

TEORIA DE VOO: AERODINÂMICA BÁSICA

AUTOR: ALAN BRAGA

1. INTRODUÇÃO:

Por que voamos? Essa é uma pergunta que a aerodinâmica busca responder.

A aerodinâmica é o estudo do movimento relativo entre o ar e os objetos sólidos, com aplicação em diversas áreas, como a indústria automotiva, a construção civil, a energia eólica e, claro, o voo de Paramotor.

Este material apresenta os conceitos envolvidos na geração da sustentação aerodinâmica, a força que mantém as asas no ar, além dos fatores que a influenciam e que podem até levar à perda da capacidade de voo.

2. O PERFIL AERODINÂMICO

O perfil aerodinâmico de uma asa de Paramotor segue os mesmos princípios das asas de aeronaves convencionais, das hélices e das asas dos pássaros.

Seu formato possui uma curvatura característica: a parte frontal, chamada de **bordo de ataque**, é mais espessa, enquanto a parte traseira, conhecida como **bordo de fuga**, é mais afilada, permitindo um escoamento mais suave do ar e minimizando a turbulência e o arrasto.

Esse design melhora a eficiência aerodinâmica e proporciona um voo mais estável e controlável.

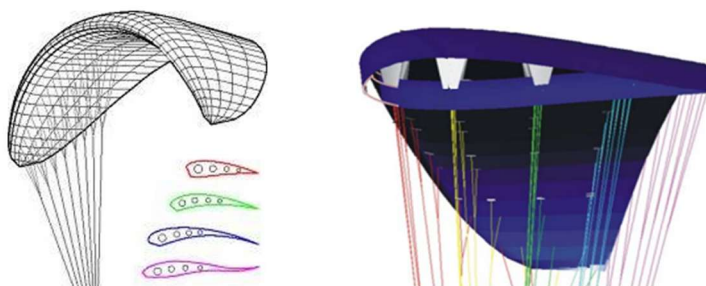


Figura 1: Perfil Aerodinâmico

3. O FLUXO DE AR

Quando o parapente voa, a asa se move pelo ar, gerando ao seu redor um fluxo chamado **vento relativo**. Ele recebe esse nome porque, para a aerodinâmica, tanto faz se a asa se desloca pelo ar ou se o ar se desloca em relação à asa: os efeitos são os mesmos.

A asa divide esse fluxo em duas partes: uma passa por baixo, e a outra, por cima. A forma como esse ar interage com a asa determina a geração de sustentação aerodinâmica.

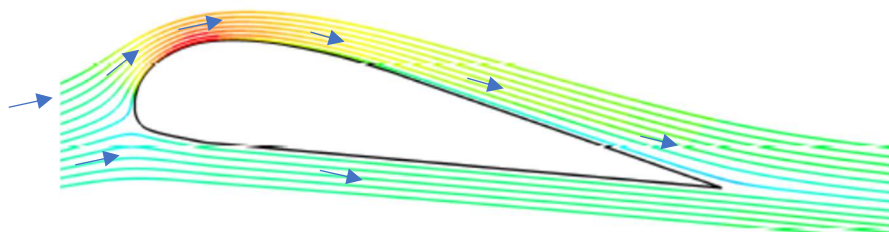


Figura 2: Fluxo de ar – vento relativo.

4. O EFEITO COANDĂ

O efeito Coandă explica a tendência dos fluidos, como o ar, de aderirem às superfícies em vez de seguirem em linha reta. Esse efeito permite que o fluxo de ar acompanhe o perfil aerodinâmico da asa, contribuindo para a geração de sustentação aerodinâmica.

Para observar esse fenômeno na prática, abra a torneira e aproxime um objeto de superfície curva, como as costas de uma colher ou uma garrafa, do filete de água. Ao encostar, você perceberá que a água se curva e acompanha a superfície do objeto.



Figura 3: Efeito Coandă.

