



## ANÁLISE DE CONTROLE DE ESCOAMENTO EM AERONAVES USANDO FOTOELASTICIDADE PARA VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE PROTÓTIPOS FEITOS DE RESINAS TRANSPARENTES

**Bruno G. Neto**  
**Cássio S. F. Chamone**  
**Filipe G. Vieira**  
**Marco Túlio Silva**  
**Pedro Américo A. M. Júnior**  
[bruno.garkauskas@outlook.com](mailto:bruno.garkauskas@outlook.com)  
[cassiochamone@gmail.com](mailto:cassiochamone@gmail.com)  
[filipevieira\\_90@hotmail.com](mailto:filipevieira_90@hotmail.com)  
[silvatuliomec@gmail.com](mailto:silvatuliomec@gmail.com)  
[paamjr@gmail.com](mailto:paamjr@gmail.com)

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil – 30535-610

**Resumo:** No contexto do estudo dinâmico do escoamento, o artigo mostra uma metodologia inédita. Há uma grande dificuldade em determinar o momento de transição do fluxo laminar para turbulento em ensaios experimentais, além disso, muitos dos modelos em escala empregados em análises em túnel de vento costumam ter um custo razoável e demandam um tempo elevado de construção. Este trabalho conta com uma verificação de modelos numéricos de aerodinâmicos através do ensaio em túnel de vento com uso de lentes de fotoelasticidade e câmeras fotográficas, o que permitirá verificar o momento em que as tensões aumentam sobre o modelo e determinar a transição dos regimes. Também, a produção de modelos em resina transparente desenvolvidos em ferramenta de CAD, traz ao projeto um ganho de tempo, redução de custos e possibilidade de experimentação inovadora. Considerando o aspecto da redução do arraste proveniente do ar, a intenção de estabelecer uma correlação das melhores medidas de controle do escoamento a baixos custos representa a possibilidade de emprego imediato das tecnologias, com significativa economia nos âmbitos do consumo de combustível e manutenção de componentes de superfície, além de possibilitar maiores velocidades e, conseqüentemente, redução do tempo de voo. Simulações computacionais verificam os dados experimentais.

**Palavras Chaves:** Análise estrutural; Elementos finitos; Foto elasticidade; Limite de escoamento; Aerodinâmica.

## 1 INTRODUÇÃO

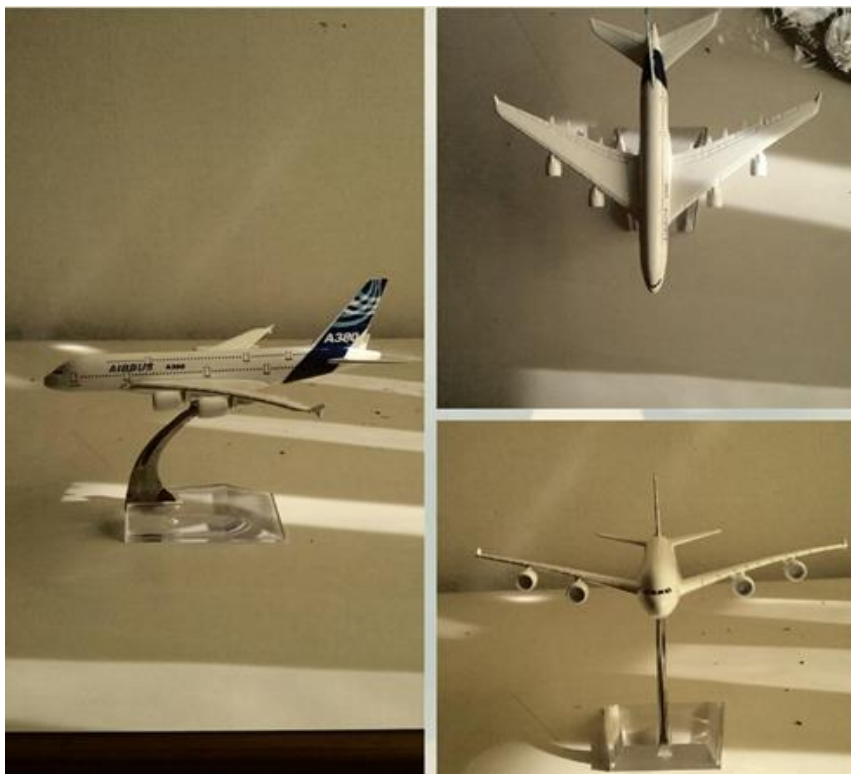
A técnica fotoelástica, conforme Magalhães (2011), surgiu do trabalho de Sir Davis Brewster em 1816, estudando o comportamento físico dos materiais transparentes não cristalinos e descrevendo o fenômeno denominado hoje de refração dupla temporária. Todavia, foram as Teorias de Maxwell sobre ondas eletromagnéticas, fenômeno da birrefringência, refração dos materiais transparentes, polarização da luz e outros que realmente formaram os princípios básicos da fotoelasticidade (Magalhães, 2011).

