

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ARRASTO
DE UM PARAQUEDAS HIPERSUSTENTADO

por

EDUARDO MORAES DA CUNHA

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, julho de 2017.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ARRASTO
DE UM PARAQUEDAS HIPERSUSTENTADO

por

EDUARDO MORAES DA CUNHA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Profa. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Francis Henrique Ramos França

Prof. Sérgio Luiz Frey

Profa. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, julho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo suporte e incentivo durante o período de graduação, em especial a meus pais, Orlando e Liane, e ao meu irmão Lucas;

À equipe do laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS, pelo valioso assessoramento durante a modelagem dos problemas;

Aos amigos (e colegas) do curso de Engenharia Mecânica, por auxiliar nos estudos e a fazer dessa uma etapa tão importante;

Ao camarada Edson S. Velozo, pela divisão dos fardos, tanto na caserna quanto nas classes desta Universidade; e

À Professora Adriane P. Petry, pela orientação e doação de seu tempo e de seus conhecimentos.

CUNHA, E. M. “**Simulação computacional para determinação do coeficiente de arrasto de um paraquedas hipersustentado**”. 17 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvida a análise em CFD (“*Computational Fluid Dynamics*”) de três geometrias distintas de um paraquedas de perfil hipersustentado para definir quais alterações podem ser propostas para o aumento do seu coeficiente de arrasto. Para tanto é empregada metodologia RANS, com modelagem $K-\omega$ SST de turbulência em uma modelagem de regime transiente; a avaliação de independência de malha é feita pelos métodos GCI e y^+ . Os resultados são comparados com dados experimentais levando-se em conta as considerações apresentadas na literatura acerca do tema e se identifica que ambos os casos, de acréscimo ou de redução de 20 mm na altura do ápice do velame, geram uma diminuição do coeficiente de arrasto. Por fim, são abordadas características práticas da implementação de melhorias geométricas para o paraquedas estudado e possibilidades de refinamento do estudo realizado.

PALAVRAS-CHAVE: Paraquedas, CFD, Coeficiente de arrasto.

CUNHA, E. M. “**Computational simulation for determining the drag coefficient in a pulled down apex parachute**”. 17 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The present work proposes the CFD analysis of three different geometries for a pulled-down apex parachute to define which modifications may be proposed to increase its drag coefficient. Therefore the RANS methodology is applied, with the $K-\omega$ SST turbulence modeling in an unsteady flow and the mesh independence is evaluated by the GCI and y^+ methods. The results are compared to the experimental data based in the considerations founded in the literature about the theme and is founded that both the cases, the increase and the decrease of the canopy apex height in 20mm, generates a reduction in the drag coefficient. Finally, are approached the practical characteristics for the geometrical upgrades implementation in the parachute and the possibilities of refinement for this study.

KEYWORDS: Parachute modeling, CFD, Drag coefficient.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS	1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4 REFERENCIAL TEÓRICO.....	2
4.1 FORÇAS ATUANTES EM UM CORPO ENVOLTO EM FLUIDO.....	2
4.2 ESTUDO DE CAMADA LIMITE.....	3
4.3 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO DE MASSA E QUANTIDADE DE MOVIMENTO.....	6
5 MÉTODOS COMPUTACIONAIS.....	6
5.1 MÉTODO RANS E MODELO DE TURBULÊNCIA.....	7
5.2 DOMÍNIO DO PROBLEMA.....	7
5.3 MALHA E SUA INDEPENDÊNCIA.....	8
5.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO DO PROBLEMA.....	10
5.5 CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA.....	10
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
7. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
Anexo A.....	16

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos no que se refere à eletrônica embarcada e à aviônica dos veículos aéreos não tripulados (VANTs) permitem o seu emprego para a cobertura de áreas cada vez mais extensas, com alta autonomia e elevada precisão de voo, o que têm corroborado para a configuração de aeronaves com equipamentos ópticos e eletrônicos de elevado custo.

Em vista desses fatores, visando a proteção dos dispositivos e também a redução dos riscos associados à queda desses VANTs, o uso de paraquedas tem sido aceito como sistema de recuperação, tanto para o emprego em caso de panes de voo, quanto como meio primário de pouso para os veículos configurados para navegação programada (cujo voo é realizado de forma automatizada seguindo critérios pré-estabelecidos pelo referente software de planejamento de rotas).

Em face do exposto, com o objetivo de se ampliar a capacidade de carga sustentada pelo VANT, estes paraquedas devem possuir o menor peso e o menor volume possível, conseqüentemente ter o menor diâmetro que atenda às especificações dos fabricantes. Nesse cenário, figura com elemento determinante o mais elevado coeficiente de arrasto associado ao perfil do paraquedas inflado.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho se baseia na a modelagem de três configurações geométricas distintas de um determinado paraquedas de modelo hipersustentado para que seja definido qual o perfil de maior coeficiente de arrasto dentre os analisados.

O paraquedas analisado, apresentado na Figura 2.1, possui seu ápice (fenda circular na região central do paraquedas) rebaixado, e é esta a dimensão a ser variada a fim de se analisar a influência deste parâmetro no desempenho aerodinâmico deste sistema de recuperação.

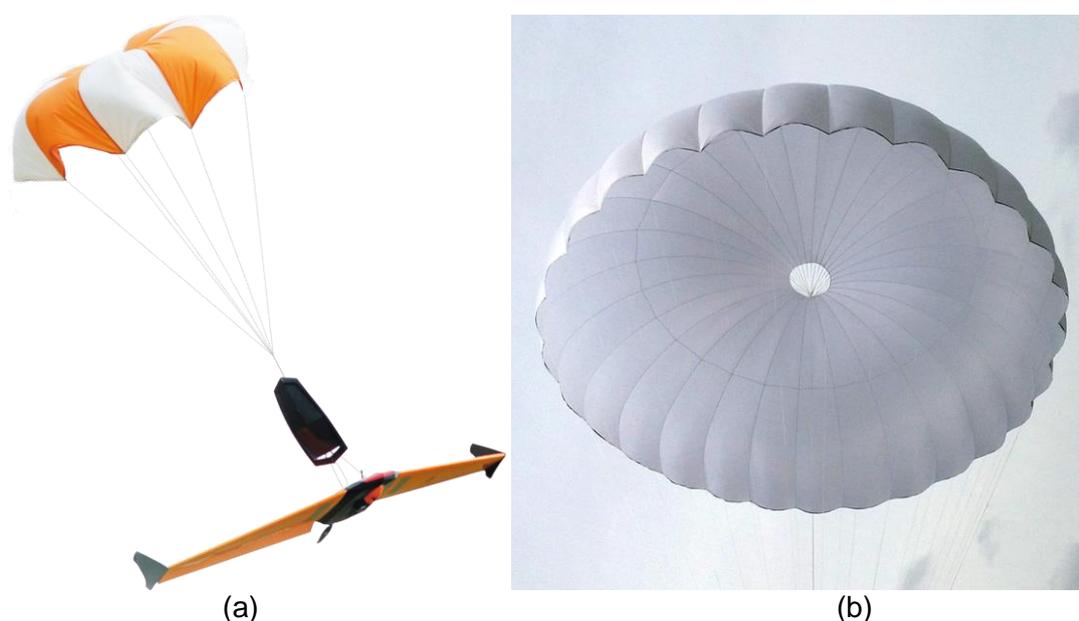


Figura 2.1 - (a) Exemplo do paraquedas como sistema de recuperação de VANT de asa fixa. (Fonte: SkyDrones T. A., 2017); (b) Detalhe do ápice em um paraquedas hipersustentado. (Fonte Sol Paragliders, 2017)

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O emprego de análises auxiliadas por computador como estudo da fluidodinâmica computacional (CFD, do inglês “*Computational Fluid Dynamics*”) vem assumindo um papel cada vez mais fundamental para o projeto aeronáutico e, em específico, de sistemas de recuperação como o paraquedas. O trabalho de Leonov *et alli*, 2011, apresenta um exemplo dos avanços que estes recursos têm feito no sentido de implementar técnicas de simulação com maior exatidão de parâmetros de elasticidade e características estruturais para o projeto de paraquedas.

