



# Mecânica do Voo

Parafuso e Teoria de Voo de Alta Velocidade





## Referências Bibliográficas

- Newton Soler Saintive, Teoria de Voo, Editora Asa, 3ª Edição, 2001.
- Jorge M. Homa, Aerodinâmica e Teoria de Voo, Editora Asa, 27ª Edição, 2000.
- A.C. Kermode, Mechanics of Flight, Editora Pearson, 11ª Edição, 2006.
- E. Torenbeek e H. Wittenberg, FLIGHT PHYSICS - Essentials of Aeronautical Disciplines and Technology, with Historical Notes, Editora Springer, 2009.
- Theodore A. Talay, Introduction to the Aerodynamics of Flight, NASA SP-367, 1975



**Parafuso e teoria de voo de alta velocidade**

# Roteiro da Aula

- **Parafusos**
- **Estol**
- **Teoria de Voo de Alta Velocidade**

Capa: [http://www.matronics.com/photoshare/tis1\\_verod@scarlet.be.11.12.2008/Yak\\_52\\_\\_\\_\\_G-CBSS\\_FLAT\\_SPIN.jpg](http://www.matronics.com/photoshare/tis1_verod@scarlet.be.11.12.2008/Yak_52____G-CBSS_FLAT_SPIN.jpg) Yak-52 em parafuso chato.



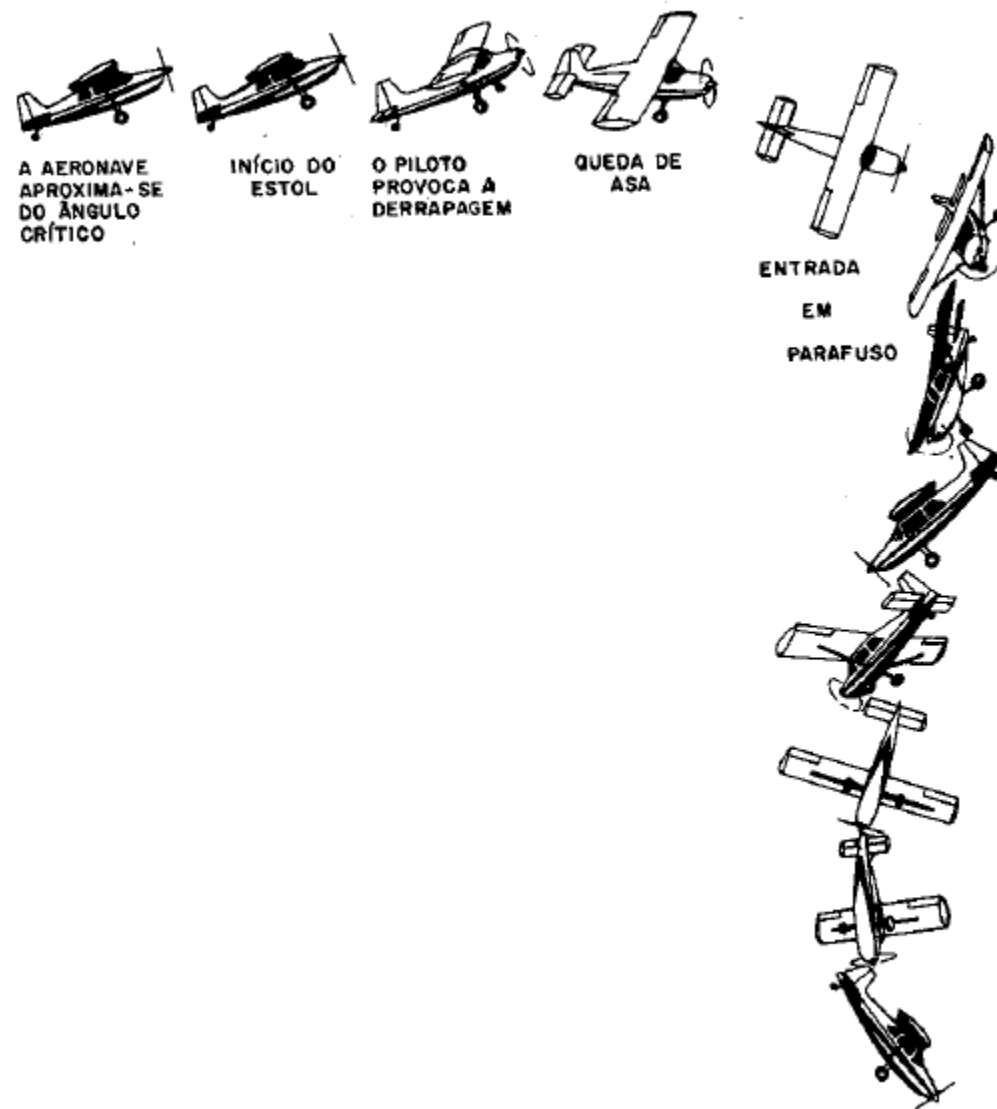
# PARAFUSOS

✓ O parafuso é uma condição não controlada de um avião totalmente estolado, na qual ele descreve uma trajetória espiral descendente e apresenta um estado de autorrotação da asa, ocasionado por um estol assimétrico.

## PARAFUSOS

✓ No parafuso o avião está:

- Estolado
- Rolando
- Guinando
- Picando
- Glissando
- Despencando





# PARAFUSOS

- ✓ A primeira condição para a ocorrência do parafuso é o estol, que é obtido movendo-se o manche progressivamente para trás, como num estol comum.
- ✓ A queda da asa, essencial para a entrada em parafuso, pode ocorrer de maneira acidental ou comandada, o piloto guina o avião com o leme ou usando aileron, pouco antes do estol.

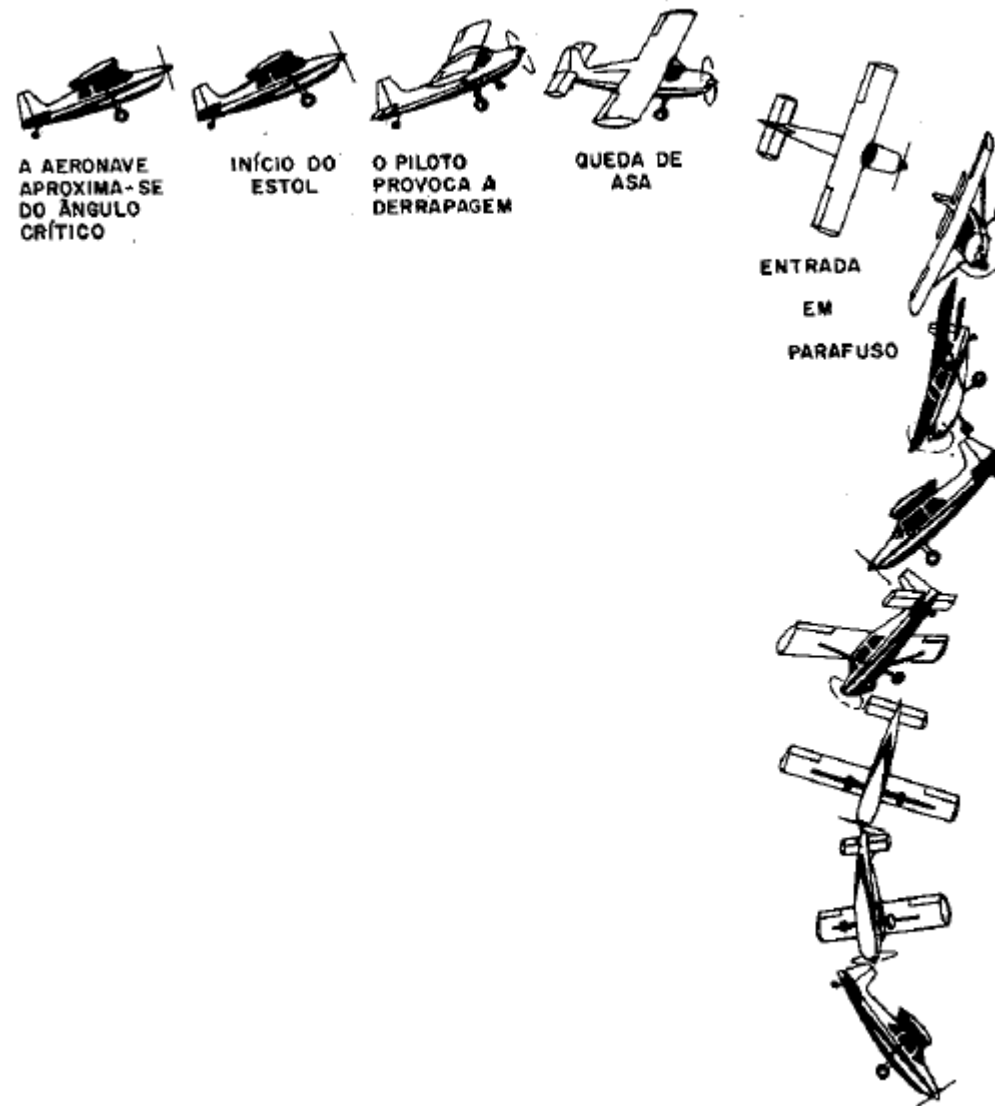




# PARAFUSOS

✓ Durante um parafuso comandado, quando o piloto guina o avião perto do estol:

- A asa externa aumenta a velocidade, produzindo mais sustentação, levantando-a. O ângulo de ataque diminui, afastando-a do estol.
- A asa interna reduz a velocidade e produz menos sustentação, abaixando. Seu ângulo de ataque aumenta, e a asa estola.

