



Como os Aviões Voam: Uma Descrição Física do Vôo

Hoje em dia muita gente já andou de avião e muitos se perguntaram como é que um avião voa. A resposta que normalmente se obtém ou é enganosa ou simplesmente errada. Esperamos que as respostas encontradas neste artigo ajudem a dirimir concepções alternativas acerca da sustentação de aviões bem como sejam adotadas como argumento quando se tiver que explicar aos outros o porquê dos aviões voarem. Mostraremos aqui que é mais fácil explicar a sustentação se partirmos das leis de Newton ao invés do princípio de Bernoulli. Mostraremos também que a explicação que mais comumente nos é ensinada é, no mínimo, enganosa e que a sustentação é devido ao fato que a asa desvia o ar para baixo. A maior parte deste ar desviado é puxada da parte de cima da asa.

Começamos por três descrições da sustentação de asas que são normalmente apresentadas em livros-texto e manuais de treinamento.

Chamaremos a primeira de *descrição aerodinâmica matemática* da sustentação, usada por engenheiros aeronáuticos. Esta abordagem usa uma matemática complexa e/ou simulações computacionais para calcular a sustentação de uma asa. Ela usualmente faz uso de um conceito matemático chamado *circulação* para com ele calcular a aceleração do ar sobre a asa. A circulação é uma medida da rotação aparente do ar em torno da asa. Embora prático na hora de calcular a sustentação, esta descrição não nos fornece uma compre-

ensão intuitiva sobre o vôo.

A segunda descrição possível será por nós chamada de *descrição popular* e é baseada no princípio de Bernoulli. A vantagem maior desta descrição é que ela é fácil de ser entendida e tem sido ensinada há anos. Devido a sua simplicidade, ela é usada na maioria dos manuais de treinamento de vôo para explicar a sustentação de uma asa. Sua principal desvantagem é o fato de estar baseada no princípio dos *tempos de trânsito iguais*, ou ao menos na hipótese de que uma vez que o ar tem um caminho maior para percorrer por cima da asa, ele tem que fazê-lo mais rapidamente. Esta abordagem é focada no formato da asa e impede que se entendam vários fenômenos importantes como o vôo invertido, a potência, o efeito-solo e a dependência da sustentação com o ângulo de ataque da asa.

A terceira maneira de descrever a sustentação, reivindicada neste artigo, é o que chamaremos

de *descrição física*. Ela é baseada essencialmente nas três leis de Newton e em um fenômeno chamado de efeito Coanda. Esta descrição é a única capaz de explicar os fenômenos associados ao vôo, permitindo que sejam entendidos. Ela é útil para uma compreensão precisa de certas relações entre parâmetros de vôo, como o modo pelo qual a potência aumenta com a carga ou a velocidade de estol aumenta com a altitude¹. Ela também serve para fazer cálculos simples (com lápis e papel) da sustentação. A descrição física da sustentação também é de grande valia para

Muitos se perguntam como é que um avião voa. Ao perguntar sobre isso, a resposta que normalmente se obtém ou é enganosa ou simplesmente errada

.....
David Anderson

Fermi National Accelerator
Laboratory, Batavia
e-mail: dfa@fnal.gov

.....
Scott Eberhardt

Boeing Company, Seattle
Foi professor por longo tempo do
Departamento de Aeronáutica e
Astronáutica da Universidade de
Washington
e-mail: Scott.Eberhardt@boeing.com

.....
Tradução e resumo: **S.R. Dahmen**
.....

Há uma controvérsia sobre a causa da sustentação que permite a aviões se manterem no ar. A explicação usualmente encontrada nos livros texto é aquela baseada no Princípio de Bernoulli e no princípio dos tempos de trânsito iguais. Neste artigo, D. Anderson e S. Eberhardt, além de mostrarem que este último é incorreto, defendem que a sustentação pode ser entendida apenas em se considerando as leis de Newton aplicadas ao movimento do ar entorno da asa. No artigo seguinte, C.N. Eastlake argumenta que tanto as explicações baseadas em Newton e Bernoulli estão corretas, e seu uso é uma questão de conveniência em função dos dados disponíveis.

pilotos que precisam de uma intuição a respeito da razão dos aviões voarem.

A descrição popular da sustentação

Aos estudantes de Física e aerodinâmica é ensinado que o avião voa por causa do princípio de Bernoulli, que estabelece que se a velocidade do ar aumenta, sua pressão diminui (na verdade isto nem sempre é correto. O ar flui muito rapidamente ao lado do orifício da fuselagem onde fica o altímetro, mas mesmo assim este faz uma leitura correta da altitude da aeronave). O argumento é que a asa se sustenta porque o ar sobre ela flui mais rapidamente, criando uma região de baixa pressão. Esta explicação satisfaz os curiosos e poucos questionam as conclusões. Alguns podem ficar imaginando o que faria o ar andar mais rapidamente por cima da asa, e é justamente aí que a explicação popular desmorona.

Para poder explicar o porquê do ar fluir com maior velocidade por cima da asa, muitos recorrem a um argumento geométrico segundo o qual a distância que o ar tem que vencer está diretamente relacionada com a sua velocidade. A afirmação costumeira é que quando o ar se separa no bordo de ataque, a parte que vai por cima da asa tem que chegar ao bordo de fuga no mesmo tempo que a parte do ar que foi por baixo. Isto é o chamado princípio dos tempos de trânsito iguais.

A pergunta que fica é se os números que são obtidos com a descrição realmente fazem sentido. Tomemos um exemplo de um Cessna 172, que é um avião muito popular de quatro lugares e asa superior. As asas precisam levantar uma carga máxima de vôo de 1.045 kg. O caminho percorrido pelo ar que passa por cima da asa é aproximadamente 1,5% maior que o do caminho de baixo. Usando a descrição popular, a asa criaria apenas algo no entorno de 2% da sustentação exigida a uma velocidade de 104 km/h, um “vôo lento” para este tipo de avião. Na verdade, os cálculos mostram que seria necessária uma velocidade de no mínimo 640 km/h para se conseguir sustentação sufi-

ciente. Pode-se inverter a questão e perguntar qual deveria ser a diferença mínima de caminhos para que se conseguisse a sustentação necessária em vôo lento? A resposta é 50%, o que daria uma espessura de asa quase tão grande quanto o comprimento de sua corda.

