



Diversidade, inclusão e formação

SÉRIE

ASAS

DO CONHECIMENTO

PRINCÍPIOS DE VOO



ANAC AGÊNCIA NACIONAL
DE AVIAÇÃO CIVIL



A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) criou a série “Asas do Conhecimento” com o objetivo de disponibilizar manuais teóricos sobre temas aeronáuticos para interessados em ingressar em profissões da aviação civil. As apostilas estão disponíveis para acesso no [portal da ANAC](#).

O projeto faz parte do Asas para Todos, programa estratégico da Agência que fomenta a diversidade, a inclusão, a capacitação e a formação no setor aéreo brasileiro.

As apostilas são baseadas em materiais da autoridade de aviação civil norte-americana, a *Federal Administration Aviation* (FAA).

INTRODUÇÃO

Esta apostila trata das leis físicas fundamentais que regem as forças que atuam em uma aeronave em voo e o efeito que essas leis e forças naturais têm sobre as características de desempenho da aeronave. Para controlar uma aeronave, seja ela um avião, helicóptero, planador ou balão, o piloto deve entender os princípios envolvidos e aprender a usar ou neutralizar essas forças naturais.

ESTRUTURA DA ATMOSFERA

A atmosfera é um envelope de ar que circunda a Terra e repousa sobre sua superfície. Ela faz parte da Terra tanto quanto os mares ou a terra, mas o ar é diferente da terra e da água, pois é uma mistura de gases. Ele tem massa, peso e forma indefinida.

A atmosfera é composta de 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de outros gases, como argônio e hélio. Alguns desses elementos são mais pesados que outros. Os elementos mais pesados, como o oxigênio, depositam-se na superfície da Terra, enquanto os elementos mais leves são levados para regiões de maior altitude. A maior parte do oxigênio da atmosfera está contida abaixo de 35 mil pés de altitude.

O Ar é um fluido

Quando a maioria das pessoas ouve a palavra “fluido”, geralmente pensa em líquido. Entretanto, gases como o ar também são fluidos. Os fluidos assumem a forma de seus recipientes. Em geral, os fluidos não resistem à deformação, mesmo quando a menor tensão é aplicada, ou resistem apenas ligeiramente. Chamamos essa leve resistência de viscosidade. Os fluidos também têm a capacidade de fluir. Assim como um líquido flui e preenche um recipiente, o ar se expande para ocupar todo o volume disponível desse recipiente. Tanto os líquidos quanto os gases apresentam essas propriedades exclusivas de fluido, apesar de diferirem muito em densidade. Compreender as propriedades fluidas do ar é essencial para entender os princípios do voo.

Viscosidade

A viscosidade é a propriedade de um fluido que faz com que ele resista ao escoamento. A maneira como as moléculas individuais do fluido tendem a aderir, ou grudar, umas às outras determina o quanto um fluido resiste ao fluxo. Os fluidos de alta viscosidade são “espessos” e resistem ao fluxo; os fluidos de baixa viscosidade são “finos” e fluem facilmente. O ar tem baixa viscosidade e flui facilmente.

Usando dois líquidos como exemplo, quantidades semelhantes de óleo e água despejados em duas rampas idênticas escorrerão a velocidades diferentes devido às suas viscosidades diferentes. A água parece fluir livremente, enquanto o óleo flui muito mais lentamente.

Como outro exemplo, diferentes tipos de líquidos semelhantes apresentarão comportamentos distintos devido às diferentes viscosidades. A graxa é muito viscosa. Com o tempo, a graxa fluirá, mesmo que a velocidade do fluxo seja lenta. O óleo de motor é menos viscoso do que a graxa e flui com muito mais facilidade, mas é mais viscoso e flui mais lentamente do que a gasolina.

Todos os fluidos são viscosos e têm uma resistência ao fluxo, independentemente de observarmos ou não essa resistência. Não podemos observar facilmente a viscosidade do ar. Entretanto, como o ar é um fluido e possui propriedades de viscosidade, ele resiste ao fluxo em torno de qualquer objeto até certo ponto.

Fricção

Outro fator que atua quando um fluido passa por cima ou ao redor de um objeto é o chamado atrito. Atrito é a resistência que uma superfície ou objeto encontra ao se mover sobre outro. O atrito existe entre quaisquer dois materiais que entrem em contato um com o outro.

Os efeitos do atrito podem ser demonstrados com um exemplo semelhante ao anterior. Se fluidos idênticos forem despejados em duas rampas idênticas, eles fluirão da mesma maneira e na mesma velocidade. Se a superfície de uma rampa for áspera e a da outra for lisa, o fluxo pelas duas rampas será significativamente diferente. A rampa de superfície áspera impede o fluxo do fluido devido à resistência da superfície (atrito). É importante lembrar que todas as superfícies, por mais lisas que pareçam, não são lisas em um nível microscópico e impedem o fluxo de um fluido.

A superfície de uma asa, como qualquer outra superfície, tem uma certa rugosidade em nível microscópico. A rugosidade da superfície causa resistência e diminui a velocidade do ar que flui sobre a asa. [Figura 1]

As moléculas de ar passam sobre a superfície da asa e, de fato, aderem (grudam ou se agarram) a ela devido ao atrito. As moléculas de ar próximas à superfície da asa resistem ao movimento e têm uma velocidade relativa próxima de zero. A rugosidade da superfície impede seu movimento. A camada de moléculas que adere à superfície da asa é chamada de camada limite.



Figura 1. Superfície microscópica de uma asa.

Uma vez que a camada limite do ar adere à asa por atrito, a resistência adicional ao fluxo de ar é causada pela viscosidade, ou seja, a tendência do ar de aderir a si mesmo. Quando essas duas forças agem juntas para resistir ao fluxo de ar sobre uma asa, chamamos esse fenômeno de arrasto.