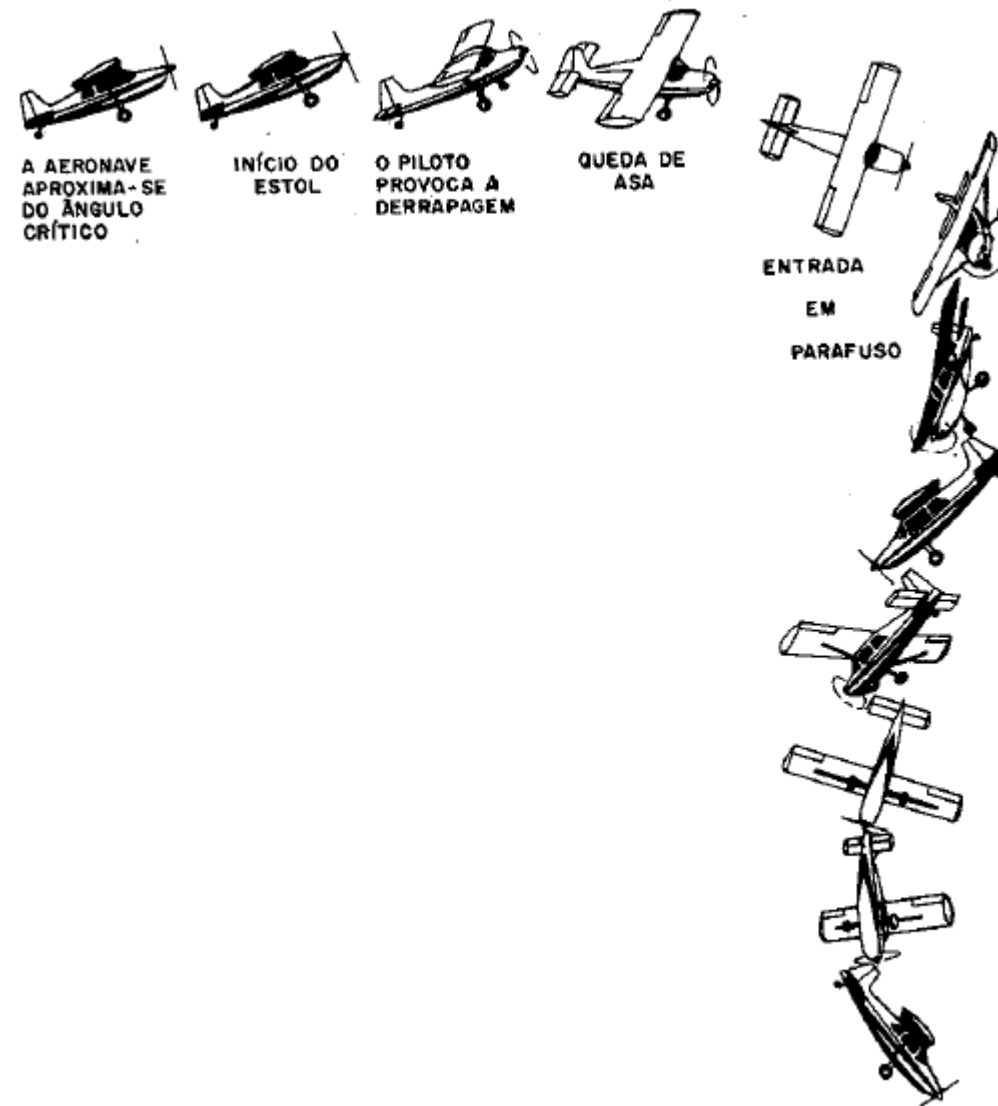




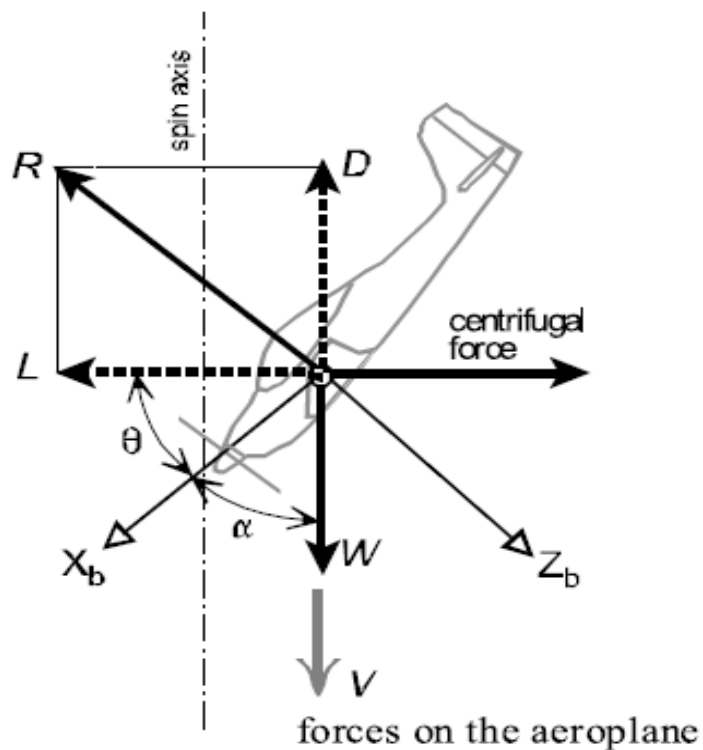


# PARAFUSOS

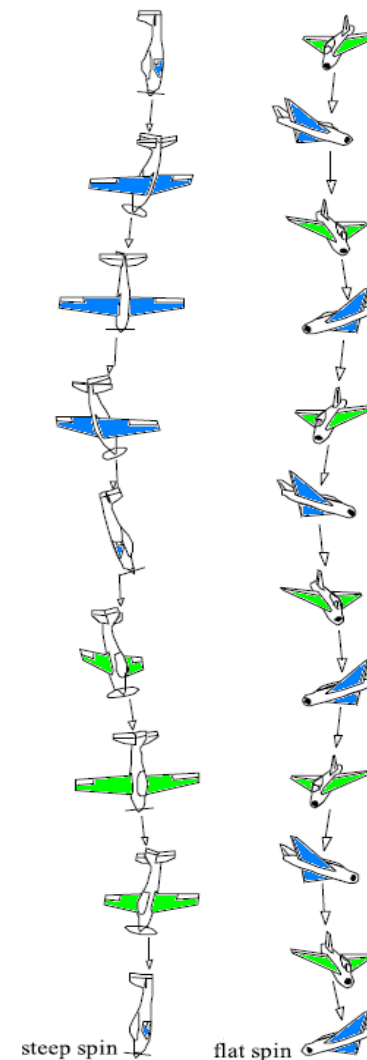
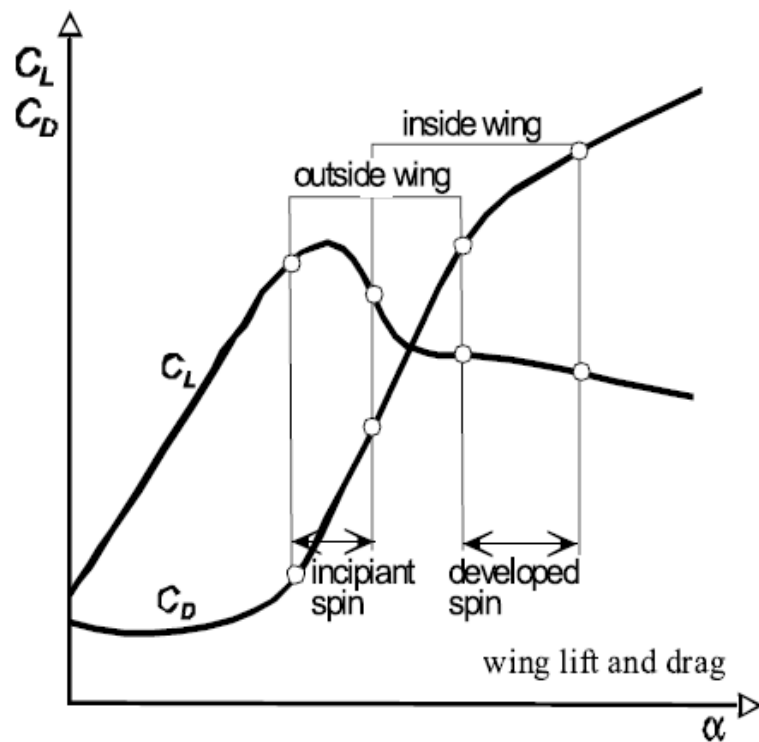
- Tem início a autorrotação, com a asa abaixada aumentando seu ângulo de ataque, reduzindo a sustentação e aumentando o arrasto. O avião rolará, glissará e o nariz abaixará.
- Existe um período de transição entre o estol e o parafuso, que dura duas ou três voltas na autorrotação antes de iniciar um parafuso completo e estável.



# PARAFUSOS



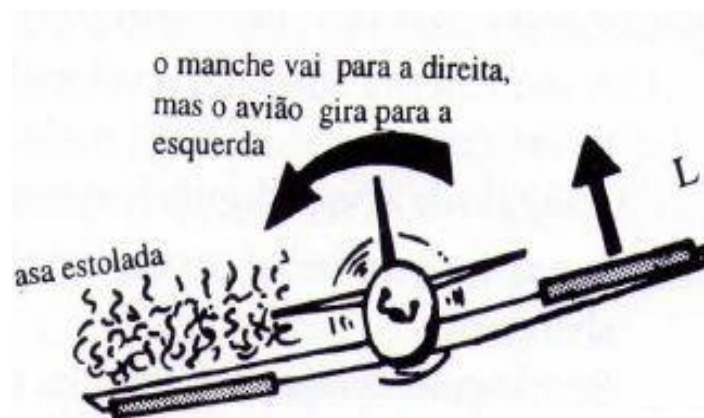
[Torenbeek e Wittenberg, 2009]



# PARAFUSOS

- **Uso de ailerons em baixas velocidades**

Ao tentar levantar com os ailerons uma asa que baixou, pode-se provocar o efeito inverso quando o avião está próximo ao estol. Se, quando o aileron descer, o ângulo de ataque ultrapassar o ângulo crítico, ao invés da asa levantar, ela pode baixar rapidamente, resultando em um parafuso.





