



Artigo

Estudo da variação da geometria da asa através de simulação computacional

Jeremy Michael Venâncio da Silva ^[1], Maximilyano Gois Sena ^[2] e Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras ^[3]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; venanciojeremy@gmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; maximilyano.sena@alunos.ufersa.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; dautcouras@ufersa.edu.br

Recebido: 29/04/2024;

Aceito: 27/06/2024;

Publicado: 30/06/2024;

Resumo: A competição SAE (*Society of Automotive Engineers*) aerodesign tem como objetivo projetar uma aeronave radio controlada que deve levar a maior quantidade de massa possível com o mínimo de peso da aeronave. Este trabalho tem como objetivo analisar diferentes geometrias de asas com o intuito de identificar qual delas faz com que a aeronave carregue a maior quantidade de carga possível, maximizando o MTOW (*Maximum Take-Off Weight*). Com isso, foi realizado um estudo para identificar, com o auxílio de simulações computacionais por CFD (*Computational Fluid Dynamics*), qual o melhor perfil e quais os parâmetros utilizados. Durante o estudo, foi possível encontrar os parâmetros, para que fosse analisado o comportamento das asas nas simulações de corrida e decolagem, seguindo as regras estabelecidas pelo regulamento da competição, a fim de identificar qual geometria apresenta o melhor desempenho. Ao final do trabalho foi concluído que uma asa 100% retangular consegue suportar a maior quantidade de carga, porém, isso não faz dela a melhor asa, já que é necessário analisar outros aspectos, como propagação de estol na asa, formação de vórtices nas pontas da asa, e manobrabilidade da aeronave.

Palavras-chave: Aerodesgin, CFD, Aerodinâmica, Desempenho.

Abstract: The SAE (*Society of Automotive Engineers*) aerodesign competition aims to design a radio-controlled aircraft that must carry the greatest amount of mass possible with the minimum weight of the aircraft. This work aims to analyze different wing geometries in order to identify which one allows the aircraft to carry the greatest amount of load possible, maximizing the MTOW (*Maximum Take-Off Weight*). As a result, a study was carried out to identify, with the aid of computational simulations using CFD (*Computational Fluid Dynamics*), the best profile and which parameters were used. During the study, it was possible to find the parameters, so that the behavior of the wings in racing and takeoff simulations could be analyzed, following the rules established by the competition regulations, in order to identify which geometry presents the best performance. At the end of the work it was concluded that a 100% rectangular wing can support the greatest amount of load, however, this does not make it the best wing, as it is necessary to analyze other aspects, such as stall propagation on the wing, formation of vortices at the tips of the wing, and maneuverability of the aircraft.

Key-words: Aerodesgin, CFD, Aerodynamics, Performance.

1. INTRODUÇÃO

Em todo projeto aeronáutico, sempre se busca realizar otimizações com o objetivo de obter asas com a melhor eficiência aerodinâmica possível. Para isso, envolvem-se conceitos de propagação de estol na asa, estabilidade da aeronave, momento gerado, entre outros. Neste trabalho, será feita uma variação na geometria da asa, com o intuito de identificar qual variação resulte com que a aeronave carregue a maior quantidade de peso, levando em consideração a limitação da pista de decolagem.

Com relação as geometrias de asa, existe uma grande variedade que depende do uso da aeronave. Em geral, as asas podem ter formato elíptico, retangular, trapezoidal, mista, pode ser enflechada ou não e cada uma terá propriedades e características diferentes, bem como vantagens e desvantagens. [1]

A asa com formato elíptico apresenta a melhor eficiência aerodinâmica e apresenta o menor arrasto em relação à sustentação, provocando uma melhor eficiência aerodinâmica, porém esse tipo de asa é de difícil construção, fazendo com que seja pouco utilizada. [1]