Mas quem disse que o ar que vai por cima tem que chegar ao bordo de fuga ao mesmo tempo em que o ar que vai por baixo? A Fig. 1 mostra o fluxo de ar no entorno de uma asa em uma simulação de túnel de vento. Neste tipo de simulação, fumaça é periodicamente introduzida no túnel. O que se pode ver é que o ar que passa por cima da asa chega ao bordo de fuga consideravelmente antes que o ar que vai por baixo. Isto quer dizer que o ar de cima tem uma aceleração muito maior do que aquela prevista pelo princípio dos tempos de trânsito iguais. Além disso, como uma análise mais detalhada nos mostra, o ar que passa pela parte de baixo da asa tem uma velocidade reduzida em relação àquela do ar que flui livremente (longe das asas). O princípio dos tempos de trânsito iguais funciona apenas para asas com sustentação zero.

Decorre também da explicação popular o fato de que vôos invertidos são impossíveis. Ela certamente não considera aviões de acrobacia, que têm asas simétricas (a parte superior e a parte inferior da asa tem o mesmo perfil) e muito menos como uma asa se ajusta às grandes variações de carga quando sai de um mergulho ou faz uma curva acentuada.

A pergunta então é: por qual motivo a explicação popular dominou por tanto tempo? Uma resposta é que o princípio de Bernoulli é de fácil entendimento. Não há nada errado com o princípio ou com a afirmação de que o ar flui mais rapidamente pela parte superior da asa. Porém, como a discussão acima sugere, não se pode compreender inteiramente a susten-

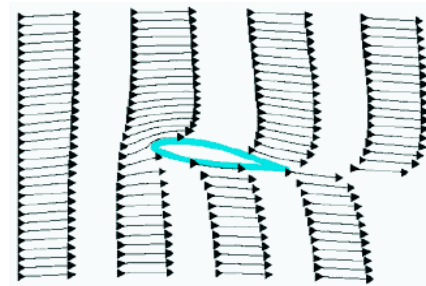


Figura 1. Simulação do fluxo de ar por uma asa em um túnel de vento com fumaça.

tação com esta explicação². O problema é que falta um ponto crucial quando aplicamos o princípio de Bernoulli. Podemos calcular as pressões no lado de cima e de baixo da asa se soubermos a velocidade do ar nestas regiões, mas como medir a velocidade? Como veremos em breve, o ar é acelerado sobre a asa porque a pressão é menor, e não o contrário.

Um outro problema fundamental da descrição popular é que ela ignora o trabalho realizado. Sustentação requer potência (trabalho por unidade de tempo). Como veremos, a potência é uma das chaves para se compreender muitos dos interessantes fenômenos associados à sustentação.

As leis de Newton e a sustentação

Então, como é que uma asa gera sustentação? Para entender isto a primeira e terceira leis de Newton (sobre a segunda falaremos mais tarde)

devem ser lembradas. A primeira lei de Newton afirma que um corpo em repouso permanece em repouso, ou um corpo em movimento continuará em movimento retilíneo uniforme a menos que uma força externa atue sobre ele. Ou seja, se vemos o escoamen-

O argumento de que a asa se sustenta porque o ar sobre ela flui mais rapidamente, criando uma região de baixa pressão, satisfaz os curiosos pouco atentos. Mas se tentarmos imaginar o que faria o ar andar mais rapidamente por cima da asa, bem, não encontraremos uma boa explicação...

to se curvar ou se o ar, a princípio parado, for repentinamente acelerado, significa que há uma força atuando sobre ele. A terceira lei de Newton afirma que para cada ação há uma reação igual em magnitude, mas no sentido



Figura 2. Representação muito comum do fluxo de ar por uma asa. A asa não tem qualquer sustentação.

contrário. Por exemplo, um objeto sobre uma mesa exerce uma força sobre ela, e a mesa exerce uma força contrária que o mantém no lugar. A fim de criar sustentação, a asa precisa fazer algo com o ar. Aquilo que a asa faz com o ar é a ação, enquanto a sustentação representa a reação.

Comparemos duas figuras para ver as linhas de corrente de ar pela asa. Na Fig. 2 o ar vem direto em direção à asa, a contorna e sai direto pela parte de trás da mesma. Todos já vimos figuras semelhantes a esta. Porém o ar atrás que sai da asa está exatamente igual a quando ele estava na frente da asa. Não há uma ação resultante sobre o ar e, portanto não pode haver sustentação!

A Fig. 3 mostra as linhas de corrente como elas realmente deveriam ser desenhadas. O ar passa pela asa e é encurvado para baixo. A primeira lei de Newton diz que deve haver uma força sobre o ar para encurvá-lo (a ação). A terceira lei de Newton diz que deve haver uma força igual, mas em sentido contrário (para cima) sobre a asa (reação). Para poder criar uma sustentação, a asa precisa desviar uma grande quantidade de ar para baixo.

A sustentação de uma asa é igual à variação do momento do ar que ela está desviando para baixo. O momento é o produto da massa pela velocidade ($m\mathbf{v}$). A forma mais comum de expressar a segunda lei de Newton é $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, ou seja, força é igual à massa vezes aceleração. Nesta formulação a lei nos diz qual a força necessária para acelerar um objeto com uma certa



Figura 3. Fluxo de ar verdadeiro pela asa, mostrando o upwash e o downwash.

massa. Uma outra maneira de expressar a lei de Newton é dizendo: a sustentação de uma asa é proporcional à quantidade de ar sendo desviado para baixo multiplicado pela velocidade vertical da mesma³. Simples assim. Para conseguir um empuxo maior, a asa ou tem que deslocar mais ar para baixo (massa) ou aumentar a velocidade vertical. A componente vertical da velocidade do ar atrás da asa é a componente vertical do *downwash*. A Fig. 4 mostra como o piloto vê o *downwash* (ou como o vemos em um túnel de vento). A figura mostra também como uma pessoa no chão vê o *downwash* à medida que a asa passa por ela. Para o piloto, o ar sai pelo bordo de fuga da asa com um ângulo aproximadamente igual ao ângulo de ataque e com uma velocidade aproximadamente igual à velocidade da aeronave. Para um observador no solo, se ela ou ele pudessem ver o ar, o veriam saindo do bordo de fuga quase que na vertical com uma velocidade relativamente baixa. Quanto

A sustentação de uma asa é igual à variação do momento do ar que ela está desviando para baixo. De outra maneira, podemos dizer que ela é proporcional à quantidade de ar sendo desviado para baixo multiplicado pela velocidade vertical da mesma

maior o ângulo de ataque da asa maior a velocidade vertical do ar. Do mesmo modo, para um ângulo de ataque fixo, quando maior a velocidade da aeronave maior a velocidade vertical do ar. Tanto o aumento do ângulo de ataque quanto o aumento da velocidade do avião fazem aumentar o comprimento da componente vertical para baixo da velocidade. É esta velocidade vertical que dá à asa sua sustentação.

