

## **SIMULAÇÃO FLUIDODINAMICA DE TREM DE POUSO DE AERONAVES: MANUFATURA ADITIVA VERSUS MANUFATURA SUBTRATIVA**

Filipe Wiltgen – Universidade de Taubaté  
E-mail: LFWBarbosa@gmail.com ou Filipe.Wiltgen@unitau.br

Jãoo Gomes – Universidade de Taubaté  
E-mail: jfbgomes10@gmail.com

**Resumo:** A comparação da manufatura aditiva com a manufatura subtrativa em projetos de trens de pouso de aeronaves, sob o enfoque da aerodinâmica, pode sem dúvida provar ser inovador para a indústria aeronáutica. Isso é relevante, visto que os requisitos relacionados ao ruído causado pelo arrasto aerodinâmico são cada vez mais severos, por isso é um assunto importante a ser pesquisado. Este artigo apresenta os resultados obtidos com simulações de dinâmica de fluidos (CFD – Computação Fluido Dinâmica) comparando dois modelos diferentes de trem de pouso de aeronaves. O primeiro modelo, um trem de pouso projetado de forma tradicional com manufatura subtrativa, ou seja, não integrado e sem forma aerodinâmica. O segundo modelo desenvolvido em formato aerodinâmico via manufatura aditiva. Por fim, são apresentadas análises de simulações de dinâmica de fluidos e os resultados são discutidos. As análises obtidas dessa pesquisa mostram a necessidade de uma abordagem enfática e mais estudos sobre projetos de trens de pouso de aeronaves. No futuro próximo, é bem possível que o trem de pouso da aeronave seja inteiramente construído com manufatura aditiva.

**Palavras-chave:** Impressão 3D, Manufatura Aditiva, Aerodinâmica, Trem de Pouso de Aeronave.

## **FLUIDODYNAMIC SIMULATION OF AIRCRAFT LANDING GEAR: ADDITIVE MANUFACTURE VERSUS SUBTRACTIVE MANUFACTURE**

**Abstract:** The comparison of additive manufacturing with subtractive manufacturing in aircraft landing gear designs, from the perspective of aerodynamics, can undoubtedly prove to be innovative for aeronautical industry. This is relevant, since requirements related to noise caused by aerodynamic drag are increasingly severe, so it is an important subject to be researched. This article presents results obtained with fluid dynamics simulations (CFD - Computational Fluid Dynamics) comparing two different aircraft landing gear models. The first model, a traditionally designed landing gear with subtractive manufacturing, that is, not integrated and without aerodynamic shape. And second model developed in aerodynamic format via additive manufacturing. Finally, analyzes of fluid dynamics simulations are presented and results are discussed. The analyzes obtained from this research show the need for an emphatic approach and further studies on aircraft landing gear projects. In near future, it is quite possible that aircraft's landing gear will be entirely built with additive manufacturing.

**Keywords:** 3D Printing, Additive Manufacturing, Aerodynamics, Aircraft Landing Gear.

### **1. Introdução**

A manufatura vem evoluindo simultaneamente com a humanidade, ou seja, a cada nova inovação tecnológica o ser humano adquire novas habilidades as quais levam as quebras de paradigmas na fabricação. Estas rupturas nos modos de fabricação geram as chamadas revoluções industriais. A quarta revolução industrial, conhecida no Brasil por Manufatura Avançada (WILTGEN, 2020; GIMENEZ; SANTOS, 2019) é a introdução

de novos conceitos de fabricação via sistemas ciber-físicos, armazenamento de dados em nuvem, internet das coisas, manufatura aditiva, entre tantas outras.

Um dos pilares dessa revolução industrial é a introdução da manufatura aditiva nos meios produtivos (ALCALDE.; WILTGEN, 2018; WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2021). Com a evolução da manufatura aditiva, além de sua tradicional abordagem na prototipagem rápida, é possível atualmente seguir na fabricação de componentes metálicos, ou mesmo em ligas especiais e com metais nobres (GOMES, 2020).

É interessante perceber que existem técnicas de manufatura aditiva em metais que promovem resistência mecânica igual, ou mesmo, maior que nas formas e processos convencionais de manufatura do tipo forjado ou fundido (GOMES, 2020; LEWANDOWSKI; SEIFI, 2016; WILTGEN, 2021).

Além disso, atualmente com as novas pesquisas para remover as porosidades que ocorriam durante processo de fabricação de componentes metálicos via manufatura aditiva, permitiu o desenvolvimento de um material mais resistente e durável (SEEDE *et al.*, 2020).