O ensaio é realizado em um equipamento denominado polariscópio, com uso de luz branca ou com luz monocromática. São geradas imagens com dois tipos de franjas, as isoclínicas e as isocromáticas, onde podem ser obtidas as informações sobre as direções e diferença de tensões principais em corpos de prova sob ação de esforços. Com a simples observação da forma e cor dessas franjas fotoelásticas na imagem é possível se obter uma rápida análise qualitativa da distribuição global de tensões na região sob análise.

Utilizando a técnica fotoelástica para estudo de tensões em asas de aeronaves e conciliando a análise dinâmica de fluídos e de carregamento computacional com modelos fotoelásticos de resina transparente, obteve-se um protótipo de baixo custo para averiguar em tempo real a variação de tensão.

## 2 METODOLOGIA

Para a realização do trabalho, foi utilizado o modelo em miniatura da aeronave Airbus A380 mostrado na Fig. 1, um molde feito da própria miniatura em resina transparente, análise de escoamento, análise estrutural e testes práticos no túnel de vento.



**Figura 1. Miniatura do Airbus A380**

## 2.1 Processo de modelagem do avião em resina transparente

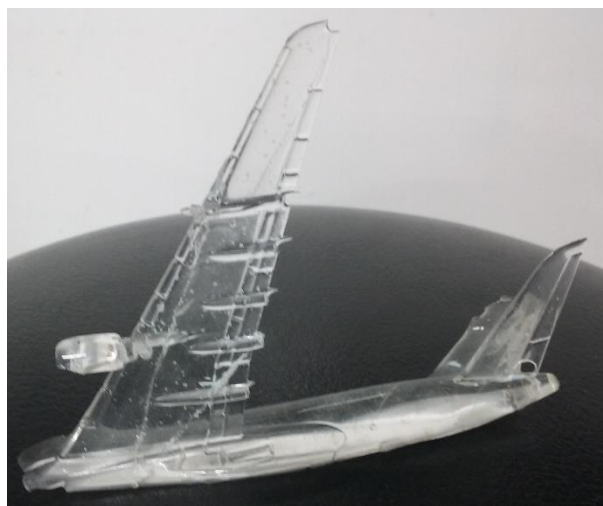
A confecção do modelo do avião em resina transparente se dá inicialmente pela construção de um molde de borracha de silicone industrial, um elastômero de secagem por poli condensação, que resulta em um produto elástico, excelentes níveis de detalhes, de boa resistência e moldabilidade. A borracha é um bi componente, ou seja, a cada um Kg de borracha é necessário 30 mL de catalisador.

Para a obtenção do molde, mistura-se o silicone e o catalisador nas proporções indicadas pelo fabricante. Posteriormente, despeja-se em uma caixa com dimensões maiores que a miniatura do avião A380 utilizada, cobrindo-a inteiramente. O processo de secagem da borracha de silicone leva em torno de uma hora, podendo ser removido da caixa após esse tempo.