Como já dito, um observador em terra veria o ar atrás da asa saindo quase que diretamente para baixo. Isto pode ser visto quando se observa

a estreita coluna de ar atrás de uma hélice, um ventilador caseiro ou sob os rotores de um helicóptero. Todos são exemplos de asas giratórias. Se o ar saísse das pás com certo ângulo, ele produziria mais um cone de vento do que uma coluna estreita. A asa desenvolve a sustentação transferindo momento para o ar. Para um voo nivelado em linha reta, este momento eventualmente acaba atingindo o chão. Se um avião pudesse voar sobre uma balança gigante, a balança conseguiria pesá-lo.

Façamos agora um cálculo simples para ver quanto de ar uma asa pode separar. Tomemos por exemplo o Cessna 172 com uma massa de aproximadamente 1.045 kg. Com uma velocidade de cruzeiro de 220 km/h e supondo um ângulo de

ataque efetivo de 5°, obtemos uma velocidade vertical do ar de aproximadamente 18 km/h à direita da asa. Se supusermos que a velocidade vertical média do ar desviado é metade deste valor, podemos calcular da segunda lei

de Newton que a quantidade de ar desviado é da ordem de 5 ton/s. Assim, um Cessna 172 em velocidade de cruzeiro está desviando aproximadamente uma quantidade de massa de ar 5 vezes maior que a sua própria massa a fim de produzir uma sustentação. Imagine quanto de ar é desviado por um Boeing 777 de 250 toneladas durante a decolagem.

Desviar tanto ar assim para baixo é um forte argumento contra a idéia de que a sustentação é apenas um efeito da superfície da asa (quer dizer, apenas uma pequena quantidade de ar no entorno da asa contribui para a

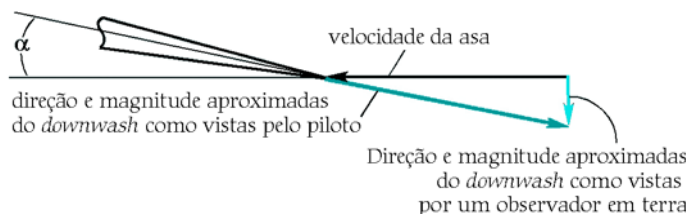


Figura 4. Como o downwash é visto pelo piloto e por um observador em terra.

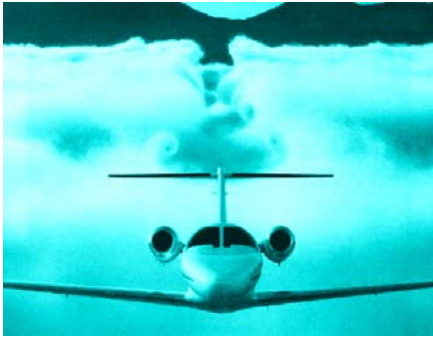


Figura 5. *Downwash* e vórtices de asas na neblina. (Paul Bowen, cortesia da Cessna Aircraft Co.).

sustentação), como se deduz da explicação popular. Pois, para poder desviar 5 ton/s, a asa do Cessna 172 teria que acelerar todo o ar dentro de uma distância de 7,3 m acima da asa. Não nos esqueçamos de que a densidade do ar no nível do mar é de aproximadamente 1 kg/m^3 . A Fig. 5 mostra o efeito do ar sendo jogado para baixo pela asa. Surge um enorme buraco na neblina causado pelo *downwash* de um avião que acabou de sobrevoá-la.

Como, então, a asa desvia tanto ar? Quando o ar se curva ao redor do topo da asa, ele puxa o ar acima dele acelerando-o para baixo. Caso contrário haveria lacunas no ar acima da

asa. O ar é puxado de cima. Isto faz com que a pressão do ar acima da asa se torne menor. A aceleração do ar acima da asa para baixo é que cria a sustentação (na próxima seção discutiremos a razão pela qual a asa puxa o ar com força suficiente para gerar sustentação).

Como podemos ver na Fig. 3, algo que complica esta imagem é o efeito do *upwash* no bordo de ataque da asa. À medida que ela se desloca, o ar não apenas é empurrado para baixo na parte de trás da asa como é também empurrado para cima no bordo de ataque. Este *upwash*, na verdade, provoca uma sustentação negativa e mais ar precisa ser jogado para baixo para compensar este efeito. Discutiremos isso mais para frente quando falarmos do efeito solo.

Como podemos ver na Fig. 3, algo que complica esta imagem é o efeito do *upwash* no bordo de ataque da asa. À medida que ela se desloca, o ar não apenas é empurrado para baixo na parte de trás da asa como é também empurrado para cima no bordo de ataque. Este *upwash*, na verdade, provoca uma sustentação negativa e mais ar precisa ser jogado para baixo para compensar este efeito. Discutiremos isso mais para frente quando falarmos do efeito solo.

A parte superior da asa faz muito mais para mover o ar do que a parte de baixo. Por este motivo, aviões podem carregar compartimentos sob as asas, mas não em seu topo, onde elas interfeririam na sustentação

Costuma-se olhar para o fluxo de ar do ponto de vista do referencial da asa. Em outras palavras, para um piloto, é o ar que se move e a asa que está parada. Já afirmamos que uma pessoa em terra veria o ar saindo do bordo de fuga da asa quase na vertical. Mas o que faz o ar embaixo da asa? Na Fig. 6 mostramos uma foto instantânea de como as moléculas do ar se deslocam à medida que a asa passa pelo observador. Lembre-se que nesta figura o ar está inicialmente em repouso e a asa é que se move. A seta 1 vira a seta 2 e assim por diante. À frente do bordo de ataque o ar se move para cima (*upwash*). No bordo de fuga, o ar desloca-se para baixo (*downwash*). Sobre a asa o ar é acelerado em direção ao bordo de fuga. Embaixo, o ar é levemente acelerado para frente.