Isso permitirá a utilização de manufatura aditiva em diversas aplicações que necessitam de resistência mecânica a cargas estáticas e cíclicas (que geram fadiga) o que inclui a construção de trens de pouso de aeronaves, caixa de marchas, palhetas, turbinas, entre outros.

Uma grande vantagem da manufatura aditiva é a redução de consumo de matéria-prima, energia elétrica, e a possibilidade de construir os produtos personalizados e de acordo com cada cliente (SRIVATSAN; SUDARSHAN, 2015).

É possível afirmar que nos próximos anos haverá um grande crescimento na utilização da manufatura aditiva principalmente em metais e em todo tipo de indústria. Especialmente na indústria aeroespacial e aeronáutica, pois ambas necessitam de geometrias complexas, com pouco peso, metais nobres e alta resistência mecânica (GOMES; WILTGEN, 2020).

Nesse artigo a utilização das vantagens construtivas da manufatura aditiva são aplicadas com o intuito da redução de arrasto aerodinâmico. No decorrer do artigo, será apresentado um projeto de construção tradicional via manufatura subtrativa concomitantemente com a concepção de outro projeto desenvolvido via manufatura aditiva. Ambos simulados em fluido dinâmica computacional e comparados. A final será apresentado e discutidas as análise e os resultados aerodinâmicos para cada uma das formas de manufatura aqui propostas.

## **2. Aerodinâmica e Arrasto**

A aerodinâmica pode ser definida como o estudo dos movimentos e suas interações com os fluidos que a cercam. Relaciona esses movimentos relativos às suas propriedades, seus formatos e suas características geométricas, com as forças que atuam sobre os sólidos imersos nesse fluido (MATOS; DIAS, 2007).

Arrasto aerodinâmico é definido como uma força de retardo causada por interrupção fluxo de ar, que dessa forma, causa turbulência no fluido e produz ruído aerodinâmico (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2008).

Um dos tipos de arrasto é o devido ao formato de uma geometria, chamado de arrasto de forma, e justamente tem este nome pela maneira como o fluxo de ar passa pela geometria. A adoção de uma geometria a perfil conhecido como NACA (*Neighborhood*

*Assistance Corporation of America*) que produz menor arrasto aerodinâmico, e por consequência menos ruído acústico, e menos energia é dissipada.

Para avaliar geometrias aerodinâmicas em duas dimensões, devem ser utilizados formatos que representam a seção de determinada asa, perfil de asa ou aerofólio (JUNIOR; COSTA, 2016). Por este motivo, nesta pesquisa buscou-se um perfil de trem de pouso de aeronave o mais similar possível a uma asa de aeronave.

Quando se refere a ruídos provocados por turbulência pode-se afirmar que os ruídos de aeronaves foram primeiramente notados como algo importante na década 60 (YONG *et al.*, 2013; MERINO-MARTÍNEZ *et al.*, 2021).

O ruído aerodinâmico é considerado caso de saúde pública pela organização mundial da saúde (GOMES, 2020), pois pode provocar várias doenças (ZHAO *et al.*, 2020).

No que se refere ao arrasto e ruído provocado por um trem de pouso de aeronave a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) vem desde 2017 (MINAFRA, 2017) pesquisando e simulando trens de pouso de aeronaves. Nessa pesquisa foi possível verificar que as características do fluxo de ar e a forma como este interage com o trem de pouso de uma aeronave que quanto maior for a turbulência gerada pelo arrasto aerodinâmico maior será o ruído produzido e a dissipação de energia.

Portanto, com o intuito de melhorar a aerodinâmica do trem de pouso foi estudada uma perna de força com o perfil similar possível ao de uma asa de avião com o perfil do tipo NACA, e dessa forma diminuir a turbulência causada pelo arrasto aerodinâmico que são a causa do ruído acústico (BECK, 2010; MINAFRA, 2017).

### **3. Trem de Pouso de Aeronaves**

O Trem De Pouso (TDP) de uma aeronave é a estrutura responsável pela movimentação de um avião durante a sua decolagem e pouso. Permite que em uma pista de aeroporto, a aeronave possa acelerar e desacelerar, promovendo a absorção e dissipação da energia do impacto com o solo durante o pouso, decolagem, taxiamento, frenagem e manobras em solo.

Foi Alberto Santos Dumont o primeiro a instituir um trem de pouso com rodas em uma aeronave (14 Bis) (CURREY, 1988).

Os TDP podem ser auxiliares ou principais, o primeiro é o posicionado na parte frontal da aeronave mais próximo ao “nariz” do avião, o segundo tipo, principais, são posicionados mais na região central da aeronave, normalmente mais próximos às asas.