Pressão

A pressão é a força aplicada perpendicularmente à superfície de um objeto. Geralmente, a pressão é medida em libras-força por polegada quadrada de um objeto, ou PSI (*Pound-force per Square Inch*). Um objeto completamente imerso em um fluido sentirá a pressão uniformemente em toda a sua superfície. Se a pressão em uma das superfícies do objeto se tornar menor do que a pressão exercida nas outras superfícies, o objeto se moverá na direção da menor pressão.

PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Embora existam vários tipos de pressão, os pilotos estão principalmente preocupados com a pressão atmosférica. A pressão atmosférica é um dos fatores básicos nas mudanças meteorológicas, ajuda a levantar uma aeronave e aciona alguns dos principais instrumentos de voo. Esses instrumentos são o altímetro, o velocímetro (*airspeed indicator*), o variômetro ou climb (*vertical speed indicator*) e o manômetro (*manifold pressure gauge*).

O ar é muito leve, mas tem massa e é afetado pela atração da gravidade. Portanto, como qualquer outra substância, ele tem peso e, por causa de seu peso, tem força. Como o ar é uma substância fluida, essa força é exercida igualmente em todas as direções. Seu efeito sobre corpos dentro do ar é chamado de pressão. Sob condições normais, ao nível do mar, a pressão média exercida pelo peso da atmosfera é de aproximadamente 14,70 libras por polegada quadrada (psi) de superfície, ou 1.013,2 milibares (mb). A espessura da atmosfera é limitada; portanto, quanto maior a altitude, menor a quantidade de ar acima dela. Por esse motivo, o peso da atmosfera a 18.000 pés é metade do que é ao nível do mar.

A pressão da atmosfera varia com o tempo e o local. Devido a essas variações, foi desenvolvido um padrão de referência. A atmosfera padrão ao nível do mar corresponde a uma temperatura de superfície de 59°F ou 15°C e a uma pressão de superfície de 29,92 polegadas de mercúrio ("Hg) ou 1.013,2 mb. [Figura 2]

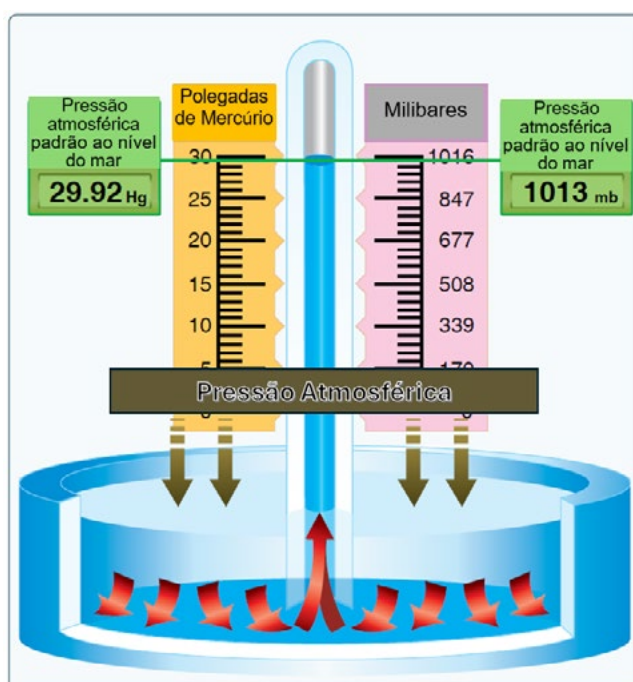


Figura 2. Pressão padrão ao nível do mar.

Uma taxa de lapso de temperatura padrão ocorre quando a temperatura diminui a uma taxa de aproximadamente 3,5°F ou 2°C por mil pés até 36.000 pés, o que equivale a aproximadamente -65°F ou -55°C. Acima desse ponto, a temperatura é considerada constante até 80.000 pés.

Uma taxa de lapso de pressão padrão ocorre quando a pressão diminui aproximadamente 1 “Hg por 1.000 pés de ganho de altitude, até 10.000 pés. [Figura 3] A Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) estabeleceu esse como um padrão mundial, e ele é frequentemente referido como Atmosfera Padrão Internacional (ISA - *International Standard Atmosphere*) ou Atmosfera Padrão da ICAO. Qualquer temperatura ou pressão que seja diferente das taxas de lapso padrão é considerada temperatura e pressão fora do padrão.

ATMOSFERA PADRÃO			
Altitude (ft)	Pressão (Hg)	Temperatura	
		(°C)	(°F)
0	29.92	15.0	59.0
1,000	28.86	13.0	55.4
2,000	27.82	11.0	51.9
3,000	26.82	9.1	48.3
4,000	25.84	7.1	44.7
5,000	24.89	5.1	41.2
6,000	23.98	3.1	37.6
7,000	23.09	1.1	34.0
8,000	22.22	-0.9	30.5
9,000	21.38	-2.8	26.9
10,000	20.57	-4.8	23.3
11,000	19.79	-6.8	19.8
12,000	19.02	-8.8	16.2
13,000	18.29	-10.8	12.6
14,000	17.57	-12.7	9.1
15,000	16.88	-14.7	5.5
16,000	16.21	-16.7	1.9
17,000	15.56	-18.7	-1.6
18,000	14.94	-20.7	-5.2
19,000	14.33	-22.6	-8.8
20,000	13.74	-24.6	-12.3

Figura 3. Propriedades da atmosfera padrão.

Como o desempenho da aeronave é comparado e avaliado com relação à atmosfera padrão, todos os instrumentos da aeronave são calibrados para essa referência. Para considerar adequadamente a atmosfera fora do padrão, alguns termos relacionados devem ser definidos.

Altitude pressão

A altitude pressão é a altura acima de um Plano de Referência Padrão (*Standard Datum Plane* – SDP), que é um nível teórico em que o peso da atmosfera é de 29,92 “Hg (1.013,2 mb), conforme medido por um barômetro. Um altímetro é essencialmente um barômetro sensível calibrado para indicar a altitude na atmosfera padrão. Se o altímetro estiver ajustado para o SDP de 29,92 “Hg, a altitude indicada será a altitude pressão. Conforme a pressão atmosférica muda, o SDP pode estar abaixo, ao nível do mar ou acima dele.