Porque o ar acompanha este padrão? Primeiro nos lembremos que o ar é considerado um fluido incompressível para vôos de baixa velocidade. Isto significa que ele não pode mudar seu volume e há uma resistência ao surgimento de espaços vazios. Bem, mas o ar foi acelerado no topo da asa pela redução da pressão. Isto faz com que o ar seja sugado da parte da frente

da asa e seja expelido para trás e para baixo da asa. É preciso compensar este deslocamento de ar e, portanto, o ar se move no entorno da asa para suprir esta falta. Isto é análogo ao escoamento de

água em torno do remo de uma canoa. Esta circulação do ar em torno da asa não é a força motriz que produz sustentação tanto quanto a circulação da água em torno do remo não é responsável pelo movimento deste, embora seja verdade que se for possível calcular a circulação do ar ao redor da asa, então a sustentação pode ser calculada. A sustentação é proporcional à circulação.

Uma observação que podemos fazer, a partir da Fig. 6, é que a parte superior da asa faz muito mais para mover o ar do que a parte de baixo. A superfície superior é, deste modo,



Figura 6. Direção do movimento do ar em torno de uma asa como vista por um observador em terra.

mais importante. Por este motivo, aviões podem carregar coisas sob as asas, como tanques descartáveis ou compartimentos de armazenamento, mas não em seu topo, onde elas interfeririam na sustentação. É por isso que *struts*⁴ sob as asas são comuns, mas as mesmas sobre as asas são historicamente raras. Um *strut* ou qualquer obstrução sobre o topo da asa interferiria na sustentação da mesma.

Efeito Coanda

Uma questão que surge naturalmente é como a asa desvia o ar para baixo. Quando um fluido que escoar encontra uma superfície curva pela frente, ele tentará acompanhar o perfil daquela superfície. Para ver este efeito, segure um copo debaixo de um filete de água de uma torneira de modo a fazer com que a água toque levemente o lado do copo. Ao invés de continuar fluindo na vertical, a presença do copo faz a água grudar-se nele e escorrer pela sua superfície, como mostra a Fig. 7. Esta tendência dos fluidos de acompanharem uma superfície curva é conhecida como efeito Coanda. Sabemos, porém, da primeira lei de Newton, que se o líquido se encurva é porque deve haver uma força atuando sobre ele, e a terceira lei de Newton nos diz que o fluido exerce uma

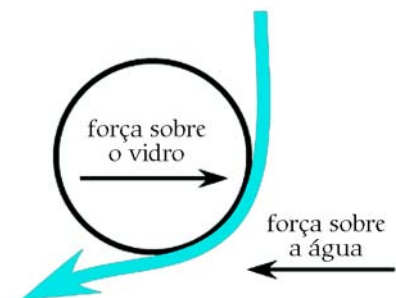


Figura 7. O efeito Coanda.

força de reação igual, mas em sentido oposto sobre o copo.

Então por que o fluido acompanha o perfil da superfície? A resposta é a viscosidade, a resistência ao escoamento que também faz com que o ar tenha certa “aderência”. A viscosidade do ar é pequena, mas o suficiente para fazê-lo querer se grudar na superfície. Imediatamente sobre a superfície, a velocidade relativa entre esta e as moléculas do ar é zero (razão pela qual não se consegue tirar a poeira de um carro jogando água sobre ele). Um pouco acima da superfície o fluido tem uma pequena velocidade e quanto mais longe nos afastamos da superfície, mais aumenta a velocidade do fluido

Há vários tipos de asa: convencionais, simétricas, convencionais em vôo invertido, etc. O que todas elas têm em comum é um ângulo de ataque em relação ao ar que contra elas sopra...

até que ela atinja o valor do fluxo livre. Uma vez que o fluido na superfície muda de velocidade, seu fluxo é encurvado em direção à superfície por forças de cisalhamento. A menos que a curvatura da superfície seja muito abrupta, o fluido seguirá o perfil da mesma. O volume de ar ao redor da asa que parece estar parcialmente grudado a ela é chamado de “camada limite” e tem menos de 2,5 cm de espessura mesmo em asas grandes.

Olhe novamente para a Fig. 3. As magnitudes das forças sobre o ar (e sobre a asa) dependem de quão “fechadas” são as curvas que o ar faz. Quanto mais a curva for fechada, maiores as forças atuantes. Note que a maior parte da sustentação ocorre na parte dianteira da asa. Na verdade, metade da sustentação total de uma asa surge na região dianteira que corresponde a 1/4 do comprimento da corda.

Sustentação como função do ângulo de ataque

Há vários tipos de asa: convencionais, simétricas, convencionais em vôo invertido, as asas dos biplanos antigos que pareciam pranchas curvas e a famosa “porta de celeiro” (*barn door*). Em todos estes casos a asa está jogando ar para baixo, ou mais precisamente, puxando o ar sobre ela para baixo (embora as primeiras asas usassem

uma contribuição significativa da parte de baixo). O que todas estas asas têm em comum é um ângulo de ataque em relação ao ar que contra elas sopra. O ângulo de ataque é o parâmetro mais importante que determina a sustentação da asa.

Para melhor entender o papel do ângulo de ataque, é útil introduzirmos o conceito de ângulo de ataque “efetivo”, cujo valor zero é definido como o ângulo entre a asa e o ar para o qual a sustentação é nula. Ao se mudar o ângulo de ataque para cima ou para baixo, descobre-se que a sustentação é proporcional ao ângulo. A Fig. 8 ilustra como a sustentação de uma asa típica varia com o ângulo de ataque. Uma

relação semelhante a esta existe para todo tipo de asa, independentemente de sua forma - isto vale para a asa de um 747, para uma asa invertida ou para a sua mão do lado de fora da janela do carro. A asa invertida pode ser explicada em termos de seu ângulo de ataque, não obstante sua aparente contradição com a explicação popular da sustentação. Um piloto ajusta o ângulo de ataque para assim conseguir ajustar a sustentação à velocidade e à carga da aeronave. Para se entender a sustentação, o ângulo de ataque desempenha papel mais importante do que detalhes da forma das asas. O formato da asa aparece quando queremos entender as características do estol ou do arrasto a grandes velocidades.