O estudo apresentado neste trabalho considera o perfil analisado como um corpo rígido em análise de duas dimensões, embora Shen e Cockrell, 1988, tenham demonstrado em seus estudos que a porosidade do velame (tecido do paraquedas) exerce significativa importância na determinação de seu arrasto aerodinâmico. Da mesma forma, Cruz *et al.*, 2003, levantaram que o número de Strouhal em paraquedas em queda é significativamente mais elevado do que o medido em corpos de prova com geometria axissimétrica.

Estes trabalhos auxiliam na compreensão da divergência entre os resultados obtidos por este estudo e os dados de referência.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

Serão abordados aqui os temas pertinentes à análise dos fenômenos e princípios atuantes sobre um corpo exposto a um dado escoamento. A compreensão desta matéria permitirá a interpretação correta das suposições feitas no capítulo referente aos métodos computacionais empregados na modelagem do paraquedas em queda livre.

4.1 FORÇAS ATUANTES EM UM CORPO ENVOLTO EM FLUIDO

Para o estudo das forças atuantes em um corpo sob efeito do escoamento de um fluido é necessário compreender a definição deste estado. Segundo Fox *et alli*, 2014, um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob efeito de uma tensão de cisalhamento, não importando quão pequeno seja o seu valor.

As forças de pressão, assim como a tensão, são forças de superfície, normais às mesmas, estão associadas à pressão do fluido e à área de contato com o outro meio. Basicamente variam, conforme a pressão, de acordo com a velocidade e a temperatura do fluido.

O arrasto, ou resistência, é definido por Shames, 1973, como a componente de força exercida sobre um corpo, decorrente do movimento de um fluido na direção da corrente livre do fluido afastada do corpo. Estudos mais aprofundados abordam a existência de outras resistências, não obstante, as principais componentes desta força se apresentam em função do atrito e da tensão normal ocasionada pelo escoamento em análise.

O arrasto por tensão normal, também chamado de resistência de forma, representa a força aplicada pelo fluido, associada à conservação da sua quantidade de movimento, e está relacionada com a área da seção projetada da superfície do sólido e às forças de pressão, já abordadas.

O arrasto por atrito está diretamente relacionado com a distribuição de tensões cisalhantes ao longo da superfície, sendo atuante apenas na chamada superfície molhada, que nada mais é que a superfície do objeto exposto ao escoamento em contato com o fluido. Este fator está intimamente relacionado com o desenvolvimento da camada limite do escoamento.

Sendo assim, grande parte dos resultados físicos decorrentes do escoamento de um fluido em interação com uma superfície sólida estão associados às forças de atrito geradas pelo cisalhamento entre as moléculas do fluido e aos efeitos de variação de pressão decorrentes das diferenças de velocidades do escoamento.

O coeficiente de arrasto, ou C_d (do inglês “*Drag coefficient*”), objeto de análise deste trabalho, pode ser calculado pela equação que segue, e é um número adimensional relacionado à força de arrasto associada a um determinado perfil sob o efeito do escoamento de um fluido.

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (4.1)$$

sendo C_d o coeficiente de arrasto, F_d a força de arrasto, ρ a densidade do fluido, v a velocidade de escoamento e A área característica.

A respeito do ar atmosférico como fluido, como considerado nesta simulação, pode-se considerá-lo incompressível para escoamentos com velocidades significativamente baixas frente à velocidade de propagação do som.

Esta relação é dada pelo número de Mach, conforme a equação:

$$M_c = \frac{V}{c} \quad (4.2)$$

onde M_c é o chamado número de Mach, V é a velocidade do escoamento, e c é a velocidade de propagação do som no fluido. Para fins práticos, o escoamento pode ser considerado incompressível para números de Mach inferiores a 0,3.

Em um processo isentrópico, a velocidade do som pode ser calculada pela equação:

$$c = \sqrt{kRT} \quad (4.3)$$

sendo k o expoente isentrópico, R a constante do gás, e T a temperatura do fluido, temos que para o ar a 1 atm e 15° C: $k=1,4$; $R=287\text{J/Kg.K}$; e $T=288\text{K}$. Portanto, nestas condições a velocidade de propagação do som pode ser assumida por 340m/s.

4.2 ESTUDO DE CAMADA LIMITE

O conceito de camada limite, como proposto por Prandtl, se refere à região próxima à superfície do corpo exposto ao escoamento, na qual se observa a evolução de um perfil de velocidades do fluido, uma vez que, em função da condição de não escorregamento, no contato com a superfície o fluido tem sua velocidade relativa nula, e a uma certa distância suficientemente afastada da mesma o escoamento não percebe a presença da superfície, mantendo a velocidade inicial do fluido (u_∞), como pode ser observado na Figura 4.1.

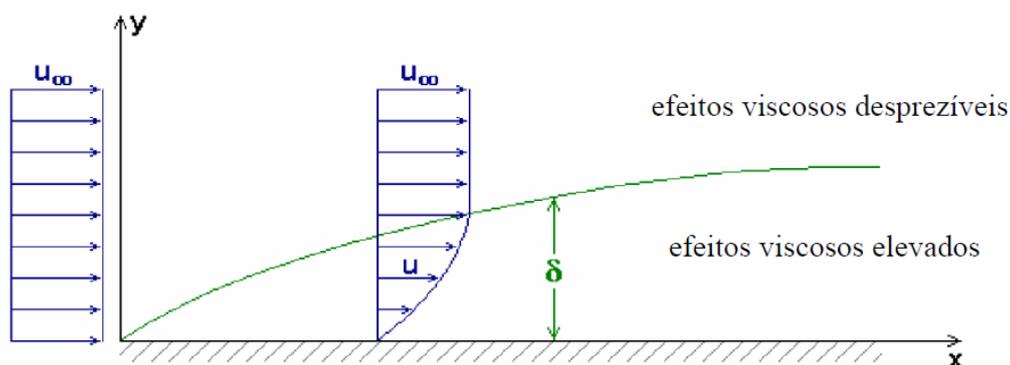


Figura 4.1 – Camada limite sobre uma superfície plana. (Fonte: Abramchuk, 2014).

Shames, 1973, apresenta uma das definições de espessura da camada limite (δ) como sendo a distância do contorno até onde a velocidade do fluido iguale a 99% da velocidade da corrente principal local.

A propriedade responsável pela transmissão dessa informação (a perturbação causada ao escoamento em função de uma superfície de obstáculo) é a viscosidade. Basicamente, as diversas camadas de fluido que se sobrepõe, formando o volume de controle, estão conectadas por forças de interação intermoleculares, e a diferença de velocidades entre estas camadas gera o mesmo cisalhamento responsável pelo arrasto de atrito. Desta forma, a região do fluido que se encontra suficientemente afastada da superfície de perturbação, ou, que em outras palavras, não percebe as perturbação causadas ao escoamento, mantém um perfil de velocidade de escoamento constante, de intensidade u_∞ , independentemente da viscosidade do fluido (podendo, inclusive, ser o fluido considerado invíscido além dos limites da espessura da camada limite). Por outro lado, a região mais próxima da superfície de perturbação, que tem o seu perfil de velocidades (u) alterado pela mesma, é tida como região sobe influência de efeitos viscosos.

