

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**João Francisco Bueno Gomes**

**ESTUDO, SIMULAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE  
TRENS DE POUSO DE AERONAVES INTEGRADOS  
VIA MANUFATURA ADITIVA**

**Taubaté – SP**  
**2020**

**João Francisco Bueno Gomes**

**ESTUDO, SIMULAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE TRENS  
DE POUSO DE AERONAVES INTEGRADOS VIA  
MANUFATURA ADITIVA**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo curso de Mestrado do Departamento de Engenharia da Universidade de Taubaté.  
Área de Concentração: Energia & Materiais  
Orientador: Prof. Dr. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa

**Taubaté – SP**

**2020**

**JOÃO FRANCISCO BUENO GOMES**  
**ESTUDO, SIMULAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE TRENS DE POUSO DE**  
**AERONAVES INTEGRADOS VIA MANUFATURA ADITIVA**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo curso de Mestrado do Departamento de Engenharia da Universidade de Taubaté.  
Área de Concentração: Energia & Materiais  
Orientador: Prof. Dr. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa

Data: 15 de outubro de 2020


Resultado: APROVADO

**BANCA EXAMINADORA**

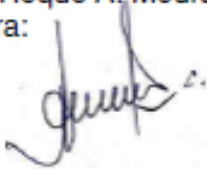
Prof. Dr. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa - Orientador Universidade de Taubaté

Assinatura: 

Prof. Dr. José Rubens de Camargo - Membro Interno Universidade de Taubaté

Assinatura: 

Prof. Dr. Roque A. Moura - Membro Externo FATEC-SJC

Assinatura: 

**SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU**

G633e Gomes, João Francisco Bueno  
Estudo, simulação e desenvolvimento de trens de pouso de aeronaves integrados via manufatura aditiva / João Francisco Bueno Gomes. -- 2020.  
129 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Manufatura aditiva em metais. 2. Trens de pouso de aeronaves. 3. Protótipos. 4. Peças integradas. 5. Simulação CFD. I. Mestrado em Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD – 629.13

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995



Dedico esta pesquisa aos meus colegas de curso, aos meus familiares e em especial aos professores da UNITAU.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, nosso supremo criador, aos meus pais, minha esposa, minha irmã e sobrinhos, meus cunhados, a todos que contribuíram na minha formação e em especial ao professor Dr. Filipe Wiltgen pela dedicação, paciência e por todo ensinamento transmitido.

“Quanto melhor é adquirir a sabedoria do que o ouro! E quanto mais excelente,  
adquirir a prudência do que a prata!”.

Pv.16:1

## RESUMO

A contínua evolução da indústria aeronáutica e aeroespacial junto ao desenvolvimento da manufatura aditiva nas últimas décadas promove novos desafios, dentre os quais levam ao desenvolvimento de produtos com formas complexas, com menor peso, porém resistentes, além é claro da possibilidade de desenvolver geometrias especiais e aperfeiçoadas que não poderiam ser construídas utilizando outras técnicas de manufatura. A manufatura aditiva em metais disponibiliza a indústria um leque de opções de produtos, mas ao mesmo tempo promove muitos desafios tecnológicos. Nos próximos anos, toda a indústria de manufatura passará por mudanças significativas com a adoção desta tecnologia moderna. Esta inovação tecnológica deverá inclusive ser adotada no desenvolvimento de novos tipos de trens de pouso de aeronaves impondo mudanças relevantes nesse dispositivo. Esta pesquisa apresenta um estudo da aplicação da manufatura aditiva em metais com o intuito de integrar partes, diminuir peso e quantidade de peças, melhorar geometrias no que se refere a aerodinâmica, simular estas geometrias em Fluido Dinâmica Computacional (CFD), e por fim, promover uma reflexão acerca de aprofundamento de estudos das possíveis utilizações desta tecnologia em trens de pouso de aeronaves no decorrer dos próximos anos.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva em Metais, Trens de Pouso de Aeronaves, Protótipos, Peças Integradas, Simulação CFD.

## **ABSTRACT**

The continuous evolution of aeronautical and aerospace industry together with development of additive manufacturing in the last decades promote new challenges, among which lead to development of products with complex shapes, with less weight, but robust. In addition, possibility of creating improved geometries that cannot be manufactured using other manufacturing techniques. The metal additive manufacturing provides the industry with a range of product options, but at same time promotes some technological challenges. In coming years, whole manufacturing industry will undergo significant changes with adoption of this modern technology. This technological innovation must even be adopted in development of new types of aircraft landings gears generating some relevant changings in this device. This research presents a study of application in metal additive manufacturing in order to integrate parts, reduce weight and quantity of parts, improve geometries with regard to aerodynamics, simulate these geometries in CFD (Computational Fluid Dynamics), and finally, promote an in-depth reflection of studies of possible uses of this technology in aircraft landing gear over the years.

**Keywords:** Metal Additive Manufacturing, Aircraft Landing Gear, Prototypes, Integrated Parts, CFD Simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo V da pesquisa realizada nessa dissertação.....	19
Figura 2 – Desenvolvimento das fases dessa dissertação.....	20
Figura 3 – Revoluções Industriais .....	28
Figura 4 – 1º Revolução industrial - (a) Fábrica têxtil, (b) Gerador a vapor.....	29
Figura 5 – 2º Revolução industrial - Linha de produção do Ford T .....	29
Figura 6 – As tecnologias importantes para Quarta Revolução Industrial (Manufatura Avançada) .....	30
Figura 7 – Objetos construídos pela deposição de solda.....	32
Figura 8 – Esquema simplificado de fabricação por SLA.....	33
Figura 9 – Fluxo de MA .....	34
Figura 10 – Técnicas e processos de MA estabelecidos na ASTM F42 .....	35
Figura 11 – Corpos de prova com a densidade de preenchimento e tipos de perfis internos em manufatura aditiva .....	37
Figura 12 – Fabricação experimental de um Flap Spar do F35.....	37
Figura 13 – Funcionamento de MA PBF .....	38
Figura 14 – Funcionamento da MA DED.....	39
Figura 15 – Funcionamento MA-BJ.....	40
Figura 16 – Trens de pouso de um A380. Notar os dois tipos (modelos) de trem de pouso, o principal (MLG) e o auxiliar (NLG) .....	42
Figura 17 – Tipos de Trens de Pouso: (a) Tipo fixo no modelo Dream Tundra 200 e (b) Tipo retrátil no modelo Boeing 777 .....	43
Figura 18 – Tipos de arranjos de trens de pouso de aeronaves .....	44
Figura 19 – Tipos de trens de pouso de aeronaves: .....	45
Figura 20 – Tipos de arrasto aerodinâmico conforme a estrutura física.....	47
Figura 21 – Efeito de arrasto aerodinâmico parasita por interferência .....	48
Figura 22 – Efeito do arrasto aerodinâmico induzido por uma aeronave .....	49
Figura 23 – Ruídos aerodinâmicos de aeronaves na aproximação.....	50
Figura 24 – Arrasto aerodinâmico provocado por trens de pouso do tipo NLG.....	51
Figura 25 – Características de um perfil de asa .....	52
Figura 26 – Etapas do desenvolvimento da pesquisa .....	53

Figura 27 – Principais partes que compõe um trem de pouso de aeronave do tipo balancim.....	54
Figura 28 – Dimensões da perna de força do trem de pouso de aeronave construído com a manufatura subtrativa.....	55
Figura 29 – Dimensões do balancim do trem de pouso de aeronave construídos via manufatura subtrativa.....	55
Figura 30 – Dimensões do eixo de roda do trem de pouso de aeronave construídos via manufatura subtrativa.....	56
Figura 31 – Dimensões do pino pivô do trem de pouso de aeronave construídos via manufatura subtrativa.....	56
Figura 32 – Dimensões do eixo de articulação do trem de pouso de aeronave construídos via manufatura subtrativa.....	56
Figura 33 – Principais componentes do trem de pouso de aeronave construídos via manufatura aditiva.....	58
Figura 34 – Perfil aerodinâmico aplicado a perna de força e eixo de roda integrados em peça única via manufatura aditiva.....	59
Figura 35 – Variação da ocupação interna das peças (cinco diferentes versões) com perfil aerodinâmico via manufatura aditiva.....	60
Figura 36 – Desenvolvimento da peça haste integrada.....	61
Figura 37 – Desenvolvimento da peça pino pivô.....	61
Figura 38 – Interface do ANSYS <i>Discovery Live</i> – Simulação CFD em túnel de vento.....	63
Figura 39 – Passo a passo para simulação CFD.....	63
Figura 40 – Parâmetros de configuração da simulação CFD.....	64
Figura 41 – Modelo em 3D CAD do protótipo do trem de pouso de aeronave com modificações aerodinâmicas e em peça única.....	65
Figura 42 – Protótipo em MA do trem de pouso de aeronave integrado e com perfil aerodinâmico.....	66
Figura 43 – Protótipo em MA do trem de pouso de aeronave integrado e com perfil aerodinâmico.....	66
Figura 44 – Protótipo em MA do trem de pouso de aeronave integrado e com perfil aerodinâmico.....	67
Figura 45 – Interno de componentes com alívio de peso:.....	70
Figura 46 – Perfil aerodinâmico da perna de força:.....	71

Figura 47 – Resultado da simulação CFD apresentando a vista frontal (a) TDP MS, (b) TDP MA. ....	73
Figura 48 – Resultado da simulação CFD apresentando a vista de cima. (a) TDP MS, (b) TDP MA. ....	74
Figura 49 – Resultado da simulação CFD. TDP MS corte balancim. ....	74
Figura 50 – Resultado da simulação CFD. TDP em MA com o corte da peça integrada .....	75



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas: Fabricação via MA em SLM e MS.....	36
Tabela 2 – Lista de peça trem de pouso de aeronave do tipo balancim construído em manufatura subtrativa.....	57
Tabela 3 – Lista de peça trem de pouso de aeronave via manufatura aditiva .....	62
Tabela 4 – Massa total por versão de trem de pouso de aeronave via manufatura aditiva.....	62
Tabela 5 – Comparativo de Redução de Peças Manufatura Aditiva x Manufatura Subtrativa .....	68
Tabela 6 – Comparativo de Redução de Massa Manufatura Aditiva x Manufatura Subtrativa .....	68

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição das publicações ao longo do tempo.....	21
Gráfico 2 - Distribuição das referências bibliográficas por área de conhecimento ....	22
Gráfico 3 - Distribuição dos artigos por fontes de pesquisa utilizadas .....	22

## LISTA DE ABREVIATURAS

ACARE	<i>Advisory Council for Aeronautics Research in Europe</i>
BJ	<i>Binder Jetting</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer aided manufacturing</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DED	<i>Direct Energy Deposition</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
DMLM	<i>Direct Metal Laser Melting</i>
EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FAR	<i>Federal Acquisition Regulations</i>
MA	Manufatura Aditiva
MAM	Manufatura Aditiva em Metais
MF	Manufatura Formativa
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MLG	<i>Main Landing Gear</i>
MS	Manufatura Subtrativa
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NLG	<i>Nose Landing Gear</i>
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
PLA	Poli Ácido Láctico
TDP	Trem de Pouso de Aeronave
SLA	Estereolitografia

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 Objetivo Geral da Pesquisa.....	15
1.2 Motivação e Justificativa.....	16
1.3 Delimitação da Pesquisa.....	16
1.4 Estrutura e Organização da Dissertação.....	17
1.5 Metodologia Aplicada.....	18
1.6 Levantamento e Estudo Bibliográfico.....	21
1.7 Artigos Publicados.....	25
<b>2 REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS.....</b>	<b>28</b>
<b>3 MANUFATURA ADITIVA.....</b>	<b>32</b>
3.1 Fusão em Leito de Pó (PBF - Powder Bed Fusion).....	38
3.2 Deposição por Energia Direta (DED- Direct Energy Deposition).....	39
3.3 Jateamento por Enfardamento (BJ - Binder Jetting).....	39
<b>4 TRENS DE POUSO DE AERONAVES.....</b>	<b>41</b>
<b>5 AERODINÂMICA.....</b>	<b>46</b>
<b>6 DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>53</b>
6.1 Etapas do Desenvolvimento.....	53
6.1.1 Modelo de Trem de Pouso de Aeronave via Manufatura Subtrativa ...	53
6.1.2 Modelo de Trem de Pouso de Aeronave via Manufatura Aditiva.....	57
6.2 Simulação em CFD (Fluido Dinâmica Computacional).....	62
6.3 Protótipo do Trem de Pouso de Aeronave via MA.....	64
<b>7 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....</b>	<b>68</b>
<b>8 CONCLUSÃO.....</b>	<b>76</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICE D.....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE E.....</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, ocorre o crescimento da utilização da tecnologia de manufatura aditiva que passo a passo vem obtendo alta maturidade tecnológica e começa a ser utilizada fortemente na indústria como um todo. Esta nova tecnologia tem vantagens construtivas que serão exploradas durante esta pesquisa quando comparada aos métodos tradicionais de fabricação (WILTGEN, 2019; ALCALDE; WILTGEN, 2018; GOMES; WILTGEN, 2020). Com a introdução de metais e ligas metálicas como matérias-primas disponíveis será possível o desenvolvimento de muitas inovações, especialmente nas indústrias de aeronáutica e espacial, tal como o projeto completo de um trem de pouso em aeronaves (GOMES; WILTGEN, 2020).

Utilizando-se a manufatura aditiva na concepção de trens de pouso de aeronaves será possível obter melhorias no que se refere a forma da geometria e aerodinâmica, redução de massa, integração de componentes, redução de arrasto aerodinâmico e de ruído.

A indústria aeroespacial e aeronáutica vem sendo aquelas mais promissoras para a utilização plena desta nova tecnologia, dado as características deste setor. Sabe-se que normalmente a indústria aeroespacial e aeronáutica necessitam de componentes que possuam pouco peso, alta resistência, e por características próprias tem baixa cadência de produção e utilizam matérias-primas especiais com alto valor agregado (GOMES; WILTGEN, 2020).

Dado estas características, optou-se estudar a utilização da manufatura aditiva em metais na confecção de um trem de pouso de aeronave com a integração de componentes e que possua um perfil aerodinâmico com a intenção de reduzir o arrasto e ruído aerodinâmico produzido devido ao fluxo de ar ao redor deste dispositivo. Além disso, há fortes indícios de que em um futuro próximo esta tecnologia será adotada em maior escala dentro do processo industrial.

Nessa pesquisa é apresentada uma breve contextualização da evolução do setor produtivo aeronáutico, a apresentação do sistema de trem de pouso em aviões, suas principais funções e os tipos principais existente. De forma sintética apresenta-se a manufatura aditiva, em especial sobre a que utiliza metais como matéria-prima. É apresentada uma comparação entre um trem de pouso de aeronave fabricado tradicionalmente utilizando a manufatura subtrativa, e um trem de pouso de aeronave

fabricado via manufatura aditiva, tendo como premissas comparar a massa, geometria, vantagens e desvantagens de cada trem de pouso. Por fim, apresenta-se a simulação em CFD, mostrando os níveis referentes aos efeitos de arrasto aerodinâmico nos dois modelos de trem de pouso de aeronave.

Para a realização do estudo foram aplicadas 05 (cinco) considerações como delimitação do escopo da pesquisa, são elas:

- *Desenvolver dois trens de pouso de aeronaves com concepções diferentes através de modelo 3D em CAD. Um utilizando a concepção voltada para a manufatura aditiva e um outro voltado para a manufatura subtrativa;*
- *Comparar a massa e quantidade de componentes entre o trem de pouso de aeronave projetado via manufatura aditiva (MA) e manufatura subtrativa (MS), cujo as matérias-primas serão apresentadas no decorrer da pesquisa;*
- *Adotar de um perfil aerodinâmico inovador para o trem de pouso de aeronave desenvolvido em manufatura aditiva, com intuito de reduzir arrasto e ruído;*
- *Simulação utilizando a técnica CFD provendo comparação entre o trem de pouso de aeronave projetado via MS e MA;*
- *Fabricação de um protótipo em escala reduzida do trem de pouso de aeronave desenvolvido em MA com o intuito de avaliar fisicamente os ganhos obtidos pela integração de componentes e o projeto aerodinâmico.*

## **1.1 Objetivo Geral da Pesquisa**

O objetivo geral dessa pesquisa é desenvolver um trem de pouso de aeronave que possa ser fabricado através de manufatura aditiva integrando diversos componentes em peças únicas, obtendo uma geometria que seja capaz de ser resistente e leve, e que ao mesmo tempo tenha capacidade de melhorar a aerodinâmica e diminuir o arrasto e o ruído provocado pelo deslocamento de ar pelo sistema de trem de pouso. Ainda pode-se afirmar que nesta pesquisa será feita a

comparação entre as duas concepções de trem de pouso via MS e MA e apresentada as diferenças e vantagens de se adotar a MA na confecção do trem de pouso de aeronave.

## **1.2 Motivação e Justificativa**

A fabricação de componentes na indústria aeronáutica e aeroespacial vem em inovação contínua, sempre buscando maior eficiência, menor utilização de matéria-prima com redução de massa, geometrias complexas, mais robustez mecânica e maior segurança operacional. Há poucos anos essas indústrias estavam limitadas as manufaturas tradicionais quer fossem MS ou em manufatura formativa, utilizando os processos de usinagem, fundição e forjas. Com o surgimento da MAM (Manufatura Aditiva em Metais) novas possibilidades de projeto e fabricação estão emergindo.

A indústria aeronáutica e aeroespacial utilizará todas as vantagens inerentes ao processo de MA, não somente através de componentes metálicos, mas também de componentes não metálicos. Desta forma, podendo ser empregada esta tecnologia tanto em peças estruturais, quanto não estruturais.

Através dessa pesquisa será possível demonstrar que a manufatura aditiva aplicada no desenvolvimento de um trem de pouso de aeronave permitirá sua fabricação com vantagens importantes como será apresentado adiante.

## **1.3 Delimitação da Pesquisa**

Essa pesquisa tem sua delimitação aplicada apenas ao estudo de modelos novos de trens de pouso de aeronaves via a MA, em especial o chamado trem de pouso principal da aeronave ou *Main Landing Gear* (MLG). Limitando-se a concepção e desenvolvimento de trens de pouso de aeronaves em escala e baseados em protótipo fabricado em MA com matéria-prima em plástico. Na pesquisa não foram fabricados componentes em metal (MAM), e também, não foram realizados testes estáticos, dinâmicos, fadiga, túnel de vento e outros necessários para validação do componente e da tecnologia. Esses testes e ensaios poderão ser realizados posteriormente como a continuação natural desta pesquisa.

## 1.4 Estrutura e Organização da Dissertação

Essa pesquisa seguiu uma estrutura de desenvolvimento apresentada em oito capítulos.

O primeiro capítulo refere-se a uma breve introdução descrevendo de forma objetiva e clara o contexto da pesquisa, apresentando as justificativas, levantamento bibliográfico, objetivos da pesquisa, bem como a delimitação da pesquisa e o contexto no qual o tema está inserido.

No segundo capítulo, foi feita uma breve abordagem acerca da evolução dos processos produtivos, as três revoluções industriais da história da humanidade. Assim como, a percepção do autor quanto a quarta revolução industrial que está ocorrendo neste momento.

No terceiro capítulo é apresentada a manufatura aditiva, suas principais técnicas, características e vantagens no qual a discussão concentra-se nas técnicas aplicadas a fabricação em metais.

O quarto capítulo se refere ao sistema de trem de pouso de aeronave, suas funções e os principais modelos existentes.

No quinto capítulo serão apresentados conceitos básicos de aerodinâmica, mostrando os efeitos e o comportamento de arrasto e ruído produzido por um trem de pouso de aeronave.

O sexto capítulo apresenta o desenvolvimento da dissertação com o estudo realizado nas duas concepções construtivas a manufatura subtrativa e a manufatura aditiva. Adicionalmente, neste capítulo são apresentadas a simulação em CFD do trem de pouso de aeronave e o protótipo da geometria do trem de pouso de aeronave projetado para a execução em manufatura aditiva.

No sétimo capítulo é apresentado o resultado da pesquisa, contendo a comparação entre os dois diferentes tipos trens de pouso de aeronaves projetados para a manufatura subtrativa e aditiva, resultado das simulações CFD e a apresentação do protótipo do trem projetado via manufatura aditiva.

O oitavo capítulo apresenta a conclusão da pesquisa, a avaliação final do estudo, recomendações e as considerações finais dessa pesquisa.



Os Apêndices que se encontram ao final desta pesquisa contêm artigos e participações em congressos com temas relacionados a manufatura aditiva, trens de pouso de aeronaves, inspeção não destrutivas e painéis fotovoltaicos.

## 1.5 Metodologia Aplicada

Para que a metodologia seja efetiva a pesquisa foi estruturada em três fases:

- *Fase 1: Desenvolvimento teórico-conceitual;*
- *Fase 2: Desenvolvimento do modelo;*
- *Fase 3: Conclusão.*

- **Fase 1**

A metodologia utilizada nessa pesquisa é de natureza aplicada, e teve como início um extenso estudo bibliográfico com intuito de embasar de forma coerente e completa o tema estudado na atualidade.

Foi realizada uma pesquisa histórica incluindo as revoluções industriais, o que de fato apresenta a importância deste estudo com a manufatura aditiva compreendida como sendo de fundamental importância para a manufatura avançada.

A manufatura aditiva é abordada de tal maneira que possa atender plenamente a fabricação de peças metálicas necessárias na indústria de aeronáutica e espaço. Além disso, foi realizado um estudo acerca do sistema de trem de pouso de aeronave, exemplificando quais configurações, tipos e funções em protótipos físicos. E por fim, são apresentadas as referências bibliográficas pertinentes para a execução desta pesquisa.

- **Fase 2**

Nessa fase, tendo o conhecimento necessário para dar prosseguimento a pesquisa foi definido o escopo do projeto aplicado no modelo em V de Eng. de Sistemas & Requisitos para que o domínio do problema (requisitos), e o domínio da solução ficassem claros e, portanto, pudessem ter uma abordagem assertiva. Na Figura 1 é ilustrado o modelo em V desenvolvido para a condução dessa pesquisa.

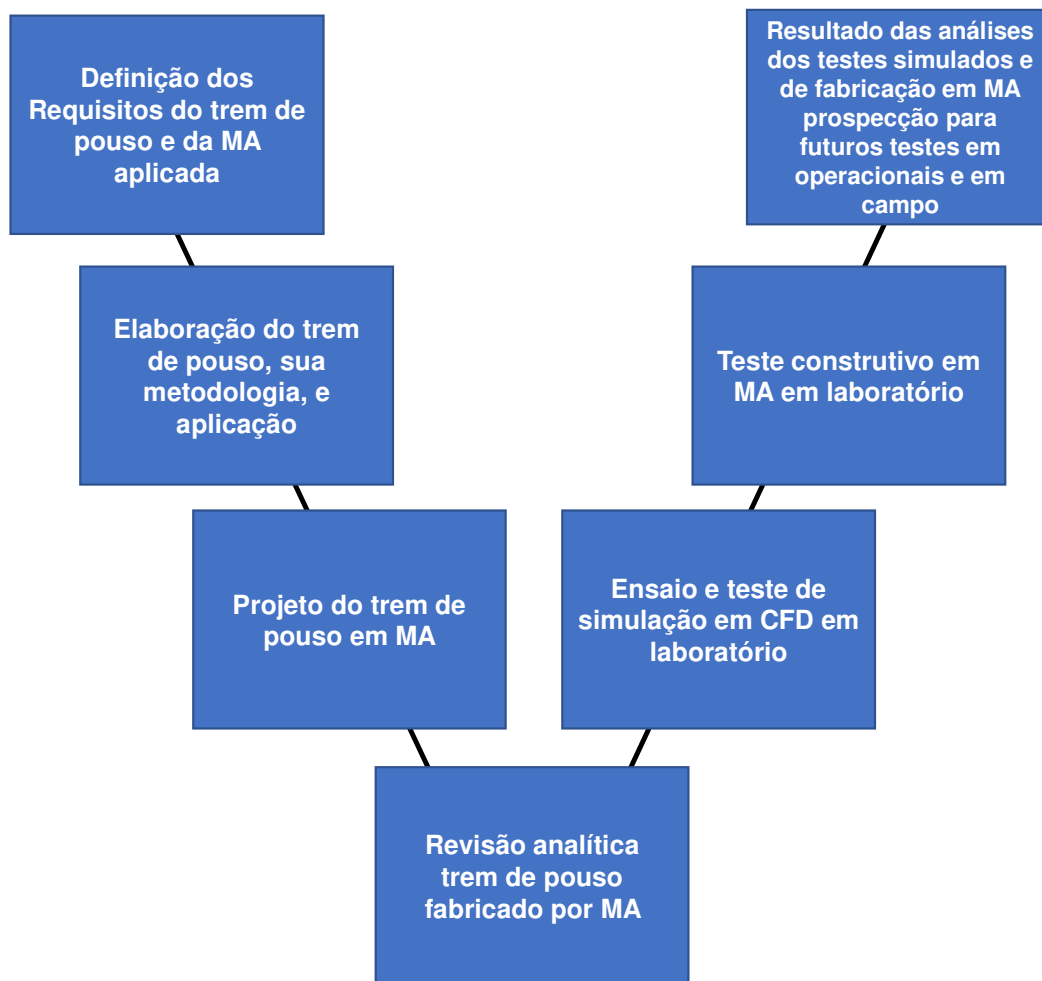


Figura 1 – Modelo V da pesquisa realizada nessa dissertação  
 Fonte: Próprio Autor (2020)

Desta forma, o trem de pouso de aeronave deveria ter suas peças integradas, ser resistente, ser leve e ter características aerodinâmicas favoráveis para redução do arrasto e o do ruído. Para tanto, os modelos de trens de pouso de aeronaves foram desenvolvidos no programa CAD 3D CATIA V5 R20, por sua larga utilização na indústria aeronáutica.

Um projeto em manufatura subtrativa e o outro adotando todos os requisitos propostos. Além disso, foi definido o tipo de trem de pouso de aeronave que seria projetado e desenvolvido. O tipo escolhido de trem de pouso foi o MLG do tipo balancim no caso da manufatura subtrativa, ou seja, com o sistema de amortecimento não integrado, como será melhor detalhado no Capítulo 4 desta dissertação. Para o projeto e desenvolvimento do trem de pouso de aeronave para a manufatura aditiva, não há um balancim, pelo fato de ocorrer a ampla integração de componentes, como será melhor detalhado no Capítulo 4 desta dissertação.

Foram comparados ambos os projetos para determinar as vantagens e desvantagens de cada tecnologia de manufatura.

Foram realizadas diversas simulações em CFD para determinar o comportamento físico e aerodinâmico de cada modelo de trem de pouso e suas respectivas tecnologias de fabricação.

Após o desenvolvimento do modelo de trem de pouso fabricado com a manufatura aditiva, foi possível adaptar os desenhos em CAD 3D para arquivos de fatiamento em 3D para ser confeccionado um protótipo do trem de pouso projetado nessa pesquisa em plástico em tamanho reduzido para avaliar de forma física a integração dos componentes e as possíveis melhorias aerodinâmicas.

- **Fase 3**

Na Fase 3 foram feitas as avaliações comparativas nos dois projetos em CAD 3D, cujo resultados são discutidos e avaliados no Capítulo 6. De forma similar, é possível observar a consolidação de todas as análises realizadas nesta dissertação no Capítulo 7.

Na Figura 2 é ilustrada de forma gráfica e simplificada as três fases dessa pesquisa aplicadas no desenvolvimento dessa dissertação.

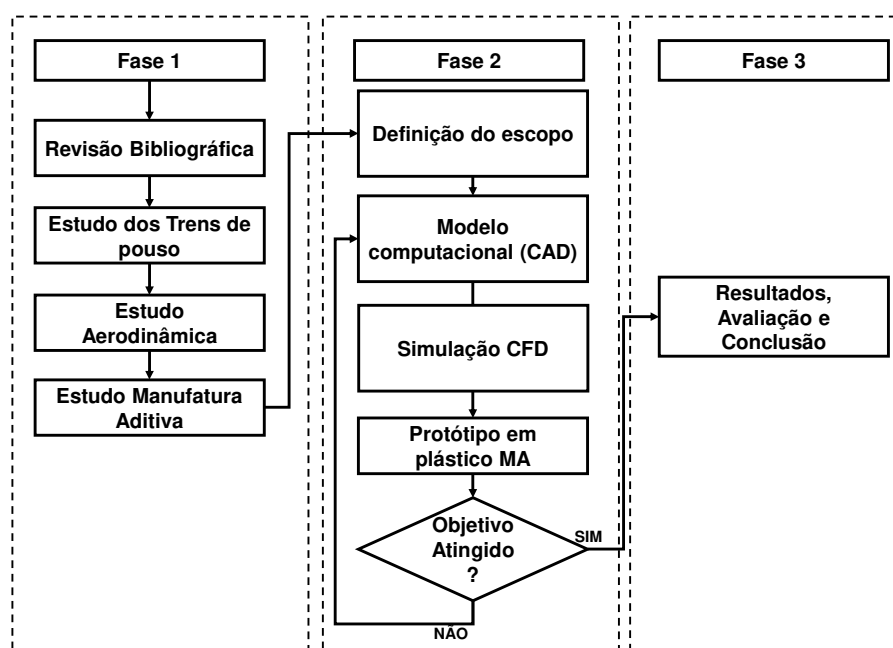


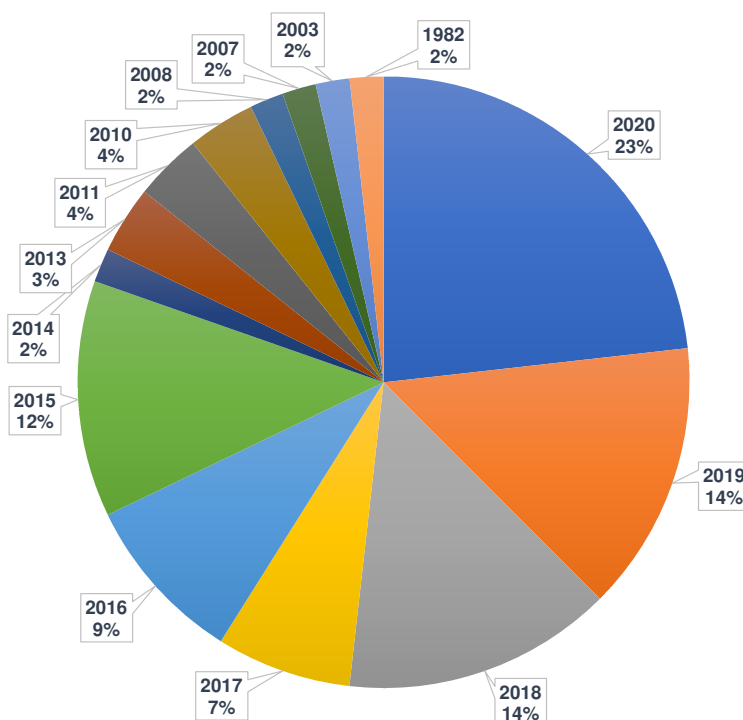
Figura 2 – Desenvolvimento das fases dessa dissertação

Fonte: Próprio Autor (2020)

## 1.6 Levantamento e Estudo Bibliográfico

Para dar embasamento teórico e científico a esta dissertação foi feito um extenso levantamento e estudo bibliográfico. Para demonstrar numericamente o estudo bibliográfico são apresentados gráficos em setores para mostrar de forma clara a distribuição das publicações ao longo dos anos, como ilustrado no Gráfico 1.

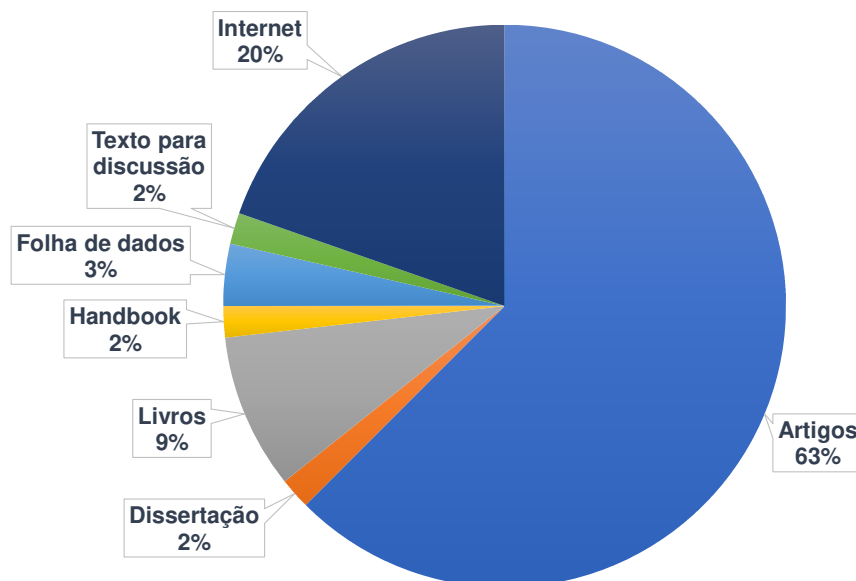
Gráfico 1 - Distribuição das publicações ao longo do tempo



Fonte: Próprio Autor (2020)

A distribuição das referências bibliográficas dessa pesquisa científica por área de conhecimento ilustrado no Gráfico 2. Observa-se nesse gráfico a porcentagem de áreas nas referências utilizadas.

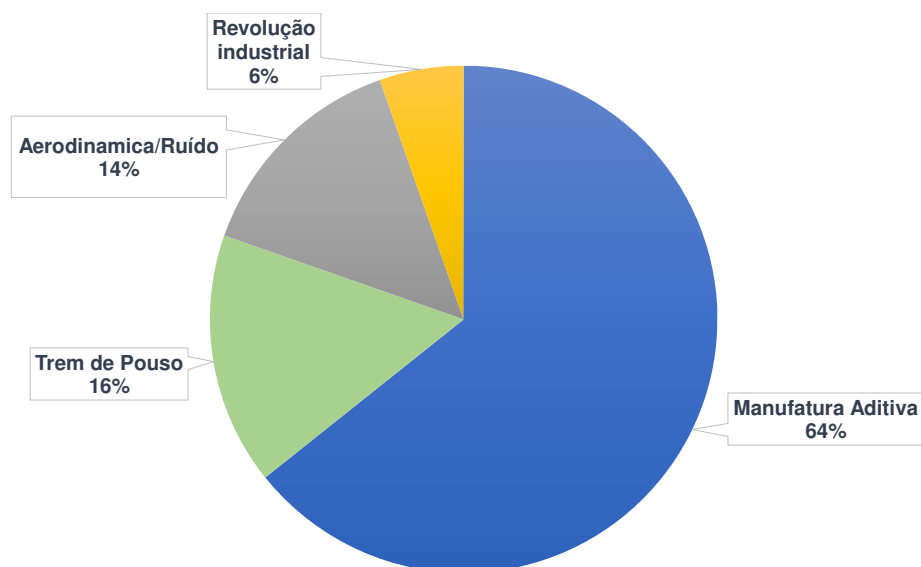
Gráfico 2 - Distribuição das referências bibliográficas por área de conhecimento



Fonte: Próprio Autor (2020)

Para ajudar na compreensão da pesquisa foi realizada também, a distribuição por fontes de pesquisa utilizadas, conforme ilustrado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Distribuição dos artigos por fontes de pesquisa utilizadas



Fonte: Próprio Autor (2020)

O estudo bibliográfico tem o intuito de apresentar o material que apoiará a fundamentação teórica dessa dissertação de mestrado.

Muitos estudos têm sido realizados na utilização e no aprimoramento da manufatura aditiva (MA). Ao início a MA era utilizada principalmente como prototipagem rápida para testar novos conceitos de produtos e para alcançar maior maturidade. O conceito da prototipagem rápida não é novo e foi evoluindo até que com o advento da MA obteve grande impulso por facilitar a saída de informação do computador diretamente para as “impressoras 3D” (WILTGEN, 2019; WILTGEN; ALCALDE, 2019, WILTGEN, *et al.* 2020).

A adoção da manufatura aditiva utilizando metais como matéria-prima veio como consequência do aprimoramento e da evolução desta tecnologia. Entretanto, existem algumas limitações, e alguns desafios relacionados ao acabamento superficial final (YAKOUT, *et al.* 2018).

