesse caso, não é possível produzir peças com o mesmo material da fuselagem, geralmente feito de materiais compósitos, como fibra de vidro. No entanto, um remendo feito de plástico com a tecnologia FDM pode ser suficiente para que a aeronave prossiga na missão, ou viaje para instalações mais equipadas para prosseguir com reparos permanentes. Todos esses possíveis cenários de falhas e equipamentos disponíveis devem ser simulados previamente, objetivando que a tomada de decisão no ambiente de combate seja a mais ágil e intuitiva possível.

Através da variação da preferência de impressão 3D em cada critério, um de cada vez, deixando os outros dois critérios constantes, é possível visualizar o impacto que cada critério causa no resultado de preferência global (Figura 22, Figura 23 e Figura 24). Os *break even points* para tempo de atendimento, nível de restauração e custo de atendimento são alcançados, respectivamente, em 0,61, 0,19 e 0,32.

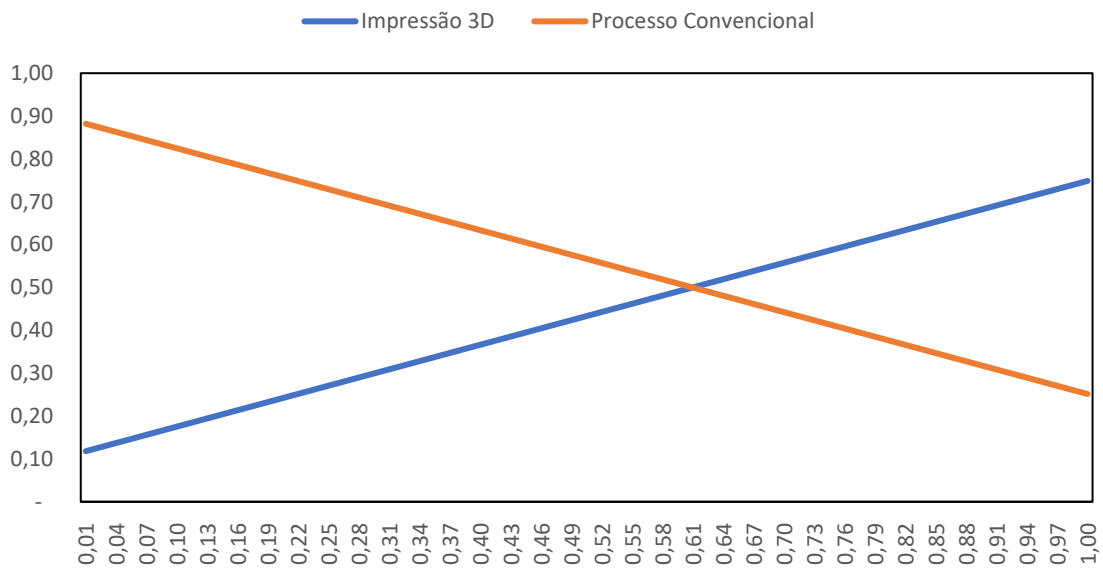


Figura 22 – Análise de sensibilidade do nível de atratividade global da impressão 3D variando o critério “tempo de atendimento”.

