
ESTUDO NUMÉRICO- COMPUTACIONAL DA AERODINÂMICA DE UM TUBO DE PITOT

Arthur Mezzomo Manoukian

Rodrigo Pasiani de Paula

Edvaldo Angelo

Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

Resumo

O tubo de Pitot é um dispositivo capaz de medir a velocidade relativa entre o fluido e o medidor. Presente em todos os aviões, é um elemento que também causa resistência ao escoamento de ar. Neste trabalho, foram realizadas simulações numérico-computacionais de uma geometria padrão de um tubo de Pitot e de geometrias propostas visando à diminuição de arrasto. A ferramenta computacional utilizada foi o *software* Ansys CFX. Os modelos desenvolvidos adotaram algumas condições, a saber: escoamento permanente, tridimensional, viscoso e subsônico. Os resultados dos modelos numéricos foram comparados e as geometrias alternativas propostas para o tubo de Pitot obtiveram menor valor da força de arrasto se comparadas à geometria padrão.

Palavras-chave: Tubo de Pitot. Aerodinâmica. Dinâmica dos fluidos computacional.

1 INTRODUÇÃO

A determinação da velocidade de um fluido é fundamental para o estudo do escoamento em regiões de interesse e para o funcionamento de diferentes tipos de máquinas e processos. Existem diversos métodos para esse tipo de medição, entretanto, o método que utiliza a diferença entre pressão total e pressão estática é um dos mais utilizados.

Introduzido pelo francês Henri Pitot, em 1732, o tubo de Pitot é um mecanismo capaz de medir a velocidade relativa entre o fluido e o medidor. Por ser um equipamento simples e completamente mecânico, torna-se possível sua utilização em aeronaves, uma vez que tal simplicidade não interfere nas informações obtidas e repassadas aos componentes eletrônicos presentes no sistema de navegação dessas e o torna economicamente viável (ANDERSON, 2001). Apesar de seu tamanho e geometria simples, seu impacto na aerodinâmica, mesmo que pequeno, eventualmente, pode representar uma parcela considerável se analisado um longo período de funcionamento.

Aerodinâmica é o estudo do movimento de corpos pelo ar. Ao ser inserido no meio em escoamento, o objeto de estudo sofre ações de forças aerodinâmicas, sendo as principais a força de sustentação e a força de arrasto. A força de arrasto, definida como a força que um fluido em movimento, exerce sobre um corpo na direção do escoamento (ÇENGEL, 2007, p. 41), é de fundamental importância, uma vez que seus efeitos refletem significativamente no balanço energético dos veículos.

Mesmo sendo um equipamento praticamente onipresente em veículos de alto rendimento, não significa que o Pitot seja perfeito. O tubo tem um histórico de falhas, principalmente por congelamento, ocasionando problemas de medição e resultando em acidentes. Esses aspectos não são estudados neste trabalho, pois não fazem parte do escopo da aerodinâmica, mas, como continua a ser utilizado como principal meio de medição de velocidade relativa, o estudo proposto tem sua relevância na possibilidade de indicação da geometria mais eficiente do ponto de vista aerodinâmico.

Neste trabalho, para o foco de utilização do tubo de Pitot, foi adotado um avião, o modelo Cessna 210 Centurion, amplamente presente tanto regional quanto mundialmente. Sua velocidade e sua altitude de voo impuseram algumas condições às simulações numéricas.

Os tubos de Pitot estudados nesta investigação também têm uma orientação vertical diferente da normalmente utilizada. O Pitot, que normalmente se encontra na parte inferior da asa da aeronave, tem sua haste horizontal posicionada abaixo da sua haste vertical. Neste estudo, por motivos de montagem de domínio computacional, a haste vertical posiciona-se abaixo da haste horizontal. Essa diferente orientação não

causa nenhuma espécie de inconformidade para a obtenção dos resultados requeridos pelo escopo deste trabalho, tendo em vista que os efeitos do campo gravitacional pouco importam em escoamentos como o de interesse.

1.1 Problema de pesquisa

Para realizar sua função de uma forma mais eficiente, uma boa aerodinâmica do tubo de Pitot é essencial, logo, o equipamento deve permanecer em contato com o ambiente externo a todo momento para que exerça sua função, que, como descrito, é a de medir a velocidade relativa entre o Pitot e o fluido em movimento.

Portanto, buscou-se reunir dados por meio de simulações numéricas computacionais para responder ao seguinte problema: de que maneira a geometria de um tubo de Pitot influencia em suas características aerodinâmicas e quais são as formas possíveis de diminuir seu arrasto?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é analisar a aerodinâmica de um tubo de Pitot por meio de simulação numérico-computacional pelo emprego da ferramenta Ansys CFX.

1.2.2 Objetivos específicos

Estudar a aerodinâmica de um tubo de Pitot padrão por meio de simulações numérico-computacionais e analisar o comportamento de duas geometrias distintas visando à redução da força de arrasto. Em todas as condições de interesse, o ar é o fluido em escoamento relativo em condições compatíveis com aquelas encontradas em veículos equipados com tubos de Pitot. A condição de interesse do estudo concentrou-se no escoamento permanente, tridimensional, viscoso, incompressível e subsônico.

1.3 Justificativa

O tubo de Pitot está presente em veículos que necessitam da medição de velocidade relativa, os quais, por serem de extrema complexidade e tecnologia, têm geralmente altos valores financeiros agregados. Logo, a melhor aerodinâmica do

tubo de Pitot tem potencial de impacto positivo na eficiência do veículo, podendo torná-lo mais adequada.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O tubo de Pitot funciona a partir de um transdutor de pressão ou um manômetro, que é responsável por medir a diferença entre a pressão de duas câmaras separadas: uma que é ligada aos orifícios presentes na parte exterior lateral do tubo e outra que provém do furo central do tubo. Para que o equipamento possa exercer suas funções, o Pitot deve estar montado com a ponta do tubo perpendicular ao escoamento (ÇENGEL, 2007), como representado esquematicamente na Figura 1.

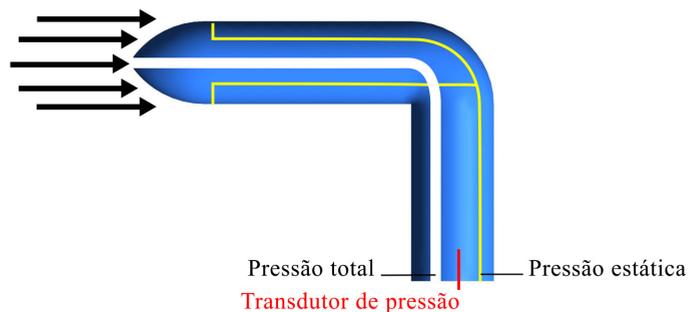


Figura 1 Tubo de Pitot esquematizado

Fonte: Elaborada pelos autores.