4.2.1 CAMADAS LIMITE LAMINAR E TURBULENTA

Foi apresentado que na região sob efeito da viscosidade do fluido o perfil de velocidade de escoamento do mesmo varia de zero até u_∞ , entretanto, cabe salientar que esta variação de velocidade pode se dar de forma abrupta ou não, dependendo do comportamento do fluido no interior da camada limite.

Para um fluido com uma determinada velocidade de escoamento de perfil laminar na direção horizontal, em uma primeira região no contato com uma superfície de perturbação o fluido mantém o seu perfil laminar, caracterizado pela predominância de componentes de velocidade de horizontais. Neste trecho o aspecto do escoamento caracteriza a camada limite laminar e a variação do perfil de velocidade de escoamento se dá de forma progressiva.

Em uma região posterior à de camada limite laminar o efeito viscoso passa a influenciar de tal forma que a interação entre as camadas de fluido gera vórtices de turbulência, responsáveis pela presença de componentes verticais de velocidade do escoamento. Esta região possui características aleatórias de escoamento e nele a variação do perfil de velocidades do fluido é abrupta. Esta é conhecida como camada limite turbulenta.

Vale ressaltar que transição da região de camada limite laminar para a de camada limite turbulenta não acontece de forma repentina, fica então estabelecida uma região de transição, onde tanto os efeitos laminares do escoamento, quanto as revoluções características do comportamento turbulento são percebidas. A Figura 4.2 representa estas regiões dentro da camada limite.

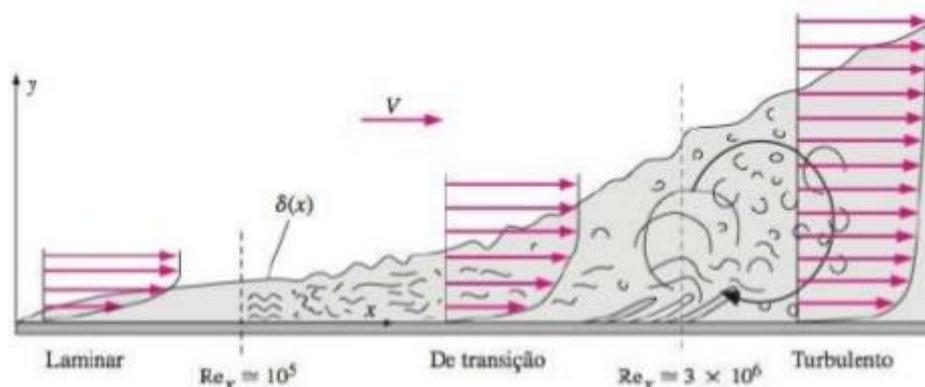


Figura 4.2 – Comportamento do fluido no interior da camada limite. (Fonte: Çengel e Cimbala, 2006)

De acordo com Çengel e Cimbala, 2006, a determinação dos limites dessas regiões laminares, de transição e turbulenta, depende de diversos fatores, como a rugosidade da superfície e a presença de tropeços que podem antecipar a transição.

Por fim, acerca dos fenômenos associados ao comportamento do fluido no interior da camada limite, cabe abordar o fenômeno conhecido como descolamento da camada limite, que se dá quando os gradientes de pressão desfavoráveis (isto é, campos de maior pressão a jusante) fazem com que redução da velocidade do escoamento seja violenta o suficiente para estagnar o fluido no sentido do escoamento principal. Desta forma o fluido se vê forçado a deslocar no sentido transversal à superfície, configurando um elevado espessamento da camada limite nesta região. A equação determina o ponto de descolamento.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{\text{superfície}} = 0 \quad (4.4)$$

onde u é a velocidade do escoamento e y é a coordenada normal à superfície, de forma que fica determinado o ponto de descolamento onde o gradiente de velocidade do escoamento for nulo mesmo na região afastada da superfície, como mostrado na figura 4.3.

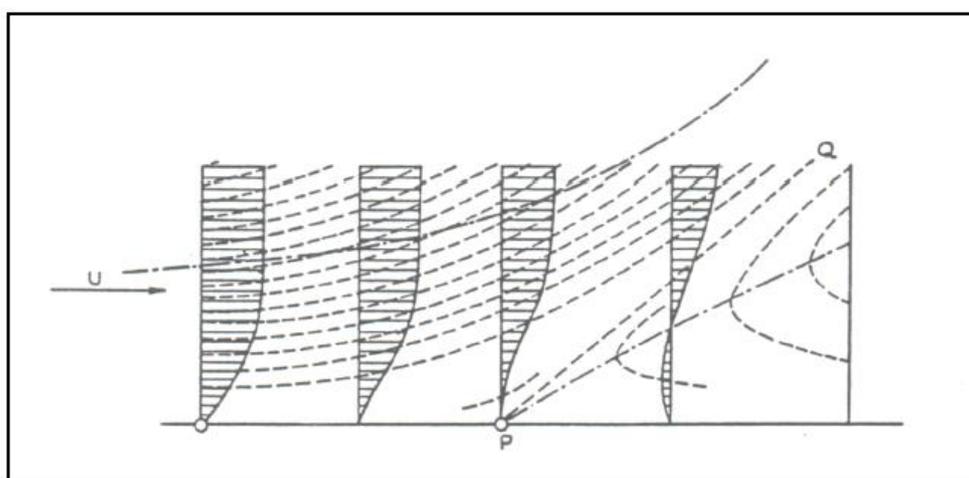


Figura 4.3 – Ponto (P) de descolamento da camada limite no escoamento externo sobre uma placa plana. (Fonte: Freire, 1990)

4.3 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO DE MASSA E QUANTIDADE DE MOVIMENTO

Diversas são as relações de descrição do comportamento de propriedades dos fluidos que podem se fazer necessárias para solução de problemas envolvendo o seu escoamento. Entretanto, a leis de conservação da massa, o princípio da conservação da quantidade de movimento, a primeira e a segunda leis da termodinâmica, e a segunda lei de Newton são as Leis básicas aplicáveis a qualquer fluido.

Dentre estas, destacam-se as equações de Navier-Stokes, como são conhecidas as equações de conservação de massa e de conservação de quantidade de movimento. Para a análise em duas dimensões de um fluido incompressível, e quando a viscosidade é considerada constante, as equações de conservação de massa e de conservação de quantidade de movimento podem ser apresentadas em uma de suas notações como se vê, respectivamente nas equações abaixo:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (4.5)$$

Em x:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4.6)$$

Em y:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4.7)$$

onde ρ é a massa específica, u e v são as componentes do vetor de velocidades, e p e μ são respectivamente a pressão e a viscosidade do fluido.

A solução destas equações será realizada de forma numérica, adotando-se as hipóteses convenientes ao problema proposto.

5. MÉTODOS COMPUTACIONAIS

A solução analítica das equações previamente apresentadas somente é possível para alguns casos elementares. Bortoli, 2000, apresenta que os métodos analíticos tem a desvantagem de serem aplicados apenas a problemas cujas hipóteses simplificativas os desviam demasiadamente do fenômeno físico real e, geralmente, só podem ser aplicados para geometrias simples.