Pode-se afirmar que ao projetar um TDP deve-se obter o mínimo peso possível, volume ocupado e tempo de fabricação e montagens.

Quando a massa do dispositivo TDP, é importante reduzir o máximo possível o peso sem comprometer funcionalidades de desempenho e resistência. O TDP é um equipamento que precisa atender muitos requisitos e normalmente são necessários testes e ensaios com muitos protótipos durante o seu desenvolvimento onerando o processo (DIVAKARAN *et al.*, 2018; BÖHNKE *et al.*, 2011; JAMESON *et al.*, 2000).

### **4. Desenvolvimento do Projeto em CAD 3D**

Os projetos desenvolvidos para estas simulações serão permitirão a comparação de cada modelo e seus resultados serão visualmente analisados com relação as intensidades apresentadas nas simulações fluidodinâmicas computacionais.

Durante o projeto do trem de pouso de aeronave via manufatura subtrativa, devido às características restritivas da técnica, optou-se pelo desenvolvimento de um trem de pouso de aeronave que possui um balancim e o amortecedor não integrado a perna de força é o padrão atualmente adotado de fabricação de trens de pouso tradicional possuindo uma quantidade razoável de componentes e partes, devido a necessidade de fixação o que resulta em um projeto de trem de pouso de aeronaves como pode ser observado na Figura 1.

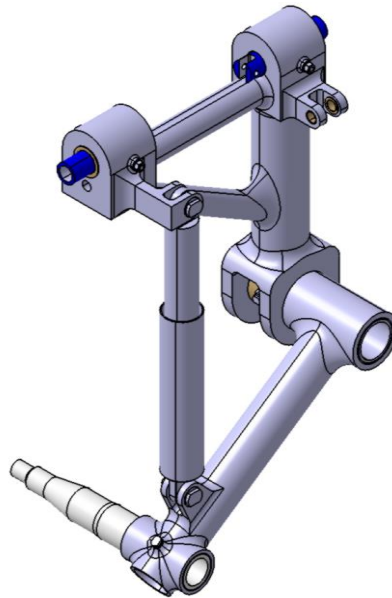


Figura 1 – Trem de pouso de uma aeronave projetado via manufatura subtrativa.

Fonte: Gomes (2020).

Na Figura 2 é possível verificar que no projeto concebido para manufatura aditiva para o desenvolvimento do trem de pouso de aeronave permitiu a integração de partes (perna de força e eixo de roda), além de possibilitar a construção de uma geometria no perfil do tipo NACA para diminuir a turbulência aerodinâmica. Os dois tipos de modelos foram projetados em CAD (*Computer Aided Design*).

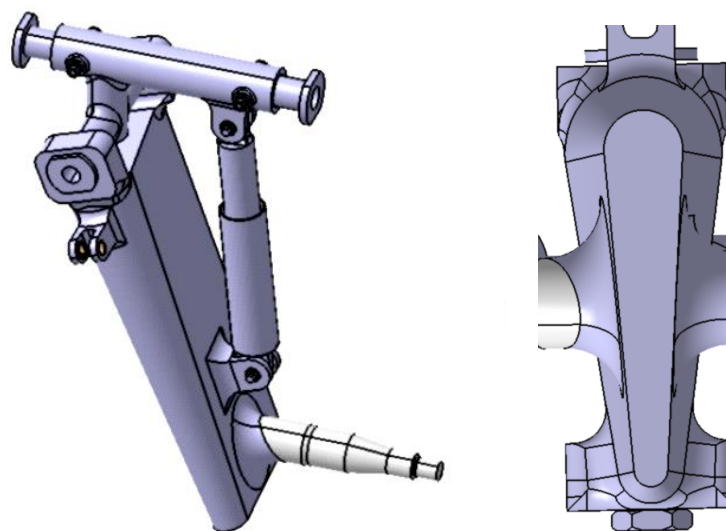


Figura 2 – Trem de Pouso de uma aeronave projetado aerodinamicamente via manufatura aditiva.

Fonte: Gomes (2020).

Com o resultado da integração de componentes do modelo em manufatura aditiva, foi possível a redução na quantidade de componentes e assim de massa. Enquanto, o projeto tradicional em manufatura subtrativa necessitou de trinta e quatro componentes a mais. O modelo via manufatura aditiva necessitou um total de 22 componentes, uma redução de peças na ordem de ~35% se comparado ao modelo de manufatura subtrativa.

## 6. Simulação Computacional Fluidodinâmica

A confecção do modelo em CAD para a simulação computacional fluidodinâmica (CFD) para os dois diferentes modelos de trem de pouso de aeronave (GOMES, 2020; BÖHNKE *et al.*, 2011; JAMESON *et al.*, 2000) permitiu conduzir as simulações necessárias para a comparação.