A asa com formato retangular, por apresentar maior área, apresenta a maior sustentação, mas alinhado com um aumento no arrasto, o que piora a manobrabilidade da aeronave. Uma das vantagens desse tipo de asa é a facilidade construtiva e a propagação do estol que se dá da raiz da asa para o centro, deixando livre as superfícies de controle. [1]

A asa com formato trapezoidal, apresenta um menor arrasto, porém, com uma sustentação menor, em comparação com a geometria retangular, esse tipo de asa é a melhor para manobrabilidade, porém o estol se inicia do meio da asa para a ponta, afetando as superfícies de controle. [1]

Pela asa elíptica ser complexa de construir, utiliza-se uma geometria de asa mais próxima possível, para aumentar ganhos aerodinâmicos e de desempenho. Como a aeronave para competições SAE (*Society of Automotive Engineers*) são de baixas velocidades, não é aconselhado que elas sejam enflechadas. Por isso, nesse trabalho, serão estudados 11 tipos de asa, que são: 100% trapezoidal, 100% retangular e asas mista com 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% e 90% de seção retangular.

A partir disso, foram realizadas simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para obter os coeficientes que são utilizados como *inputs* no código de corrida e decolagem para saber qual das asas suporta a maior quantidade de peso.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Escolha do perfil para a asa

Para a escolha do perfil da asa, é feita uma análise para identificar quais dos perfis apresentam as melhores características para o projeto, ou seja, perfis que tenham uma alta sustentação e o mínimo de arrasto possível. Além disso, é preferível que se escolha um perfil que apresente a melhor eficiência aerodinâmica. [2]

Para a escolha do perfil, foram analisados os perfis mais utilizados nas competições SAE: Wortmann FX 74-CL5-140, Selig 1223, Selig 1210, Eppler 423. Para realizar as análises, foi utilizado o software XFLR5. [3]

Os perfis estão mostrados na Figura 1.