A altitude de pressão é importante como base para determinar o desempenho do avião, bem como para atribuir níveis de voo a aeronaves que operam a 18.000 pés ou acima.

A altitude pressão pode ser determinada por um dos seguintes métodos:

1. Ajuste da escala barométrica do altímetro para 29,92 e leitura da altitude indicada.
2. Aplicação de um fator de correção à altitude indicada de acordo com a configuração do altímetro informada.

Altitude Densidade

A SDP é uma altitude de pressão teórica, mas as aeronaves operam em uma atmosfera fora do padrão, e o termo **altitude de densidade** é usado para correlacionar o desempenho aerodinâmico na atmosfera fora do padrão. A altitude de densidade é a distância vertical acima do nível do mar na atmosfera padrão em que se encontra uma determinada densidade do ar.

A densidade do ar tem efeitos significativos sobre o desempenho da aeronave porque, à medida que o ar se torna menos denso, ocorre uma diminuição em:

- Potência, pois o motor recebe menos ar;
- Empuxo, porque uma hélice é menos eficiente no ar rarefeito;
- Sustentação, porque o ar rarefeito exerce menos força sobre os aerofólios.

A altitude de densidade é a altitude de pressão corrigida para a temperatura fora do padrão. À medida que a densidade do ar aumenta (altitude de densidade mais baixa), o desempenho da aeronave aumenta; por outro lado, à medida que a densidade do ar diminui (altitude de densidade mais alta), o desempenho da aeronave diminui.

Uma diminuição na densidade do ar significa uma altitude de alta densidade; um aumento na densidade do ar significa uma altitude de baixa densidade.

A altitude de densidade é usada no cálculo do desempenho da aeronave porque, sob condições atmosféricas padrão, o ar em cada nível da atmosfera não só tem uma densidade específica, como sua altitude de pressão e altitude de densidade identificam o mesmo nível.

O cálculo da altitude de densidade envolve a consideração da pressão (altitude pressão) e da temperatura. Como os dados de desempenho da aeronave em qualquer nível são baseados na densidade do ar sob condições padrão do dia, esses dados de desempenho se aplicam a níveis de densidade do ar que podem não ser idênticos às indicações do altímetro. Em condições mais altas ou mais baixas do que o padrão, esses níveis não podem ser determinados diretamente pelo altímetro.

A altitude de densidade é determinada primeiro encontrando a altitude de pressão e, em seguida, corrigindo essa altitude para variações de temperatura fora do padrão. Como a densidade varia diretamente com a pressão e inversamente com a temperatura, uma determinada altitude de pressão pode existir para uma ampla faixa de temperaturas, permitindo variações na densidade do ar. Entretanto, uma densidade conhecida ocorre para qualquer temperatura e altitude de pressão. A densidade do ar tem um efeito pronunciado no desempenho da aeronave e do motor. Independentemente da altitude real da aeronave, ela terá um desempenho como se estivesse operando em uma altitude igual à altitude de densidade existente.

A densidade do ar é afetada por mudanças na altitude, temperatura e umidade. Uma altitude de alta densidade refere-se ao ar rarefeito, enquanto uma altitude de baixa densidade refere-se ao ar denso. As condições que resultam em uma altitude de alta densidade são altitudes elevadas, baixas pressões atmosféricas, altas temperaturas, alta umidade ou alguma combinação desses fatores. Altitudes mais baixas, alta pressão atmosférica, baixas temperaturas e baixa umidade são mais indicativas de altitude de baixa densidade.

EFEITO DA PRESSÃO SOBRE A DENSIDADE

Como o ar é um gás, ele pode ser comprimido ou expandido. Quando é comprimido, uma quantidade maior de ar pode ocupar um determinado volume. Por outro lado, quando a pressão sobre um determinado volume de ar é reduzida, o ar se expande e ocupa um espaço maior. Em uma pressão mais baixa, a coluna original de ar contém uma massa menor de ar. A densidade é reduzida porque a densidade é diretamente proporcional à pressão. Se a pressão dobrar, a densidade dobrará; se a pressão diminuir, a densidade diminuirá. Essa afirmação é verdadeira somente quando a temperatura permanece constante.

EFEITO DA TEMPERATURA NA DENSIDADE

O aumento da temperatura de uma substância diminui sua densidade. Por outro lado, a diminuição da temperatura aumenta sua densidade. Assim, a densidade do ar varia inversamente com a temperatura. Isso só é válido sob pressão constante.

Na atmosfera, tanto a temperatura quanto a pressão diminuem com a altitude e influenciam a densidade de formas opostas. Entretanto, uma queda bastante rápida na pressão, à medida que a altitude aumenta, geralmente tem um efeito dominante. Portanto, os pilotos podem esperar que a densidade diminua com a altitude.

EFEITO DA UMIDADE SOBRE A DENSIDADE

Os parágrafos anteriores referem-se ao ar que está perfeitamente seco. Na realidade, ele nunca está completamente seco. Uma pequena quantidade de vapor de água suspensa na atmosfera pode ser quase insignificante em determinadas condições, mas em outras a umidade pode se tornar um fator importante no desempenho de uma aeronave. O vapor de água é mais leve que o ar; conseqüentemente, o ar úmido é mais leve que o ar seco. Portanto, à medida que o teor de água do ar aumenta, o ar se torna menos denso, aumentando a altitude de densidade e diminuindo o desempenho. Ele é mais leve ou menos denso quando, em um determinado conjunto de condições, contém a quantidade máxima de vapor de água.

A umidade, também chamada de umidade relativa, refere-se à quantidade de vapor de água contida na atmosfera e é expressa como uma porcentagem da quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter. Essa quantidade varia de acordo com a temperatura. O ar quente retém mais vapor de água, enquanto o ar frio retém menos. O ar perfeitamente seco, que não contém vapor de água, tem uma umidade relativa de zero por cento, enquanto o ar saturado, que não pode reter mais vapor de água, tem uma umidade relativa de 100 por cento. A umidade, por si só, geralmente não é considerada um fator importante no cálculo da altitude de densidade e no desempenho da aeronave, mas é um fator contribuinte.