5. FORÇAS AERODINÂMICAS

O voo de um Paramotor é influenciado por quatro forças principais:

- **Sustentação:** mantém a asa no ar.
- **Peso:** puxa a aeronave para baixo devido à gravidade.

- **Empuxo:** gera propulsão, permitindo que o Paramotor ganhe velocidade para decolar e tenha inclinação para subir ou manter o voo nivelado.
- **Arrasto:** é a força de oposição do ar ao movimento do Paramotor.



Figura 4: Forças aerodinâmicas envolvidas no voo de Paramotor.

6. EMPUXO

O empuxo gerado pelo motor altera a inclinação do Paramotor, modificando sua trajetória de voo.

Ao acelerar o motor durante o voo, a trajetória se inclina para cima, sem alteração significativa da velocidade horizontal. Quando o motor é desligado, deixa de existir o empuxo mecânico, e a asa avança em relação

ao piloto, enquanto o voo passa a ser mantido pela conversão da energia potencial gravitacional em movimento.

O ângulo de ataque sofre pouca alteração com a variação do empuxo, pois depende da relação entre a asa e a trajetória de voo, que tendem a se inclinar juntas. Assim, essa relação se mantém quase constante, embora pequenas variações possam ocorrer, especialmente durante as acelerações.

O empuxo gerado pelo motor altera a inclinação do Paramotor, modificando sua trajetória de voo.

Ao acelerar o motor durante o voo, a trajetória se inclina para cima, sem alteração significativa da velocidade horizontal.

Quando o motor é desligado, deixa de existir o empuxo mecânico, e a asa avança em relação ao piloto. Nesse caso, o avanço do voo passa a ser mantido por uma componente do peso ao longo da trajetória, com a energia necessária vindo do potencial gravitacional.

O ângulo de ataque sofre pouca alteração com a variação do empuxo, pois depende da relação entre a asa e a trajetória de voo, que tendem a se inclinar juntas. Assim, essa relação se mantém quase constante, embora pequenas variações possam ocorrer, especialmente durante as acelerações e desacelerações.

7. SUSTENTAÇÃO E PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

A sustentação pode ser compreendida por dois princípios complementares:

- **Terceira Lei de Newton:** ao passar pela asa, o ar é desviado para baixo e, como reação, a asa recebe uma força para cima.
- **Princípio de Bernoulli:** o ar escoar mais rapidamente sobre o extradorso do que sobre o intradorso, gerando uma diferença de pressão que contribui para a sustentação.

Segundo o princípio de Bernoulli, quanto maior a velocidade de escoamento de um fluido, menor tende a ser a pressão exercida por ele. Como o ar circula mais rapidamente na parte superior da asa, chamada **extradorso**, do que na parte inferior, chamada **intradorso**, forma-se uma região de menor pressão acima da asa e de maior pressão abaixo dela.

Essa diferença de pressão contribui para a sustentação: a menor pressão no extradorso favorece a elevação da asa, enquanto a maior pressão no intradorso também atua de baixo para cima.