# PARAFUSOS

- **Torque do Motor**

Quando o avião está próximo ao ângulo crítico, o torque do motor tende a girar o avião no sentido contrário ao da rotação da hélice. Este efeito é muito mais pronunciado quando o avião entra em estol "com motor", ou seja, sem que a potência esteja reduzida.

.





# PARAFUSOS

- **Ângulo de incidência**

Em aviões a hélice, para compensar a influência do torque do motor em voo de cruzeiro e o efeito da esteira da hélice, o avião pode ter tido suas asas construídas com ângulos de incidências ligeiramente diferentes. Ao se aproximar do estol, a asa com o maior ângulo poderá estolar antes da outra, e assim, entrar em parafuso.





# PARAFUSOS

- **Curvas**

Durante uma curva muito inclinada, o piloto deve tomar cuidado para não entrar em estol. Se isso acontecer, o avião estará com excesso de inclinação e pouca sustentação. A glissada resultante e o efeito de diedro farão o avião entrar em parafuso girando no sentido contrário ao da curva.

<https://www.youtube.com/watch?v=j7LPtFpkwq0>





# PARAFUSOS

- **Recuperação**

Para fazer a recuperação de uma parafuso, o piloto deve primeiramente interromper a rotação, pressionando a fundo o pedal do lado contrário ao da rotação.

A seguir, deverá sair do mergulho, primeiramente picando de depois cabrando, para evitar o estol de velocidade.

Os parafusos não oferecem perigo ao avião, exceto quando ocorrem próximos ao solo.







# PARAFUSOS

## Parafuso chato

Quando o CG está muito além de seu limite traseiro, após algumas voltas, o parafuso pode se tornar chato (*flat spin*), no qual o avião gira quase na posição horizontal. O vento relativo é praticamente perpendicular ao eixo longitudinal, de modo que o leme e profundor encontram-se estolados, dificultando (ou praticamente impossibilitando) a recuperação através desses comandos de voo.



# PARAFUSOS

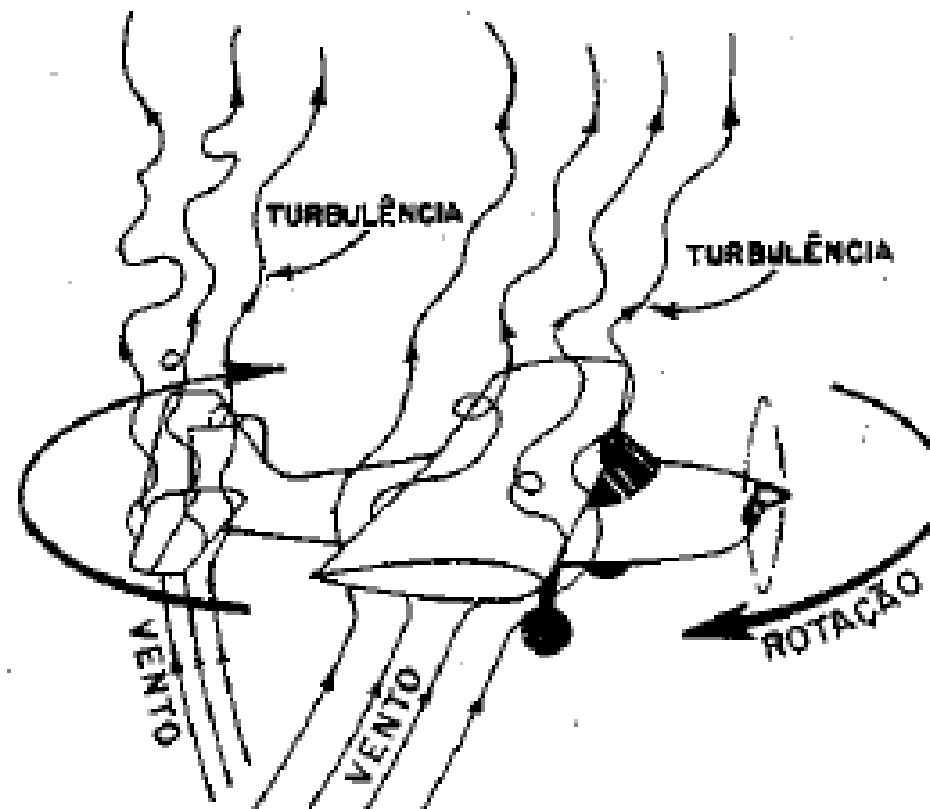
## Parafuso chato

Durante o parafuso chato, o avião desce girando em torno de si, no sentido vertical.

Portanto o ar escoa praticamente a 90º em relação ao eixo longitudinal do avião.

Isso cria fortes turbulências que tornam o profundor e o leme totalmente ineficazes para recuperar o avião do parafuso.

Por outro lado, essas mesmas turbulências criam forte arrasto, diminuindo consideravelmente a velocidade de descida do avião.



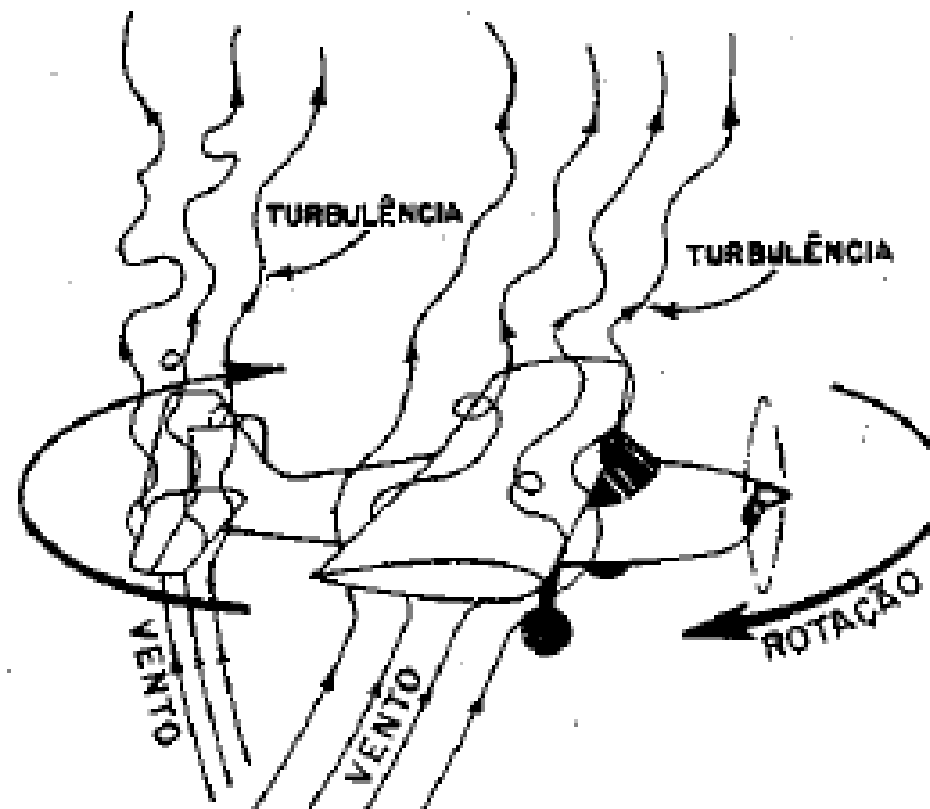
# PARAFUSOS

O parafuso chato é sempre accidental, isto é, depende das características do avião e não dos comandos do piloto.

Portanto, quando não se tem certeza sobre a possibilidade do avião entrar em parafuso chato, é necessário iniciar a recuperação imediatamente quando ele entrar em parafuso normal, a fim de impedir um possível "achatamento".

O parafuso é também chamado **auto-rotação** porque, uma vez iniciado, o avião mantém a rotação por si só.

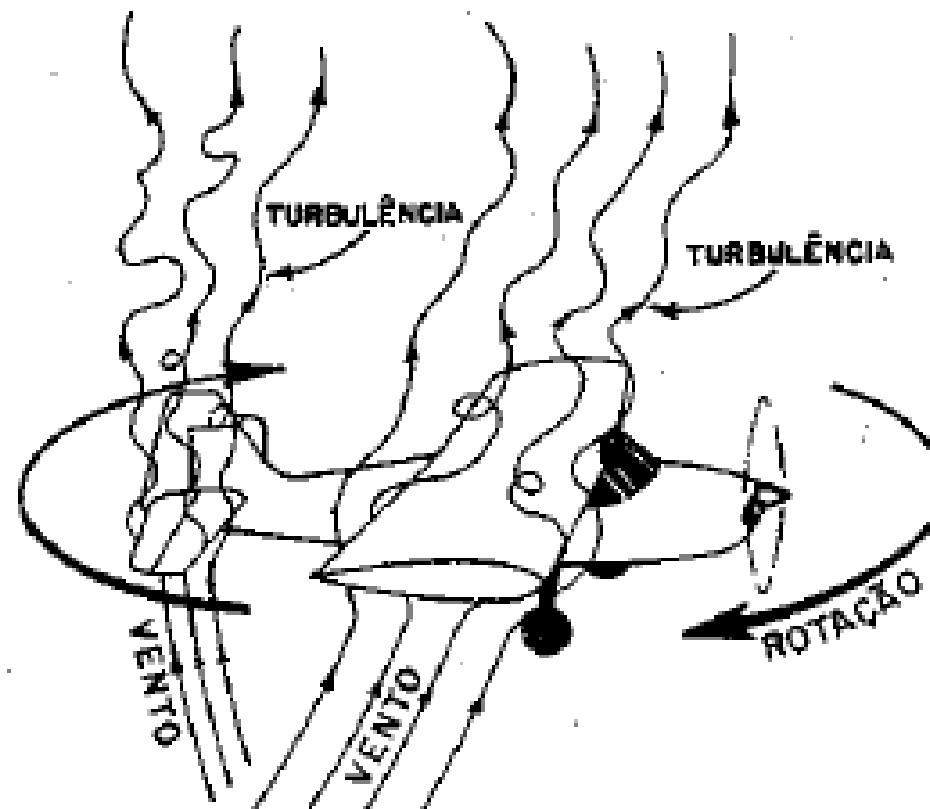
Mesmo em um parafuso normal, a velocidade do avião é moderada, por que uma das asas está estolada, provocando grande arrasto.