Por outro lado, a solução de problemas de escoamento por experimentação em laboratório pode se tornar extremamente onerosa, uma vez que os seus custos são proporcionais à dimensão e complexidade dos sistemas analisados.

Neste cenário, a modelagem numérica, empregando-se destas duas formas de solução de casos simplificados para a validação de seus algoritmos, se estabelece como solução para a análise de problemas com condições de contorno e geometria complexa.

A solução de modelos matemáticos via métodos numéricos envolve, além da compreensão das leis de conservação, a determinação de relações constitutivas, de modelos de turbulência que sejam adequados ao problema proposto, e a correta designação das condições de contorno.

Para a solução do problema proposto neste trabalho foi utilizado o “software” ANSYS Fluent 18.0, que, como a maioria dos programas de modelagem em “*Computational Fluid Dynamics*”, resolve as equações de Navier-Stokes pelo método de volumes finitos, aplicando as leis de conservação e balanço de propriedades a cada volume discretizado, o que proporciona a manutenção da estabilidade numérica do método.

5.1 MÉTODO RANS E MODELO DE TURBULÊNCIA

A solução numérica das equações de Navier-Stokes pode se dar para a simulação numérica direta (DNS – direct numerical solution), pelo método RANS ou pelo método LES. O método RANS (do inglês “*Reynolds averaged Navier Stokes equations*”) se baseia em, com o intuito de reduzir o trabalho computacional a níveis factíveis, decompor o espectro de soluções em uma parte média e outra residual, de forma que o termo médio é calculado e a parte residual é simulada por um modelo de turbulência que seja capaz de reproduzir as características flutuantes do componente de velocidade. O modelo de turbulência resolve o problema de fechamento proveniente da existência do tensor de tensões de Reynolds (que são os termos dependentes das oscilações de velocidade, oriundos da decomposição da solução e de seus termos não lineares), o que representa a existência de um maior número de incógnitas do que de equações descritivas. As equações abaixo apresentam para a formulação RANS respectivamente a equação da continuidade e quantidade de movimento, em notação indicial pelo somatório de Einstein:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{u}_i) = 0 \quad (5.1)$$

onde x é a direção do escoamento e \bar{u}_i é o componente de velocidade médio do escoamento.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u_i' u_j'} \quad (5.2)$$

onde ρ é a massa específica, \bar{u}_i é o componente de velocidade médio do escoamento, e p e μ são respectivamente a pressão e a viscosidade do fluido, x é a direção do escoamento e \bar{u}_i' é a flutuação de \bar{u}_i .

O modelo de turbulência empregado é o $K-\omega$ SST, (“*Shear Stress Transport*”) que, segundo Spode, 2006, é um modelo a duas equações de transporte, largamente aplicado a escoamentos industriais, que apresenta bom desempenho em escoamentos do tipo camada limite com gradiente adverso e favorável de pressão. Este modelo reúne as características favoráveis da formulação $K-\omega$ e $K-\varepsilon$, respectivamente nas regiões próximas à superfície e também nas zonas afastadas da mesma.

5.2 DOMÍNIO DO PROBLEMA

Para a determinação do domínio do problema, foi descrito um volume de controle de duas dimensões, com dimensão cinco vezes maior que o diâmetro do paraquedas a montante e nos limites superior e inferior; a jusante foi determinada uma distancia de dez vezes o diâmetro do mesmo. Estas dimensões são usuais para que haja a garantia de que as paredes não irão interferir no escoamento do paraquedas em estudo.

O paraquedas analisado é o modelo PTP-IIX, projetado pela 3D Design LTDA para a utilização como sistema de recuperação de Veículos que possuem 1,600m de envergadura, peso máximo equipado de 3.300g e são empregados em mapeamento topográfico, inspeção de redes e geração de mapas de intensidade de ventos para parques eólicos. As máximas velocidades de cruzeiro dos VANTs em questão são de 25m/s, entretanto eles podem atingir até 35m/s, sendo que são projetados para resistir a pousos com velocidade de descida de até 4m/s.

O paraquedas possui diâmetro externo de 1.400,0mm, diâmetro interno de 140 mm e altura de ápice de 341,5mm. Seu perfil hipersustentado é dividido em oito painéis com construção pelo método de bloco, como se vê na figura 5.1, que representa seu perfil em corte axial. De acordo com a F.A.A., 2015, a construção por bloco é a que tem as fibras transversais dos painéis montadas paralelamente à borda do velame.

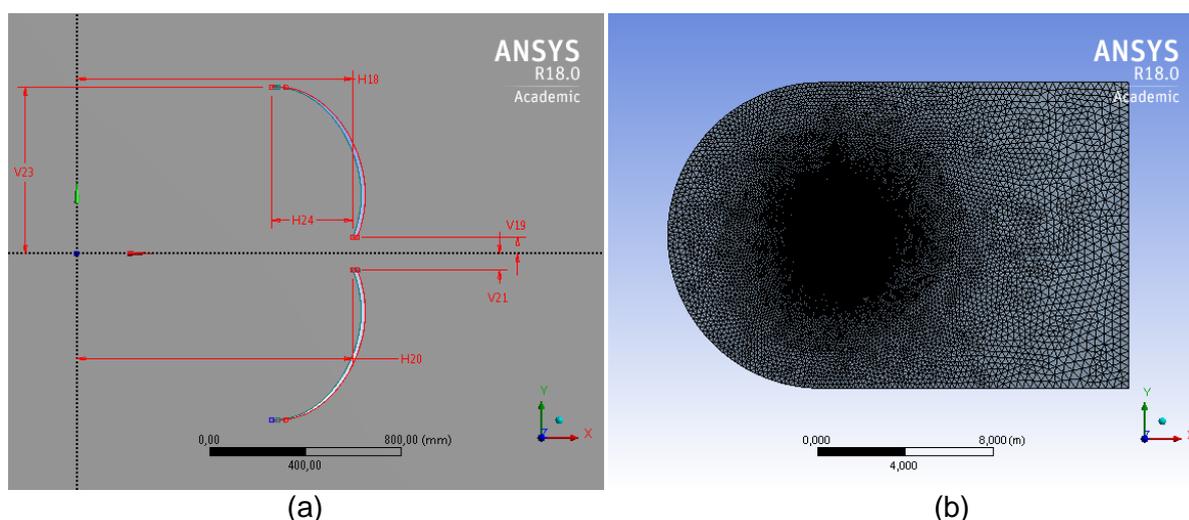


Figura 5.1 – Dimensões do domínio: (a) corte axial do perfil do paraquedas hipersustentado em emprego atualmente; (b) domínio discretizado por malha.

5.3 MALHA E SUA INDEPENDÊNCIA

A discretização do domínio do problema baseia-se na divisão da região de interesse em pequenas seções, a fim de permitir, individualmente, o seu cálculo de forma iterativa.

Para tanto, foram determinadas três malhas (grosseira, intermediária e fina) através do *software* Meshing do pacote ANSYS Fluent 18.0. Cada malha respeitou diferentes critérios de expansão, desde a região mais refinada à volta do perfil analisado, até os limites do domínio, resultando em distintos níveis globais de refinamento. A Figura 5.2, apresenta detalhes de refinamento da malha na região de borda do velame.

