



1- FÍSICA E MATEMÁTICA

1- Para falar sobre teoria de voo dos aviões vamos relembrar alguns conceitos de física e matemática que serão úteis para compreender essa matéria.

2- Vamos lembrar algumas fórmulas matemáticas:

Quadrado - É a multiplicação do próprio número (o quadrado de 8 = 8×8).

Produto - É a multiplicação (o produto de 3 por 5 = 3×5).

Cubo - É a multiplicação do próprio número por 3 vezes (o cubo de 5 = $5 \times 5 \times 5$).

Razão ou Quociente - É a divisão (a razão de 9 e 3 = 9 dividido por 3).

Raiz quadrada - É o número que elevado ao quadrado, o resultado é o próprio número (a raiz quadrada de 81 é 9 porque $9 \times 9 = 81$).

Diretamente proporcional - Uma grandeza varia no mesmo sentido de outra.

Inversamente proporcional - Uma grandeza varia no sentido contrário de outra.

3- Vamos lembrar algumas noções de física:

Massa - É a quantidade de matéria contida num corpo, e ela é invariável.

Peso - É a força da gravidade sofrida pelo corpo, o peso é variável, uma pessoa pesa mais nos pólos do que no equador, assim como na lua, o peso de uma pessoa é menor.

Densidade - É a massa pelo volume que ocupa.

Velocidade - É a distância percorrida por um tempo determinado. **Velocidade Relativa** - É a velocidade de um corpo em relação a um outro corpo, a velocidade relativa é a soma da velocidade dos dois corpos.

Aceleração - É a variação da velocidade por um tempo determinado.

Força - É o que pode alterar o estado de repouso ou de movimento do corpo.

Trabalho - É a força pelo deslocamento. Para movimentar um objeto é necessário aplicar força. Quando a força é aplicada gerando um deslocamento, houve a realização do trabalho.

Torque - É tudo o que pode causar rotação,

também é chamado de momento.

Potência - É o tempo gasto para realizar um trabalho.

Lei da Inércia - A primeira Lei de Newton diz que um corpo em movimento permanecerá em movimento e um corpo em repouso permanecerá em repouso até que uma força seja aplicada sobre ele.

Ação e Reação - A terceira Lei de Newton diz que toda ação corresponde uma reação de igual intensidade e sentido contrário.

Vetor - É uma grandeza matemática que possui intensidade, direção e sentido.

Composição de Vetores - Determina a resultante de vários vetores.

Decomposição de Vetores - Determina as componentes de um vetor.

Vento Relativo - É o vento que sopra sobre um corpo em movimento, normalmente em sentido contrário.

Pressão - É a força aplicada em uma área. Ela pode ser estática (em repouso) ou dinâmica (em movimento).

Energia - É a capacidade de realizar trabalho.



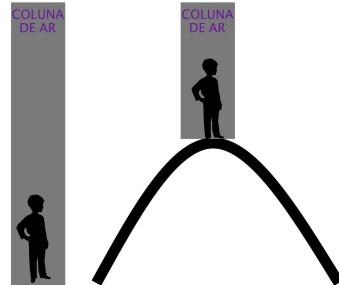
varia com a altitude, a temperatura, densidade e umidade do ar influenciam diretamente a pressão.

2- FLUIDOS E A ATMOSFERA

1- Como os aviões voam através do ar, é importante conhecer as propriedades que afetam o voo. **Fluído** é qualquer substância que não possua forma fixa, que seja capaz de fluir como os líquidos e os gases.

2- A atmosfera é composta por 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de outros gases. A **pressão atmosférica** é realmente uma pressão estática que é exercida sobre todas as coisas que estão dentro da atmosfera, e tem grande influência no voo de uma aeronave.

A pressão padrão ao nível do mar é de 29.92 polegadas de mercúrio, ou 1013,25 hPa. Quanto mais você subir na atmosfera menor será a pressão, ou seja, a pressão



3- A temperatura do ar diminui a medida que a altitude aumenta, quanto mais você subir com a aeronave, mais baixa será a temperatura. Ela é medida com termômetros que podem ser graduados em escala Celsius ou Fahrenheit. Na escala Celsius 0 °C corresponde ao ponto de congelamento da água, e 100 °C corresponde à fervura da água. Já no termômetro Fahrenheit o congelamento corresponde a 32 °F e a fervura 212 °F. A diferença de temperatura de 1 °F é o equivalente a uma diferença de temperatura de 0,556 °C.

A menor temperatura possível na natureza

é de -273 °C ou -460 °F, também conhecida como Zero Absoluto.

4- A densidade é a massa pelo volume que ocupa, o ar pode ser comprimido ou expandido, alterando a sua densidade. Quando ele é comprimido, ou seja o espaço que ele ocupa é diminuído, a sua densidade consequentemente vai aumentar. Sendo assim a densidade é diretamente proporcional a pressão, quando a pressão aumenta, a densidade também aumenta.

5- A umidade é a quantidade de vapor de água na atmosfera, essa quantidade de vapor que o ar pode absorver varia com a temperatura, quanto mais baixa a temperatura menos ele vai poder absorver.

O ar úmido é menos denso que o ar seco, sendo então a umidade inversamente proporcional a densidade.

A umidade relativa é a razão da quantidade de vapor de água presente em uma porção da atmosfera, com a quantidade máxima que ela pode suportar naquela temperatura, indicando a possibilidade de chuva, granizo ou nevoeiro.



6- A lei dos gases nos mostra o comportamento caso varie a pressão, a temperatura e a densidade dos gases. Se aumentamos a pressão do gás a temperatura e a densidade também aumentarão. Se aumentarmos a temperatura, a pressão aumentará e a densidade diminuirá.

LEI DOS GASES



+ TEMPERATURA =
+ PRESSÃO =
- DENSIDADE



+ PRESSÃO =
+ TEMPERATURA =
+ DENSIDADE

desobstruídas.

Toda pressão exercida por um gás em repouso chama-se **pressão estática**, como por exemplo a pressão que existe dentro de um botijão ou dentro de um pneu.

7- **Bernoulli** foi um matemático que descreveu o comportamento do fluido, que varia de acordo com a sua velocidade. Caso a velocidade do fluido aumente a pressão vai diminuir. O tubo de Venturi é uma aplicação dessa teoria, no estreitamento do tubo a velocidade aumenta e a pressão diminui.

9- Ao contrário da pressão estática, temos a **pressão dinâmica**, que é o resultado do movimento do corpo. Quanto mais rápido estiver o corpo, maior será a pressão dinâmica exercida sobre ele. Na aeronave a pressão dinâmica é captada pelo tubo de pitot e serve como base para alguns instrumentos.

8- Como a pressão atmosférica exerce uma pressão sobre qualquer corpo na atmosfera, é possível medir essa pressão em qualquer ponto da atmosfera. Sendo assim, existem tomadas que medem essa pressão nas aeronaves, para servir de base para os instrumentos. É importante sempre verificar se essas tomadas estão

10- Quando somamos a pressão estática mais a dinâmica temos a **pressão total**.

11- Como a aeronave se comporta de

maneira diferente com a variação da temperatura, densidade e pressão, foi necessário criar uma **atmosfera padrão** para calcular o desempenho dos aviões, comparar o desempenho com outros aviões e padronizar o critério de avaliação pelos fabricantes.

Para isso existe a ISA (ICAO Standard Atmosphere), que foi definida pela OACI (Organização da Aviação Civil Internacional), com sede em Montreal, no Canadá. A atmosfera padrão ficou sendo:

Pressão - 1013,25 hPa, ou 760 mm de mercúrio, ou 29,92 Pol Hg. **Densidade** - 1,225 kg/m³. **Temperatura** - 15 °C.

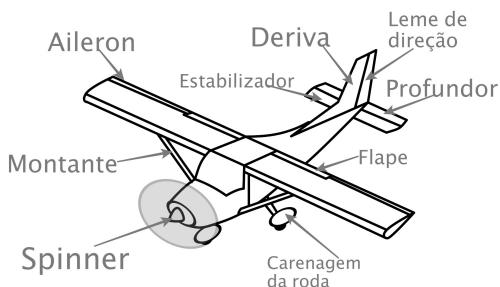
12- Já sabemos que a densidade do ar diminui com a altitude, e é com esse parâmetro que o altímetro funciona, porém a densidade varia de forma um pouco diferente do que é considerada na atmosfera padrão ISA, isso significa que a altitude indicada no altímetro terá um leve erro, recebendo o nome de **Altitude Densidade** o que não gera risco ao voo já que todas as aeronaves voando na região

estarão com o mesmo erro. Da mesma forma acontece com o altímetro, a altitude indicada pelo altímetro é a **Altitude Pressão** e a altitude real que o avião está, sem considerar esse erro se chama **Altitude Verdadeira**. Novamente, isso não apresenta nenhum erro ao voo já que todas as aeronaves do setor estão com a mesma diferença e por isso não representa risco de colisão.