# PARAFUSOS

Todavia, quando a rotação é interrompida para iniciar a recuperação, cessa o estol (e o arrasto devido à turbulência), e a velocidade do avião aumenta rapidamente.

Por esse motivo, a recuperação do mergulho deve ser iniciada sem demora mas, conforme vimos, com a necessária suavidade.





# PARAFUSOS

## Vídeo recomendado

Back to Basics - Avoiding the Inadvertent Spin! The FAA's Spin Awa...

<http://www.youtube.com/watch?v=4Ab1oneRde4>

Inadvertent stalls and resulting spins continue to be a leading cause of accident and fatalities within the General Aviation Community. A lack of understanding and practical experience with spin onset recognition has increased the number of pilots who are inadequately trained and/or are uncomfortable with spins. This video is suitable for pilots at all certificate levels and experiences.



# PARAFUSOS

## Vídeo recomendado

Spin Awareness Training

<https://www.youtube.com/watch?v=c4XbkwMdZvY>

In this episode, Ryan Carlson, CFI, teaches Spin Awareness.



# PARAFUSOS

## Vídeo recomendado

Recuperação parafuso

[https://www.youtube.com/watch?v=CRzHxAjoW\\_w](https://www.youtube.com/watch?v=CRzHxAjoW_w)

<https://www.youtube.com/watch?v=eVGtsK7vvnA&feature=share&fbclid=IwAR1LzxISDcET50-JSRe-lZZ8H88hCiiazB00F1x2pnWVh-ChZfurzct7qX8>



## Estol

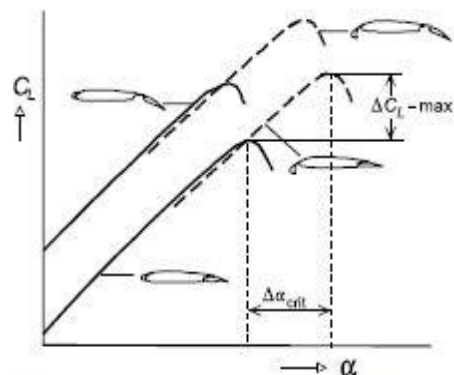
O fenômeno estol ocorre quando o ângulo de ataque ultrapassa o ângulo crítico, onde o coeficiente de sustentação é máximo. Pode ocorrer em qualquer velocidade, atitude, regime de motor, peso e fator de carga. Se o piloto não reduzir o ângulo de ataque, pode ocorrer um estol secundário ou um parafuso.

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

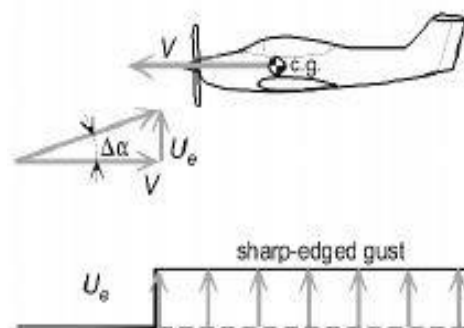
$$L = W$$

$$L = nW$$

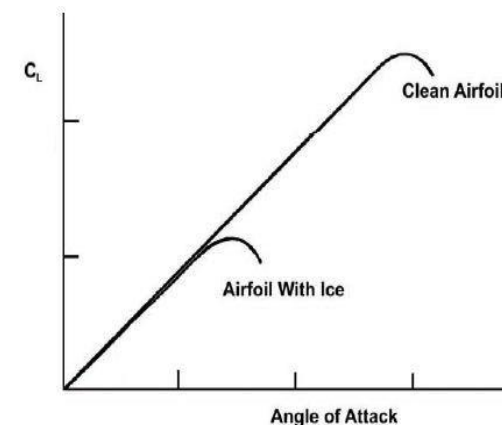
$$C_L = C_{L\alpha} \alpha$$



The influence of high-lift devices on the wing lift curve.



Angle of attack increment





# Estol

Apesar do estol ocorrer com qualquer velocidade, o piloto não deve concluir que a velocidade não tenha nada a ver com o estol ou com a prevenção do estol. Um avião completamente carregado ou com grande fator de carga estola numa velocidade superior a de um avião com pouca carga; um avião com CG dianteiro estola com velocidade superior àquela de um avião com CG traseiro. Além do fator de carga, a posição do flap, peso e posição do CG, outros fatores podem afetar a velocidade de estol. Turbulência, voo não coordenado, neve e gelo podem aumentar a velocidade de estol. Um fator não considerado normalmente é a condição do avião. Uma manutenção inadequada afeta adversamente a velocidade de estol.



# Estol

## Tipos de estol

Os estois podem ser com ou sem potência, em voo reto ou em curva. Além dessas, temos o estol acelerado, estol secundário, estol com cruzamento de comandos.

- Estol acelerado

É causado por movimentos abruptos ou excessivos do manche. Ocorre normalmente com grandes fatores de carga, em manobras como curvas de grande inclinação ou recuperações envolvendo mudanças abruptas na trajetória de voo.



# Estol

## Tipos de estol

- Estol secundário

Pode ocorrer durante a recuperação imprópria de qualquer tipo de estol. O caso mais comum é a tentativa de acelerar a recuperação de um estol antes de reduzir o ângulo de ataque e ganhar velocidade suficiente.

- Estol de comandos cruzados

Ocorre quando os comandos do aileron está aplicado em uma direção e o do leme em direção contrária, juntamente com aplicação excessiva de profundor a cabrar.



# Estol

- Reconhecimento e recuperação do estol
- Cada modelo de avião apresenta suas próprias características de estol, na qual oferecem ao piloto alguns sinais, como mudança de ruído, sensibilidade nos comandos, *buffeting*, etc. Na aviação geral normalmente é utilizado buzinas, que consiste em um medidor de ângulo de ataque instalado no bordo de ataque em uma das asas (apenas), e regulado para ser acionada alguns nós antes do estol. Como o sensor é instalado em uma asa apenas, ele apresenta a desvantagem de não indicar a proximidade de um estol em uma condição de voo assimétrica ou não coordenada.



# Estol

## Reconhecimento e recuperação do estol

O piloto deve ser capaz de perceber os sintomas de um estol iminente e tomar as medidas para evitá-lo. A recuperação ao primeiro sintoma é muito simples, mas se o piloto permitir que o estol continue, a recuperação pode ser tornar mais difícil.

A ação básica para recuperação do estol é reduzir o ângulo de ataque, movendo o manche para a frente. Pode consistir em apenas aliviar a pressão ou pode ser necessário empurrá-lo firmemente à frente, dependendo do tipo de avião, severidade do estol, dentre outros fatores. Deve também ser aplicado potência máxima para aumentar a velocidade e minimizar a perda de altitude.

Durante a recuperação, a aplicação não coordenada dos comandos de voo pode agravar o estol e resultar em um parafuso. Deve-se evitar exceder os limites de velocidade e rpm do avião.

# Teoria de Voo de Alta Velocidade

O voo dos aviões de alta velocidade é afetado por diversos fenômenos aerodinâmicos que não ocorrem em baixa velocidade.

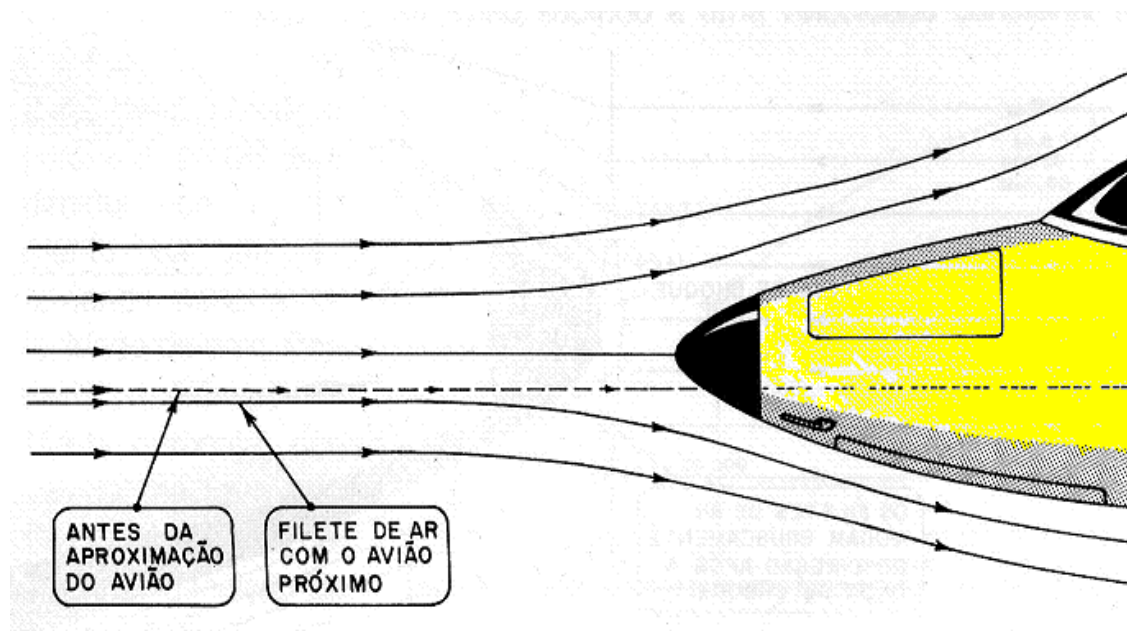
Durante o voo em baixa velocidade, o avião desloca as partículas de ar que estão à sua frente. Essas partículas deslocam as partículas que estão mais à frente. Essa onda de impulsos propaga-se à velocidade do som sob a forma de ondas de pressão esféricas.