A independência de malha está associada ao nível de refinamento da mesma, que deve ser suficientemente alto de forma que a discretização do domínio não seja responsável pela variação dos resultados modelados de forma a extrapolar um determinado grau de convergência, que pode ser definido de acordo com as condições físicas simuladas.

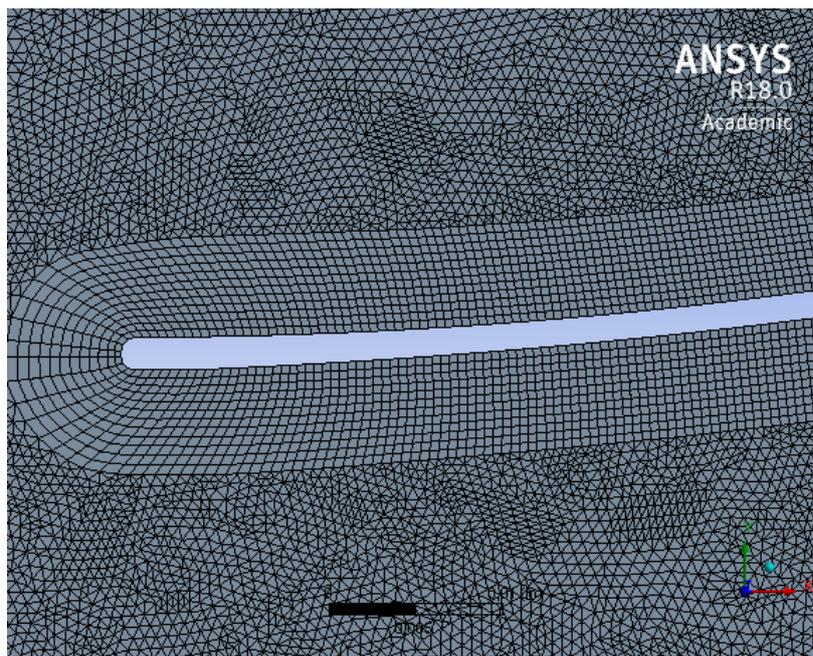


Figura 5.2 – Detalhe do refinamento da malha na região de contorno das extremidades de borda do velame.

Para que os resultados obtidos com a modelagem numérica possam ser empregados, é importante que a discretização do domínio seja suficientemente acurada, para que os detalhes geométricos do problema possam ser computados. Lohner, 2001, apresenta que a malha ideal está associada à precisão esperada para os resultados da simulação.

Com o intuito de avaliar a qualidade das malhas projetadas foram considerados dois critérios: O “Grid Convergence Index” (GCI), e o fator y^+ .

O índice de convergência de malha, ou GCI pela sigla do inglês, caracteriza uma mensuração do erro associado aos parâmetros de malha, e é empregado para determinar se os resultados obtidos em uma simulação se encontram na faixa assintótica de soluções.

Por se tratar de um fator de erro associado ao refinamento de malhas, os menores valores de GCI são visados. Para o seu cálculo, as três discretizações analisadas (definidas sobre o domínio do perfil do paraquedas que existe no mercado atualmente) foram empregadas na modelagem sob as mesmas condições de contorno e os resultados foram utilizados seguindo a metodologia que pode ser acompanhada no ANEXO A, conforme os parâmetros de cálculo que são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros empregados no cálculo do GCI.

Parâmetro	Resultado
f1	2.525
f2	2.587
f3	3.109
N_1	1.086.851
N_2	700.041
N_3	511.996

O outro parâmetro de qualidade de malha que foi empregado é o y^+ , este fator é um adimensional que relaciona a espessura da malha no perímetro da parede com as características fluidodinâmicas do escoamento. Este parâmetro é importante para que se determine se a espessura de malha empregada no contorno das paredes do perfil do

paraquedas é refinada o bastante para compreender a altura da camada limite e, conseqüentemente, computar os seus efeitos. O cálculo de y^+ é feito através da equação:

$$y^+ = \frac{\rho y}{\mu} \sqrt{\left(\frac{\tau_\omega}{\rho}\right)} \quad (5.3)$$

onde ρ é a massa específica do ar, y é a distância da parede do perfil ao primeiro nó da malha, μ é a viscosidade do fluido e τ_ω é a tensão cisalhante na parede do perfil. Para o modelo $K-\omega$ SST de turbulência, empregado na simulação, os valores recomendados de y^+ estão entre 5 e 8, necessariamente abaixo de 10.

Para os dados de densidade e viscosidade dinâmica do ar, tomados ao nível do mar e a 20° C, ρ 1,205 Kg/m³ e μ 1,82e-5 kg/m.s, temos que para o comprimento característico de 700mm que define cada painel do paraquedas, a distância estimada da primeira camada da malha até a superfície do perfil é de 4,8e-4m para um y^+ de 6,5.

Para y de 1 mm o resultado de y^+ é 14, o que está fora da faixa de validação do modelo de turbulência. Portanto a malha grosseira foi descartada em função deste parâmetro.

Os dados da três malhas geradas e os resultados dos cálculos de GCI e y^+ são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 5.2 – Características das malhas de discretização.

Malha	NR VOLUMES	y [mm]	GCI [adm]	y^+ [adm]
Fina	1.086.851	0,48	0,004127	6,5
Intermediaria	700.041	0,48	0,034000	6,5
Grosseira	511.996	1,00	-	14,0

Em vista do exposto, a malha fina foi a que atendeu às condições de tolerância de ambos os métodos e apresentou o melhor resultado de GCI, sendo, portanto a empregada nos cálculos subsequentes.

5.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO DO PROBLEMA

Foi definida a condição de regime transiente, pois embora seja estudada a queda em velocidade terminal do paraquedas, alguns fenômenos aerodinâmicos na interação da estrutura com o escoamento são intrinsecamente transientes, não se apresentado na análise permanente, e as propriedades do ar foram tomadas à condição ambiente. À região denominada "*inlet*", a montante, foi estipulada a velocidade de entrada uniforme de 4m/s com escoamento laminar e intensidade de turbulência de 05%, na intenção de simular o escoamento externo ambiente. Na região de saída, denominada "*outlet*" foi determinada a condição de pressão constante igual a 1atm, já as superfícies internas do volume de controle foram designadas de forma que o perfil respeitasse a condição de não escorregamento, diferentemente do perímetro do domínio, onde esta condição não foi assumida, a fim de que estas não interferissem na análise do escoamento sobre o perfil.

5.5 CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA

Para que fosse garantida precisão dos resultados, no tocante aos erros de truncamento, iterativos e de discretização associados ao método numérico de solução, foi estipulado o critério da ordem de 1e-5 como parâmetro de convergência para as componentes x e y de velocidade, assim como para os resíduos de K , ω e de massa.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Acerca da comparação com os dados experimentais, de acordo com Poynter, 1991, os paraquedas hipersustentados em utilização atualmente possuem um coeficiente de arrasto de aproximadamente 2,2 e os paraquedas de perfil hemisféricos (sem rebaixamento de ápice) possuem C_d de 1,5 a 2,0, porém as considerações empregadas para a solução numérica influenciam nos resultados. A flexibilidade do tecido permite uma grande variação na geometria do velame, não apenas na fase de abertura, mas também durante a descida terminal. Também, há um escoamento secundário através da superfície do velame e função da porosidade do tecido, contabilizando um pequeno percentual da velocidade de escoamento livre [Zhe *et al.*, 2014].

Portanto, em função das simplificações adotadas na modelagem deste trabalho, há uma tendência de que os resultados obtidos possuam uma discrepância apresentando resultados mais elevados para o coeficiente de arrasto do que os medidos experimentalmente.