Pesquisas mostram que existem diversas técnicas de manufatura aditiva em metais que poderiam obter resistência estrutural semelhante ou melhor que peças forjadas e ou fundidas (LEWANDOWSKI; SEIFI, 2016).

A manufatura aditiva em metais e em outros materiais vem sendo utilizada para fabricar componentes aeronáuticos do tipo não estruturais (SINGAMNENI, *et al.* 2019). O mesmo caminho para peças estruturais é mais lento devido à dificuldade de certificação por parte das autoridades de aviação, dentre as quais o fornecimento e divulgação dos resultados de diversos fabricantes que utilizam a MAM porém que tratam estes dados como sigilosos.

A adoção da manufatura aditiva nas grandes indústrias é uma parte importante na revolução industrial atual, que é chamada de manufatura avançada, ou quarta revolução industrial (WILTGEN, 2020).

A manufatura aditiva em metais é uma novidade que vem sendo adotada por muitas empresas ao redor do mundo, e no futuro, poderá ser utilizada para projetar diversas peças estruturais em aeronáutica. Devido as suas características, a manufatura aditiva se adequa perfeitamente com as necessidades da indústria aeroespacial e suas geometrias complexas, leves, de baixa cadência, de alta integração de componentes, e ainda possui a vantagem de não desperdiçar matéria-prima de alto custo (GOMES; WILTGEN, 2020).

É interessante ressaltar que existem centros especializados em fabricações metálicas de MA pelo mundo, tal como o da GE na Alemanha (GE, 2019).

Basicamente este centro utiliza o método de fabricação em MAM com a técnica fusão por feixe de elétrons (EBM- *Electron Beam Melting*) com intuito de fornecer componentes fabricados com esta técnica para diversas companhias, porém a GE também utiliza a sinterização direta de metal a laser (DMLS- *Direct Metal Laser Sintering*) com algumas diferenças o que a empresa chamou de fusão direta de metal a laser (DMLM - *Direct Metal Laser Melting*), segundo a GE a principal diferença reside na fusão completa do pó metálico. É possível ver que esta tecnologia faz parte do presente e do futuro com a constante evolução.

Um grande passo para eliminação de limitações foi obtido com o desenvolvimento do método de manufatura aditiva em metais no qual são removidas as porosidades, com isso é possível ter um material mais resistente e durável, principalmente sob aspectos de fadiga, pois a resistência estática é uma realidade inerente a estas peças (SEEDE, *et al.* 2020). Esse estudo promoveu a possibilidade de utilização desta tecnologia em componentes estruturais como por exemplo, trens de pouso de aeronaves, caixa de marchas, turbinas, dentre outros.

A NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) vem desenvolvendo e fabricando injetores de combustível manufaturados com MAM. Um componente deste geralmente possui cerca de ~115 (cento e quinze) partes e peças. A utilização da MAM reduziu para apenas duas peças (NASA, 2013). Isso corrobora com um dos principais objetivos a ser demonstrado nessa pesquisa científica relacionado a forte integração de partes e peças.

Observa-se o crescimento substancial da demanda por MAM em estudo feito por várias consultorias que antevê um crescimento de até 28,3% até 2022 (GOMES; WILTGEN, 2020).

O trem de pouso de uma aeronave é um subsistema entre os mais críticos desse dispositivo (DIVAKARAN, *et al.* 2018), uma vez que seu ciclo de desenvolvimento é longo. Portanto, é necessário buscar meios de diminuir o ciclo de desenvolvimento do produto além de fabricar com menos peso e volumes reduzidos. Por este motivo, a MA poderá ser utilizada e poderá auxiliar a atingir-se estas metas.

Um dos objetivos desta dissertação é promover a melhora na geometria para obter uma aerodinâmica que reduza o arrasto e ruído. Isso é importante dado os regulamentos aeronáuticos serem muito restritivos quanto ao ruído acústico produzido por aeronaves no pouso e na decolagem (IMAMURA, *et al.* 2010).

Além disso, o incômodo ou o estresse gerado pelo ruído das aeronaves é oficialmente identificado como o maior obstáculo para o crescimento do tráfego aéreo no mundo (BULTE; REDONNET, 2017).

O primeiro processo para fabricação de componentes estruturais aeronáuticos via MAM foi aprovado pela FAA (*Federal Aviation Administration*). A fabricante NORSK (NORSK TITANIUM, 2018) em parceria com a BOEING fizeram a primeira peça estrutural em titânio para o avião *787 Dreamliner*, e adicionalmente, a mesma empresa fez um memorando de acordo com a empresa SAFRAN *Landing System* para demonstrar a prontidão da fabricação de peças estruturais em titânio via MAM para fabricação de trens de pouso de aeronaves.

Através do estudo bibliográfico recente, verifica-se que a tecnologia de MAM deverá crescer consideravelmente no futuro próximo, principalmente na área de aeronáutica e aeroespacial dado as características de componentes de baixo peso, com geometrias complexas, com necessidade de alta resistência mecânica, integração de partes e pela baixa cadência fabril.

Os estudos realizados pela FAA, NASA e outras empresas privadas promoverão uma ampla utilização da MAM aliado as vantagens construtivas em fabricar componentes com geometrias complexas quando comparada a outras tecnologias de fabricação usuais.

## 1.7 Artigos Publicados

Durante o desenvolvimento dessa pesquisa surgiu a oportunidade de escrever dois artigos, sobre manufatura aditiva em metais. Estes artigos estão anexados nos Apêndices A a E.

No **Apêndice A**, tem-se um artigo que apresenta as principais tecnologias utilizadas pela manufatura aditiva em metais, as matérias-primas metálicas mais utilizadas e os custos da manufatura aditiva. As técnicas mais utilizadas em manufatura aditiva em metais aplicadas na indústria de tecnologia mecânica (aeronáutica, aeroespacial e automobilística).

Este artigo foi publicado na Revista Tecnologia da Universidade de Fortaleza (e-ISSN: 2318-0730, v41(01), pp. 1-16, jun. 2020), cujo título é:



## **AVANÇOS NA MANUFATURA ADITIVA EM METAIS: TÉCNICAS, MATERIAIS E MÁQUINAS**

No **Apêndice B**, tem-se um artigo que apresenta os principais métodos de inspeção não destrutivas aplicadas aos trens de pouso de aeronaves.

Este artigo foi apresentado na EIC 2019 - XVI Encontro de Iniciação Científica, XIV Mostra de Pós-Graduação e VI Mostra de Extensão do Centro Universitário Teresa D'Ávila UNIFATEA, sendo selecionado como um dos melhores artigos apresentados. O nome do artigo apresentado é:

### **INSPEÇÃO NÃO DESTRUTIVA PARA FABRICAÇÃO DE TUBO DESLIZANTE PARA TREM DE POUSO DE AERONAVE.**

No **Apêndice C**, tem-se um resumo que apresenta uma investigação realizada de sobreaquecimento em um tubo deslizante de trem de pouso.

Esta pesquisa foi apresentada no 8º Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento (CICTED) realizado na UNITAU em 2019. O nome da pesquisa apresentada é:

### **ANÁLISE DO SOBREAQUECIMENTO CAUSADA PELA RETIFICAÇÃO EM TUBOS DESLIZANTES DE TRENS DE POUSO DE AERONAVES.**

No **Apêndice D**, tem-se um resumo que apresenta um projeto de trem de pouso que utiliza a manufatura aditiva como tecnologia de fabricação.

Esta pesquisa foi apresentada no 8º Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento (CICTED) realizado na UNITAU em 2019. O nome da pesquisa apresentada é:

### **PROTOTIPAGEM RÁPIDA DE TREM DE POUSO DE AERONAVES UTILIZANDO A TÉCNICA DE MANUFATURA ADITIVA.**

No **Apêndice E**, tem-se um artigo que apresenta uma tecnologia que faz parte da sustentabilidade proposta dentro da manufatura avançada denominada energia fotovoltaica.

Esta pesquisa será apresentada no I CERES – Congresso Nacional de Energias Renováveis, Energia e Sustentabilidade em 2020. O nome da pesquisa apresentada é:

**RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA ELÉTRICA E ÁREA DISPONÍVEL PARA CADA TIPO DE INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA.**

## 2 REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS

A manufatura, assim como a humanidade, evolui e se aperfeiçoa no decorrer da história. As evoluções da manufatura, são chamadas de revoluções industriais. Estas são sempre marcadas por quebras de paradigmas no modo de manufaturar peças. Estas quebras de paradigmas promovem uma disrupção no meio produtivo, que levaram a uma revolução.

A manufatura no decorrer da história passou por três grandes revoluções, e atualmente está passando pela quarta revolução, conhecida como Manufatura Avançada (Indústria 4.0).

Todo novo desenvolvimento revolucionário de manufatura ocorre através da implementação de questões básicas. Entre estas, as mais importantes são: as técnicas, os dispositivos e as pessoas (WILTGEN, 2020)

Na Figura 3 é ilustrada cada uma das revoluções industriais e suas principais características.

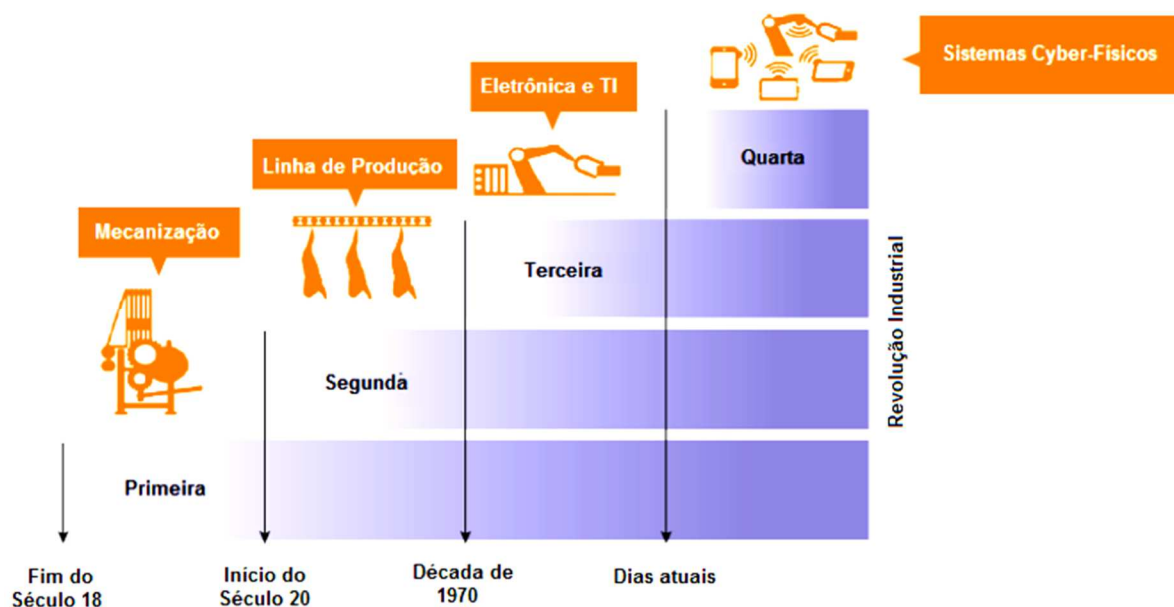


Figura 3 – Revoluções Industriais  
Fonte: SILVA, *et al.* (2019)

A primeira revolução industrial ocorreu no século XVIII na Inglaterra, e teve como grande marco a mecanização da produção. Esta revolução foi impulsionada pela utilização de máquinas a vapor principalmente nas fábricas de tecidos e sua forma de produzir, além da mudança nas máquinas e na forma de distribuição logística

de produtos (CAVALCANTE; SILVA, 2011). A Figura 4 ilustra em (a) uma indústria têxtil e em (b) um gerador a vapor, algo comum na primeira revolução industrial.

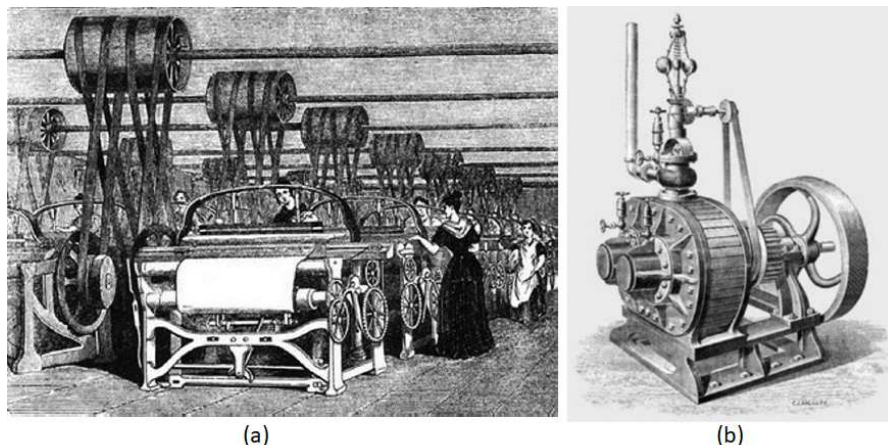


Figura 4 – 1ª Revolução industrial - (a) Fábrica têxtil, (b) Gerador a vapor  
Fonte: SANTOS, *et al.* (2011)

A segunda revolução industrial ocorreu entre o final do século XIX e XX com o surgimento da energia elétrica e a utilização do petróleo como insumo para as máquinas as quais começaram a ter produção em massa.

Foi nessa revolução que se iniciou as chamadas linhas de produção de Henry Ford (ALCALDE; WILTGEN, 2018), ilustrada na Figura 5. A linha de montagem para a fabricação do veículo *Ford T* marcou esta revolução industrial (SAKURAI; ZUCHI, 2018).



Figura 5 – 2ª Revolução industrial - Linha de produção do Ford T  
Fonte: Ford (2020)

A terceira revolução industrial começou na década de 60 do século XX, ela se desenvolveu devido a utilização da eletrônica, com a invenção de transistores semicondutores. A utilização deste componente eletrônico possibilitou a difusão de equipamentos como rádios, televisores, eletrodomésticos, e primeiros computadores pessoais (RIFKIN, 2011).

Com a evolução da informática moderna foi possível aplicar este conhecimento no desenvolvimento de diversas máquinas automáticas, controladas e até mesmo os primeiros robôs. Foi nessa revolução que houve a automatização dos meios produtivos industriais (COUTINHO, 2016).

A Toyota através de Sakichi Toyoda se destacou devido ao desenvolvimento de seu sistema produtivo, e devido ao modo pela qual eles fabricavam seus automóveis (RIFKIN, 2011).

A quarta revolução industrial chamada de Manufatura Avançada, também conhecida como a quarta revolução industrial (WILTGEN, 2020) é baseada na adoção de sistemas ciber-físicos, internet das coisas (IoT – *Internet of Things*), armazenamento de dados em nuvens, manufatura aditiva, entre outras formas de automatização avançadas (GIMENEZ; SANTOS, 2019).

Na Figura 6 são ilustrados os principais suportes para a quarta revolução industrial.



Figura 6 – As tecnologias importantes para Quarta Revolução Industrial (Manufatura Avançada)  
Fonte: MULLER, *et al.* (2018)

Faz parte desta pesquisa a manufatura aditiva (MA) aplicada tanto na indústria atual, quanto na quarta revolução industrial (WILTGEN, 2019; ALCALDE; WILTGEN, 2018).

As vantagens construtivas da manufatura aditiva apresentadas nessa pesquisa devem subsidiar outras pesquisas mais avançadas em trens de pouso de aeronaves. As quais poderão permitir testes e ensaios em protótipos construídos em MAM, e em tamanho real possibilitando validar a utilização desta tecnologia no futuro próximo.

Vale ainda ressaltar que dentro da manufatura avançada existe a preocupação com a sustentabilidade e uso racional de energia e matéria-prima. A sustentabilidade se refere ao esforço de minimizar os impactos negativos nas relações ambiental, social e econômica, e se além às questões de alteração do clima, poluição e utilização dos recursos sem restrições (PALMA, *et al.* 2017). Dentre as tecnologias que serão vanguardistas na manufatura avançada está utilização de energias fotovoltaicas seja na indústria, seja nas residências desde que haja um projeto verificando a relação entre a potência e a área disponível para cada tipo de unidade consumidora (WILTGEN, *et al.* 2020).

### 3 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva pode ser dividida em três partes, pré-histórica, precursora e moderna (BOURELL, 2016; ALCALDE; WILTGEN, 2018).

Na era pré-histórica tem-se a fotoescultura e topografia como exemplos. Não utilizavam ferramentas, e se baseavam na utilização das próprias mãos para a adição de material, formando dessa maneira um objeto ou peça.

A era precursora na década de 1950 do século XX até meados da década de 1980 do mesmo século. Nessa era existiam alguns recursos da era moderna, mas não existia a utilização de computador para geração de objetos como ilustrado na Figura 7. Esses objetos foram todos construídos camada por camada através da técnica de soldagem, e portanto sem o auxílio de um computador.

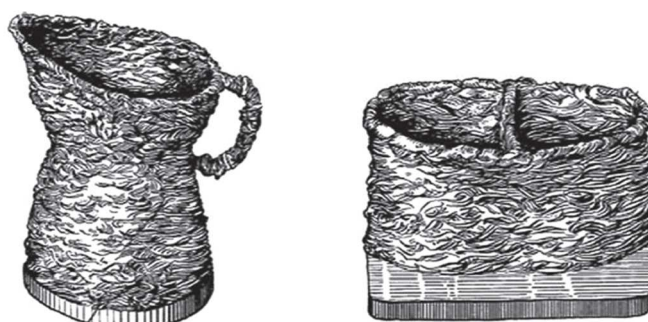


Figura 7 – Objetos construídos pela deposição de solda  
Fonte: Bourell (2016)

A era moderna começa a partir de meados da década de 1980 do século XX e foi impulsionada pelo desenvolvimento do primeiro computador pessoal. Tornando possível operar o computador de forma gráfica sem a necessidade de conhecimento de programação. Para a manufatura aditiva a utilização de um computador capaz de modelar objetos computacionalmente em 3D é essencial.

A MA foi desenvolvida por Charles W. Hull (“Chuck” Hull) em 1986 com uma máquina moderna de MA utilizando a técnica de estereolitografia (SLA) e esse pesquisador ficou conhecido como o pai da manufatura aditiva (ALCALDE; WILTGEN, 2018). Essa inovação revolucionou a forma de fabricação de peças e componentes mecânicos através do processo de agregação de matéria-prima na proporção necessária para a confecção de uma peça ou componente conforme o projeto (WILTGEN, 2019).

Antes da invenção de Hull eram necessários moldes, no caso de manufatura formativa (MF), ou a usinagem de peças, ou seja, remoção de material, no caso da manufatura subtrativa (MS). Estes meios de fabricação exigem muitas etapas prévias antes da produção como por exemplo criação de roteiros, modelos CAM, verificação de colisão, entre outros.

Com o surgimento das primeiras máquinas de manufatura aditiva pode-se dizer que houve uma simplificação no modo de produção tornando o processo de manufatura menos complexo (WILTGEN, 2019).

A Figura 8 ilustra de forma simplificada como é o funcionamento de uma máquina SLA a mesma que Hull construiu. Notar que conforme o laser atinge a resina líquida vai formando camadas do objeto que se desejar confeccionar, e desta forma, sucessivamente camada por camada até que a geometria esteja completa e a peça fabricada.

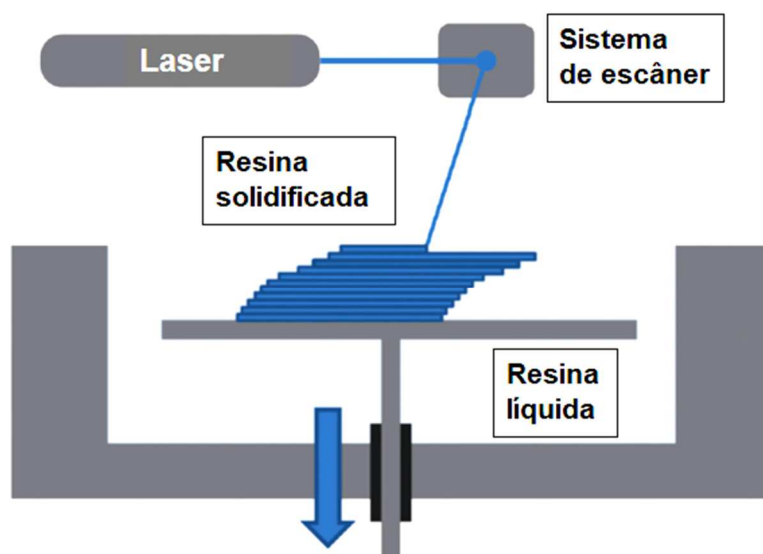


Figura 8 – Esquema simplificado de fabricação por SLA  
Fonte: Adaptado de Kim, *et al.* (2016)

Segundo a terminologia da ASTM/ISO F2792-12<sup>a</sup> (*Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*) a MA pode ser definida como o processo de unir material com o objetivo de fabricar componentes oriundos do modelo 3D CAD, camada por camada, ou seja, o oposto da MS.

O fato de utilizar um modelo digital em 3D CAD ajuda nos processos de fabricação automatizados como as manufaturas subtrativa e aditiva (WILTGEN; ALCALDE, 2019). A grande diferença se dá pelo fato de que em manufatura aditiva



existe uma transformação no modelo digital permitindo que ele seja fatiado, ou seja, interpretado em camadas e fabricado camada por camada.

Conforme citado anteriormente a fabricação via MA compreende partir de um modelo 3D CAD, a vantagem de não necessitar desenvolver programas CAM (*Computer Aided Manufacturing*), e nem programas de computador que simulam colisão da peça com máquinas, eliminando boa parte das análises que a engenharia de manufatura precisava fazer na MS.

Evidentemente que para fabricação de componentes estruturais antes da impressão 3D é necessário a análise CAE (*Computer Aided Engineering*) com o intuito de gerar um componente robusto, leve e com a melhor distribuição de tensão mecânicas, topológicas, e se possível, o desenvolvimento de protótipos para avaliação dos componentes (WILTGEN, 2019; SRIVATSAN; SUDARSHAN, 2015).

A Figura 9 ilustra um esquema simplificado da fabricação via MA e a avaliação se o objeto construído atende os requisitos do projeto.

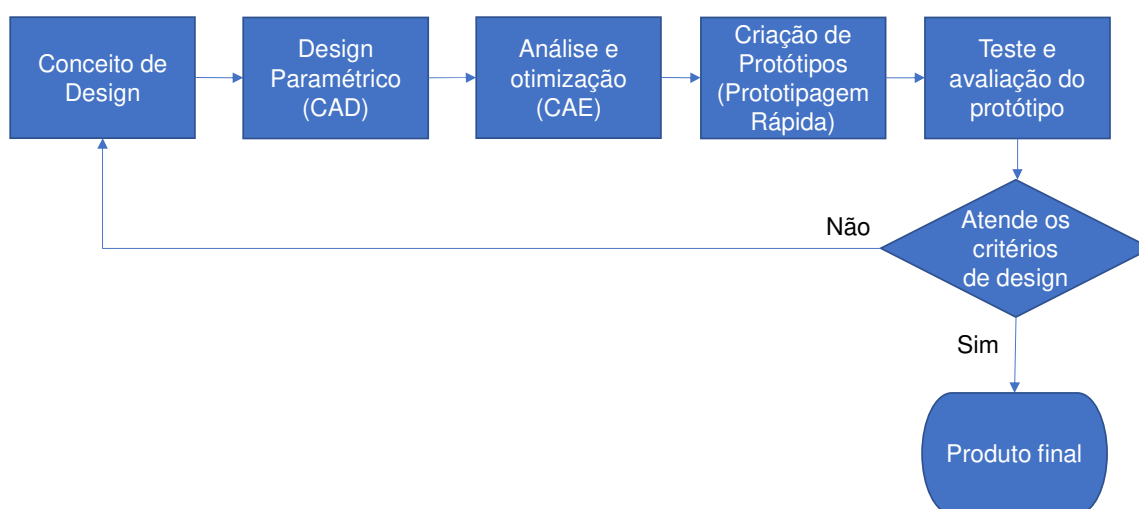


Figura 9 – Fluxo de MA  
Fonte: Adaptado de Srivatsan e Sudarshan (2015).

A MA reduz o consumo de matéria-prima e de energia, podendo-se fabricar sob demanda e personalizar os produtos de acordo com o cliente (SRIVATSAN; SUDARSHAN, 2015).

Com o desenvolvimento de novas tecnologias e o maior interesse na utilização destas técnicas, foram fomentadas pela indústria diversas pesquisas que geraram a evolução de vários tipos de materiais (PONSFORD, *et al.* 2014).

Atualmente a norma ASTM F42 divide a manufatura aditiva em sete tipos de processos, dentre estes apenas quatro são aplicáveis a fabricação utilizando metais, são estas: *Fusão em Leito de Pó - Powder Bed Fusion (PBF)*, *Deposição por Energia Direta - Direct Energy Deposition (DED)*, *Jateamento por Enfardamento - Binder Jetting (BJ)*, e por fim a *Laminação de Folhas - Sheet Lamination (SL)* (GOMES; WILTGEN, 2020).

A Figura 10 ilustra os sete tipos de processos de manufatura aditiva na ASTM F42.



Figura 10 – Técnicas e processos de MA estabelecidos na ASTM F42  
Fonte: Adaptado de *Hybrid Manufacturing Technologies* (2020).

Estudos com as técnicas de MA, *Deposição por Energia Direta - Direct Energy Deposition (DED)* e *Fusão em Leito de Pó - Powder Bed Fusion (PBF)* concluiu que as mesmas promovem propriedades mecânicas similares, ou até melhores que corpos de prova concebidos de forma convencional (LEWANDOWSKI; SEIFI, 2016).

Análises e testes realizados com a técnica de Fusão Seletiva a Laser – *Selective Laser Melting (SLM)*, um tipo de PBF, foi possível verificar propriedades mecânicas do material superiores quando comparados a matérias-primas desenvolvidas convencionalmente (YAP, *et al.* 2015).

Na Tabela 1 é possível observar alguns materiais e suas respectivas propriedades quando fabricados via a técnica SLM.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas: Fabricação via MA em SLM e MS

Material	Limite de ruptura corpo de prova fabricado em MA SLM (MPa)	Limite de escoamento fabricado em MA SLM (MPa)	Limite de ruptura matéria-prima MS (MPa)
Ti-6Al-4V	1250	1125	1055
Aço inox 15-5PH Tipo 1	1450	1297	1317
Aço inox 15-5PH Tipo 2	1470	1100	1317

Fonte: Adaptado de Yap, *et al.* (2015).

É possível verificar que o limite de ruptura do material fabricado via MA SLM é maior que o fabricado com MS.

Pode-se afirmar que a MAM possui vantagem quando comparada a MS que se caracteriza na possibilidade de integração de componentes e peças promovendo assim uma possível diminuição de massa (GOMES; WILTGEN, 2020).

Algumas pesquisas mostram a redução de até 25% (vinte e cinco por cento) de massa no bico de combustível que antes possuía 20 (vinte) peças soldadas (KOVER, 2018).

A diminuição no uso na quantidade de matéria-prima é uma vantagem competitiva principalmente na aviação e a área aeroespacial por serem quase sempre metais nobres e de custo elevado devido a necessidade de se ter materiais com melhor resistência mecânica.

A MA possibilita a variação da ocupação interna, ou seja, do preenchimento interno das peças, mudanças na definição de espessura mínima, ou mesmo na combinação dos dois ou mais materiais, gerando diminuição de massa nos componentes (GOMES; WILTGEN, 2020).

Dentre as variações do preenchimento interno tem-se duas características que podem ser alteradas, a densidade e a geometria interna do preenchimento, como ilustrado na Figura 11.

No item A existem três tipos de corpos de prova com densidade de preenchimento diferente, enquanto no item B pode-se observar alguns tipos usuais de geometrias internas.

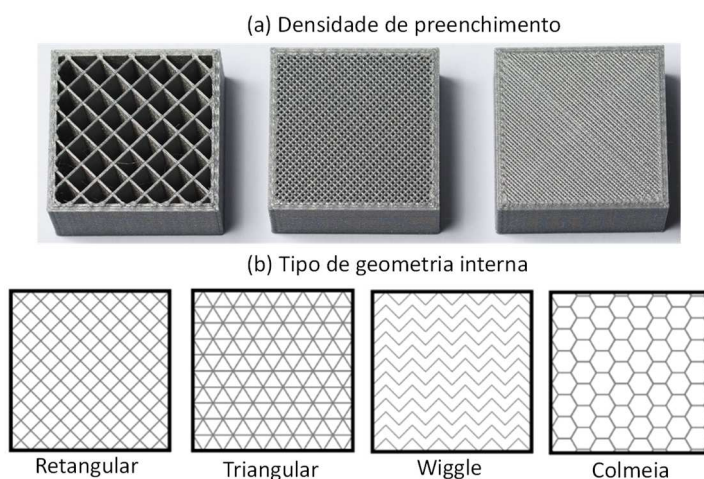


Figura 11 – Corpos de prova com a densidade de preenchimento e tipos de perfis internos em manufatura aditiva  
 Fonte: Adaptado de Perry (2020).

Como exemplo de um componente fabricado em metal pode-se citar a fabricação do *Flap Spar* que está sendo desenvolvido pela Lockheed Martin (ZELINSKI, 2105) para o F35 conforme ilustrado na Figura 12.

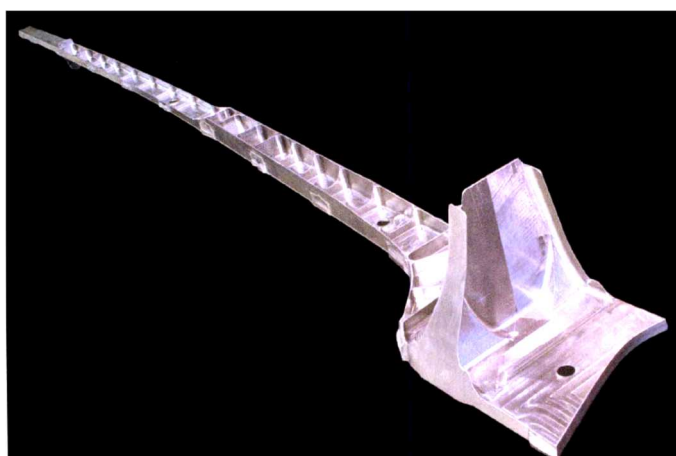


Figura 12 – Fabricação experimental de um Flap Spar do F35  
 Fonte: Zelinski (2015).

No decorrer dessa pesquisa em manufatura aditiva em metais serão apresentadas as três técnicas MAM que possuem resistência estrutural: Fusão em Leito de Pó (PBF), Deposição por Energia Direta (DED) e Jateamento por Enfardamento (BJ) (GOMES; WILTGEN, 2020).

### 3.1 Fusão em Leito de Pó (PBF - Powder Bed Fusion)

Esta técnica consiste na utilização de um feixe de laser ou de elétrons que incidem em um leito de pó metálico promovendo a fusão desta matéria-prima. Uma camada a após a outra vai se fundindo formando o componente desejado (GOMES; WILTGEN, 2020).

Dentro desta técnica existem alguns tipos de tecnologias, tais como, fusão seletiva a laser (SLM *Selective Laser Melting*), fusão por feixe de elétrons (EBM - *Electron Beam Melting*) e sinterização direta de metal a laser (DMLS - *Direct Metal Laser Sintering*).

Na Figura 13 é ilustrada a fabricação de um componente desde o modelo CAD 3D, até a sua fabricação completa através da fusão do pó metálico camada por camada.

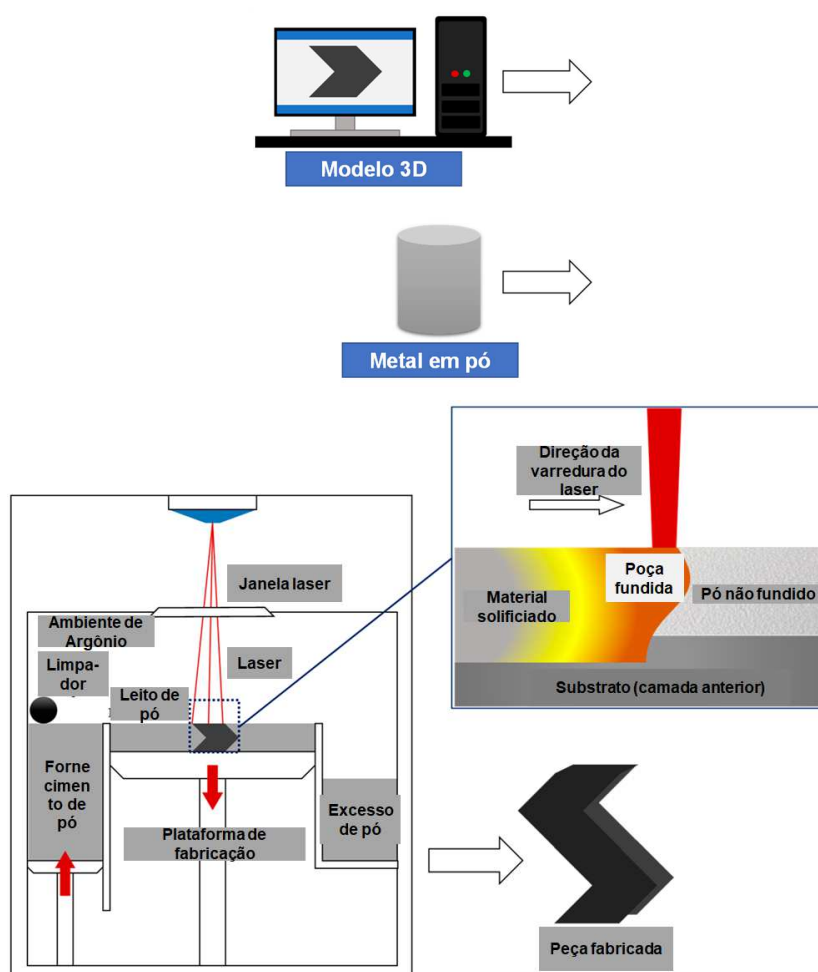


Figura 13 – Funcionamento de MA PBF  
Fonte: Adaptado de Patterson (2017).

### 3.2 Deposição por Energia Direta (DED- Direct Energy Deposition)

A técnica de MA chamada de deposição por energia direta consiste na utilização de laser ou feixe de elétrons que através de um bocal queima o pó ou arames metálicos.

Conforme ilustrado na Figura 14 é possível verificar que diferentemente da técnica PBF, esta plataforma é fixa e não há um leito de pó. A técnica consiste no pó ou arame fundidos e alimentados de forma quase que instantânea no processo, formando o componente camada por camada, ou mesmo, revestindo um componente com uma camada metálica e mesmo na reparação de componentes danificados (THOMPSON, *et al.* 2015).

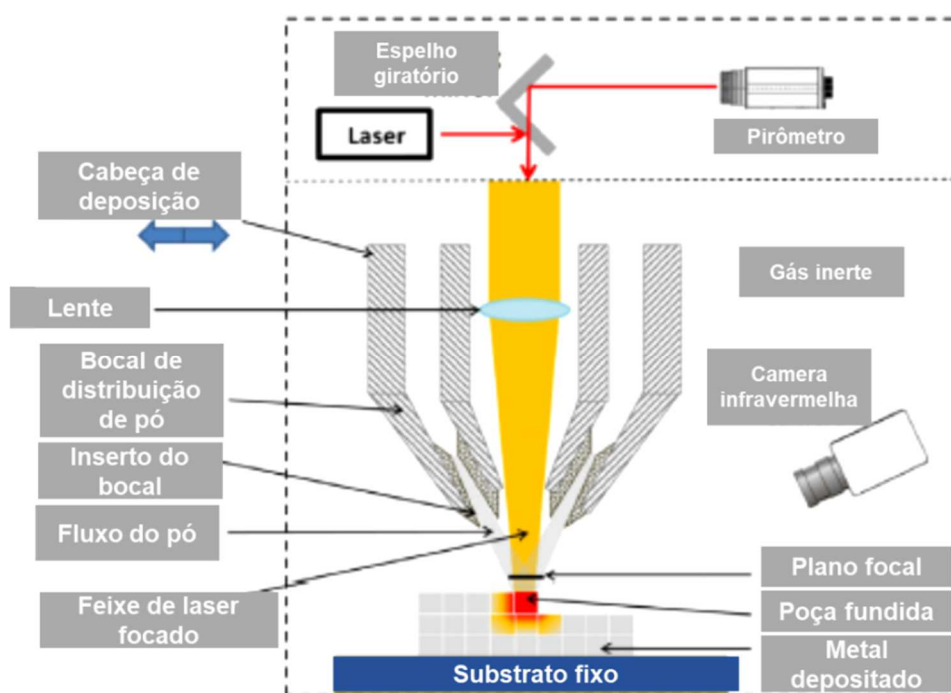


Figura 14 – Funcionamento da MA DED  
Fonte: Adaptado de Thompson, *et al.* (2015).