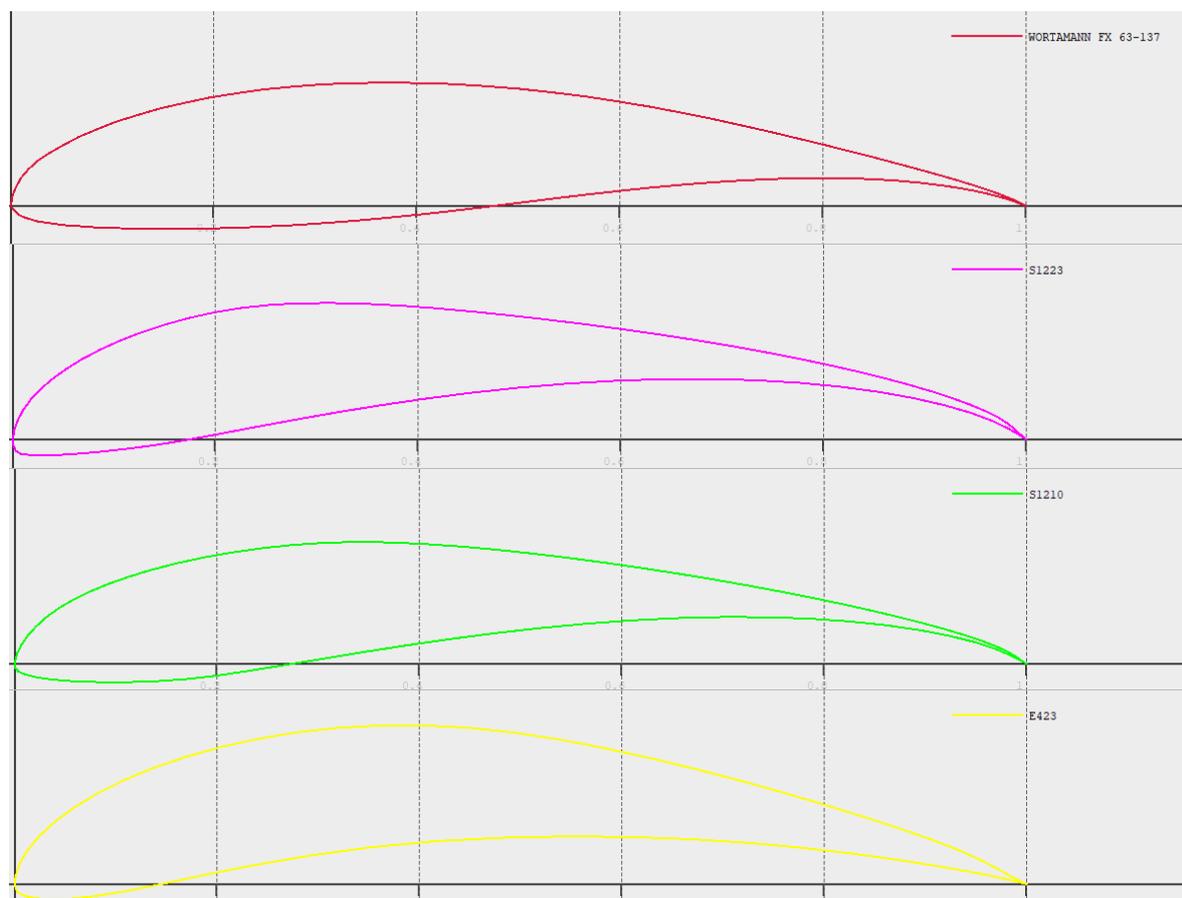


FIGURA 1. Design dos perfis no software XFLR5. (Autoria própria)

As análises dos perfis foram realizadas para uma velocidade de cruzeiro de 16 m/s e uma variação de angulação de 0 a 25°. As análises realizadas estão apresentadas na Figura 2.

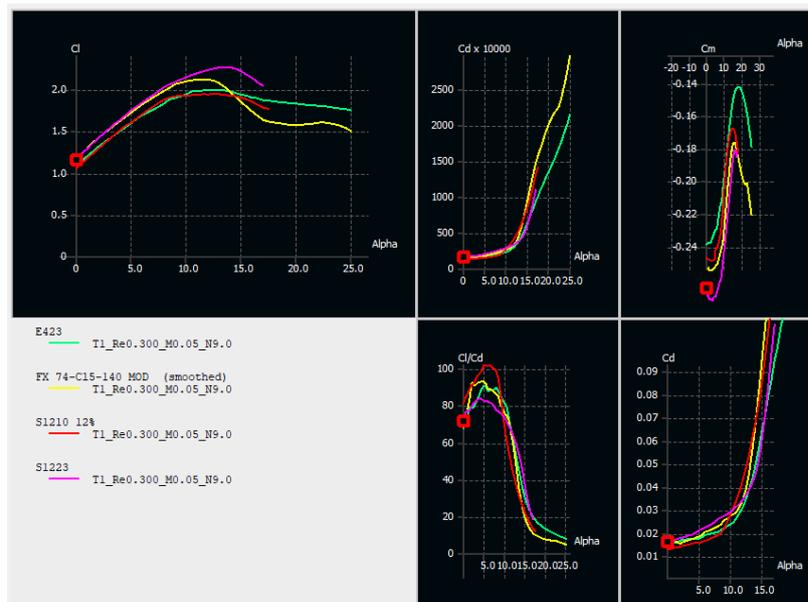


FIGURA 2. Análise dos perfis no software XFLR5. (Autoria própria)

Através da análise realizada, percebe-se que o perfil Selig 1223 é o mais adequado, por apresentar um alto valor de C_l (Coeficiente de sustentação), um C_d (Coeficiente de arrasto), relativamente parecido com os demais e apresentar um menor coeficiente de momento.

2.2. Parâmetros da asa

Para a asa, foi utilizada uma envergadura de 2 m, uma corda na raiz de 0,6 m; um afilamento de 0,5 que gera uma corda na ponta da asa de 0,3 m. Esse afilamento foi utilizado para aproximar ao máximo a asa para um formato elíptico. Outra questão é a seção da ponta da asa, na qual teve um *offset* de 0,075 m para que os centros aerodinâmicos dos perfis estivessem alinhados. As geometrias das asas estudadas estão mostradas na Figura 3 seguir.