3 - ESTRUTURA DO AVIÃO

1- Para falar sobre as forças aerodinâmicas, temos que conhecer a **estrutura** do avião.



As aeronaves mais pesadas que o ar recebem o nome de **aeródinos**, e as aeronaves mais leves que o ar recebem o nome de **aeróstatos**.

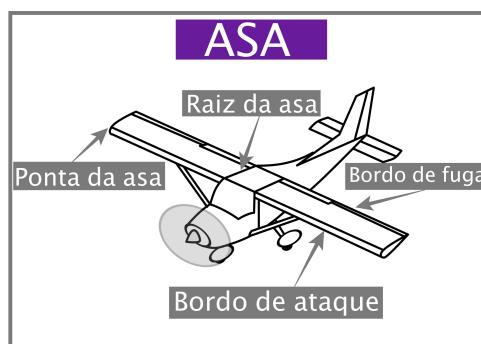
Como exemplo de aeródinos temos os aviões e os helicópteros. E como aeróstatos temos os balões e dirigíveis

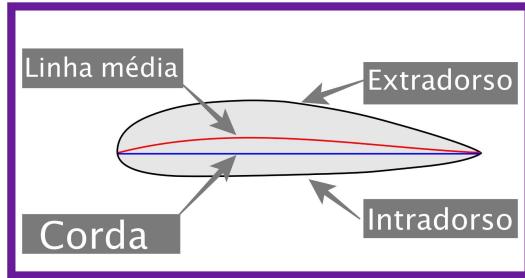
2- Quando uma superfície é projetada, um dos pontos importantes é sempre fazer que ela seja mais aerodinâmica possível, ou seja, que ela possua pouco resistência ao avanço,

que gere pouco arrasto. Para isso existem recursos como a carenagem da roda, que produz menos arrasto do que a roda em si, e o spinner.

3- Toda superfície que produz força útil ao voo é chamada de **aerofólio**. São eles: asa, empennagem e hélice.

4- A asa é responsável por produzir sustentação ao voo, o nome correto de cada parte dela é:



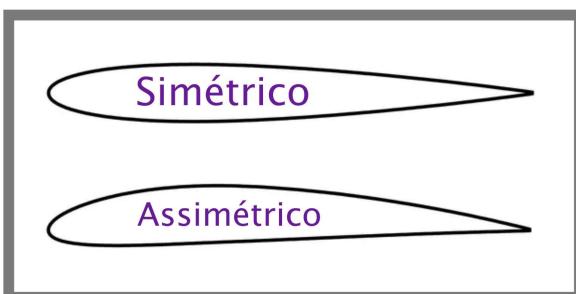


Linha média - A linha média tem a mesma distância do intradorso e do extradorso da asa. No caso de um perfil simétrico a linha média é a mesma que a corda.

Corda - A corda é a linha imaginária, reta que vai do bordo de ataque até o bordo de fuga. Ela serve para determinar a área da asa e o ângulo de ataque, que é o ângulo da corda com a direção do vento relativo.

5- O aerofólio pode ter um perfil simétrico ou assimétrico:

No perfil **simétrico** o aerofólio, se dividido no meio, tem 2 partes iguais. Ele tem uma desvantagem em relação ao perfil assimétrico, ele necessita de um ângulo de ataque maior para produzir a mesma sustentação. Mas também tem uma vantagem, produz a mesma sustentação tanto com ângulo de ataque positivo como negativo.
No perfil assimétrico, se dividido no meio, tem 2 partes diferentes





4- ESCOAMENTO

1- O **escoamento** é o movimento de um fluido que pode ser laminar ou turbilhonado.

2- O **tubo** por onde esse fluido escoa pode ser real ou imaginário.

3- A lei do escoamento, é a equação da continuidade, que diz que quanto mais estreito for o tubo de escoamento, maior será a velocidade do fluido, e vice-versa.

4- Como vimos, o ar é um fluido, e ele é essencial para as aeronaves, como por exemplo para o funcionamento de alguns instrumentos, o altímetro e o velocímetro funcionam através da pressão estática e dinâmica do ar que são captadas pelo **Sistema Pitot-Estático**.

O altímetro funciona pela tomada de ar estático, e o velocímetro funciona com a pressão estática e a dinâmica que é captada

pelo tubo de Pitot. Em algumas aeronaves o tubo de Pitot e a tomada de pressão estática podem estar incorporadas em um único conjunto.

5- Quanto ao fluxo de ar na asa, categorizamos ele em **Upwash**, que é o fluxo ascendente da camada de ar, e **Downwash** que é o fluxo descendente da camada de ar.





5 - FORÇAS AERODINÂMICAS

1- As forças aerodinâmicas são a base do estudo dessa matéria, que são as forças que atuam no avião em voo. Existem 4 forças atuantes no voo, o peso, a sustentação, a tração e o arrasto.



2- O **peso** é a força da gravidade que atua no centro de gravidade da aeronave (CG), esse peso varia conforme os passageiros, combustível, equipamentos, carga, etc. E esse peso também varia durante o voo, uma vez que o combustível vai sendo consumido, ela vai se tornando mais leve.

Para que o avião voe é necessário uma força igual ou maior que o seu peso, no sentido contrário dele.

3- A **sustentação** (L) é uma força que se opõe ao peso, é fornecida pela asa no sentido perpendicular à trajetória do voo, e depende do coeficiente de sustentação (que se torna maior quando aumentam o ângulo de ataque, a espessura e curvatura do aerofólio), da densidade do ar, da área da asa e da velocidade da aeronave.

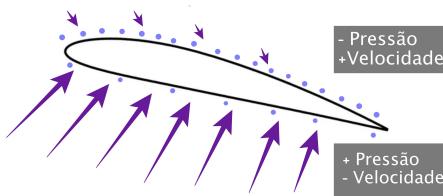
Fórmula da Sustentação

$$L = C_L \frac{\rho}{2} SV^2$$

↓ ↓ ↓
 Sustentação Densidade
 Coeficiente de do ar
 Sustentação ↑
 Área da asa Velocidade

O formato da asa é baseado na lei de Newton e no princípio de Bernoulli, como tem uma curvatura maior no extradorso, o ar passa com mais velocidade e consequentemente com menos pressão do que no intradorso, essa diferença de pressão gera a sustentação para a asa. No perfil simétrico o ângulo de ataque é aumentado para que essa mesma diferença aconteça.

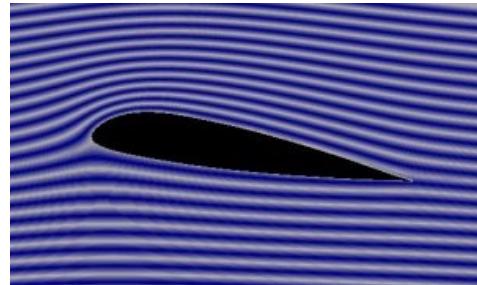
Sustentação



A sustentação varia conforme o tipo de perfil da asa e o ângulo de ataque, quando o ângulo de ataque é aumentado, a sustentação também aumenta até um valor máximo, quando se inicia um turbilhonamento no extradorso da asa, esse é o ângulo critico, ou ângulo de sustentação máxima, ou ângulo de estol. Ao ultrapassar esse ângulo os filetes de ar não conseguem mais acompanhar a curvatura do extradorso, a sustentação diminui e o arrasto aumenta.

A sustentação varia de acordo com o perfil do aerofólio, num mesmo ângulo de ataque o perfil assimétrico tem um coeficiente de sustentação maior do que o perfil simétrico. Num ângulo de ataque positivo a sustentação é positiva nos dois tipos de aerofólios. Num ângulo de ataque nulo a sustentação é positiva no assimétrico e nula no simétrica. Num ângulo de ataque inferior ao de sustentação nula a sustentação é nula nos dois aerofólios.

4- O arrasto (D) nada mais é do que a resistência ao avanço que todo objeto tem, agindo no sentido oposto ao avanço através do ar. O arrasto é indesejável ao voo e por isso deve ser reduzido ao mínimo, uma superfície aerodinâmica gera pouco arrasto, no caso do aerofólio esse arrasto vai aumentando quando aumenta o ângulo de ataque.