É importante salientar que o objetivo dessa pesquisa é avaliar os formatos dos trens de pouso de aeronaves tendo como objetivo principal a comparação da aerodinâmica e o nível de arrasto aerodinâmico provocado pela forma desses modelos, por esse motivo, nas simulações não foram adicionados os pneus, as rodas e os amortecedores, pois esses componentes extras poderiam mascarar os resultados das simulações.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os resultados das simulações fluidodinâmicas em vista isométrica no qual podem ser observados os comportamentos do fluxo de ar através dos dois modelos diferentes de trens de pouso de aeronave, tanto via manufatura subtrativa, quanto via manufatura aditiva, respectivamente.

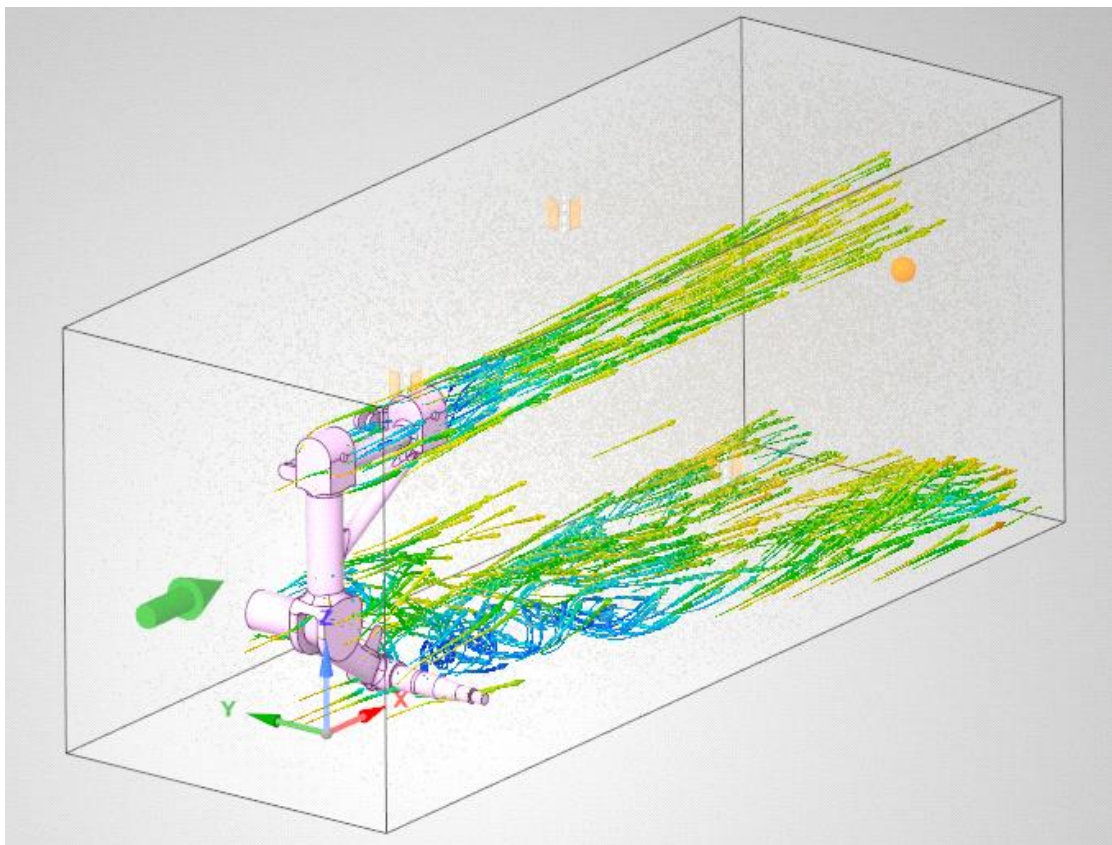


Figura 3 – Fluxo de ar em um trem de pouso de aeronave via manufatura subtrativa – vista isométrica.

Fonte: Próprios Autores.