A partir do furo central, que recebe o impacto do fluido e mede a pressão do fluido somada a uma parcela de pressão relacionada à desaceleração do escoamento, é possível mensurar a pressão de estagnação e, por meio dos pequenos orifícios em seu corpo, é possível calcular a pressão estática. Segundo Çengel (2007), a diferença entre elas reside no fato de que a pressão estática representa a pressão termodinâmica real de um fluido, enquanto a pressão de estagnação representa a pressão em uma condição de desaceleração completa, obtida de forma isoentrópica, a qual pode ser calculada conforme Equação 1.

$$P_{estag} = P + \rho \frac{v^2}{2} \quad (1)$$

Na Equação 1, P indica a pressão estática, ρ indica a densidade do fluido e v , a velocidade relativa (entre o medidor e o fluido). O índice *estag* se refere à pressão de estagnação. Essa velocidade é de grande importância, pois é responsável direta e grande influenciadora dos esforços aerodinâmicos (WHITE, 2011).

Como já estabelecido, a força de arrasto exercida no Pitot é o principal parâmetro analisado neste estudo, já que, para haver uma melhor eficiência aerodinâmica do equipamento, menor deve ser sua resistência ao movimento relativo. Devido às diferentes geometrias utilizadas, para facilitar a comparação adequada entre elas, utilizou-se adicionalmente o coeficiente de arrasto, que, de certa forma, é uma adimensionalização da força de arrasto (ÇENGEL, 2007). A força e o coeficiente de arrasto, respectivamente, F_D e C_D , são indicados nas equações 2 e 3.

$$F_D = C_D A \frac{\rho v^2}{2} \quad (2)$$

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho A v^2} \quad (3)$$

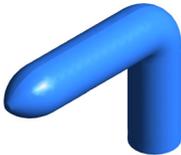
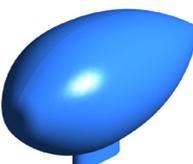
Nas duas equações, A indica a área frontal projetada do corpo. A força de arrasto foi determinada por meio da distribuição de pressão e tensão de cisalhamento na superfície do corpo, com valores obtidos nas simulações computacionais no Ansys CFX e o coeficiente de arrasto foi determinado por meio de função programada no pós-processamento. É possível também determinar a força de sustentação produzida pela geometria, mas, sendo o tubo de Pitot um elemento cuja finalidade não é a de produzir sustentação, os resultados de força de sustentação foram ignorados nas análises. Logo, quando eficiência aerodinâmica, grandeza que, normalmente, nos estudos acadêmicos, utiliza-se tanto da força de arrasto quanto da sustentação para sua composição, for mencionada neste trabalho, apenas será considerada a força de arrasto.

O *design* do tubo de Pitot já sofreu várias alterações ao decorrer dos anos, principalmente após os trabalhos de Henry Darcy, como indicado por Brown (2012). As mudanças geométricas propostas foram tantas que o autor defende que o tubo seja denominado Pitot-Darcy. Nos dias atuais, o Pitot é modelado para suas diferentes aplicações, sendo mais comum no formato da letra L (ARGENTINI, 2008).

Este estudo considerou três geometrias, duas das quais foram produzidas de forma autoral. A primeira geometria (Pitot 1) foi feita no formato tradicional em L, utilizado atualmente na aviação. A segunda geometria (Pitot 2) também foi feita em formato de L, mas com um bordo de ataque mais fino, para uma menor geração de turbulência (SPALART, 1988). A terceira criada para este estudo (Pitot 3) é um tubo de Pitot de maior dimensão que os demais e se aproxima do perfil NACA 0012, muito estudado aerodinamicamente. No Quadro 1, estão representadas as geometrias descritas dos modelos de tubo de Pitot consideradas nos estudos numéricos realizados neste trabalho.

QUADRO 1

Representação tridimensional dos modelos criados de tubo de Pitot

| Pitot 1 | Pitot 2 | Pitot 3 |
|---|---|--|
|  |  |  |

Fonte: Elaborado pelos autores.

O estudo da aerodinâmica em máquinas de alta *performance* não é algo novo. Entretanto, muitos desses trabalhos não levaram em consideração a eficiência aerodinâmica de um equipamento tão pequeno quanto o tubo de Pitot. Um artigo cujos objetivos se relacionam aos deste trabalho é o de Moria *et al.* (2013).

Embora auxiliem no campo computacional, algumas pesquisas que abordam questões relacionadas a aspectos geométricos internos do tubo de Pitot não fazem parte dos interesses deste estudo, em especial por conterem condições semelhantes àquelas encontradas no escoamento externo ao tubo de Pitot (VINOD *et al.*, 2012).

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada foi a comparação entre os resultados da força de arrasto e do coeficiente de arrasto em diferentes geometrias de tubos de Pitot e a verificação dos efeitos aerodinâmicos a que estão submetidos os tubos em situações que se aproximam de condições de voo de cruzeiro de aeronaves de pequeno porte.

Neste trabalho, foi empregada a técnica de simulação computacional por meio da utilização de uma ferramenta de dinâmica dos fluidos computacional (*computational fluid dynamics* [CFD]), mais especificamente a ferramenta Ansys CFX®, *software* comercial que utiliza o método de volumes finitos para resolver equações de conservação, turbulência e constitutivas.

Pelo método de volumes finitos, o domínio estudado é dividido por um número finito de volumes de controle, dessa forma, transformando as equações diferenciais do escoamento em um sistema de equações algébricas. As equações são resolvidas então por iterações, delimitadas pelo domínio computacional, e as condições de contorno devem ser adequadamente estabelecidas (MALISKA, 2004).

Inicialmente, uma geometria simplificada de um tubo de Pitot foi adotada como geometria base de comparação. Tal modelo apresenta 10 mm de diâmetro na entrada, 70 mm de largura, 305 mm de comprimento total e altura de 220 mm com uma geometria de cotovelo 90°, conforme indicada na Figura 2.