A corda na raiz é o valor da corda na raiz da asa e ficou estabelecido que seria de 0,6 m e a corda na ponta é o valor da corda na ponta da asa e ficou definido que seria 0,3 m. O afilamento é a razão entre a corda na ponta e a corda na raiz da asa como mostrado na Equação 1. [3]

$$\lambda = \frac{c_t}{c_r} = \frac{0,3}{0,6} = 0,5 \quad (1)$$

Utilizou-se um afilamento de 0,5, para aproximar ao máximo a asa de uma elipse.

A corda média aerodinâmica é o comprimento de corda que, quando for multiplicada pela área de asa, pressão dinâmica e coeficiente de momento, vai resultar no valor do momento aerodinâmico. A corda média aerodinâmica pode ser calculada pela Equação 2. [3]

$$\bar{c} = \frac{2}{3} c_r \left(\frac{1 + \lambda + \lambda^2}{1 + \lambda} \right) \quad (2)$$

Alongamento ou Razão de Aspecto (AR) é a razão entre a envergadura e a área de asa, de forma que quanto maior o AR maior o desempenho da asa e tem uma redução no arrasto induzido, porém vem acrescido de problemas estruturais e construtivos. O AR é calculado de acordo com a Equação 3. [3]

$$AR = \frac{b^2}{S} \quad (3)$$

A eficiência aerodinâmica da asa é determinada pela Equação 4.

$$e = 1,78(1 - 0,045 \cdot AR^{0,68}) - 0,64 \quad (4)$$

O arrasto induzido (C_{di}) é o arrasto que depende da geração de sustentação e é caracterizado como um arrasto de pressão e causa o efeito de *downwash* que está associado aos vórtices nas pontas da asa. O arrasto induzido pode ser calculado de acordo com a Equação 5. [3]

$$C_{di} = \frac{CL^2}{\pi \cdot e \cdot AR} \quad (5)$$

O arrasto parasita (C_{do}) é o arrasto total da aeronave menos o arrasto induzido, é a parcela do arrasto que não está relacionada com a sustentação e é o arrasto de forma/perfil. O arrasto parasita pode ser calculado de acordo com a Equação 6. [3]

$$C_{do} = C_d - C_{di} \quad (6)$$

O coeficiente de proporcionalidade (K) pode ser calculado de acordo com a Equação 7.

$$K = \frac{1}{\pi \cdot e \cdot AR} \quad (7)$$

Os parâmetros das asas estão mostrados na Tabela 1.

TABELA 1. Dados e parâmetros de cada asa. (Autoria própria)

Configuração da Asa	Corda na raiz (m)	Corda na ponta (m)	Corda média aerodinâmica (m)	Área da asa (m ²)	Razão de aspecto (AR)
Retangular	0,6	0,6	0,6	1,2	3,33
Trapezoidal	0,6	0,3	0,467	0,9	4,44
Mista 10	0,6	0,3	0,484	0,93	4,301
Mista 20	0,6	0,3	0,5	0,96	4,167
Mista 30	0,6	0,3	0,515	0,99	4,04
Mista 40	0,6	0,3	0,529	1,02	3,922
Mista 50	0,6	0,3	0,543	1,05	3,81
Mista 60	0,6	0,3	0,556	1,08	3,704
Mista 70	0,6	0,3	0,568	1,11	3,604
Mista 80	0,6	0,3	0,579	1,14	3,509
Mista 90	0,6	0,3	0,59	1,17	3,419

A Figura 3, mostra todas as geometrias de asas estudadas.