Fórmula Arrasto

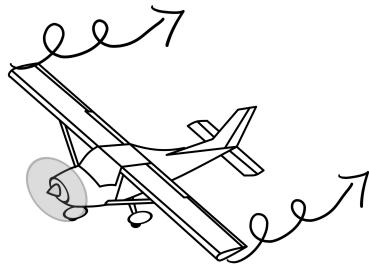
$$D = C_D \frac{P}{2} S V^2$$

Densidade
do ar
 Arrasto
 Coeficiente
de arrasto
 Área da
asa
 Velocidade

Existem alguns tipos de arrasto que atuam sobre a aeronave, vamos conhecer agora um pouco sobre eles.

Arrasto induzido - Quando o ar escapa do intradorso para o extradorso da asa pelas pontas, forma-se um turbilhonamento em espiral, ou vortex, criando um arrasto que chamamos de Arrasto Induzido. Isso ocorre porque a pressão no intradorso é menor e os

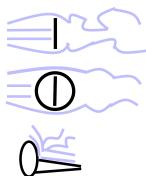
filetes de ar tem esse deslocamento a fim de igualar as pressões, gerando esse turbilhonamento que reduz a sustentação. Esse arrasto é maior em ângulo de ataque maior como pousos e decolagens.



Para diminuir o arrasto induzido, existem alguns recursos como aumentar o alongamento, que é a razão entre a envergadura e a corda média geográfica, ou ainda o uso de dispositivos nas pontas das asas como tanques e winglets.

Arrasto parasita - Toda e qualquer parte da aeronave que não produza sustentação gera um arrasto parasita. Pode ser reduzido com designs aerodinâmicos, limpeza das superfícies e rebites escareados, mas ele aumenta à medida que a velocidade aumenta. Esse arrasto é dividido em arrasto de forma, que é a diferença entre a pressão na entrada e saída do objeto, arrasto de atrito, que é o atrito do ar com a superfície, e arrasto de interferência que é o arrasto entre partes adjacentes como a interseção da asa com a fuselagem. A soma desses 3 tipos de arrasto determinam qual é o arrasto parasita da aeronave.

Arrasto Parasita

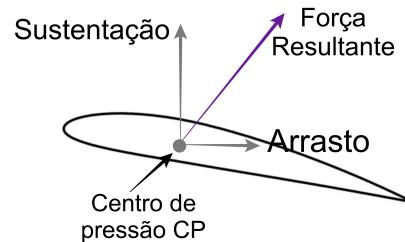


Arrasto de forma

Arrasto de atrito

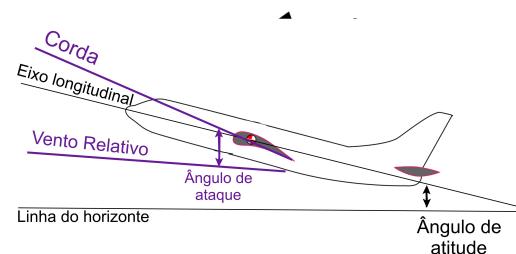
Arrasto de interferência

5- O centro de pressão (CP) é o centro de sustentação, ou seja, o ponto imaginário onde as forças aerodinâmicas atuam no aerofólio, e sempre deverá ficar atrás do CG. Esse CP pode se deslocar no perfil assimétrico, por exemplo, no perfil assimétrico o aumento do ângulo de ataque faz o CP se deslocar para frente.



6- O ângulo de ataque é formado entre a corda e o vento relativo, e possui uma ligação direta com a sustentação. Já o ângulo de atitude é formado entre a linha do horizonte e o eixo longitudinal da aeronave.

Durante a decolagem de uma aeronave com trem de pouso convencional, é necessário erguer a cauda para reduzir o ângulo de ataque e o arrasto.



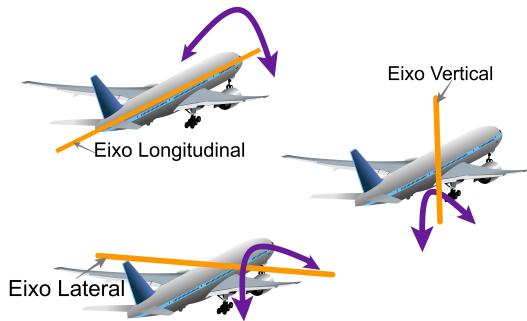
7- Quando os filetes de ar se desprendem e se tornam turbulentos, a sustentação reduz consideravelmente, isso acontece quando o ângulo de ataque é aumentado se aproximando do ângulo critico, a aeronave começa a vibrar, os comandos começam a ficar menos sensíveis e a atitude da aeronave é diferente do usual. Alguns fatores externos podem aumentar a velocidade de stall da aeronave como a formação de gelo, o aumento da altitude e o aumento do peso, que diminuem o desempenho da aeronave.

O piloto deve monitorar constantemente a velocidade da aeronave, é através dela que o piloto monitora a proximidade do stall que é determinada pelo fabricante da aeronave. Um erro muito comum dos pilotos que passam por uma emergência com problemas no motor é descuidar da velocidade, fazendo com que o avião caia por falta de velocidade.



6 - CONTROLES DE VOO

1- Para comandar o avião o piloto conta com o sistema de controle que atua sobre 3 **eixos** na aeronave. O eixo longitudinal, lateral e vertical.



2- Esses eixos atuam através dos controles, que são divididos em primário (leme, profundor e aileron), e secundário (compensadores). Os controles primários são aerofólios móveis que movimentam a aeronave sobre um desses eixos através do manche e pedais. E os secundários ajudam o piloto a aplicar menos força nos comandos da aeronave.

Comando	Eixo	Movimento
Aileron	> Longitudinal	> Rolagem
Profundor	> Lateral	> Arfagem
Leme	> Vertical	> Guinada

3- Os **ailerons** ficam no bordo de fuga, perto da ponta da asa. Os 2 ailerons trabalham em sincronia, quando um sobe o outro desce, e isso faz o avião rolar porque o aileron que sobe faz essa asa perder sustentação, e consequentemente essa asa vai descer, e o outro aileron que desce aumenta a sustentação fazendo aquela asa subir. O piloto sempre gira o manche para o lado que deseja fazer a curva.

4- O profundor fica no estabilizador horizontal, e também é comandado pelo manche com movimentos pra frente e pra trás. Quando o piloto puxa o manche o profundor sobe, fazendo com que aquele aerofólio perca sustentação, fazendo com que a cauda desça, e quando o piloto empurra o manche o profundor desce, aumentando a sustentação e fazendo a cauda subir e o nariz descer.

5- O leme fica no estabilizador vertical e é acionado pelos pedais. Ao aplicar o pedal esquerdo, o leme deflete para a esquerda, fazendo a aeronave guinar pela ação do aerofólio.



7 - DISPOSITIVOS HIPERSUSTENTADORES

1- Os **dispositivos hipersustentadores** aumentam o coeficiente de sustentação do perfil, como todo perfil tem um coeficiente máximo de sustentação, e que se ultrapassado passa a aparecer o turbilhonamento, emprega-se o uso desses dispositivos para aumentar essa capacidade de sustentação, os mais usados são os flaps, slats e slots.

2- O **flape** aumenta a curvatura do perfil, proporcionando entre outras coisas um maior ângulo de descida durante o pouso, e uma diminuição da velocidade de stall, os tipos mais comuns são o comum, o com fenda, o ventral e o fowler, uma consequência do flape é aumentar também o arrasto. O tipo Fowler é o que proporciona o maior aumento no coeficiente de sustentação.

3- O **slot**, também conhecido como fenda, fica no bordo de ataque da asa, aumenta o ângulo de ataque crítico do aerofólio, energizando o escoamento no extradorso evitando o turbilhonamento, ajudando a asa a atingir ângulos de ataque maiores.

4- O **slat** é um tipo de slot, mas ele fica recolhido durante o voo, entrando em funcionamento apenas quando o ângulo de ataque aumenta.

5- Os **Spoilers** tem a função de aumentar o arrasto, ele trabalha contrariamente aos dispositivos hipersustentadores, ao ser aberto ele reduz a sustentação e aumenta o arrasto. São placas que levantam no extradorso da asa auxiliando a aeronave a reduzir a velocidade.



8- GRUPO MOTO-PROPULSOR

1- A tração de uma aeronave é fornecida pelo grupo motopropulsor, que produz a força no sentido oposto ao arrasto. Para se manter um voo reto e nivelado, a tração deve ser igual ao arrasto, e para que a aeronave acelere a tração deve ser maior que o arrasto. Os tipos mais usados de grupos motopropulsores são turbofan, turbohélice e o motor a pistão. Como esse curso é voltado para aeronaves de pequeno porte, vamos estudar o desempenho dos motores a pistão, que são os motores usados nesse tipo de aeronave.