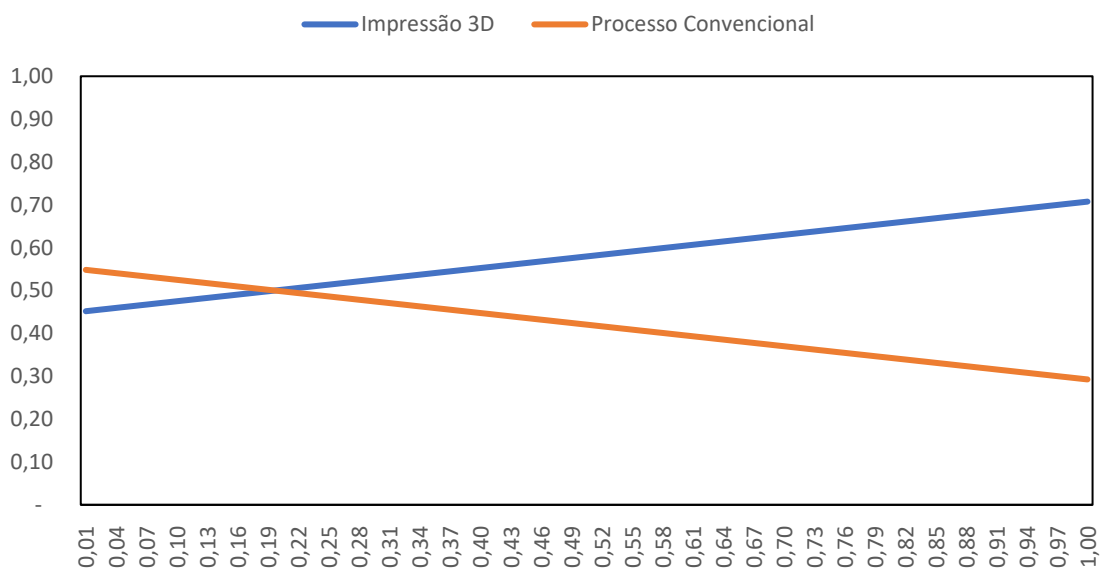


Figura 23 – Análise de sensibilidade do nível de atratividade global da impressão 3D variando o critério “nível de restauração”.

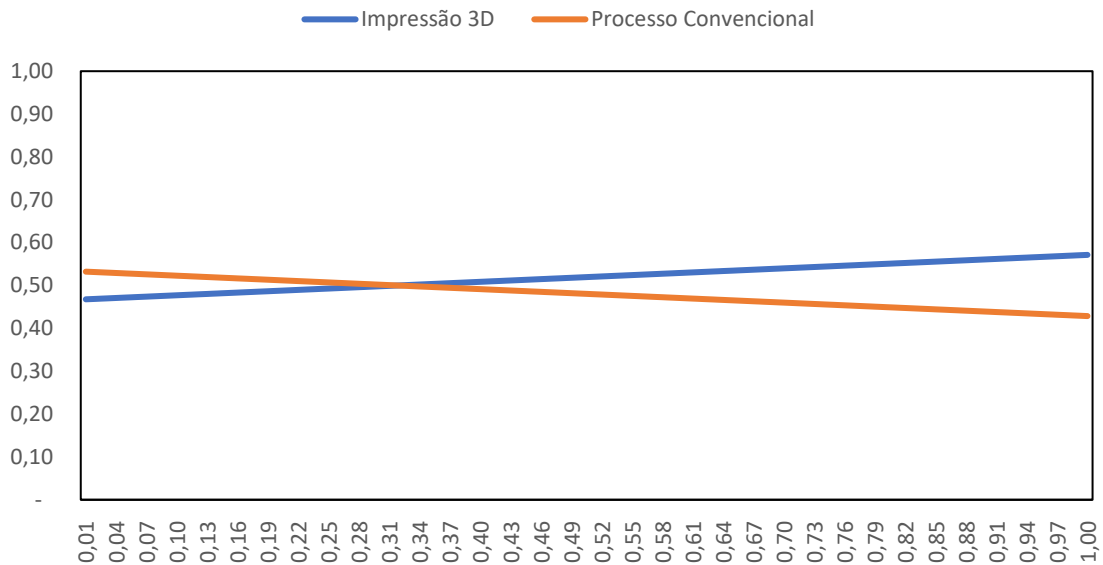


Figura 24 – Análise de sensibilidade do nível de atratividade global da impressão 3D variando o critério “custo de atendimento”.

Apesar do peso do critério custo de atendimento ter sido o menor, seu *break even point* é mais distante que o nível de restauração, que possui um peso maior no estudo de caso. Isso deve-se pelo fato de que o tempo de atendimento e o custo de atendimento terem uma parcela fixa e uma parcela variável. A distância entre a base instalada em local remoto e o centro de distribuição mais próximo tem forte influência nos resultados de preferência locais nos critérios “tempo de atendimento” e “custo de atendimento”. A Figura 25 mostra a simulação dos níveis de preferência locais e global da impressão 3D em função da distância de atendimento, com as considerações realizadas no estudo de caso. Os níveis de preferência em “tempo de atendimento” e “custo de atendimento” possui relação de proporcionalidade direta com a distância, enquanto o nível de restauração não sofre qualquer influência. Como esperado, a preferência global da impressão 3D do componente também aumenta com o aumento da distância. Pela Figura 25, o atendimento da demanda por impressão 3D é preferível a partir de aproximadamente 450 km de distância, dentro das considerações realizadas no estudo de caso. Logo, conclui-se que o uso da tecnologia de impressão 3D em ABDR tem maior potencial quanto mais remota for a localização da base instalada.