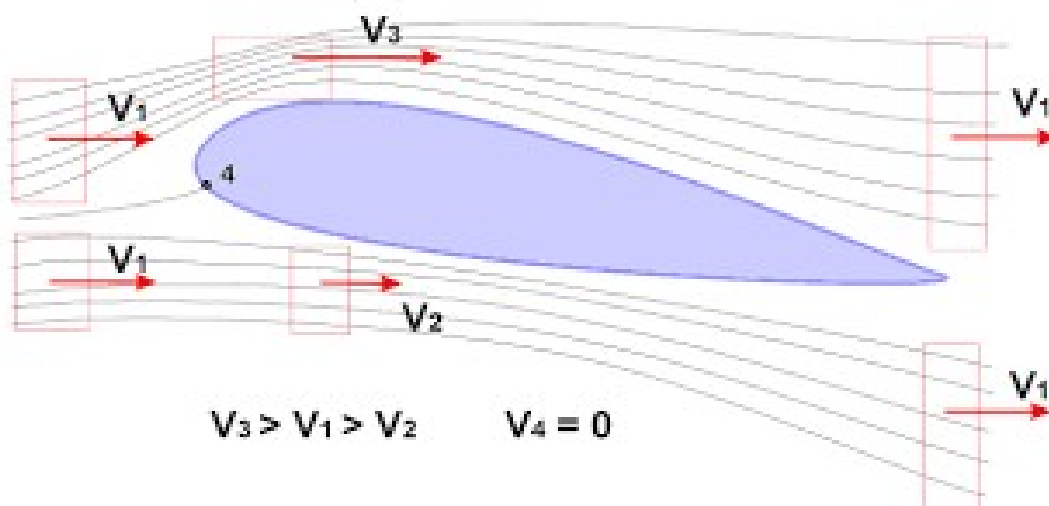


Figura 5: Velocidades do fluxo de ar passando pelo perfil aerodinâmico

Geralmente, as forças são representadas por uma única linha, que indica a **força resultante**, ou seja, a soma de todas as forças atuantes. Em um corpo rígido, essa força poderia substituir as demais sem alterar o efeito final. No entanto, na prática, a sustentação não atua em um único ponto, mas de forma distribuída ao longo da asa.

Estudos aerodinâmicos mostram que essa distribuição não é uniforme. Em uma explicação simplificada, costuma-se considerar que cerca de **1/3** da sustentação está associado ao intradorso, enquanto cerca de **2/3** está associado ao extradorso.

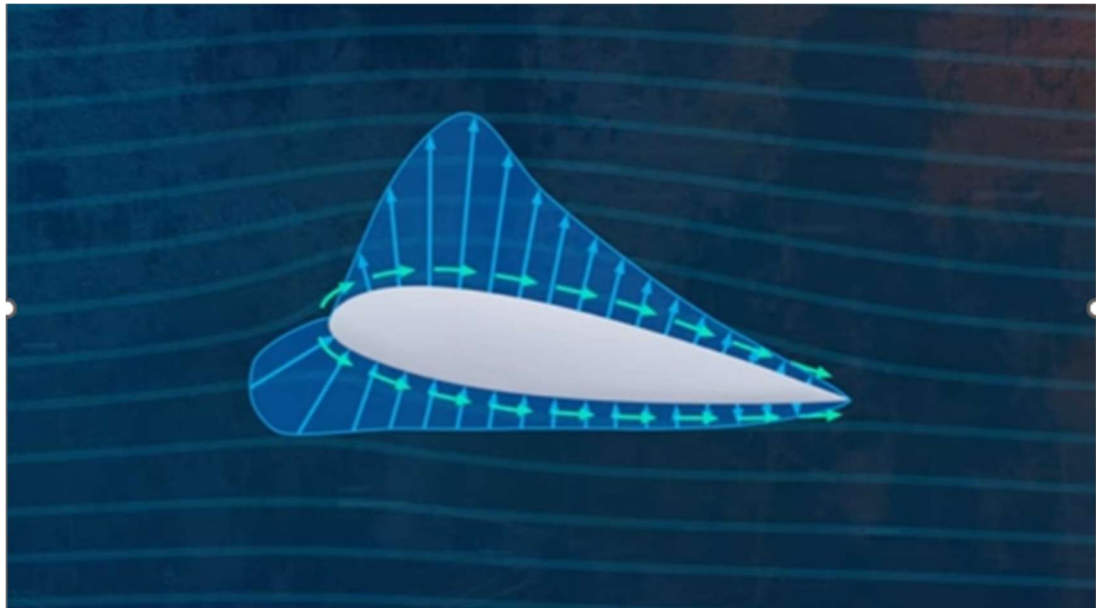


Figura 6: Distribuição da força de sustentação ao longo do perfil aerodinâmico.