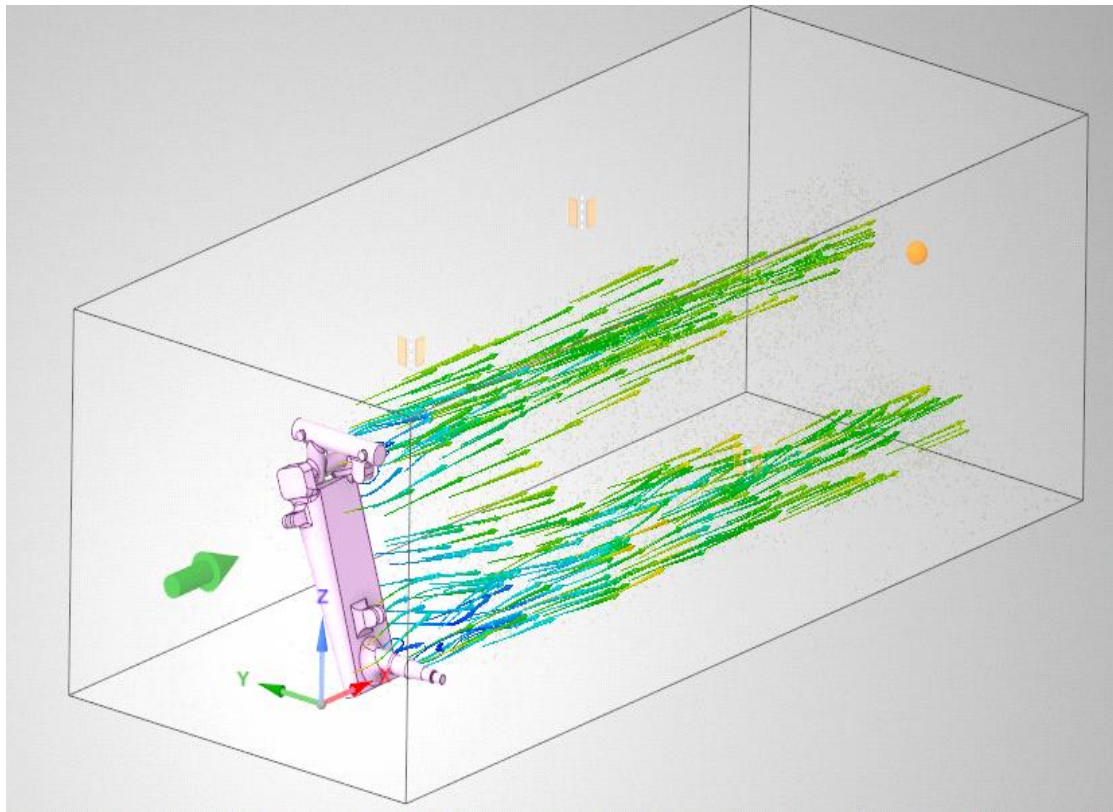


Figura 4 – Fluxo de ar em um trem de pouso de aeronave formato aerodinâmico via manufatura aditiva – vista isométrica.

Fonte: Próprios Autores.

O programa utilizado foi ANSYS *Discovery Live 2020 R1 Academic Version*. Os parâmetros para as simulações adotados foram: velocidade de 100 m/s (360 km/h), que é uma velocidade compatível com uma aeronave em procedimento de aceleração na decolagem e desaceleração no caso do procedimento de pouso, a temperatura ambiente fixada em 20°C, e por fim, a pressão de saída fixada em 0 (zero) Mpa. A menos da velocidade os demais parâmetros são por definição, padrão de simulação do programa e configurados automaticamente (GOMES, 2020). O fluido escolhido foi aplicado na direção do eixo x positivo, conforme podem ser observados nas figuras.

Na Figura 5 em uma vista frontal (plano XZ), é possível observar que na parte superior da imagem o fluxo de ar é menos turbulento quando comparado ao restante do comportamento do dispositivo. Vê-se claramente que a região de eixo da roda provoca grande quantidade de turbulência e por consequência arrasto e ruído no modelo de manufatura subtrativo.

Na Figura 6 em uma vista frontal (plano XZ), é possível ver o trem de pouso aeronáutico com geometria aerodinâmica da manufatura aditiva e perceber que a parte superior no qual fica localizada a haste integrada, assim como, na parte inferior na região de eixo da roda há uma pequena turbulência, mas que não impede o comportamento laminar no fluxo de ar nessa vista de simulação.