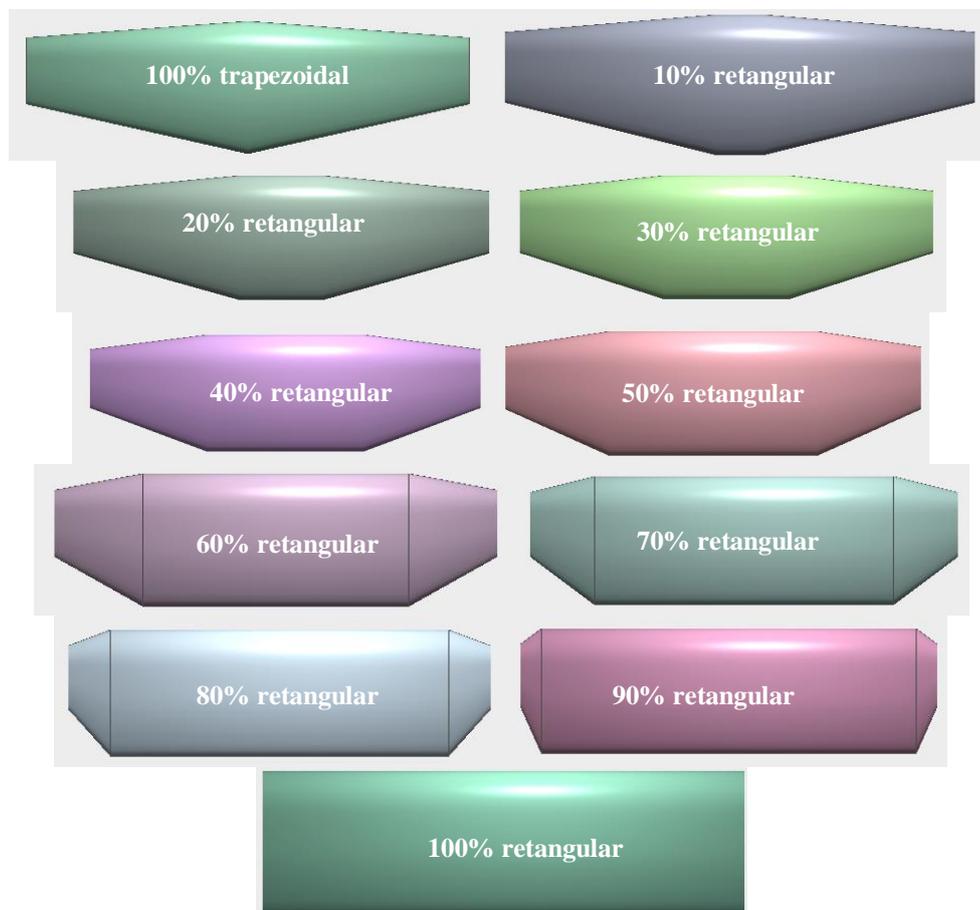


FIGURA 3. Geometria das asas modeladas no XFLR5. (Autoria própria)

2.3. Simulação CFD

Para a realização das simulações CFD das asas, foi utilizado o software ANSYS® com auxílio da ferramenta de análise *Fluent*. As asas foram feitas em um software de modelagem e exportadas no formato IGS para o ANSYS. Foi modelada apenas metade da asa, com o intuito de reduzir esforço computacional e de malha, já que a versão estudantil tem uma limitação de elementos.

No ANSYS, inicialmente foi realizado o desenho do volume de controle em torno da asa, com um tamanho de 10 vezes a meia envergadura, para que as paredes não gerem influência no escoamento da asa. O formato do volume de controle é um cilindro e uma “meia esfera”, que reduz os cantos vivos (caso fosse um formato de uma caixa).

Para a geração da malha, foi utilizado um *Body Sizing*, para que a região em torno da asa tivesse um refino de malha melhor. Além disso foi utilizado um *Edge Sizing* para realizar os contornos dos perfis da asa. Por fim, foi utilizado um *Face Sizing* para adequar a malha nas faces da asa.

A malha pode ser analisada na Figura 4.