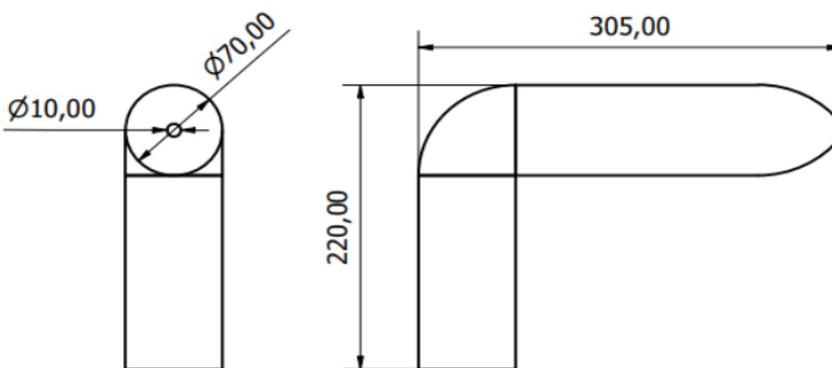


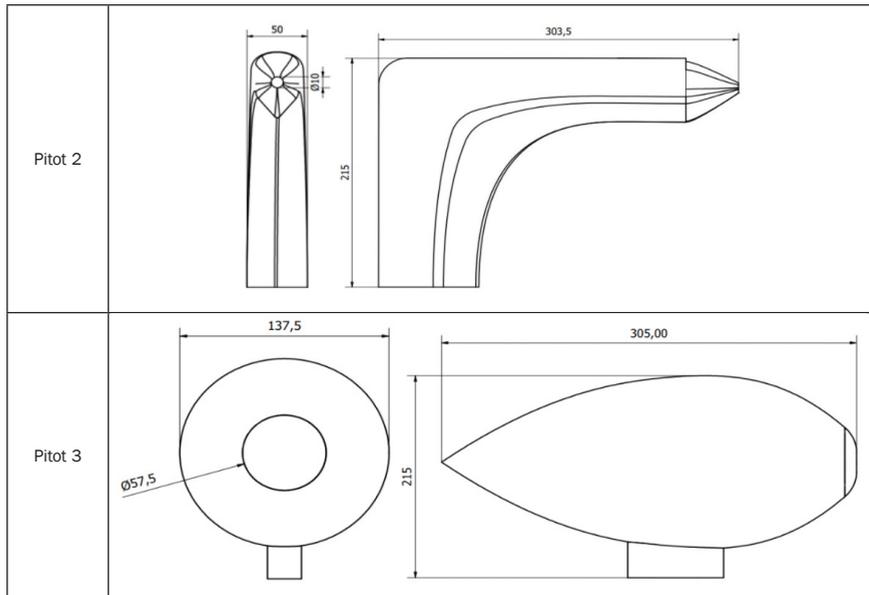
Figura 2 Dimensões do modelo 1 (em mm)

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os outros modelos estudados são apresentados no Quadro 2. Todas as unidades estão em milímetros.

QUADRO 2

Dimensões dos modelos 2 e 3 (em mm)



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1 Domínio computacional

O domínio computacional em que os modelos serão inseridos é um paralelepípedo com 1.300 mm de comprimento, 270 mm de altura e 200 mm de largura.

Os modelos construídos não contam com discretização do veículo no qual o tubo de Pitot é instalado. A parte posterior do domínio computacional tem dimensões maiores do que a parte anterior para capturar efeitos da esteira que se forma atrás desse. Essa opção de modelamento é coerente com a operação do tubo de Pitot, já que este deve estar com sua linha central horizontal alinhada à direção da velocidade do escoamento.

Para os modelos em estudo, as mesmas dimensões do domínio computacional foram adotadas a fim de padronizar as simulações.

O domínio computacional conta com a simplificação de simetria para reduzir a necessidade de elementos na malha.

3.2 Malha computacional

A malha, ou divisão do domínio computacional, foi obtida para condições em que sua densidade seja adequada e não produza efeitos negativos nos resultados das simulações numéricas, adotando-se práticas de refinamento e de convergência bastante conhecidas na literatura (ANDERSON, 1995).

A Figura 3 representa a versão final do domínio computacional para o modelo básico em estudo. Na malha, nota-se a presença de camadas prismáticas próximas à superfície do tubo de Pitot que favorecem a captura da camada limite que se desenvolve próximo à superfície do corpo.

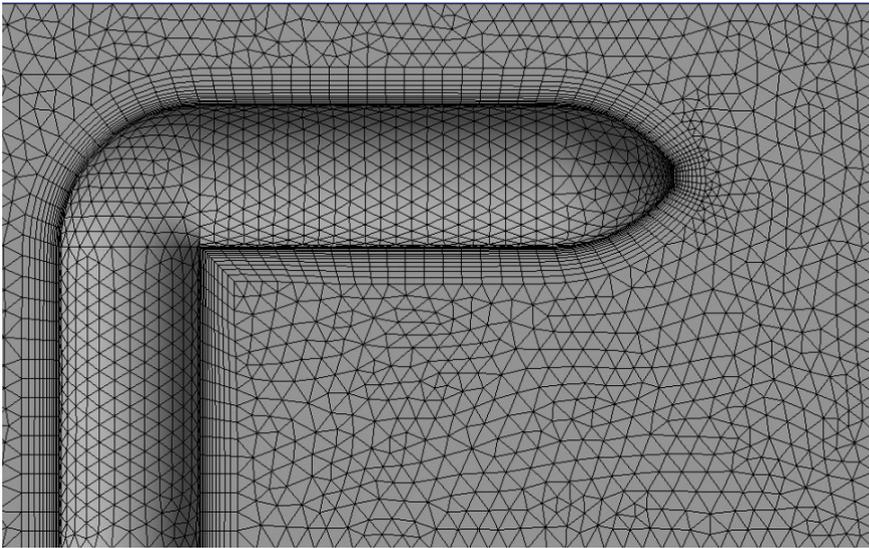


Figura 3 Detalhe da malha próxima ao corpo (com mais elementos)

Fonte: Elaborada pelos autores.

Todas as condições impostas ao modelo básico foram estendidas aos modelos 2 e 3, resultando em suas versões finais, conforme indicam as Figuras 4a e 4b, respectivamente.

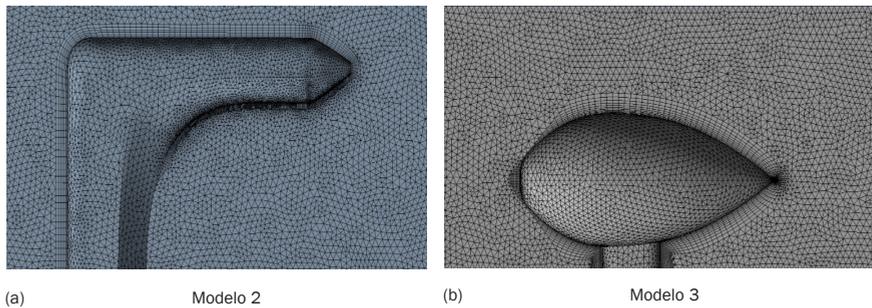


Figura 4 Versão final de malha dos modelos

Fonte: Elaborada pelos autores.