### 3.3 Jateamento por Enfardamento (BJ- Binder Jetting)

Esta técnica foi desenvolvida no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) sendo chamada de Impressão 3D (3DP - 3D *Printing*) e posteriormente adaptada para a fabricação em metais (GIBSON, *et al.* 2015).

A técnica consiste em lançar um aglutinante em um leito de pó sucessivamente camada por camada formando o componente (GOMES; WILTGEN, 2020).

No caso de metais para a remoção do aglutinante o componente deverá ser pós processado através da operação em um forno. Como desvantagem tem-se a diminuição do tamanho em cerca de 20%, que deverá ser compensada aumentando as dimensões do componente. A Figura 15 ilustra a fabricação de um componente através do BJ.

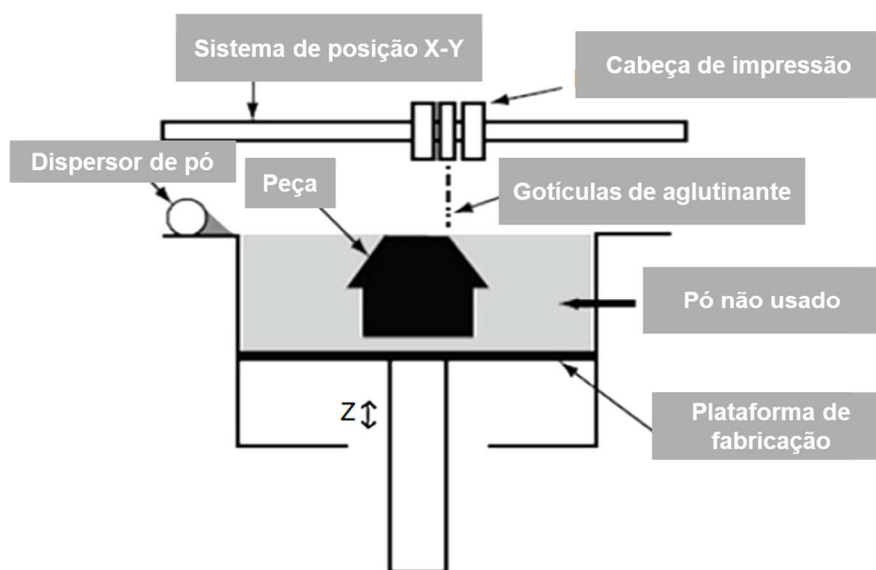


Figura 15 – Funcionamento MA-BJ  
Fonte: Adaptado de Gibson (2015).

## 4 TREM DE POUSO DE AERONAVE

O trem de pouso de aeronave (TDP) é a estrutura responsável pelo deslocamento de um avião durante a sua decolagem e pouso, permitindo que no curso de uma pista de aeroporto, a aeronave obtenha posicionamento (taxiamento), aceleração e desaceleração.

Este componente permite absorver e dissipar a energia durante o pouso, decolagem e no taxiamento de uma aeronave, possuindo também, a função de frenagem e manobras em solo.

O avião 14-Bis de Santos Dumont em 1906 foi o primeiro a possuir em sua estrutura um trem de pouso de aeronave com rodas. Isso provocou uma quebra de paradigma e todas máquinas similares começaram a utilizar este tipo de equipamento (CURREY, 1982).

Os trens de pouso de aeronaves podem ser denominados de acordo com a posição em que são alocados na estrutura da aeronave. Podendo ser classificado como telescópico ou balancim. Quanto a posição do trem de pouso na estrutura do avião, esse pode ser denominado como principal (MLG–*Main Landing Gear*) ou auxiliar (NLG–*Nose Landing Gear*) (CURREY, 1982).

O MLG é o primeiro a ter contato com o solo quando o avião está pousando e o auxiliar além de receber carga de pouso é responsável pelo sistema de direção da aeronave, conhecido como *steering system* (GOMES, *et al.* 2019a).

Os trens de pouso do tipo MLG geralmente são colocados na parte central ou sob as asas das aeronaves, e do tipo NLG geralmente fica localizado na parte frontal da aeronave, próximo ao “nariz” do avião. A Figura 16 ilustra a posição dos tipos de trens de pouso em uma aeronave.





Figura 16 – Trens de pouso de um A380. Notar os dois tipos (modelos) de trem de pouso, o principal (MLG) e o auxiliar (NLG)  
Fonte: Adaptado de Bulté (2020).

Quanto à retratibilidade, os trens de pouso de aeronaves podem ser do tipo fixo ou retrátil (CURREY, 1982), sendo que, o tipo fixo normalmente é utilizado em aviões de pequeno porte, e se mantém estendido, inclusive durante o voo. Porém do tipo retrátil, diferentemente do fixo, é recolhido logo após a decolagem e fica armazenado dentro da carenagem da aeronave. A Figura 17 ilustra a aeronave de pequeno porte em (a) que possui trem de pouso fixo, assim como a aeronave de grande porte em (b) que possui trem retrátil.

A grande vantagem do trem de pouso retrátil está no que se refere ao arrasto aerodinâmico. Enquanto o trem de pouso fixo convive com os efeitos do arrasto aerodinâmico durante todo o voo, o trem de pouso do tipo retrátil é capaz de eliminar a interferência causada pelo arrasto aerodinâmico ao recolher os trens de pouso dentro da baia da aeronave. Isso é uma vantagem, tendo em vista que promove uma economia de combustível que é importante nos custos operacionais para as companhias aéreas.



(a) Trem de pouso fixo



(b) Trem de pouso retrátil

Figura 17 – Tipos de Trens de Pouso: (a) Tipo fixo no modelo Dream Tundra 200 e (b) Tipo retrátil no modelo Boeing 777

Fonte: Adaptado de Dream Tundra, Boeing (2020).

Em relação ao arranjo, o trem de pouso de aeronave varia de acordo com o projeto adotado, tendo em vista a quantidade de rodas e suas posições que proporcionam melhor distribuição de peso. Pode-se observar algumas aeronaves e seus respectivos tipos de arranjo e a quantidade de rodas por trem de pouso de aeronave ilustrados na Figura 18.


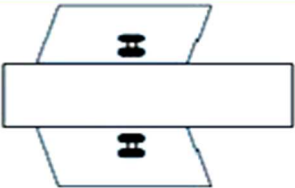


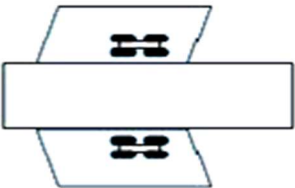


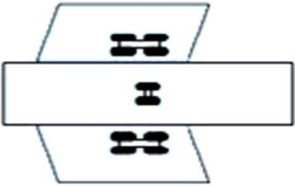


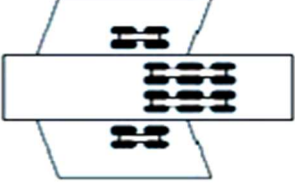


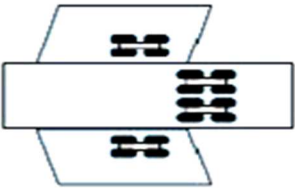

Aeronave	Nariz	Centro	Exemplo
A318, A319, A320, A321			
A300, A310, A330			
A340- 200/300			
A380			
747 Jumbo Jet			

Figura 18 – Tipos de arranjos de trens de pouso de aeronaves  
Fonte: Júnior (2012).

Os trens de pouso de aeronave podem ainda ser classificados de acordo com o tipo de amortecimento. O tipo telescópico possui amortecimento realizado através dos componentes no interior do tubo pistão e perna de força. Entretanto, o do tipo balancim, o amortecimento é realizado através de um componente separado que conecta a perna de força ao balancim. Na Figura 19 são ilustrados esses dois tipos de trens de pouso e é possível notar as diferenças entre eles.

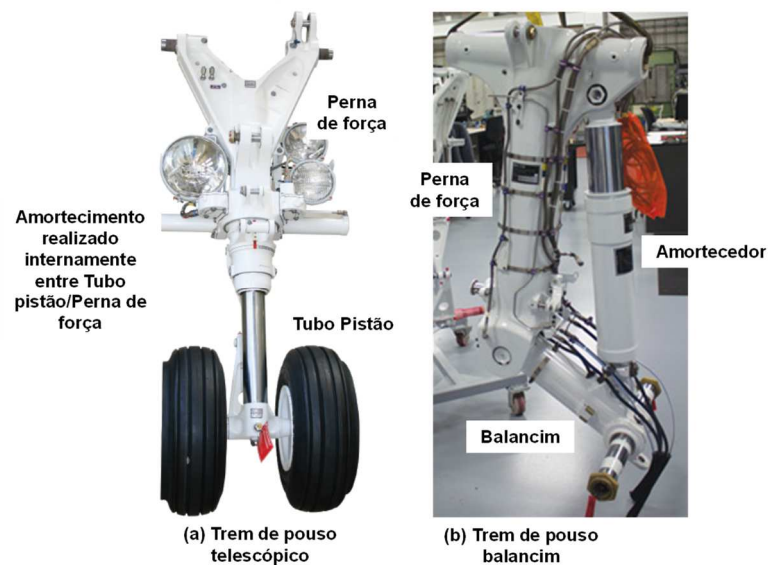


Figura 19 – Tipos de trens de pouso de aeronaves:  
 (a) Tipo telescópico no modelo EMB Legacy 600 e (b) Tipo balancim no modelo EMB145.  
 Fonte: Adaptado de Professional Aircraft (2015) e Duncan Aviation (2015)

O dispositivo trem de pouso é regulamentado por normas específicas quando a aeronave é utilizada para aviação civil os requisitos são severos e atendem ao FAR 25 (DIVAKARAN, *et al.* 2018). No projeto do trem de pouso de aeronave existem muitos desafios, tais como: peso, volume, durabilidade, confiabilidade durante o desenvolvimento. Quando se refere ao peso do dispositivo o desafio é diminuir ao máximo o peso sem comprometer funcionalidade, seu desempenho e resistência mecânica.

Quando se refere ao volume tem-se outro desafio, pois quando o trem de pouso de aeronave é retraído, este deve caber dentro da área designada a qual normalmente é justa para caber o dispositivo, e por fim, quando se refere ao tempo de desenvolvimento, por ser um equipamento que precisa atender muitos requisitos e garantir que manterá sua durabilidade e confiabilidade (DIVAKARAN, *et al.* 2018).

Os principais componentes de trem de pouso após a fabricação devem ser inspecionados não destrutivamente para garantir sua integridade, dentre as inspeções realizadas destacam-se: líquido penetrante, partícula magnética e ataque nital. Este último é realizado nas peças que passam por retífica e essa inspeção serve para verificar se houve sobreaquecimento durante a operação de retífica (GOMES, *et al.* 2019; GOMES *et al.* 2019a).

## 5 AERODINÂMICA

A aerodinâmica pode ser definida como o estudo dos movimentos com as suas interações com fluídos. Relaciona os movimentos relativos às suas propriedades, ou seja, formatos e características geométricas, com as forças que atuam sobre os sólidos imersos neste fluído (MATOS; DIAS, 2007; ANDERSON, 2015).

Arrasto aerodinâmico é definido como uma força de retardo para trás causada por interrupção fluxo de ar ou como a força que resiste ao movimento da aeronave através do ar saliente (FAA *Pilot's Handbook*, 2008).

Existem dois tipos de arrastos: parasita e/ou induzido. O primeiro tipo de arrasto aerodinâmico é o somatório de todas forças que tendem a diminuir o movimento de uma aeronave. Podendo ser do tipo arrasto de forma, ou arrasto de interferência ou arrasto de atrito.

O arrasto aerodinâmico de forma como o próprio nome diz, tem a ver com a forma da geometria e o fluxo do ar que passa ao redor da forma. Como ilustrado na Figura 20 é possível ver o arrasto aerodinâmico de forma em alguns tipos de geometria. Note que quanto mais próximo de um perfil do tipo NACA (Figura 20 - C e D), o fluido passa gerando menos arrasto aerodinâmico, menos ruído acústico, e por consequência menos energia é dissipada.



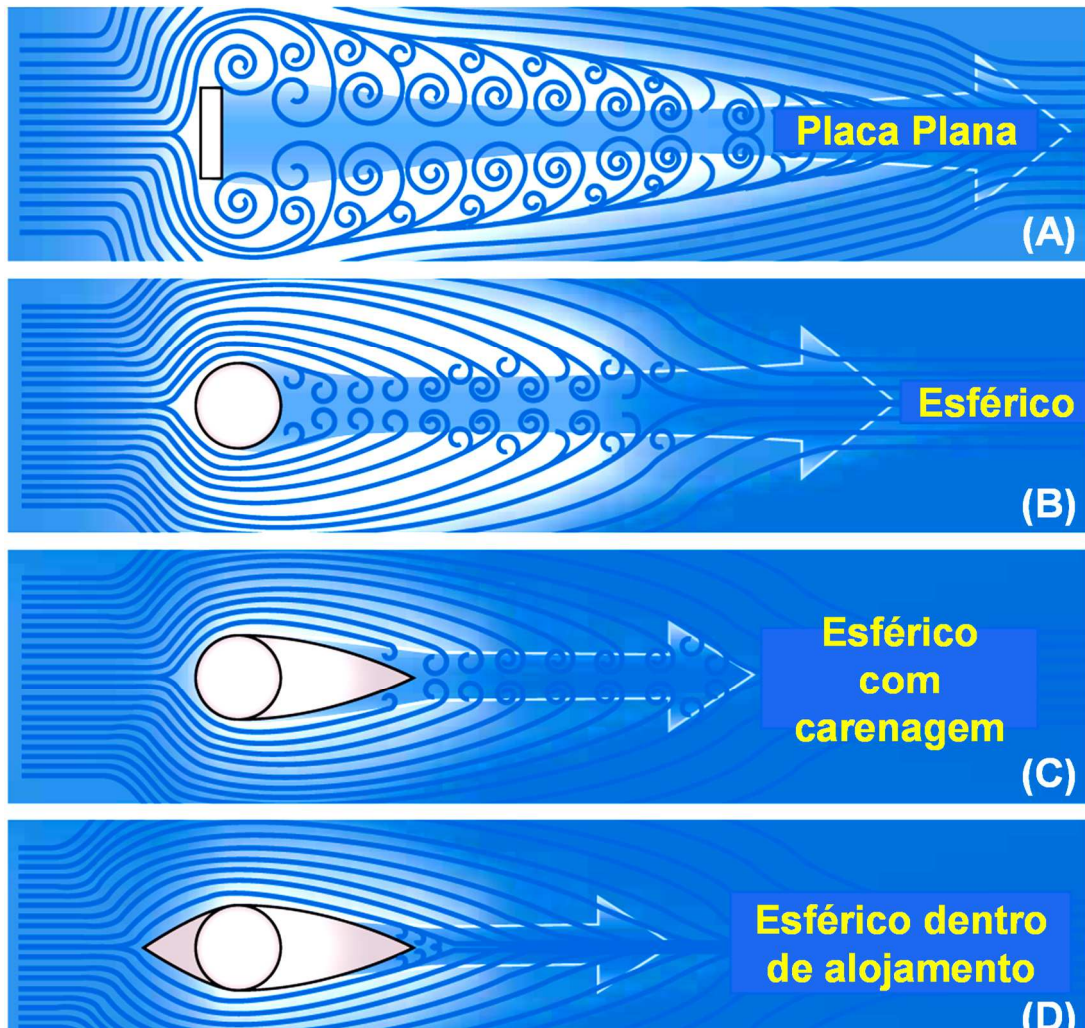


Figura 20 –Tipos de arrasto aerodinâmico conforme a estrutura física.  
 Fonte: Adaptado de FAA *Pilot's Handbook* (2008).

O segundo tipo de arrasto aerodinâmico é o parasita que se subdivide em dois: o obtido devido a interferências e o por fricção. O primeiro ocorre quando há interferências entre as correntes de ar as quais geram correntes parasitas, turbulência, ou há restrição no fluxo de ar.

Na Figura 21 é ilustrada a junção da asa com a fuselagem, o fluxo de ar da fuselagem colide com o fluxo de ar da asa dessa maneira gerando um terceiro fluxo de ar que é denominado de arrasto aerodinâmico parasita.

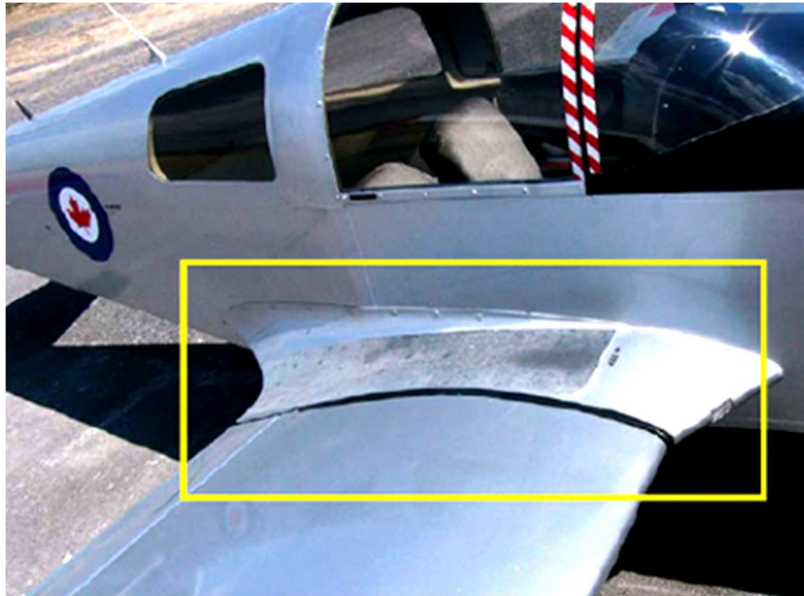


Figura 21 – Efeito de arrasto aerodinâmico parasita por interferência  
Fonte: Adaptado de *Pilot's Handbook* (2008).

O terceiro tipo de arrasto aerodinâmico parasita é o de fricção ou de atrito, gerado pelo contato do fluxo de ar com a superfície do objeto. Como por exemplo, a rugosidade e rebites na superfície que geram este tipo de arrasto aerodinâmico.

O arrasto aerodinâmico induzido é aquele que é formado quando um aerofólio gera sustentação. Quando este aerofólio está gerando a sustentação a pressão na parte superior é menor que a inferior, com isso o fluxo de ar da área de alta pressão tende a ir em direção a de baixa pressão, e no encontro dos fluxos de ar ocorre a tentativa de se igualarem, gerando um fluxo de ar lateral que provoca uma velocidade de rotação que ocasiona vórtices. Esse efeito é típico nas pontas de asas de aeronaves (FAA *Pilot's Handbook*, 2008).

A Figura 22 ilustra a formação de vórtices gerados devido ao arrasto aerodinâmico induzido na ponta de asa de uma aeronave.



Figura 22 – Efeito do arrasto aerodinâmico induzido por uma aeronave  
Fonte: Adaptado de FAA *Pilot's Handbook* (2008).

Os ruídos de aeronaves foram primeiramente interpretados como algo importante na década de 70 do século XX, e o objetivo das pesquisas eram na identificação das fontes de ruído (YONG, *et al.* 2013).

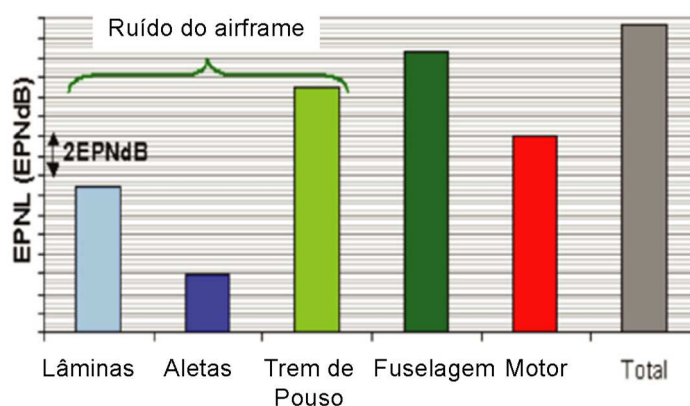
O ruído é considerado como sendo caso de saúde pública pela organização mundial da saúde e diversos especialistas, pois provocam várias doenças (ZHAO, *et al.* 2020).

Por este motivo, as autoridades têm exigido cada vez maior redução no ruído e do arrasto aerodinâmico em aeronaves. Suas fontes são muito estudadas com a finalidade de vir a cumprir exigências de regulamentos para diminuição de ruído em aeronaves.

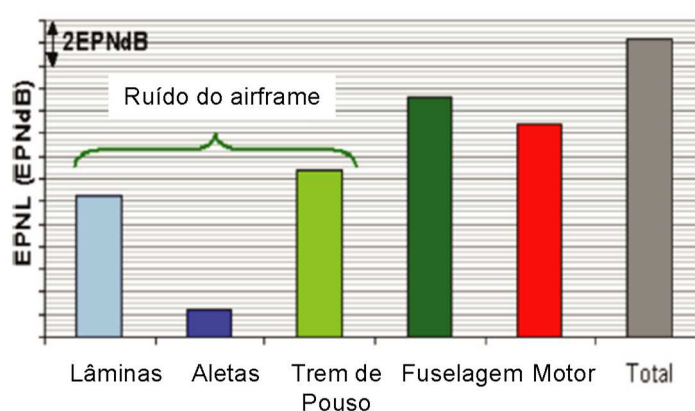
Um dos reguladores de ruídos é a *Advisory Council for Aeronautics Research in Europe* (ACARE) que estipulou como meta até 2050 a redução de ruídos em até 65% (ZHAO, *et al.* 2020).

Conforme ilustrado na Figura 23 pode-se perceber que o trem de pouso de aeronave contribui muito na quantidade de ruído aerodinâmico na aproximação da aeronave para o pouso, e portanto é algo que merece ser estudado e melhorado.





(a) Aeronave de longo alcance



(b) Aeronave de curto alcance

Figura 23 – Ruídos aerodinâmicos de aeronaves na aproximação.

(a) Aeronave de longo alcance (b) Aeronave de curto alcance.

Fonte: Adaptado de Zhao (2020).

Uma das maneiras de reduzir o ruído aerodinâmico é a adoção de carenagens aerodinâmicas em volta dos componentes (ZHAO, *et al.* 2020). Entretanto, com a vantagem da manufatura aditiva é possível projetar geometrias com aspectos aerodinâmicos de menor arrasto, e reservar as carenagens em áreas na qual seja difícil implementar qualquer tipo de manufatura.

Nessa pesquisa cujo o intuito foi de melhorar a aerodinâmica do trem de pouso de aeronave foi desenvolvida uma nova perna de força com o perfil o mais similar possível de um perfil do tipo NACA, com a intenção de diminuir a turbulência e o arrasto aerodinâmicos que são a causa dos ruídos acústicos em aeronaves (BECK, 2010).

Ao avaliar geometrias aerodinâmicas em duas dimensões, devem ser utilizados formatos que representam a seção de determinada asa, chamadas de perfil de asa ou aerofólio (JÚNIOR; COSTA, 2016).

Em 2017 a NASA apresentou um estudo em que simulava os efeitos do ruído acústico aerodinâmico causado pelo trem de pouso de aeronave quando o fluxo de ar colide e circunda nesse dispositivo ocasionando a turbulência ao redor do trem de pouso de aeronave (MINAFRA, 2017).

Devido a necessidade de aprimorar o conhecimento acerca deste fenômeno várias pesquisas têm sido conduzidas com intuito de melhorar e reduzir a incidência deste fenômeno.

A Figura 24 ilustra duas simulações, a primeira simulação (a) realizado pela NASA em que estão incluídos além dos trens de pouso de aeronave do tipo NLG, também há a presença das portas da aeronave, e na segunda simulação (b) no qual o trem de pouso do tipo NLG possui perfil aerodinâmico para redução do ruído (BULTE; REDONNET, 2017).

Ambas simulações utilizam geometrias simples do trem de pouso de aeronave, devido à grande carga computacional necessária para as simulações

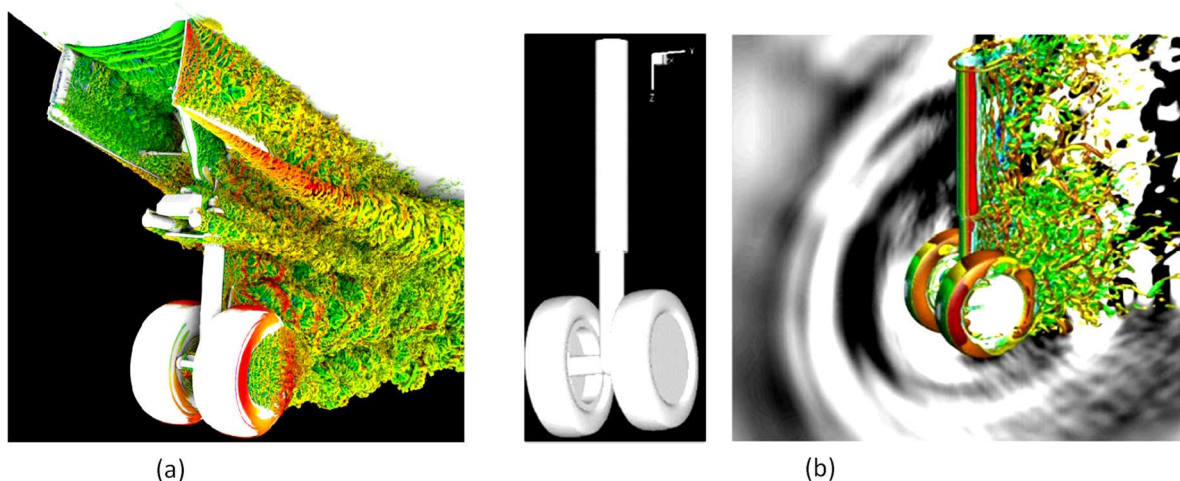


Figura 24 – Arrasto aerodinâmico provocado por trens de pouso do tipo NLG  
(a) Simulação da NASA (MINAFRA, 2017) e (b) Simulação de Bult-Redonnet (BULT, REDONNET, 2017)

Fonte: MINAFRA, BULTEREDONNET (2017).

Na Figura 25 ilustra-se um típico perfil de asa. Notar o bordo de ataque na extremidade dianteira do perfil. E o bordo de fuga na extremidade traseira do perfil.

Além do extradorso ou linha superior do perfil e o intradorso ou linha inferior do perfil. Por fim, a corda linha reta que liga o bordo de ataque ao de fuga.

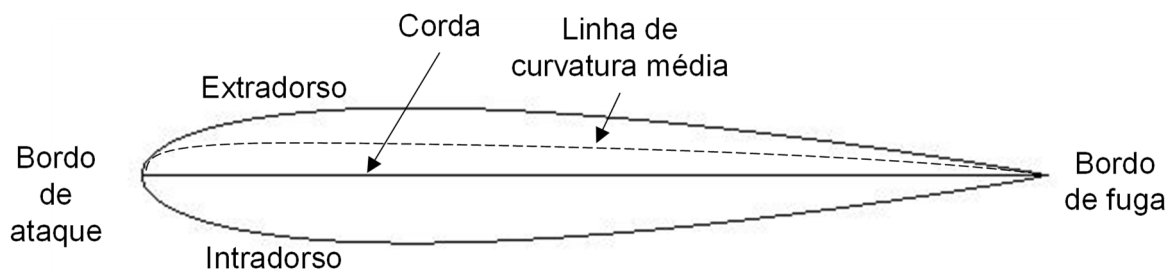


Figura 25 – Características de um perfil de asa  
Fonte: Adaptado de Júnior e Costa (2016)

## 6 DESENVOLVIMENTO

### 6.1 Etapas do Desenvolvimento

A pesquisa realizada nesta dissertação foi desenvolvida conforme ilustrado na Figura 26.

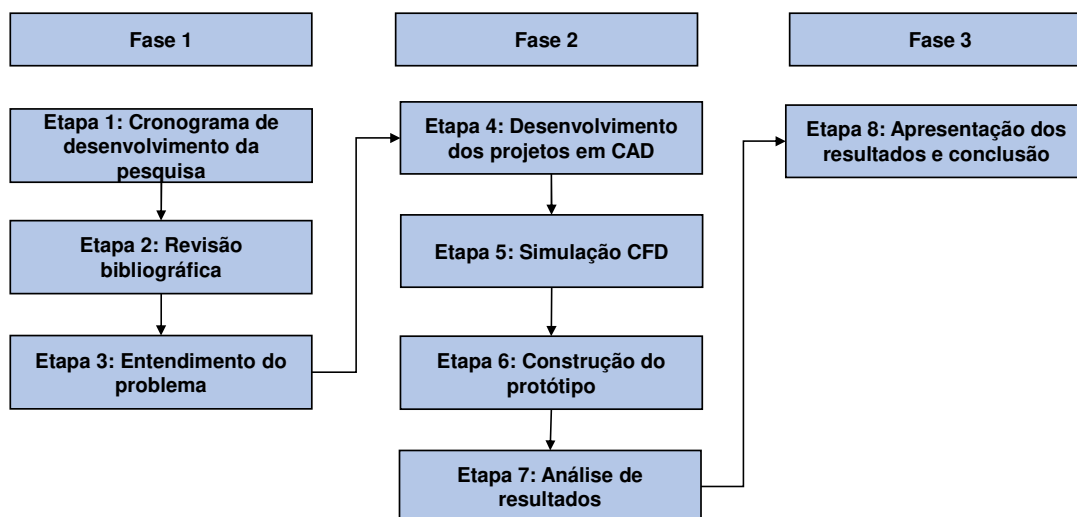


Figura 26 – Etapas do desenvolvimento da pesquisa  
Fonte: Próprio Autor (2020)

#### 6.1.1 Modelo de Trem de Pouso de Aeronave via Manufatura Subtrativa

Para o modelamento do trem de pouso de aeronave via manufatura subtrativa, também chamado de manufatura tradicional, foi concebido um trem de pouso de aeronave do tipo balancim, ou seja, além da perna de força e balancim tem-se o amortecedor que interliga ambos os componentes para formar o trem de pouso.

De maneira simplificada este tipo de trem de pouso de aeronave tem como principais componentes as seguintes peças: eixo de roda, pino pivô, perna de força, pino de articulação, e por fim, o balancim, conforme ilustrado na Figura 27.

No projeto desse trem de pouso de aeronave foi baseado no suposto ponto de fixação dos pinos pivôs na aeronave, a partir disso, e com a definição do tipo de trem de pouso de aeronave os componentes foram desenvolvidos.

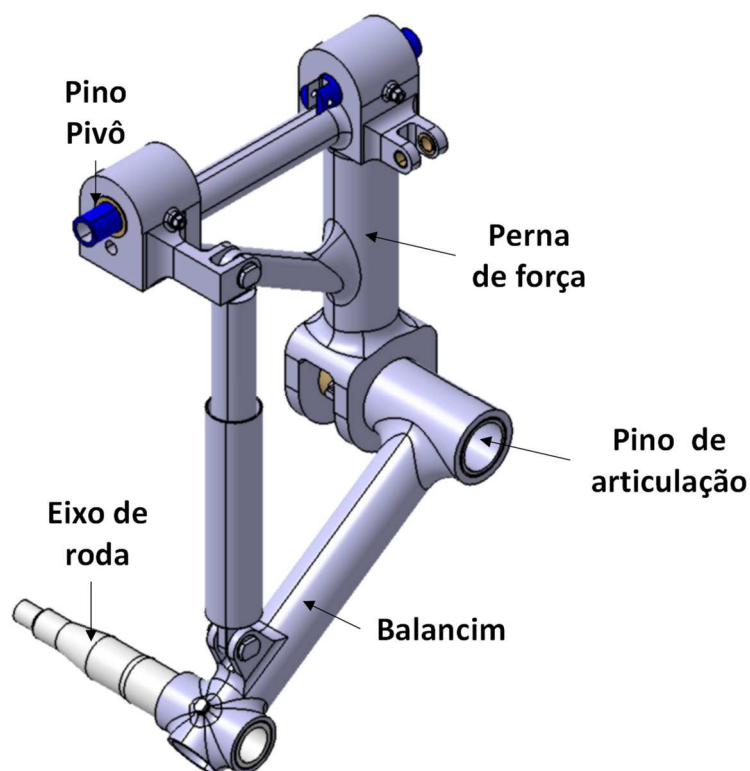


Figura 27 – Principais partes que compõe um trem de pouso de aeronave do tipo balancim  
Fonte: Próprio Autor (2020)

Esse trem de pouso por não ser integrado necessita de buchas normalmente feitas de ligas de bronze e alumínio nas interfaces entre componentes para evitar desgaste e corrosão. Entretanto, isto aumenta muito a quantidade de componentes utilizados em um trem de pouso de aeronave.

Além disso, para promover a fixação e travamento entre peças são necessários componentes extras como *crossbolts*, arruelas, porcas, e se for avião comercial além disso serão necessárias de porcas autofrenantes com cupilhas para garantir duplo travamento na fixação.

Na interface entre o balancim e o eixo da roda utiliza-se buchas de ligas de bronze e alumínio, ou de aço inox, além de *crossbolt*, porca, arruela e buchas entre balancim-*crossbolt*, *crossbolt*-eixo da roda, ou seja, são muitos os componentes extras necessários para fixar estes dois componentes (balancim e eixo de roda).

Tendo em vista o objetivo deste estudo o trem de pouso de aeronave do tipo MLG foi concebido para a MS, e o resultado dos modelos 3D em CAD são ilustrados da Figura 28 até a Figura 32, no qual podem ser vistas as principais dimensões deste trem de pouso.