Com o emprego da malha fina, para o paraquedas com o dimensionamento em emprego atualmente foi calculado um coeficiente de arrasto igual a 2,525, o que é aproximadamente 14,8% maior que o dado conhecido do paraquedas existente no mercado, entretanto, o escopo do trabalho se baseia na identificação do incremento no coeficiente de arrasto em função da variação da altura do ápice do perfil, como pode ser visto na figura abaixo (em maior detalhamento no Anexo B). Sendo assim, os resultados da simulação dos dois perfis com alturas de ápice modificadas foram comparados com este dado que passou a ser tomado como parâmetro de referência.

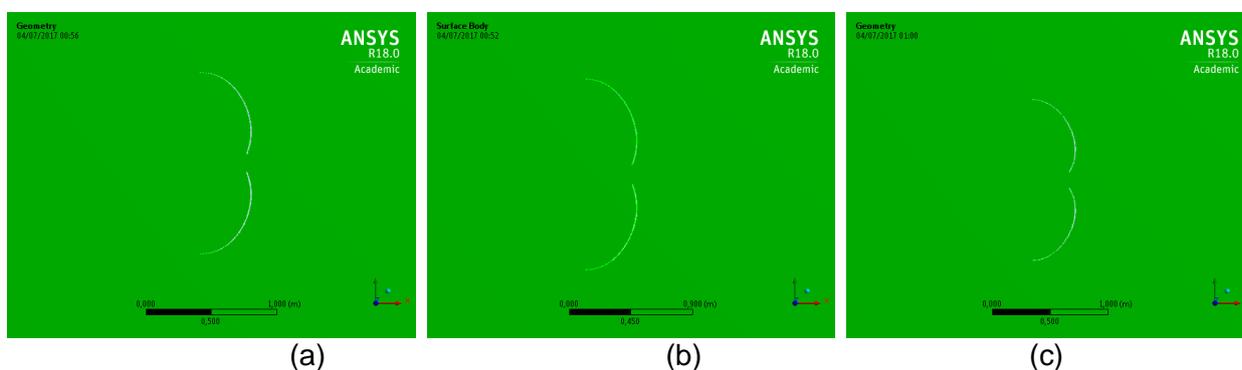


Figura 6.1 – Detalhes das variações geométricas do perfil do paraquedas: (a) ápice reduzido em 20 mm; (b) perfil de referência; e (c) ápice aumentado em 20 mm.

As simulações foram rodadas no Laboratório de mecânica dos fluidos da UFRGS, em um computador HP, modelo Pavilion dv6, com processador AMD Phenom II N660 Dual-Core com 4GB de memória RAM, e cada modelagem levou em média 45 horas para ser concluída, somando 135 horas de processamento computacional.

As Figura 6.2 e 6.3 apresentam os campos de magnitude de velocidade para os escoamento à volta do perfil tomado como referência (sem alteração da altura do ápice). Pode-se identificar o caráter assimétrico característico dos fenômenos de natureza transiente no escoamento sobre o perfil de geometria simétrica. As oscilações da esteira de turbulência apontam para uma descensão do paraquedas com maiores deslocamentos secundários, isto é, movimentos oscilatórios em direções distintas da vertical, mesmo em condições nulas de vento.

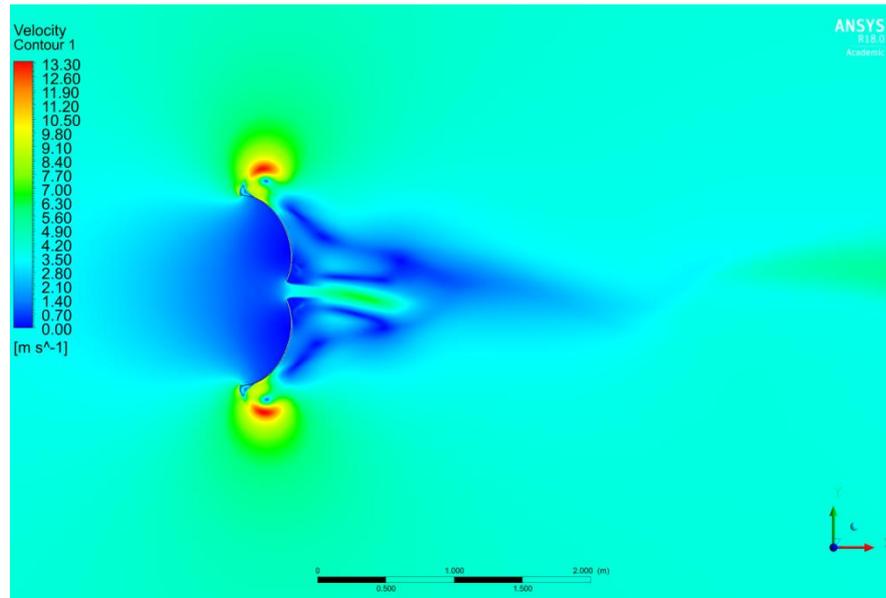


Figura 6.2 – Campo de magnitude de velocidades no entorno do perfil de referência, no instante $t = 2,5$ s.

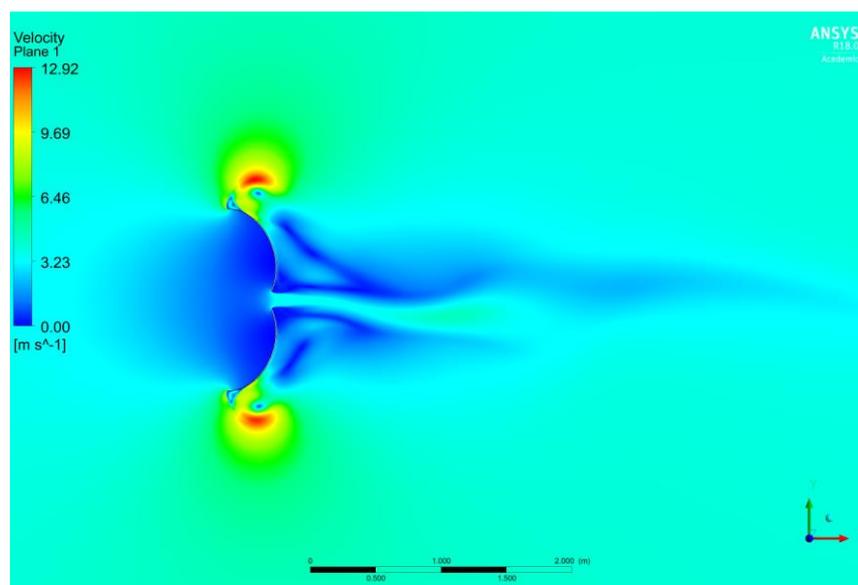


Figura 6.3 – Campo de magnitude de velocidades no entorno do perfil de referência, no instante $t = 5$ s.

Pelos mesmos parâmetros de refinamento de malha e sob as mesmas condições de contorno da modelagem do perfil de referência, foi calculado o coeficiente de arrasto para o modelo de ápice posicionado 20 mm a cima, e para outro com o ápice 20 mm abaixo da referência, os resultados são apresentados na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Resultados para a simulação de dois distintos perfis.

<i>Perfil</i>	<i>Altura de ápice [mm]</i>	<i>Cd</i>
Referência	341,5	2,525
+20 mm	361,5	1,928
-20 mm	321,5	1,813

Os resultados apontam para um decréscimo do coeficiente de arrasto aerodinâmico, tanto do paraquedas de ápice estendido (31%) quanto do paraquedas de ápice rebaixado (39%).