# Teoria de Voo de Alta Velocidade

Graças a essa onda de impulsos, o ar atmosférico situado muito à frente do avião desloca-se antecipadamente, preparando-lhe a passagem. O escoamento do ar é, portanto, suave e gera pequeno arrasto.



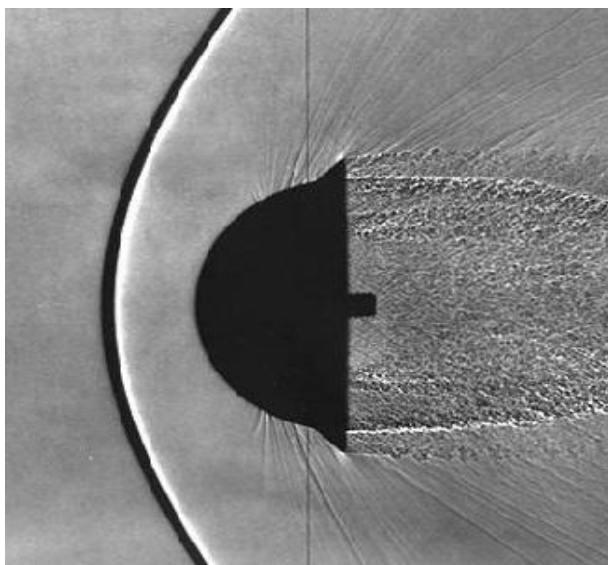
## Teoria de Voo de Alta Velocidade

- Quando o avião voa na mesma velocidade do som, as ondas de pressão não conseguem afastar-se do avião, pois este é tão veloz quanto elas. Consequentemente, as ondas de pressão ficam acumuladas no nariz do avião, formando uma camada de ar comprimido chamada **onda de choque**.

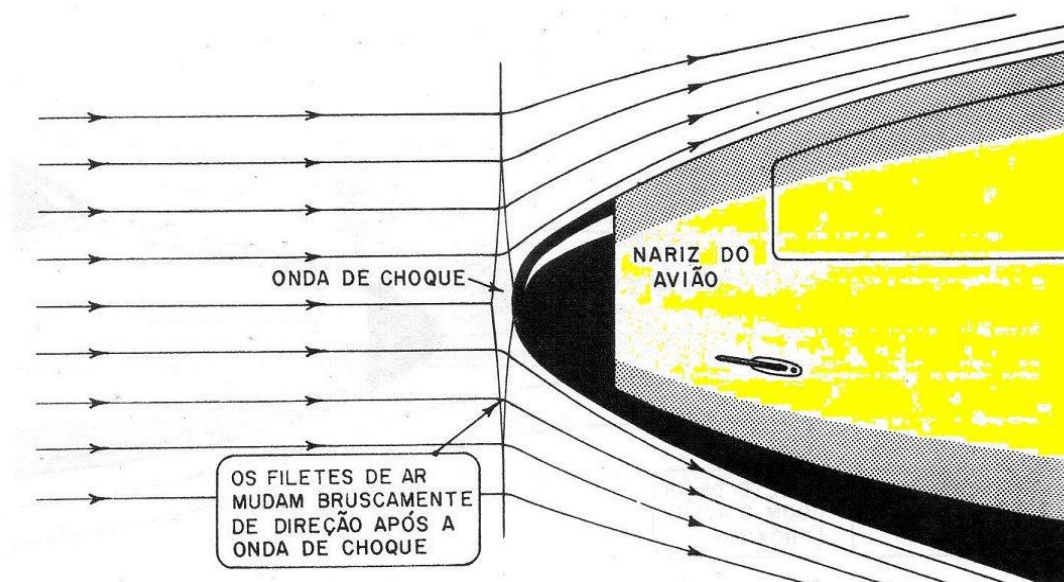


# Teoria de Voo de Alta Velocidade

Na velocidade do som, é como se as camadas de ar à frente do avião não pudessem ser avisadas da aproximação deste. Elas são apanhadas de surpresa e recebem o impacto do avião, sendo comprimidas na onda de choque, formando as **ondas de proa**, normal à direção de voo.

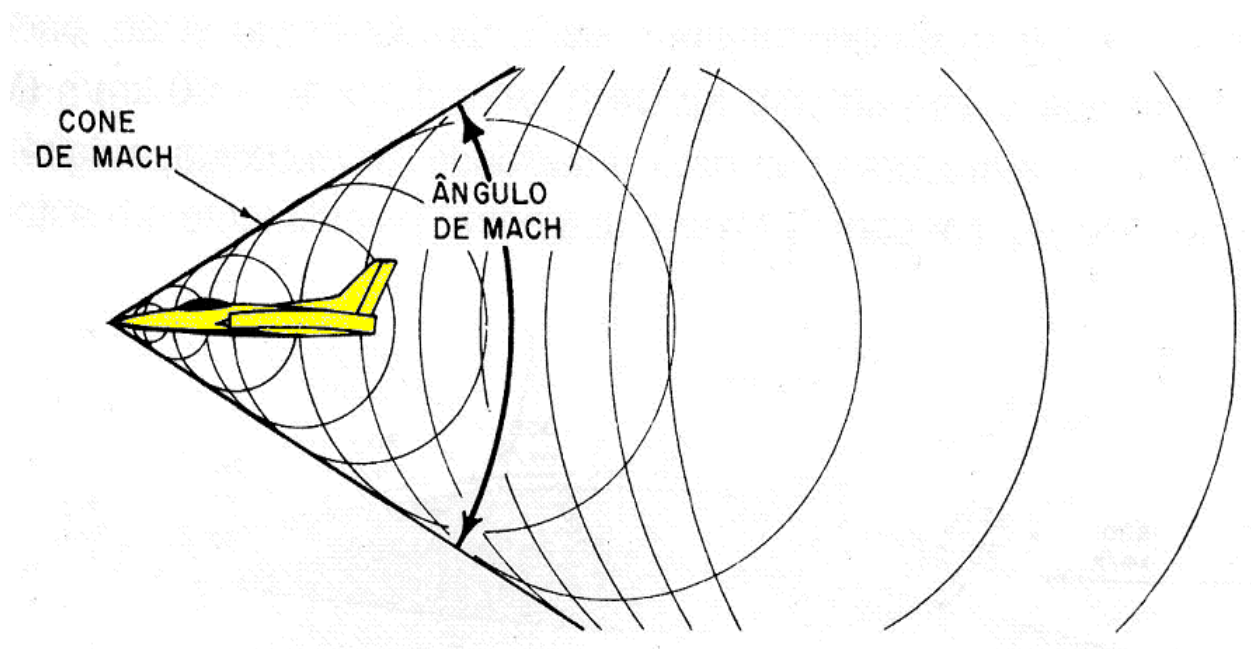


Shock waves produced by blunt bodies  
<http://history.nasa.gov/SP-4302/ch2.8.htm>



# Teoria de Voo de Alta Velocidade

- Quando o avião voa em velocidade superior à do som, a onda de proa deixa de ser **normal** e torna-se **oblíqua**, adquirindo a forma cônica, chamado **cone de Mach**. O vértice do cone forma um ângulo chamado **ângulo de Mach**. Quanto maior a velocidade, menor o ângulo de Mach.







# Teoria de Voo de Alta Velocidade

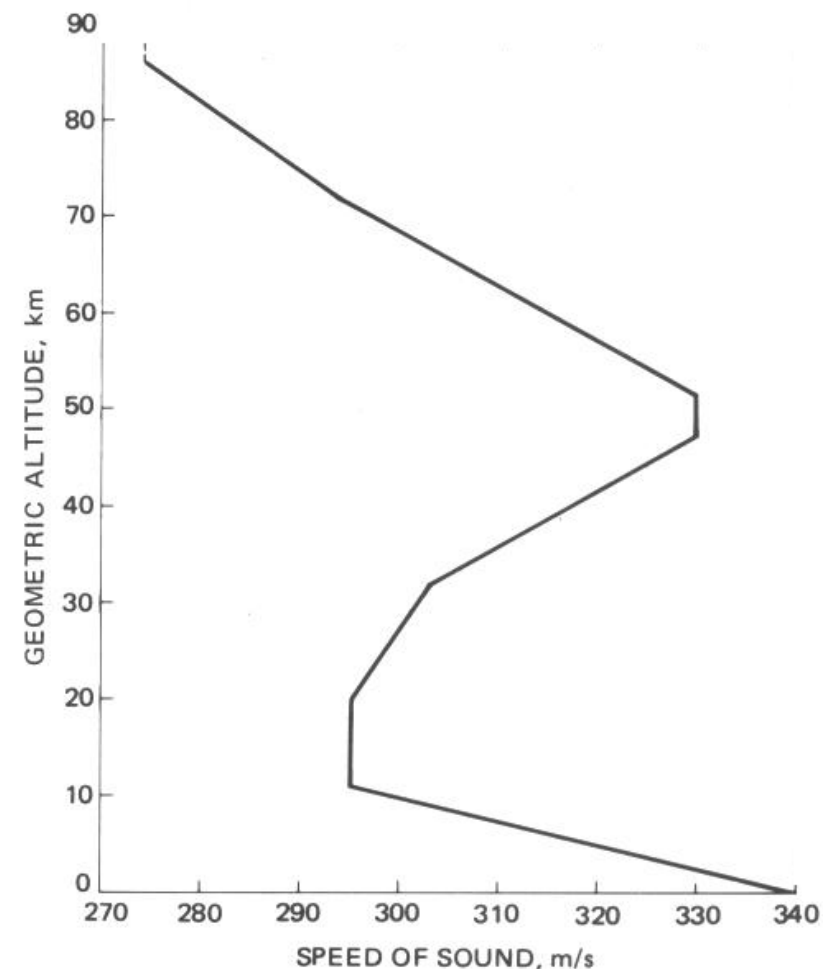
## Número de Mach

É a relação entre a velocidade verdadeira do avião pela velocidade do som local.