Após obtenção do molde da borracha de silicone é realizada a preparação da resina que constituirá o modelo desejado. A resina final é constituída por sistemas bi componentes à base de resina epóxi e endurecedores. Depois de aplicado sobre a peça, a mistura formará uma lente rígida ou flexível com alta transparência e brilho. Além disso, possui uma característica de maior resistência à umidade do ar, o que evita a perda de peças e gera um acabamento sem defeitos como névoa ou estrias superficiais, que seriam prejudiciais para a análise fotoelástica. Ambos os sistemas são curados a frio, não necessitando de estufa ou mesa resinadora, o que acarreta uma fácil aplicação e menor incidência de bolha devido a sua baixa viscosidade.

A preparação consiste em estimar o volume aproximado que a peça ocupa no molde, obtendo-se a quantidade adequada de cada resina seguindo as proporções de 80% da resina flexível e 20% da resina rígida. Posteriormente, adiciona-se o endurecedor de cada resina na proporção de 2:1 misturando até que seja obtida uma mistura completamente transparente e homogênea.

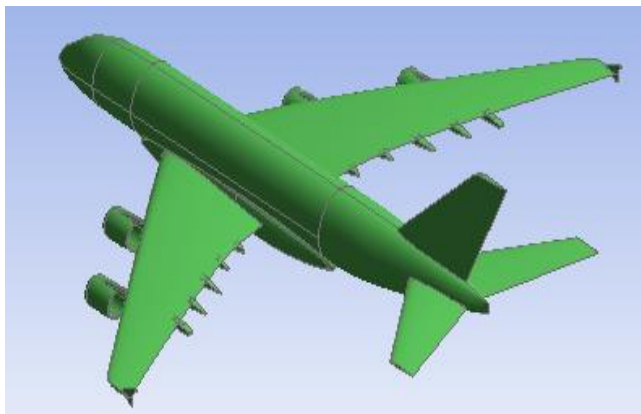
Após o tempo de cura da resina, que dura aproximadamente 24 horas, o modelo pode ser retirado do molde de silicone conforme Fig. 2.



**Figura 2. Modelo em corte de miniatura do Airbus A380 em resina transparente**

## 2.2 Análise aerodinâmica

Foi redefinida a geometria do avião para deixá-lo um único sólido, removendo os detalhes como portas, janelas e perfurando as turbinas, para simplificar a análise, conforme observado na Fig. 3.

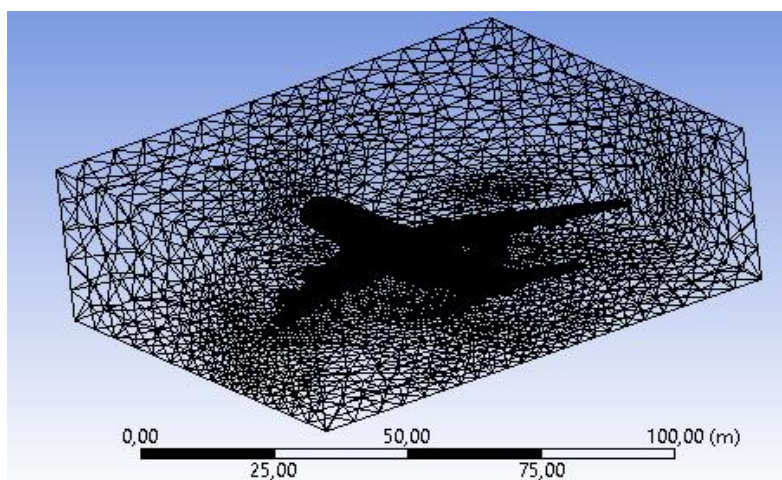


**Figura 3. Modelo como um sólido**

A análise de escoamento foi realizada utilizando-se a ferramenta “Fluid Flow (Fluent)” do software Ansys, exigindo inicialmente a criação de um contorno ou cápsula no entorno do avião para definir a área de análise abrangida.