À medida que a temperatura aumenta, o ar pode conter maiores quantidades de vapor de água. Ao comparar duas massas de ar distintas, a primeira quente e úmida (ambas as qualidades tendem a tornar o ar mais leve) e a segunda fria e seca (ambas as qualidades o tornam mais pesado), a primeira deve ser menos densa que a segunda. A pressão, a temperatura e a umidade têm grande influência no desempenho da aeronave devido ao seu efeito sobre a densidade. Não há regras práticas que possam ser facilmente aplicadas, mas o efeito da umidade pode ser determinado usando várias fórmulas on-line. No primeiro exemplo, a pressão é necessária na altitude para a qual a altitude de densidade está sendo procurada. Usando a Figura 2, selecione a pressão barométrica mais próxima da altitude associada. Por exemplo, a pressão a 8.000 pés é 22,22 "Hg.

Usando o site <https://www.wolframalpha.com/input/?i=density+altitude+calculator> para altitude de densidade, digite 22,22 para 8.000 pés na janela de pressão da estação. Digite uma temperatura de 80° e um ponto de orvalho de 75°. O resultado é uma altitude de densidade de 11.564 pés. Sem umidade, a altitude de densidade seria quase 500 pés mais baixa.

Outro site (<https://wahiduddin.net/calc/index.htm>) fornece um método mais direto de determinar os efeitos da umidade na altitude de densidade sem usar gráficos interpretativos adicionais. De qualquer forma, os efeitos da umidade na altitude de densidade incluem uma diminuição no desempenho geral em condições de alta umidade.

TEORIAS SOBRE A PRODUÇÃO DE SUSTENTAÇÃO

Para conseguir voar em uma máquina mais pesada que o ar, existem vários obstáculos que devemos superar. Um desses obstáculos, discutido anteriormente, é a resistência ao movimento chamado arrasto. O obstáculo mais desafiador a ser superado na aviação, entretanto, é a força da gravidade. Uma asa movendo-se no ar gera a força chamada sustentação, já discutida anteriormente. A sustentação da asa, que é maior que a força da gravidade, em direção oposta à da gravidade, permite que uma aeronave voe. A geração dessa força chamada sustentação é baseada em alguns princípios importantes, nas leis básicas do movimento de Newton e no princípio de pressão diferencial de Bernoulli.

Leis básicas de Newton sobre o movimento

A fórmula da sustentação tem sido refinada ao longo dos séculos a partir das leis básicas da física. Essas leis, embora aparentemente aplicáveis a todos os aspectos da sustentação, não explicam como ela é formulada. De fato, é preciso considerar os muitos aerofólios simétricos que, ainda assim, produzem uma sustentação significativa.

As leis fundamentais da física que regem as forças que atuam sobre uma aeronave em voo foram adotadas a partir de teorias postuladas desenvolvidas antes que qualquer ser humano conseguisse pilotar uma aeronave com sucesso. O uso dessas leis da física surgiu com a Revolução Científica, que começou na Europa no século XVII. Motivados pela crença de que o universo operava de uma maneira previsível e aberta à compreensão humana, muitos filósofos, matemáticos, cientistas naturais e inventores passaram a vida desvendando os segredos do universo. Um dos mais conhecidos foi Sir Isaac Newton, que não apenas formulou a lei da gravitação universal, mas também descreveu as três leis básicas do movimento.

Primeira Lei de Newton: “Todo objeto persiste em seu estado de repouso ou movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja compelido a mudar esse estado por forças impostas a ele.”

Isso significa que nada começa ou para de se mover até que alguma força externa faça com que isso aconteça. Uma aeronave em repouso na rampa permanece em repouso a menos que uma força suficientemente grande seja aplicada para superar sua inércia. Quando está em movimento, sua inércia a mantém em movimento, sujeita a várias outras forças que atuam sobre ela. Essas forças podem aumentar seu movimento, desacelerá-lo ou mudar sua direção.

Segunda Lei de Newton: “A aceleração adquirida por um corpo é diretamente proporcional à resultante das forças que atuam sobre ele. Para uma massa constante, a força é igual à massa vezes a aceleração.”

Quando um corpo sofre a ação de uma força constante, sua aceleração resultante é inversamente proporcional à massa do corpo e é diretamente proporcional à força aplicada. Isso leva em conta os fatores envolvidos na superação da Primeira Lei de Newton. Abrange tanto as mudanças de direção quanto de velocidade, incluindo a partida do repouso (aceleração positiva) e a parada (aceleração negativa ou desaceleração).

Terceira Lei de Newton: “Para toda ação, há uma reação igual e oposta.”

Em um avião, a hélice se move e empurra o ar para trás; consequentemente, o ar empurra a hélice (e, portanto, o avião) na direção oposta – para frente. Em um avião a jato, o motor empurra uma rajada de gases quentes para trás; a força de reação igual e oposta empurra o motor e força o avião para frente.

Princípio de pressão diferencial de Bernoulli

Meio século depois de Newton ter formulado suas leis, Daniel Bernoulli, um matemático suíço, explicou como a pressão de um fluido em movimento (líquido ou gás) varia com sua velocidade de movimento. O Princípio de Bernoulli afirma que, à medida que a velocidade de um fluido em movimento aumenta, a pressão dentro do fluido diminui. Esse princípio explica o que acontece com o ar que passa sobre a parte superior curva da asa do avião.