2- Um **motor a pistão** pode gerar diversos tipos de potência:

Potência indicada - A bruta produzida pelo motor

Potência efetiva - Medida no eixo da hélice

Potência nominal - A efetiva máxima que o motor pode fornecer

Potência útil - A que o motor disponibiliza para a aeronave

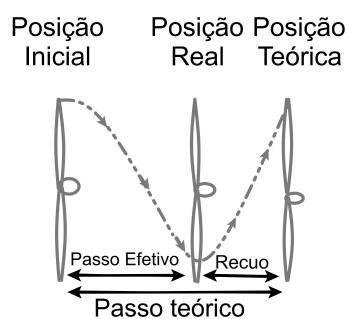
Potência necessária - A que a aeronave necessita para manter o voo reto e nivelado

3- A **hélice** é um aerofólio que converte a força do motor em tração, da mesma forma que as asas geram sustentação, a hélice durante a sua rotação faz com que o fluxo de ar no extradorso tenha uma pressão menor do que no intradorso, resultando parte da tração produzida.

4- A **torção** da hélice não é a mesma em toda a sua extensão, cada seção da hélice tem uma torção, próximo ao cubo tem mais torção do que próximo das pontas, portanto próximo ao cubo é onde temos uma maior tração. Essa torção gera um ângulo em relação ao vento relativo, chamado de ângulo de ataque.



5- A cada rotação da hélice ela avança uma determinada distância, que é conhecida como **passo teórico**. Podemos comparar com o parafuso, que a cada torção aplicada nele, ele avança um pouco. Na realidade ela acaba avançando menos do que o previsto, porque ela se desloca pelo ar, que é um fluido, esse passo então é o **passo efetivo**. A diferença do passo teórico para o efetivo é o **recuo**.



6- O ângulo de torção ideal da hélice vai depender da velocidade do avião, se a velocidade aumentar o vento relativo que atinge a hélice ficará mais inclinado, não existe um único passo que seja ótimo para todas as etapas do voo. Para isso existem

alguns tipos de ajustes nas hélices, temos a de passo fixo, ajustável e variável.

7- A hélice de **passo fixo** não pode ter o seu ângulo ajustado, ela funciona bem apenas para uma determinada velocidade, para a qual foi construída.

8- A hélice de **passo ajustável** pode ter seu ângulo modificado no solo, com ferramentas apropriadas, ela funciona bem apenas para a velocidade que foi ajustada.

9- A hélice de **passo variável** é o tipo ideal, pois pode ter seu ângulo alterado durante o voo, permitindo com que ela funcione bem em todas as velocidades porque ela mantém o ângulo de ataque ideal.

10- Durante a decolagem, subida inicial e aproximação final, o ideal é a hélice desenvolver a máxima RPM para que a potência máxima do motor possa ser utilizada, deve então selecionar o passo mínimo. Durante o voo de cruzeiro, descida e subida após a decolagem a RPM será reduzida e o passo aumentado, fazendo com

que o motor consuma menos combustível.

11- Os monomotores tem uma tendência de rolagem para a esquerda, essa tendência fica mais evidente nas decolagens, existem algumas correções possíveis como deslocar o estabilizador vertical levemente para a esquerda ou o uso de trim tab. Para corrigir essa tendência em voo basta aplicar levemente o pedal direito. Existem 4 fatores que geram essa tendência de rotação:

Torque - A hélice gira no sentido horário e a reação é o avião girar no sentido anti-horário

Esteira - Durante a rotação da hélice o ar jogado para trás atinge o leme de direção pelo lado esquerdo, fazendo com que o nariz da aeronave vire para a esquerda.

Efeito giroscópico - Como a rotação da hélice tem as características de um giroscópio (rigidez e precessão), toda vez que uma força é aplicada fora do seu plano de rotação, gera uma força a 90 graus.

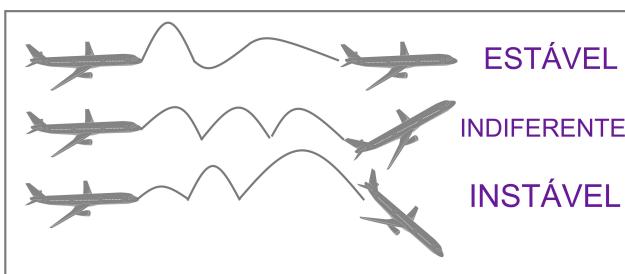
Carga assimétrica - Quando a aeronave está com o ângulo de ataque elevado, o eixo da hélice também fica elevado, essa inclinação faz com que a pá que desce tenha um ângulo de ataque maior do que a que sobe, resultando em uma guinada para a esquerda.



9 - ESTABILIDADE

1- Cada aeronave reage de uma forma diferente na sua estabilidade, cada uma tem sua maneira para voltar para a sua posição de equilíbrio. Uma aeronave muito estável tende a reagir mais lentamente aos comandos do piloto. A estabilidade tem relação com os 3 eixos da aeronave, lateral, longitudinal e vertical. Vamos aprender agora um pouco mais sobre cada uma delas.

2- O **equilíbrio** trata da tendência que a aeronave tem após a condição de equilíbrio dela ter sido alterada. Existem 3 tipos de equilíbrio, estável, instável e indiferente.



Estável - O avião tende a voltar ao equilíbrio.

Instável - O avião tende a se afastar ainda

mais do seu equilíbrio.

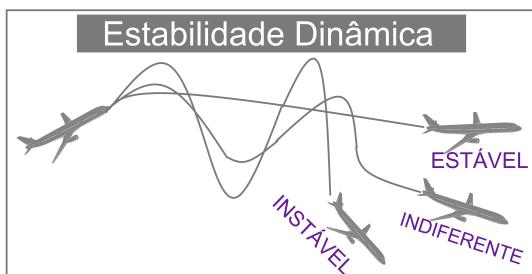
Indiferente - O avião continua fora do equilíbrio.

3- A asa assimétrica é **estaticamente instável** porque quando aumenta o ângulo de ataque o centro de pressão (CP) se move pra frente, fazendo com que o ângulo de ataque aumente ainda mais. Para que o avião seja estaticamente estável é preciso um nariz pesado, fazendo com que o centro de gravidade fique na frente do centro de pressão. Isso significa que se o avião receber uma rajada, por exemplo, sua cauda sobe mais rapidamente que o nariz, fazendo o ângulo de ataque diminuir, neutralizando o efeito dessa rajada.

4- Para descobrir se o avião é estaticamente estável, você pode reduzir a potência do motor, se ele abaixar o nariz e iniciar uma descida, ele é estaticamente estável, ou ainda se você forçar o manche para frente e ao

largar ele volta para a posição inicial, erguendo o nariz e voltando ao voo nivelado.

5- Ao tentar voltar para esse equilíbrio o avião pode apresentar 3 tipos de comportamento:



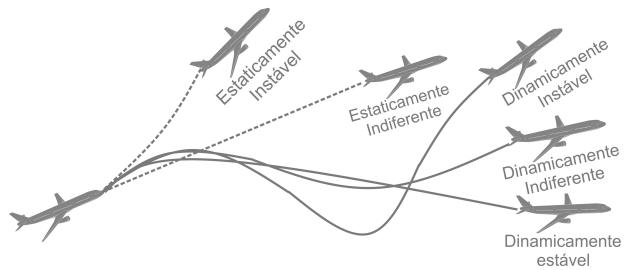
Estável - O avião volta ao equilíbrio.

Indiferente - Tenta voltar mas não consegue achar o equilíbrio.

Instável - Tenta voltar mas aumenta ainda mais a oscilação.

A diferença entre a estabilidade estática e a dinâmica é que a estática é a tendência inicial que a aeronave tem ao ter seu equilíbrio alterado, e a dinâmica é como essa alteração de estabilidade vai refletir na aeronave com o tempo.

6- Então podemos concluir que o avião pode ser estaticamente estável porém dinamicamente instável, podemos conferir a diferença entre eles no quadro abaixo.