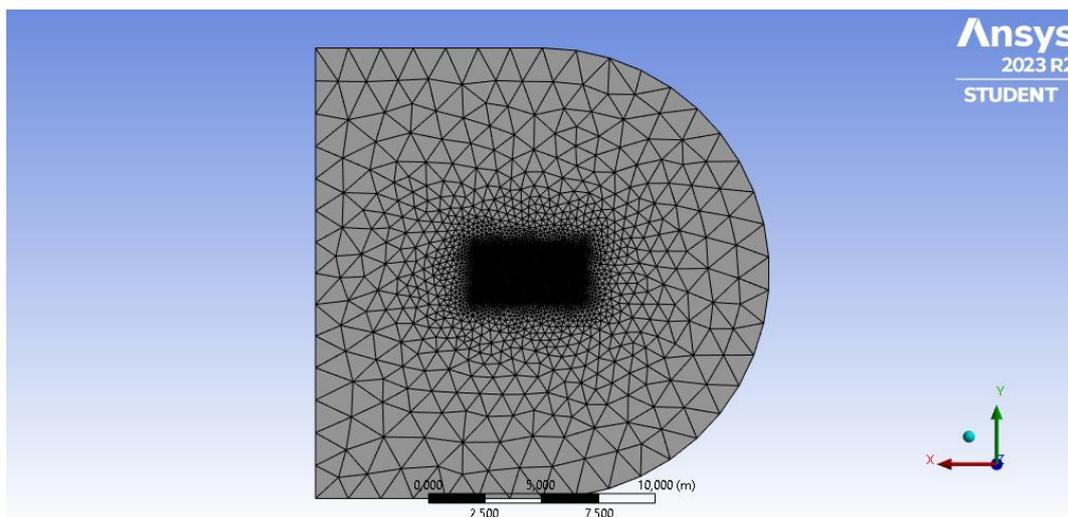


FIGURA 4. Malha utilizada na simulação. (Autoria própria)

A malha utilizada nas simulações tem em torno de 175701 nós e 1019853 elementos.

Para realizar a solução do problema, foi aplicado o modelo de turbulência K-w-SST, que prevê bem a separação da camada limite, mostrando-se o mais adequado para analisar o escoamento em asas. As simulações foram feitas levando em consideração o voo de cruzeiro (0°) e a aeronave a uma velocidade de 16 m/s. [4]

2.4. Simulação de corrida e decolagem

Para realizar a corrida da decolagem, foi empregado o método de integração numérica por trapézios, utilizando dados aerodinâmicos fornecidos. Foram feitas as seguintes considerações:

1. Rotação da aeronave em 50 m de pista, já que na competição há um obstáculo em 55 m,
2. Utilizando C_l e C_d constantes;
3. A decolagem é realizada quando a distância da aeronave com relação ao solo for de 0,75 m, estabelecendo uma faixa de segurança para o obstáculo de 0,70 m;
4. Variáveis como aceleração, velocidade e posição, foram calculadas e a análise foi feita variando a massa para três densidades (A nível do mar, São José dos Campos e para 1000 m, fator crítico).

3. RESULTADOS

Com o auxílio das simulações CFD, foi possível obter os dados de C_l e C_d de cada geometria de asa. Os dados obtidos nas simulações estão descritos na Tabela 2.

TABELA 2. Resultados das simulações CFD. (Autoria própria)