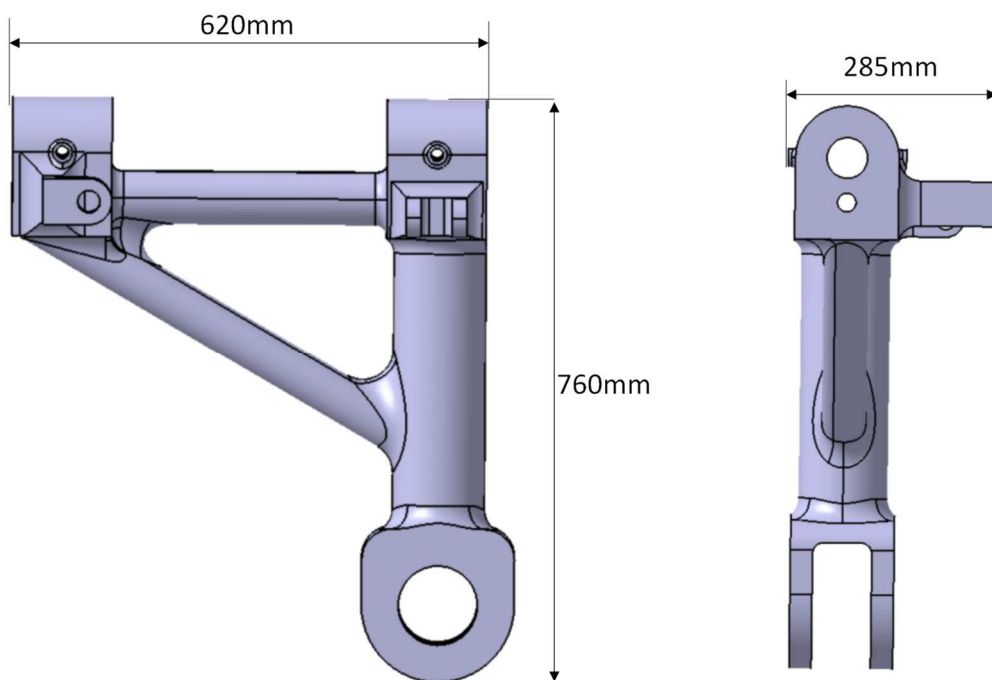


Figura 28 – Dimensões da perna de força do trem de pouso de aeronave construído com a manufatura subtrativa  
Fonte: Próprio Autor (2020)

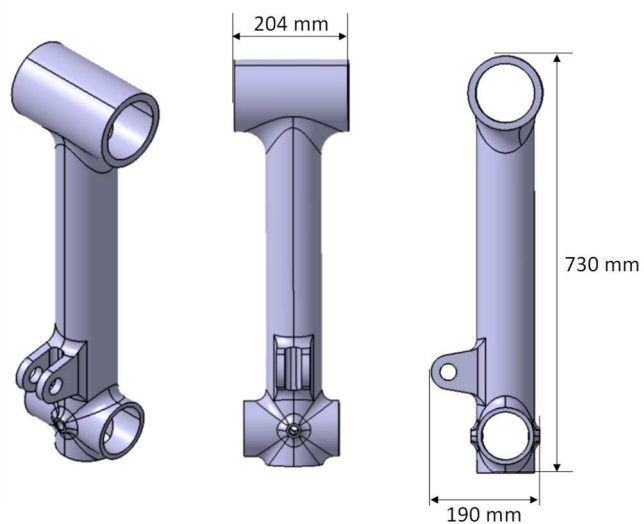


Figura 29 – Dimensões do balancim do trem de pouso de aeronave construídos via manufatura subtrativa  
Fonte: Próprio Autor (2020)

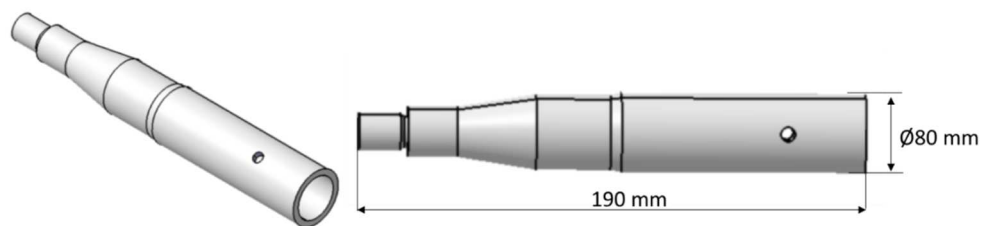


Figura 30 – Dimensões do eixo de roda do trem de pouso de aeronave construídos via manufatura subtrativa

Fonte: Próprio Autor (2020)



Figura 31 – Dimensões do pino pivô do trem de pouso de aeronave construídos via manufatura subtrativa

Fonte: Próprio Autor (2020)

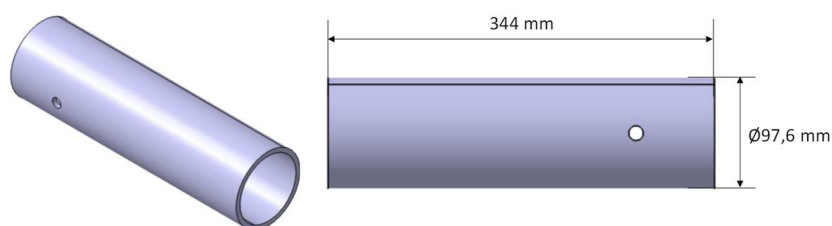


Figura 32 – Dimensões do eixo de articulação do trem de pouso de aeronave construídos via manufatura subtrativa

Fonte: Próprio Autor (2020)

Após a finalização do projeto em manufatura subtrativa foi feita a lista de peça contendo as principais informações acerca de cada componente com a quantidade, os nomes, as massas e o tipo de matéria-prima. Esses dados podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Lista de peça trem de pouso de aeronave do tipo balancim construído em manufatura subtrativa.

Quantidade	Peças e Componentes	Massa Unitária (g)	Massa por TDP (g)	Tipo de Matéria-Prima
1	Munhão	101.894	101.894	Aço
1	Balancim	21.209	21.209	Aço
1	Eixo de Roda	7.194	7.194	Aço
1	Luva Bucha Balancim	1.444	1.444	Bronze_Al
2	Pintle Pin	1.671	3.342	Aço
2	Buchas Eixo da Roda	164	327	Bronze_Al
2	Buchas balancim cb	19	38	Bronze_Al
2	Luvras crossbolt	3	6	Bronze_Al
1	Crossbolt Eixo da Roda	152	152	Aço
1	Porca Eixo da Roda	22	22	Aço
1	Arruela Eixo Roda	1	1	Aço
1	Bucha Eixo Munhão	488	488	Bronze_Al
2	Bucha Eixo Munhão	94	189	Bronze_Al
1	Eixo Balancim Munhão	4.656	4.656	Aço
1	Crossbolt Eixo Munhão	153	153	Aço
1	Porca Eixo Munhão	22	22	Aço
1	Arruela Eixo Munhão	1	1	Aço
4	Bucha Crossbolt PP	49	196	Bronze_Al
2	Bucha Pintle Pin	412	824	Bronze_Al
2	Crossbolt PP	201	402	Aço
2	Arruela PP Crossbolt	1	2	Aço
2	Porcas Crossbolt Pintle Pin	23	45	Aço
<b>TOTAL</b>	<b>34 peças</b>	<b>~140.000</b>	<b>~143.000</b>	

Fonte: Próprio Autor (2020).

### 6.1.2 Modelo de Trem de Pouso de Aeronave via Manufatura Aditiva

No modelamento do trem de pouso de aeronave baseado na manufatura aditiva buscou-se a máxima integração de componentes com a finalidade de diminuir a quantidade de componentes e aprimoramento da geometria aerodinâmica do perfil para reduzir o arrasto e ruído.

A Figura 33 ilustra os principais componentes que foram projetados para serem fabricados através da MA, tais como, o pino pivô, a haste e a perna de força integrada ao eixo de roda.



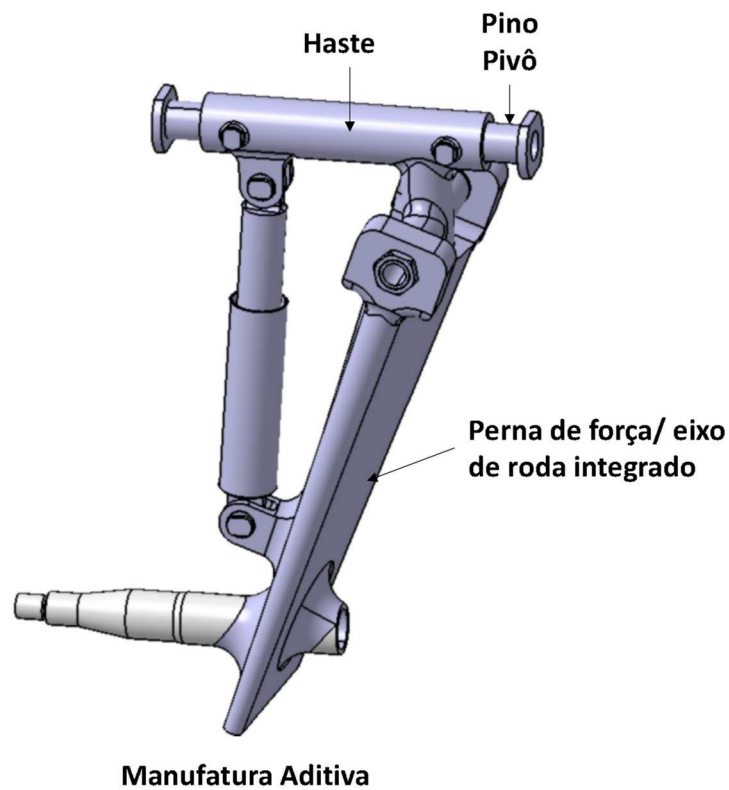


Figura 33 – Principais componentes do trem de pouso de aeronave construídos via manufatura aditiva

Fonte: Próprio Autor (2020)

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, aproveitando-se das facilidades construtivas promovida pela MA no desenvolvimento de perfis complexos.

Seguindo estes preceitos, foi possível desenvolver um trem de pouso com um perfil NACA (similar ao de uma asa) na perna de força e portanto, um perfil que produz menos turbulência, além disso foi feita a integração de componentes da perna de força integrada ao eixo de roda. O resultado desta integração e do perfil aerodinâmico estão ilustrados juntos com suas principais dimensões na Figura 34.

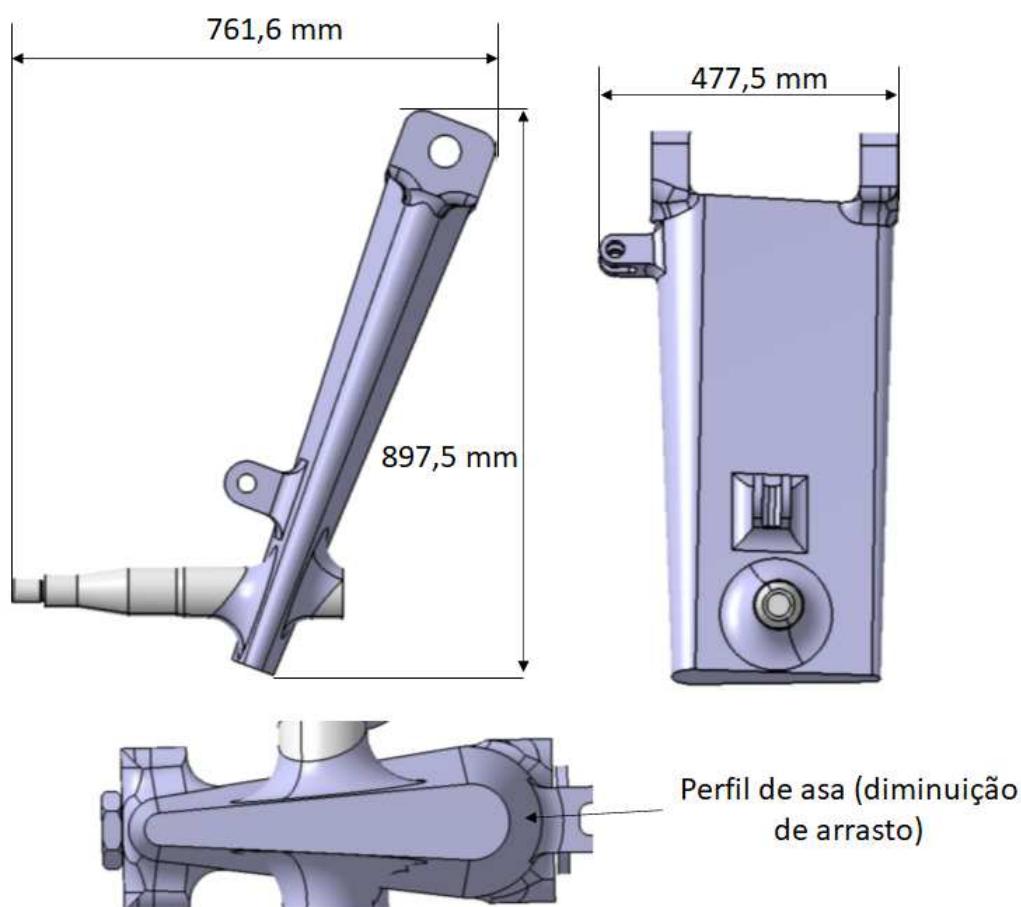


Figura 34 – Perfil aerodinâmico aplicado a perna de força e eixo de roda integrados em peça única via manufatura aditiva.  
 Fonte: Próprio Autor (2020)

Outra vantagem da MA é a possibilidade de variar diversos tipos de parâmetros para aumentar ou diminuir o peso do componente. Diferentemente da manufatura subtrativa que para reduzir o peso necessita de usinagem e obrigatoriamente furação, rasgos, perfis de alívio de peso, a manufatura aditiva pode variar na fabricação a ocupação interna de preenchimento de matéria-prima. Podendo tanto escolher a forma geométrica da estrutura de ocupação interna (Exemplo a forma geométrica do tipo colmeia - *honeycomb*), quanto a densidade de preenchimento interno (*infill*) que pode variar de zero a 100% de matéria-prima.

Outro parâmetro que pode ser utilizado na MA é a possibilidade de definir espessuras das paredes de um componente, isto gera a possibilidade de manter o interno oco e ou com uma densidade de preenchimento, mas sempre mantendo uma espessura mínima de parede para a peça.

Para testar a melhor opção no projeto da perna de força integrada aerodinâmica foram desenvolvidas cinco versões diferentes, na qual foi feita a variação do preenchimento interno em cada peça.

Na primeira versão o componente é completamente maciço (100% de ocupação interna com matéria-prima), enquanto nas outras versões houve variação na densidade de ocupação do preenchimento interno.

Em todas as cinco versões de peças a espessura mínima de parede foi de 8mm com a intenção de garantir a rigidez mínima necessária.

Na última versão de número V5, foi realizada uma estratégia diferente identificando as regiões mais importantes para os esforços mecânicos, e nestas o preenchimento interno foi de 100% de matéria-prima e as regiões menos susceptíveis a esforços mecânicos o preenchimento interno foi de 0% (zero), ou seja, vazio.

Na Figura 35 estão ilustradas as cinco versões de TDP com suas respectivas variações na densidade de ocupação interna como proposto na pesquisa.

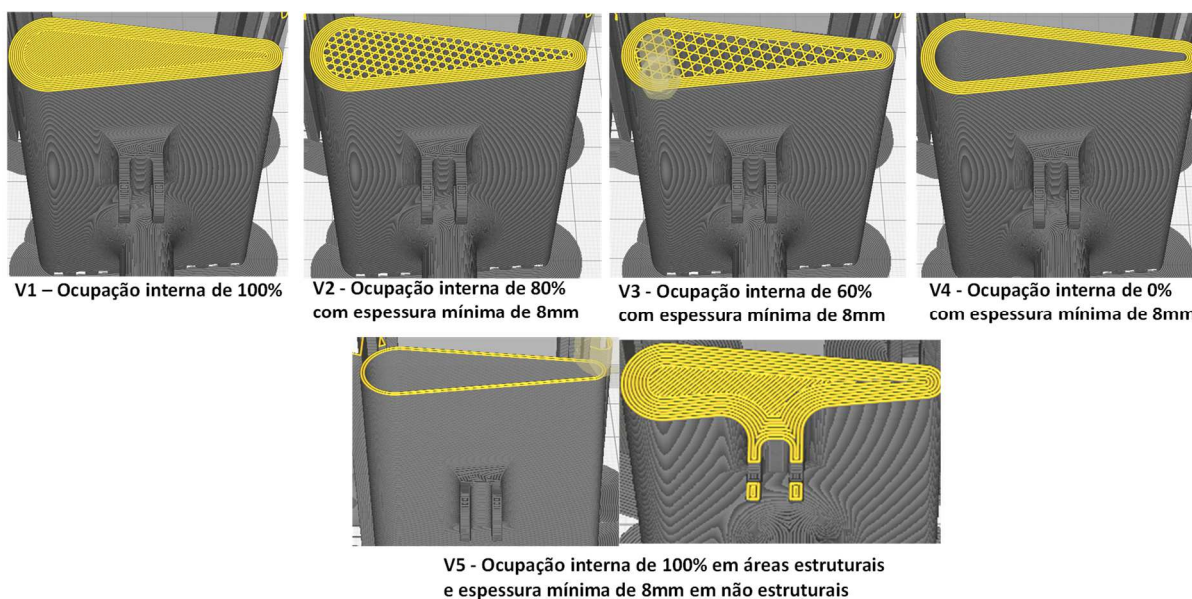


Figura 35 – Variação da ocupação interna das peças (cinco diferentes versões) com perfil aerodinâmico via manufatura aditiva.

Fonte: Próprio Autor (2020)

Uma vez definida a peça principal deste estudo, foram desenvolvidos outros dois componentes que fazem parte da estrutura principal, a haste integrada e pino pivô. Ambos estão ilustrados com suas principais dimensões nas Figura 36 e Figura 37.

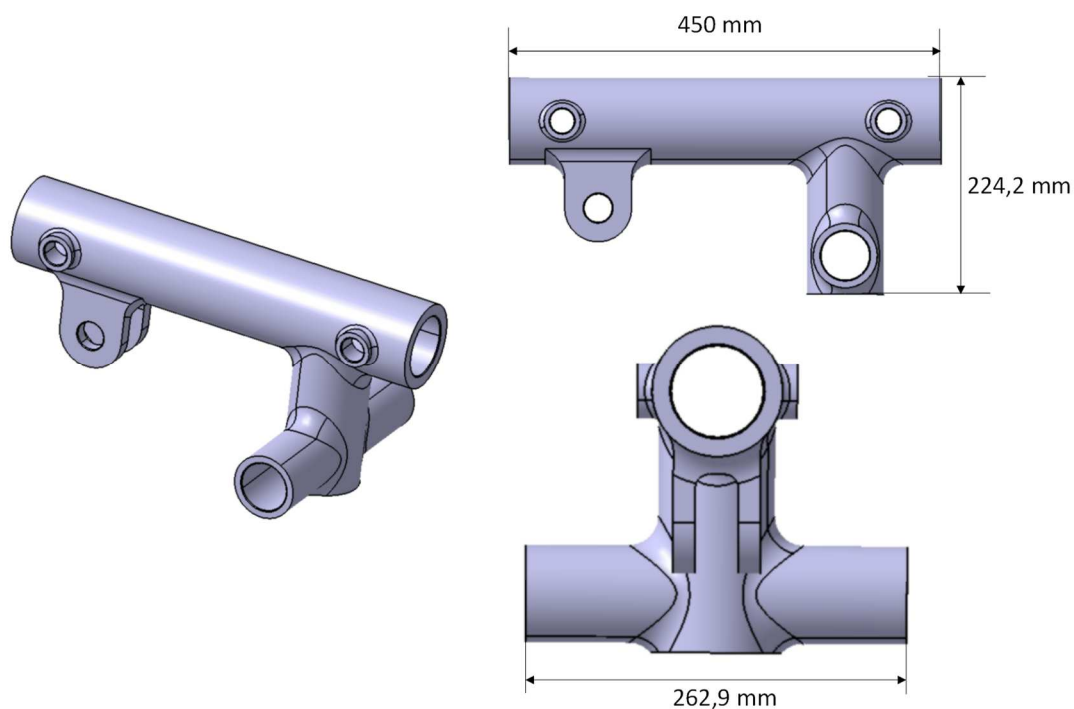


Figura 36 – Desenvolvimento da peça haste integrada.  
Fonte: Próprio Autor (2020)

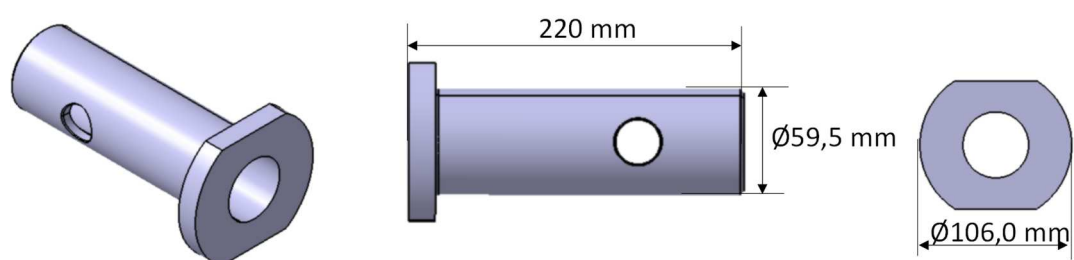


Figura 37 – Desenvolvimento da peça pino pivô.  
Fonte: Próprio Autor (2020)

Ao finalizar o projeto do trem de pouso de aeronave via manufatura aditiva foi feita uma lista de peças contendo todos os componentes, com suas respectivas massas, assim como as matérias-primas. Essa lista pode ser visualizada na Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 – Lista de peça trem de pouso de aeronave via manufatura aditiva

Quantidade	Peças e Componentes	Massa Unitária (g)	Massa por TDP (g)	Tipo de Matéria-Prima
1	V1- Perna de força/eixo de roda Maciça	~110.333	~110.333	Titânio
2	Pintle Pins	2.249	4.499	Aço
1	Pino	2.632	2.632	Aço
2	Crossbolt	360	719	Aço
4	Luvax	31	124	Bronze_Al
2	Porcas Crossbolt	23	45	Aço
4	Buchas Pino	210	839	Bronze_Al
4	Arruela	1	3	Aço
1	Porca Pino	215	215	Aço
1	Haste Integrada	9.306	9.306	Titânio
1	V2 - Perna de força/eixo de roda 80% infill - espessura 8mm	~105.005	~105.005	Titânio
1	V3 - Perna de força/eixo de roda 60% infill - espessura 8mm	~79.428	~79.428	Titânio
1	V4 -Perna de força/eixo de roda 0% infill (vazia) - espessura 8mm	~31.471	~31.471	Titânio
1	V5 -Perna de força/eixo de roda híbrido0% infill na região não estrutural e 100% de infill na região estrutural	~71.990	~71.990	Titânio
<b>Total de componentes (por versão)</b>	<b>22 peças</b>			

Fonte: Próprio Autor (2020).

Tabela 4 – Massa total por versão de trem de pouso de aeronave via manufatura aditiva

Versões do trem de pouso	Massa total (g)
Versão V1	~128.716
Versão V2	~123.387
Versão V3	~97.810
Versão V4	~49.853
Versão V5	~90.372

Fonte: Próprio Autor (2020).

## 6.2 Simulação em CFD (Fluido Dinâmica Computacional)

Para a avaliação do comportamento aerodinâmico dos dois modelos de trem de pouso de aeronave foi utilizado o programa ANSYS *Discovery Live* 2020 R1 *Academic Version*. Esta versão tem suas limitações por se tratar de uma versão para estudantes, entretanto, para o propósito desta pesquisa ele se adequou perfeitamente.

Dentro do ANSYS *Discovery Live* existe a opção de simulação CFD de túnel de vento, como ilustrado na Figura 38.



Figura 38 – Interface do ANSYS *Discovery Live* – Simulação CFD em túnel de vento.  
Fonte: Próprio Autor (2020)

Uma vez selecionado o tipo de simulação a ser realizada é feita a importação do modelo CAD. Após este procedimento alguns parâmetros devem ser configurados na análise como, por exemplo, o plano ou direção em que fluido se movimentará em relação ao plano de referência. No caso desta pesquisa optou-se pelo fluxo vindo na direção X positiva. Por padrão do programa de simulação a velocidade do fluido é de 1m/s. Entretanto, para a simulação nos dois trens de pouso a velocidade utilizada devido a velocidade da aeronave foi de 100m/s. Demais parâmetros ficaram conforme o padrão do programa de simulação, e foram gerados automaticamente. A Figura 39 ilustra o passo a passo da inserção dos dados no programa.

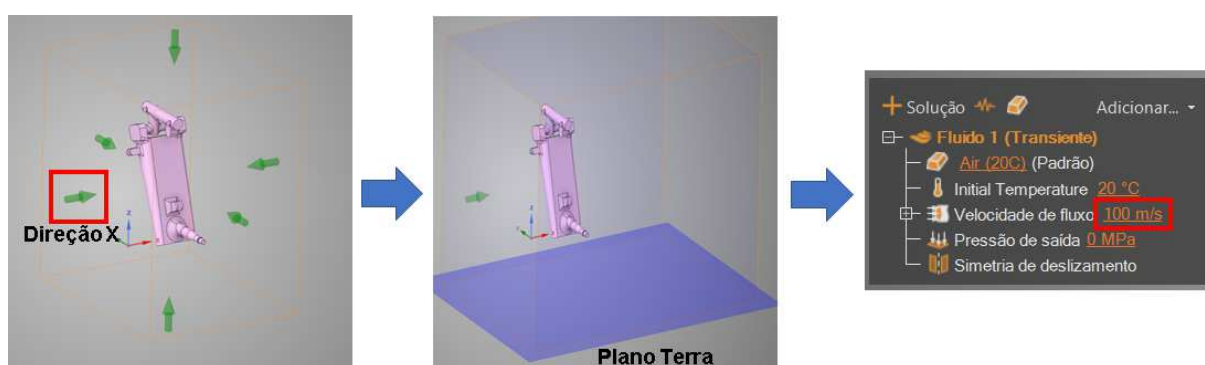


Figura 39 – Passo a passo para simulação CFD.  
Fonte: Próprio Autor (2020)

Finalizado os ajustes de parâmetros de simulação, o resultado obtido da simulação é apresentado como uma visualização do fluxo de ar por entre as partes do trem de pouso.

A exibição visual é obtida através dos vetores e das partículas esféricas, assim sendo, é necessário criar filtros, pois na configuração padrão os componentes ficam submersos entre esferas e vetores e não é possível distinguir visualmente o fluxo pelos componentes, conforme ilustrado na Figura 40.

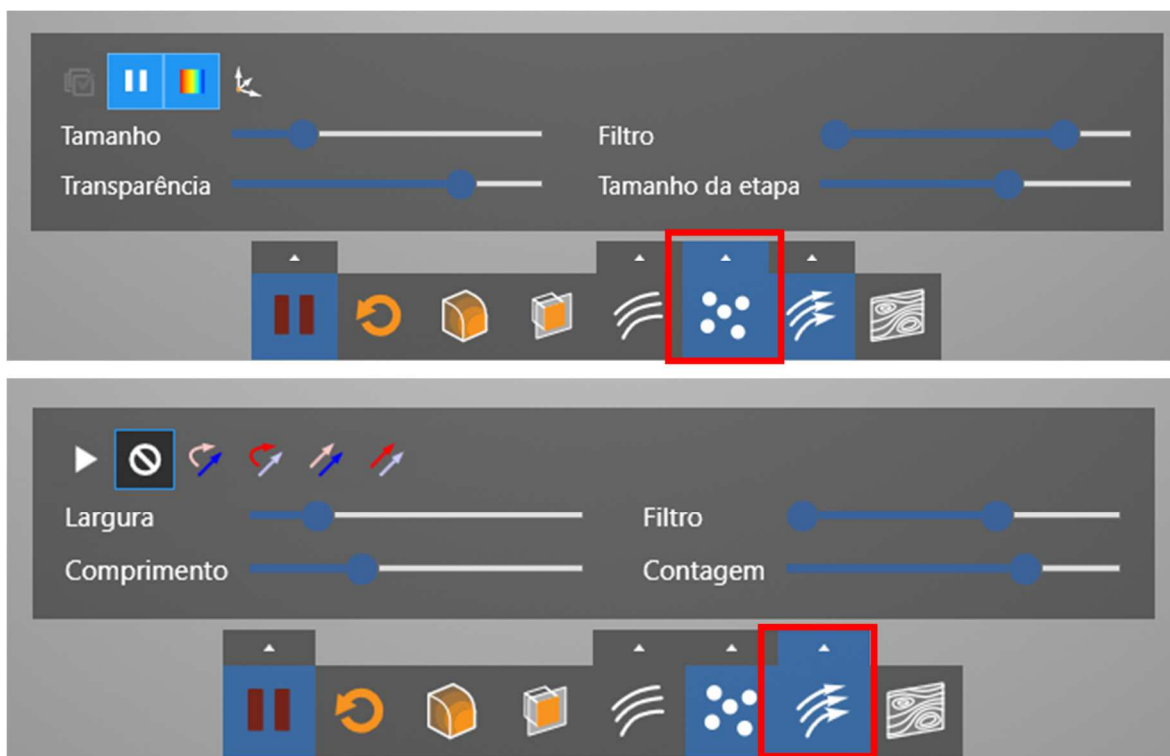


Figura 40 – Parâmetros de configuração da simulação CFD.  
Fonte: Próprio Autor (2020)

Os resultados das simulações serão apresentados no Capítulo 7 dessa dissertação.

### 6.3 Protótipo do Trem de Pouso de Aeronave via MA

Após a finalização dos projetos em 3D CAD foi realizada a simulação em CFD e a próxima etapa da pesquisa foi a construção de um protótipo em escala reduzida de um trem de pouso de aeronave (GOMES; WILTGEN, 2019).

O modelo 3D CAD foi reduzido para uma fração do tamanho original, em seguida convertido para um arquivo com extensão STL. Os arquivos STL produzidos por sistemas de modelagem 3D contêm representação de faceta triangular de superfícies e tornaram-se entradas de dados padrão de prototipagem rápida e

sistemas de manufatura (SZILVASI-NAZY, 2003). Simplificando primeiramente o modelo é feito em um CAD e em seguida ele é dividido em diversos triângulos criando uma malha com a intenção de representar uma geometria de uma forma matemática mais simplificada computacionalmente, isso é realizado quando o arquivo STL é desenvolvido (SZILVASI-NAZY, 2003).

Para facilitar a construção do protótipo do trem de pouso de aeronave via manufatura aditiva em plástico, foi utilizado um modelo 3D em peça única, incluindo parafusos, porcas e o sistema de amortecimento, como ilustrado na Figura 41.

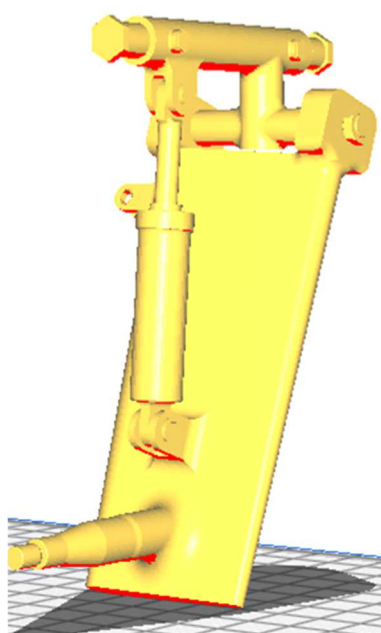


Figura 41 – Modelo em 3D CAD do protótipo do trem de pouso de aeronave com modificações aerodinâmicas e em peça única.  
Fonte: Próprio Autor (2020)

Nas Figura 42 a Figura 44 estão ilustrados o protótipo em escala reduzida do trem de pouso de aeronave. Nessas figuras é possível observar os principais componentes como por exemplo, o eixo de roda integrado a perna de força.

Além disso foi impresso também o amortecedor que faz interface entre a perna de força e a haste integrada, desta maneira todo o conjunto do trem de pouso de aeronave foi confeccionado dando a real noção de como o produto em escala real ficaria.





Figura 42 – Protótipo em MA do trem de pouso de aeronave integrado e com perfil aerodinâmico  
Fonte: Próprio Autor (2020)

Com a impressão do protótipo foi possível verificar cada componente individualmente, por exemplo, a perna de força e eixo da roda visualmente atingiu o propósito de integrar componente e eliminar os componentes que fariam interface entre eles. A perna de força ficou com o perfil desejado semelhante a uma asa, a haste integrada e pinos pivôs complementam os principais componentes do dispositivo também alcançaram os seus objetivos que no caso é o de fixação do dispositivo em uma aeronave.



Figura 43 – Protótipo em MA do trem de pouso de aeronave integrado e com perfil aerodinâmico  
Fonte: Próprio Autor (2020)



Figura 44 – Protótipo em MA do trem de pouso de aeronave integrado e com perfil aerodinâmico  
Fonte: Próprio Autor (2020)

Além disso, ao analisar o protótipo é possível verificar possíveis melhorias em algumas regiões. Como por exemplo, aumentar a distância entre o eixo da roda e olhal de fixação do amortecedor, estudar em como aumentar o ângulo do eixo da roda e a parte aerodinâmica da perna de força, todas essas melhorias com o intuito de garantir uma maior tolerância de fabricação.

O protótipo do trem de pouso de aeronave foi fabricado com a utilização do polímero biodegradável ou também chamado de biopolímero, Poli Ácido Lático (PLA). Esse tipo de material é obtido a partir de fontes renováveis como milho, mandioca, beterraba e cana-de-açúcar. É versátil, de fácil utilização, com boa resistência mecânica, além de ser ecologicamente correto devido a sua biodegradabilidade. Tem sido altamente utilizada nas impressões em MA devido ao custo-benefício.

## 7 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados da pesquisa. Primeiramente, serão apresentados os resultados do modelo CAD, em especial as diferenças concernentes a quantidade de componentes e peso total dos conjuntos do trem de pouso de aeronave, estas informações podem ser verificadas na Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 – Comparativo de Redução de Peças Manufatura Aditiva x Manufatura Subtrativa

<b>Diferença na Quantidade de Componentes</b>	<b>Unidades</b>	<b>Redução de Peças (%)</b>
nº de peças em Manufatura Subtrativa - nº de peças em Manufatura Aditiva	12	35,3%

Fonte: Próprio Autor (2020).

Tabela 6 – Comparativo de Redução de Massa Manufatura Aditiva x Manufatura Subtrativa

<b>Diferença na Massa em MS x MA</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Redução de Massa (%)</b>
Massa MS – MassaV1 MA	~13.894	9,7%
Massa MS – MassaV2 MA	~19.222	13,5%
Massa MS – MassaV3 MA	~44.799	31,4%
Massa MS – MassaV4 MA	~92.756	65,0%
Massa MS – MassaV5 MA	~52.238	36,6%

Fonte: Próprio Autor (2020).

Ao comparar a MA e MS foi possível constatar uma redução considerável na quantidade de componentes na ordem de 35% (trinta e cinco por cento) ou em números absolutos de 12 (doze) peças, isto ocorreu por conta da integração de componentes. Outra diferença a se levar em conta é a redução no peso total do conjunto de trem de pouso de aeronave, pois em todas as versões de TDP via MA apresentadas nesta pesquisa, houve redução de peso considerável, esta variação foi de 9 a 65% (nove a sessenta e cinco por cento), dependendo da versão escolhida, o que em números absolutos gerou uma redução de até 93 kg (noventa e três quilogramas).

Fazendo uma síntese da análise das cinco versões da perna de força pode-se afirmar que:

- *A versão V1 do componente é a mais robusta e resistente quando comparada as outras versões, entretanto, tem a desvantagem de pouca redução de massa quando comparada a MS, aproximadamente 14 kg.*
- *A versão V2 do componente optou-se por definir uma espessura mínima de parede de oito milímetros, e o preenchimento interno de oitenta por cento. Esta versão é resistente, robusta e obteve uma redução maior de massa de aproximadamente 19kg. Entretanto, esta versão é menos resistente do que a V1;*
- *A versão V3 possui a espessura mínima de parede de oito milímetros e o preenchimento interno de sessenta por cento, neste caso houve uma redução substancial de massa com relação a MS, aproximadamente 45kg e quando se comparada as outras versões de MA também houve grande diminuição de massa.*
- *A versão V4 possui a espessura mínima de parede de oito milímetros e o preenchimento interno de zero por cento, ou seja, o componente é oco. Nesse caso houve maior redução de massa, aproximadamente 93kg, por outro lado perdeu rigidez mecânica e robustez.*
- *A versão V5, é um componente híbrido, maciço em áreas mais requisitadas estruturalmente e outro sem preenchimento interno, ou seja, oco. Esta versão atingiu a redução de peso na ordem de 52kg.*

Ainda comparando os dois modos de fabricação MS e MA pode-se afirmar que com a MA obteve-se um projeto menos complexo e mais simples de montar. Como houve integração de componentes, não houve necessidade de componentes que fixam e fazem interface entre peças (buchas, *crossbolts*, porcas, arruelas entre outros).

Além disso, uma possível vantagem da integração de componentes é a diminuição da corrosão galvânica pelo fato de não haver interface/contato entre peças fabricadas com materiais diferentes.

Quanto a matéria-prima na MS a maior parte dos componentes são em aço, na MA houve a troca de matéria-prima para titânio nos componentes mais relevantes e aço para componentes menores. A escolha do titânio deve-se a duas características: a primeira devido a sua alta maturidade nos processos de fabricação via MA, e a

segunda, por sua alta resistência mecânica, podendo-se aliar peças mais leves com alta resistência.

Com relação a forma de reduzir peso dos componentes pode-se afirmar que a MS tem ainda algumas outras dificuldades, pois são necessárias várias operações de usinagem com os chamados alívios de peso.

Devido a necessidade de redução de peso são necessárias operações de usinagem, muitas vezes de difícil acesso devido a profundidade, além de aumentar em muito a quantidade de horas de usinagem e em máquinas normalmente diferentes.

Estes alívios de peso foram implementados no modelo simulado para MS. A Figura 45 ilustra as furações para alívio de peso em (a) perna de força e (b) balancim.