3.3 Condições das simulações e do processamento

As hipóteses simplificadoras e condições de contorno adotadas para a execução deste trabalho foram as seguintes:

- a) altitude de voo para a aeronave Cessna 210 Centurion de 5.000 m;
- b) velocidade de cruzeiro de 350 km/h – condição subsônica;
- c) pressão atmosférica local de 54.019,9 Paabs – pressão relativa na saída do domínio computacional de 0 Pa;
- d) escoamento isotérmico com temperatura de 255,65 K;
- e) escoamento incompressível – densidade do fluido constante;
- f) condição de livre escorregamento nas paredes opostas ao modelo dentro do domínio computacional; e
- g) condição de não escorregamento na superfície do tubo de Pitot, com situação de parede considerada lisa.

O modelo de turbulência utilizado foi o SST (*Shear Stress Transport*), uma vez que este prevê adequadamente a posição da separação do escoamento (ANSYS EUROPE, 2021).

O critério de convergência para as equações de conservação utilizado foi o de resíduo médio quadrático máximo de valor-alvo inferior a 1.10^{-4} .

Para o cálculo do coeficiente de arrasto, foi programada uma equação para sua determinação na área de pós-processamento do *software*, por meio da ferramenta *expression*, de acordo com a Equação 3.

4 RESULTADOS

4.1 Domínio computacional e discretização da malha

O processo de construção de uma geometria para análise deste projeto se iniciou com a criação do modelo por meio da ferramenta de construção em três dimensões (3D) em um *software* de desenho assistido por computador (*computer aided design* [CAD]) denominado Autodesk Inventor e com posterior exportação da geometria e importação no pacote Ansys, *software* utilizado para as simulações aqui apresentadas.

O domínio computacional construído, apresentado na Figura 5, é uma representação do padrão utilizado em todos os modelos construídos. O tubo de Pitot se encontra em contato com a carenagem do avião e, na direção escoamento, as setas indicam a direção da passagem de ar pelo domínio. Na figura, a indicação da região de abertura se refere à porção superior do domínio computacional com condição de contorno de livre escoamento e velocidade normal nula.

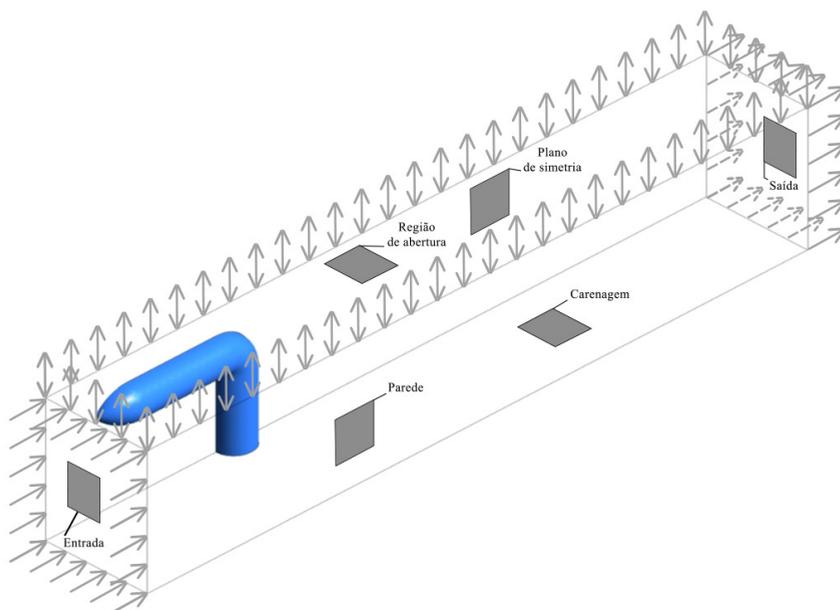


Figura 5 Domínio computacional

Fonte: Elaborada pelos autores.

A solução numérica dessa malha é resultado da resolução de um fenômeno contínuo por meio de uma abordagem discreta, a qual origina erros que devem ser minimizados (ANGELO, 2013). A presença desses erros em conjunto com um processo de comparação entre diferentes malhas provou a necessidade da construção cuidadosa e metódica de uma malha padronizada entre simulações.

Embora não exista um valor plenamente estabelecido para simulações CFD, utilizou-se recomendação de Stern *et al.* (2001), que define $r = \sqrt{2}$ como taxa de refinamento para simulações sucessivas, comparando as variações obtidas entre simulações consecutivas. O parâmetro escolhido pelos autores desta pesquisa para indicação de convergência foi a diferença máxima 1% na força de arrasto entre simulações com refinamentos sucessivos em taxas de aumento de elementos.

4.2 Estratégias de simulação

Apesar dos métodos descritos pelos trabalhos estudados, adaptações foram necessárias para a conclusão do projeto.

A malha descrita e projetada inicialmente teve que ser alterada para o modelo Pitot 2, devido ao seu pequeno tamanho vertical, pois, no caso dessa geometria, a proximidade da superfície de imposição das condições de contorno à geometria do tubo ocasionou problemas de convergência, impossibilitando o atendimento aos critérios de convergência estabelecidos.

Na obtenção dos resultados, utilizando a teoria de refinamento de malha descrita por Stern *et al.* (2001), uma limitação do *software* foi encontrada por ser a versão estudantil. Após um certo número de nós, não era mais possível aumentar o número de elementos na malha. Assim, dada a limitação, algumas simulações não obedeceram à limitação de 1% de variação entre simulações sucessivas, nesses casos, o valor limite obedecido foi de 1,5%.

4.3 Resultados obtidos

Para a compilação dos resultados computacionais numéricos, considerou-se valor da grandeza o último resultado obtido a partir das simulações. As grandezas, os parâmetros e os destaques que têm grande impacto no escopo deste projeto são: pressão, velocidade, regiões de recirculação, regiões de descolamento, tensão de cisalhamento, força de arrasto e coeficiente de arrasto.

4.3.1 Pressão

Um tubo de Pitot que tem melhor eficiência aerodinâmica é aquele que apresenta uma maior pressão em sua parte posterior. Quando se trata de distribuição de pressão na parte frontal do Pitot, valores elevados podem causar problemas em sua aerodinâmica, devidos à geometria rombuda dos modelos de tubo de Pitot, podendo aumentar o tamanho da camada limite (TIMMER, 2013).

No Quadro 3, constam os resultados da solução numérico-computacional da pressão presente em cada uma das geometrias de tubo de Pitot levantadas.

Pode-se observar, como esperado, maiores valores de pressão na região frontal do tubo de Pitot.