$$\text{Mach} = \frac{\text{Velocidade verdadeira}}{\text{Velocidade do som}}$$

$$v_{\text{sound}} = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \quad \text{where}$$

$\gamma$  = adiabatic constant  
 $R$  = gas constant  
 $M$  = molecular mass of gas  
 $T$  = absolute temperature

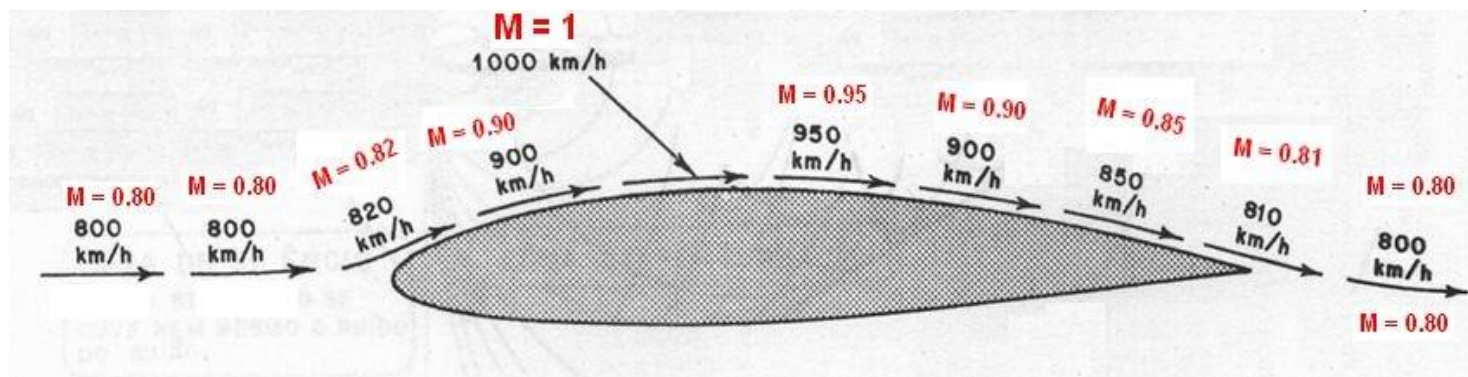


# Teoria de Voo de Alta Velocidade

## Número de Mach Crítico

Vimos no capítulo sobre Sustentação que a velocidade do ar sofre um aumento no extradorso.

Exemplo: Vamos supor que a velocidade do som local seja 1000 km/h. Então...



Portanto, no exemplo acima, o valor de **Mach crítico** vale desse avião é **0.80**.

# Teoria de Voo de Alta Velocidade



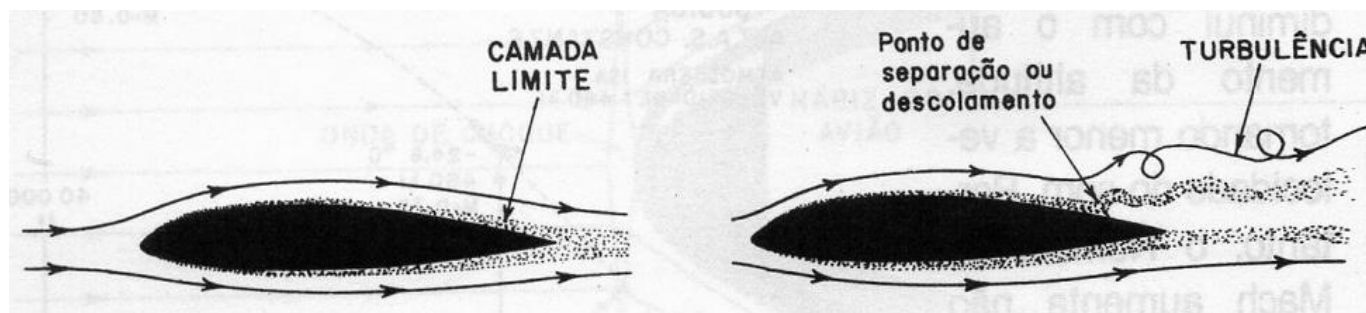
[http://i896.photobucket.com/albums/ac164/1w4kar/F-22\\_Prandtl-Glauert\\_condensation.jpg](http://i896.photobucket.com/albums/ac164/1w4kar/F-22_Prandtl-Glauert_condensation.jpg)



# Teoria de Voo de Alta Velocidade

## Camada limite

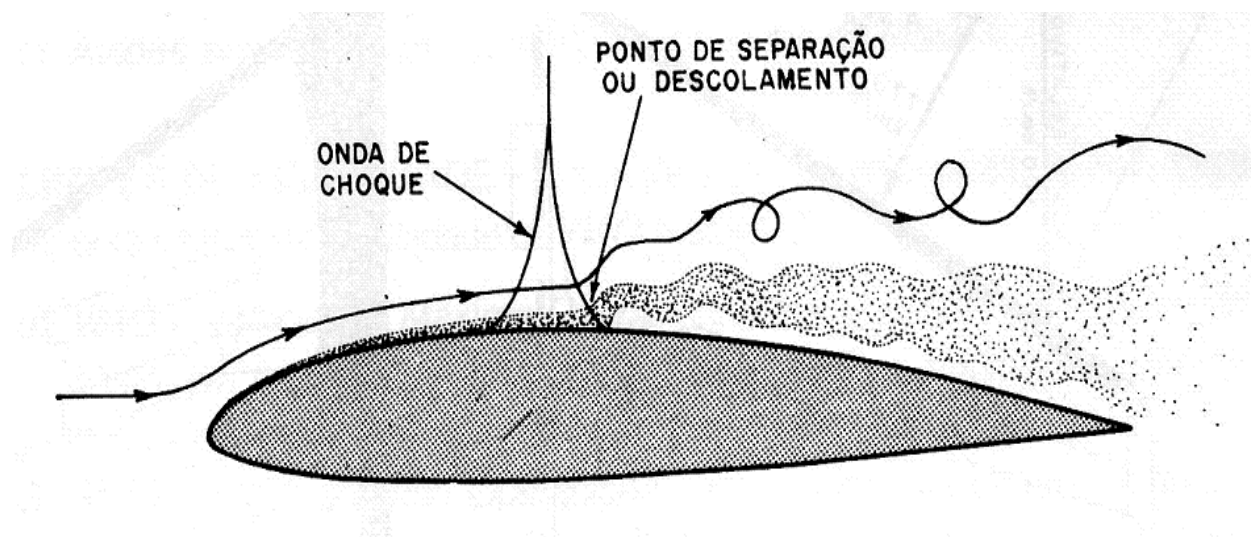
Quando há separação da camada limite por qualquer que seja o motivo, os filetes de ar deixarão de acompanhar o perfil da asa, criando uma região de turbulência a partir do ponto de separação.



Quando o avião ultrapassa o número de Mach crítico, surge uma onda de choque sobre a asa. As pressões elevadas dentro da onda de choque dificultam o avanço da camada limite, que poderá parar sobre o extradorso, e, conseqüentemente se separar, gerando turbilhonamento e, por conseguinte, aumento do arrasto.

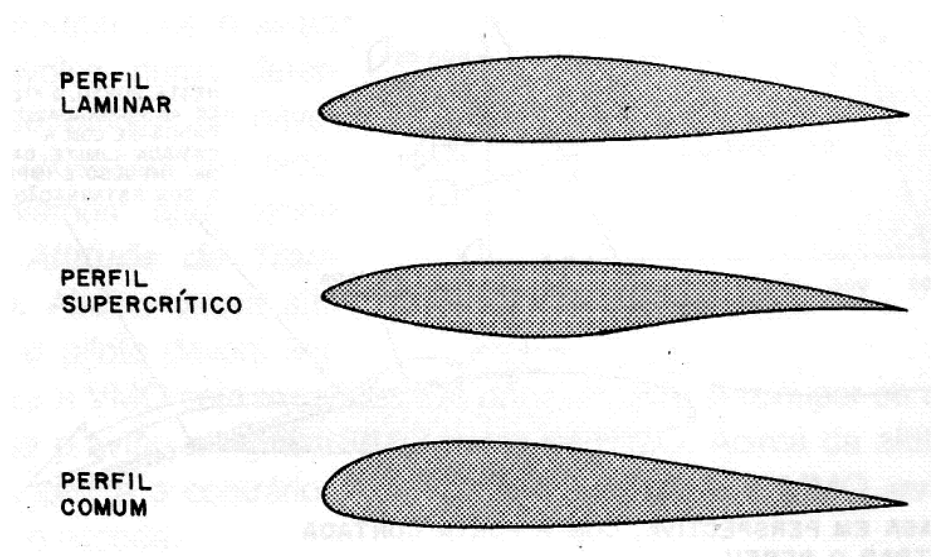
# Teoria de Voo de Alta Velocidade

Para aviões que voam no regime alto subsônico, a asa deve ser construída de modo a retardar ao máximo o aparecimento da onda de choque. Ou seja, o Mach crítico deve ser o maior possível.