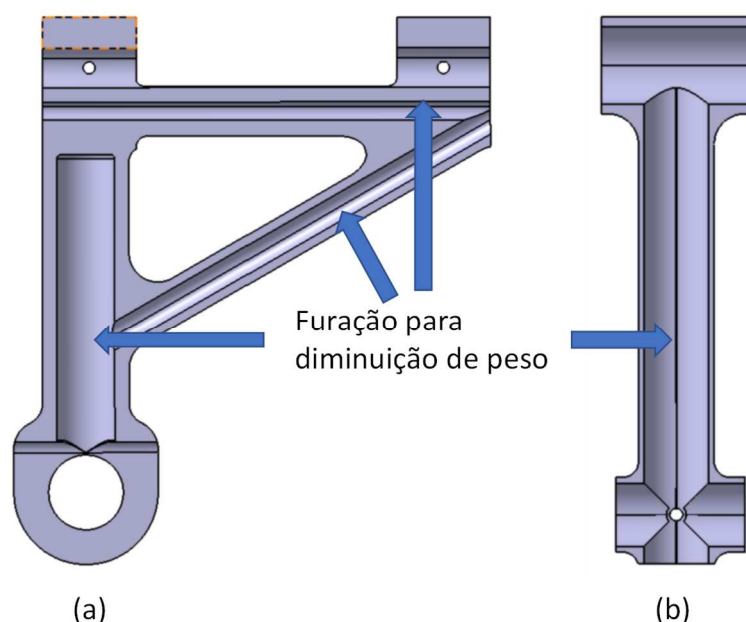


Figura 45 – Interno de componentes com alívio de peso:  
(a) Perna de força, (b) Balancim  
Fonte: Próprio Autor (2020)

Na fabricação via MS existem diversas restrições construtivas diferente do que ocorre na MA que permite o desenvolvimento de peças quase sempre sem estas restrições de fabricação.

Acredita-se que seria possível fabricar a perna de força integrada também na MS. É claro que seriam necessárias muitas horas de usinagem com variação de posição em diversos eixos de usinagem e necessariamente seria necessário muito mais massa de matéria-prima levando a grande perda de material, o que não é sustentável.

Na opção de forjamento seriam necessárias operações de usinagem para melhorar acabamento. Nestas duas opções de fabricação tradicional as peças seriam maciças. Se fosse necessário reduzir a massa seria preciso muitas operações de furações e desenvolvimento de perfis de alívio de peso em regiões pouco exigidas estruturalmente, o que provavelmente a tornariam inviáveis de fabricar.

Quanto ao objetivo de redução de ruído e arrasto aerodinâmico, a perna de força foi concebida com o perfil de asa (NACA) para que houvesse menos arrasto e ruído, na Figura 46 estão ilustradas três vistas para que se possa verificar o perfil aerodinâmico visualmente.

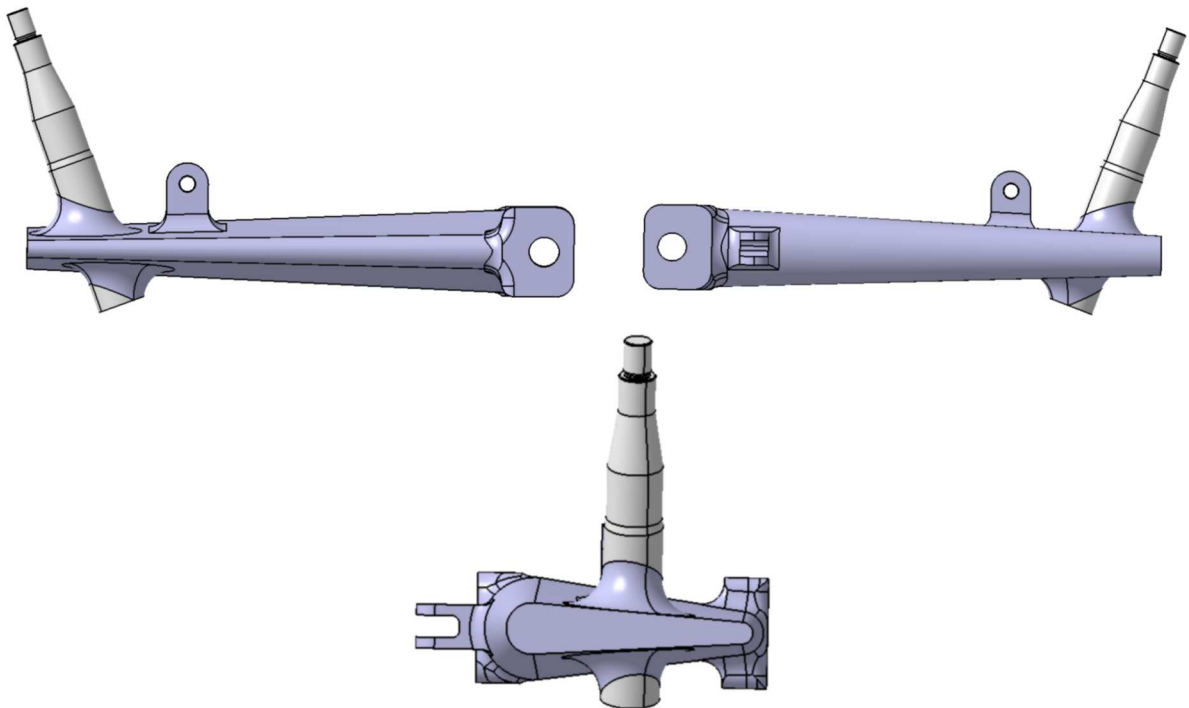


Figura 46 – Perfil aerodinâmico da perna de força:  
Fonte: Próprio Autor (2020)

O desenvolvimento da simulação CFD foi feita em um computador portátil da marca DELL com as seguintes características:

- *Modelo: G3 P75F*
- *Sistema operacional: Windows 10 64bits*
- *Processador: Intel i7 2.2GHz*
- *Memória RAM: 16GHz*
- *Disco rígido: 914Gb*
- *Placa de vídeo: NVIDIA Geforce GTX 1050 Ti 12Mb de memória*

Além disso, o desenvolvimento da análise e pós processamento do resultado foi realizado através do programa ANSYS *Discovery Live 2020 R1 Academic Version*.

Após a inserção de dados referentes a simulação em CFD (citadas no Capítulo 6) no modelo o computador levou ~15 minutos para processar e apresentar os resultados. Esta versão do programa tem limitações quanto a quantidade de componentes permitidos, número de faces das peças, e a simulação realizada é bem mais simples quando comparada a uma feita em um programa com a versão completa, que sem dúvidas seria mais detalhada e mais precisa. Entretanto, para o propósito dessa pesquisa a versão de estudante atende os requisitos mínimos, pois nela é possível verificar as características aerodinâmicas de cada um dos dispositivos propostos.

A análise aerodinâmica dos trens de pouso realizada através de simulação CFD obteve os resultados que estão ilustrados da Figura 47 até a Figura 50. No decorrer dessas figuras é possível observar os comportamentos aerodinâmicos dos trens de pouso de aeronaves fabricado via MS e MA.

Como se pode perceber o fluxo de ar no trem de pouso de aeronave via MS provocou uma turbulência maior, percebe-se ainda que no disposto via MA o ar fluiu de maneira mais suave, ou seja, com menos vórtices e menos arrasto devido ao seu perfil aerodinâmico.

A Figura 47 ilustra o resultado da simulação em uma vista frontal (plano xz) no qual é possível observar em (a) o resultado para o modelo de trem de pouso de aeronave via manufatura subtrativa e em (b) o resultado via manufatura aditiva.

Na Figura 47 (a) é ilustrado o resultado da simulação da MS e é possível verificar que a parte superior o fluxo de ar é menos turbulenta quando comparada ao restante do comportamento do dispositivo.

Na Figura 47 (b) é ilustrado o resultado da simulação da MA no qual é possível visualizar que a parte superior no qual está localizada a haste integrada e na parte inferior na região de eixo da roda há uma pequena turbulência, mas que não impede o comportamento laminar do fluxo de ar quando comparado a MS.

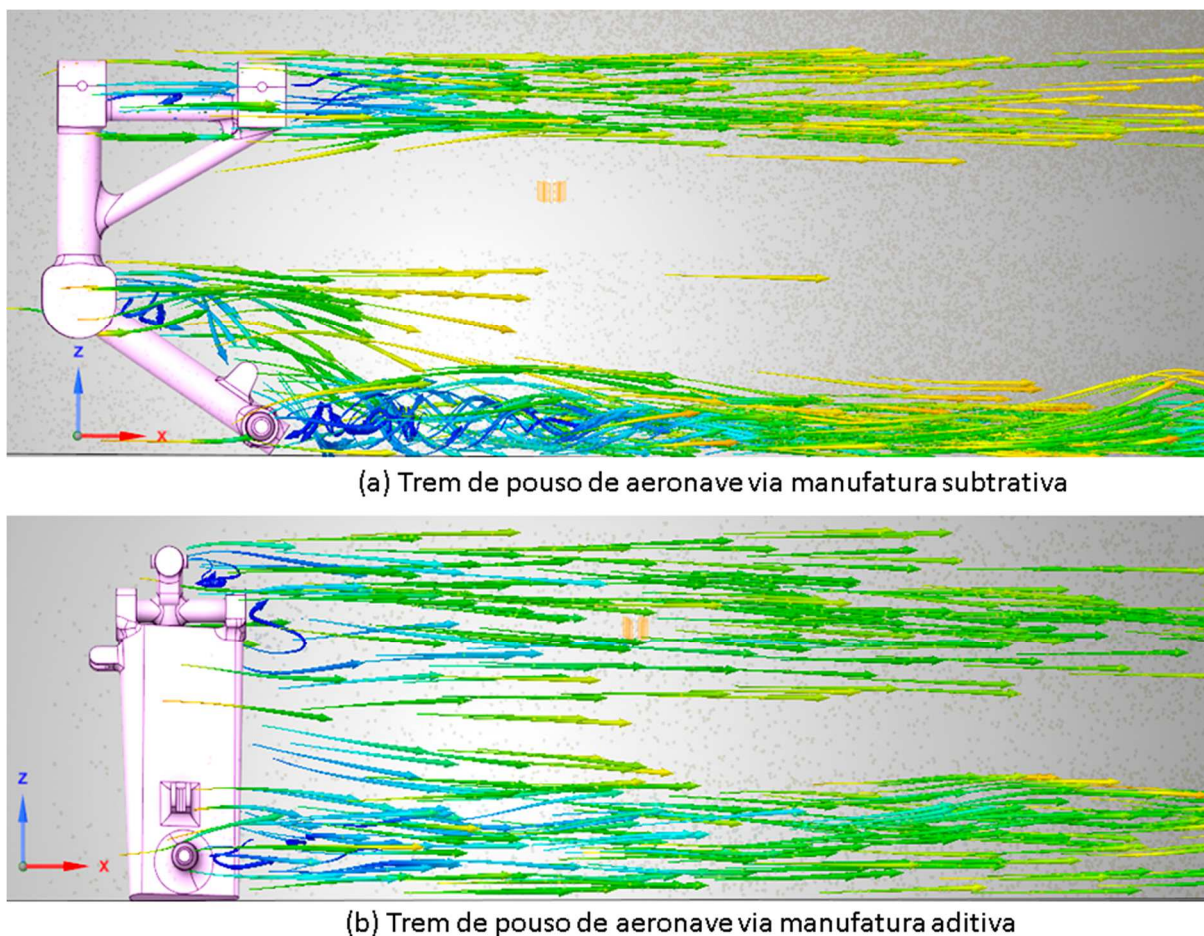


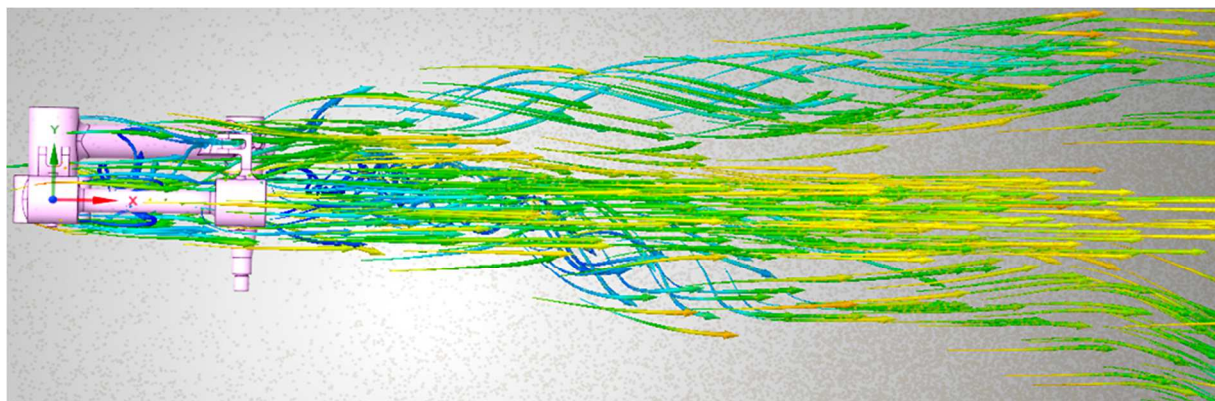
Figura 47 – Resultado da simulação CFD apresentando a vista frontal  
 (a) TDP MS, (b) TDP MA.  
 Fonte: Próprio Autor (2020)

Na Figura 48 é ilustrado o resultado da simulação na vista de cima (plano xy) e em (a) tem-se TDP via MS enquanto em (b) tem-se o TDP via MA.

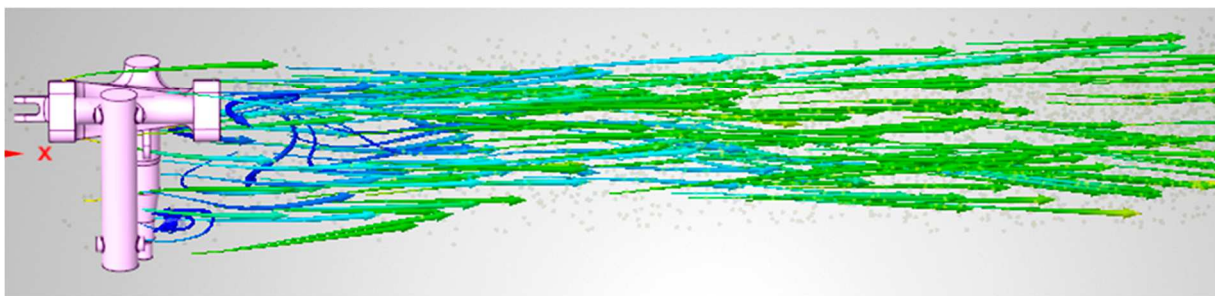
É possível verificar que o TDP via MS ilustrado na Figura 48 (a) provoca uma alteração no fluxo de ar no qual há um grande “espalhamento” do ar, ou seja, a região de perturbação do fluxo de ar que causa um comportamento não laminar é bem maior do que aquele ilustrado na Figura 47 (a).

O trem de pouso via manufatura aditiva ilustrado na Figura 48 (b) possui turbulência na região da haste integrada e eixo da roda, menor que aquela gerada pelo trem de pouso via MS (Figura 48 (a)), em contrapartida é possível verificar que nas outras regiões o fluxo de ar é quase laminar. Assim sendo, é visível que o perfil aerodinâmico foi realmente importante para reduzir o arrasto aerodinâmico que causa a turbulência e o ruído acústico.





(a) Trem de pouso de aeronave via manufatura subtrativa



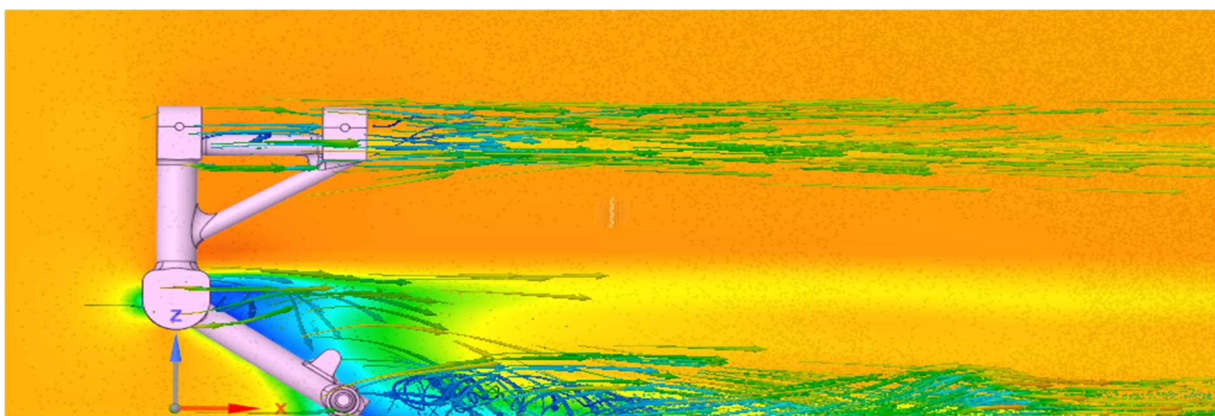
(b) Trem de pouso de aeronave via manufatura aditiva

Figura 48 – Resultado da simulação CFD apresentando a vista de cima.

(a) TDP MS, (b) TDP MA.

Fonte: Próprio Autor (2020)

Na Figura 49 está ilustrado o trem de pouso de aeronave via MS, em que foi realizado um corte no plano xz na região central do balancim para observar o efeito da turbulência e o arrasto aerodinâmico provocado por esse tipo de geometria



(a) Trem de pouso de aeronave via manufatura subtrativa – corte balancim

Figura 49 – Resultado da simulação CFD. TDP MS corte balancim.

Fonte: Próprio Autor (2020)

Semelhantemente na Figura 50 foi realizado um corte no plano xz na região aerodinâmica do trem de pouso via manufatura aditiva. Nessa abordagem foi possível verificar que a turbulência na região do eixo da roda e da haste integrada é menor quando comparada a Figura 49 que ilustra o trem de pouso via MS.

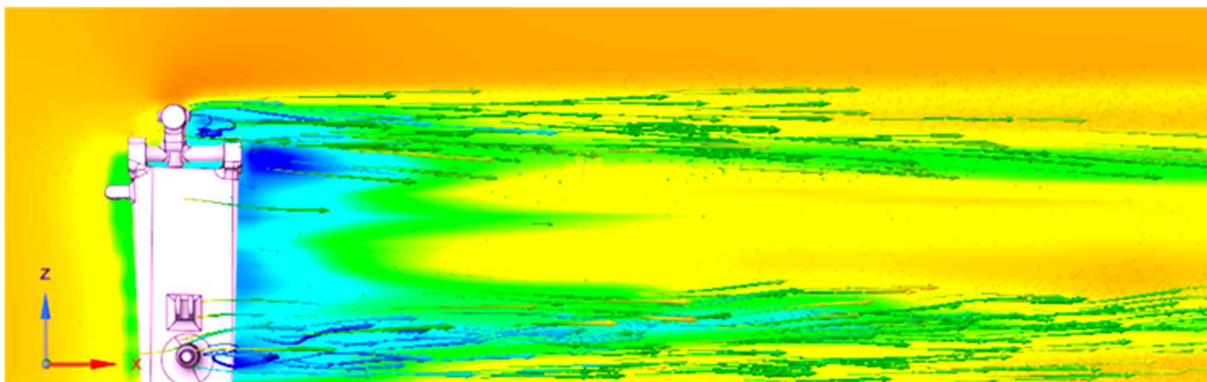


Figura 50 – Resultado da simulação CFD. TDP em MA com o corte da peça integrada  
Fonte: Próprio Autor (2020)

Todas as análises de resultados da simulação CFD o fluxo de ar vai da esquerda para direita, ou seja, na direção do eixo x positivo conforme descrito no Capítulo 6 dessa pesquisa.

Conforme visualizado em todas as imagens da simulação CFD fica evidente que ambos modelos geram turbulência no fluxo de ar. Nota-se também, que o modelo integrado, e com perfil aerodinâmico construído em MA obteve êxito em reduzir o arrasto e turbulência aerodinâmica se comparado com o modelo via MS com perfis e geometrias tradicionais de trens de pouso de aeronaves.

É fato que a eliminação total da turbulência, ruído acústico e arrasto aerodinâmico não são possíveis, tendo em vista que mesmo uma superfície favorável aerodinamicamente, ainda assim, terá regiões de perturbação ao fluxo de ar. Fica claro que a adoção de um perfil aerodinâmico no corpo da perna de força do trem de pouso construído em MA melhorou o comportamento do fluxo do ar pelo componente e desta maneira contribuiu para melhorar a aerodinâmica do trem de pouso.

## 8 CONCLUSÃO

Compreender as mudanças nas formas de manufatura que serão implementadas na indústria de aeronáutica e aeroespacial em um futuro próximo, assim como, a possibilidade de integrar partes e modificar as formas geométricas dessas partes com a finalidade de obter melhorias aerodinâmicas, é importante para a evolução da indústria.

Os resultados apresentados nessa pesquisa, corroboram com as expectativas da comunidade científica com relação a adoção da manufatura aditiva, como candidata promissora e de relevância para o desenvolvimento industrial futuro.

É possível notar que de acordo com os resultados apresentados nessa pesquisa que a construção de trens de pouso de aeronaves via manufatura aditiva, quando comparada a manufatura subtrativa, obteve resultados positivos para a utilização da manufatura aditiva na construção deste subsistema da aeronave.

Houve a redução de número de partes, ou seja, a integração de partes, e também, foram apresentadas partes que obtiveram significativa redução de massa. É claro ainda com as mudanças geométricas para favorecer a aerodinâmica, com redução de arrasto, turbulência e de ruído acústico.

Para os projetos futuros de trem de pouso de aeronave, assim como, em outras peças metálicas será necessária a mudança de metodologia na concepção de projetos, desenvolvendo geometrias complexas e fabricadas via a manufatura aditiva em 3D.

As simulações em CFD ajudaram na comparação e na visualização dos resultados, e dos efeitos ocorridos em cada tipo tecnologia de fabricação sob o efeito da aerodinâmica. É fato que a possibilidade de construir partes integradas e aerodinamicamente favoráveis ao vôo como na manufatura aditiva em 3D, tiveram substancial impacto nos resultados favoráveis dessa pesquisa.

Outro fator importante, e que cabe maior investigação científica, é que a integração de componentes diminuiu o número de interfaces metálicas diferentes, o que pode eventualmente diminuir o efeito da corrosão galvânica. Efeito este que ocorre sempre que existe contato entre metais diferentes.

Pode-se afirmar que atualmente é uma realidade a adoção de peças metálicas fabricadas via manufatura aditiva em diversos setores industriais, em especial na indústria aeroespacial e aeronáutica corroborando com a investigação científica da mesma para elaboração e construção de partes de aeronaves.

No atual momento histórico a manufatura aditiva é uma aliada a manufatura subtrativa e manufatura formativa.

Existem muitos desafios financeiros e tecnológicos para serem ultrapassados para que a manufatura aditiva venha a ser aplicada em larga escala na indústria. Entretanto, isso promoverá mais pesquisas e inovações nesse extenso caminho da manufatura humana.

Desenvolvimentos futuros da manufatura aditiva provavelmente provocarão o surgimento de inovadores projetos de trens de pouso de aeronaves para serem partes integrantes e constantemente presentes nas futuras aeronaves.

E por fim como continuidade natural desta pesquisa existe a possibilidade de imprimir o trem de pouso em titânio, e para validação estrutural do componente realizar pesquisas referente a testes estático e de fadiga. Pode-se ainda pesquisar o perfil aerodinâmico do componente através do ensaio em um túnel de vento, desta maneira seria possível não só avaliar o atual perfil, bem como aperfeiçoá-lo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCALDE, E.; WILTGEN, F. Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro, **Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté**, Taubaté, v24(2), pp. 12-20, 2018.

ANDERSON, J. D. **Fundamentos de Engenharia Aeronáutica**, 7ª Ed., Nova York:McGraw-Hill Education, 2015. p. 944.

BECK, P. A. **Análise Metodológica de Simulações de Escoamentos Turbulentos Sobre Seções de Perfis Aerodinâmicos**, 2010, 138 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFRGS, Porto Alegre, 2010.

BOEING 777 **Air Team Images**, 2020. Figura, Disponível em: <[www.airteamimages.com/photo/](http://www.airteamimages.com/photo/)>. Acessado em: 01 de junho de 2020.

BOURELL, D. L. Perspectives on Additive Manufacturing, **Annual Review of Materials Research**, Austin, v46, pp. 1-18, 2016.

BULTE, J.; REDONNET, S. Landing Gear Noise Identification Using Phased Array with Experimental and Computational Data, **AIAA Journal**, Châtillon, v55(11), pp. 3839–3850, 2017.

CAVALCANTE, Z.; SILVA, M. **A Importância da Revolução Industrial no Mundo da Tecnologia**, VIII EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar, Maringá - PR, pp.1-6, 2011.

COUTINHO, L. A Terceira Revolução Industrial e Tecnológica. As Grandes Tendências das Mudanças. **Economia e Sociedade**, v1(01), pp. 69-87, 2016.

CURREY, N. **Landing Gear Design Handbook**, First Edition, Georgia: American Institute of Aeronautics & Astronautics, 1982, p. 865.

DIVAKARAN, V.N.; RAVIKUMAR, G. V. V.; SRINIVASA R. P. Aircraft Landing Gear Design & Development: How Advanced Technologies are helping to meet the challenges?, **Infosys**, 2018. Disponível em: <<https://www.infosys.com/engineering-services/white-papers/documents/landing-gear-design-and-development.pdf>> Acessado em 01 de junho de 2020.

DREAM TUNDRA 200 **Airliners.net**, 2020. Disponível em: <<https://www.airliners.net/photo/>>. Acessado em: 01 de junho de 2020.

DUNCAN AVIATION Embraer Landing Gear Overhauls Land at Duncan Aviation, **Duncan Aviation**, 2020. Disponível em: <<https://blog.duncanaviation.com/author/diane-heiserman/page/5>>, Acessado em: 01 de junho de 2020.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, **Pilot's handbook of aeronautical knowledge**, Washington, D.C., United States.: U.S. Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration, 2008, p. 524.

FORD, Segunda Revolução Industrial – História, característica, principais inventos, **Conhecimento científico**, 2020, Disponível em: <<https://conhecimentocientifico.r7.com/segunda-revolucao-industrial/>> Acessado: 01 de junho 2020.

GE, GE Additive inaugurates new facility in Germany, **GE**, 2019. Disponível em: <<https://www.ge.com/additive/press-releases/ge-additive-inaugurates-new-facility-germany>>. Acessado em: 08 de setembro de 2020.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. Binder Jetting. **Additive Manufacturing Technologies**. Springer, 2015, p.498.

GIMENEZ, D.; SANTOS, A. **Indústria 4.0, Manufatura Avançada e seus Impactos sobre o Trabalho**, Texto para Discussão, Unicamp. IE, Campinas, v371, pp.1-28, 2019.

GOMES, J.; CAMARGO, J. R., WILTGEN, F. **Análise do Sobreaquecimento Causada pela Retificação em Tubo Deslizante de Trens de Pouso de Aeronaves**, *In*: 8º Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento (CICTED), Taubaté - SP, UNITAU, 23 a 25 de outubro, 2019.

GOMES, J.; GRANDINETTI, F. J.; MOURA R. A.; RAYMUNDO, E. A.; WILTGEN, F.; CAMARGO, J. R **Inspeção Não Destrutiva para Fabricação de Tubo Deslizante para Trem de Pouso de Aeronave**, *In*:XVI Encontro de Iniciação Científica, XIV Mostra de Pós-Graduação e VI Mostra de Extensão (EIC), Lorena - SP, pp.1-10, 2019a.

GOMES, J.; WILTGEN, F. Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: técnicas, Materiais e Máquinas, **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v41(01), pp. 1-16, 2020.

GOMES, J.; WILTGEN, F. **Prototipagem Rápida de Trem de Pouso de Aeronaves Utilizando a Técnica de Manufatura Aditiva**, *In*:8º Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento (CICTED), Taubaté - SP, UNITAU, 23 a 25 de outubro, 2019.

HYBRID MANUFACTURING, 7 Families of Additive Manufacturing - A Quick Reference Guide, **Hybrid Manufacturing**, 2020. Disponível em: <<http://www.hybridmanutech.com/resources.html>>Acessado em 01 de junho de 2020.

IMAMURA, T.; HIRAI, T.; AMEMIYA, K.; YOKOKAWA, Y.; ENOMOTO, S.; YAMAMOTO, K. Aerodynamic and Aeroacoustic Simulations of a Two-wheel Landing Gear, **Procedia IUTAM**, Southampton, v01, pp. 293-302, 2010.

JÚNIOR, J.; COSTA, F. Análise Numérica de Escoamento sobre Perfil de Asa: Estudo de Modelo NACA 64A004.291. **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, v3(02), pp. 1-18, 2016.

JÚNIOR, T. **Mecanismo Hidráulico de um Trem de Pouso**, 2020, Disponível em: <<https://www.slideshare.net/tadeuferreirajr/mecanismo-hidraulico-de-um-trem-de-pouso>>. Acessado em: 01 de junho de 2020

KIM G.B., LEE S., KIM H., YANG D.H., KIM Y.H., KYUNG Y.S., KIM C.S., CHOI S.H., KIM B.J., HA H., KWON S.U. KIM N. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology, **Korean Journal of Radiology**, Korean, v17(2), pp. 182-197, 2016.

KOVER, A. Transformation In 3D: How A Walnut-Sized Part Changed The Way GE Aviation Builds Jet Engines, **GE Report**, 2018. Disponível em: <<https://www.ge.com/reports/transformation-3d-walnut-sized-part-changed-way-ge-aviation-builds-jet-engines>>. Acessado em: 01 de junho de 2020.

LEWANDOWSKI, J.; SEIFI, M. Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties, **Annual Review of Materials Research**, Cleveland, v46, pp. 151-186, 2016.

MATOS, C. C.; DIAS, B. R. **A Influência da Aerodinâmica no Design**, Actas de Diseño 4. II Encuentro Latino Americano de Diseño “Diseño en Palermo” Comunicaciones Académicas, Buenos Aires, Argentina, Universidad de Palermo, pp.186-189, 2007.

MINAFRA, K. Researchers Explore Aircraft Landing Gear Aerodynamics Through Supercomputer Simulations, **NASA**, 2017. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/ames/image-feature/nasa-highlights-simulations-at-supercomputing-conference-like-aircraft-landing-gear>>. Acessado em: 01 de junho de 2020.

MULLER, F. M.; AZEVEDO, A. **A História da Pesquisa Operacional no Brasil - O Caso dos Encontros Regionais de Pesquisa Operacional**, Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento, v10(03), pp. 128-145, 2018.

NASA, **NASA Tests Limits of 3-D Printing with Powerful Rocket Engine Check**, Disponível em :<<https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/3d-printed-rocket-injector.html>>. NASA, 27 de agosto de 2013. Acessado em: 01 de junho de 2020.

NORSK TITANIUM, The World’s First FAA-Approved 3d-Printed Structural Titanium, **Norsk Titanium**, 2018. Disponível em: <[https://www.norsktitanium.com/storage/media/NOR18005\\_OverviewBrochure\\_FA1\\_digital.pdf](https://www.norsktitanium.com/storage/media/NOR18005_OverviewBrochure_FA1_digital.pdf)> Acessado em: 01 de junho de 2020

PALMA, J. M. B.; BUENO, U. S.; STOROLLI, W. G.; SCHIAVUZZO, P. L.; CESAR, F. I. G.; MAKIYA, I. K. **Os Princípios da Indústria 4.0 e os Impactos na Sustentabilidade da Cadeia de Valor Empresarial**, In: 6th International Workshop, Advances in Cleaner Production, São Paulo, UNIP, 24 a 26 maio, 2017.



PATTERSON, A.; MESSIMER, S.; FARRINGTON, P. Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need, **Technologies**, Basel, v5(02), pp.15, 2017.

PERRY, C. Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D printing, **3D Hubs**, 2020. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing/>> Acessado em 01 de junho de 2020.

PONSFORD, M.; GLASS N. The Night I Invented 3D Printing, **CNN Business**, 14 de fevereiro de 2014. Disponível em: <<https://edition.cnn.com/2014/02/13/tech/innovation/the-night-i-invented-3d-printing-chuck-hall/index.html>>. Acessado em: 01 de junho de 2020.

PROFESSIONAL AIRCRAFT, EMBRAER Legacy 600 Landing Gear, **Professional Aircraft**, 2015. Disponível em: <<http://www.gopaa.com>>. Acessado em: 01 de junho de 2020.

RIFKIN, J. **The Third Industrial Revolution**, First Edition, New York: Palgrave Macmillan, 2011, p. 330.

SANTOS, L. S.; ARAÚJO, R. B. A Revolução Industrial. **História econômica geral e do Brasil**, Universidade Federal de Sergipe, Aula n03, pp. 36-49, 2011.

SAKURAI, R.; ZUCHI, J. D. As Revoluções Industriais até a Indústria 4.0. **Revista Interface Tecnológica**, Taquaratinga, v15 (02), pp. 480-491, 2018.

SEEDE, R.; SHOUKR, D.; ZHANG, B.; WHITT, A.; GIBBONS, S.; FLATER, P.; ELWANY, A.; ARROYAVE, R.; KARAMAN, I. An Ultra-High Strength Martensitic Steel Fabricated using Selective Laser Melting Additive Manufacturing: Densification, Microstructure, and Mechanical Properties, **Acta Materialia**, v186, pp. 199-214, 2020.

SILVA, W.; ZAIDAN, F. H.; ALVARENGA, I.; CÂMARA, M. Modelo de Arquitetura Corporativa no contexto da Indústria 4.0: em direção ao alinhamento da TI com os negócios, **Revista de Ciências e Tecnologias de Informação e comunicação**, v38, pp. 19-36, 2019.

SINGAMNENI, S.; YIFAN, L.V.; HEWITT, A.; CHALK, R.; THOMAS, W.; JORDISON, D. Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review, **Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering**, v8, pp. 1-13, 2019.

SRIVATSAN, T. S.; SUDARSHAN, T. S. **Additive Manufacturing Innovations, advances, and applications**, 1st Edition, Boca Raton, CRC Press, 2015, p. 460.

SZILVASI-NAZY, M.;MATYASI, G. Analysis of STL Files, **Mathematical Computer Modelling**, Budapeste, v38(7-9), pp. 945-960, 2003.

THOMPSON, S.; BIAN, L.; SHAMSAEI, N.; YADOLLAHI, A. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I, **Transport phenomena, modeling and diagnostics, Additive Manufacturing**, v8, pp. 36-62, 2015.

WILTGEN, F. A Manufatura Avançada Precisa de uma Engenharia Avançada, **Revista Tecnologia**, v41(02), pp. 1-11, 2020.

WILTGEN, F. **Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico**. *In*:10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), São Carlos - SP, UFSCar, 5 a 7 agosto, 2019.

WILTGEN, F.; ALCALDE, E. **Prototipagem Rápida Aditiva Aplicada em Dispositivos Funcionais de Auxílio Humano**. *In*:10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), São Carlos - SP, UFSCar, 5 a 7 agosto, 2019.

WILTGEN, F.; FERMINO, D.; GOMES, J. **Relação entre Potência Elétrica e Área Disponível para Cada Tipo de Instalação Fotovoltaica**, *In*:I CERES – Congresso Nacional de Energias Renováveis, Energia e Sustentabilidade, Natal -RN, UFRN, 04 a 11 de novembro, 2020.

YAKOUT, M.; ELBESTAWIB, M. A.; VELDHUIS, S. C. A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies, **Solid State Phenomena**, Hamilton, v278, pp. 1-14, 2018.

YAP, C. Y.; CHUA, C. K.; DONG, Z. L.; LIU, Z. H.; ZHANG, D. Q.; LOH, L. E.; SING S. L., Review of Selective Laser Melting: Materials and Applications, **Applied Physics Reviews**, New York, v2(04), pp. 1-21, 2015.

YONG, L.; XUNNIAN, W.; DEJIU, Z. Control Strategies for Aircraft Airframe Noise Reduction, **Chinese Journal of Aeronautics**, China, v26(02), pp. 249-260, 2013.

ZELINSKI, P. Will Additive Manufacturing Play a Major Role in aircraft Production?, Modern Machine Shop, **Additive Manufacturing**, 2015. Disponível em:<<https://www.additivemanufacturing.media/articles/will-additive-manufacturing-play-a-major-role-in-aircraft-production>> Acessado em: 01 de junho de 2020.