Nessa região, ocorre a formação de pontos de estagnação, indicando que o fluido que se escoar tem toda sua energia cinética convertida em pressão, resultando em arrasto aerodinâmico de elevada ordem (ESCOAMENTO, 2020) e impedindo o fluido a contornar o corpo.

Regiões de baixa pressão são observadas após a região de estagnação sendo resultado de um gradiente adverso de pressão, obedecendo ao Princípio de Bernoulli (ÇENGEL, 2007: quanto maior for a velocidade de escoamento de um fluido, menor será a pressão exercida por ele e vice-versa).

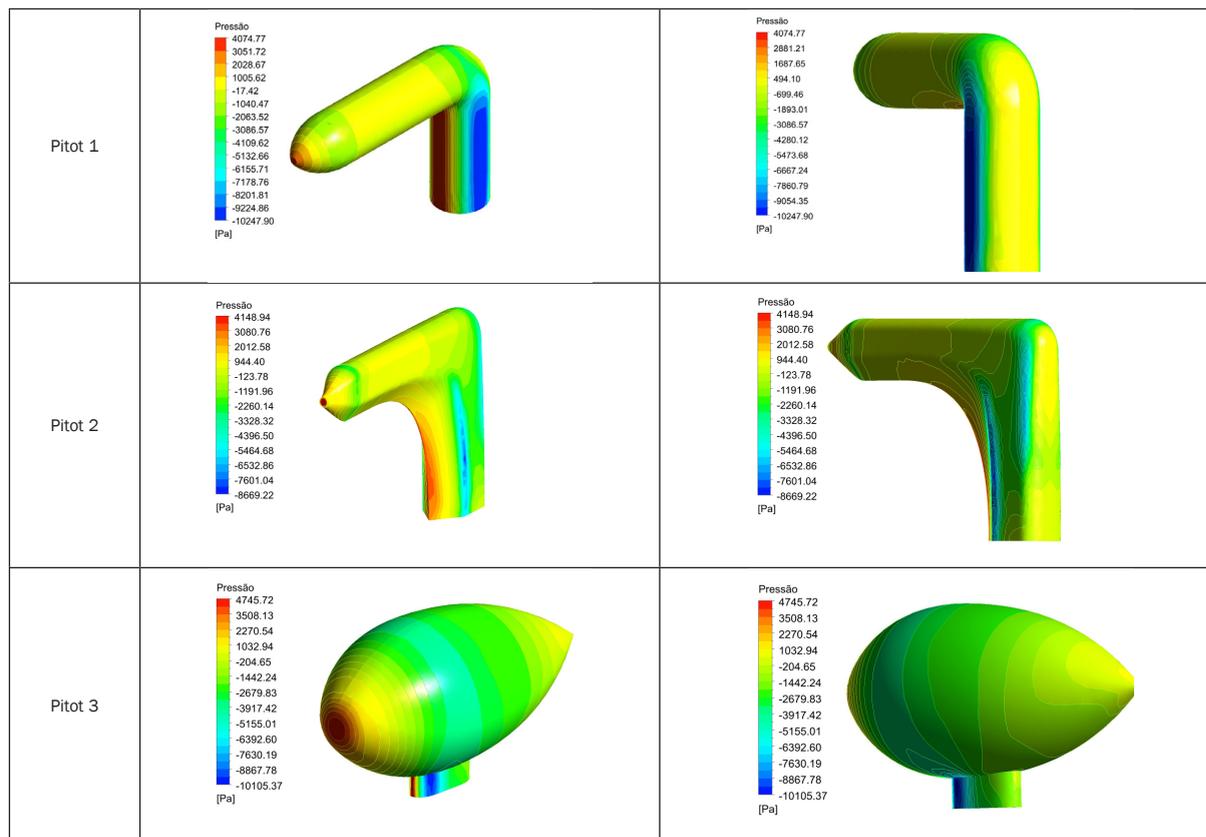
A simetria perfeita dos modelos resulta no choque das correntes de velocidade em sua região posterior, criando uma zona de turbulência e vórtices, elevando novamente a pressão.

4.3.2 Velocidade, vorticidade e região de descolamento

Para a verificação do padrão de escoamento externo ao tubo de Pitot, uma análise das velocidades se mostrou necessária. No Quadro 4, é possível observar o padrão de escoamento representado por linhas de corrente estrategicamente escolhidas nas proximidades da superfície do tubo de Pitot.

QUADRO 3

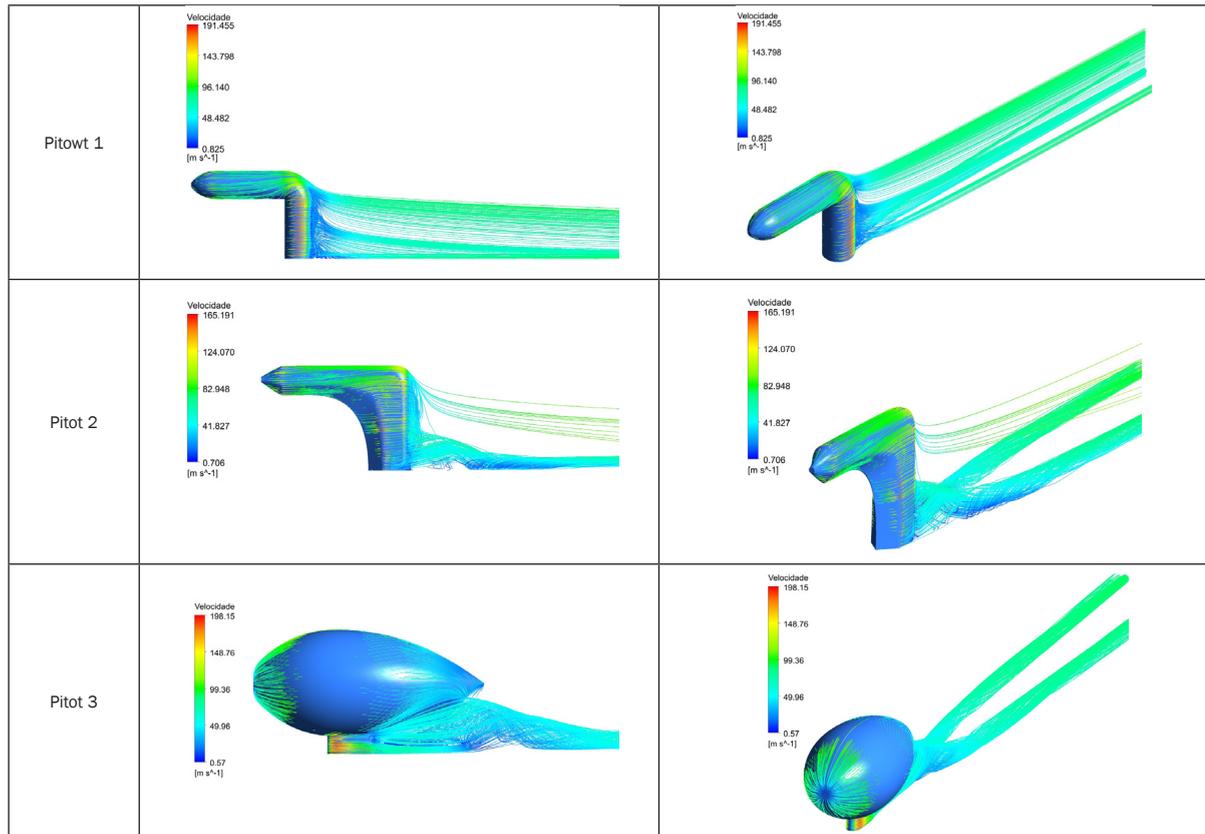
Resultados numérico-computacionais da força de pressão nas partes posterior e frontal do corpo do tubo de Pitot