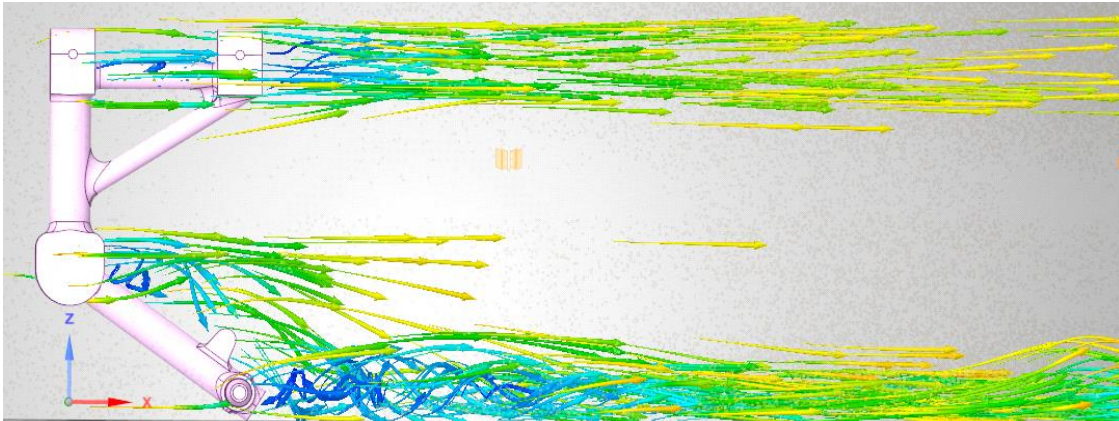


Figura 5 – Fluxo de ar em um trem de pouso de aeronave via manufatura subtrativa– vista frontal.

Fonte: Próprios Autores.

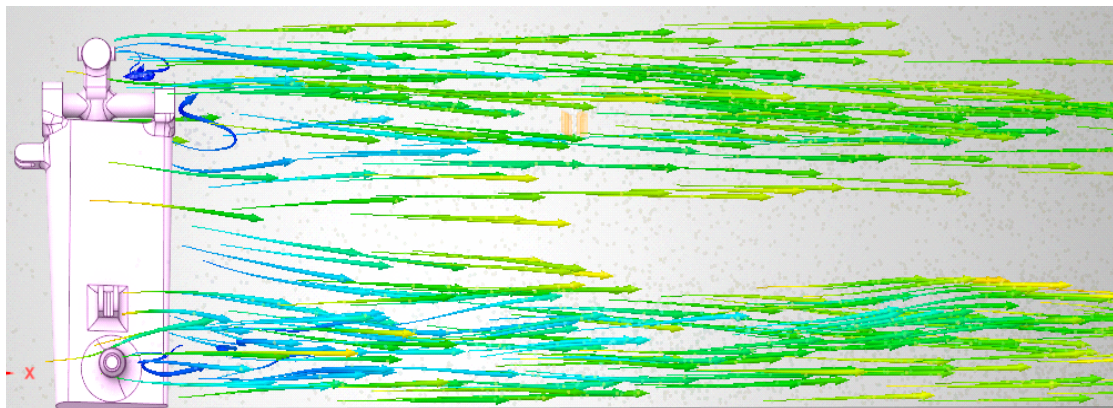


Figura 6 – Fluxo de ar em um trem de pouso de aeronave formato aerodinâmico via manufatura aditiva – vista frontal.

Fonte: Próprios Autores.

Nas Figuras 7 e 8 é possível observar os resultados das simulações na vista superior (plano XY) para os dois modelos de trem de pouso de aeronave.

Na Figura 7 é possível verificar que o trem de pouso desenvolvido via manufatura subtrativa apresenta uma alteração significativa no comportamento do fluxo de ar no qual gera um “espalhamento” do ar, ou seja, uma região de perturbação no fluxo de ar o que provoca um comportamento turbulento e arrasto aerodinâmico.

Na Figura 8 é possível observar que o comportamento do trem de pouso com formato aerodinâmico via a manufatura aditiva que ocorre turbulência na região da haste integrada e no eixo da roda, inevitáveis devido a forma geométrica, mas verifica-se que nas outras regiões do dispositivo o fluxo de ar é quase laminar. Assim sendo, é visível que o perfil aerodinâmico desenvolvido via manufatura aditiva reduziu o arrasto aerodinâmico responsável por produzir turbulência e ruído acústico.