Uma aplicação prática do Princípio de Bernoulli é o **tubo de Venturi**. O tubo de Venturi possui uma entrada de ar que se estreita em uma garganta (ponto de constrição) e uma seção de saída que aumenta de diâmetro em direção à parte traseira. O diâmetro da saída é o mesmo da entrada. A massa de ar que entra no tubo deve ser exatamente igual à massa que sai dele. Na constrição, a velocidade aumenta para permitir a passagem da mesma quantidade de ar no mesmo período de tempo que nas outras partes do tubo. Quando a velocidade do ar aumenta, a pressão diminui, conforme o Princípio de Bernoulli. Após a constrição, o fluxo de ar diminui e a pressão aumenta. [Figura 4]

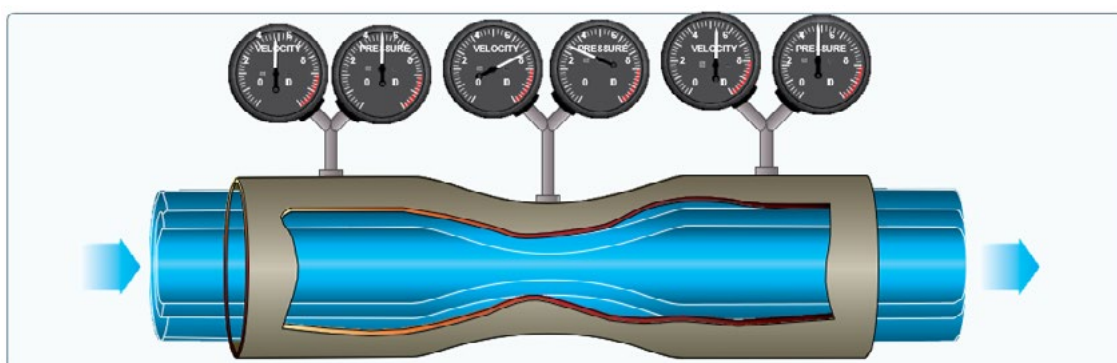


Figura 4. A pressão do ar diminui em um tubo de Venturi.

Como o ar é reconhecido como um corpo e entende-se que ele seguirá as leis acima, pode-se começar a ver como e por que uma asa de avião desenvolve sustentação. À medida que a asa se move pelo ar, o fluxo de ar sobre a superfície superior curva da asa aumenta de velocidade, criando uma área de baixa pressão.

Embora Newton, Bernoulli e centenas de outros cientistas antigos que estudaram as leis físicas do universo não tivessem os laboratórios sofisticados disponíveis hoje em dia, eles forneceram uma grande contribuição para a compreensão contemporânea de como a sustentação é criada.

DESIGN DE AEROFÓLIO

Um aerofólio é uma estrutura projetada para obter uma reação sobre a sua superfície a partir do ar através do qual ele se move ou que passa por essa estrutura. O ar age de várias maneiras quando submetido a diferentes pressões e velocidades, mas esta discussão se limita às partes de uma aeronave com as quais o piloto mais se preocupa durante o voo, ou seja, os aerofólios projetados para produzir sustentação. Ao observar um perfil típico de aerofólio, como a seção transversal de uma asa, é possível ver várias características evidentes do projeto. [Figura 5] Observe que há uma diferença nas curvaturas (chamadas de arqueamento) das superfícies superior e inferior do aerofólio. A curvatura da superfície superior é mais pronunciada do que a da superfície inferior, que geralmente é mais plana.

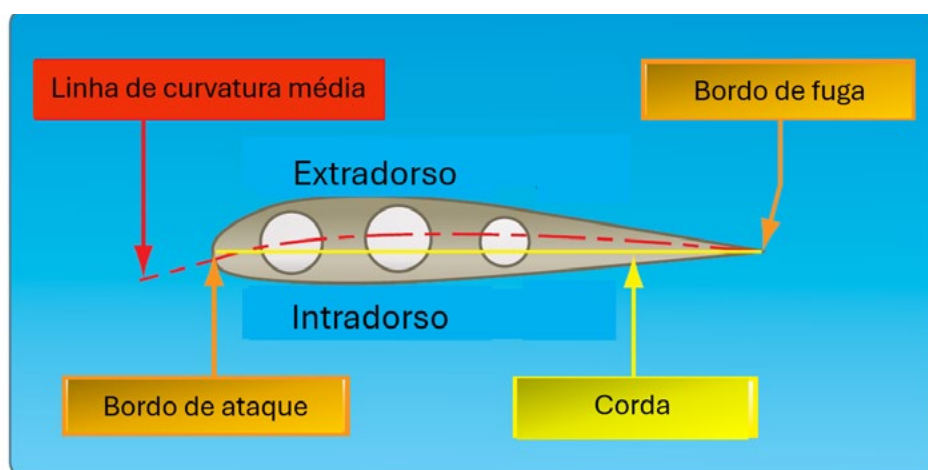


Figura 5. Seção típica de aerofólio.

OBSERVAÇÃO: As duas extremidades do perfil do aerofólio também diferem na aparência. A extremidade arredondada, que fica voltada para a frente durante o voo, é chamada de bordo de ataque; a outra extremidade, o bordo de fuga, é bastante estreita e cônica.

Uma linha de referência frequentemente usada na discussão do aerofólio é a linha de corda, uma linha reta traçada através do perfil que conecta as extremidades dos bordos de ataque e de fuga. A distância dessa linha de corda até as superfícies superior e inferior da asa indica a magnitude da curvatura superior e inferior em qualquer ponto. Outra linha de referência, desenhada do bordo de ataque até o bordo de fuga, é a linha de curvatura média. Essa linha média é equidistante em todos os pontos das superfícies superior e inferior.

Um aerofólio é construído de forma que seu formato aproveite a resposta do ar a determinadas leis da física. Isso gera dois efeitos principais na massa de ar: uma ação de elevação por pressão positiva da massa de ar abaixo da asa e uma ação de elevação por pressão negativa devido à pressão reduzida acima da asa.

À medida que o fluxo de ar atinge a superfície inferior relativamente plana de uma asa ou pá do rotor, quando inclinada em um pequeno ângulo em relação à sua direção de movimento, o ar é forçado a desviar-se para baixo, gerando uma reação ascendente que resulta em sustentação positiva. Ao mesmo tempo, o fluxo de ar que atinge a seção curva superior do bordo de ataque é desviado para cima. Um aerofólio é moldado para causar uma ação no ar e forçá-lo para baixo, o que gera uma reação igual do ar, forçando o aerofólio para cima. Se uma asa for projetada de tal forma que cause uma força de sustentação maior do que o peso da aeronave, ela voará.