ZHAO, K.; OKOLO, P.; NERI, E.; CHEN, P.; KENNEDY, J.; BENNETT, G. J. Noise Reduction Technologies for Aircraft Landing Gear- a Bibliographic Review, **Progress in Aerospace Sciences**, v112, pp. 1- 23, 2020.

**APÊNDICE A**

**ARTIGO:** AVANÇOS NA MANUFATURA ADITIVA EM METAIS: TÉCNICAS, MATERIAIS E MÁQUINAS

**AUTORES:** João Francisco Bueno Gomes e Filipe Wiltgen

**REVISTA:** Tecnologia – UNIFOR - PUBLICADO

**ANO:**2020



doi 10.5020/23180730.2020.9917

## **Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas**

***Metal additive manufacturing advances: techniques, materials and machines***

***Avances en la fabricación aditiva en metales: técnicas, materiales y máquinas***

***Progrès de la fabrication additive métalliques: techniques, matériaux et machines***

**João Francisco Bueno Gomes** 

jfbgomes10@gmail.com  
Universidade de Taubaté  
(Unitau)

**Filipe Wiltgen** 

fwbarbosa@gmail.com  
Universidade de Taubaté  
(Unitau)

### **Resumo**

Com o advento de novas técnicas de manufatura aditiva, tornou-se possível a introdução de diversos metais como matéria-prima e isso tem sido uma revolução para indústria, pois permite muitas possibilidades. Neste artigo serão apresentadas técnicas de impressão 3D em metais, as matérias-primas metálicas mais utilizadas e os custos da manufatura aditiva em comparação com a manufatura subtrativa. O objetivo é apresentar as técnicas mais utilizadas em manufatura aditiva em metais aplicadas na indústria de tecnologia mecânica (aeronáutica, aeroespacial e automobilística) alinhando as inovações, expectativas e dificuldades enfrentadas por essas técnicas na fabricação de componentes que necessitam de grande resistência estrutural. Por fim, serão apresentadas possíveis aplicações no futuro próximo.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva. Metais. Impressão 3D. Componentes aeronáuticos.

### **Abstract**

With the advent of new additive manufacturing techniques, it became possible to introduce several metals as raw material, and this has been a revolution for industry, as it allows many possibilities. This article will present 3D printing techniques on metals, the most used metallic raw materials, and the costs of additive manufacturing compared to subtractive manufacturing. The objective is to present the most used techniques in additive manufacturing in metals applied in the mechanical technology industry (aeronautics, aerospace, and automobile) aligning the innovations, expectations, and difficulties faced by these techniques in the manufacture of components that require great structural resistance. Finally, possible applications will be presented shortly.

**Keywords:** Additive manufacturing. Metals. 3D Printing. Aeronautical components.

### **Resumen**

Con la llegada de nuevas técnicas de fabricación aditiva, ahora es posible la introducción de diversos metales como materia prima y esto es revolucionario para la industria, permitiendo muchas posibilidades. En este trabajo serán presentadas técnicas de impresión 3D en metales, las materias primas metálicas más utilizadas y los costes de la fabricación aditiva en comparación con la fabricación subtrativa. El objetivo es presentar las técnicas más utilizadas en la fabricación aditiva en metales aplicadas en la industria de tecnología mecánica (aeronáutica, aeroespacial y automobilística) alineando las novedades, expectativas y dificultades enfrentadas por estas técnicas en la fabricación de componentes que piden



gran resistencia estructural. Por fin, serán presentados posibles usos en un futuro cercano.

**Palabras-clave:** Fabricación aditiva. Metales. Impresión 3D. Componentes aeronáuticos.

### Résumé

Avec l'avènement de nouvelles techniques de fabrication additive, il est devenu possible d'introduire plusieurs métaux comme matière première. Cela a été une révolution pour le secteur, car il permet de nombreuses possibilités. Cet article présente des techniques d'impression 3D métal. C'est-à-dire, les matières premières métalliques les plus utilisées et les coûts de fabrication additive par rapport à la fabrication soustractive. L'objectif est de présenter les techniques les plus utilisées en fabrication additive métallique appliqués dans le secteur des technologies mécaniques (aéronautique, aérospatiale et automobile). On veut aussi aligner les innovations, les attentes et les difficultés rencontrées par ces techniques dans la fabrication des composants qui nécessitent une grande résistance structurelle. Enfin, des possibles applications dans un avenir proches sont présentées.

**Mots-clés:** Fabrication additive. Métaux. Impression 3D. Composants aéronautiques.

## 1 Introdução

A manufatura aditiva (MA) começou a tomar forma na década de 80 (ALCALDE, 2019; WILTGEN; ALCALDE, 2019; ALCALDE; WILTGEN, 2018; WILTGEN, 2019) com o advento do CAD (*computer-aided designs*), o qual impulsionou o projeto e a modelagem de peças mecânicas de forma mais eficiente e rápida.

A possibilidade de manipular uma peça desenhada em um ambiente computacional do tipo CAD, em 3D, permite a visualização de como a peça pode ficar quando fabricada, além de incorporar rápidas formas de modificar os desenhos de um projeto. O desenho de uma peça em modelo físico tridimensional permite a análise completa do desenho do projeto, a implementação de aperfeiçoamentos necessários e a identificação de interferências funcionais, incluindo a possibilidade de movimentação de peças para observar sua montagem ou mesmo o funcionamento do mecanismo projetado.

Entretanto, a partir da ideia de unir os projetos desenhados em CAD com as máquinas de fabricação mecânica capazes de executar a construção/usinagem de peças com informações vindas de desenhos/modelos e/ou códigos computacionais que o caminho para a fabricação de protótipos começou a se tornar mais viável e rápida (WILTGEN, 2019).

Na atualidade, propor a construção de um protótipo, seja pelos métodos tradicionais (subtrativos) de fabricação, seja pelos métodos modernos (aditivos) de fabricação, é algo relativamente simples de ser realizado.

A prototipagem rápida (WILTGEN, 2019) é, sem dúvida, um marco no desenvolvimento e na inovação tecnológica, pois permite acelerar os processos de desenvolvimento de produtos na realização de ensaios em ambiente controlados (*DT&E –developmental test and evaluation*), ajudando a obter de forma mais rápida a maturidade tecnológica (*TLR – technology readiness level*) esperada para o lançamento de um produto no mercado.

Entre as tecnologias existentes atualmente em prototipagem rápida, destaca-se a manufatura aditiva via impressão 3D. As técnicas de impressão 3D vêm permitindo, ao longo dos últimos anos, o desenvolvimento e construção de novas máquinas, capazes de fabricar peças com os mais diferentes tipos de materiais (ALCALDE; WILTGEN, 2018). Nesta pesquisa, o material de interesse é o metal impresso em 3D com diferentes técnicas, diferentes dispositivos e diferentes tipos de metais e ligas metálicas, que podem ser empregados para a construção na indústria aeronáutica, aeroespacial e automobilística.

A integração da manufatura aditiva com a indústria de fabricação permite a criação de peças complexas, que antes eram difíceis ou impossíveis de serem fabricadas pelos métodos tradicionais, com a explícita economia de matéria-prima obtida por meio da inserção apenas na quantidade necessária para confeccionar a peça (ALCALDE; WILTGEN, 2018; WILTGEN, 2019).

## 2 Metodologia

### 2.1 Impressão de metais

A necessidade de aumentar a velocidade de criação e implementação de produtos tem feito da manufatura aditiva um aliado no desenvolvimento de novos produtos e sua utilização na indústria, os quais vêm crescendo gradualmente nos últimos anos e gerando inovações (LANGEFELD, 2017; THOMAS; VENKAT, 2016; BRIANTAIS, 2017).

Conforme pode ser observado no comitê de normas técnicas (ASTM, 2019), existem sete tipos de processo de manufatura aditiva, entretanto as técnicas que realmente são aplicáveis a metais são quatro: *powder bed fusion (PBF)*, *direct energy deposition (DED)*, *binder jetting (BJ)* e *sheet lamination (SL)*.

#### • Técnica Powder Bed Fusion (PBF)

Nesse processo de MA do tipo fusão em leito de pó, a impressão 3D é baseada na utilização de um feixe de laser. O feixe de laser é utilizado para fundir regiões que se encontram em um leito de pó metálico. Essa tecnologia é utilizada na produção industrial de peças altamente complexas e em pequenos lotes, no qual se faz necessário grande precisão dimensional. Normalmente, é utilizado em áreas aeroespaciais, e também na indústria automobilística destinada ao auxílio de equipes de corrida de automóveis. A seguir são apresentados os três principais métodos que utilizam a técnica PBF como princípio de impressão 3D em metal (ASTM F42, 2019).

#### ► Selective Laser Melting (SLM)

A técnica de derretimento seletivo a laser (SLM) é semelhante à técnica SLS que é aplicada em plásticos e cerâmicas. A principal diferença entre essas técnicas é a fundição de pó metálico com a intenção de obter propriedades mecânicas semelhantes à de matérias-primas utilizadas na fabricação tradicional. Com a obtenção de melhores propriedades mecânicas é possível aumentar a possibilidade de utilização de componentes em regiões sujeitas a elevados esforços mecânicos. Esse processo, entretanto, possui algumas desvantagens, como as reações de absorção do feixe laser de forma diferente para cada tipo de metal, levando a tensões superficiais e aumentando a tensão térmica, podendo provocar trincas (YAKOUT *et al.*, 2018). A Figura 1 mostra um esquema de uma máquina SLM.

Figura 1 – Esquema de funcionamento da técnica SLM



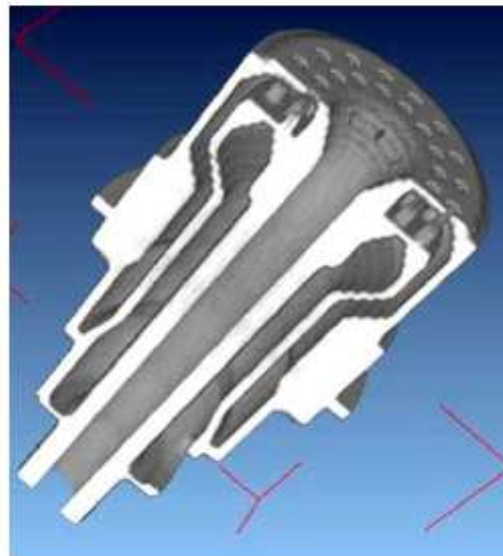
Fonte: Adaptado de Metal AM, 2019.

Nessa técnica podem ser impressos componentes com pó de um único tipo de metal ou misturas de pó metálico, formando ligas. Atualmente, esse processo possui limitação no que tange a matéria-prima metálica utilizada, uma vez que nem todos os tipos de metais podem ser utilizados nesse processo (YAKOUT *et al.*, 2018). Nessa técnica, SLM em metal, eventualmente pode ocorrer o encolhimento das dimensões do



componente devido a instabilidades na fusão do pó metálico. Dessa forma, todas as medidas físicas devem ser verificadas na análise dimensional. Esse método vem sendo utilizado pela NASA para desenvolver peças de alta complexidade. Em 2013, foi desenvolvido um injetor de motor foguete (NASA, 2013; MCMAHAN, 2013; KRAFT *et al.*, 2013) com essa tecnologia, cuja grande vantagem apontada pela NASA é a possibilidade de integrar muitas partes em uma única peça. Na fabricação tradicional do injetor do motor foguete da NASA, geralmente, eram necessárias construir e montar 115 (cento e quinze) peças. Com a utilização da MA via a técnica SLM, porém, foi possível reduzir de 115 peças para apenas duas peças (CASTELLS, 2016). Pode ser vista na Figura 2 a geometria complexa do injetor do motor foguete da NASA feito através da técnica SLM.

Figura 2 - Injetor de motor foguete da NASA construído com a técnica SLM



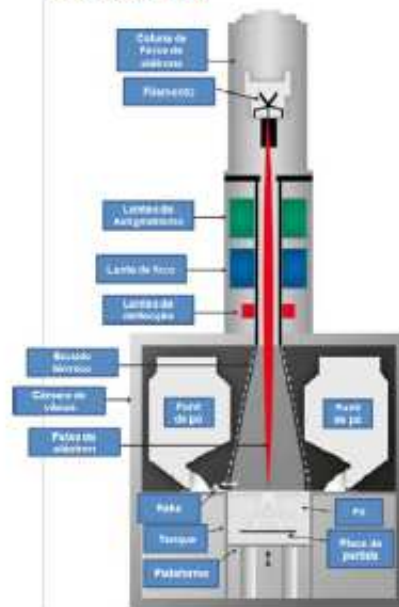
Fonte: NASA, 2013 e Kraft *et al.*, 2013.

► *Electron Beam Melting (EBM)*

O método de impressão 3D por fusão por feixe de elétrons (EBM) necessita de que o pó metálico seja pré-aquecido e que o processo seja feito a vácuo. O derretimento do pó de metal é feito através de um feixe de elétrons, diferentemente do SLM, que utiliza o laser para tal função. Esse método é similar ao SLM, mas apresenta maior complexidade operacional e rapidez na impressão 3D dos componentes fabricados quando comparados ao SLM. (YAKOUT *et al.*, 2018). Na Figura 3 é possível ver um esquema do método EBM em detalhes.



Figura 3 - Esquema de funcionamento da técnica EBM



Fonte: Adaptado de Sames 2016.

► *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*

Diferentemente do método SLM, a técnica de sinterização direta metal laser (DMLS) consegue construir peças com quase todo tipo de material metálico. A principal diferença entre eles é a temperatura do *powder bed fusion*, com o intuito de fundir ou sinterizar (DELGADO, 2012; DESIGNIFYING, 2018).

A técnica consiste em "espalhar" uma camada de pó metálico na superfície em que se deseja imprimir em 3D. Em seguida, é aplicado o feixe de laser de tal maneira que ocorre a sinterização do pó metálico, ocasionando, ao mesmo tempo, o derretimento de parte do pó metálico (CASTELLS, 2016). A técnica é repetida quantas vezes forem necessárias até que se obtenha a geometria desejada.

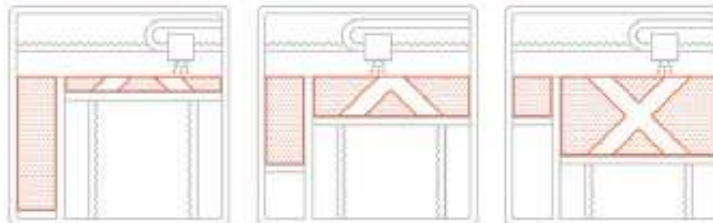
Essa técnica possui a vantagem de não criar tantas tensões residuais internas nas peças e, assim, consegue suprimir os defeitos na estrutura interna das peças fabricadas. O método DMLS, por ser uma técnica que permite utilizar diversos tipos de metais, tem custo elevado quando comparado a outras técnicas, sendo a sua utilização restrita a poucas aplicações, como na fabricação de protótipos da indústria aeroespacial (CASTELLS, 2016).

• *Técnica Binder Jetting (BF)*

O método de jateamento por enfardamento (BJ) é realizado em temperatura ambiente, no qual o pó de metal é impresso, camada por camada, utilizando-se de um agente aglutinante que faz a ligação ou colagem de uma camada na outra, permitindo a impressão em 3D (REDWOOD *et al.*, 2017).

Essa impressão 3D é semelhante à de uma impressora 2D, cuja principal diferença é a plataforma que se desloca para baixo conforme a peça vai sendo impressa, como pode ser observado na Figura 4, de maneira similar a mecânica utilizada na SLS.

Figura 4 - Esquema de funcionamento da técnica BJ



Fonte: Redwood, 2017.

Devido à impressão 3D ser realizada em temperatura ambiente, para que o metal venha a possuir resistência estrutural, é necessário realizar um pós-processamento, com a finalidade de remover o agente aglutinante e, concomitantemente, ter uma peça metálica resistente.

Existem dois métodos de pós-processamento nessa técnica: infiltração e sinterização, sendo que a sinterização é a técnica mais utilizada por sua maior resistência estrutural e térmica quando comparada com a técnica de pós-processamento por infiltração (3D HUBS, 2019).

Na técnica de infiltração, o agente aglutinante é removido, criando uma peça altamente porosa. Posteriormente, essa peça é aquecida em forno industrial junto com um metal de baixo ponto de fusão, de modo que os espaços vazios são preenchidos por esse metal e, assim, obtém-se uma peça bimetálica.

No método de sinterização, a peça é colocada em forno de alta temperatura, no qual o agente aglutinante é "queimado" e o metal é sinterizado, obtendo-se a peça com alta densidade. Esse método tem a desvantagem de que, no processo, a peça pode diminuir cerca de 20% de seu tamanho original (3D HUBS, 2019). Para compensar essa perda dimensional, é necessário imprimir o componente com dimensões cerca de 20% maiores, contabilizando seu encolhimento.

#### • Técnica *Direct Energy Deposition (DED)*

A deposição por energia direta (DED) é tipicamente formada por um braço multi-eixo que, através de um bocal/queimador, funde o material metálico e o deposita sobre uma superfície.

É um processo que possui duas técnicas 3D *cladding* (revestimento) e *3D welding* (soldagem) (YAKOUT *et al.*, 2018). A primeira técnica consiste em utilizar um pó metálico, que é fundido por um feixe de laser ou uma tocha de plasma. Esse método é mais utilizado para reparar peças ou adicionar metal a peças fabricadas.

A técnica chamada de *3D welding*, também conhecida como *shaped metal deposition (SMD)*, utiliza arames metálicos em vez de pó. Esse arame de metal é derretido e se liga às camadas anteriores através do processo de soldagem (YAKOUT *et al.*, 2018). A técnica é promissora para a utilização em componentes que exijam resistência estrutural, pois produz peças com alta resistência e há grande quantidade de materiais que podem ser empregados. Por outro lado, possui como desvantagem a pouca acuracidade geométrica e o controle difícil da "poça" de solda.

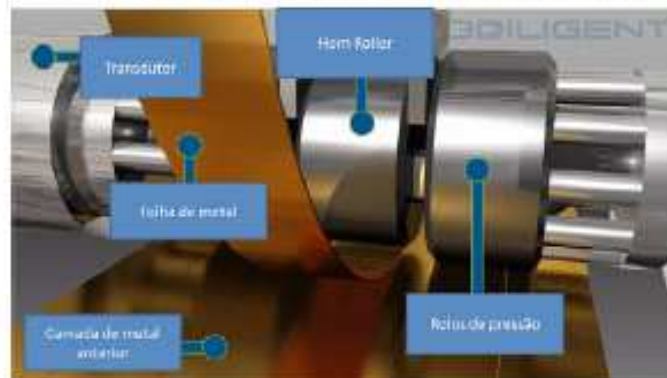
#### • Técnica *Sheet Lamination (SL)*

Dentro da técnica de laminação em folha (SL), pode-se destacar a *ultrasonic additive manufacturing* (manufatura aditiva ultrassônica - UAM), a qual utiliza "folhas" de metal para a fabricação de componentes. A união entre as "folhas metálicas" é feita através de soldagem ultrassônica (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2019).

O processo é feito em baixa temperatura e requer pouca energia, uma vez que as folhas metálicas não são derretidas. Os componentes fabricados através da laminação não são aplicáveis em áreas estruturais, pois possuem baixa resistência estrutural. A simplificação do processo de fabricação através da UAM pode ser visto na Figura 5.



Figura 5 - Esquema de funcionamento da técnica UAM



Fonte: Adaptado de 3D Iligent, 2019.

## 2.2 Manufatura aditiva em metais na indústria

### 2.2.1 Indústria aeroespacial e aeronáutica

A manufatura aditiva via impressão 3D tem sido inserida na indústria aeroespacial devido às suas características únicas de confecção de peças complexas. Tem caminhado para possibilitar sua utilização na indústria aeronáutica. Esse tipo de indústria exige peças com geometria altamente complexas, com exigência de baixo peso e alta resistência estrutural, e a produção é, geralmente, de baixa escala.

As técnicas para impressão 3D em metais nesse tipo de indústria que mais se destacam são a SLM e a EBM, porque são capazes de fabricar peças altamente complexas com baixo volume de produção e com o mínimo peso possível (YAKOUT *et al.*, 2018). Atualmente, as matérias-primas mais utilizadas são o titânio, as ligas de alumínio e alguns tipos de aço (COLLINS; CORE, 2018).

Para alguns tipos de componentes essas técnicas vêm sendo utilizadas, principalmente em peças que não são tão exigidas estruturalmente e que, normalmente, são confeccionadas em ligas de titânio Ti6Al4V e/ou Inconel 718. Várias empresas no mundo estão utilizando em suas linhas de produção a MA. Entre elas se podem destacar a GE e a Airbus (ÅLGÄRDH, 2018). Essas empresas têm investido maciçamente para que, até o ano de 2020, haja um grande aumento na produção através dessa técnica.

A Figura 6 mostra o bico de combustível desenvolvido pela GE e a Figura 7 mostra uma válvula em titânio desenvolvida pela Liebherr Aerospace, no qual conseguiram diminuir em 35% o peso em comparação com a versão feita em manufatura convencional.

Figura 6 - Bicos de combustível do motor Leap 1 feito através da MA



Fonte: Billy, 2017.

Figura 7 - Válvula do atuador de spoiler do A380 impresso com MA



Fonte: Bramm, 2017.

No Quadro 1 são observadas algumas empresas e os seus respectivos componentes fabricados via MA.

Quadro 1 - Empresa vs. componentes fabricados por MA.

EMPRESA	TIPO DE COMPONENTE
GE Aviation	Bicos de combustível do motor Leap 1A
Airbus	Parede divisória de aeronave
Comac	Longarina de asa
LiebherrAerospace	Válvulas hidráulicas
Honeywell	Componentes para motor
Boeing	Peças em Ti6Al4V
GE Aviation	Bicos de combustível do motor Leap 1A

Fonte: Ålgårdh, 2017 e Bramm, 2017.

No caso da *Boeing* foram adotados alguns componentes produzidos pela empresa *Norsk Titanium*, que conseguiu certificação de um processo DED (ALWYN, 2017). Estima-se que a empresa *Boeing* economizará entre 2 e 3 milhões de dólares em cada avião ao utilizar o método de manufatura aditiva (WOHLERS, 2019; JACKSON, 2019).

Os desafios para maior implementação dessa técnica na indústria aeronáutica são:

- *Maior robustez e qualificação de componentes, garantindo que a qualidade seja sempre a mesma;*
- *Pós-processamento para melhorar o acabamento superficial e a estrutura interna, removendo qualquer tipo de tensão residual para obter menor fadiga dos componentes;*
- *Métodos de inspeção não destrutiva precisam ser desenvolvidos para que seja garantida uma produção em série desses componentes;*
- *Melhorar as propriedades mecânicas de materiais e desenvolver a utilização de aços de alta resistência;*
- *Garantir maior velocidade de produção, para que seja possível a serialização da produção;*
- *Projetos pensados exclusivamente para fabricação via manufatura aditiva, uma nova filosofia conceitual de projeto, no qual o projetista necessita pensar na forma de manufatura aditiva;*
- *Certificação de matérias-primas e processos por parte da autoridade aeronáutica e seus respectivos órgãos fiscalizadores (FAA, ANAC e EASA).*

### 2.2.2 Indústria automobilística

Assim como a indústria aeroespacial e aeronáutica, a indústria automobilística tem vários componentes complexos que são candidatos a serem integrados, otimizados e fabricados em manufatura aditiva. Acredita-



se que, atualmente, aproximadamente 14% das peças feitas em MA na indústria automobilística em produção em série são utilizadas em motores de veículos (ÄLGÄRDH, 2017).

Quando a MA é utilizada com a finalidade de substituir a manufatura convencional (subtrativa e formativa), obtém-se uma otimização na geometria, reduzindo quantidade de massa, componentes e complexidade, como pode ser visto nas Figuras 8 e 9.

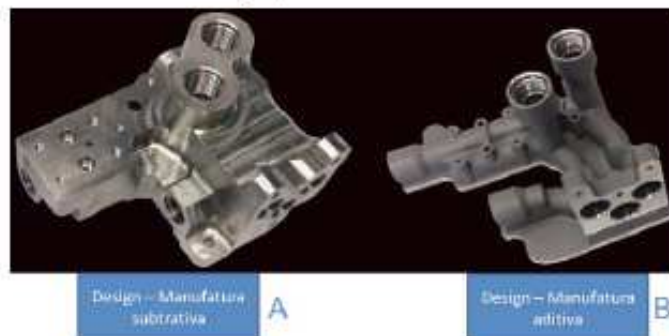
Figura 8 - Comparação entre manufatura subtrativa (A) e manufatura aditiva (B)



Fonte: Adaptado de Älgårdh, 2017.

3D II

Figura 9 - Comparação entre manufatura subtrativa (A) e manufatura aditiva (B)



Fonte: Wohlers, 2019.

Entre as vantagens, estão: a customização de peças automotivas de diversos modelos de veículos; mudanças nas geometrias de peças que provoquem menor consumo de combustível; melhor eficiência; além de inúmeros tipos de adaptações que podem ser feitas para ajustar diferentes tipos de peças em diferentes tipos de veículos.

### 2.3 Tipos de metais utilizados em cada tipo de tecnologia

O Quadro 2 mostra as tecnologias de impressão de metais e as principais matérias-primas utilizadas.

Quadro 2 - Empresa vs. componentes fabricados por MA.

TECNOLOGIA	MATÉRIAS-PRIMA UTILIZADAS
SLS	Al, Ti, Ligas de Ni, CoCr, Steel
SLM	Al, Ti, Ligas de Ni, CoCr, Steel
EBM	Al, Ti, Ligas de Ni, CoCr, Steel
DMLS	Al, Ti, Ligas de Ni, CoCr, Steel
BJ	WC, W, CoCr, Steel/ Bronze, Steel, Inco
DED	Ti, Ligas de Ni, Steel, Co, Al
UAM	Al, Cu

Fonte: Langefeld, 2018, 3D Diligent, 2019 e Designifying, 2019.

#### 2.4 Estimativa de custo da manufatura aditiva em metais

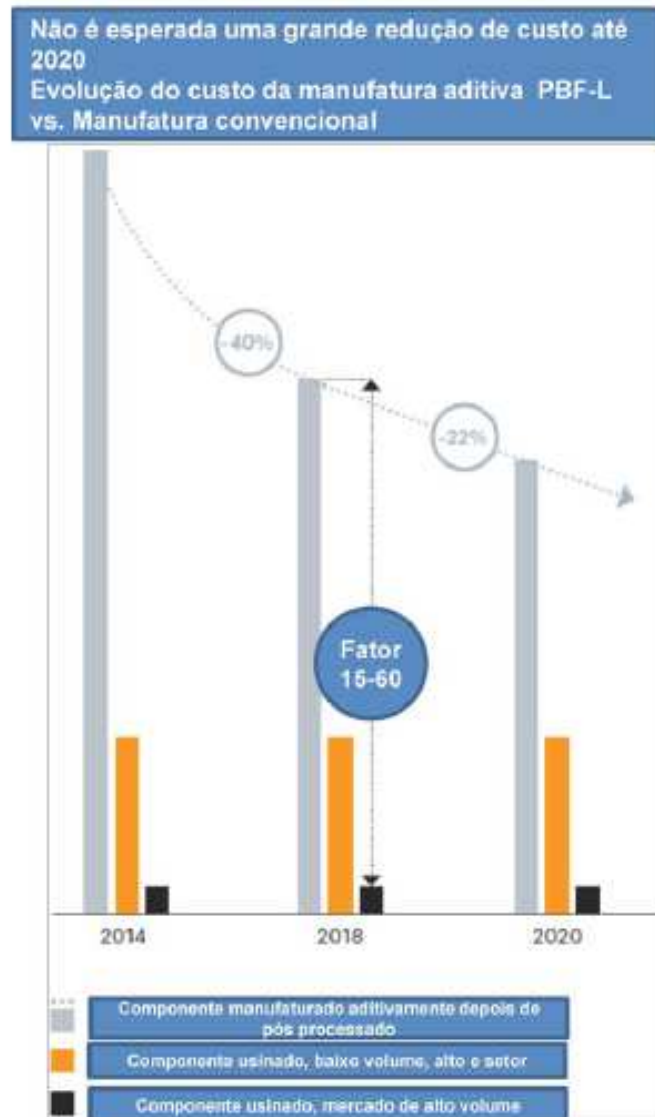
Para que a MA se tome atrativa em um mercado de alta demanda, como a indústria automotiva, é necessário que exista um fator menor que 10 (dez) no custo quando comparado à produção convencional (LANGEFELD, 2018). Nessa comparação, foi adotado o processo *powder bed fusion* com utilização de laser (PBF-L), pois é o processo mais utilizado na indústria (LANGEFELD, 2018). Na Figura 10 pode-se ver a redução dos custos em MA para os próximos anos e, no Quadro 3, observa-se a maturidade dos processos e o seu respectivo custo.

Quadro 3 - Empresa vs. componentes fabricados por MA.

TECNOLOGIA	MATURIDADE	CUSTO
PBF-L (SLS, SLM, DMLS)	Maturidade atingida para indústrias específicas 	
PBF-EB	Maturidade atingida para indústrias específicas 	
DED	Até agora usado principalmente para camadas (re-vestimentos) 	
BJ	Maturidade atingida para aplicação em nichos 	

Fonte: Adaptado de Langefeld, 2018.

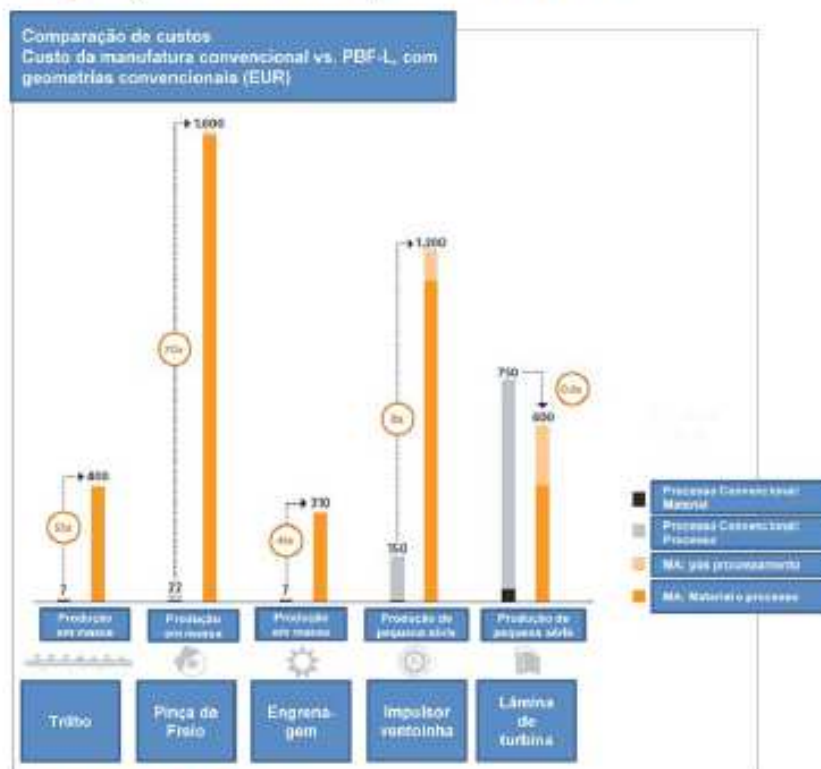
Figura 10 - Comparação entre custo de produção em manufatura subtrativa e aditiva



Fonte: Adaptado de Langefeld, 2018.

Comparando-se alguns componentes que são fabricados em MA, pode-se verificar que o custo é alto se comparado ao processo convencional para a produção em massa. Quando se fala de componentes de baixa demanda, a diferença entre as duas tecnologias não é tão diferente, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Custo de produção manufaturas do tipo subtrativa vs. Aditiva



Fonte: Adaptado de Langefeld, 2018.

### 2.5 Expectativa de utilização da manufatura aditiva em metais no futuro

Para os próximos anos haverá crescimento da MA, conforme estudo publicado por (LANGEFELD, 2017). A Figura 12 mostra, com base em informações vinda de várias consultorias, a previsão de crescimento da manufatura aditiva nos próximos anos. Um grande indicativo de que a manufatura aditiva de metais está avançando devido ao comprometimento das entidades de normas técnicas, que estão gerando normas específicas para esse tipo de tecnologia. A ASTM desenvolveu o comitê F42 (ASTM, 2019), cuja finalidade é formular normas relativas a MA. Além dessa entidade, o FAA fez um *workshop*, no ano de 2016, no qual mostrou as suas atividades, e entre elas, a criação do AMNT (Equipe Nacional de Manufatura Aditiva), da qual farão parte os principais fabricantes de MA, e o engajamento de diversos grupos de trabalho com a indústria (KABBARA, 2016).



Figura 12 - Previsão de crescimento da manufatura aditiva



Fonte: Adaptado de Langefeld, 2017.

### 3 Resultados e discussão

Tendo em vista as tecnologias apresentadas neste artigo, cada empresa deverá avaliar e verificar quais componentes são candidatos a serem manufaturados em tecnologia aditiva. Atualmente, a MA de metais está presente na fabricação de jóias, próteses dentárias e peças mais complexas. Na área aeronáutica e aeroespacial, a MA em metais está sendo utilizada para fabricar componentes específicos, em especial de peças que necessitam ter pouco peso, com alta resistência mecânica e geometrias complexas.

O desafio atual da impressão 3D em metal é conseguir aumentar a quantidade de tipos de metais utilizáveis, como os aços de ligas com alta resistência mecânica. Esses metais são frequentemente utilizados na indústria aeroespacial e aeronáutica, entretanto não figuram entre as matérias-primas disponíveis atualmente em MA. Componentes que sofrem muitos carregamentos cíclicos (fadiga) possuem pouca maturidade tecnológica devido à falta de informações que mostrem o que ocorre com o comportamento dessas matérias-primas em MA quando cicladas (curvas SN e curvas EN). Além disso, será necessário o desenvolvimento de métodos de inspeção não destrutivos compatíveis com essa nova tecnologia.

Na área da aeronáutica existem alguns obstáculos há vencer, como a certificação de processos, a criação de padrões específicos para inspeção e de testes de fabricação de componentes manufaturados de forma aditiva. Entretanto espera-se que, para os próximos anos, a MA consiga alcançar novas aplicações objetivando a confecção de componentes de baixa demanda. Além disso, a possibilidade de produzir peças integradas, leves, rígidas e complexas, será, sem dúvida, um grande diferencial construtivo.

Em um futuro próximo acredita-se que as novas tecnologias disruptivas de manufatura aditiva venham a integrar efetivamente as indústrias e os processos produtivos, apoiando o desenvolvimento da manufatura avançada e fazendo, assim, parte definitiva da produção industrial mundial. Portanto, modificando permanentemente a forma de produzir novos produtos na indústria.