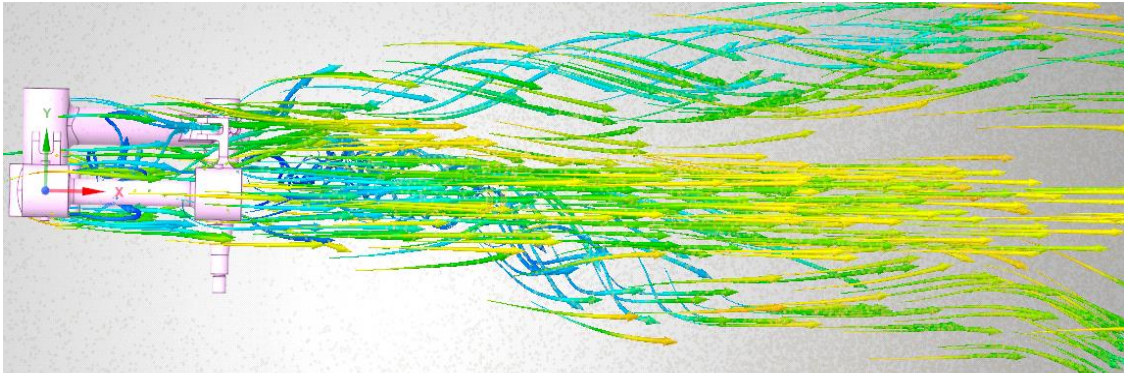


Figura 7 – Fluxo de ar em um trem de pouso de aeronave via manufatura subtrativa – vista superior.

Fonte: Gomes (2020).

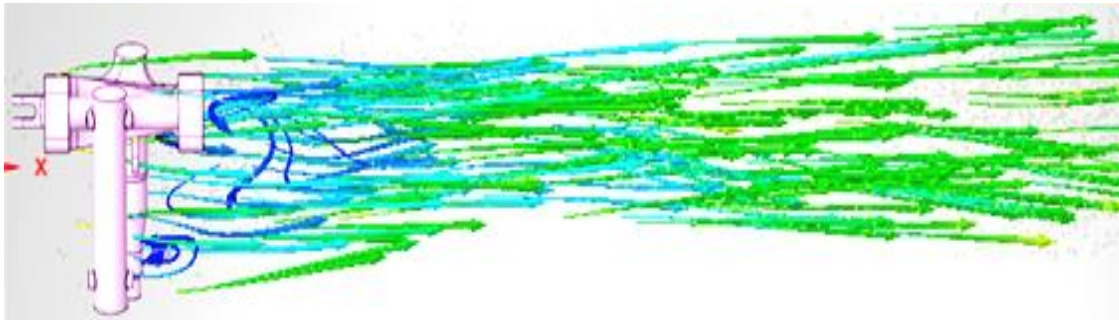


Figura 8 – Fluxo de ar em um trem de pouso de aeronave via manufatura aditiva – vista superior.

Fonte: Gomes (2020).

### 7. Protótipo do Trem de Pouso de Aeronave Via Manufatura Aditiva

Após a conclusão e análise das simulações, foi fabricado um protótipo em escala reduzida do trem de pouso de aeronave com perfil aerodinâmico em manufatura aditiva.

O protótipo da Figura 9, teve o objetivo de verificar visualmente as vantagens intrínsecas observadas nas simulações. Nesse primeiro momento o protótipo foi construído em plástico utilizando-se uma impressora 3D do tipo FDM (*Fused Deposition Modeling* ou Modelagem por Deposição Fundida) (ALCALDE; WILTGEN, 2018; WILTGEN, 2019; GOMES, 2020).



Figura 9 – Protótipo via manufatura aditiva FDM em plástico do tipo PLA.

Fonte: Gomes (2020).



Para facilitar a fabricação do protótipo do trem de pouso de aeronave do tipo aerodinâmico foi desenvolvido um modelo em CAD na forma de um sólido em peça única, incluindo parafusos, porcas e o sistema de amortecimento.

A manufatura aditiva em plástico (impressão 3D) é relativamente simples e permite obter um protótipo físico do modelo em CAD. Dessa forma, foi possível verificar modificações necessárias para implementar possíveis melhorias no dispositivo, como por exemplo, distanciamento maior entre olhal de fixação do amortecedor e eixo da roda, o que deve melhorar ainda mais os resultados das simulações fluidodinâmicas no futuro breve.

### **8. Discussão e Conclusões**

A pesquisa desse artigo está relacionada a simulação fluidodinâmica de dois diferentes modelos de trens de pouso de aeronaves, um desenvolvido via manufatura subtrativa, e o outro via manufatura aditiva.

As simulações aqui apresentadas permitiram observar o comportamento aerodinâmico nos dois modelos de trens de pouso de aeronaves, as quais conduziram as análises dos resultados das simulações.

Na compreensão dos resultados apresentados, o trem de pouso com perfil aerodinâmico desenvolvido via a manufatura aditiva se mostrou, como o esperado e conforme as pesquisas em andamento, muito promissor. A adoção de um perfil semelhante a um aerofólio ou asa de um avião (formato NACA) proporcionou fluxos de ar menos turbulentos sobre o dispositivo e assim, tornando-os menos ruidosos.