Fonte: Elaborado pelos autores.

QUADRO 4

Representação das linhas de corrente próximas à superfície dos modelos



Fonte: Elaborado pelos autores.

A presença de vorticidades no escoamento pode ser observada no Quadro 4. A vorticidade pode ser definida como uma constante cujo módulo é o dobro da velocidade angular (ÇENGEL, 2007), logo, não é surpresa que esteja presente nas geometrias, principalmente em áreas com grande deflexão de escoamento, causada pela imposição de mudança na direção do fluxo.

4.3.3 Tensão de cisalhamento

A tensão de cisalhamento é a principal grandeza responsável pela força de arrasto em corpos afilados (CHOUTAPALLI, 2016), porém, é importante destacá-la também para os corpos rombudos. A tensão de cisalhamento apresenta maior valor na camada-limite em escoamentos turbulentos (WHITE, 2011) e, com isso, quanto menor for a presença dessa tensão nas partes frontal e lateral do corpo, menos resistência ao movimento o corpo apresenta.

O Quadro 5 apresenta a distribuição da tensão de cisalhamento através do corpo dos tubos Pitot estudados.

Nota-se que a tensão de cisalhamento mostra-se menos evidente nas regiões frontais dos modelos, local em que a pressão apresenta maior intensidade. Isso se dá, pois pressão e tensão de cisalhamento são grandezas físicas que atuam em diferentes direções, uma vez que a pressão depende da força normal que o escoamento exerce sobre o corpo e a tensão de cisalhamento é dependente da força tangencial.

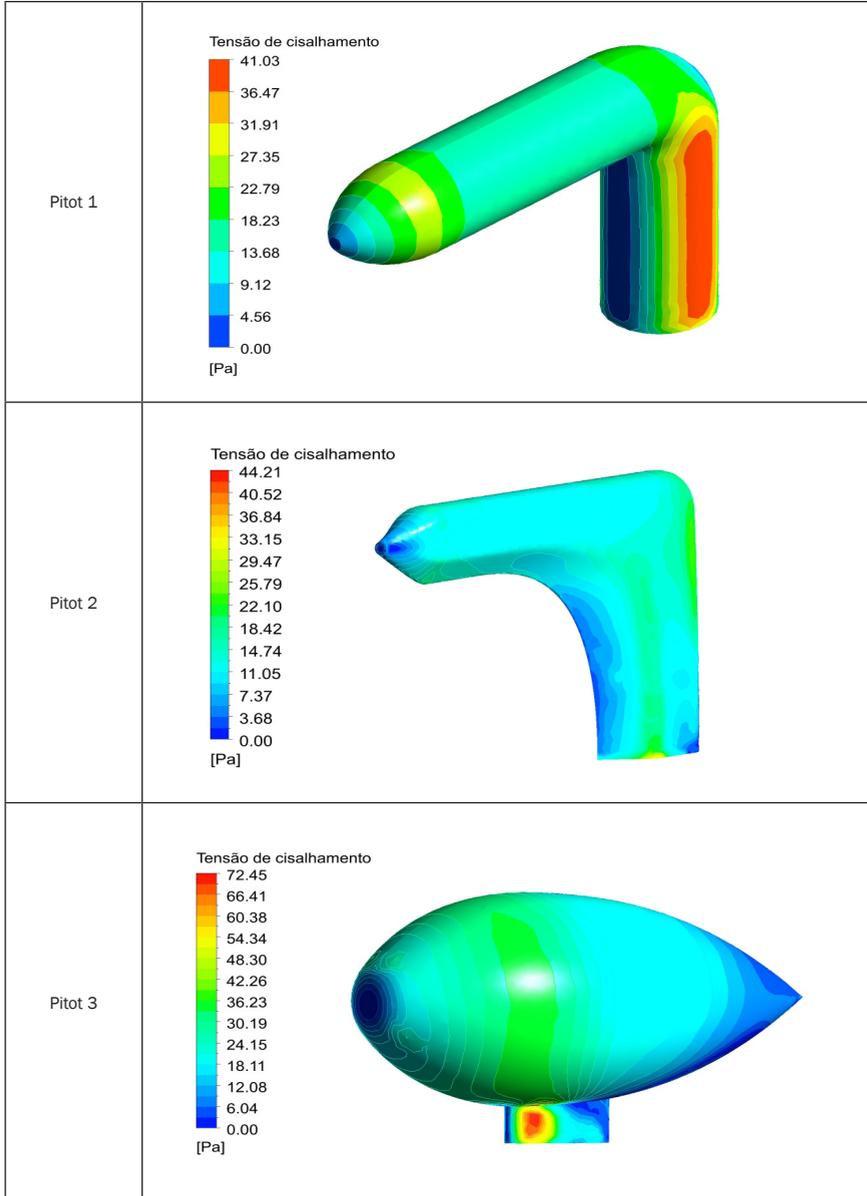
4.3.4 Força de arrasto

Uma menor força de arrasto no tubo de Pitot resulta em uma menor resistência do corpo ao movimento, fazendo-o, assim, mais eficiente do ponto de vista da aerodinâmica.

No Gráfico 1, é possível observar a flutuação dos valores simplificada da força de arrasto do Pitot 1 em relação ao número de elementos presentes na malha, assim como foi descrito por Stern *et al.* (2001).

QUADRO 5

Resultados numérico-computacionais da tensão de cisalhamento



Fonte: Elaborado pelos autores.