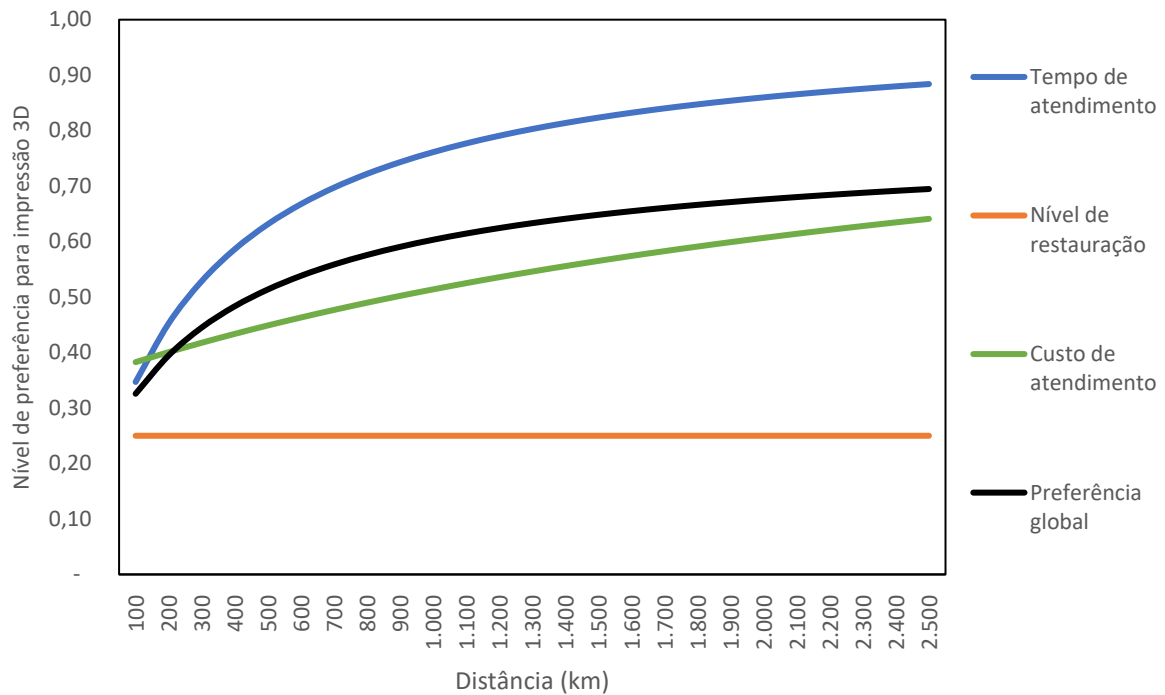


Figura 25 – Variação dos níveis de preferência locais e global com a distância de atendimento.

A Figura 25 foi construída na consideração de que o atendimento no processo convencional seja feito por um caminhão. Esta modalidade só faz sentido se a ocupação máxima do caminhão seja conseguida, formando-se uma carga fracionada com outros itens de suprimentos. Há outras formas de transportar o item solicitado, tais como carro, motocicleta, avião, barco ou até mesmo drone. O custo variável de transporte pode ser padronizado em \$/km. Para diferentes modais de transporte, existem diferentes custos variáveis. A Figura 26 mostra o nível global de preferência por impressão 3D quando o atendimento é feito por um caminhão (estudo de caso), uma picape, uma motocicleta e um Cessna 208, este último presente na frota da Força Aérea Brasileira (FAB). Os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 20.

Tabela 20 – Custo total de atendimento por impressão 3D e processo convencional.

