

# TEORIA DE VOO



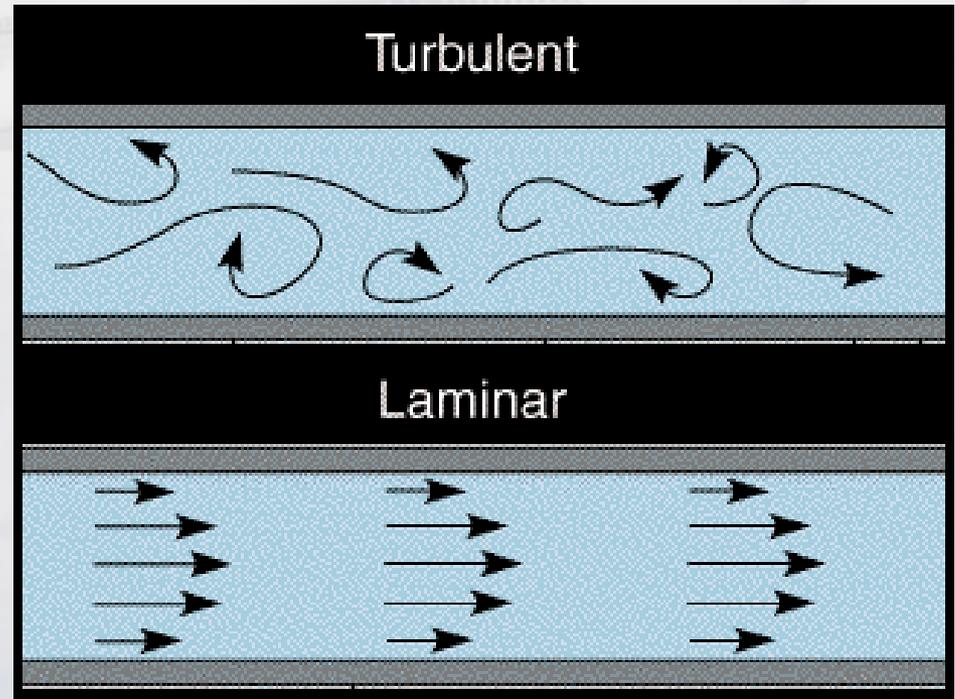
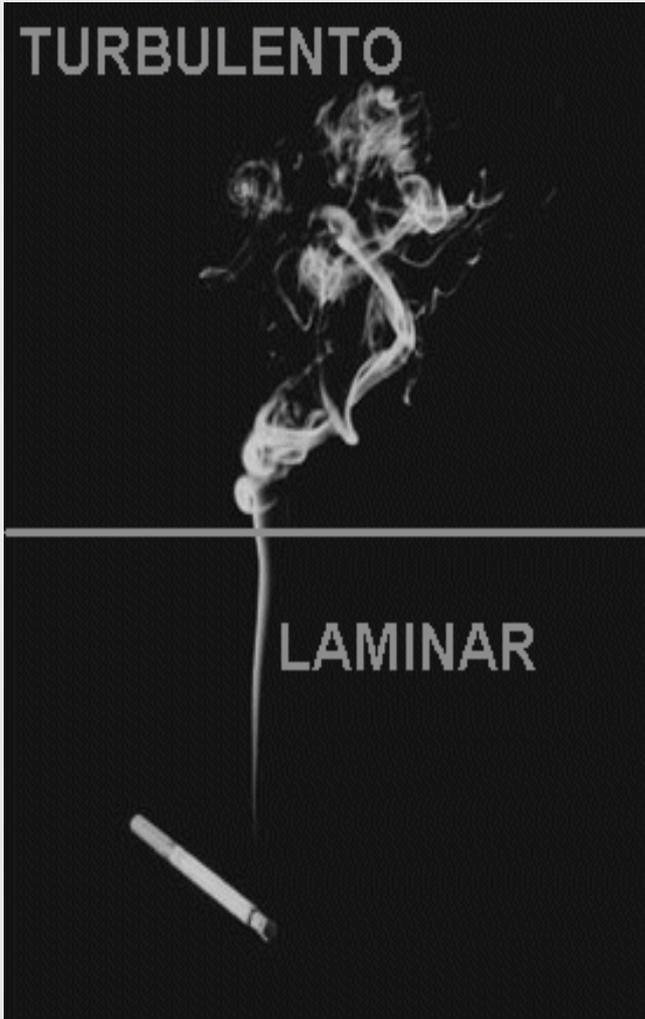
Vinícius Roggério da Rocha

# Aerodinâmica de baixa velocidade

- Estaticamente X Aerodinamicamente  
(flutuabilidade) (sustentação)
- Aerodinâmica: estudo do movimento de fluidos gasosos (**escoamento**) e às forças envolvidas