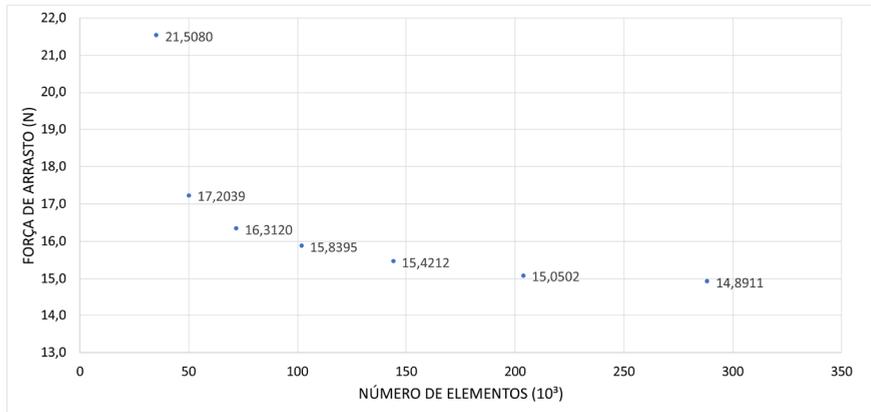


Gráfico 1 Resultados numérico-computacionais da força de arrasto do Pitot 1 em relação ao número de elementos presentes na malha

Fonte: Elaborado pelos autores.

De maneira análoga, foi feita esta análise para os tubos 2 e 3, cujas forças de arrasto, calculadas por meio das simulações numérico-computacionais, constam na Tabela 1. Os resultados obtidos representam o valor da última convergência com o máximo de elementos.

TABELA 1

Resultado numérico-computacional para a força de arrasto dos tubos de Pitot 2 e 3

| | |
|---------|------------|
| Pitot 2 | 13,64784 N |
| Pitot 3 | 12,92596 N |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os valores obtidos de força de arrasto são para apenas uma metade do corpo do tubo de Pitot, devido ao método de montagem do domínio computacional na ferramenta de dinâmica dos fluidos computacional. Entretanto, para essa análise, os valores apresentados no gráfico e na tabela já estão multiplicados, logo, representando o valor da força total causada pela geometria. Como os valores seguirão em mesma proporção, o tubo que apresentou uma melhor eficiência em relação à força de arrasto, de acordo com os resultados mostrados nos gráficos, é o Pitot 3, o qual, após dez simulações dentro dos limites estabelecidos neste projeto, chegou a um valor de 12,92596 N, superando as outras duas geometrias estudadas.

4.3.5 Coeficiente de arrasto

O coeficiente de arrasto é utilizado para comparar a aerodinâmica de corpos com diferentes dimensões. Um menor coeficiente de arrasto implica mais facilidade de escoamento pela parte frontal do corpo (HEISLER, 2002), qualidade necessária para haver uma boa *performance* aerodinâmica.

Na Tabela 2, estão presentes os valores de coeficiente de arrasto encontrados nas geometrias por meio do uso da ferramenta *expression*, anteriormente mencionada, presente no Ansys CFX. Os valores se apresentam em módulo e são adimensionais.

TABELA 2

Coeficiente de arrasto para os modelos simulados

| | |
|---------|--------|
| Pitot 1 | 0,1037 |
| Pitot 2 | 0,1961 |
| Pitot 3 | 0,1238 |

Fonte: Elaborada pelos autores.

5 DISCUSSÃO

Considerando que a geometria do tubo de Pitot 1 é semelhante aos utilizados em grande escala na aviação atualmente, é possível obter um elemento de comparação entre esse e os modelos propostos neste trabalho. Tendo em vista também a aeronave adotada como referência, Cessna 210 Centurion, é possível inferir quão mais efetivas são as opções geométricas apresentadas em uma perspectiva aerodinâmica, se comparadas à geometria padrão.

5.1 Tubo de Pitot 1

O tubo de Pitot 1, como foi mencionado, é similar aos modelos em formato de L, utilizados amplamente na aviação. Por meio da análise das grandezas descritas, foi possível observar muitos pontos de estagnação em seu corpo.

A análise das linhas de corrente indicadas no Quadro 4 indica regiões de descolamento, com pouca formação de vórtices – situação favorável para a geometria, pois caracteriza uma menor perda de energia.

Esta geometria apresentou a maior força de arrasto das três. Entretanto, tem o melhor coeficiente de arrasto.

5.2 Tubo de Pitot 2

O tubo de Pitot 2 apresenta uma geometria mais similar à de L, porém sua seção não é circular e tem um bordo de ataque menos suavizado na região frontal. Sua face anterior apresenta uma estrutura afilada para melhor escoamento. Sua construção ocasiona uma pequena zona de estagnação na entrada do modelo e uma redução desta ao longo da face vertical, resultante de pouca área para a colisão frontal do ar.

É possível notar algumas regiões de descolamento da camada-limite, principalmente em sua região de entrada, devido à região de estagnação, e na região posterior ao modelo, devido à geometria afilada.

Este modelo apresenta uma grande vorticidade em sua base posterior, por sua geometria apresentar uma concavidade, resultando no choque entre as linhas correntes e a separação delas ao longo da esteira. Tanto sua força de arrasto quanto seu coeficiente apresentaram um valor intermediário em relação às outras duas geometrias.

5.3 Tubo de Pitot 3

A geometria similar à Naca 0012 diferencia o tubo de Pitot 3 das demais geometrias adotadas para este estudo.

Poucas zonas de alta pressão podem ser observadas no decorrer de seu corpo e a maior variação de pressão e cisalhamento é encontrada em seu suporte. Devido à sua proporção, há uma grande região de impacto frontal, o que resulta em uma região de pouco descolamento em sua parte posterior.

Em função do formato alongado, a formação de vórtices é menos intensa (SUN; DAICHIN, 2011), como pode ser observado no Quadro 3. Isso implica uma melhor eficiência da geometria.

Este modelo também foi o que apresentou a menor força de arrasto, mesmo que não tenha apresentado o menor coeficiente de arrasto.

5.4 Análise energética simplificada

Por ser uma grandeza adimensional e dependente do tamanho, da inclinação e de condições de escoamento (GREGOREK, 1970), o coeficiente de arrasto caracteriza um estudo mais teórico da aerodinâmica, logo, para a definição de melhor eficiência aerodinâmica, é tomada a força de arrasto apresentada para cada modelo em vez de seu coeficiente de arrasto, visto que essa força é a principal componente adversa à eficiência do movimento dos modelos durante seu funcionamento.