	Un.	Caminhão Truck	Picape	Motocicleta	Cessna 208
Combustível		Diesel S10	Diesel S10	Gasolina comum	Querosene de aviação
Preço do combustível (ANP, 2020)	R\$/l	3,67	3,67	4,37	3,00
Consumo	km/l	3,00	10,00	25,00	1,65
Peso do combustível no custo total de frete	%	40	40	40	0,40
Velocidade média/ velocidade de cruzeiro (arbitrado)	km/h	40	50	60	340
Alcance da aeronave	km	-	-	-	1.980
Capacidade dos tanques da aeronave	l	-	-	-	1.200
Custo de fabricação (impressão 3D)	R\$	6.300	6.300	6.300	6.300
Custo de fabricação (convencional)	R\$	3.600	3.600	3.600	3.600
Tempo de fabricação (impressão 3D)	h	8,47	8,47	8,47	8,47
Tempo de processamento (convencional)	h	2,00	2,00	2,00	2,00

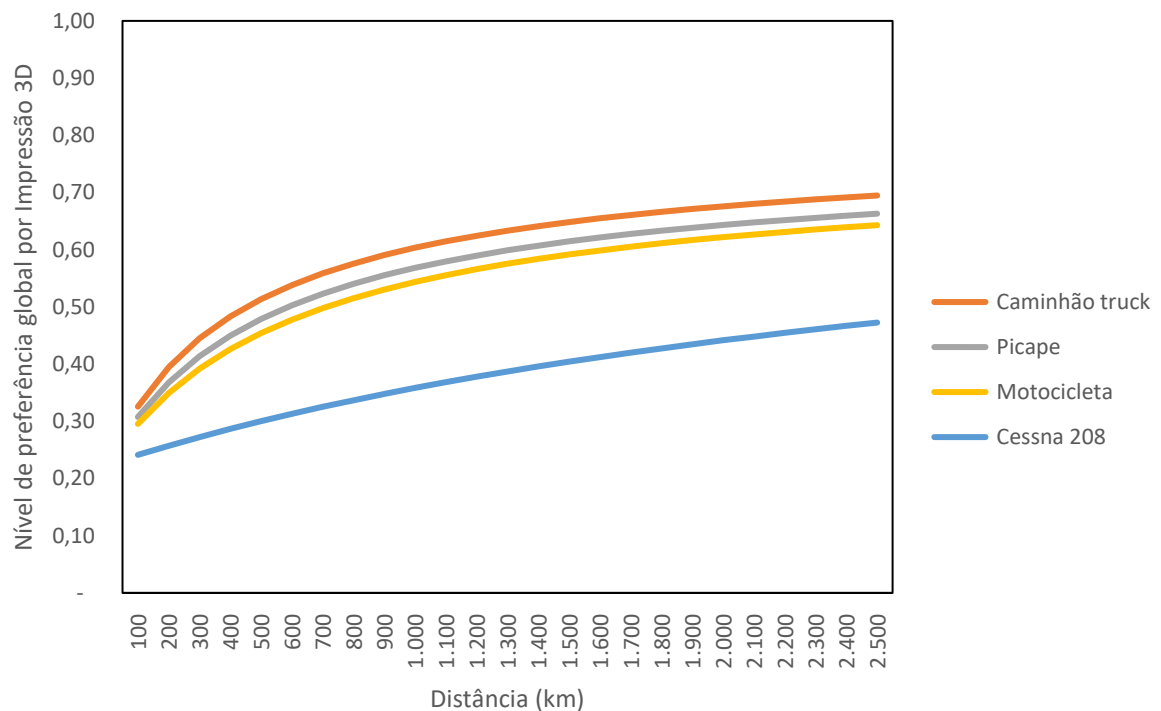


Figura 26 – Variação dos níveis de preferência global por impressão 3D em diferentes modais de atendimento.

5 Conclusão

A pesquisa reportada neste trabalho explorou os potenciais impactos do uso da impressão 3D na suportabilidade logística de sistemas complexos aeronáuticos em ABDR, além de desenvolver um processo de seleção de componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3D.

Uma abordagem sobre as diferentes tecnologias de impressão 3D, além de sua presença no setor aeroespacial foram exploradas. Geometrias complexas com integração de funcionalidades, produção de pequenos lotes e *buy to fly ratio* são características importantes dos componentes aeronáuticos que contribuem para que a impressão 3D seja uma alternativa de processo de fabricação. Mesmo com a presença cada vez maior na indústria aeroespacial, a impressão 3D ainda é utilizada principalmente em componentes, em geral, de baixa criticidade. No entanto, fabricantes de motores aeronáuticos estão na vanguarda da aplicabilidade de impressão 3D, já construindo peças que podem ser consideradas mais críticas ao funcionamento dos sistemas e à segurança de voo. A indefinição de orientações pelas autoridades aeronáuticas sobre a certificação do uso e fabricação de componentes por impressão 3D ainda é uma das principais barreiras que esta tecnologia deve superar para o avanço na aviação.