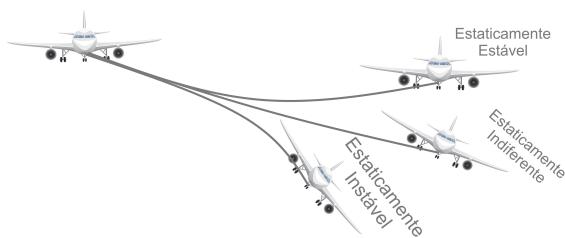
10 - ESTABILIDADE LATERAL

1- As asas são as principais responsáveis pela estabilidade lateral do avião. Quando ele sofre um desequilíbrio lateral, que pode ser por uma rajada assimétrica, isso acontece em torno do eixo longitudinal e a aeronave pode se comportar de 3 formas:

Estaticamente estável - Tende a retornar ao equilíbrio inicial

Estaticamente instável - Tende a se desequilibrar ainda mais

Estaticamente indiferente - Tende a continuar fora do equilíbrio

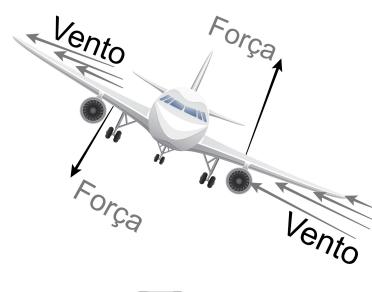


2- Basicamente, são 5 fatores que influenciam na estabilidade lateral do avião, o diedro, enflechamento, distribuição de

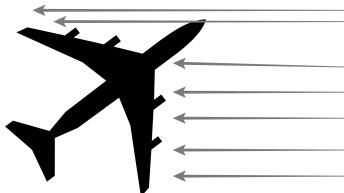
peso, efeito de fuselagem e efeito de quilha.

3- O **diedro** influencia na estabilidade lateral pois a aeronave tende a glissar na direção da asa mais baixa, o resultado disso é um vento lateral sobre a asa. O diedro positivo aumenta a estabilidade lateral porque a asa mais baixa tem um ângulo de ataque maior, portanto mais sustentação que a asa elevada, essa diferença de sustentação faz com que a asa mais baixa se levante e retorne a posição inicial, portanto ela propicia mais estabilidade lateral.

Diedro Positivo



4- A asa enflechada tem mais estabilidade lateral, o **enflechamento** faz com que uma das asas seja atingida mais diretamente pelo vento lateral, produzindo mais sustentação do que a outra e fazendo com que a asa suba, retornando a posição inicial.



5- As aeronaves de asa alta tem uma estabilidade lateral maior, como a asa fica acima do centro de gravidade (CG), o efeito quilha aumenta, aumentando a estabilidade lateral, a estabilidade lateral não deve ser exagerada para não neutralizar os comandos do aileron, por isso algumas aeronaves de asa alta tem o diedro negativo.

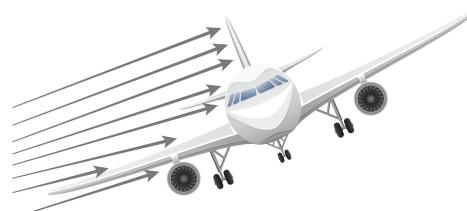
As aeronaves de asa baixa tem o CG localizado acima das asas fazendo com que a estabilidade lateral seja menor. Nessas aeronaves o **peso** da fuselagem aumenta o desequilíbrio lateral, reduzindo a estabilidade.

6- O **efeito de fuselagem** diminui a estabilidade lateral porque prejudica o efeito de diedro. A fuselagem impede que o vento

lateral alcance o extradorso da asa que está levantada.



7- A área lateral da aeronave, fuselagem e estabilizador vertical tem uma influência direta na estabilidade lateral da aeronave, o ideal é que se tenha mais área lateral acima do CG, para quando a aeronave fizer uma rolagem o fluxo de ar sobre essa área faça ela retornar a posição de equilíbrio inicial, esse é o **efeito de quilha**.



8- Mesmo um avião sendo estaticamente estável, ou seja, que tente voltar ao equilíbrio, ele nem sempre conseguirá, então podemos categorizar os estaticamente estáveis em:

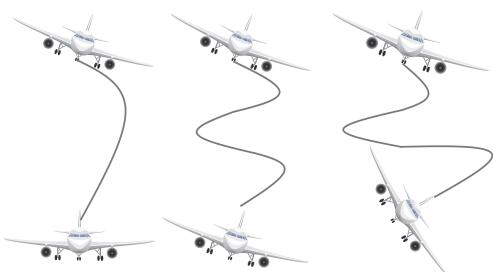
Dinamicamente estável - Amortece as oscilações e volta ao equilíbrio

Dinamicamente indiferente - Tenta voltar

mas não consegue amortecer as oscilações

Dinamicamente instável - Tenta voltar ao equilíbrio mas se desvia cada vez mais

Estável Indiferente Instável





11 - ESTABILIDADE DIRECIONAL

1- A estabilidade direcional acontece em torno do eixo vertical do avião, ou seja, é a capacidade de estabilidade na guinada, quando se aplica o pedal. O avião pode ser:

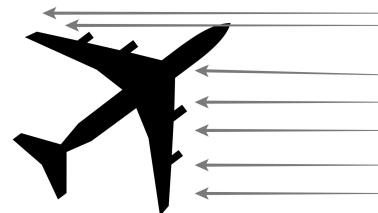
Estaticamente estável - Tende a voltar para o equilíbrio

Estaticamente indiferente - Continua fora do equilíbrio

Estaticamente instável - Se afasta ainda mais do equilíbrio

2- Existem 2 fatores que influenciam nessa estabilidade, o enflechamento e o efeito de quilha.

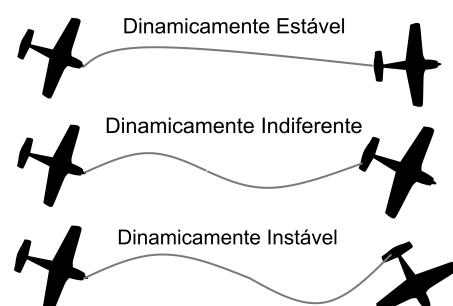
3- O **enflechamento** tem a ver com a área que fica em contato com o vento relativo no caso de uma guinada, da mesma forma que na estabilidade lateral.



4- O **efeito quilha** é a ação do vento relativo na lateral do avião, quanto maior essa área atrás do CG, maior será a estabilidade direcional.



5- Como vimos, a aeronave pode ser estaticamente estável, mas pode ter 3 tipos de estabilidade dinâmica:





12- SUBIDA

1- Vamos falar agora sobre algumas etapas do voo e o que influencia cada uma delas afetando a performance. Começaremos falando sobre a etapa de subida, o voo ascendente. As forças aerodinâmicas que atuam no avião ficam em equilíbrio, mas durante a subida a trajetória do voo é inclinada, ou seja, a relação das forças aerodinâmicas ficam alteradas porque o peso passa a agir em direção a parte de trás da aeronave. A fase inicial da subida é uma das mais críticas porque a aeronave ainda está muito perto do solo, com obstáculos próximos, tanque cheio de combustível e com o peso agindo em direção a parte de trás da aeronave, aumentando o arrasto.

2- Para que o avião suba, a tração desenvolvida deve ser capaz de suportar o peso do avião mais o arrasto produzido por ele, como um carro subindo uma ladeira, que deve ter um motor capaz de impulsionar o peso dele mais o arrasto produzido, fazendo

com que ele suba a ladeira.

3- As duas componentes de **velocidade** de um voo ascendente são:

Razão de subida - Também conhecida como velocidade vertical. O quanto a aeronave se desloca na vertical, geralmente medida em pés por minuto no climb.

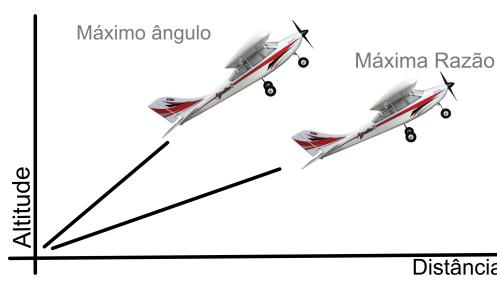
Velocidade horizontal - O quanto ele se desloca na horizontal, em relação ao solo.

4- O **ângulo de subida** é formado entre a linha do horizonte e a trajetória do voo ascendente.



5- O gradiente máximo de subida, é o ângulo de subida que o piloto usa para se livrar dos obstáculos, pois permite um ganho de altitude mais rapidamente. Também é conhecido como máximo ângulo de subida. O piloto usa esse gradiente mantendo uma velocidade determinada.

6- A máxima razão de subida permite um ganho de altitude no menor tempo possível, o piloto usa essa velocidade para atingir o nível de cruzeiro. Você consegue perceber a diferença entre a máxima razão e gradiente máximo na figura abaixo:



A máxima razão de subida e o gradiente máximo de subida dependem do peso, da altitude e da potência disponível.

7- O aumento de peso aumenta também o arrasto, isso significa que será necessário mais **potência**, ou seja, com o aumento do peso, a velocidade de máxima razão e de

gradiente máximo aumenta.

8- A altitude influencia diretamente nessa velocidade porque a densidade do ar diminui com o aumento da altitude, isso afeta a potência do motor e a performance da aeronave, fazendo com que esse gradiente de subida e a razão máxima seja diminuído.