## Referências

- ALCALDE, E. **Prototipagem rápida aditiva: aplicação em dispositivo funcional de auxílio humano para membros superiores**. 2019. 141 f. / Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté (UNITAU), Taubaté, 2019.
- ALCALDE, E.; WILTGEN, F., **Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro**, *Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté*, Taubaté, v. 24, n. 2, p. 12-20, 2018.
- ÅLGÅRDH J. *et al.*, **State-of-the-Art for Additive Manufacturing of Metals**. [S. l.]: Metalliska Material, 2017. Disponível em: [https://www.metalliskamaterial.se/globalassets/3-forskning/rapporter/2016-03898---state-of-the-art-for-additive-manufacturing-of-metals-2\\_1.pdf](https://www.metalliskamaterial.se/globalassets/3-forskning/rapporter/2016-03898---state-of-the-art-for-additive-manufacturing-of-metals-2_1.pdf). Acesso em: 15 jul. 2019.
- ALWYN, S. **Printed titanium parts expected to save millions in Boeing dreamliner costs**. *Reuters*, 2017. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-norsk-boeing/>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- ASTM. **ASTM F42/ISO TC 261 Develops Additive Manufacturing Standards**. [S. l.: s. d.]. Disponível em: [https://www.astm.org/COMMIT/F42\\_AMStandardsStructureAndPrimer.pdf](https://www.astm.org/COMMIT/F42_AMStandardsStructureAndPrimer.pdf). Acesso em: 15 jul. 2019.
- BILLY W. *et al.* **The value of additive manufacturing: future opportunities**. Briefing paper N2, Technical Report, Institute for Molecular Science and Engineering, Imperial College London, September, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/323079276\\_The\\_value\\_of\\_additive\\_manufacturing\\_future\\_opportunities/](https://www.researchgate.net/publication/323079276_The_value_of_additive_manufacturing_future_opportunities/). Acesso em: 06 jul. 2019.
- BRAMM, U. **First ever 3D printed primary flight control component from Liebherr – Aerospace Flownon an Airbus Aircraft**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.liebherr.com/>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- BRIANTAIS, L. **Metal additive manufacturing: process, conception and post-treatments**. 2017. 117 f. Dissertação (Máster Universitarien Enginyeria d'Automoció), Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona, 2017.
- CASTELLS, R. **DMLS vs SLM 3D printing for metal manufacturing**. [S. l.]: Element Materials Technology, 2016. Disponível em <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- COLLINS, R.; CORE, B. **Additive manufacturing and light weight materials for aerospace and defense**. [S. l.]: IDTechEx, 2018.
- DELGADO, J. *et al.* **Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with Iron - based materials**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [S. l.], 60, 60, p. 601–610, 2012.
- DESIGNIFYING. **3D printing dmls direct metal laser sintering**. [Haryana], 2018. Disponível em <http://www.designifying.com/blog/3d-printing-technology/3d-printing-dmls-direct-metal-laser-sintering/>. Acesso em: 12 jul. 2019.
- GOEHRKE, S. **A look ahead in 3D printing with Gartner's Pete Basiliere**. *Fabbaloo*, 2019. Disponível em <https://www.fabbaloo.com/blog/2019/1/10/a-look-ahead-in-3d-printing-with-gartners-pete-basiliere>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- JACKSON, B. **SAE international releases first specifications for no risk titanium rapid plasma deposition**. [S. l.]: 3D Printing Industry, 2019. Disponível em <https://3dprintingindustry.com/news/sae-international-releases-first-specifications-for-norsk-titanium-rapid-plasma-deposition-149210/>. Acesso em: 15 jul. 2019.

- KABBARA, J.; GORELIK, M. **FAA Perspectives on Additive Manufacturing, On Demand**. Mobility Workshop Additive Manufacturing, FAA Perspectives, [S. l.], 2016. Disponível em: <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/tc16-15.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- KRAFT, R. *et al.* NASA tests limits of 3-D printing with powerful rocket engine check. **NASA**, 23 ago. 2013. Disponível em: <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/3d-printed-rocket-injector.html>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- LANGFELD, B. *et al.* **Advancements in metal 3D printing**. [S. l.]: Roland Berger, 2018. Disponível em: [https://www.rolandberger.com/publications/publication\\_pdf/Roland\\_Berger\\_Additive\\_Manufacturing.pdf](https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/Roland_Berger_Additive_Manufacturing.pdf). Acesso em: 06 jul. 2019.
- LANGFELD, B. *et al.* **Additive manufacturing in aerospace and defense**. [S. l.]: Roland Berger, 2017. Disponível em: [https://www.rolandberger.com/publications/publication\\_pdf/roland\\_berger\\_additive\\_manufacturing.pdf](https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_additive_manufacturing.pdf). Acesso em: 06 jul. 2019.
- LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. **Sheet Lamination**. [S. l.]: Additive Manufacturing Research Group. Disponível em: <https://www.lboro.ac.uk>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- MCMAHAN, T. **Hot-fire tests show 3-D printed rocket parts rival traditionally manufactured parts**. NASA, 24 jul. 2013. Disponível em <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/3dprinting.html>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- METAL AM. **Metal additive manufacturing processes**. [S. l.: s. d.]. Disponível em: <https://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/metal-additive-manufacturing-processes>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- NASA tests 3D-printed rocket engine fuel injector. **BBC News**, Londres, 15 jul. 2013. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/technology-23313921>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- REDWOOD, B.; SCHÖFFER, F.; GARRET, B. **The 3D printing handbook – technologies: design and applications**. Amsterdam: 3D Hubs B.V., 2017.
- SAMES W. J. *et al.* The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. **International Materials Reviews**, [S. l.], v. 61, n. 5, p. 315-360, 2016.
- THOMAS, D.; VENKAT, R. 3D Metal Printing Technology. **IFAC-PapersOnLine**, [S. l.], v. 49, n. 29, p. 103-110, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316325496>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- WILTGEN, F. Protótipos e prototipagem rápida aditiva sua importância no auxílio do desenvolvimento científico e tecnológico. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 10., COBEF, 10., São Carlos, 5-7 ago., 2019. **Anais [...]**. São Carlos: UFSCar. 2019
- WILTGEN, F.; ALCADE, E. Prototipagem rápida aditiva aplicada em dispositivos funcionais de auxílio humano. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 10., COBEF, 10., São Carlos, 5-7 ago., 2019. **Anais [...]**. São Carlos: UFSCar. 2019.
- WOHLERS ASSOCIATES, **Additive manufacturing and 3d printing**. [S. l.]: Disponível em: <http://wohlersassociates.com>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- YAKOUT, M. *et al.* **A review of metal additive manufacturing technologies**. *Solid State Phenomena*, [S. l.], p. 1–14, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.278.1>. Acesso em: 15 jul. 2019.



3DILIGENT. **Sheet lamination**. [S. l.:s. d.]. Disponível em: <https://www.3diligent.com/3d-printing-service/sheet-lamination/>. Acesso em: 15 jul. 2019.

3D HUBS. **Metal 3D Printing: additive manufacturing technologies compared**. Amsterdam: 3D HUBS, [S. d.]. Disponível em <<https://www.3dhubs.com/guides/metal-3d-printing/#metal-binder-jetting>> Acesso em: 08 jul. 2019.

### Sobre os autores

---

#### **João Francisco Bueno Gomes**

Mestrando em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté (Unitau) em 2020. MBA em Gestão Industrial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) em 2015. Bacharel em Engenharia industrial mecânica pela (ETEP) em 2010.

#### **Filipe Wiltgen**

Doutor em Dispositivos eletrônicos e computação, na área de fusão termonuclear controlada, utilizando inteligência artificial para controle do plasma de Tokamaks pelo Instituto de Tecnologia de Aeronáutica (ITA) em 2003. Mestre em Dispositivos eletrônicos e computação, na área de fusão termonuclear controlada, utilizando controle de campos magnéticos para confinamento e produção de plasma em Tokamaks pelo Instituto de Tecnologia de Aeronáutica (ITA) em 1998. Graduado em Engenharia elétrica, com ênfase em eletrônica de potência, pela Universidade de Taubaté (Unitau) em 1994. Atualmente é professor do Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica, e também, coordenador e professor no curso Especialização em Energia Solar Fotovoltaica na Universidade de Taubaté (Unitau).

---

**Recebimento em:** 03.09.2019

**Aceito em:** 02.12.2019

**APÊNDICE B**

**ARTIGO:** INSPEÇÃO NÃO DESTRUTIVA PARA FABRICAÇÃO DE TUBO DESLIZANTE PARA TREM DE POUSO DE AERONAVE

**AUTORES:** João Francisco Bueno Gomes, Francisco José Grandinetti, Roque Antonio de Moura, Emerson Augusto Raymundo, Filipe Wiltgen, José Rubens de Camargo

**CONGRESSO:** XVI Encontro de Iniciação Científica, XIV Mostra de Pós-Graduação e VI Mostra de Extensão

**ANO:** 2019

## INSPEÇÃO NÃO DESTRUTIVA PARA FABRICAÇÃO DE TUBO DESLIZANTE PARA TREM DE POUSO DE AERONAVE

### Resumo

Este artigo tem como objetivo apresentar as principais técnicas de inspeção não destrutivas aplicadas em componentes estruturais de um trem de pouso com intuito de detectar trincas e/ou defeitos que posteriormente implicarão em falhas do trem de pouso. Dentre os tipos de inspeção se dará destaque aos seguintes tipos: Inspeção por Líquido Penetrante, Partícula Magnética e Inspeção de queima de superfície também conhecida como Ataque Nital. A inspeção não destrutiva tem papel de destaque na indústria aeronáutica, pois garante a integridade dos componentes e por conseguinte evita falhas e acidentes. Os defeitos e/ou trincas podem ser gerados tanto na fabricação, quanto no uso do componente, mas neste caso serão apresentados a inspeção pós fabricação. O caso estudado foi o de um tubo deslizante o qual foi inspecionado por duas técnicas não destrutivas para constatar a falha proveniente da produção.

**Palavras-chave:** Ensaio não destrutivo; Trem de Pouso; Trincas; Aeronave; Aeronáutica.

### ABSTRACT

This paper presents the non destructive inspections techniques applicable in the landing gear structural components, in order to detect cracks and/or defects that will generate landing gear failures. Among the types of inspection will be highlighted the following types: Penetrating Liquid Inspection, Magnetic Particle and Surface Burning Inspection. Non-destructive inspection plays a prominent role in the aeronautics industry as it ensures component integrity and therefore prevents failures and accidents. Defects and / or cracks can be generated in both manufacturing and component use, but in this case post-fabrication inspection will be presented. The case studied was a sliding tube which was inspected by two different non-destructive techniques to detect the production failure.

**Keywords:** Non-destructive inspection; Landing gear; Cracks; Aircraft; Aeronautics.

## 1. INTRODUÇÃO

Os componentes estruturais de uma aeronave têm requisitos rígidos com intuito de gerar segurança e aeronavegabilidade de aviões, helicópteros, etc... No caso de trens de pouso, por ser uma estrutura *safe-life* (FAA, 2019), estrutura que é projetada para uma quantidade de ciclos em que não pode apresentar trinca onde a inspeção não destrutiva ocupa uma posição importante para impedir que peças com possíveis problemas sejam utilizadas. Portanto, a inspeção não destrutiva é muito importante para detectar possíveis trincas após produção, durante campanha de certificação e durante *overhaul* dos trens de pouso. A Figura 1 mostra um *shipset* completo do trem de pouso 747-8.

### Realização



### Apoio



**Figura 1 – Trens de pouso 747-8**

Fonte: ANDREA (2016)

### 1.1. Objetivo

Apresentar as técnicas mais utilizadas como inspeção não destrutiva: líquido penetrante, partícula magnética e ainda a técnica de ataque Nital para detecção de queima ocasionada por usinagem ou retífica, esta provoca diminuição das propriedades mecânicas do material. Ainda serão mostrados alguns componentes estruturais e uma inspeção aplicada em um tubo deslizante.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Líquido Penetrante (LP)

O ensaio não destrutivo mais velho após a inspeção visual é o líquido penetrante, Figura 2. A utilização deste método começou nas oficinas de manutenção de estradas de ferro (ANDREUCCI, 2013) como até então não se conheciam as descontinuidades dos componentes ocorriam falhas por fadiga quando estes eram colocadas em uso, pois ficavam sujeitos a todo tipo de esforços cíclicos.

Naquela época foi desenvolvido o método do óleo e giz o qual foi utilizado por algum tempo (RODRIGUES, 2019). A partir do estudo deste método foi então criado o método de líquido penetrante e então se começou a usar este método para a detecção de trincas e descontinuidades em componentes metálicos não ferrosos como, por exemplo, alumínio, titânio, alguns tipos de aço inox, etc... Estes tipos de metais não podem ser inspecionados por partícula magnética pelas características deles, pois não são magnetizáveis.

O método de inspeção por líquido penetrante é muito versátil, pois inspeciona materiais não ferrosos, ferrosos, cerâmicos, plásticos, etc... e é utilizada para detecção de trincas e/ou descontinuidades superficiais que não podem ser detectadas na inspeção visual (RODRIGUES, 2019).

#### Realização



#### Apoio

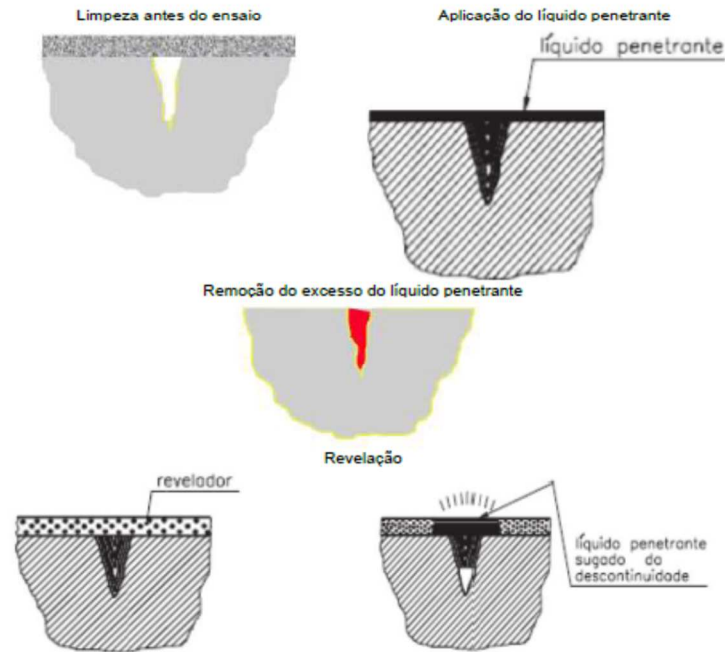






Divide-se em algumas etapas: (a) limpeza da peça, (b) aplicação do líquido penetrante, (c) remoção do excesso de líquido penetrante, (d) revelação, (e) inspeção e (f) limpeza final.

Figura 2 – Etapas do processo de inspeção de líquidos penetrantes (LP)



Fonte: ANDREUCCI (2003)

Assim que finalizada a inspeção é emitido um relatório de inspeção e então o componente inspecionado deverá ser limpo e removido qualquer resquício de produtos que possam prejudicar uma próxima etapa do processo de fabricação ou uso.

**Realização**



**Apoio**

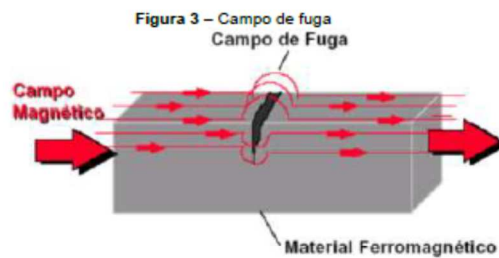






## 2.2. Partícula Magnética (PM)

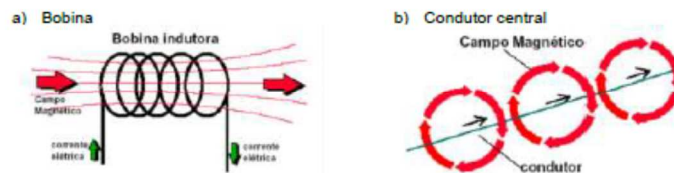
Este método é baseado em colocar o componente ou parte dele sujeito a campo magnético. Onde existem descontinuidades haverá campo de fuga, como mostrado na Figura 3, que será identificado com a utilização de partículas ferro magnéticas que irão se aglomerar na região da descontinuidade (FERRARESI, 2019). Este método é capaz de identificar descontinuidades e trincas em metais ferromagnéticos, ou seja, materiais não magnetizáveis não são inspecionáveis por este método. Outra característica deste método é a capacidade de detectar descontinuidades superficiais e subsuperficiais.



Fonte: FERRARESI (2019)

Existem vários métodos de magnetização dentre os quais, magnetização longitudinal, circular, multidirecional. No primeiro método aplica-se uma corrente circular na bobina e gera um campo magnético longitudinal que será capaz de detectar descontinuidades transversais, Figura 4a. No segundo método aplica-se uma corrente no condutor central e gera um campo magnético circular que será capaz de detectar descontinuidades longitudinais, Figura 4b (FERRARESI, 2019).

Figura 4 – Tipos de Magnetização



Fonte: FERRARESI (2019)

### Realização



### Apoio



Na magnetização multidirecional são aplicados campos circular e longitudinal de tal maneira que é possível detectar descontinuidades em várias direções.

Como preparação das peças é necessário que estas sejam completamente limpas sem resquícios de graxa, óleo e/ou outros contaminantes que façam com que haja aglomeração de partículas em regiões que não possuem descontinuidades.

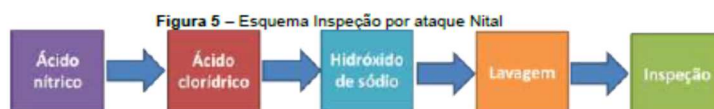
Como técnicas de magnetização pode-se destacar as por passagem de corrente e por indução de corrente de campos magnéticos. Na primeira técnica a corrente elétrica passa pelo componente a ser inspecionado, na segunda ocorre a indução do campo magnético na peça.

Ao fim do processo de inspeção a peça deve ser desmagnetizada para que não cause problemas no processo produtivo, interferências em instrumentos aeronáuticos, dentre outros.

### 2.3. Inspeção de queima de superfície de aços através do ataque Nital

O método de inspeção por ataque Nital é um processo químico que atua na superfície das peças (ácido nítrico e ácido clorídrico) e é utilizado para verificar a superfície de metais com o intuito de checar se houve queima ou superaquecimento durante a usinagem ou retífica de um componente. Isto é importante devido ao fato de que se houver superaquecimento ou queima as propriedades mecânicas do material serão alteradas. Através do ataque Nital é possível ver a olho nu quais regiões sofreram com a queima ou superaquecimento.

No ataque Nital o ácido nítrico entra em contato com o aço oxidando sua superfície, e em seguida se utiliza o ácido clorídrico que retira o excesso de oxidação. Após a utilização dos ácidos nas peças é aplicado o hidróxido de sódio para neutralizar a ação destes ácidos. Ao fim do processo o ataque Nital fará com que a parte com queima ou superaquecimento de superfície fique uma cor diferente. A Figura 5 mostra o esquemático de como é feita a inspeção por ataque Nital.



Fonte: Próprio autor (2019)

### 2.4. Função do trem de pouso

O trem de pouso tem como funções principais de absorver impactos ao pousar, permitir a movimentação, taxiamento e manobras em solo, prover frenagem, amortecer as vibrações em solo. A Figura 6 mostra um típico trem de pouso utilizado na aviação comercial A340-642.

#### Realização



#### Apoio



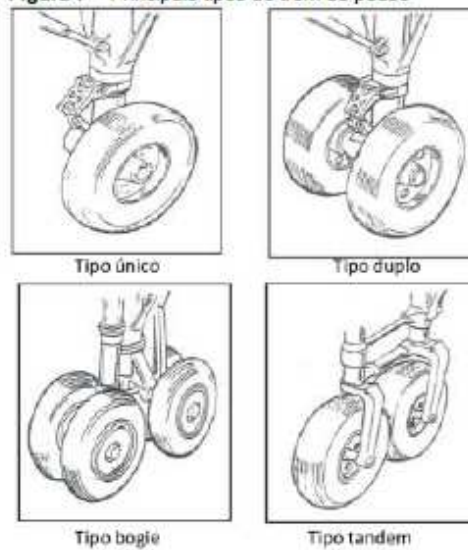
Figura 6 – Trem de pouso A340-642



Fonte: AIRLINERS (2014)

Os trens de pouso podem ser classificados quanto o tipo de disposição das rodas (BAI, 2014), dentre os principais tipos de trem de pouso da aviação comercial pode-se destacar os que são apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Principais tipos de trem de pouso



Fonte: BAI (2014)

#### Realização



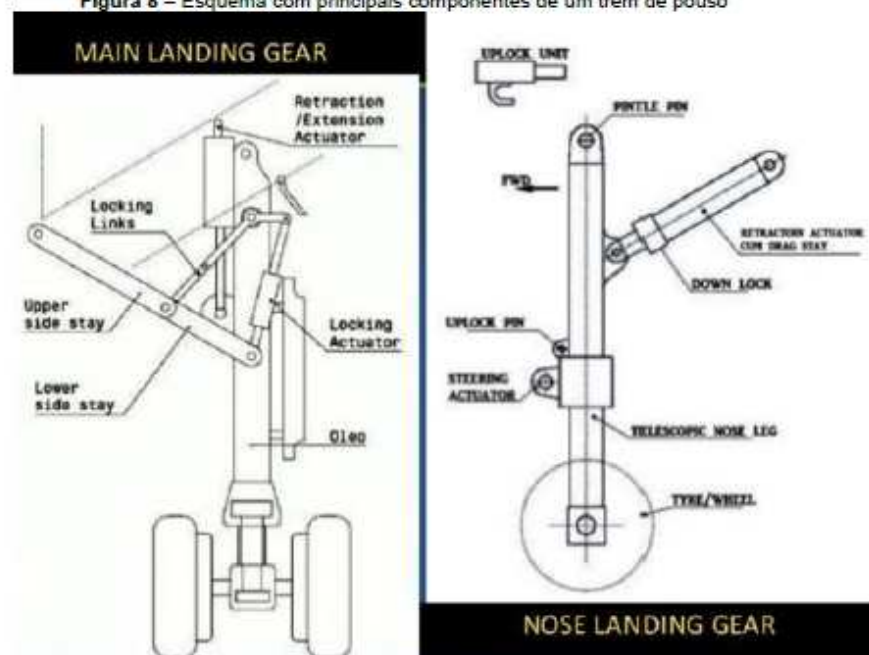
#### Apoio





Os trens de pouso ainda se subdividem em duas categorias, os trens de pouso auxiliares (NLG) e o principal (MLG) (PANI, 2015). O MLG é o primeiro a ter contato com o solo quando o avião está pousando e o auxiliar além de receber carga de pouso é responsável também pelo sistema de direção da aeronave, conhecido como *steering system*. O Figura 8 apresenta o MLG e NLG com seus principais componentes. A nomenclatura de alguns componentes varia de acordo com a companhia como, por exemplo, perna telescópica do trem auxiliar, *telescopic nose leg*, é também conhecido como tubo deslizante ou *sliding tube*.

Figura 8 – Esquema com principais componentes de um trem de pouso



Fonte: PANI (2015)

## 2.5. Requisito

O requisito 25.571 do órgão controlador *Federal Aviation Administration* mais conhecido como FAA, trata da fadiga de uma aeronave. Nele é exposto que ao projetar, fabricar, e verificar a fadiga, corrosão ou danos acidentais em componentes durante a vida inteira do avião não podem leva-lo a falhas catastróficas, inclui-se nos componentes o trem de pouso. Neste requisito é exposto que a fabricante do avião deverá identificar as principais peças estruturais que podem eventualmente provocar uma falha catastrófica. No caso do trem de pouso, após a identificação dos

Realização

Apoio



componentes que podem provocar falhas catastróficas, é feita uma lista de itens com vida controlada.

Como o trem de pouso é uma estrutura *safe-life* (FAA, 2019), ele tem que ter sua vida limitada ao que foi projetada e após as quantidades de ciclos deve ser descartada. É também reportado que durante a vida inteira do avião os componentes do trem de pouso não poderão apresentar trincas, então, normalmente quando a aeronave passa por *overhaul* (revisão programada) ou alguns tipos de manutenção estes itens críticos passam por inspeção não destrutiva para que seja verificada se após utilização houve algum aparecimento de trinca.

O mesmo é feito durante ensaios de certificação, o trem de pouso é ciclado por  $n$  vezes a quantidade de ciclos de vida real. Este fator que multiplica a quantidade de ciclos é conhecido como *scatter factor* e é acordado entre fabricantes e autoridades aeronáuticas levando-se em conta quantidade de corpos de prova. Após a definição do *scatter factor* a cada fim de ciclagem é feita inspeção não destrutiva e é obrigatório que não haja falha.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o processo produtivo, com o intuito de verificar um componente chamado tubo deslizante, este foi inspecionado primeiramente por meio da técnica de líquido penetrante fluorescente e foi constatada a seguinte não conformidade:

Inspeção de líquido penetrante apresenta indicações de espiral na camada de cromo com características de retífica abusiva conforme apresentado na Figura 9.

Para a inspeção por líquido penetrante fluorescente foram utilizados os seguintes produtos:

Líquido penetrante fluorescente: ZYGLO ZL-27A

Emulsificador: ZYGLO ZR-10B

Revelador: ZYGLO ZP-14A

Luz negra.

Uma vez que após a inspeção por líquido penetrante fluorescente detectou uma possível queima do metal base por retífica foi feita a remoção da camada de cromo do tubo deslizante e em seguida inspecionou-se o componente com o ataque Nital conforme apresentado na Figura 10.

#### Realização



#### Apoio





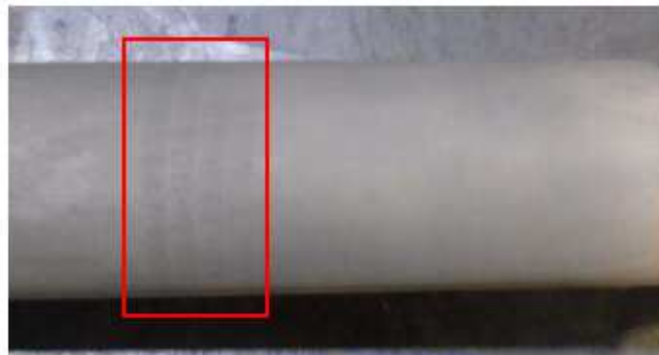
**Figura 9 – Resultado da inspeção por líquido penetrante fluorescente em tubo deslizante**



Fonte: Próprio autor (2019)

A inspeção por líquido penetrante fluorescente detectou uma possível queima circunferencial feita no metal base por retífica. Observa-se um aglomerado de pontos brilhantes.

**Figura 10 – Resultado da inspeção por ataque Nital em tubo deslizante**



Fonte: Próprio autor (2019)

Após a inspeção anterior, foi realmente constatada a queima no tubo deslizante apresentado na região demarcada da Figura 10. Com o resultado desta inspeção, a engenharia de produto foi acionada para dar disposição quanto ao que fazer com o componente. Alguns componentes quando detectada a queima são descartados e outros são retrabalhados. Neste caso, a peça precisou ser

**Realização**



**Apoio**





descartada, pois não havia margem de segurança tendo em vista que era necessário remover muito material na região com queima.

#### 4. CONCLUSÕES

É importante salientar que as inspeções são complementares para as inspeções de itens de trem de pouso onde a inspeção por líquido penetrante detectou uma possível falha e o ataque Nital comprovou a suspeita. Portanto, esse caráter complementar fornece subsídios para o inspetor e para o engenheiro responsável tomar a devida decisão referente ao componente com falha produtiva e neste caso o descarte. O principal objetivo é garantir a confiabilidade dos componentes do trem de pouso, por ser um item de segurança, evitando graves acidentes durante a decolagem e pouso das aeronaves.

#### REFERÊNCIAS

ANDREA J., *Boeing 747-8 landing gear delivered; size dwarfs truck (photo)* <<https://www.airliners.net/forum/viewtopic.php?t=761595>>, 24 julho 2016, acessado em 31 julho 2019.

ANDREUCCI R., *Líquidos Penetrantes* <<http://www.mundomecanico.com.br/wp-content/uploads/2012/04/Inspe%C3%A7%C3%A3o-por-líquido-penetrante.pdf>>, Julho 2013, disponível em 01 agosto 2019.

*Airbus A340-642* <<https://www.airliners.net/photo/Airbus/Airbus-A340-642/1086962>> disponível em 02 agosto 2019.

BAI H., *Landing Gear for Aircraft* <[https://pt.slideshare.net/partyrocka99/landing-gear-for-aircraft?from\\_action=save](https://pt.slideshare.net/partyrocka99/landing-gear-for-aircraft?from_action=save)>, LinkedIn slideshare, 24 de mai de 2014, disponível em 04 agosto 2019.

FAA, *Far Part 25.571* <[https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?node=14:1.0.1.3.11#se14.1.25\\_1571](https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?node=14:1.0.1.3.11#se14.1.25_1571)> disponível em 02 agosto 2019.

FERRARESI, V., *Partícula Magnética* <<http://mecanica.ufu.br/LIVRE/Valtair%20-%20END/PART%20CDCULA%20MAGN%20C9TICA.pdf>> disponível em 02 agosto 2019.

RODRIGUES L., *Líquido Penetrante* <<http://www.engbrasil.eng.br/pp/em/aula14.pdf>> disponível em 01 agosto 2019.

PANI S.S. et al., *Landing Gear, 28 março 2015* <<https://www.slideshare.net/srinivasphanikumar2/landing-gear-46386875/7>> disponível em 02 agosto 2019.

#### Realização



#### Apoio



**APÊNDICE C**

**RESUMO:** ANÁLISE DO SOBREAQUECIMENTO CAUSADA PELA RETIFICAÇÃO EM TUBO DESLIZANTE DE TRENS DE POUSO DE AERONAVES

**AUTORES:** João Francisco Bueno Gomes, José Rubens de Camargo e Filipe Wiltgen

**CONGRESSO:** 8º Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento (CICTED) - UNITAU

**ANO:** 2019



NR. IDENTIFICAÇÃO: MPG201970115

# ANÁLISE DO SOBREAQUECIMENTO CAUSADA PELA RETIFICAÇÃO EM TUBOS DESLIZANTES DE TRENS DE POUSO DE AERONAVES

João Francisco Bueno Gomes – Mestrando - Universidade de Taubaté - jfbgomes10@gmail.com

Prof. Dr. Filipe Hilgen – Universidade de Taubaté - fhdadoc@ gmail.com

Prof. Dr. José Roberto de Camargo – Universidade de Taubaté - jruberocamargo@gmail.com

## Introdução

O sistema de trens de pouso absorve a energia provocada pelo pouso das aeronaves e pelo taxamento nos aeroportos. Este sistema é composto de muitos componentes estruturais e não estruturais dentre os quais o tubo deslizante. O tubo deslizante objeto deste trabalho é um componente que tem o diâmetro externo coneado e com tolerância na casa do micrômetro. Este pega em uma das etapas do processo produtivo passa pela retificação. Como requisito interno de algumas companhias as peças de aço de alta resistência que são retificadas passam por inspeções para detecção de um possível superaquecimento devido ao rebolo. O superaquecimento que popularmente é chamado de queima da superfície metálica provoca modificações na metalurgia do aço que faz com que a resistência mecânica seja reduzida. Isto impede que o componente seja colocado em serviço e para detecção de possível queima é utilizado a inspeção conhecida como ataque níquel. Como consequência da inspeção utilizando o processo de ataque níquel tem-se uma região com diferente coloração mostrando que houve uma queima. Este fato possibilita a inspeção visual.

## Objetivo

O objetivo é apresentar a importância de inspecionar componentes aeronáuticos utilizando o processo de ataque níquel após a etapa de manufatura. O intuito é evitar que peças com problemas possam ser colocadas em uso.

## Metodologia

Com a manufatura do tubo deslizante o componente é inspecionado para verificação de integridade. A intenção é verificar se a operação de retificação do tubo provocou alguma queima superficial. A inspeção com uso do processo de ataque níquel é realizada de forma sequencial. Na sequência do processo apresentado na Figura 1 a peça deve ser inspecionada no final do processo de forma visual evidenciando ou não a queima superficial do tubo testado.



Figura 1 – Sequência que mostra o resultado da inspeção em um processo de ataque níquel.  
Fonte: Projeto autor.

## Resultados

O resultado da inspeção visual após o banho químico do ataque níquel em um tubo deslizante testado, revelou a queima superficial do tubo deslizante conforme pode ser visto na Figura 2. Este componente deve ser analisado para verificar a necessidade de descarte ou retrabalho na região da queima superficial. Neste caso houve descarte devido a falta de material necessário para um contato (margem de segurança insuficiente).



Figura 2 – Queima superficial evidenciada em um tubo deslizante do trem de pouso de aeronaves.  
Fonte: Projeto autor.

## Conclusão

A inspeção visual após o processo de ataque níquel auxilia o processo de inspeção pelo engenheiro inspetor responsável pela decisão de descarte ou não da peça. Garantir a confiabilidade dos componentes aeronáuticos é absolutamente importante. Verificar uma possível falha na manufatura do trem de pouso evita a ocorrência graves acidentes durante a decolagem e pouso das aeronaves. A importância deste processo mostra que no futuro próximo a automatização da inspeção deve ser uma realidade.

**APÊNDICE D**

**RESUMO:** PROTOTIPAGEM RÁPIDA DE TREM DE POUSO DE AERONAVES UTILIZANDO A TÉCNICA DE MANUFATURA ADITIVA

**AUTORES:** João Francisco Bueno Gomes e Filipe Wiltgen

**CONGRESSO:** 8º Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento (CICTED) - UNITAU

**ANO:** 2019

# PROTOTIPAGEM RÁPIDA DE TREM DE POUSO DE AERONAVES UTILIZANDO A TÉCNICA DE MANUFATURA ADITIVA

João Francisco Bueno Gomes – Estudante de Mestrado em Eng. Mecânica na Universidade de Taubaté  
jfbgomes10@gmail.com

Prof. Dr. Filipe Wilgen – Professor do Programa de Mestrado em Eng. Mecânica na Universidade de Taubaté  
f.wilgen@unifal.br

## Introdução

A manufatura aditiva em metais é uma tecnologia que vem sendo adotada por muitas empresas ao redor do mundo, e no futuro, poderá ser utilizada para projetar diversas peças estruturais em aeronaves. Devido às suas características, a manufatura aditiva se adequa perfeitamente com as necessidades de modelos personalizados e suas geometrias complexas, leves, de fácil fabricação, de alta integração de componentes, e ainda possui a vantagem de não desperdiçar matéria prima de alto custo. O sistema de trem de pouso é responsável pela absorção da energia produzida pelo atrito das rodas no solo, e pelo isolamento do pouso e decolagem nos aeroportos. Além desse tipo de aplicação, o trem de pouso também está sujeito a esforços de tração e tensão que são responsáveis por seu funcionamento. O sistema de trem de pouso é composto de muitos componentes (pneus, o tubo de escape, amortecedor, baulão e eixo de roda). Tendo em vista a necessidade de reduzir o consumo de matérias-primas (peças complexas), esta pesquisa de mestrado tem como objetivo explorar os pontos do trem de pouso que podem ser produzidos utilizando técnicas de manufatura aditiva em metais. Como forma, será possível experimentar geometrias novas e inovadoras de trem de pouso que possuam estruturas mecânicas, rígidas, estruturais e que possam garantir, diminuir o custo e reduzir o tempo, com um componente estruturalmente fabricado em manufatura aditiva. Durante o desenvolvimento da pesquisa tem-se a intenção de realizar a construção de modelos via prototipagem rápida com impressão 3D. Assim como projetos de trem de pouso sendo testados em protótipos fabricados em resina reduzida. Permite-se assim, avaliar os resultados obtidos na integração de partes, assim como, na redução de massa estrutural em áreas críticas.

## Objetivo

O objetivo é apresentar os resultados iniciais de uma pesquisa com os tipos de sistemas de trem de pouso, bem como elencar os componentes candidatos a integração através da manufatura aditiva. Após a definição dos componentes integrados passará-se a próxima etapa de conceber uma geometria de componente com o intuito de diminuir o custo. Como o sistema de trem de pouso é de baixa produção a manufatura aditiva é ideal para este tipo de aplicação.

## Metodologia

Será feita a escolha do tipo de trem de pouso a implementar e integração de componentes e melhoria de geometria. Será feita modelagem no software CAD/CAM (Figura 1, 2 e 3) e os componentes integrados serão convertidos a um trem de pouso concebido de forma tradicional e apresentará-se as vantagens da integração como por exemplo, custo de menos partes, a redução de complexidade, pois não haverá interferência entre superfícies de regiões que anteriormente eram interfaces de componentes. O projeto do trem de pouso então estará com componentes integrados e com uma geometria com menos partes, e então o próximo passo será imprimir um protótipo em resina reduzida para verificação das ideias deste trabalho.