Uma abordagem geral sobre conceitos básicos de gerenciamento de estoques foi mostrada, que se fazem necessários para o melhor entendimento do contexto no restante da dissertação, principalmente para leitores não familiarizados com o tema. Em seguida, mostrou-se os possíveis impactos da impressão 3D na cadeia de suprimentos aeronáutica, sobretudo no fornecimento de peças de reposição. A possibilidade de digitalização do fornecimento de peças de reposição tem potencial em contribuir para simplificar a complexa cadeia de suprimentos aeronáutica. As capacidades de produção sob demanda, distribuída e customizada da impressão 3D podem ser consideradas como os principais fatores que contribuem para esta simplificação logística. Em seguida, foi abordado como estas características podem contribuir para otimização operacional de aeronaves em ambiente de combate. Redução do tempo de reparo, redução dos níveis de estoque, redução do risco de indisponibilidade, redução de custos operacionais e aumento da segurança de voo foram elencados como os principais potenciais impactos resultantes da aplicação de impressão 3D em um contexto de ABDR.

Tendo-se como base a revisão da literatura e utilizando o *Web of Science* para encontrar as publicações que tenham relação com a dissertação foi desenvolvido o processo de seleção

proposto nesta dissertação. O modelo proposto busca saber se para um certo componente aeronáutico é viável sua fabricação por impressão 3D, no contexto de ABDR, através da integração de aspectos tecnológicos e logísticos na análise. Para isso, um processo baseado em múltiplos critérios utilizou-se de uma análise preliminar com fatores restritivos tecnológicos seguido de uma análise detalhada com o método AHP. Tempo de atendimento, nível de restauração e custo de atendimento foram os critérios utilizados na análise detalhada AHP. Componentes aeronáuticos de geometrias complexas, de pequeno tamanho, com elevado valor agregado, de baixo/médio nível de criticidade à segurança de voo, com alta incerteza na previsão de demanda e pouco solicitados tendem a ser mais candidatos a serem fabricados por impressão 3D em ABDR.

A partir do que foi pesquisado, conclui-se que a integração de aspectos tecnológicos e de suportabilidade logística de sistemas complexos são necessários na seleção de componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3D em ABDR. A abordagem de seleção levando-se em conta somente aspectos tecnológicos traz consigo o risco de que dificuldades quanto a maturidade do sistema complexo em termos de RAMS apareçam durante a operação da aeronave. Com isso, entende-se que a inserção de impressão 3D na suportabilidade logística tem potencial de ser mais eficiente quando já for incorporado tal tecnologia desde as fases iniciais do ciclo de vida dos sistemas complexos de defesa.

5.1 Propostas de Desenvolvimentos Futuros

Em relação a literatura, esta dissertação contribui com um modelo que integra aspectos tecnológicos e de suportabilidade logística; esta última uma característica pouco explorada nos trabalhos encontrados na comunidade científica. O modelo desenvolvido tem potencial de ser adaptado e utilizado em outros sistemas de defesa, tais como componentes de veículos terrestres e aquáticos de combate. Além disso, o modelo proposto tem também potencial em ser utilizado no âmbito da aviação civil.

Como desenvolvimentos futuros, a adaptação e otimização do modelo desta dissertação para aplicações não-aeronáuticas de combate e para suportabilidade logística na aviação civil podem ser exploradas.

Uma das limitações da dissertação se encontra na definição dos pesos dos critérios na análise somente de forma demonstrativa no estudo de caso. Além disso, os memoriais de cálculo para tempos e custos de atendimento foram simplificados. Aplicar uma metodologia que utilize

de opiniões de um conselho de especialistas para a definição dos pesos dos critérios e de um memorial de cálculo para as preferências locais mais detalhado pode ser explorado futuramente para tornar o modelo de seleção mais robusto e adaptável para uma gama maior de cenários possíveis.