8. PRINCIPAIS VARIÁVEIS DA SUSTENTAÇÃO

A equação da sustentação aerodinâmica é dada por:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L$$

Onde:

- **L** = Sustentação
- **ρ** = Densidade do ar
- **V** = Velocidade relativa do ar
- **S** = Área da asa
- **C_L** = Coeficiente de sustentação

Fatores que influenciam a sustentação:

- Velocidade: é um dos fatores mais influentes, pois está elevada ao

quadrado na equação. Assim, ao aumentar a velocidade, a sustentação cresce de forma muito expressiva.

- **Densidade do ar:** em altitudes elevadas, o ar é menos denso, reduzindo a sustentação.
- **Área da asa:** quanto maior a área, maior a capacidade de gerar sustentação.
- **Ângulo de ataque:** o aumento do ângulo de ataque eleva a sustentação até certo limite; se for excessivo, pode levar ao estol.

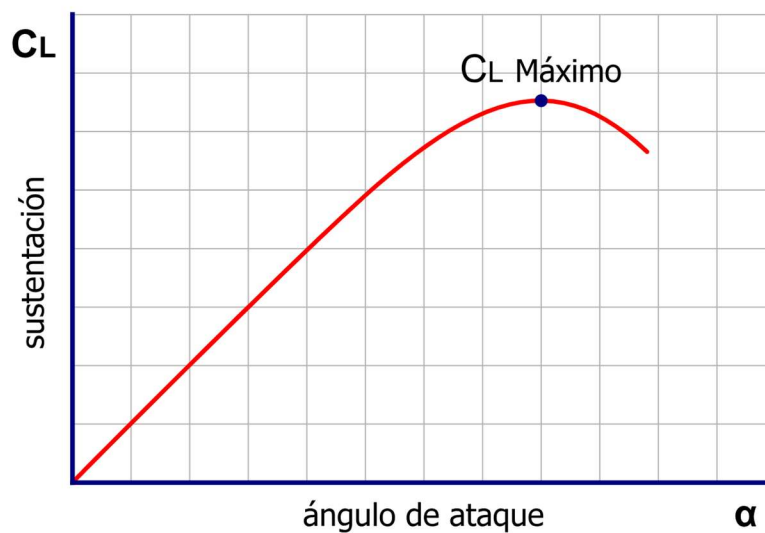


Figura 7: coeficiente de sustentação

O **ângulo de ataque** é o ângulo formado entre a trajetória de voo, representada pela direção do vento relativo, e a corda do perfil aerodinâmico, uma linha imaginária que liga o bordo de ataque ao bordo de fuga da asa.

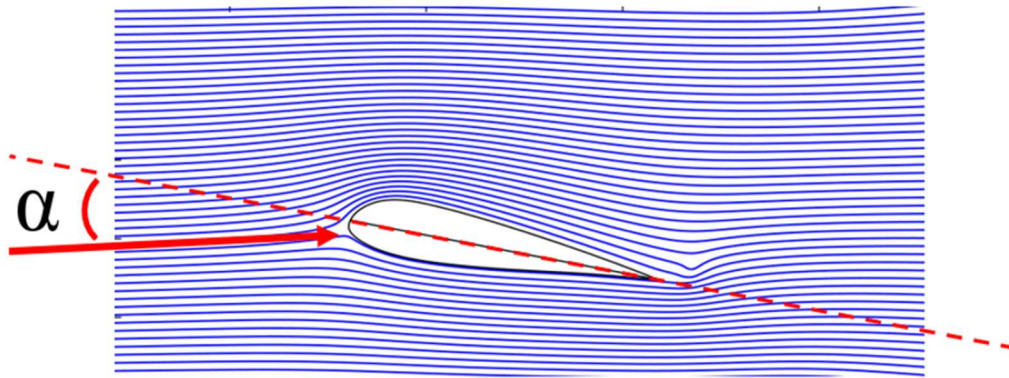


Figura 8: Ângulo de ataque

9. O ESTOL (STALL)

O estol ocorre quando o ângulo de ataque se torna excessivo, fazendo com que o fluxo de ar se **descole** do extradorso da asa. Isso reduz drasticamente a sustentação e pode levar à perda de controle.