Com a geometria de análise definida, construiu-se a malha para análise conforme observado na Fig. 4. Definiu-se para a condição de contorno da análise o plano frontal, mais próximo do nariz do avião, como entrada, estando sujeito a velocidade de entrada e o plano posterior como saída. A velocidade utilizada para a análise de escoamento foi definida como 972 km/h (270 m/s), velocidade intermediária entre a velocidade de cruzeiro e a velocidade máxima do modelo de avião estudado (A380 Specification, 2016).

Modelo de análise fluidodinâmica computacional (CFD) utilizado é do tipo K-epsilon, em que são definidas duas variáveis de transporte. A primeira variável, “K”, corresponde a energia cinética de turbulência e “ $\epsilon$ ” representa a turbulência dissipada. Esse é o modelo mais utilizado em estudo de casos que apresentam escoamento turbulento (Wilcox, 1998).



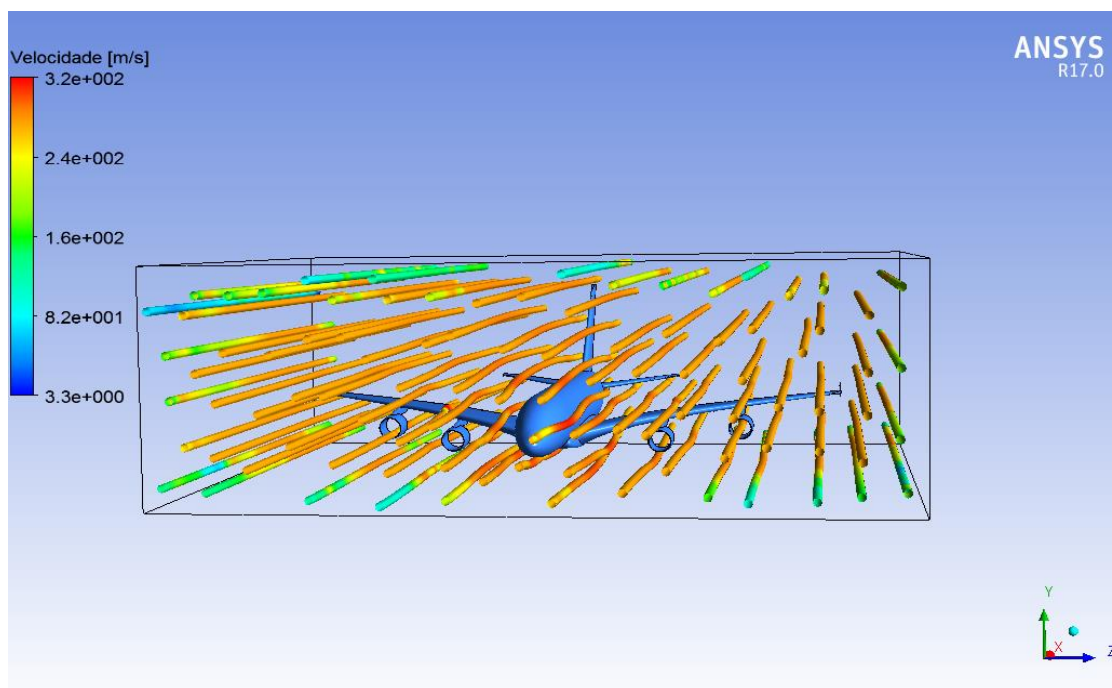
**Figura 4. Malha em torno da geometria**

### 3 RESULTADOS

Após a execução da análise CFD pelo software, pôde-se observar as linhas de velocidade do ar ou linhas de corrente em torno do avião, representadas no formato tubular conforme demonstrado pela Fig. 5.

Observa-se que as linhas mais próximas à geometria da aeronave tendem a seguir o seu contorno sofrendo acelerações em alguns pontos específicos, como na lateral próxima ao nariz da aeronave e também na parte superior da turbina. Quanto maior o distanciamento da geometria, menores as velocidades avaliadas e a variação ao longo da aeronave.

As velocidades observadas variam de maneira que em alguns pontos podem chegar a ser superiores a velocidade de voo utilizada na análise gerada, que corresponde a 270 m/s. Percebem-se algumas linhas de corrente em que a velocidade atingida pelo ar escoando no entorno do avião chega a 320 m/s, quase 20% a mais do que a velocidade da aeronave.