Referências

- 3D-PRINTING-EXPERT. **Different types of 3D printing methods for 3D printers**. 2019. Disponível em: <<http://3d-printing-expert.com/different-types-of-3d-printing-for-3d-printers/>>. Acesso em: 22 June 2019.
- ABRAHÃO, F. T. M. **Recommendations for the brazilians air force aircraft battle damage repair program**. Ohio: Air Force Institute of Technology. 1998, p. 132.
- ABRAHÃO, F. T. M.; MATA FILHO, J. N.; MESQUITA, A. C. P. Development of the aerologlabtooL[®]. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 19., 2019, Rio de Janeiro, RJ. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Centro de Análises de Sistemas Navais, 2019.
- ANP. **Série histórica do levantamento de preços e de margens de comercialização de combustíveis**. 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/levantamento-de-precos/serie-historica-do-levantamento-de-precos-e-de-margens-de-comercializacao-de-combustiveis>>. Acesso em: 22 mar. 2020.
- ASD/AIA. **SX000i international guide for the use of S-Series integrated logistics support (ILS) specifications**. Brussels. 2018, p. 147.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. 5^a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- BERGER, R. **Additive manufacturing in aerospace and defense**. [S.l.]: Roland Berger. 2017, p. 37.
- BOEING. **Boeing 787 dreamliner composition by major componente**. 2010. Disponível em: <https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html>. Acesso em: 7 Julho 2018.
- BORILLE, A. V. **Decision support method to apply Additive Manufacturing Technologies for plastic components in the aircraft industry**. 2009. 174f. Tese (Doutorado em Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.
- C3 PLASTIC DESIGN. **Stereolithography process (SLA)**. 2019. Disponível em: <<http://c3plasticdesign.co.uk/stereolithography-process.html>>. Acesso em: 21 Jun. 2019.
- COLUMBUS, L. **2015 roundup Of 3D printing market forecasts and estimates**. 2013. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2015/03/31/2015-roundup-of-3d-printing-market-forecasts-and-estimates/#318aa50c1b30>>. Acesso em: 30 set. 2019.
- COYKENDALL, J. *et al.* **3D opportunity in aerospace and defense: additive manufacturing takes flight**. London: Deloitte University Press. 2014, p. 28.
- CRUZ, M. F.; BORILLE, A. V. Decision methods application to compare conventional manufacturing process with metal additive manufacturing process in the aerospace industry. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 39, n. 1, p. 177-193, Janeiro 2017.

DDDROP. dddrop. **What are the advantages of the FDM technology?** 2018. Disponível em:<www.dddrop.com/fdm-technology/>. Acesso em: 21 jun. 2019.

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER, G.; NORONHA, S. **Apoio à decisão - metodologias para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas**. 1ª. ed. Florianópolis: Editora Insular, 2001.

EOS. **EOS M 290**. 2019. Disponível em:<<https://www.eos.info/eos-m290>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

ETMM. **A world first: additively manufactured titanium components now onboard the Airbus A350 XWB**. 2014. Disponível em:<<https://www.etmm-online.com/a-world-first-additively-manufactured-titanium-components-now-onboard-the-airbus-a350-xwb-a-486310/>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY - EASA. **Additive manufacturing**, 2019. Disponível em:<<https://www.easa.europa.eu/>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

FELDMANN, C.; PUMPE, A. A holistic decision framework for 3D printing investments in global supply chains. **Transportation Research Procedia**, n. 25, p. 677-694, Julho 2017.

GEHRKE, F. **3D printed bunny holds information encoded in DNA to copy itself**. December 2019. Disponível em:<https://all3dp.com/4/3d-printed-bunny-holds-information-encoded-in-dna-to-copy-itself/?omhide=true&utm_source=Newsletter&utm_campaign=71c83ba38c-Newsletter&utm_medium=email&utm_term=0_9dffeeddae-71c83ba38c-401579765>. Acesso em: 13 dez. 2019.

GHADGE, A. *et al.* Impact of additive manufacturing on aircraft supply chain performance: A system dynamics approach. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Endinburgh, v. 29, n. 5, p. 856-865, Fevereiro 2018.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing**. 2ª. ed. Nova York: Springer, 2015.

GLOBAL SECURITY. **F-22 raptor materials and processes**. 2016. Disponível em:<<https://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/f-22-mp.htm>>. Acesso em: 12 out. 2019.

HOLCOMB, D. H. **Aircraft battle damage repair for the 90s and beyond**. Alabama: Air University. 1994, p. 55.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 6ª. ed. New Jersey: Pearson, 2010.