Os dados levantados neste trabalho estão de acordo com o esperado, uma vez que o desenvolvimento do perfil em utilização atualmente foi baseado em um processo experimental, onde diversas configurações de altura de ápice foram ensaiadas, e buscou-se a otimização do coeficiente de arrasto durante o dimensionamento das linhas de sustentação do paraquedas (que determinam a altura final do ápice).

Com relação ao desempenho de voo, os gráficos dos campos de magnitude de velocidade em dois diferentes instantes são apresentados para análise nas Figuras 6.4 e 6.5.

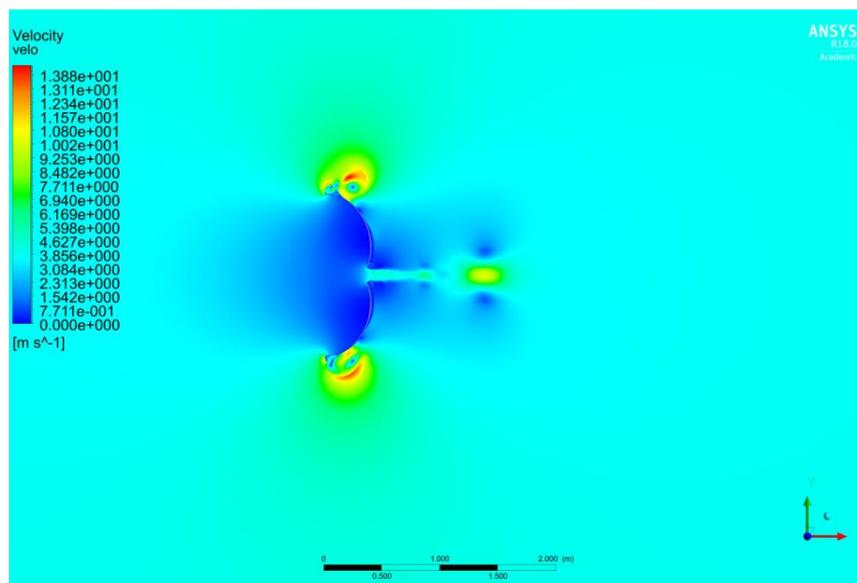


Figura 6.4 – Campo de magnitude de velocidades no entorno do perfil de ápice estendido, no instante $t = 2,5$ s.

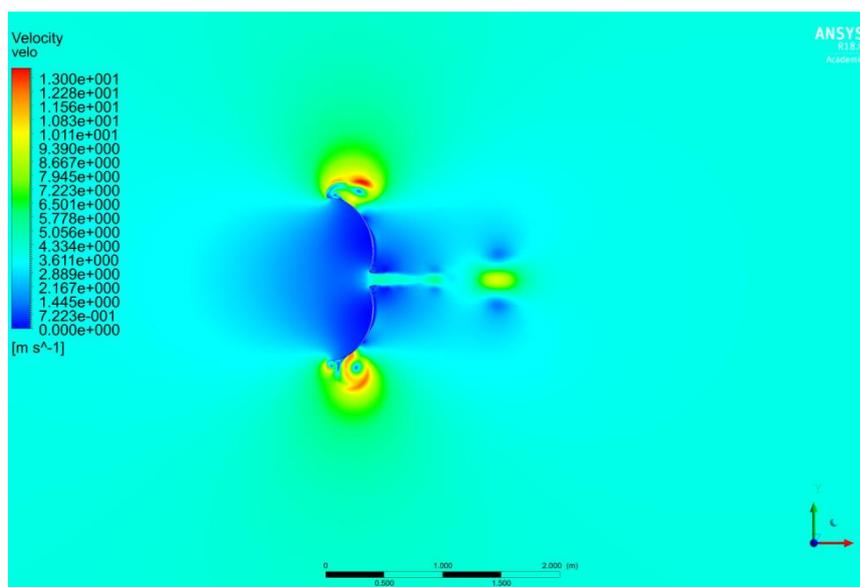


Figura 6.5 – Campo de magnitude de velocidades no entorno do perfil de ápice estendido, no instante $t = 5$ s.

Foi constatado que o velame de ápice encurtado demonstrou características similares ao de referência, entretanto, no velame de ápice estendido há uma significativa melhora no que se refere à estabilidade de descensão, como pode ser percebido pela simetria e estabilidade da região de esteira nos dois instantes apresentados.

Convém salientar que o processo experimental utilizado no desenvolvimento de paraquedas leva em consideração outros fatores além do coeficiente de arrasto, como velocidade de abertura (que tem forte influência no choque de abertura (pico de tensão distribuída pelas linhas de sustentação do paraquedas)) e estabilidade sob condições de turbulência e vento cruzado. Estes temas, em vista de suas complexidades fenomenológicas têm sido, juntamente com os desenvolvimentos de materiais de mais alto desempenho, tema de estudos mais aprofundados na área de sistemas de recuperação.

Sobre o pós-processamento de dados obtidos com a modelagem numérica do software ANSYS Fluent 18.0, em função das oscilações de esteira percebidas pela análise em regime transiente, foi identificada uma variação cíclica no ponto de descolamento da camada limite nas extremidades do perfil do velame. Este fenômeno resultou em uma oscilação na ordem de $10e-2$ no coeficiente de arrasto mesmo após a convergência da ordem de $10e-5$ dos resíduos numérico, que haviam sido determinados como parâmetro de convergência das simulações. Para que as soluções das três modelagens pudessem ser comparadas, foram feitas as médias aritméticas dos resultados após a obtenção do parâmetro de convergência dos resíduos associados ao cálculo numérico.

7. CONCLUSÕES

Baseado na dinâmica de fluidos computacional para a solução das equações médias de Reynolds, com modelagem $K-\omega$ SST de turbulência em regime transiente, o estudo de três distintos perfis de paraquedas conclui que tanto a redução quanto a extensão em 20 mm da altura do ápice do velame geram uma redução no coeficiente de arrasto do mesmo, o que representa um déficit de seu desempenho, entretanto, aponta para uma melhora na estabilidade de descensão no caso do perfil de ápice aumentado.

Como possibilidades de melhoria dos resultados, é proposta a simulação em três dimensões, onde possam ser modelados todos os detalhes de geometria do perfil, e não simplesmente a posição média da borda do velame. Este implemento pode permitir a obtenção de valores reais de coeficiente de arrasto, facilitando o processo de discretização de malha e de seleção de condições de contorno, uma vez que se torna possível a comparação direta com resultados experimentais.

Igualmente benéfica à proposta de obtenção de uma geometria de maior C_d , seria a seleção de menores variações de altura do ápice, como 10 mm ou ainda 5 mm. Em se tratando de um perfil que se propõe a ter atualmente uma altura de ápice próxima à ideal, estas dimensões mais refinadas podem compreender algum implemento não percebido na análise deste trabalho. Um fator a se considerar neste caso é o de que a precisão dimensional referente à manufatura do paraquedas, especialmente no que tange os processos de corte com gabaritos e costura manual, possui uma tolerância de 10 mm para a altura do ápice, portanto, mesmo que melhorias geométricas possam ser propostas, eventualmente estas não poderiam garantir um desempenho de voo significativamente maior do velame.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abramchuk, V.; “**Estudo da força de arrasto sobre veículos de transporte de pessoas empregando CFD**”, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

Bortoli, A. L.; **“Introdução à dinâmica de fluidos computacional”**, Ed. Universidade/UFRGS, 2000.