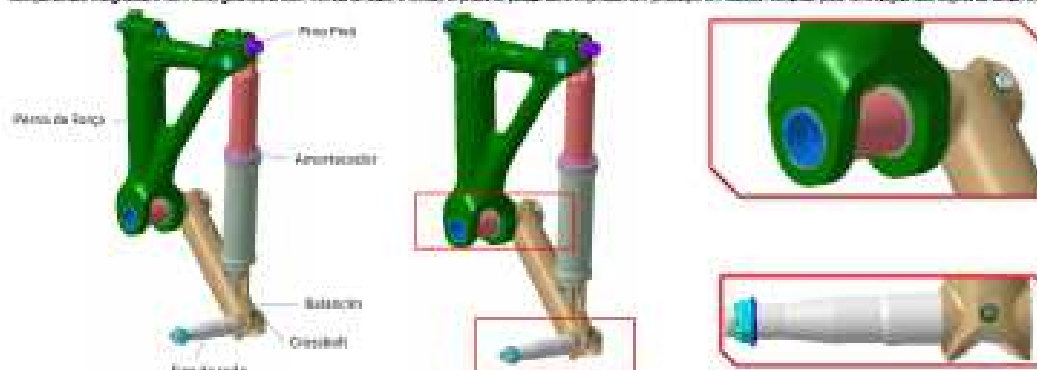


Figura 1 – Diagrama do trem de pouso convencional  
Fonte: Filipe Wilgen

Figura 2 – Detalhes do trem de pouso para serem testados em  
manufatura aditiva  
Fonte: Filipe Wilgen

Figura 3 – Região do trem de pouso candidata a integração  
Fonte: Filipe Wilgen

## Resultados Preliminares

Com a integração de partes o trem de pouso haverá economia de matéria prima, assim como não será necessário a remoção de material. Além disso haverá um custo prévio nas regiões que anteriormente era interface entre componentes de diferentes materiais. Cabe ressaltar que maiores detalhes da manufatura aditiva estão sendo desenvolvidos. Como pode ser visto na Figura 2 será possível integrar o baulão com eixo de roda eliminando o cresilhã e a parte que o eixo (região crítica, no que tange a conexão) irá interface entre a parte de torque e baulão, o pneu poderá ser integrado no baulão eliminando dois cresilhãs e duas partes.

## Conclusão

No futuro próximo a manufatura aditiva, por suas características, fabricação de componentes leves, complexos e de baixa produção deverá ser utilizada na fabricação de trem de pouso facilitando a integração de componentes, permitindo melhorar as geometrias, diminuir o tempo de produção e possibilitando assim um atendimento mais ágil e industrializado.

**APÊNDICE E**

**ARTIGO:** RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA ELÉTRICA E ÁREA DISPONÍVEL PARA CADA TIPO DE INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA

**AUTORES:** Filipe Wiltgen, Douglas Fermino e João Francisco Bueno Gomes

**CONGRESSO:** I CERES – Congresso Nacional de Energias Renováveis, Energia e Sustentabilidade

**ANO:** 2019



# I CERES 2020

## Congresso Nacional de Energias Renováveis, Exergia e Sustentabilidade

04-06 Novembro 2020 *Natal/RN*

### RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA ELÉTRICA E ÁREA DISPONÍVEL PARA CADA TIPO DE INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA

Filipe Wiltgen, [lfwbarbosa@gmail.com](mailto:lfwbarbosa@gmail.com)<sup>1</sup>

Douglas Fermino, [douglascofer@gmail.com](mailto:douglascofer@gmail.com)<sup>1</sup>

João Gomes, [jfbgomes10@gmail.com](mailto:jfbgomes10@gmail.com)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Taubaté

**Resumo:** Para um projeto solar fotovoltaico é necessário verificar a disponibilidade de área para instalação dos painéis fotovoltaicos. Cada tipo de consumidor de energia elétrica (residencial, comercial ou industrial) possui características muito distintas, tanto em quantidade de potência elétrica consumida, quanto em disponibilidade de instalação de painéis fotovoltaicos nos telhados ou mesmo no solo. A densidade de energia consumida e energia elétrica fornecida pelos painéis fotovoltaicos podem variar muito para cada tipo de consumidor. Observa-se que em geral consumidores residenciais geralmente possuem boa relação entre área para instalação de painéis fotovoltaicos e consumo de energia elétrica, porém no caso de consumidores comerciais esta relação é dificultada pelo fato de que em geral o consumo é elevado e a área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos é pequena. No caso industrial a relação de densidade de potência e área pode ser tal que atenda perfeitamente as necessidades, pois mesmo no caso de falta de área disponível no telhado, ainda sim, podem ser utilizados estacionamentos, entre outros. Este artigo apresenta uma forma de estimar a relação entre a potência e a área disponível para cada tipo de unidade consumidora usuária de energia solar fotovoltaica.

**Palavras-chave:** Energia Elétrica, Energia Renovável, Energia Fotovoltaica

## 1. INTRODUÇÃO

Um projeto de sistema solar fotovoltaico tem início com o cálculo da potência elétrica consumida na instalação elétrica que será colocado o sistema. Em seguida deve ser observada a área total disponível no local para a instalação dos painéis fotovoltaicos que fazem parte fundamental do sistema solar fotovoltaico. Existem características interessantes e importantes relativo a cada tipo de instalação consumidora (residencial, comercial e industrial) no qual são diferentes e peculiares, e de certa forma, são fundamentais para o projeto do sistema solar fotovoltaico.

Um sistema solar fotovoltaico tem como parâmetro importante realizar um arranjo de painéis fotovoltaicos de tal maneira que permita aproveitar ao máximo a área disponível para a instalação (JONES; BOUAMANE, 2012; MAJOR, 2017). Este arranjo depende de cinco itens importantes:

- Localização da unidade consumidora referente a posição solar (solstícios de verão e de inverno, além da localização do pólo norte magnético);
- Regiões de sombra ou interferência de incidência solar;
- Área disponível para a instalação dos painéis solares fotovoltaicos;
- Área total de um painel solar fotovoltaico a ser instalado e que consta no projeto;
- Potência total a qual a instalação do sistema solar fotovoltaico vai atender da unidade consumidora.

Desta forma, fica claro que ao interpretar esses itens anteriores, cada tipo de instalação consumidora terá suas particularidades as quais devem ser contabilizadas no projeto do sistema solar fotovoltaico de cada tipo diferentemente. Assim sendo, este artigo apresenta uma forma prática de estimar a densidade de energia solar fotovoltaica disponível para cada tipo de instalação consumidora. Esta densidade de energia disponível deve ser levada em consideração nas estimativas iniciais da quantidade de painéis solares fotovoltaicos necessários ou possíveis, para serem instalados na unidade consumidora a fim de atender o consumo desta instalação.

## 2. PAINEL FOTOVOLTAICO

Os painéis solares fotovoltaicos variam de tamanho a cada tipo de tecnologia, cada faixa de potência elétrica a ser gerada, a cada tipo de fabricante, assim como, do próprio tipo de células solares e seus respectivos tamanhos físicos. Assim sendo, neste artigo, o tamanho do painel será genérico com as medidas de 1m de largura e 2m de comprimento, conforme pode ser visto na Figura 1 que mostra uma comparação de tamanhos do painel genérico ao lado de um ser humano (1,8m) e de um cão grande.



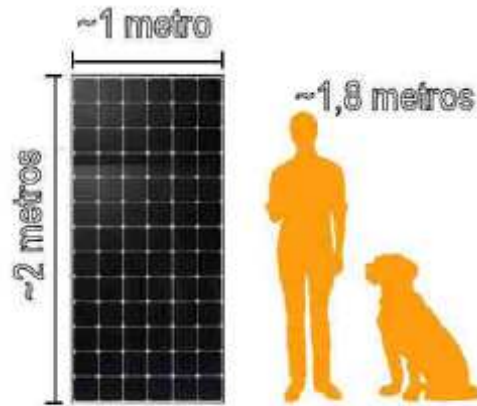


Figura 1. Representação esquemática do tamanho de um painel solar fotovoltaico genérico. Adaptado de Solar Power Rocks (2019).

Em uma instalação de sistema solar fotovoltaico são utilizados alguns painéis solares fotovoltaicos, a quantidade depende da potência elétrica ser gerada. A potência elétrica final total do conjunto de painéis solares fotovoltaicos para gerar eletricidade depende da área física que os painéis solares fotovoltaicos do conjunto devem ocupar, e também, se o conjunto pode ser instalado na área física total disponível na unidade consumidora que utilizará o sistema projetado.

### 3. DENSIDADE DE POTÊNCIA ELÉTRICA POR TIPO DE FONTE DE ENERGIA E DE CONSUMIDOR

Um parâmetro muito importante para qualquer tipo de instalação elétrica é entender como cada consumidor, de cada país, se comporta com relação a energia elétrica utilizada. Esse parâmetro pode ser visto para diversos países, incluindo o Brasil, na Figura 2. Nessa figura o consumo de energia é apresentado por cada pessoa por dia (kWh/d/p) pela densidade populacional (Pessoa/km<sup>2</sup>), podendo ainda ser comparado com faixas típicas de potência por área.

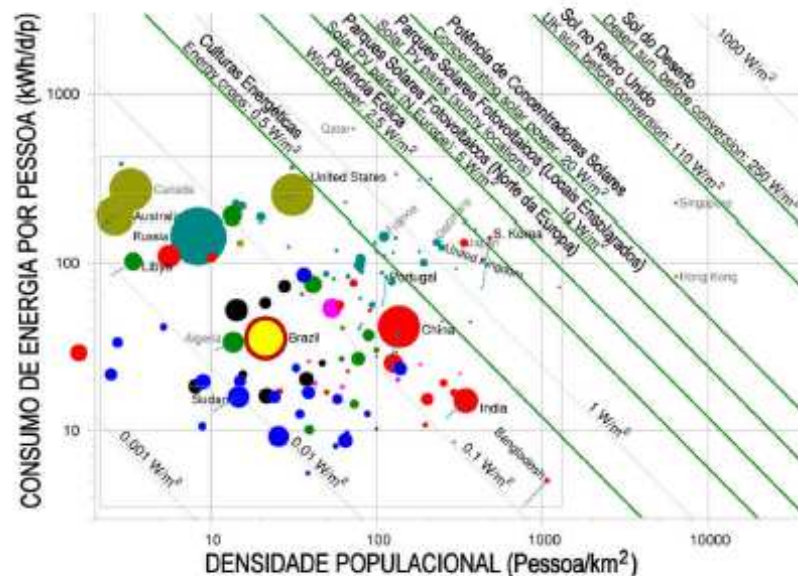


Figura 2. Mapa do Mundo de Mackay's é uma representação do consumo de energia por pessoa pela densidade populacional mundial (2005). O tamanho do ponto é proporcional à área terrestre e as linhas diagonais são os contornos do consumo de energia por unidade de área. Adaptado de Mackay (2005) e Mackay (A e B - 2013).

Na Figura 2 (MACKAY, 2005) é possível notar que no Brasil em 2013 (círculo na cor amarela) o consumo de energia por pessoa é de  $\sim 40$  kWh/d/p para uma densidade populacional de  $\sim 40$  Pessoas/km<sup>2</sup>. O Brasil está centrado entre as faixas típicas de potência por área para  $0,01$ W/m<sup>2</sup> e  $0,1$ W/m<sup>2</sup>. Em contrapartida, um dos países de maior abundância de energia em 2013 é o Qatar com o consumo de energia por pessoa de  $\sim 800$  kWh/d/p ( $\sim 16$  vezes maior que o Brasil) para uma densidade populacional de  $\sim 900$  Pessoas/km<sup>2</sup>, localizado no limiar da faixa típica de potência por área de  $2,5$  W/m<sup>2</sup>. É possível também notar que um dos países de menor disponibilidade de energia em 2013 é o Sudão com o consumo de energia por pessoa de  $\sim 20$  kWh/d/p para uma densidade populacional de  $\sim 20$  Pessoas/km<sup>2</sup>, localizado na faixa típica de potência por área de  $0,01$  W/m<sup>2</sup>.

Tendo em vista que uma pessoa (em média) no Brasil no ano de 2013 consumia  $\sim 40$  kWh (MACKAY A e B, 2013), atualmente este valor é inferior devido aos elevados custos da energia elétrica produzida pela matriz energética no Brasil (EPE, 2017 e 2018) e a crise econômica que assola o Brasil.

Uma residência no estado de São Paulo em média consome cerca de  $\sim 170$  kWh/mês (GOV-SP, 2019) de energia elétrica. Ou seja, um brasileiro no estado de São Paulo em 2019, considerando que São Paulo representa um dos maiores estados consumidores de energia elétrica no Brasil, consome atualmente menos energia elétrica do que consumia no ano de 2013.

Supondo que a quantidade de energia elétrica consumida por uma residência seja de  $\sim 200$  kWh/mês em todos os meses do ano (valor médio anual), para projetar um sistema solar fotovoltaico típico utilizando painéis genéricos de cerca de  $330$  W ( $\sim 2$ m<sup>2</sup>), em um lugar genérico do Brasil (índice solarimétrico médio no estado de SP) serão necessários cerca de  $7$  painéis solares fotovoltaicos ( $\sim 12$  kg/m<sup>2</sup>) ocupando uma área total de  $\sim 14$  m<sup>2</sup>. Desta forma, a densidade de potência solar fotovoltaica por área nesta residência será de  $\sim 165$  W/m<sup>2</sup>, o que equivale a  $\sim 14$  W/kg. Como  $1$ W equivale a  $1$  J/s, assim sendo,  $200$  kWh equivale a  $\sim 720$  MJ, o que corresponde a cerca de  $\sim 5.000$  kJ/kg.

Estes valores podem ser aplicados na Figura 3 (NUGENT; KARE, 2011) para observar a relação entre a densidade de potência elétrica (W/kg) e a densidade de energia (kJ/kg) referente ao exemplo anterior. Na Figura 3 a estrela na cor amarela representa a região aproximada da localização desse exemplo de uma residência com os valores de  $\sim 14$  W/kg e  $\sim 5.000$  kJ/kg ( $200$  kWh/m e  $\sim 14$ m<sup>2</sup>).

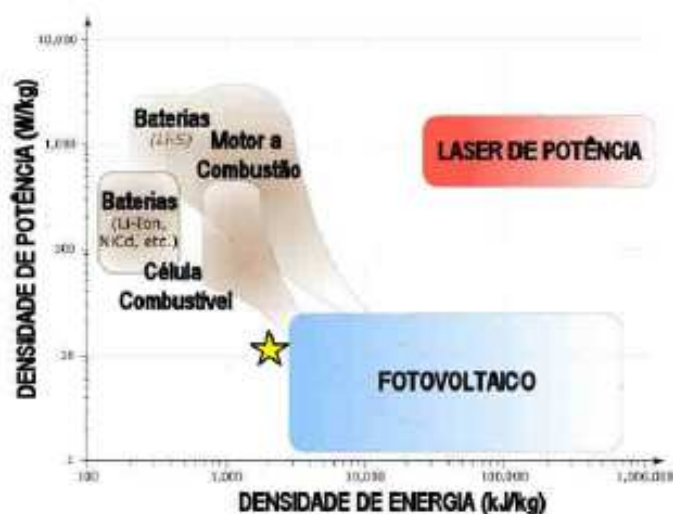


Figura 3. Relação entre Densidade de Potência (W/kg) e a Densidade de Energia (kJ/kg). A estrela amarela é aproximadamente o local calculado no exemplo de uma residência no texto anterior ( $200$ kWh/m e  $14$ m<sup>2</sup> =  $14$ W/kg e  $5.000$  kJ/kg).

Adaptado de Nugent; Kare (2011).

Apesar de possuir uma elevada densidade de potência elétrica (W/kg) a densidade de energia (kJ/kg) está no limiar da densidade típica de sistemas fotovoltaicos. Isso mostra que a densidade de um sistema solar fotovoltaico típico de uma residência possui baixa densidade de energia. Ou seja, está diretamente relacionado à questão relativa a baixa quantidade de energia concentrada em uma residência devido ao baixo consumo de energia elétrica, que por sua vez é muito inferior à área disponível para atender a quantidade de painéis solares fotovoltaicos necessários para suprir a demanda de energia (SMIL B e C, 2006).

Estas diferenças ficaram muito claras quando se compara a relação de disponibilidade de área útil para geração de energia fotovoltaica e o consumo de energia elétrica necessário para cada tipo de consumidor, quer seja residencial, comercial e industrial. Uma diferença básica entre estes três tipos de consumidores é baseado também, na disponibilidade de área útil de telhado de cada tipo de consumidor, que em muitas vezes é o único local disponível para atender uma instalação de um conjunto de painéis de um sistema solar fotovoltaico.



Na Figura 4 (SMIL, 2006 (A) e 2010) pode se observar a relação de sistemas fotovoltaicos (cor verde) comparados com outras fontes de energia e suas respectivas relações entre as densidades de potência elétrica ( $W/m^2$ ) e área ( $m^2$ ). Esta relação para sistemas de produção de eletricidade fotovoltaica é de  $-150$  a  $500 W/m^2$  cuja área total ocupada geralmente não passa de  $500m^2$  para uma instalação típica.

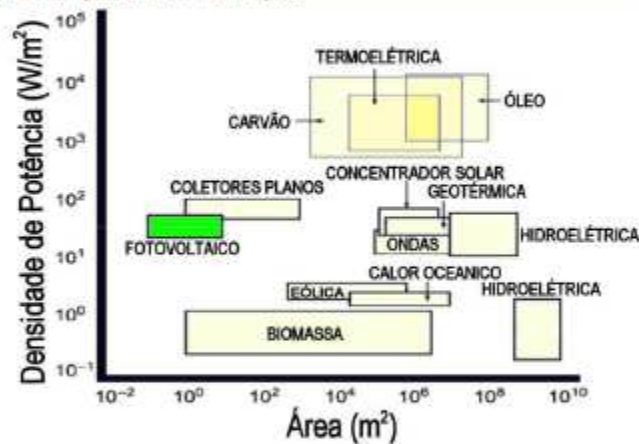


Figura 4. Relação de Densidade de Potência Elétrica por Área Ocupada para diversos tipos de fontes de energia. Na cor verde é possível observar a região atual da fonte fotovoltaica ( $-150-500W/m^2$ ). A adaptado de Smil (2010).

Uma outra forma de observar e comparar as densidades de potência elétrica por área observando-se as características por tipo de instalação elétrica consumidora, tais como: edifícios comerciais, supermercados, residências, indústrias, e até mesmo cidades. Desta forma, é possível relacionar como a energia fotovoltaica pode atender a estes consumidores (SAMPAJO; GONZÁLEZ, 2017; PEDREIRA, 2017).

Na Figura 5 (SMIL, 2006) pode ser visto que os consumidores comerciais (edifícios e supermercados), devido a relação de área por consumo de energia ser ruim, ou seja, pouca área para instalação de painéis solares fotovoltaicos e um consumo alto de energia elétrica, quase que inviabilizam o atendimento de geração de energia elétrica via sistemas solares fotovoltaicos locais. Em contrapartida é possível notar que residências e indústrias podem ser atendidas.

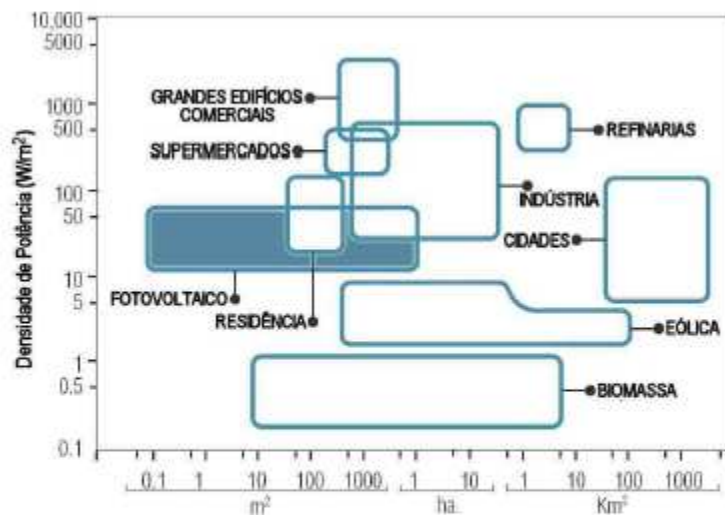


Figura 5. Relação de Densidade de Potência ( $W/m^2$ ) por Área Ocupada ( $m^2$ , ha (hectare =  $10$  mil  $m^2$ ) e  $km^2$ ) Comparando fontes de energia (fotovoltaica em destaque) e tipos de consumidores. Fonte: A adaptado de Smil (2006).



#### 4. RELAÇÃO ENTRE A ÁREA DE TERRENO DISPONÍVEL PARA INSTALAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA E ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA PELO TIPO DE INSTALAÇÃO

Conforme pôde ser observado na Figura 5, residências e indústrias possuem relação boa com a área disponível e quantidade de energia elétrica consumida (SMIL, 2003). Nota-se que a relação é melhor para residências pelo simples fato de que quase que geralmente, a área disponível para painéis solares fotovoltaicos é maior do que a quantidade de energia elétrica consumida, e assim, atendendo de forma mais fácil a quantidade de painéis para geração de eletricidade fotovoltaica.

Este tipo de relação auxilia no entendimento e no direcionamento de projetos de sistemas solares fotovoltaicos, pois pode inclusive ajudar em sistemas automáticos de orçamentos que estimam a quantidade de painéis necessários para atender o consumo de energia elétrica do usuário.

Esta estimativa permite relacionar não só o consumo elétrico do cliente, mas também a relação com a área disponível conforme o tipo de instalação.

Na Figura 6 é possível notar que para instalações consumidoras terão diferentes relações entre a área e o consumo. Em clientes consumidores do tipo residencial a relação é favorável, pois área disponível é maior do que o consumo ( $\text{Área (m}^2) > \text{Potência Consumida (W)}$ ), para clientes do tipo comercial a relação é desfavorável ( $\text{Área (m}^2) < \text{Potência Consumida (W)}$ ), e para clientes do tipo industrial esta relação é pequena, ou seja, a área disponível é similar a quantidade de energia a ser consumida ( $\text{Área (m}^2) \sim \text{Potência Consumida (W)}$ ).



Figura 6. Esquema mostrando visualmente a relação entre a área disponível do terreno de consumidores (residenciais, comerciais e industriais) com relação a densidade de energia elétrica consumida.

Próprio Autor.

As instalações industriais e comerciais podem ter uma vantagem de duas vias, que é proporcionar aos seus clientes e funcionários sombra e energia elétrica. Se a área do terreno permitir, uma ótima solução para geração solar fotovoltaica é a utilização de coberturas para sombras em corredores de pedestres nas áreas industriais, e coberturas fotovoltaicas de estacionamentos para veículos, tanto para a indústria, quanto para o comércio. A utilização de uma área de estacionamento pode permitir ao cliente comercial diminuir a desvantagem que ele pode possuir na área disponível para geração solar fotovoltaica.

Outro viés importante referente a relação entre a área e consumo de energia é estimar e conhecer a área útil disponível nos telhados por tipo de cliente consumidor, pois isso permite avaliar quanto de área de telhado é disponível para instalação dos painéis solares fotovoltaicos no projeto.

#### 5. ESTIMATIVA DA DENSIDADE DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PELA ÁREA DISPONÍVEL DE TELHADO POR TIPO DE CONSUMIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA

A estimativa de área disponível no telhado permite saber a quantidade de painéis podem ser instalados para a geração de energia solar fotovoltaica. Quando uma estimativa da quantidade de painéis solares fotovoltaica é realizada para atender uma determinada potência elétrica consumida, mas sem relacionar o tipo de cliente e a área real útil para a instalação dos painéis, a chance de ocorrer um grande erro na quantidade de painéis devido a falta de área para sua instalação. Isso ocorre principalmente para as instalações em clientes comerciais.

Na Figura 7 nota-se que existe uma representação ilustrativa dos tipos de instalações (residencial, comercial e industrial) mostrando que existe uma faixa de porcentagem da quantidade de energia elétrica que pode ser gerada por um sistema solar fotovoltaico que esta diretamente relacionado a área disponível apenas nos telhados destes tipos de consumidores de energia elétrica.



Figura 7. Esquema mostrando visualmente a relação entre a área disponível do telhado de consumidores (residenciais, comerciais e industriais) com relação ao atendimento de energia elétrica consumida. Próprio Autor.

Conforme a Figura 7, os valores típicos estimados para os consumidores residenciais é de ocupação de cerca de 1/4 da área de seus telhados para gerar entre 80-100% da energia elétrica necessária e consumida pela instalação. Note que a relação do cliente comercial é bem menor, ou seja, mesmo que seja utilizado 100% da área do telhado, apenas 20-40% da energia necessária é produzida. Entretanto, para uma instalação elétrica industrial, a relação é de cerca de 2/3 da área do telhado para produzir cerca de 60-80% do total de energia elétrica consumida.

Assim sendo, pode-se elaborar uma estimativa de cálculo que leve em consideração a relação entre a área útil dos telhados e dos terrenos, além do consumo de energia elétrica para cada tipo de instalação, conforme pode ser visto na suposição a seguir.

Supondo os seguintes parâmetros para cálculo de estimativa de uma instalação *Solar Fotovoltaica Residencial*:

- Consumo médio de potência elétrica em 12 meses: 200 kWh/mês;
- Classe de ligação elétrica residencial bifásica mínimo obrigatório: 50 kWh;
- Geração elétrica solar fotovoltaica: 150 kWh/mês;
- Potência elétrica dia: 5 kWh/dia;
- Área total disponível do terreno: 200m<sup>2</sup>;
- Área total disponível no telhado: 50m<sup>2</sup>;
- Painéis solares fotovoltaicos genéricos (2m<sup>2</sup>): 330 W;
- Estimativa da densidade de potência fotovoltaica para o painel genérico: 165 W/m<sup>2</sup>
- Localização genérica e dados solarimétricos para irradiação solar diária média mensal (kWh/m<sup>2</sup>.dia) no plano horizontal de Horas de Sol Pico (HSP) = 5 h/dia;
- Rendimento total (perdas por: temperatura, poeira, incompatibilidade elétrica (série e paralelo), cabeamento CC e CA e inversor): 0,8%;
- Potência de pico total dos painéis: 1,25 kWhp;
- Estimativa preliminar da quantidade de painéis solares fotovoltaicos: 3,78 = 4 painéis;
- Potência de pico total pelo número de painéis: 1,32 kWhp;
- Área total ocupada pelos painéis solares fotovoltaicos: 8m<sup>2</sup>;
- Porcentagem de ocupação dos painéis no terreno: 4%;
- Porcentagem de ocupação dos painéis no telhado: 16%.

Assim sendo, para uma instalação solar fotovoltaica do tipo residencial genérica, é fácil observar que tanto a área do terreno, quanto a área do telhado são muito maiores do que a potência elétrica necessária para ser gerada.

Desta forma, é necessário verificar os valores de porcentagem ocupada pelos painéis solares fotovoltaicos no terreno e no telhado, e então comparar com os parâmetros máximos (conforme a Figura 7) determinados para cada tipo de instalação (residencial, comercial e industrial).

Se o valor obtido estimado for maior que o determinado para cada tipo de instalação, deve-se aplicar o valor total máximo da área ocupada dos painéis solares fotovoltaicos estimados no cálculo preliminar, e então, descobrir quantos painéis solares fotovoltaicos podem ser instalados nesta unidade consumidora. Então determinar o número máximo de painéis solares fotovoltaicos corrigidos pela área disponível e que podem ser instalados, e assim, determinar a potência elétrica máxima solar fotovoltaica que pode ser gerada na área disponível.



Supondo os seguintes parâmetros para cálculo de estimativa de uma instalação **Solar Fotovoltaica Comercial**:

- Consumo médio de potência elétrica em 12 meses: 5.000 kWh/mês;
- Classe de ligação elétrica comercial bifásica mínimo obrigatório: 50 kWh;
- Geração elétrica solar fotovoltaica: 4.950 kWh/mês;
- Potência elétrica dia: 165 kWh/dia;
- Área total disponível do terreno: 50m<sup>2</sup>;
- Área total disponível no telhado: 40m<sup>2</sup>;
- Painéis solares fotovoltaicos genéricos (2m<sup>2</sup>): 330 W;
- Estimativa da densidade de potência fotovoltaica para o painel genérico: 165 W/m<sup>2</sup>
- Localização genérica e dados solarimétricos para irradiação solar diária média mensal (kWh/m<sup>2</sup>.dia) no plano horizontal de Horas de Sol Pico (HPS) = 5 h/dia;
- Rendimento total (perdas por: temperatura, poeira, incompatibilidade elétrica (série e paralelo), cabeamento CC e CA e inversor): 0,8%;
- Potência de pico total dos painéis: 41,25 kWhp;
- Estimativa preliminar da quantidade de painéis solares fotovoltaicos: 125 painéis;
- Potência de pico total pelo número de painéis: 41,25 kWhp;
- Área total ocupada pelos painéis solares fotovoltaicos: 250m<sup>2</sup>;
- Porcentagem de ocupação dos painéis no terreno: +100% (o terreno é apenas -20% do total necessário);
- Porcentagem de ocupação dos painéis no telhado: +100% (o telhado é apenas -16% do total necessário).

Aplicando o procedimento descrito anteriormente, tem-se:

- 50m<sup>2</sup> (área do telhado)/2m<sup>2</sup> (área do painel genérico) = 25 painéis solares fotovoltaicos ;
- 25 painéis solares fotovoltaicos (330 W) = 8,25 kWh/mês o que equivale a --20% do total de energia elétrica necessária e consumida pela instalação comercial.

Fica claro que a relação entre as áreas (terreno e telhado) e potência elétrica consumida para as instalações do tipo comercial não atende as necessidades de energia típicas deste tipo de instalação consumidora.

Supondo os seguintes parâmetros para cálculo de estimativa de uma instalação **Solar Fotovoltaica Industrial**:

- Consumo médio de potência elétrica em 12 meses: 20.000 kWh/mês;
- Classe de ligação elétrica industrial trifásica mínimo obrigatório (apenas potência ativa): 100 kWh;
- Geração elétrica solar fotovoltaica: 19.900 kWh/mês;
- Potência elétrica dia: 663,34 kWh/dia;
- Área total disponível do terreno: 4.000m<sup>2</sup>;
- Área total disponível no telhado: 1.500m<sup>2</sup>;
- Painéis solares fotovoltaicos genéricos (2m<sup>2</sup>): 330 W;
- Estimativa da densidade de potência fotovoltaica para o painel genérico: 165 W/m<sup>2</sup>
- Localização genérica e dados solarimétricos para irradiação solar diária média mensal (kWh/m<sup>2</sup>.dia) no plano horizontal de Horas de Sol Pico (HPS) = 5 h/dia;
- Rendimento total (perdas por: temperatura, poeira, incompatibilidade elétrica (série e paralelo), cabeamento CC e CA e inversor): 0,8%;
- Potência de pico total dos painéis: 165,84 kWhp;
- Estimativa preliminar da quantidade de painéis solares fotovoltaicos: 502,54 = 503 painéis;
- Potência de pico total pelo número de painéis: 165,99 kWhp;
- Área total ocupada pelos painéis solares fotovoltaicos: 1.006m<sup>2</sup>;
- Porcentagem de ocupação dos painéis no terreno: -25%;
- Porcentagem de ocupação dos painéis no telhado: -67%.

Nota-se que em uma instalação elétrica industrial, conforme a Figura 7, são 2/3 da área do telhado disponível, no exemplo anterior, a razão é exatamente 2/3 do telhado ocupado por painéis fotovoltaicos e suprindo 100% da energia elétrica consumida. Entretanto, para ser mais conservador, mantém-se a relação de energia elétrica produzida em uma instalação industrial entre 60-80% do total consumido.

## 6. CONCLUSÃO

As relações que existem entre as áreas (terreno e telhado) e a potência elétrica consumida em uma instalação elétrica, vai depender basicamente do tipo de instalação consumidora, se é residencial, comercial ou industrial. Isso define como devem ser observados os parâmetros de um projeto solar fotovoltaico baseado nas estimativas das relações área e potência dos tipos de instalações consumidoras.

Utilizar as estimativas das relações entre potência e área pode auxiliar nos cálculos preliminares e detalhados de projetos de sistemas solares fotovoltaicos, principalmente os sistemas cuja esta relação não é vantajosa para atender o consumo de energia elétrica necessário do consumidor, como no caso das instalações comerciais, ou mesmo equilibrada, como os consumidores industriais.

Fato é que as relações entre as densidades de potência elétrica por área, assim como, as densidades de energia por área, permitem ter uma boa estimativa do sistema de geração solar fotovoltaico necessário para cada tipo de consumidor elétrico. E desta forma, a estimativa aqui apresentada na forma de relações entre áreas (telhado e terreno) e potência elétrica consumida de uma dada instalação elétrica, permite ao engenheiro projetista ser mais assertivo, mesmo que apenas para realizar um simples orçamento, e até para um projeto completo e sua instalação física.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade de Taubaté – UNITAU a oportunidade de estudar e pesquisar. O primeiro autor, agradece e reforça a oportunidade em desenvolver pesquisa científica na instituição como professor doutor convidado do Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica.

## 8. REFERÊNCIAS

- EPE, 2017. Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2017 ano base 2016. Governo Federal Brasileiro, Empresa de Pesquisa Energética (EPE 2017).
- EPE, 2018. Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2018 ano base 2017. Governo Federal Brasileiro, Empresa de Pesquisa Energética (EPE 2018).
- GOV-SP, 2019. Resumo Executivo 4º Bimestre de 2019 - Dados de Produção e Consumo de Energia Elétrica no Estado de São Paulo. Relatório do Governo do Estado de São Paulo, setembro de 2019.
- IEA, 2010. Technology Roadmap - Solar Photovoltaic Energy. OECD/IEA - International Energy Agency.
- JONES, G.; BOUAMANE, L., 2012. "Power from Sunshine": A Business History of Solar Energy. Harvard Business School, Working Paper 12-105 May.
- LAYTON; B. E., 2008. A Comparison of Energy Densities of Prevalent Energy Sources in Units of Joules per Cubic Meter. *International Journal of Green Energy*, vol. 5, pp. 438–455.
- MACKAY, D., 2005. David MacKay's Map of the World - Power Consumption per Person versus Population Density, in 2005. Point size is proportional to land area. The diagonal lines are contours of power consumption per unit area. Disponível em < <http://www.inference.org.uk/sustainable/data/powerd/MapOfWorld.html>>, acessado 16 de março de 2016.
- MACKAY (A), D. J. C., 2013. Solar energy in the context of energy use, energy transportation and energy storage. *Phil Trans R Soc A* vol. 371, 20110431.
- MACKAY (B), D. J. C., 2013. Could energy-intensive industries be powered by carbon-free electricity? *Phil Trans R Soc A* vol. 371, 20110560.
- MAJOR, J., 2017. Solar Energy: Past, Present and Future. The Liverpool Physics Teachers' Conference, July.
- NUGENT, T. J.; KARE, J. T., 2011. Laser Power Beaming for Defense and Security Applications. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*.
- PEDREIRA, N. M. S., 2017. Cenários de Consumo de Energia Domiciliar no Estado do Rio De Janeiro: A Contribuição da Eficientização para uma Reflexão sobre a Pobreza Energética. Dissertação de Mestrado COPPE UFRJ.
- SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A., 2017. Photovoltaic Solar Energy: Conceptual Framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol.74, pp.590–601.

SMIL, V., 2003. Energy at the Crossroads, MIT Press, Cambridge, MA.

SMIL, V., 2006 (A). 21st Century Energy - Some Sobering Thoughts. OECD Observer, vol. 258, n. 59, pp. 22-23.

SMIL, V., 2006 (B). Energy: A Beginner's Guide, Oxford: Oneworld Publishing.

SMIL, V., 2006 (C). Transforming the 20th Century, New York, Oxford University Press.

SMIL, V., 2010. Energy Transitions: History, Requirements, Prospects (Praeger: 2010).

## 1. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

# RELATIONSHIP BETWEEN ELECTRIC POWER AND AVAILABLE AREA FOR EACH TYPE OF PHOTOVOLTAIC INSTALLATION

Filipe Wiltgen, [lfwbarbosa@gmail.com](mailto:lfwbarbosa@gmail.com)<sup>1</sup>

Douglas Fermino, [douglascoefer@gmail.com](mailto:douglascoefer@gmail.com)<sup>1</sup>

João Gomes, [jfbgomes10@gmail.com](mailto:jfbgomes10@gmail.com)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Taubaté

*Abstract.* For a solar photovoltaic project it is necessary to check the availability of area for installation of photovoltaic panels. Each type of consumer of electricity (residential, commercial or industrial) has very different characteristics, both in amount of electric power consumed, as well a availability of installation of photovoltaic panels on roofs or even on ground. The density of energy consumed and electric power provided by photovoltaic panels can vary greatly for each type of consumer. It is observed that in general residential consumers generally have good relationship between area for installation of photovoltaic panels and electricity consumption, but in case of commercial consumers this relationship is hampered by fact that in general consumption is high and area available for installation of photovoltaic panels is small. In industrial case ratio of power density and area can be such that perfectly meets needs, because even in case of lack of available area on roof, parking can still be used, among others. This paper presents a way to estimate relationship between power and available area for each type of consumer unit using solar photovoltaic energy.

**Keywords:** Electricity, Renewable Energy, Photovoltaic Energy