Usar os freios com cautela, manter as revisões do parapente em dia e não abusar de condições meteorológicas adversas são medidas essenciais para evitar o estol.

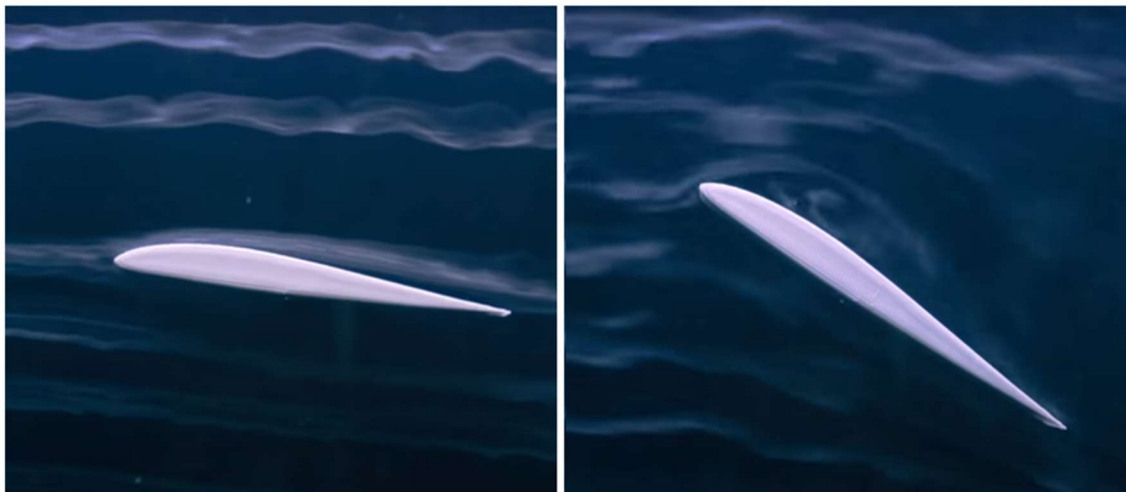


Figura 9: descolamento do fluxo de ar do extradorso

Praticamente em todos os pousos, o estol é utilizado de forma controlada. Freamos a asa progressivamente para reduzir a velocidade antes do toque no solo, aproximando-a do estol. No momento final, levamos a asa quase ao limite, aproveitando ao máximo a sustentação, e, com os pés já no chão, aplicamos totalmente os freios para provocar o estol e colocar a asa no solo, finalizando o pouso.

Durante o pouso, o estol é utilizado de maneira controlada e segura. Em voo, no entanto, o excesso de freio pode causar perda repentina de sustentação, exigindo técnica e atenção para evitar acidentes. A seguir, veja a foto de **Maurício Braga** demonstrando um estol em voo de parapente.



Figura 10: Piloto Maurício Braga efetuando um estol no parapente.

10. ARRASTO

Existem dois tipos principais de arrasto:

- **Arrasto induzido:** surge como consequência da geração de sustentação.
- **Arrasto parasita:** é causado pela resistência do ar às partes do Paramotor expostas ao fluxo de ar.

O arrasto parasita aumenta de forma muito expressiva com a velocidade, aproximadamente com o quadrado dela.

Na prática, o excesso de arrasto parasita pode comprometer a segurança e a eficiência do voo. Elementos que aumentam a resistência ao ar, como o reboque de faixas, a aplicação de adesivos no extradorso que possam se soltar e alterar o escoamento do ar, ou objetos pendurados na grade do Paramotor, prejudicam o desempenho da asa, aumentam o consumo de combustível e, em situações extremas, podem favorecer a aproximação do estol.