A sustentação diminui tipicamente a partir de um “ângulo crítico” de 15°. As forças necessárias para encurvar o fluxo de ar em ângulos tão íngremes são maiores que a viscosidade do ar pode suportar, e o ar começa a se desprender da asa. Esta separação entre o fluxo de ar e a parte superior da asa é o chamado estol.

A asa enquanto “concha” de ar

Gostaríamos agora de introduzir uma nova imagem mental da asa.

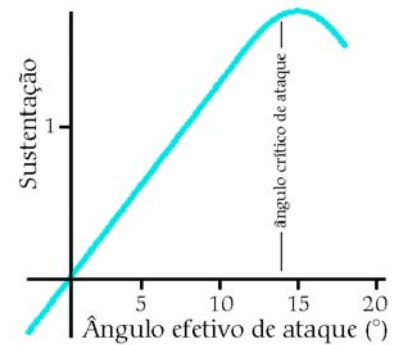


Figura 8. Sustentação vs. ângulo de ataque.

Costumamos imaginar a asa como sendo uma lâmina delgada que vai cortando o ar e de alguma maneira mágica gera uma sustentação. A nova idéia que gostaríamos de adotar aqui é aquela da asa como uma concha que desvia certa quantidade de ar da direção horizontal para uma direção aproximadamente igual ao ângulo de ataque, como mostra a Fig. 9. Para asas de aviões típicos, podemos falar com uma boa medida de aproximação que a área da concha é proporcional à área da asa. O formato da concha é aproximadamente elíptico para todas as asas, como ilustrado na figura. Uma vez que a sustentação é proporcional ao volume de ar desviado, ela é, portanto, também proporcional à área da asa.

Como dito anteriormente, a sustentação gerada por uma asa é proporcional à quantidade de ar deslocado para baixo multiplicado pela sua compo-

nente vertical de velocidade. À medida que um avião aumenta sua velocidade, a concha desvia maior quantidade de ar. Como a carga sobre as asas não aumenta, a velocidade vertical do ar deve diminuir na mesma proporção. Assim o ângulo de ataque precisa diminuir para manter constante a sustentação. Quanto mais alto sobe o avião, menos

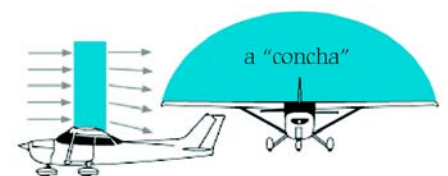


Figura 9. A asa enquanto “concha”.

denso se torna o ar e a concha desvia uma quantidade menor de ar para uma mesma velocidade. Assim, para compensar, é preciso aumentar o ângulo de ataque. Os conceitos desta seção serão utilizados para explicarmos a sustentação de uma maneira que seria impossível com a explicação popular.

Sustentação requer potência

Quando um avião passa por sobre algum lugar, o ar que estava parado anteriormente adquire uma velocidade para baixo, ou seja, o ar passa a se movimentar após a passagem do avião. Ao ar foi dada energia. Potência é energia, ou trabalho por unidade de tempo e, portanto, sustentação requer potência. Esta vem dos motores do avião (ou da gravidade e das correntes térmicas no caso de planadores).

Quanta potência é necessária para voar? Se dermos um tiro com uma bala de massa m e velocidade v a energia dela será $1/2mv^2$. Do mesmo modo, a energia do ar que foi movido para baixo é proporcional à quantidade do mesmo e ao quadrado da velocidade por ele adquirida. Mas já mencionamos o fato de que a sustentação de uma asa também é proporcional à quantidade de ar desviado multiplicado pela componente vertical da velocidade adquirida. Assim, a potência necessária para levantar um avião é proporcional à carga (ou peso) multiplicado pela velocidade vertical do ar. Se a velocidade do avião dobra, dobra a quantidade de ar desviado para baixo. Assim, para manter uma sustentação constante, o ângulo de ataque tem que diminuir para que assim a velocidade vertical caia pela metade de seu valor inicial. A potência necessária para a sustentação se reduz à metade. Isto mostra que a potência necessária para manter um avião no ar se torna menor com o aumento da velocidade do avião. Na verdade, mostramos que a potência necessária para gerar sustentação é inversamente proporcional à velocidade do avião.

Porém, todos nós sabemos que para nos deslocarmos mais rápido (em velocidade de cruzeiro) precisamos aplicar mais potência. Disto concluímos que há algo mais por trás da

potência do que simplesmente a potência necessária para manter a sustentação. A potência associada à sustentação é chamada de potência "induzida". Potência também se faz necessária para vencer o que chamamos de arrasto "parasitário", que é o arrasto associado com o movimento das rodas, das antenas e dos *struts* sustentadores de asas através do ar. A energia que um avião fornece às moléculas de ar em função do impacto é proporcional ao quadrado da velocidade ($1/2mv^2$). O número de moléculas com as quais o avião se choca por unidade de tempo é proporcional à velocidade. Quanto mais rápido se voa, maior a taxa de impacto. Assim a potência parasitária necessária para se superar o arrasto parasitário aumenta proporcionalmente à velocidade.

A Fig. 10 mostra as "curvas de potência" para a potência induzida, parasitária e total (a soma das duas primeiras). De novo, a induzida varia com $1/v$ e a segunda com v . Para velocidades baixas, a potência necessária é dominada pela potência induzida. Quanto mais devagar se voa, menor o ar deslocado e, portanto, o ângulo de ataque deve aumentar para aumentar a velocidade vertical do ar. Pilotos aprendem a voar no "lado de trás" da curva de potência para assim aprender a reconhecer que o ângulo de ataque e a potência necessária para permanecer em vôo são consideráveis.