Çengel, Y. e Cimbala J. ;**“Fluid mechanics – Fundamentals and applications”**, McGraw-Hill, Ed New York, 2006.

Cruz, J. R.; Mineck, R.E., Keller, D.F.; **“Wind tunnel testing of various disk-gap-band parachutes”**, 17th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and seminar, 19-22 MAY, Monterey, CA, 2003.

F.A.A.; **“Parachute rigger handbook”**, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Flight Standards Service – FAA-H-8083-17A, 2015.

Fox, R. W., McDonald A.T., Pritchard P.J., e Leylegan J.C.; **“Introdução à mecânica dos fluidos”**, LTC, 8^a Ed., 2014.

Freire, A. P. S; **“Teoria de camada limite”**, Programa de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990, acessado em http://www.turbulencia.coppe.ufrj.br/notas_aulas/CursoCamadaLimite_APSF.pdf, em 28 de maio de 2017.

Leonov, S. V., Morozov V.I. e Ponomarev A.T.; **“Shape Modeling and Stength Analysis of Parachutes”**, Izvestiya Akademii Nauk, Mekhanika Tverdogo Tela, No 2, 183-198, 2011.

Löhner, R.; **“Applied computational fluid dynamics techniques: an introduction based on finite element methods”**, John Wiley, 2001.

Poynter, D.; **“Parachute manual: A technical treatise on aerodynamic decelerators”**, Para Pub, vol. 2, 1991.

Shames, I. H.; **”Mecânica dos Fluidos”**, Edgar Blucher, vol. 2, 1973.

Shen, C. Q., Cockrell, D. J.; **“Aerodynamics characteristics and flow round cross parachutes in steady motion”**, J. Aircraft 25, 317-323, 1988.

Skydrones Tecnologia Aviônica, <http://www.skydrones.com.br>, acessado em 01 de junho de 2017.

Sol Paragliders, <http://www.solparagliders.com.br/reserva-rs-tk-380>, acessado em 10 de junho de 2017.

Spode, C.; **“Simulação de grandes escalas e simulação híbrida RANS/LES do escoamento sobre o degrau com condições de contorno turbulentas”**, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

Zhe, Y. J., Pasqualini, S., Qin, B.; **“Experimental investigation of the effect of Reynolds number on flow structures in the wake of a circular parachute canopy”**, TCSTAM and Springer – Verlag Berlin Heidelberg, Acta Mechanica Sinica, 361-369, 2014.

ANEXO A

Metodologia de cálculo do “*Grid Convergence Index*” (GCI):

O GCI pode ser calculado pela equação A.1:

$$GCI_{12} = \frac{F_s |\varepsilon|}{r^p - 1} \quad (\text{A.1})$$

Onde os índices 1 e 2 dizem respeito às malhas 1 (mais refinada) e 2, F_s é o fator de segurança que, segundo Roache (1944), deve ser tomado como 1,25 para a análise de três malhas, ε é o erro relativo entre as malhas, r é a razão de refinamento e p é a ordem de convergência.

O erro relativo é obtido pela equação A.2:

$$\varepsilon = \frac{f_2 - f_1}{f_1} \quad (\text{A.2})$$

Onde f é o resultado obtido pela malha referente ao seu índice.

A estimativa da razão de refinamento é calculada pela equação A.3:

$$r = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{1/D} \quad (\text{A.3})$$

Onde N é o número de volumes da malha identificada pelo índice, parâmetro este que pode ser empregado para esta estimativa (em se tratando de malhas não estruturadas), e D é o número de dimensões do problema.

Por fim, para que seja possível o cálculo do GCI, é necessário o cálculo da ordem de convergência, que se dá através da equação A.4:

$$p = \frac{\ln \left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1} \right)}{\ln(r)} \quad (\text{A.4})$$

Em que f são os valores obtidos para cada malha e r é a razão de refinamento já calculada.

ANEXO B

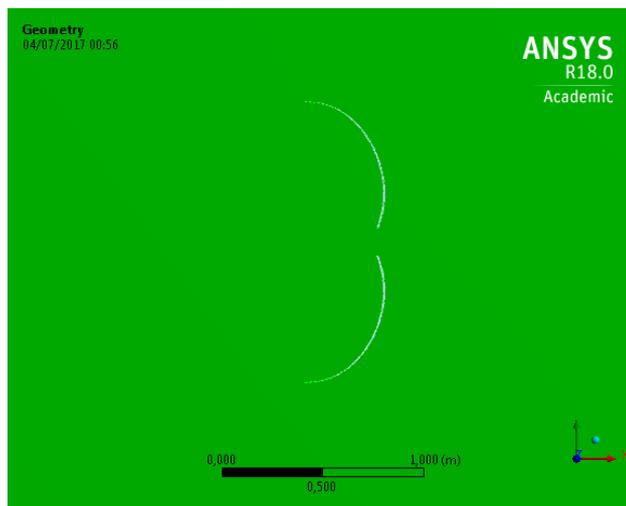


Figura B.1 – Ápice reduzido em 20 mm.

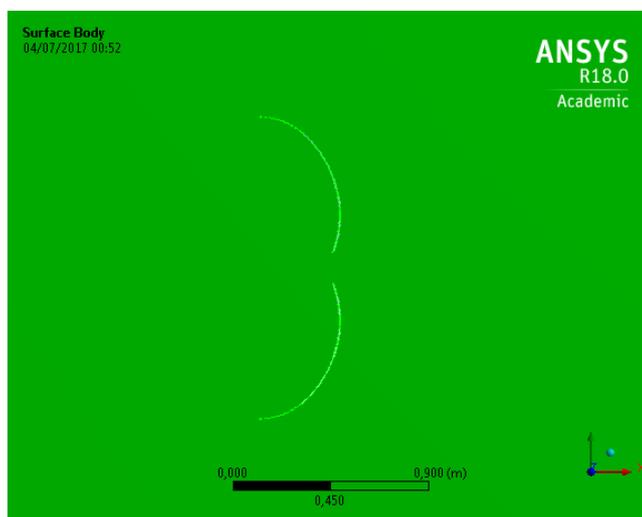


Figura B.2 - Perfil de referência.

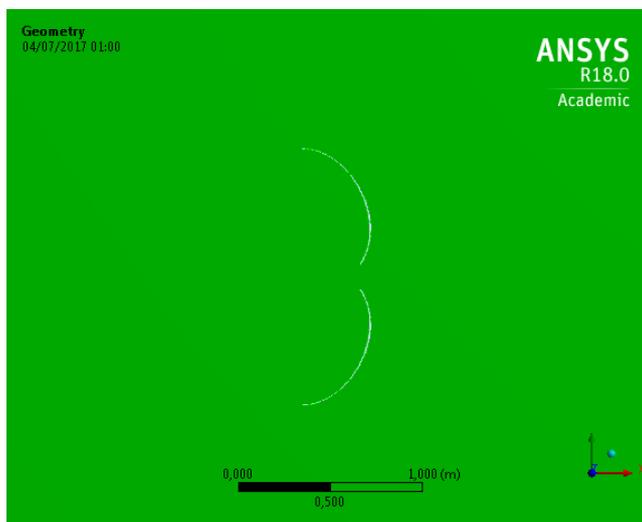


Figura B.3 – Ápice aumentado em 20 mm.