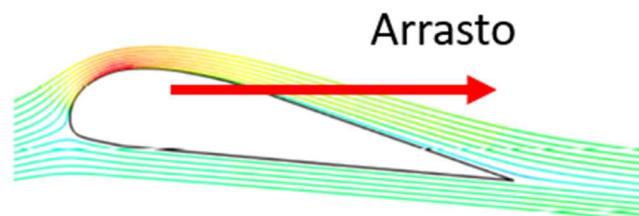


Figura 11: Arrasto

O perfil aerodinâmico foi desenvolvido para reduzir o arrasto de forma com eficiência. Por isso, com variações conforme a aplicação, ele é adotado em praticamente todas as asas.

Diferentes formas interagem de maneiras distintas com o fluxo de ar, gerando maior ou menor resistência aerodinâmica.

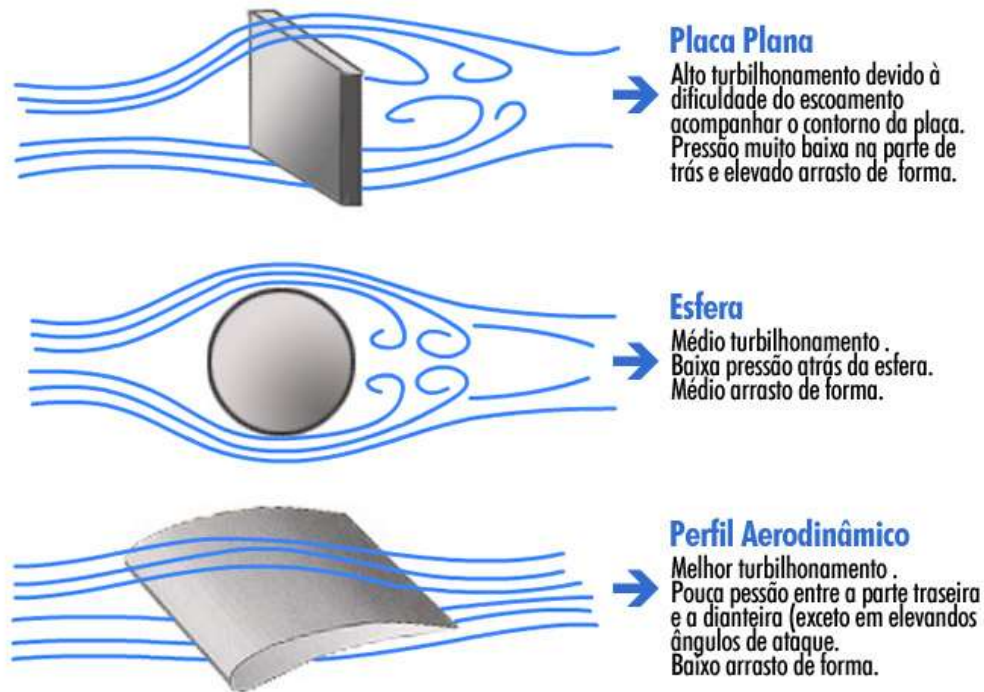


Figura 12: Arrasto de forma

11. COMO A ALTITUDE INFLUENCIA O VOO?

A densidade do ar influencia diretamente a sustentação aerodinâmica e é afetada por fatores como temperatura, umidade e, principalmente, pressão atmosférica. Ao nível do mar, onde a pressão atmosférica é maior, as decolagens exigem menos do motor e do piloto, permitindo operar em velocidades menores. Em altitudes elevadas, a menor densidade do ar reduz a sustentação, exigindo maior esforço para decolar e pousar com segurança.

12. CARGA ALAR

A carga alar é a relação entre o peso de decolagem e a área da asa. Quanto maior a carga alar, maiores tendem a ser as velocidades de voo, decolagem

e pouso, proporcionando uma pilotagem mais dinâmica, porém também mais exigente.

Por outro lado, uma carga alar menor permite decolagens e pousos mais lentos, facilitando a pilotagem, mas tornando a asa mais sensível às turbulências. Quando muito baixa, a carga alar também pode aumentar a suscetibilidade da asa a colapsos.