Em vôo de cruzeiro, a necessidade de potência é dominada pela potência parasitária. Uma vez que ela aumenta com o cubo da velocidade (v^3), um aumento no tamanho do motor do aeroplano contribui apenas para que ele ascenda mais rapidamente (maior taxa de ascensão), mas pouco faz

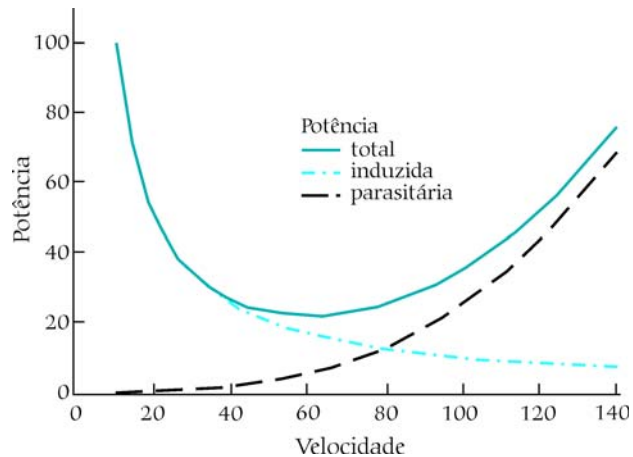


Figura 10. Necessidade de potência vs. velocidade.

para aumentar a velocidade de cruzeiro. Caso o tamanho do motor seja duplicado, obtém-se apenas um aumento de aproximadamente 25% na velocidade de cruzeiro.

Uma vez que agora sabemos como a potência necessária varia com a velocidade, podemos entender o arrasto, que é também uma força. Arrasto é simplesmente potência dividida pela velocidade. A Fig. 11 ilustra o arrasto induzido, o arrasto parasitário e o arrasto total como função da velocidade. O induzido varia como $1/v^2$ e o parasitário como v^2 . Olhando para estas figuras, podemos tirar algumas conclusões sobre como aviões são projetados. Aviões mais lentos, como planadores, são projetados visando a diminuir a potência induzida que domina em velocidades baixas. Aviões a hélice mais velozes têm que se preocupar mais com a potência parasitária, e aviões a jato com o arrasto

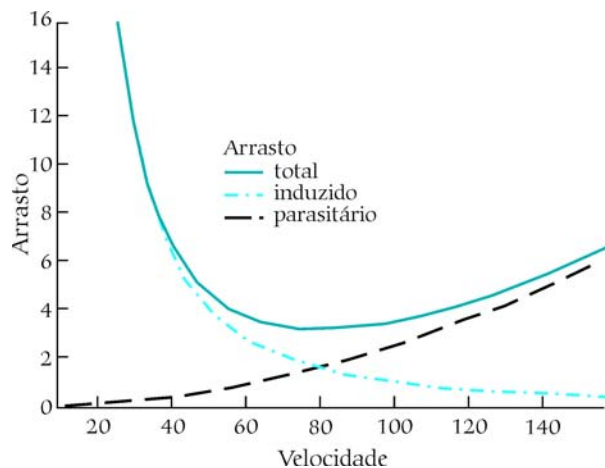


Figura 11. Arrasto vs. velocidade.

parasitário (a diferença entre estes está além da abrangência deste artigo).

Eficiência da asa

Em vôo de cruzeiro, uma quantidade não desprezível do arrasto de uma asa moderna é o arrasto induzido. O arrasto parasitário de uma asa de um Boeing 747 é equivalente àquela de um cabo de 1/2 polegada de espessura do mesmo comprimento. A pergunta então é o que afeta a eficiência de uma asa. Vimos que a potência induzida de uma asa é proporcional à velocidade vertical do ar. Se aumentássemos a área da asa, o tamanho de nossa concha também aumentaria, desviando mais ar. Deste modo, para uma mesma sustentação, a velocidade vertical (e, portanto o ângulo de ataque) teria que ser reduzida. Uma vez que a potência induzida é proporcional à velocidade vertical do ar, ela também é reduzida. Assim, a eficiência da sustentação de uma asa aumenta com a área da mesma. Quanto maior a asa, menor a potência induzida necessária para produzir uma mesma quantidade de sustentação, embora isto seja obtido com um aumento do arrasto parasitário.

Como discutiremos brevemente na seção sobre o efeito solo, a carga adicional sobre a asa em vôo reto e nivelado devido ao *upwash* é igual ao peso do avião vezes $2/AR$, onde AR (iniciais de *aspect ratio*) é a razão de aspecto definida como a razão entre a envergadura da asa e a corda média. Assim, quando temos que decidir entre duas asas de mesma área mas AR diferentes, a asa com maior AR é mais eficiente.

Algumas pessoas cometem a falácia de achar que sustentação não requer potência. Este erro vem do estudo de casos ideais da teoria de seções de asas (aerofólios) em aeronáutica. Quando nestes textos se lida com aerofólios, na verdade estão tratando do caso de um com envergadura infinita. Como vimos que a potência necessária para sustentação cai com

o aumento da área, um aerofólio de tamanho infinito não requer potência alguma para se sustentar no ar. Se para a sustentação não fosse necessária qualquer potência, aviões carregados teriam o mesmo alcance que quando vazios, e helicópteros poderiam voar em qualquer altitude e com qualquer carga. Melhor ainda, hélices (que são asas em rotação) não necessitariam de potência alguma para produzir tração. Infelizmente vivemos no mundo real, onde tanto sustentação quanto propulsão requerem potência.

Potência e carga sobre a asa

Vejam agora a relação entre potência e carga sobre a asa. Se a carga sobre uma asa é aumentada à velocidade constante da aeronave, a velocidade vertical do ar deslocado deve ser aumentada para compensar o aumento da carga. Isto se obtém aumentando o ângulo de ataque. Se o peso total de um avião do-

brar (como por exemplo em uma curva com $2g$)⁵, e a velocidade não variar, a velocidade do ar tem que dobrar para compensar o aumento da carga sobre as asas. A potência induzida, sendo proporcional ao produto da carga pela velocidade do ar desviado, deve ser quadruplicada, uma vez que ambos os fatores dobraram de valor. Ou seja, a potência induzida é proporcional ao quadrado da carga.