9- Quando a altitude aumenta, a potência disponível diminui e a necessária aumenta. Se a potência disponível diminui significa que a razão de subida e o gradiente também diminuem.

10- Para a decolagem sempre escolhemos a cabeceira que deixe o vento de proa, porque isso ajuda a aeronave a decolar em uma menor distância e com maior ângulo.

As aeronaves convencionais erguem a cauda durante a decolagem para diminuir o ângulo de ataque e o arrasto.

O pouso que o piloto faz sem deixar a aeronave entrar em stol é o pouso de pista, e o pouso que consiste em tocar o trem principal e a bequilha ao mesmo tempo é o pouso de 3 pontos



13 - CRUZEIRO

1- Essa é normalmente a fase mais longa do voo, o voo de cruzeiro é o voo reto, nivelado, e sofre influência pela altitude, pela velocidade, pelo peso, pela temperatura, etc.

No voo de cruzeiro a sustentação é igual ao peso, e a tração é igual ao arrasto, todas as 4 forças estão em equilíbrio.

2- A **velocidade** e o **ângulo de ataque** tem uma conexão direta, um influencia o outro, por exemplo se diminuirmos a velocidade, para manter a mesma altitude, vai ser necessário aumentar o ângulo de ataque, porque a tendência da aeronave quando diminui a velocidade é iniciar uma descida, porque a sustentação diminui. Obviamente isso tem um limite, existe um ângulo máximo que você vai conseguir manter em cada velocidade sem entrar em stall, a menor velocidade em voo horizontal é voando no ângulo de ataque crítico.

3- Caso a aeronave ultrapasse esse **ângulo crítico**, somente será possível manter esse voo nivelado caso a velocidade seja aumentada.

4- A escolha da altitude correta para o voo de cruzeiro é muito importante. Como a densidade diminui com a altitude, isso afeta a sustentação, porém o arrasto continua igual, o arrasto não é alterado pela altitude. Para compensar esse ar rarefeito, é necessário que o piloto aumente a potência, isso faz com que o avião voe mais rápido em altitudes maiores.

5- Vamos ver agora alguns tipos de velocidades:

Velocidade máxima - A maior possível em um voo de cruzeiro

Velocidade de máximo alcance - A que permite voar uma maior distância

Velocidade de máxima autonomia - A que permite voar por mais tempo possível, usada para espera sobre o aeroporto

Velocidade minima - A menor velocidade para uso constante

Velocidade de estol - Menor velocidade em voo horizontal, voa no ângulo de ataque crítico.

7- Ao contrario da decolagem, que o **vento** ideal é o de proa, durante o voo de cruzeiro o vento ideal é o de cauda, fazendo com que o avião tenha uma velocidade em relação ao solo muito maior, o vento vira seu aliado.

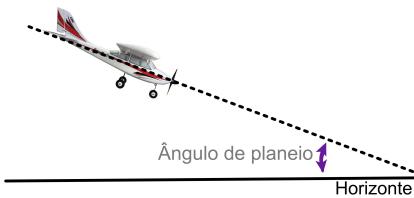
6- A velocidade de **estol** aumenta com o peso, quanto maior for o peso da aeronave, mais fácil ela vai entrar em estol. A **potência** necessária para manter um voo horizontal aumenta com a altitude, é desejável voar em altas altitudes, mas você deve ter potência pra isso, podemos concluir então que se a **densidade** diminuir a potência necessária aumentará.



14 - DESCIDA E VOO PLANADO

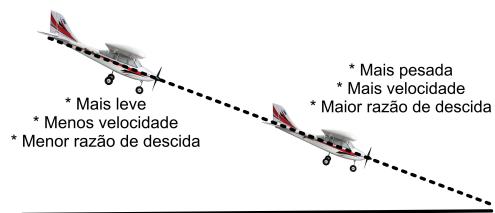
1- Quando tiramos a tração do motor a aeronave inicia uma descida, esse é o **voo planado**, nesse voo a tração não tem mais influência, a aeronave tem apenas 3 forças atuando, o peso, o arrasto e a sustentação.

2- O **ângulo de planeio** é o ângulo formado entre a trajetória do voo e a linha do horizonte.



3- A **razão de descida** é o quanto a aeronave está descendo em um tempo determinado. Normalmente instrumento é mostrado em pés por minuto, o piloto visualiza isso no **climb**, também conhecido como vertical speed.

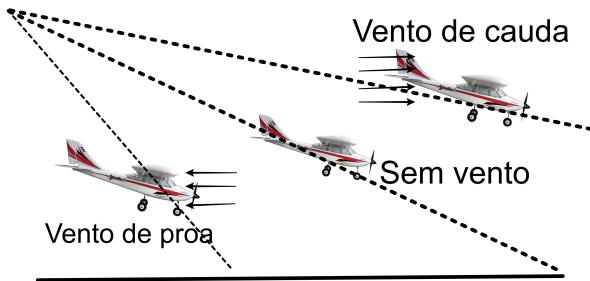
4- O **peso** da aeronave não influencia no ângulo de planeio e na distância percorrida, mas afeta a velocidade e a razão de descida.



5- A **velocidade de melhor planeio** é a que permite o avião planar a maior distância possível, essa é a velocidade que o piloto deve usar em caso de falha do motor. O piloto não deve tentar voar abaixo nem acima dessa velocidade na intenção de voar uma distância maior, na verdade o que aconteceria é voar uma distância ainda menor.

6- O **vento** influencia diretamente no ângulo de planeio e na distância do voo planado, mas não influencia na velocidade e nem na razão de descida. Ou seja, o piloto busca a

velocidade ideal, o ângulo varia conforme o vento para poder voar na velocidade buscada. A velocidade de melhor planeio é referente a velocidade indicada (VI), que é lida no velocímetro.



7- A velocidade máxima que um avião pode atingir num mergulho a 90 graus é a **velocidade final**, o avião não acelera mais depois dela, nesse caso a sustentação é nula e o arrasto é igual ao peso.

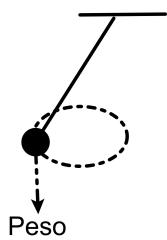
A **velocidade limite** é a velocidade que não pode ser ultrapassada pois a aeronave sofreria danos estruturais, essa velocidade é especificada pelo fabricante do avião.

8- Durante o **pouso** o vento ideal é de proa, assim como na decolagem, por isso a mesma cabeceira é usada para pousos e decolagens. As condições mais favoráveis para o pouso são baixa altitude, ar seco, vento de proa e baixa temperatura.

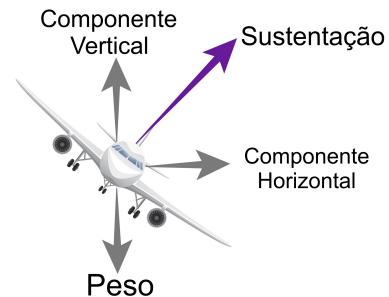


15 - VOO EM CURVA

1- Para entender a curva em uma aeronave, podemos compará-la a um pêndulo, onde vão existir 2 forças atuando, o peso e a tração no cabo. Na aeronave funciona basicamente da mesma forma, mas não existe o cabo, o que vai acontecer então é que o piloto vai substituir o cabo pela inclinação das asas e aumentando o ângulo de ataque.



3- Ao iniciar uma curva, se o piloto não puxar o manche, a aeronave terá uma tendência a descer, porque o componente vertical de sustentação será pequeno para balancear o peso, para se igualar isso o ângulo de ataque deve ser ligeiramente aumentado. Quanto mais inclinado o avião estiver na curva, mais o piloto vai precisar cabrar o manche.



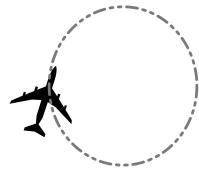
2- Em uma curva, a sustentação deve ser maior que o peso. A **força centrípeta** deve ser gerada para dar início a uma curva, essa força centrípeta aumenta com o peso e a velocidade, e diminui quando o raio da curva aumenta.

A força centrípeta é uma força que puxa o corpo para o centro da trajetória circular.

4- Existe um **limite** de inclinação nas curvas que varia de aeronave para aeronave, de acordo com a capacidade de sustentação de cada uma.

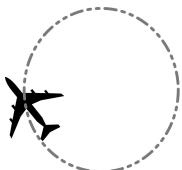
5- O **raio da curva** é a distância entre a aeronave e o centro da curva.

6- O **raio limite** é o menor raio possível para fazer uma curva, no raio limite a potência é a máxima e não é possível diminuir esse raio porque não existe mais potência disponível.