Se toda a sustentação necessária fosse obtida apenas da deflexão do ar pela superfície inferior da asa, uma aeronave precisaria apenas de uma asa plana, como uma pipa. No entanto, o equilíbrio da sustentação necessária para manter a aeronave no ar vem do fluxo de ar acima da asa. Aqui está a chave para o voo.

Não é preciso nem útil atribuir valores específicos ao percentual de sustentação gerado pela superfície superior de um aerofólio em comparação com a gerada pela superfície inferior. Esses valores não são constantes. Eles variam, não apenas com as condições de voo, mas também com diferentes designs de asas.

Aerofólios diferentes têm características de voo diferentes. Muitos milhares de aerofólios foram testados em túneis de vento e em voos reais, mas não foi encontrado um aerofólio que satisfaça todos os requisitos de voo. O peso, a velocidade e a finalidade de cada aeronave determinam o formato de seu aerofólio. O aerofólio mais eficiente para produzir a maior sustentação é aquele que tem uma superfície inferior côncava ou “escavada”. Como um projeto fixo, esse tipo de aerofólio sacrifica muita velocidade ao produzir sustentação e não é adequado para voos de alta velocidade. Os avanços na engenharia possibilitaram que os jatos de alta velocidade atuais aproveitassem as características de alta sustentação do aerofólio côncavo. Os flaps do bordo de ataque (Krueger) e do bordo de fuga (Fowler), quando estendidos a partir da estrutura básica da asa, literalmente mudam o formato do aerofólio para a forma côncava clássica, gerando assim uma sustentação muito maior em condições de voo lento.

Por outro lado, um aerofólio, que é perfeitamente aerodinâmico e oferece pouca resistência ao vento, às vezes não tem potência de sustentação suficiente para tirar o avião do chão. Assim, os aviões modernos têm aerofólios que atingem um meio termo entre os extremos do design. O formato varia de acordo com as necessidades do avião para o qual foi projetado. A Figura 6 mostra alguns dos projetos de aerofólios mais comuns.

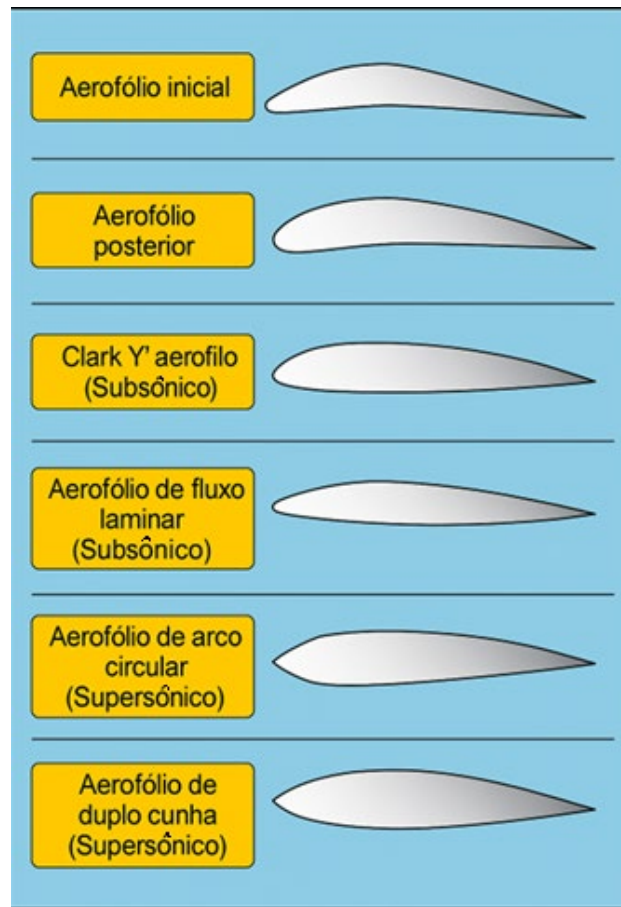


Figura 6. Projetos de aerofólio.

Baixa pressão acima

Em um túnel de vento ou em voo, um aerofólio é simplesmente um objeto aerodinâmico inserido em uma corrente de ar em movimento. Se o perfil do aerofólio tivesse o formato de uma lágrima, a velocidade e as variações de pressão do ar que passam pelas superfícies superior e inferior seriam as mesmas em ambos os lados. Mas se o aerofólio em forma de lágrima fosse cortado ao meio no sentido do comprimento, o resultado seria semelhante à seção básica do aerofólio (asa). Se esse aerofólio for então inclinado de modo que o fluxo de ar o atinja em um ângulo, o ar que se desloca sobre a superfície superior será forçado a se mover mais rápido do que o ar ao longo da parte inferior do aerofólio. Esse aumento de velocidade reduz a pressão acima do aerofólio.

Aplicando o Princípio da Pressão de Bernoulli, o aumento da velocidade do ar na parte superior de um aerofólio produz uma queda na pressão. Essa pressão reduzida é um componente da sustentação total. A diferença de pressão entre a superfície superior e inferior de uma asa, por si só, não é responsável pela força de sustentação total produzida.

O fluxo descendente para trás a partir da superfície superior de um aerofólio cria um *downwash*. Esse *downwash* encontra o fluxo da parte inferior do aerofólio no bordo de fuga. Aplicando a Terceira Lei de Newton, a reação desse fluxo descendente para trás resulta em uma força ascendente para frente no aerofólio.