Uma maneira de medir a potência total é olhar para a taxa de consumo de combustível. A Fig. 12 mostra esta taxa em função do peso bruto de um avião de carga de grandes proporções viajando a uma velocidade constante (este gráfico foi

obtido de dados reais). Uma vez que a velocidade é constante, a mudança na taxa de consumo de combustível é devida à mudança da potência induzida. Os dados são ajustados por uma constante (potência parasitária) e um termo proporcional ao quadrado da carga. Este segundo termo é exatamente aquele que havíamos previsto na nossa discussão baseada nas leis de Newton sobre o efeito da carga sobre a potência induzida.

O aumento do ângulo de ataque com aumento de carga tem um lado negativo além daquele do aumento da potência necessária. Como mostrado na Fig. 8, uma asa eventualmente entrará em estol sempre que o ar não mais puder acompanhar o formato da superfície superior da asa, ou seja, quando o ângulo crítico é atingido. A Fig. 13 mostra o ângulo de ataque como função da velocidade do ar para o caso de uma carga fixa e uma curva de $2g$. O ângulo de ataque crítico no qual o avião entra em estol é constante e não depende da carga sobre a asa. O ângulo de ataque aumenta com a carga e a velocidade de estol aumenta com a raiz quadrada da carga. Assim, se dobrarmos a carga em uma curva com $2g$, a velocidade no qual o avião entra em estol aumenta em 40%. Um

Algumas pessoas cometem a falácia de achar que sustentação não requer potência. Este erro vem do estudo de casos ideais da teoria de seções de asas (aerofólios) em aeronáutica

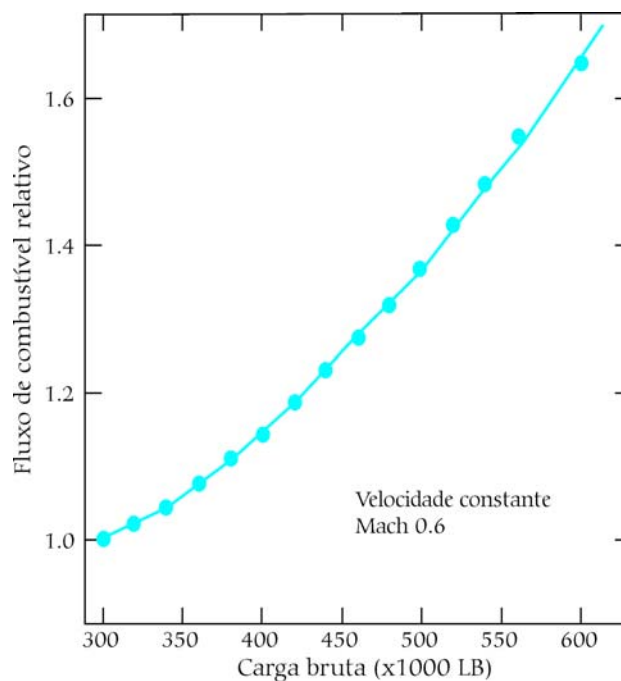


Figura 12. Consumo de combustível vs. carga bruta para um grande avião de transporte voando a uma velocidade constante.

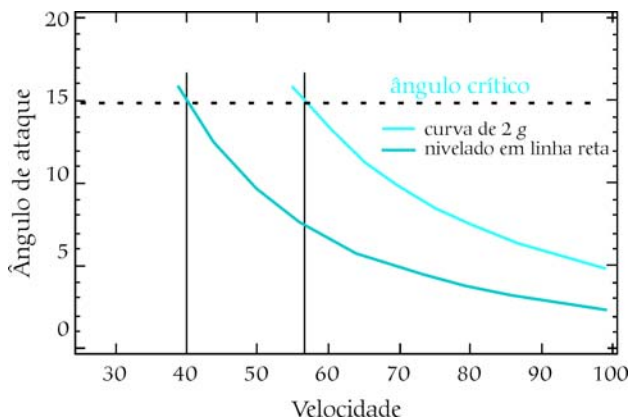


Figura 13. Ângulo de ataque vs. velocidade para um vôo plano e em linha reta e para uma curva de 2 g.

aumento na altitude aumentará ainda mais o ângulo de ataque em uma curva de 2 g. É por este motivo que pilotos treinam “estol acelerado”, que mostra que um avião pode entrar em estol em qualquer velocidade, uma vez que para cada velocidade sempre haverá uma carga que induzirá uma perda de sustentação.

Vórtices de asa

Podemos nos perguntar qual a aparência do *downwash* de uma asa. O *downwash* sai da asa como uma lâmina de ar e depende dos detalhes da distribuição de carga sobre a mesma. A Fig. 14 ilustra, por meio da condensação, a distribuição de sustentação em um avião durante uma manobra com um alto g. A partir desta figura podemos ver como a distribuição de carga muda da parte da asa junto à fuselagem até a sua ponta, o que significa que a quantidade de *downwash* deve ser diferente em diferentes pontos da asa. A parte da asa junto à fuselagem está “puxando” muito mais ar do que a parte da ponta. Por estar desviando uma quanti-



Figura 14. Condensação mostrando a distribuição de sustentação ao longo da asa (extraído de *Patterns in the Sky*, J.F. Campbell e J.R. Chambers, NASA, SP-514).

dade tão maior de ar, o efeito resultante é que a lâmina do *downwash* começará a enrolar-se sobre si própria para longe da fuselagem, da mesma maneira que o ar se curva sobre a parte superior da asa devido à mudança de sua velocidade. Isto é o que se chama de vórtice de asa. O quão fechados estes vórtices são depende da taxa de mudança da sustentação

ao longo da asa, ou seja são diretamente proporcionais à taxa de mudança. Na ponta da asa a sustentação deve cair rapidamente para zero, razão pela qual aí os vórtices são mais fechados. Este vórtice, chamado de vórtice de ponta da asa, é apenas uma pequena fração do vórtice total da asa, embora geralmente seja o mais visível. Voltando à Fig. 5, podemos claramente ver o surgimento dos vórtices de asa bem como dos de ponta da asa.

Winglets (aquelas pequenas extensões verticais na ponta de algumas asas) são empregadas para melhorar a eficiência das asas aumentando-as em comprimento efetivo e, portanto, em área. A sustentação da asa vai a zero na ponta porque ali o ar do topo e da parte de baixo se encontram. As *winglets* impedem que isso ocorra, de modo que a sustentação se estende para mais longe na asa. Uma vez que a eficiência aumenta com a área da

asa, isto causa um aumento de eficiência. O problema é que o projeto de *winglets* não é simples e elas podem, na verdade, piorar o desempenho se não forem projetadas corretamente.