Por isso, é fundamental voar dentro dos limites recomendados pelo fabricante, escolhendo o tamanho de asa compatível com o seu peso.

13. PLANEIO

O planeio é a relação entre a distância percorrida horizontalmente e a perda de altitude. Por exemplo, um parapente com razão de planeio de **7:1**, sem influência do vento, do motor ou de outros fatores externos, ao partir de **1.000 metros acima do ponto de pouso**, poderá percorrer **7 km** antes de tocar o solo.

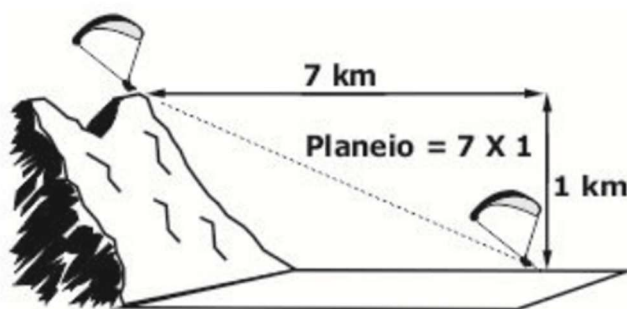


Figura 13: Representação do planeio de um parapente

Essa característica é inerente à asa e não se altera de forma significativa com a carga alar. Pilotos com pesos diferentes voando com a mesma asa terão taxas de descida distintas, fazendo com que o mais pesado pouse antes, embora ambos tendam a percorrer a mesma distância horizontal. Nesse caso, estamos considerando o planeio sem a influência do vento.

O vento, por sua vez, afeta diretamente a dinâmica do voo. Um vento de cauda reduz o ângulo de planeio em relação ao solo, aumentando a distância percorrida antes do pouso. Já um vento de frente aumenta esse ângulo, reduzindo a distância percorrida até o solo. Esse efeito é essencial para a segurança do voo e está diretamente relacionado ao cone de segurança, conceito que será explorado em outra aula.

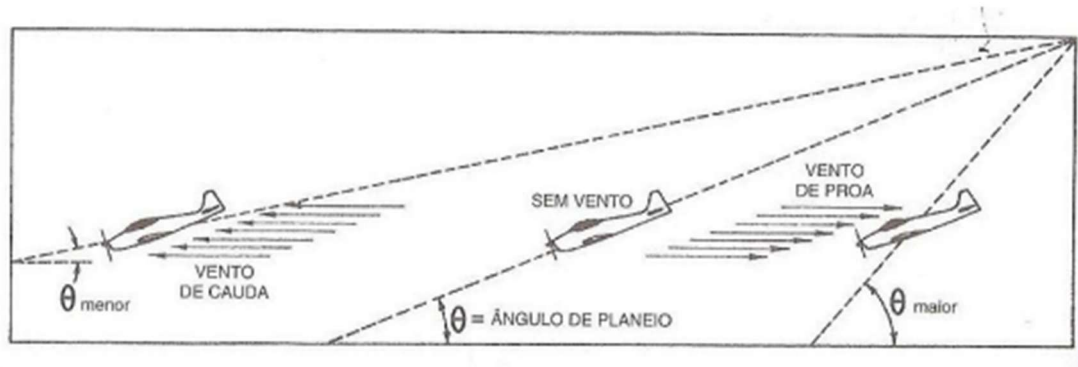


Figura 14: influência do vento no ângulo de planeio

14. EIXOS

O entendimento dos três eixos que regem os movimentos do Paramotor, é essencial para o controle e a estabilidade da asa:

- **Pitch (cabeceio):** movimento para frente e para trás em torno do eixo transversal, alterando a inclinação da asa em relação à trajetória de voo.
- **Roll (balanceio):** movimento lateral da asa em torno do eixo longitudinal, resultando em inclinações para a direita e para a esquerda.
- **Yaw (guinada):** rotação da asa em torno do eixo vertical, direcionando a aeronave para a direita ou para a esquerda.