Alta pressão abaixo

Uma certa quantidade de sustentação é gerada pelas condições de pressão sob o aerofólio. Devido à maneira como o ar flui sob o aerofólio, o resultado é uma pressão positiva, especialmente em ângulos de ataque mais altos. Entretanto, há outro aspecto desse fluxo de ar que deve ser considerado. Em um ponto próximo ao bordo de ataque, o fluxo de ar é praticamente interrompido (ponto de estagnação) e, em seguida, aumenta gradualmente a velocidade. Em algum ponto próximo ao bordo de fuga, ele atinge novamente uma velocidade igual à da superfície superior. De acordo com o princípio de Bernoulli, onde o fluxo de ar foi desacelerado sob o aerofólio, foi criada uma pressão positiva, para cima (ou seja, à medida que a velocidade do fluido diminui, a pressão deve aumentar). Como o diferencial de pressão entre a superfície superior e inferior do aerofólio aumenta, a sustentação total aumenta. Tanto o Princípio de Bernoulli quanto as Leis de Newton estão em operação sempre que a sustentação está sendo gerada por um aerofólio.

Distribuição de pressão

A partir de experimentos realizados em modelos de túnel de vento e em aviões de tamanho real, constatou-se que, à medida que o ar flui ao longo da superfície de uma asa em diferentes ângulos de ataque (AOA), há regiões ao longo da superfície em que a pressão é negativa ou menor que a atmosférica, e regiões em que a pressão é positiva ou maior que a atmosférica. Essa pressão negativa na superfície superior cria uma força relativamente maior na asa do que a causada pela pressão positiva resultante do ar que atinge a superfície inferior da asa. A Figura 7 mostra a distribuição de pressão ao longo de um aerofólio em três ângulos de ataque diferentes. A média da variação de pressão para qualquer AOA determinado é chamada de centro de pressão (CP). A força aerodinâmica atua por meio desse CP. Em altos ângulos de ataque, o CP se move para frente, enquanto em baixos ângulos de ataque o CP se move para trás. No projeto de estruturas de asas, esse deslocamento do CP é muito importante, pois afeta a posição das cargas de ar impostas à estrutura da asa em condições de baixo e alto AOA. O equilíbrio aerodinâmico e a capacidade de controle de um avião são regidos por alterações no CP.

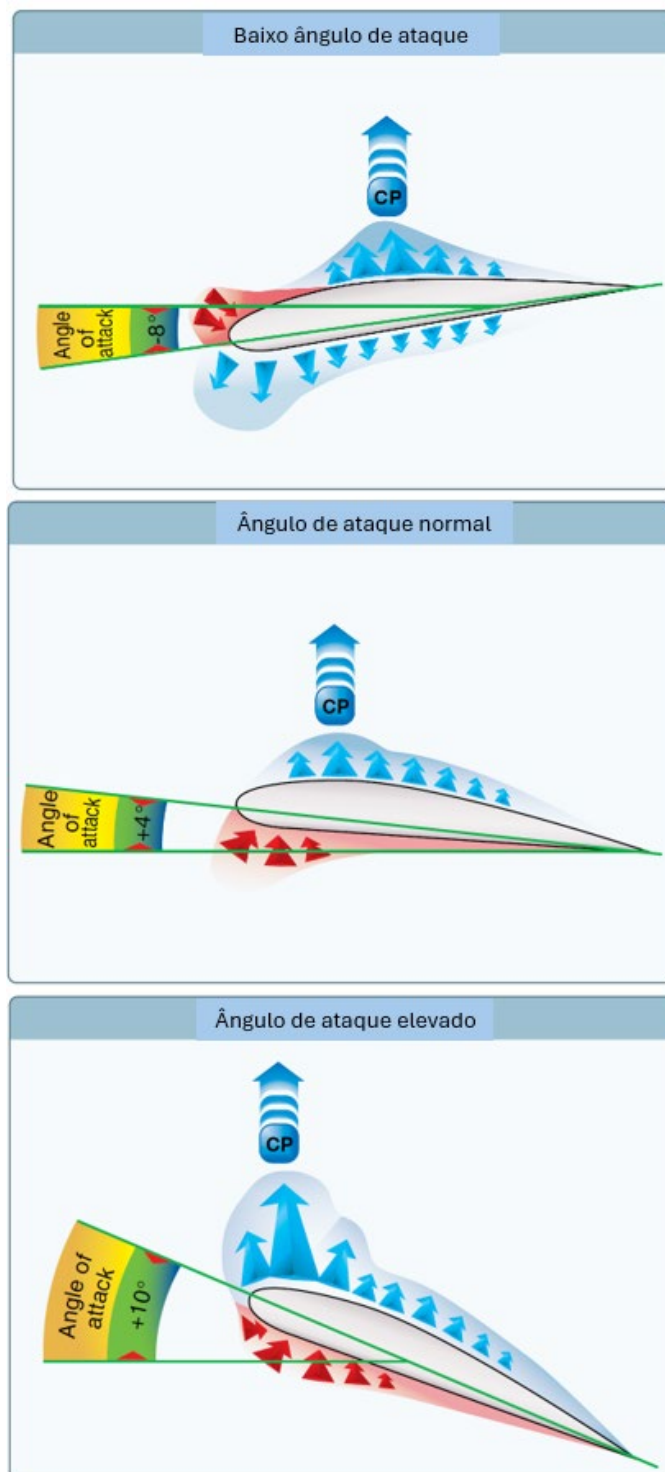


Figura 7. Distribuição de pressão em um aerofólio e alterações de CP com AOA.

Comportamento do aerofólio

Embora exemplos específicos possam ser citados em que cada um dos princípios prevê e contribui para a formação de sustentação, esse é um assunto complexo. A geração de sustentação vai além de uma simples diferença de pressão entre as superfícies superior e inferior do aerofólio. De fato, muitos aerofólios de sustentação não têm uma superfície superior mais longa do que a inferior, como no caso dos aerofólios simétricos. Esses aerofólios são vistos em aeronaves de alta velocidade com asas simétricas ou em pás de rotor simétricas de muitos helicópteros, cujas superfícies superior e inferior são idênticas. Em ambos os exemplos, a única diferença é a relação do aerofólio com a corrente de ar que se aproxima (ângulo). Um avião de papel, que é simplesmente uma placa plana, tem a parte inferior e superior exatamente com o mesmo formato e comprimento. No entanto, esses aerofólios produzem sustentação, e o “giro do fluxo” é parcialmente (ou totalmente) responsável pela criação da sustentação.