# Teoria de Voo de Alta Velocidade

- Para aumentar o Mach crítico utiliza-se perfis **laminares** ou perfis **supercríticos**. Esse tipo de perfil apresenta a curvatura do extradorso pouco acentuada, de modo a evitar grandes aumentos de velocidade, fazendo com que a onda de choque só apareça em números de Mach mais elevados.

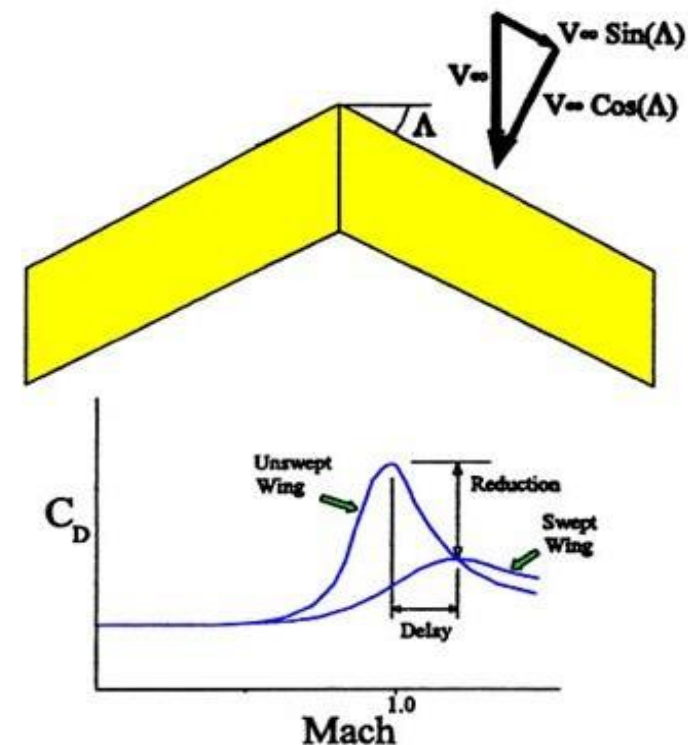


<http://www.abpic.co.uk/images/images/1144380M.jpg>

# Teoria de Voo de Alta Velocidade

O Mach crítico também pode ser aumentado utilizando-se asas enflechadas. Uma asa enflechada atrasa a formação das regiões de escoamento supersônico que ocasionam a formação das ondas de choque. O escoamento que mais afeta o comportamento aerodinâmico é o perpendicular ao bordo de ataque.

Com isso é possível atingir maiores números de Mach antes do aparecimento da primeira região com escoamento supersônico.

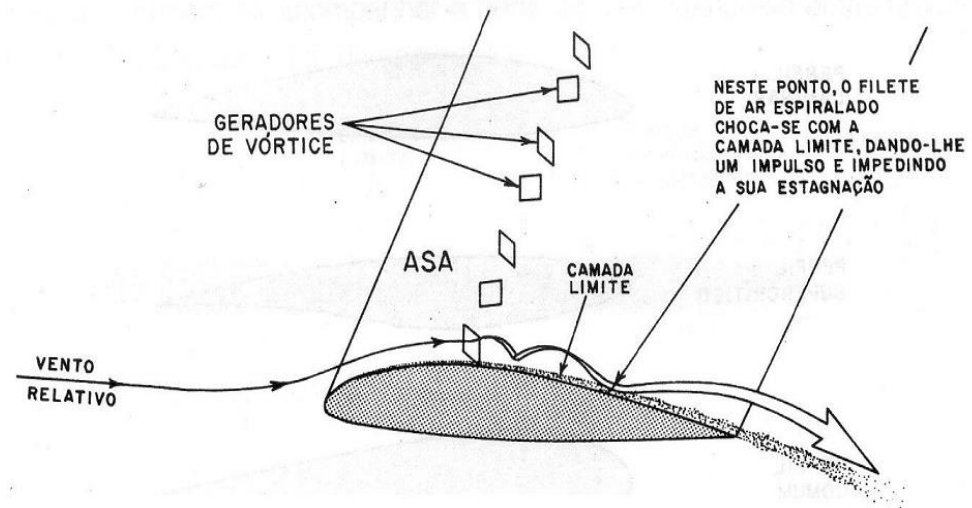
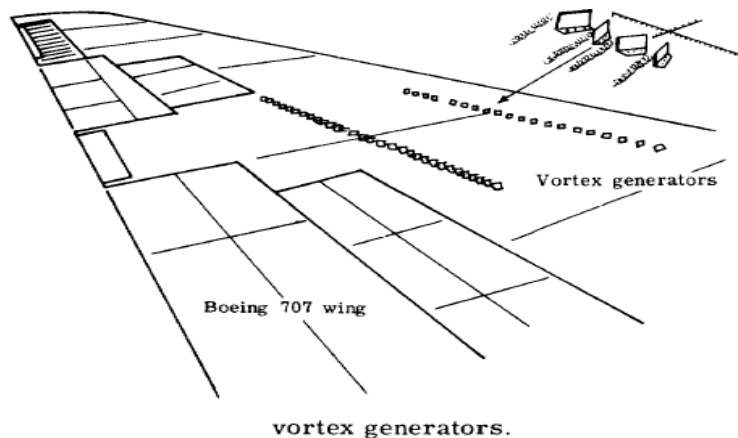


Sweep effects on the flow about a wing.



# Teoria de Voo de Alta Velocidade

- O descolamento ou separação da camada limite pode ser evitado através dos **geradores de vórtice**. Os geradores de vórtices são pequenas lâminas, montadas ao longo da superfície da asa de modo a transferir energia do escoamento externo para o ar que está no interior da camada limite. Isso faz reduzir os efeitos do gradiente adverso de pressão, de modo a evitar o descolamento da camada limite, e, conseqüentemente o estol.



# Teoria de Voo de Alta Velocidade



[http://farm7.staticflickr.com/6049/6348149350\\_36051c615e.jpg](http://farm7.staticflickr.com/6049/6348149350_36051c615e.jpg)



## Classificação dos aviões

De acordo com a velocidade, podemos ter:

- ✓ Aviões subsônicos: Voam abaixo do número de Mach crítico.
- ✓ Aviões transônicos: Voam acima do Mach crítico, porém abaixo de Mach 1.
- ✓ Aviões supersônicos: Quando voam acima de Mach 1.





# Teoria de Voo de Alta Velocidade

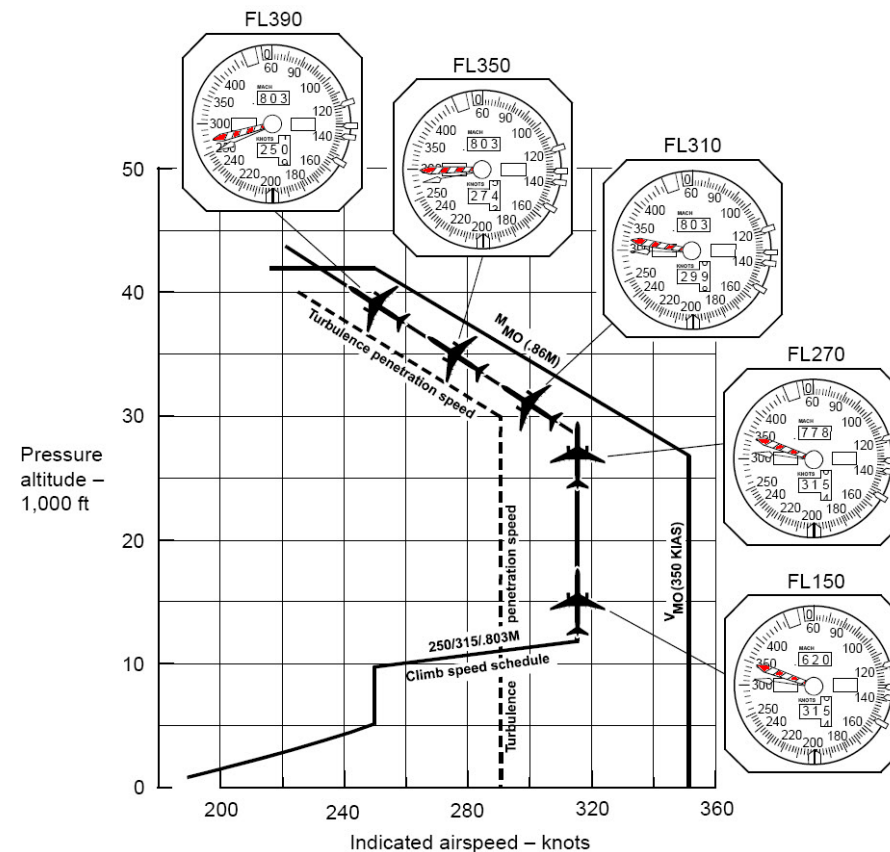
## Limites de velocidade

Os aviões de alta velocidade devem respeitar dois limites de velocidade: a VMO e o MMO.

- ✓ VMO: Velocidade máxima de operação, associada com operação em altitudes menores, é estabelecida pelo fabricante em função da estrutura. Acima da VMO o avião pode sofrer danos estruturais.
- ✓ MMO: Mach máximo de operação, associado com operação em altitudes maiores, que é estabelecido pelo fabricante em função dos efeitos de compressibilidade, que podem ocasionar perigosos fenômenos devido à formação de ondas de choque.