O efeito solo

Um outro fenômeno comum e frequentemente incompreendido é o efeito solo, que é o aumento de eficiência da asa quando um avião voa a uma altitude igual ao comprimento da asa. Um avião com asa inferior sente uma redução de 50% no arrasto pouco antes de pousar. Este fenômeno é usado por grandes aves, que às vezes podem ser observadas voando pouco acima da superfície da água. Pilotos que decolam de pistas de grama alta ou pistas de decolagem macias também utilizam o efeito solo. Muitos pilotos erroneamente acreditam que este efeito é devido ao ar ser comprimido entre a asa e o chão.

Para entender este efeito, temos que olhar novamente para o *upwash*. Note, na Fig. 15, que o ar se desvia de seu fluxo horizontal para formar o *upwash*. A primeira lei de Newton diz que deve haver uma força sobre ele para que isto ocorra, e esta deve estar dirigida para cima. A terceira lei de Newton diz que deve haver uma força igual e oposta em sentido sobre a asa, ou seja, para baixo. O resultado é que um *upwash* aumenta a carga sobre a asa. Para compensar este aumento, a asa precisa voar com um ângulo de ataque maior e, portanto, com uma maior potência induzida. À medida

Winglets (aquelas pequenas extensões verticais na ponta de algumas asas) são empregadas para melhorar a eficiência das asas aumentando-as em comprimento efetivo e, portanto, em área

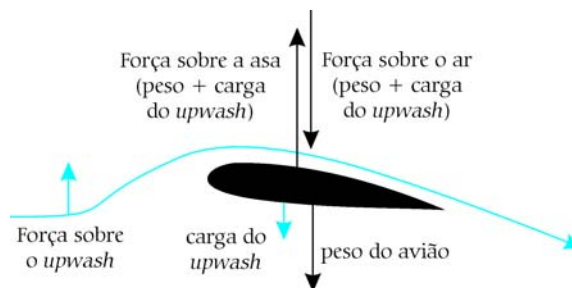


Figura 15. Asa no efeito solo.

que a asa se aproxima do chão, a circulação sob ela fica impedida de ocorrer. Como consequência, como se vê na Fig. 16, há uma redução no *upwash* e na carga adicional sobre a asa a ele devida. Como compensação, o ângulo de ataque diminui e com ela a potência induzida. A asa se torna mais eficiente.

A carga adicional devida ao *upwash* é igual ao peso da aeronave multiplicada por $2/AR$. A maioria dos aviões pequenos que tem um AR igual a 8 pode sentir uma redução de até 25% na carga sobre a asa devido ao efeito solo. Uma vez que a potência induzida é proporcional ao quadrado da carga, isto representa uma redução de 50% na potência. Estimamos anteriormente que um Cessna 172 voando a 220 km/h precisa deslocar aproximadamente 5 ton/s de ar para gerar sustentação. Em nossos cálculos desprezamos a contribuição do *upwash*. A quantidade de ar desviada é provavelmente próxima de 6 ton/s.

Conclusões

Façamos uma breve revisão do que aprendemos para que tenhamos uma idéia de como a descrição física nos permite melhor entender o voo. Primeiro aquilo que aprendemos:

- A quantidade de ar desviada pela asa é proporcional à velocidade da asa e à densidade do ar.
- A velocidade vertical do ar desviado é proporcional à velocidade da asa e ao ângulo de ataque.
- A sustentação é proporcional à quantidade de ar desviado multiplicado pela velocidade vertical do ar.
- A potência necessária à sustentação é proporcional à sustentação multiplicada pela velocidade vertical



Figura 16. Redução do *upwash* devido à proximidade do solo

do ar.

Vejamos agora algumas situações do ponto de vista físico e do ponto de vista da explicação popular.

- A velocidade do avião diminui. Neste caso a abordagem física diz que a quantidade de ar desviada diminui e, portanto o ângulo de ataque tem que aumentar para compensar a diminuição. A potência necessária para sustentação também tem que aumentar. A abordagem popular não consegue explicar estes fatos.

- A carga aumenta. A abordagem física diz que a quantidade de ar desviada continua a mesma, mas o ângulo de ataque tem que aumentar para produzir sustentação adicional. A potência necessária para sustentação também aumenta. Aqui também a abordagem popular não consegue dar conta destes fatos.

- Um avião faz um voo invertido. Para a abordagem física não há qualquer contradição nisto. O avião simplesmente ajusta o ângulo de ataque da asa invertida para conseguir a sustentação necessária. Na abordagem popular, o voo invertido é impossível.

Como vemos, a explicação popular, que se atém ao formato da asa,

pode ser satisfatória para muitos, mas ela não nos fornece as ferramentas necessárias para realmente entendermos o voo. A abordagem física é fácil de entender e muito mais poderosa.

Notas

¹A velocidade de estol é aquela abaixo da qual o avião não é mais capaz de se manter no ar (N.T.).

²Ver o artigo de Eastlake neste número.

³ $F = m \left(\frac{\Delta \mathbf{v}_a}{\Delta t} \right) + \left(\frac{\Delta m}{\Delta t} \right) \mathbf{v}_a = \left(\frac{\Delta m}{\Delta t} \right) \mathbf{v}_a$, se a velocidade do ar é constante. Para a sustentação, somente a componente vertical da aceleração é relevante (N.T.).

⁴*Struts* vem do inglês *structures* e é utilizado em aviação para se referir a quaisquer estruturas sob as asas que servem para lhe dar estabilidade estrutural. São normalmente usadas entre as asas de biplanos (N.T.).

⁵As asas devem gerar alguma sustentação extra para puxar o avião durante a curva (força centrípeta). Esta sustentação extra é usualmente medida em unidades da aceleração da gravidade g , de modo que uma curva moderadamente íngreme de 2 g equivale a duas vezes a força exercida pela gravidade (N.T.).

As coisas são mais belas quando vistas de cima

As invenções são, sobretudo, resultado de um trabalho teimoso

O meu primeiro balão, o menor, o mais lindo, o único que teve um nome: Brasil

Alberto Santos Dumont