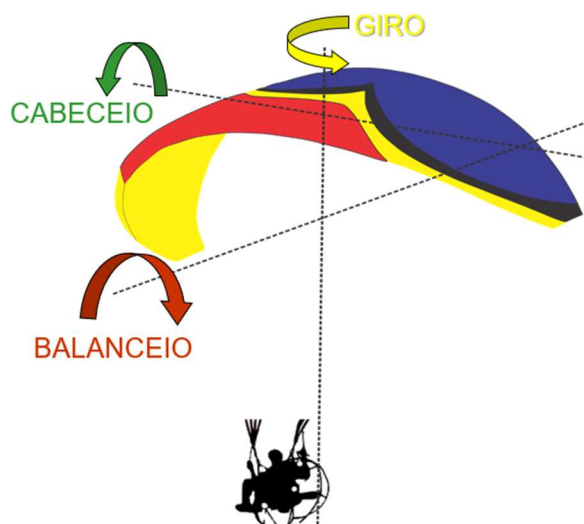


Figura 15: Eixos

Ao realizar uma curva, todos os eixos estão envolvidos, mas, em uma curva dinâmica, o **balanceio (roll)** se destaca. Já durante a inflagem, a aceleração do motor e as turbulências térmicas, o **cabeceio (pitch)** se torna mais evidente.

O controle desses movimentos ocorre por meio dos freios, de forma simétrica ou assimétrica. Embora nem sempre as variações nesses eixos alterem significativamente o fluxo de ar sobre a asa, certos movimentos podem ter grande impacto, especialmente quando não há equilíbrio da energia pendular.

Por exemplo, um avanço repentino em **pitch** pode reduzir momentaneamente o ângulo de ataque, exigindo ação nos freios para manter o controle. No entanto, avanços não são necessariamente negativos; em algumas situações, ajudam a recuperar velocidade, sendo comuns em gradientes de vento.

A compreensão desses eixos é essencial para a pilotagem ativa, permitindo maior controle da asa e um voo mais seguro e eficiente. No entanto, a pilotagem não se aprende apenas com teoria. A prática é indispensável e, quanto mais você treinar no solo, mais natural será o controle da asa em voo.

15. CONCLUSÃO

Independentemente das teorias que explicam a sustentação aerodinâmica, seja pela **Terceira Lei de Newton** ou pelo **Princípio de Bernoulli**, alguns conceitos são fundamentais para qualquer piloto:

- **Velocidade é essencial para o voo.** Se a asa não se estabiliza durante o treinamento em solo, provavelmente falta velocidade. Nesses casos, gerar empuxo correndo é necessário para corrigir isso.
- **Em voo, a velocidade da asa se ajusta automaticamente.** Fatores como ângulo de ataque, carga alar e densidade do ar influenciam essa velocidade, enquanto o acelerador do motor atua principalmente sobre o ganho de altitude.
- **Treinar no solo é indispensável.** O treinamento desenvolve a habilidade de manipular os freios corretamente, evitando comandos inadequados que possam comprometer a segurança do piloto, mesmo em condições atmosféricas tranquilas. Em situações de turbulência, o treinamento permite que o piloto atue de forma eficaz para conter instabilidades que possam reduzir o ângulo de ataque e causar colapsos.
- **O estol deve ser compreendido e respeitado.** No solo, ele é usado para pousar a asa, mas, em voo, pode representar um risco se os freios forem mal utilizados.
- **A segurança também depende da manutenção da asa.** Embora projetadas para resistir a colapsos e falhas estruturais, as asas envelhecem e saem dos padrões de fábrica, tornando-se mais suscetíveis a problemas. Revisões periódicas são fundamentais.

Conhecer os princípios aerodinâmicos da asa permite compreender melhor o equipamento e voar com mais segurança e eficiência. Mas isso, por si só, não basta. Quanto mais você treinar no solo, melhor será o seu controle da asa em voo.

Pratique, cuide do seu equipamento e voe com responsabilidade!