KELLNER, T. The FAA cleared the first 3D printed part to fly in a commercial jet engine from GE. April 2015. Disponível em:<<https://www.ge.com/reports/post/116402870270/the-faa-cleared-the-first-3d-printed-part-to-fly-2/>>. Acesso em: 7 jul. 2018.

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

KNOFIUS, N.; HEIJDEN, M. C. V. D.; ZIJM, W. H. M. Selecting parts for additive manufacturing in service logistics. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 27, n. 7, p. 915-931, September 2016.

KUMAR, L.; NAIR, C. Current trends of additive manufacturing in the aerospace industry. In: D. I. WIMPENNY; P. M. PANDEY; L. J. KUMAR (Ed.) **Advances in 3D printing & additive manufacturing technologies**. New York: Springer, 2017, p. 39-54.

LOUIS, M. J.; SEYMOUR, T.; JOYCE, J. **3D opportunity in the department of defense: additive manufacturing fires up**. London: Deloitte University Press. 2014, p. 28.

MANCANARES, C. G. *et al.* Additive manufacturing process selection based on parts' selection criteria. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 80, n. 5-8, p. 1007-1014, Setembro 2015.

MERLIN. **Project outline**. 2013. Disponível em: <<http://www.merlin-project.eu/project/index.jsp>>. Acesso em: 02 nov. 2019.

MYLES, A. J. *et al.* An introduction to decision tree modeling. **Journal of Chemometrics**, n. 18, p. 275-285, Setembro 2004.

NGO, T. D. *et al.* Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B**, v. 143, p. 172-196, 2018.

NIKOL, I. **ALCOA bracket (BRCT 12a) correction**. February 2016. Disponível em: <<https://grabcad.com/library/alcoa-bracket-brct-12a-correction-1>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

NOORANI, R. **3D printing - technology, applications, and selection**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

OETTMEIER, K.; HOFMANN, E. Impact of additive manufacturing technology adoption on supply chain management processes and components. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 27, n. 7, p. 944-968, junho 2016.

PROTOFAST. **Fotopolimerização - Vat**: photopolymerization (SLA e DLP). Setembro 2014. Disponível em: <<http://protofast.com.br/blog/2014/09/04/vat-photopolymerization-sla-e-dlp/>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process - what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, p. 161-176, 1987.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, p. 9-26, Novembro 1990.

SILVA, S. B. D. **Modelagem da integração das tecnologias RFID e manufatura aditiva no gerenciamento de estoques**: uma aplicação aeronáutica. 2016. 164f. Tese (Doutorado em Produção) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2016.

SILVA, S. B.; CORREIA, A. R. Análise multicritério para seleção de componentes aeronáuticos candidatos ao processo de manufatura aditiva em titânio. In: XIX SIMPÓSIO DE

APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA, 2017, 19., São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: ITA/SIGE, Setembro 2017.

SINGAMNENI, S. *et al.* Additive manufacturing for the aircraft industry: a review. **Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering**, v. 8, n. 215, Fevereiro 2019.

SRULL, D. W.; WALLICK, D. J.; KAPLAN, B. J. **Battle damage repair**: an effective force multiplier. Bethesda: Logistics Management Institute. 1991, p. 10.

STAPELBERG, R. F. **Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design**. 1a. ed. London: Springer-Verlag, 2009.

STRATASYS. **Deep space with humans on board**: new material enables 3D printed parts on orion. 2018. Disponível em: <<https://www.stratasys.com/resources/search/case-studies/lockheed-martin>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

STRATASYS. **NASA's human-supporting rover has FDM parts**. 2015. Disponível em: <<https://www.stratasys.com/resources/search/case-studies/nasa>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

UNITED STATES. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **Additive manufacturing in maintenance, preventive maintenance, and alteration of aircraft, aircraft engines, propellers, and appliances**. Washington, DC: FAA. 2016, p.4.

UNITED STATES. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **Regulation and guidelines**. Washington, DC: FAA, 2019. Disponível em: <<https://www.faa.gov/>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

VARGAS, L. G. An overview of the analytic hierarchy process and its applications. **European Journal of Operational Research**, v. 48, p. 2-8, Novembro 1990.

ZAMAN, U. K. U. *et al.* Integrated product-process design: material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 51, p. 169-180, Junho 2018.