**Figura 5. Linhas de velocidade do ar**

Na Fig. 6 é mostrado um plano de pressão em cima da asa do avião. Esses planos podem ser definidos ao longo de toda a extensão da aeronave e são úteis para determinar a magnitude das tensões aplicadas e sua distribuição ao longo da aeronave. Observa-se neste plano que as extremidades do corpo da aeronave delimitadas no plano YZ representado apresentam maiores valores de tensão, bem como, de maneira geral, as pressões na região inferior à asa são maiores que as pressões na porção superior.

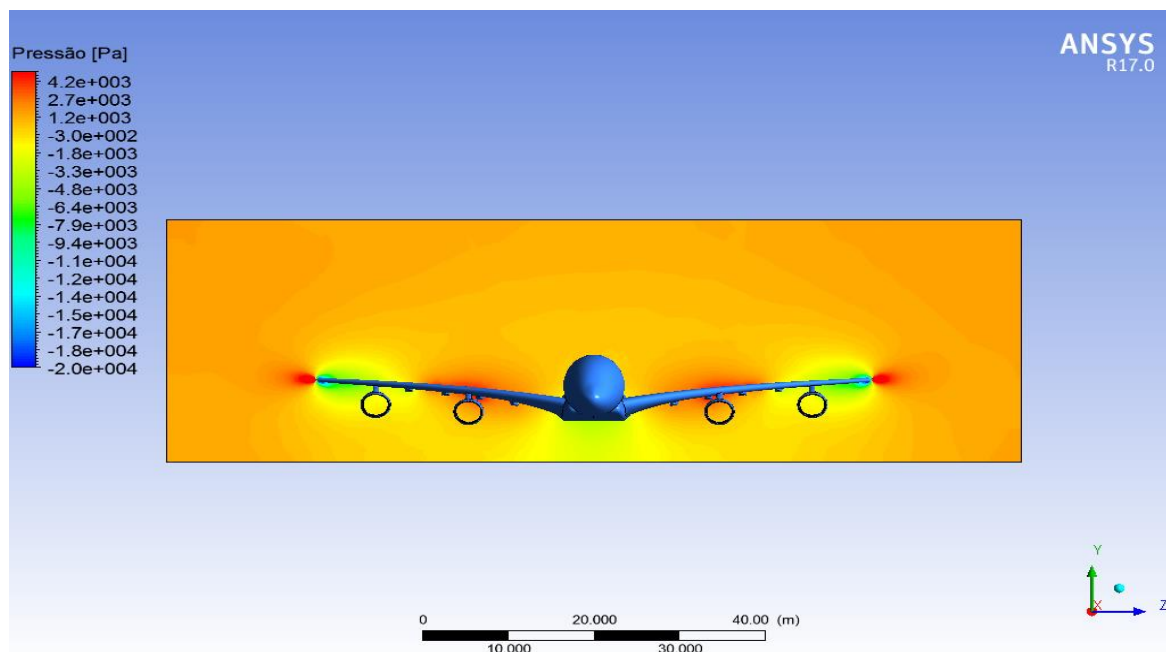


Figura 6. Plano de pressão no eixo YZ

Depois de aplicar o escoamento foi possível obter as pressões distribuídas ao longo de toda a estrutura da aeronave e, por meio do método dos elementos finitos, foi possível a determinação e representação numérica das tensões apresentadas. A Fig. 7 apresenta os esforços oriundos do arrasto aerodinâmico e sustentação sofridos pela asa:

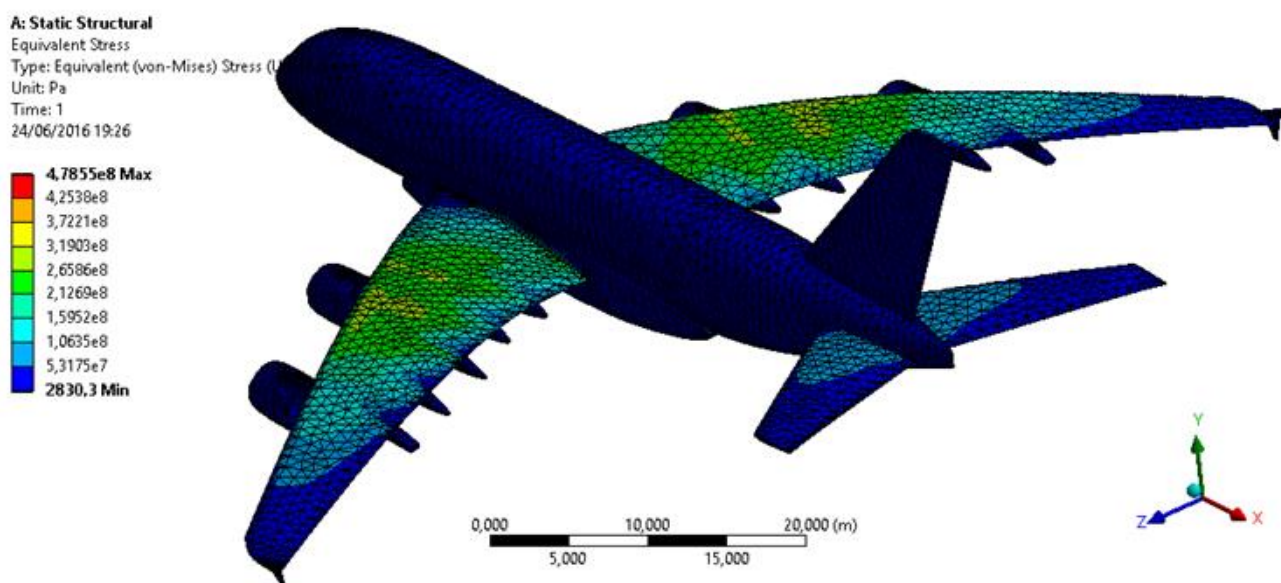
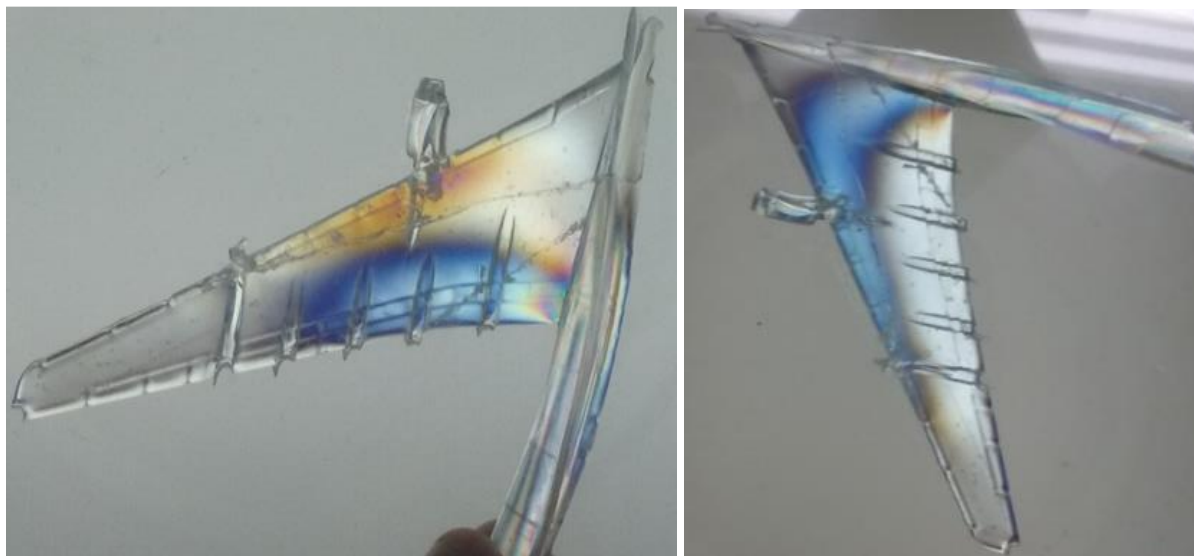


Figura 7. Tensões Distribuídas nas Asas

Com a utilização da técnica de fotoelasticidade, foi possível coletar dados experimentais da distribuição de tensão ao longo da asa do modelo do Airbus A380. As tensões são apresentadas nas regiões coloridas da Fig. 8, denominadas franjas fotoelásticas. Essas tensões são causadas por forças externas que agem sobre a asa da aeronave, como a força de sustentação e força de arrasto (Stuart, 2006).