7- Como vimos a **altitude** influencia diretamente na densidade do ar, quanto mais alto mais rarefeito é o ar, o resultado é que o raio limite aumenta com a altitude pois a potência disponível diminui com a altitude.

8- Para fazer uma curva coordenada o piloto comanda o manche e o pedal, e se necessário ajusta a potência. Quando o piloto não usa o pedal, ou não usa o suficiente a aeronave faz uma **curva glissada**, a cauda fica pra dentro da curva.



9- Quando o piloto exagera na aplicação de pedal, a aeronave **derrapa**, a cauda sai da trajetória da curva.

10- O piloto coordena a força aplicada no pedal pelo instrumento **turn coordinator**, que indica a velocidade de inclinação da curva e a coordenação dela. Para visualizar o grau de inclinação da curva existe o instrumento conhecido como horizonte artificial, mas algumas aeronaves mais simples não são equipadas com ele.

11- Para realizar uma curva coordenada o piloto deve girar o manche para o lado que deseja curvar, aplicar o pedal do mesmo lado, puxar o manche para manter o voo nivelado e se necessário aumentar a potência para compensar o aumento do arrasto.

12- A velocidade de **stall** na curva é maior do que em voo reto.



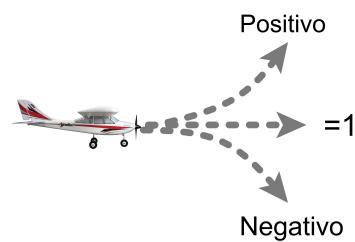
16 - FATOR DE CARGA

1- A aeronave fica em equilíbrio no voo reto e horizontal, porém um voo envolve algumas manobras que o afastam dessa condição. O **fator de carga** são os esforços sofridos durante o voo. Um voo reto e nivelado tem um fator de carga = 1g, o que significa que o peso suportado é apenas o peso atual da aeronave, ou o do seu corpo, um voo em curva com 60 graus de inclinação tem um fator de carga = 2g, isso significa que peso sentido é o dobro do que realmente tem.

2- A **força G** pode não ser familiar pra você então vamos explicar. A força G corresponde à aceleração da gravidade na Terra. 1g equivale a 1 vez o peso do corpo. Se você pesar 80kg e estiver sob um fator de 2g, você estará sentindo seu peso como 160kg. Logo em um voo acrobático, se o piloto estiver com um fator de carga igual a 3g, ele estará sentindo 3 vezes o peso do próprio corpo. Esse fator de carga é medido pelo acelerômetro.

3- Para comparar essa experiência você pode lembrar de uma montanha russa, a sensação que você sente é devido ao fator de carga, a força G atuando sobre o seu corpo.

4- O fator de carga pode ser positivo ou negativo, por exemplo, numa cabrada ele é positivo e numa picada ele é negativo. Ele pode ser também igual a 0, numa descida em trajetória parabólica, a pessoa sente como uma queda livre. Toda aeronave tem um limitante quanto ao fator de carga e o piloto não pode exceder esse limitante pois corre o risco de causar danos estruturais .



5- Como a sustentação nas **curvas** é maior do que o peso, o fator de carga é sempre maior que 1g, quanto maior a inclinação maior será

o fator de carga. Numa curva de 60 graus o fator de carga é igual a 2, ou seja, a sustentação é 2 vezes maior que num voo reto e nivelado.

6- Alguns fatores podem alterar o fator de carga sofrido, como curvas, manobras, rajadas de vento e recuperações de mergulho.

7- Para diminuir o efeito de carga em uma **turbulência**, onde temos incidência de vento ascendente e descendente, o ideal é reduzir a velocidade, como um carro passando em uma rua esburacada. Nesse momento o piloto tem que se atentar para a aeronave não se aproximar da velocidade de stall.

8- Existem 2 limitações de carga para as aeronaves:

Fator de carga limite - O fator de carga que a aeronave pode ser exposta sem que ocorram danos na estrutura.

Fator de carga última - A lei exige que a estrutura suporte 50% a mais do fator de carga limite sem que haja danos.

9- Acima de um determinado ângulo de ataque, os filetes de ar se desprendem do extradorso da asa, fazendo com que a sustentação diminua até a aeronave entrar em **stall**. Durante a recuperação do stall o piloto não pode realizar uma manobra brusca de recuperação do mergulho, pois pode elevar o fator de carga e o avião pode entrar em um novo stall, o ideal é fazer uma recuperação de forma suave.

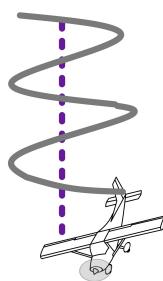
10- O fator de carga vertical é a razão entre a sustentação e o peso. E o fator de carga horizontal são esforços sofridos na horizontal da aeronave, são menos prejudiciais do que as verticais, como por exemplo uma turbulência, que não afetam a estrutura da aeronave.



17 - ATITUDES ANORMAIS

1- Nesse capítulo vamos falar sobre atitudes anormais durante o voo, o que o piloto pode fazer para evitar e sair delas.

2- Se a aeronave entrar em stall assimétrico pode entrar em parafuso. O **parafuso** é uma espécie de espiral descendente, perdendo altitude rapidamente, por isso exige a recuperação rápida.



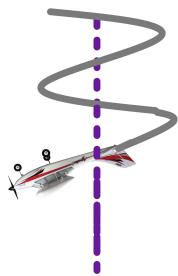
3- A asa levantada fica cada vez mais veloz e produz mais sustentação do que a outra. A recuperação do parafuso é difícil, é feita aplicando o pedal no sentido contrário ao da rotação. Como a aeronave entrou na manobra em stall, é preciso sair dela para recuperar essa velocidade.

4- No geral existem 3 tipos de parafuso, o normal, que acabamos de ver, o invertido e o chato.

No **parafuso chato** a aeronave desce girando com o nariz praticamente na linha do horizonte, essa é uma manobra muito perigosa e difícil de sair, algumas aeronaves nem são capazes de se recuperar dessa manobra porque os controles da aeronave ficam totalmente inoperantes, pois as superfícies perdem a sua capacidade aerodinâmica.



5- No **parafuso invertido** a aeronave entra no dorso, isso acontece muito nas manobras acrobáticas.



7- A guinada adversa é uma tendência do avião de desviar o nariz no sentido contrário ao comando dos ailerons, por exemplo, se o piloto comanda o manche para a esquerda e o nariz do avião vai para a direita. Pode ser evitada através de ailerons diferenciais, uso do leme de direção e ailerons tipo Frise.

6- A esteira de turbulência é causada pelo arrasto induzido de uma aeronave. Quando uma aeronave maior estiver na frente de uma menor, ela pode deixar um rastro de ar turbilhonado que atinge a aeronave que está atrás, fazendo com que gere uma turbulência ou até mesmo torne os comandos da aeronave ineficientes. Na decolagem e o pouso são os momentos mais comuns disso acontecer, porém ela se dissipia em poucos minutos, esse é um dos motivos para ter um tempo de separação mínimo entre as aeronaves.



18 - PESO E BALANCEAMENTO

1- As primeiras aeronaves mal eram capazes de sustentar o piloto e o combustível por alguns minutos de voo. Mas a performance das aeronaves foram melhorando cada vez mais e os pilotos precisam saber administrar todo o peso embarcado em suas aeronaves para ficar dentro dos padrões de segurança.

2- Quase todos os aspectos de performance da aeronave são influenciados pelo peso dela. Por exemplo, uma aeronave com sobrepeso precisa de mais pista para decolar, uma velocidade maior de decolagem, o ângulo e a razão de subida serão menores, a velocidade de cruzeiro será menor, o alcance dela será menor, a velocidade de stall será maior, e precisará também de uma pista maior para poussar.

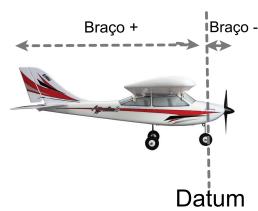
3- Os fabricantes fazem diversos testes para estabelecer limites seguros de carregamento da aeronave. Mesmo o peso estando dentro do permitido, é necessário que o **balanceamento** desse peso seja feito de forma correta dentro da aeronave, dentro dos limites estabelecidos.

4- A distribuição correta desse peso a bordo é de extrema importância, para verificar se essa distribuição foi feita corretamente o piloto deve analisar a posição do **centro de gravidade** (CG), que é um ponto imaginário onde a aeronave, se fosse erguida estaria balanceada.

5- A localização desse CG afeta diretamente a estabilidade e efetividade da aeronave, balanceamento incorreto pode ocasionar diversos problemas de controle dos comandos. O CG deve permanecer dentro dos limites dianteiro e traseiro, para assegurar essa estabilidade, esses limites também são chamados de **envelope**.