Assim, a força de arrasto pode ser relacionada diretamente com a eficiência da aeronave pelo consumo de combustível que a geometria causa, logo que quanto menor a força de arrasto, menor será combustível consumido pelo veículo. O arrasto provocado pelo avião escolhido como base para este projeto, Cessna 210 Centurion, foi desconsiderado por ser o mesmo para todos, mas foram utilizados seus dados de voo. Para esse cálculo, foram utilizadas duas equações de potência, que estão descritas nas equações 4 e 5.

$$P_{ot} = F_A V \quad (4)$$

$$P_{ot} = \dot{m} \cdot PCI \cdot \eta \quad (5)$$

Na Equação 4, foi utilizada a força de arrasto, encontrada em cada uma das geometrias e a velocidade máxima de voo permitida pelo avião Cessna 210 Centurion, com a finalidade de encontrar a potência utilizada na Equação 5 para encontrar a vazão mássica por meio da utilização do poder calorífico inferior (PCI) do combustível (ANP, 2014) e do rendimento do veículo, que, para facilitar a comparação das geometrias, foi considerado 1.

As determinações são capazes de indicar os valores de consumo de combustível relacionados na Tabela 3. O consumo refere-se apenas ao necessário para suplantar o arrasto oferecido pelas formas estudadas, desconsiderando quaisquer outras partes do avião.

Considerando que o modelo Pitot 1 foi baseado nas geometrias utilizadas na aviação, é possível concluir que ambas as geometrias produzidas para este estudo têm uma eficiência melhor que a atual, sendo que o modelo do Pitot 3 alcançou um melhor resultado – aproximadamente 13,2% mais eficiente em consumo de combustível que o Pitot 1.

A geometria do Pitot 3 foi baseada em uma geometria Naca 0012, que não foi fielmente representada na construção do modelo. Ainda, é possível afirmar que uma geometria de um tubo de Pitot fiel ao modelo Naca 0012, normalmente utilizada na modelagem de asas de avião, apresentaria um arrasto inferior, ou seja, uma melhor eficiência aerodinâmica.

TABELA 3

Comparação entre os valores de consumo de combustível das geometrias por vazão mássica

| | |
|---------|-------------|
| Pitot 1 | 117,072 %/h |
| Pitot 2 | 107,280 %/h |
| Pitot 3 | 101,628 %/h |

Fonte: Elaborada pelos autores.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da dinâmica dos fluidos computacional, três modelos de tubo de Pitot foram analisados. O primeiro modelo, uma geometria tradicional, foi comparada a duas geometrias propostas. Os resultados obtidos indicam regiões de estagnação, esteira de turbulência e a força de arrasto. Apesar das diferenças geométricas entre os modelos e os padrões de escoamento, foi possível compará-los com relação à sua eficiência aerodinâmica. Um dos modelos, baseado no formato da geratriz do perfil NACA 0012, obteve menor força de arrasto sob as mesmas condições do modelo padrão.

NUMERICAL STUDY OF THE AERODYNAMICS OF A PITOT TUBE

Abstract

The Pitot tube is a device capable of measuring the relative speed between the fluid and the meter. Present in all airplanes, it is an element that also causes resistance in the airflow. In this paper, numeric-computational simulations of a standard geometry of a Pitot tube and proposed geometries were carried out to reduce its drag. The computational tool used was the software Ansys CFX. The models developed adopted some conditions: permanent, three-dimensional, viscous, and subsonic flow. The results of the numerical models were compared, and the alternative geometries proposed for the Pitot tube obtained a lower value for the drag force in comparison with the standard geometry.

Keywords: Pitot tube. Aerodynamics. Computer fluid dynamics.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). ANP. *Fatores de conversão, densidades e poderes caloríficos inferiores*. 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2015/76748.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2021.

ANDERSON, J. D. *Computational fluid dynamics: the basics with applications*. New York: McGraw-Hill, 1995.

ANDERSON, J. D. *Fundamentals of aerodynamics*. 3. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2001.

ANGELO, G. *Análise numérica da dinâmica do escoamento em circuitos de circulação natural*. 2013. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ANSYS EUROPE. *ANSYS CFX: solver theory guide*. Canonsburg, PA: Ansys, 2021.

ARGENTINI, G. Pitot tube from Euler equations point of view: application to Formula 1 cars. *ArXiv*, 0809.3194, 2008.

BROWN, G. Henry Darcy and the Pitot Tube. *International Engineering History and Heritage*, p. 14-23, May 2012. DOI 10.1061/40594(265)43

CHOUTAPALLI, I. *Aerodynamics: some introductory thoughts*. Edinburg: Department of Mechanical Engineering – University of Texas, 2016. 63 slides.

ÇENGELEK, Y. A. *Mecânica dos fluidos*. 5. ed. Carolina do Norte: Amgh, 2007.

ESCOAMENTO Externo (Pós-Processamento) - ANSYS CFX - Parte IV. 2020. 1 vídeo (14 min). Publicado pelo canal Edvaldo Angelo. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=9a6aPzfGops>. Acesso em: 6 mar. 2022.

GREGOREK, G. M. *Aerodynamic drag of model rockets*. Penrose, CO: Estes Industries, 1970.

HEISLER, H. *Advanced vehicle technology*. Amsterdã: Butterworth-Heinemann, 2002. DOI 10.1016/B978-0-7506-5131-8.X5000-3

MALISKA, C. R. *Transferência de calor mecânica dos fluidos computacional*. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MORIA, H. *et al.* A cylindrical methodology for the study of fabric aerodynamics. *Procedia Engineering*, v. 56, 2013. DOI 10.1016/j.proeng.2013.03.121

SPALART, P. Direct numerical study of leading-edge contamination. *In: FLUID DYNAMICS OF 3D TURBULENT SHEAR FLOWS AND TRANSITION*, 1988, Çeşme. *Proceedings* [...]. Neuilly-sur-Seine: Advisory Group for Aerospace Research and Development (Agard), 1988.

STERN, F. *et al.* Comprehensive approach to verification and validation of CFD Simulations – part 1: methodology and procedures. *In: STERN, F. et al. Verification and validation of CFD simulations*. Huntsville, 2001. p. 1-50.

SUN, R.; DAICHIN. Experimental investigation on tip vortices and aerodynamics. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, v. 1, n. 3, 032001, 2011. DOI 10.1063/2.1103201

TIMMER, W. A.; BAK, C. *Advances in wind turbine blade design and materials*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. DOI 10.1533/9780857097286.1.109

VINOD, V. *et al.* Calibration of an averaging pitot tube by numerical simulations. *Flow Measurement and Instrumentation*, Kalpakkam, v. 24, p. 26-28, 2012.

WHITE, F. M. *Mecânica dos fluidos*. 6. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2011.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao *designer* Felipe Melo pela elaboração das figuras e ao piloto de helicóptero Klaus Melo pelo auxílio no âmbito da aviação.

Contato

Edvaldo Angelo
eangelo@mackenzie.br

Tramitação

Recebido em julho de 2021.
Aprovado em outubro de 2021.