Para obter as cargas geradas pelo esforço aerodinâmico, foram aplicadas cargas manuais representando a sustentação e o arrasto aerodinâmico.



**Figura 8: Representação de tensões por fotoelasticidade aplicando duas cargas manuais diferentes**

Tendo em vista que o projeto trata de uma metodologia inédita, observa-se que, relacionando a Fig. 7 à Fig. 8, o método da fotoelasticidade é capaz de representar de maneira qualitativa as tensões atuantes em uma determinada geometria que podem ser correlacionadas à distribuição de tensões obtidas computacionalmente. Esse resultado, torna possível o desenvolvimento de uma análise de modelos de aeronaves fiel a situações de carregamento, com um baixo custo proporcionado pelos modelos feitos em resina transparente.

Analisando o baixo custo – aproximadamente R\$ 270,00 (duzentos e setenta reais) – dos materiais utilizados para a produção do modelo representado na Fig. 8 (valor inferior aos materiais utilizados normalmente na produção de modelos de estudo de aeronaves, como alumínio, madeira e compósitos) e a maior possibilidade de avaliar as tensões atuantes na geometria devido a formação de uma lente com alta transparência e brilho, verifica-se o grande potencial da metodologia inédita desenvolvida para ser aplicada em processos de controle de escoamento e análise de tensões em aeronaves e outros veículos.

#### 4 CONCLUSÃO

O estudo das forças atuantes sobre uma aeronave em condições de voo é fundamental para o desenvolvimento de novos modelos aeronáuticos mais econômicos e eficientes no aspecto aerodinâmico.

Em virtude da importância desse conhecimento, o projeto desenvolvido mostrou a possibilidade de um método inédito e de baixo custo que concilia a análise dinâmica de fluidos e a análise de carregamento computacional com modelos fotoelásticos de resina transparente. Trata-se, portanto, de uma nova possibilidade de estudo das tensões suportadas por aeronaves em condições idealizadas em túnel de vento ou mesmo de mecanismos capazes de reduzir ou retardar os efeitos gerados pelo arraste aerodinâmico.

Melhorias no âmbito da modelagem do avião em resina transparente, como sua impressão em impressoras 3D contendo mais detalhes e, também, associações com aspectos quantitativos da técnica de fotoelasticidade digital, podem permitir definir valores de tensões aplicáveis no dimensionamento de aeronaves ou estudo de comportamento das mesmas em situação de voo.

As forças aplicadas para a visualização das tensões por fotoelasticidade foram feitas de forma manual com o intuito de representar as forças de sustentação e arrasto aerodinâmico. Tais forças podem ser aplicadas de forma mais qualitativas com a utilização do túnel de vento, sendo este, capaz de gerar forças com valores reais ao perfil do aerofólio estudado.

## **REFERÊNCIAS**

A380 Specification. *Airbus*. Disponível em: <  
<http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/specifications/>>. Acesso em: 12 de Junho de 2016.

Wilcox, David C (1998). *Turbulence Modeling for CFD*. 2 ed. Anaheim: DCW Industries, 1998. pp. 174.

Magalhães, Cristina Almeida. Análise de novos métodos numéricos na técnica fotoelástica digital usando o deslocamento de fase. 2011. 350 f. Tese (Doutorado) – *Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte*.

Stuart, N.; Dahmen, S. R. A Física do Voo em Sala de Aula. *Física na escola*, v. 7, n. 2, 2006. p.36 – 42.