Um projeto de trem de pouso via manufatura aditiva tem como vantagem a fabricação de partes mais complexas e com redução de massa, e de arrasto aerodinâmico. O uso da manufatura aditiva pode ainda, como apresentado nessa pesquisa, permitir integrar componentes e partes de um dispositivo levando a diminuição dos prazos de fabricação e montagens.

A manufatura aditiva no futuro próximo deve evoluir de forma significativa no uso de metais, e assim, ser aplicada em todas as áreas da aeronáutica.

Portanto, as simulações fluidodinâmicas dos trens de pouso de aeronaves com perfis aerodinâmicos, como os desenvolvidos nesta pesquisa, indicam que sua fabricação pode implicar em uma alternativa para a implantação de aeroportos em locais no qual existem sérios problemas de poluição audível, e por este motivo, é algo que vale a pena ser pesquisado profundamente.

### **Referências**

**ALCALDE, E.; WILTGEN, F.**, *Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro*. Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté, v.24 (2), pp. 12-20, 2018.

**BECK, P. A.** *Análise Metodológica de Simulações de Escoamentos Turbulentos Sobre Seções de Perfis Aerodinâmicos*. Dissertação Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2010. 138p.

**BÖHNKE, D.; NAGEL, B.; GOLLNICK, V.** *An Approach to Multi-Fidelity in Conceptual Aircraft Design in Distributed Design Environments*. IEEE Aerospace Conference, pp.1-10, 2011.

**CURREY, N.** *Landing Gear Design Handbook*. American Institute of Aeronautics & Astronautics, 1988. p.373.

**DIVAKARAN, V. N.; RAVIKUMAR, G. V. V.; SRINIVASA, P.** *Aircraft Landing Gear Design & Development: How Advanced Technologies are helping to meet the challenges?*. White Paper, Infosys, pp.1-12, 2018.

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

**GIMENEZ, D.; SANTOS, A.** *Indústria 4.0, Manufatura Avançada e seus Impactos sobre o Trabalho*. Texto para Discussão, Unicamp. IE, Campinas, n.371, novembro, 2019.

**GOMES, J.; WILTGEN, F.** *Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais e Máquinas*. Revista Tecnologia. v.41(01), pp.1-16, 2020.

**GOMES, J.** *Estudo, Simulação e Desenvolvimento de Trens de Pouso de Aeronaves Integrados Via Manufatura Aditiva*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2020.

**JAMESON, A.; MARTINELLI, L.; ALONSO, J. J.; VASSBERG, J. C.; REUTHER, J.** *Simulation Based Aerodynamic Design*. IEEE Aerospace Conference, BigSky, March, v.4(07), pp.1-24, 2000.

**JÚNIOR, J.; COSTA, F.** *Análise Numérica de Escoamento sobre Perfil de Asa: Estudo de Modelo NACA 64A004.291*. Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada, Ponta Grossa, v.3(02), pp.1-18, 2016.

**LEWANDOWSKI, J.; SEIFI, M.** *Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties*. Annual Review of Materials Research, v.46, pp.151-186, 2016.

**MATOS, C. C.; DIAS, B. R.** *A Influência da Aerodinâmica no Design*, Actas de Diseño. II Encuentro Latino Americano de Diseño "Diseño en Palermo" Comunicaciones Académicas, Buenos Aires, Argentina, Universidad de Palermo, 31 julho a 03 agosto, pp.1-7, 2007.

**MERINO-MARTÍNEZ, R.; KENNEDY, J.; BENNETT, G. J.** *Experimental Study of Realistic Low-Noise Technologies Applied to a Full-Scale Nose Landing Gear*. Aerospace Science and Technology, v.113(08), pp.1-21, 2021.

**MINAFRA, K.** *Researchers Explore Aircraft Landing Gear Aerodynamics Through Supercomputer Simulations*. NASA Highlights Simulations, 2017.

**SEEDE, R.; SHOUKR, D.; ZHANG, B.; A. WHITT, 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*. Materialia, v.186, pp.199-214, 2020.

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

**WILTGEN, F.**, *Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico*. Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia e Fabricação (COBEF), São Carlos-SP, pp.1-5, 2019.

**WILTGEN, F.** *Manufatura Avançada precisa de uma Engenharia Avançada*. Tecnologia, v.41(02), pp.1-11, 2020.

**WILTGEN, F.**, *Manufatura Aditiva em Metais – Leve, Forte e Inovador*. Revista de Engenharia e Tecnologia, v.13(02), pp.47-58, 2021.

**YONG, L.; XUNNIAN, W.; DEJIU, Z.** *Control Strategies for Aircraft Airframe Noise Reduction*. Chinese Journal of Aeronautics, v.26(02), pp.249-260, 2013.

**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, v.112, pp.1-23, 2020.