À medida que um aerofólio se move pelo ar, ele se inclina contra o fluxo de ar, produzindo um fluxo diferente causado pela relação do aerofólio com o ar que se aproxima. Pense em uma mão sendo colocada do lado de fora da janela do carro em alta velocidade. Se a mão estiver inclinada em uma direção ou outra, ela se moverá para cima ou para baixo. Isso é causado pela deflexão que, por sua vez, faz com que o ar gire em torno do objeto dentro do fluxo de ar. Como resultado dessa mudança, a velocidade em torno do objeto muda tanto em magnitude quanto em direção, resultando, por sua vez, em uma força e direção de velocidade mensuráveis.

UMA TERCEIRA DIMENSÃO

Até este ponto, a discussão se concentrou no fluxo de ar através das superfícies superior e inferior de um aerofólio. Embora a maior parte da sustentação seja produzida por essas duas dimensões, uma terceira dimensão, a ponta do aerofólio, também tem um efeito aerodinâmico. A área de alta pressão na parte inferior de um aerofólio empurra a ponta para a área de baixa pressão na parte superior. [Figura 8] Essa ação cria um fluxo rotativo chamado vórtice de ponta da asa. O vórtice flui por trás do aerofólio, criando um *downwash* que se estende de volta ao bordo de fuga do aerofólio. Esse *downwash* resulta em uma redução geral na sustentação da parte afetada do aerofólio. Os fabricantes desenvolveram diferentes métodos para neutralizar essa ação. *Winglets* podem ser adicionados à ponta de um aerofólio para reduzir esse fluxo. Os *winglets* funcionam como uma barragem que impede a formação do vórtice. Os *winglets* podem estar na parte superior ou inferior do aerofólio. Outro método de combater o fluxo é afunilar a ponta do aerofólio, reduzindo o diferencial de pressão e suavizando o fluxo de ar ao redor da ponta.

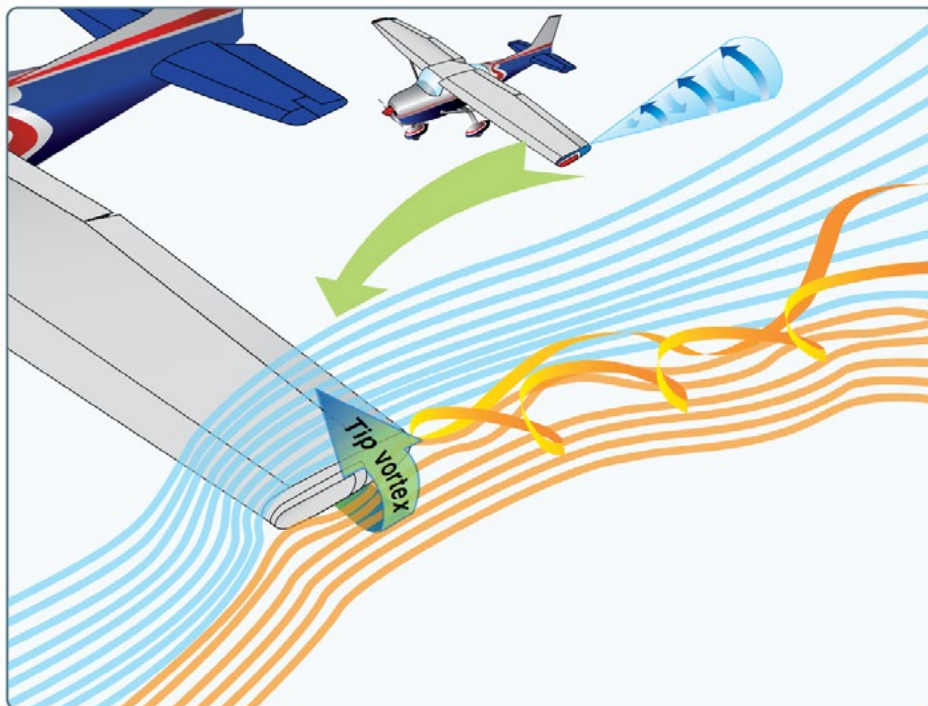


Figura 8. Vórtice de ponta da asa.

RESUMO DO CAPÍTULO

As aeronaves modernas da aviação geral têm características que podem ser consideradas de alto desempenho. Portanto, é cada vez mais necessário que os pilotos apreciem e entendam os princípios nos quais se baseia a arte de voar. Para obter informações adicionais sobre os princípios discutidos neste capítulo, visite o Guia de Aerodinâmica para Iniciantes da Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (Nasa) em <https://www.nasa.gov/stem-content/beginners-guide-to-aerodynamics/>.

QUER SABER MAIS?

Acompanhe a série Asas do Conhecimento para ficar por dentro dos manuais aeronáuticos. Além desse material, a Anac oferece cursos e seminários para aumentar a segurança aérea no [Portal de Capacitação da Agência](#).

Para obter mais informações, entre em contato com a Agência por meio do serviço [“Fale com a Anac”](#). E não se esqueça de seguir a Anac nas redes sociais para ficar por dentro das últimas notícias e atualizações.

Super App da Anac

Conheça o aplicativo que facilita a gestão de cursos e horas de voo, emissão de Certificados de Habilitação Técnica (CHT), pagamentos de taxas, além de acesso a clínicas e escolas credenciadas.

O aplicativo também envia notificações para auxiliar no cumprimento de prazos e obrigações, simplificando processos e agilizando etapas.



Baixe gratuitamente





ACOMPANHE A ANAC NAS REDES SOCIAIS



[/oficialanac](#)



[/company/oficial-anac](#)



[/oficialanac](#)



[/oficialanacbr](#)



[/oficial_anac](#)