6- Para aprender um pouco mais disso na prática vamos ter que conhecer algumas definições, como o **Datum**, que é o plano de referência vertical a partir do qual todas as distâncias horizontais são medidas, ela é determinada pelo fabricante do avião e normalmente fica no nariz da aeronave. A distância à frente do Datum são negativas e atrás do Datum são positivas.

7- O **braço** é a distância entre o Datum e o CG de um objeto.



8- O **peso básico vazio** (BEW) é o peso da estrutura da aeronave, dos motores, equipamentos, combustível não utilizável e fluidos incluindo o óleo do motor.

9- O peso básico operacional (PBO) ou (BOW) é o peso básico mais a tripulação, a bagagem deles, o material de comissaria, manuais e qualquer outro item requerido para a operação.

10- O peso zero combustível (ZFW) é o peso básico mais a carga paga, é o peso total da aeronave faltando o combustível.

11- O peso de rampa é o peso zero combustível mais o combustível abastecido. Ele acaba sendo maior que o peso de decolagem pois conta com o combustível que será gasto no táxi.

12- O peso de decolagem (TOW) é o peso da aeronave antes de iniciar a decolagem, é o peso de rampa menos o combustível gasto no táxi.

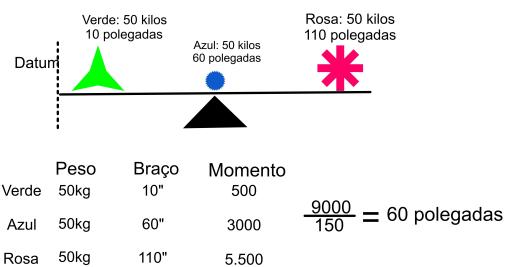
13- O peso de pouso (LW) é o peso que a aeronave toca o solo no pouso, é o peso da decolagem menos o combustível consumido no voo.

14- O peso máximo de pouso (MLW) é o peso máximo permitido para a aeronave no momento do toque do pouso.

15- O peso máximo de decolagem (MTOW) é o peso máximo permitido para a aeronave no momento da decolagem.

16- A carga paga é o peso básico operacional mais os passageiros, as bagagens e a carga.

17- Para fazer o peso e balanceamento da aeronave, é preciso calcular o peso da aeronave mais os itens carregados e determinar o CG. Lembrando que esse curso é baseado no piloto privado, então os cálculos são mais simples. A posição do CG normalmente é expressa em polegadas a partir do Datum, para achar o CG de um objeto o momento de todas as partes são adicionadas e esse total é dividido pelo peso das partes. O **momento** é o braço vezes o peso.



18- Para calcularmos o CG precisamos do peso de todos os componentes, do distância do objeto para o Datum (braço) e do momento, para calcular o momento, basta multiplicar o peso pelo braço, e para calcular CG somamos todos os momentos e dividimos pelo peso. No caso da figura acima o CG estaria localizado a 60 polegadas do Datum.

19- O próximo passo então é verificar se esse CG está dentro do envelope da aeronave e o peso total abaixo do máximo permitido para aquela aeronave. Estando tudo dentro dos valores permitidos seu voo será seguro, caso algum valor seja diferente do permitido, você terá que refazer esse balanceamento.



20 - TEORIA DE ALTA VELOCIDADE

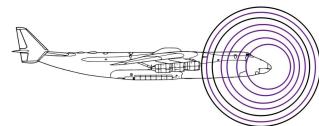
1- À medida que as aeronaves foram sendo capacitadas de voar com mais velocidade, surgiram alguns fenômenos aerodinâmicos novos, o voo em alta velocidade é afetado por esses fenômenos que dão características especiais ao voo e por isso o estudo da alta velocidade passou a ser necessário. Estudos concluíram que o problema da alta velocidade tinham relação com a compressibilidade do ar.

2- Imagine um avião voando, durante a sua trajetória ele tem que deslocar as partículas de ar à sua frente para poder avançar. Isso faz com que essa camada desloque as partículas que estão mais à frente dela, gerando uma espécie de ondas esféricas ao seu redor.

Esse deslocamento das partículas faz com que o ar à frente passe a ser “avisado” e antecipe o seu deslocamento, permitindo a passagem de forma suave e gerando pouco

arrasto.

VOO EM BAIXA VELOCIDADE



CAMADA DE AR QUE O AVIÃO VAI DESLOCANDO DURANTE O VOO

3- O problema da alta velocidade começou a surgir quando os aviões se aproximavam da velocidade do som, que é a velocidade de propagação da onda sonora, e essa velocidade varia conforme a temperatura, mas ao nível do mar consideramos 340m/s ou 1225 km/h.

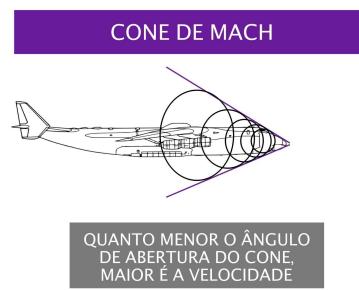
4- Quando o avião voa na velocidade do som as camadas de ar à frente do avião não conseguem serem “avisadas” da aproximação dele, por isso as ondas de pressão começam a não se afastar, o motivo é que o avião está tão

rápido quanto elas. As ondas de pressão então começam a se acumular no nariz do avião, formando uma parede de ar comprimido que chamamos de **Onda de Choque**.



A CAMADA DE AR PASSA
A NÃO SER AVISADA DA
PASSAGEM DO AVIÃO

estiver o avião menor será o ângulo de abertura do cone, que chamamos de **ângulo de Mach**.



QUANTO MENOR O ÂNGULO
DE ABERTURA DO CONE,
MAIOR É A VELOCIDADE

5- Como essas camadas não foram “avisadas” da passagem do avião, elas são surpreendidas e recebem o impacto do avião, ficando comprimidas na onda de choque.

Os filetes de ar mudam bruscamente de direção quando encontram o nariz do avião, e por isso recebe o nome de **onda de proa**, essa onda é perpendicular ao voo. Esse ar que fica comprimido nessa onda dificulta a passagem do avião, criando uma barreira e gerando um grande arrasto.

6- Ao passar a velocidade do som, essa onda de proa deixa de ser normal e passa a ser oblíqua, em forma de cone, sendo chamado de **Cone de Mach**. Quanto mais rápido

7- Para falar sobre grandes velocidades usamos o número Mach como referência, que é a relação da velocidade do avião com a velocidade do som. 1 Mach é igual a 1 vez a velocidade do som, sendo assim se o avião estiver a Mach 1.1 significa que ele está com uma velocidade de 1,1 vezes a velocidade do som.

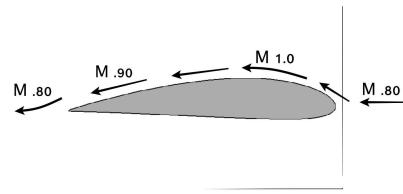
A origem do nome Mach surgiu de Ernst Mach, um físico que publicou sobre a possibilidade de um corpo ser capaz de ultrapassar a velocidade do som.

8- Como dissemos a velocidade do som varia com a temperatura, sabemos que a temperatura diminui a medida que o avião sobe, por isso a velocidade do som também

diminui com a altitude. Portanto o número Mach de um avião pode aumentar se ele subir a aeronave encontrando uma temperatura mais baixa.

9- O ar passando pelo avião tem diferentes velocidades ao longo dele, por exemplo nas asas, ele tem mais velocidade no extradorso (parte superior) do que no intradorso (parte inferior). E mesmo ao longo do extradorso ele sofre uma variação de velocidade ao longo dele, o escoamento passa pelo bordo de ataque com uma velocidade, e ao longo da asa vai sofrer alteração, isso significa que a onda de choque aparece pela primeira vez em um ponto específico da aeronave mesmo sem o avião estar em Mach 1. A velocidade que o avião estiver quando acontecer essa onda de choque em um determinado ponto da asa é considerado o **Número de Mach Crítico** do avião. Podemos dizer então que o Número de Mach Crítico é a velocidade em que começam a se formar as primeiras ondas de choque sobre a asa.

MACH CRÍTICO



10- Quando falamos de aerodinâmica o interessante é que a camada de passe pela superfície do avião com um escoamento contínuo, quando acontece um descolamento dessa camada, quando ela para de acompanhar o perfil da fuselagem, o fluxo de ar então começa a ficar turbulento.

A **camada limite** é a camada de ar aderente à superfície e que mantém os filetes do ar escoando suavemente. Se essa camada limite se separar da superfície, consequentemente o ar vai ficar turbulento nesse ponto de separação, o que é indesejável para o voo.