Tipo de asa	C_l	C_d	Área (m ²)	AR	e	$C_{d,i}$	$C_{d,o}$	K
Retangular	0,9070	0,0995	1,2	3,333	0,958	0,057	0,026	0,0996
Trapezoidal	0,7324	0,0684	0,9	4,444	0,919	0,052	0,024	0,0779
Mista 10	0,7341	0,0728	0,93	4,301	0,924	0,050	0,028	0,0801
Mista 20	0,7542	0,0726	0,96	4,167	0,929	0,051	0,025	0,0823
Mista 30	0,7678	0,0746	0,99	4,040	0,933	0,051	0,025	0,0844
Mista 40	0,7753	0,0773	1,02	3,922	0,937	0,050	0,026	0,0866
Mista 50	0,7918	0,0796	1,05	3,810	0,941	0,050	0,025	0,0888
Mista 60	0,8032	0,0813	1,08	3,704	0,945	0,050	0,025	0,0910
Mista 70	0,8117	0,0844	1,11	3,604	0,948	0,050	0,026	0,0931
Mista 80	0,8367	0,0870	1,14	3,509	0,952	0,051	0,025	0,0953
Mista 90	0,8564	0,0898	1,17	3,419	0,955	0,052	0,025	0,0975

Após obter esses dados, foi realizada uma simulação de corrida e decolagem, no qual foi possível estimar qual o peso vazio de cada aeronave com cada asa estipulada, qual a carga paga e qual o MTOW de cada aeronave. Os dados estão mostrados na Tabela 3.

TABELA 3. Resultados de MTOW de cada aeronave estudada. (Autoria própria)

Tipo de asa	Peso Vazio (kg)	Carga Paga (kg)	MTOW (kg)
Retangular	3,45	7,67	11,12
Trapezoidal	2,7	7,47	10,17
Mista 10	2,77	7,37	10,14
Mista 20	2,85	7,45	10,3
Mista 30	2,92	7,46	10,38
Mista 40	3,0	7,4	10,4
Mista 50	3,07	7,44	10,51
Mista 60	3,15	7,42	10,57
Mista 70	3,22	7,38	10,6
Mista 80	3,3	7,45	10,75
Mista 90	3,37	7,49	10,86

Através das simulações, foi possível analisar o escoamento do fluido e a formação de vórtices de ponta de asa, como mostra a Figura 5.