# Teoria de Voo de Alta Velocidade

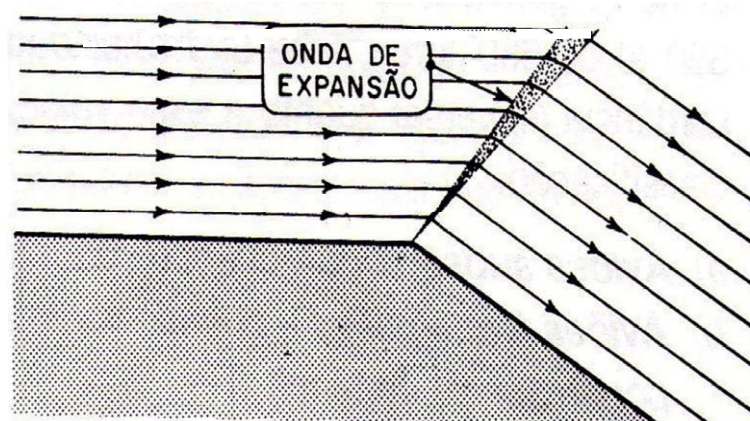


<http://forums.x-plane.org/index.php?showtopic=72161>

# Teoria de Voo de Alta Velocidade

## Ondas de expansão

As ondas de expansão apresentam um efeito contrário à onda de choque. Ela surge quando o escoamento de alta velocidade é obrigado a se expandir. Ao passar através de uma onda de expansão, a densidade e a pressão sofrem uma brusca diminuição e a velocidade aumenta.



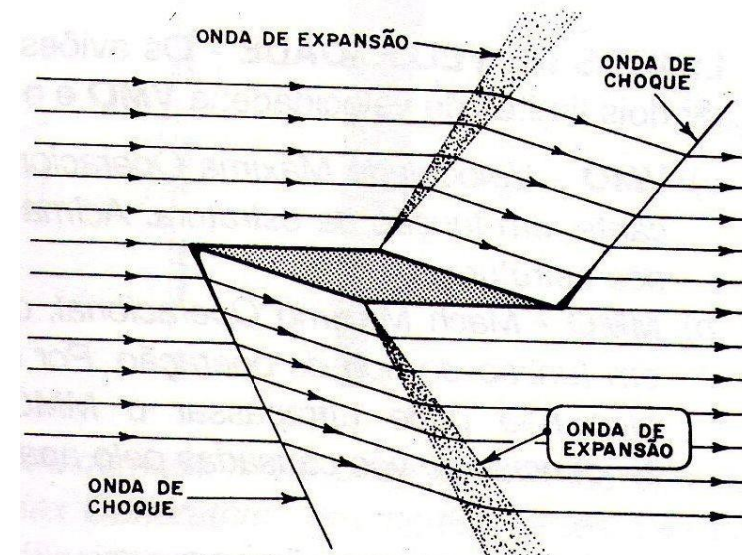
# Teoria de Voo de Alta Velocidade

## Ondas de expansão

Em um aerofólio supersônico, como os em forma de cunha, se formam ondas de expansão e ondas de choque. Elas são aproveitadas para gerar regiões de alta e baixa pressão, as quais produzem sustentação.



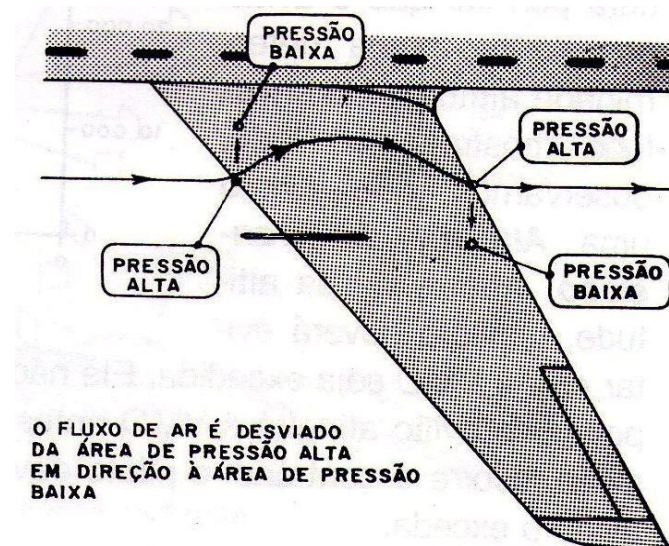
<http://www.defencetalk.com/wp-content/uploads/2010/01/swiss-f5e-tiger.jpg>



# Teoria de Voo de Alta Velocidade

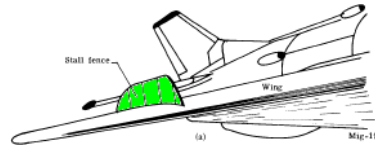
## Fluxo transversal: Fora da camada limite

A pressão na parte central do extradorso é menor que no bordo de ataque e que no bordo de fuga. Isso faz com que as linhas de escoamento não sigam a direção original do escoamento em uma asa enflechada. No bordo de ataque o ar flui em direção à raiz, e no bordo de fuga flui em direção à ponta da asa. Esse fluxo curvo chama-se **fluxo transversal**.



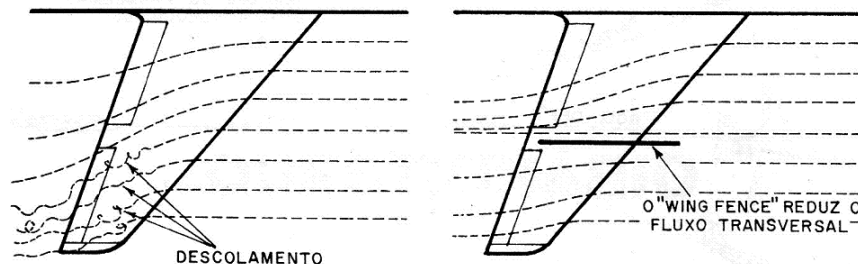


## Teoria de Voo de Alta Velocidade



### Fluxo transversal: Dentro da camada limite

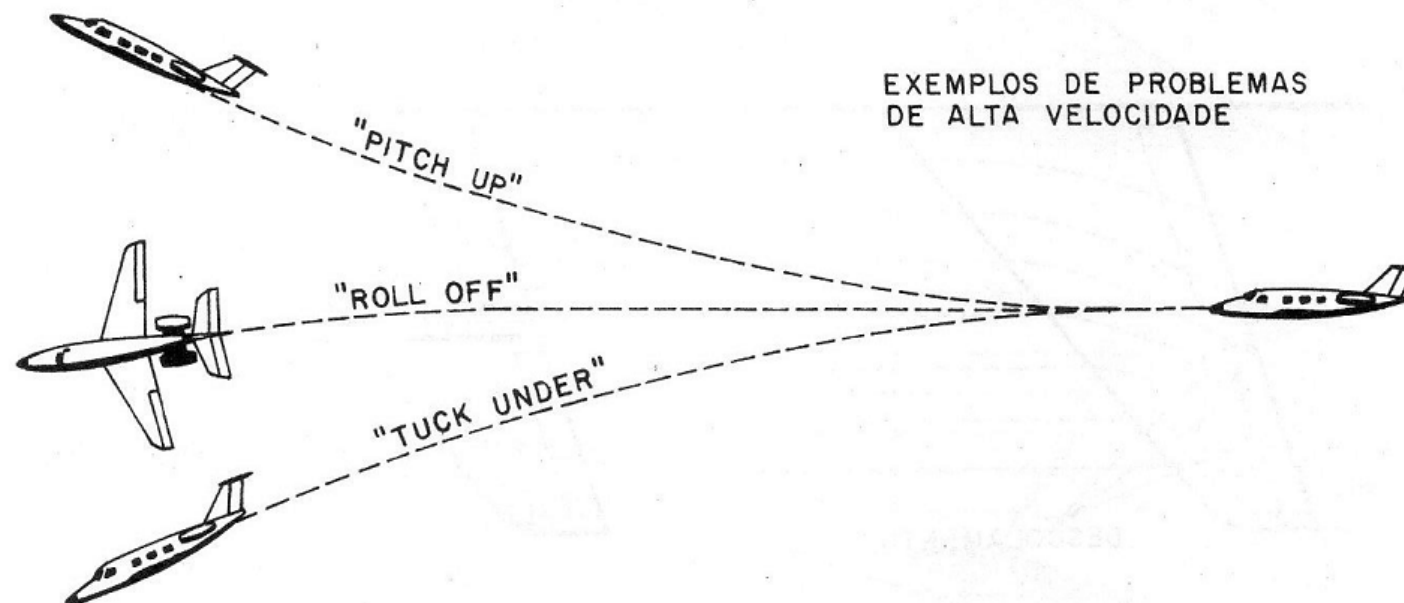
A camada limite no extradorso de uma asa enflechada escoia da raiz para as pontas. Nessa percurso ela perde velocidade devido ao atrito com a superfície da asa, e pode descolar quando próximo às pontas, produzindo estol nessa região. Para evitar esse fenômeno causado pelo fluxo transversal da camada limite, são usadas barreiras chamadas *wing fences* ou *stall fences*.



# Teoria de Voo de Alta Velocidade

## Fenômenos do voo em alta velocidade

O voo em alta velocidade pode originar vários fenômenos, como os mostrados a seguir. Tais fenômenos resultando do descolamento quando voando na região transônica.



# Teoria de Voo de Alta Velocidade

## Fenômenos do voo em alta velocidade

O comportamento dos aviões em alta velocidade e altitude depende do número de Mach e não da velocidade. Dessa forma, o voo de cruzeiro deverá ser efetuado mantendo determinado número de Mach, respeitando o limite da MMO, a fim de evitar problemas de controlabilidade e outros fenômenos de alta velocidade.





<http://e1.photos.flightrcdn.com/photos/retriever/90f7542493eb1216f54fd3200dfe03c7da2161f9>