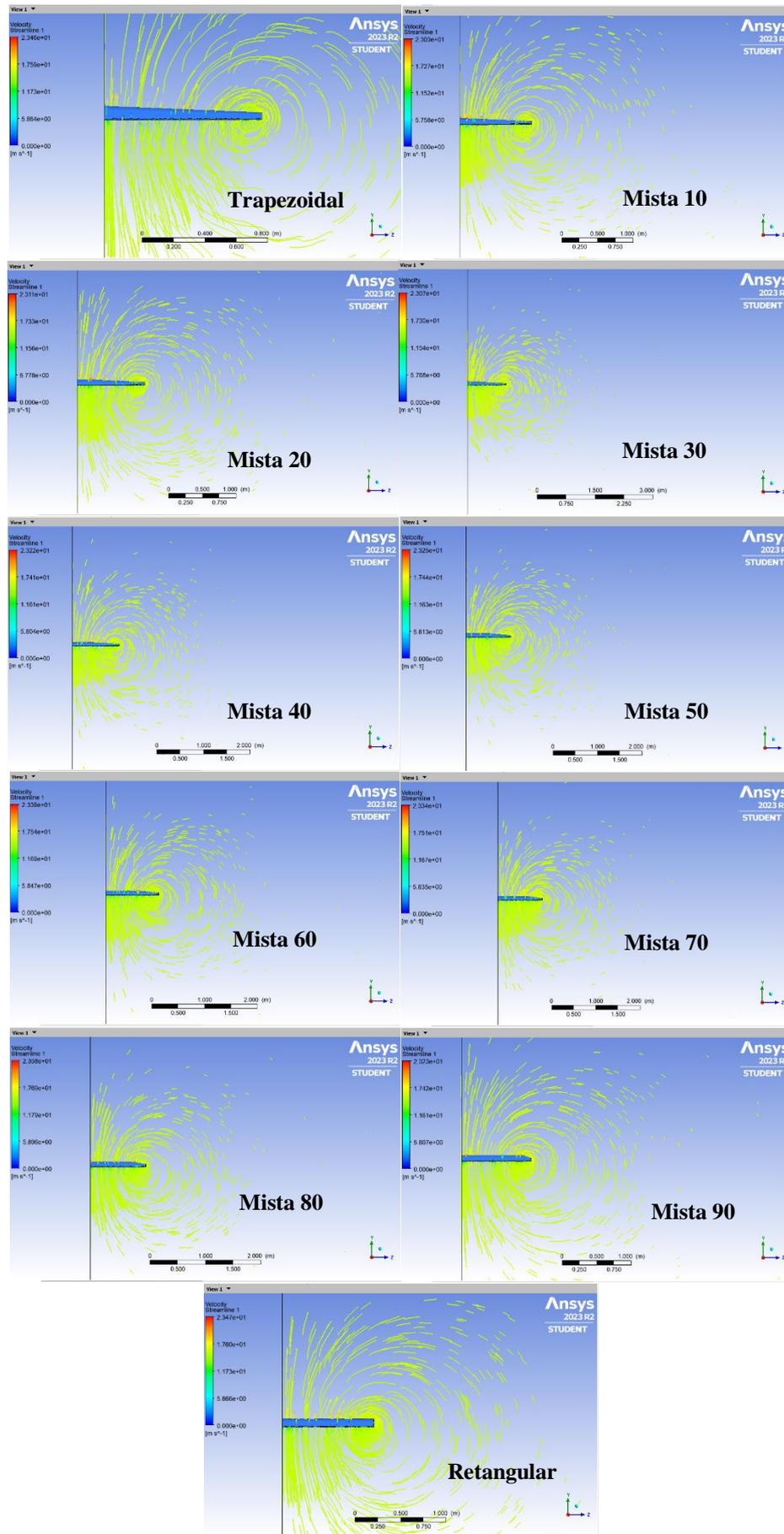


FIGURA 5. Formação dos vórtices nas pontas das asas. (Autoria própria)

Através da análise dos resultados, percebe-se que a aeronave com asa 100% retangular apresenta o maior MTOW, devido a sua maior sustentação e maior eficiência (ϵ). Devido a geometria, percebe-se que a asa trapezoidal apresenta o menor arrasto entre elas e que o arrasto vai aumentando à medida que a seção retangular vai aumentando. Devido a apresentar uma área maior, a asa com seção 100% retangular, é a que apresenta a maior sustentação e, por isso, apresenta o maior MTOW.

Além disso, foi analisada a formação dos vórtices na ponta de asa, que, na trapezoidal, é bem menor do que na asa retangular, retratando um menor arrasto na asa trapezoidal e maior na asa retangular, devido, especificamente, ao arrasto induzido, que é proporcional a sustentação.

4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados e com sua verificação, percebe-se que a aeronave com asa 100% retangular que consegue levar a maior quantidade de carga. Porém, não significa que ela é a melhor para o projeto da aeronave como um todo, pois existe outras análises que devem ser levadas em consideração, por exemplo, a asa 100% retangular consegue levar a maior quantidade de carga, mas é a que tem o maior arrasto, dificultando a manobrabilidade e estabilidade da aeronave.

Outras conclusões:

- A asa 100% retangular suporta a maior quantidade de peso;
- A asa 100% trapezoidal apresenta o menor arrasto;
- Nas asas mistas, à medida que a seção retangular aumenta, o coeficiente de sustentação e o de arrasto aumentam;
- As simulações se mostraram eficientes e coerentes com o previsto na literatura.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao PET Mecânica & Energia e a equipe PegAzuls Aerodesign pelo suporte para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] BARROS, C. P. **Introdução do Projeto de Aeronaves Leves**. Belo Horizonte: CEA. 2001.
- [2] ANDERSON, John D. **Aircraft performance and design**. McGraw-hill Companies, 1999
- [3] MIRANDA, Luiz E. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica –Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign**. 2011
- [4] KLEIN, Tânia Suaiden. **Estudo de um Novo Modelo de Turbulência**. 2007. 222 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Ciências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.