# Tipos de escoamento



Irregular

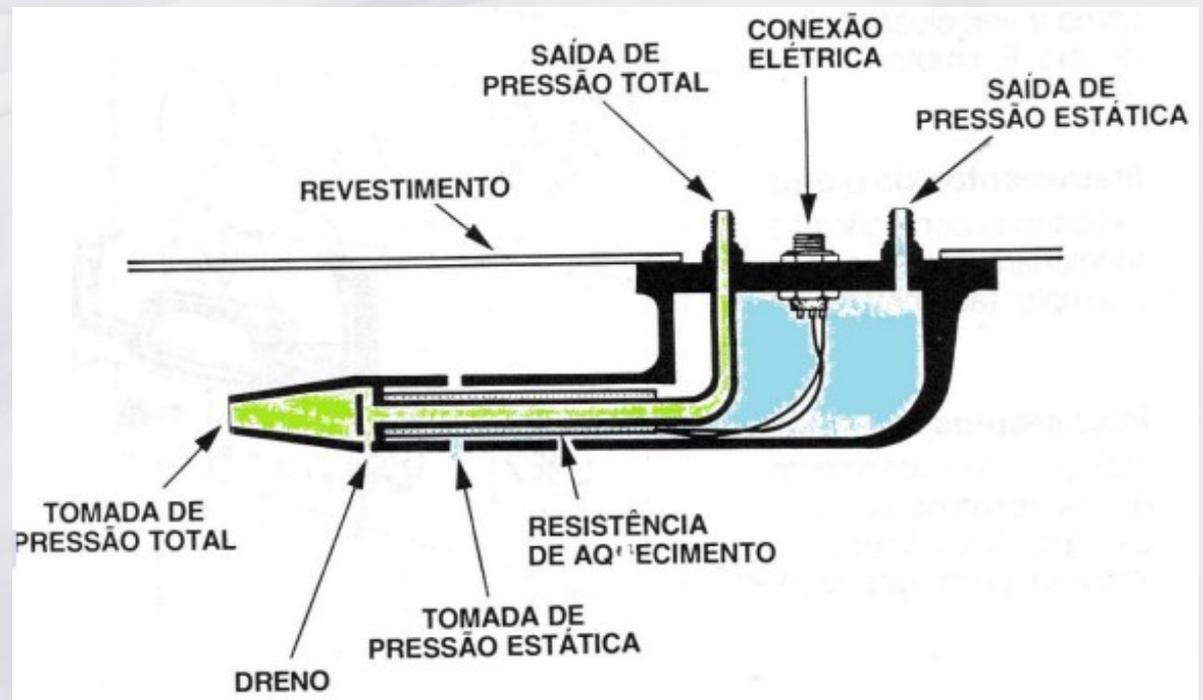
regular

# Pressão

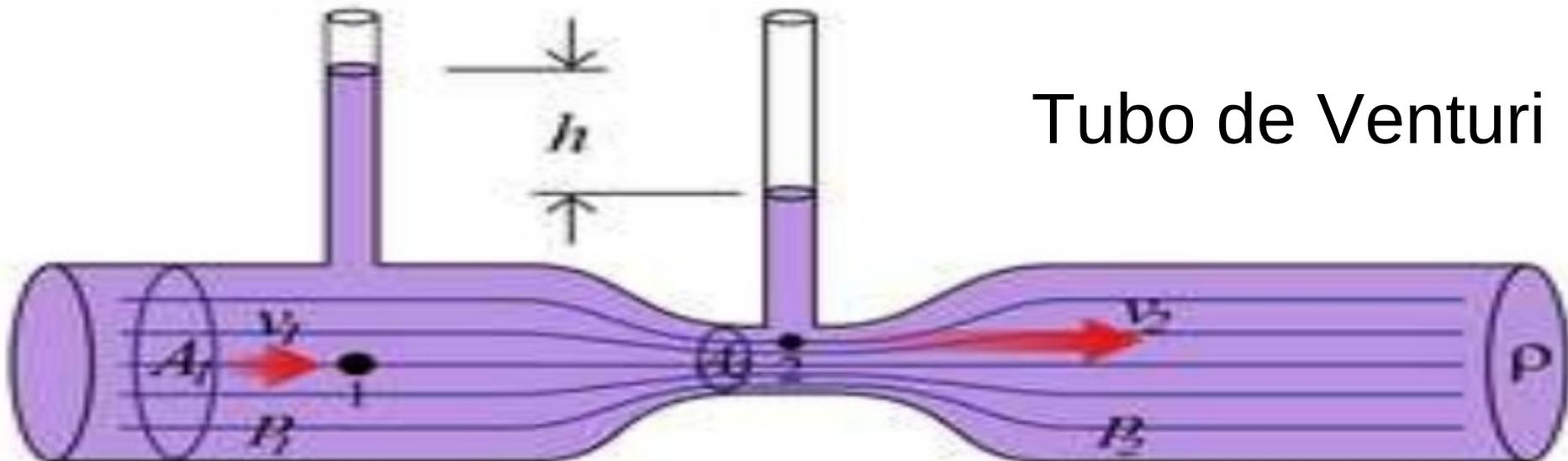
- **Pressão:** Força aplicada sobre uma área
- **Pressão estática:** exercida pelo ar em um corpo na atmosfera (ex.: pressão atmosférica – peso da coluna de ar)
- **Pressão dinâmica:** impacto do vento (aumentam com densidade e velocidade do vento)

# tubo de Pitot

- Instrumento que mede a pressão total (estática + dinâmica) para o altímetro e o velocímetro



- Quanto mais estreito for o tubo de escoamento, maior será a velocidade do fluido (e vice-versa)
- Quando a velocidade aumenta, há redução de **pressão estática** contra as paredes do tubo de escoamento e aumento da **pressão dinâmica** (proporcional à velocidade)

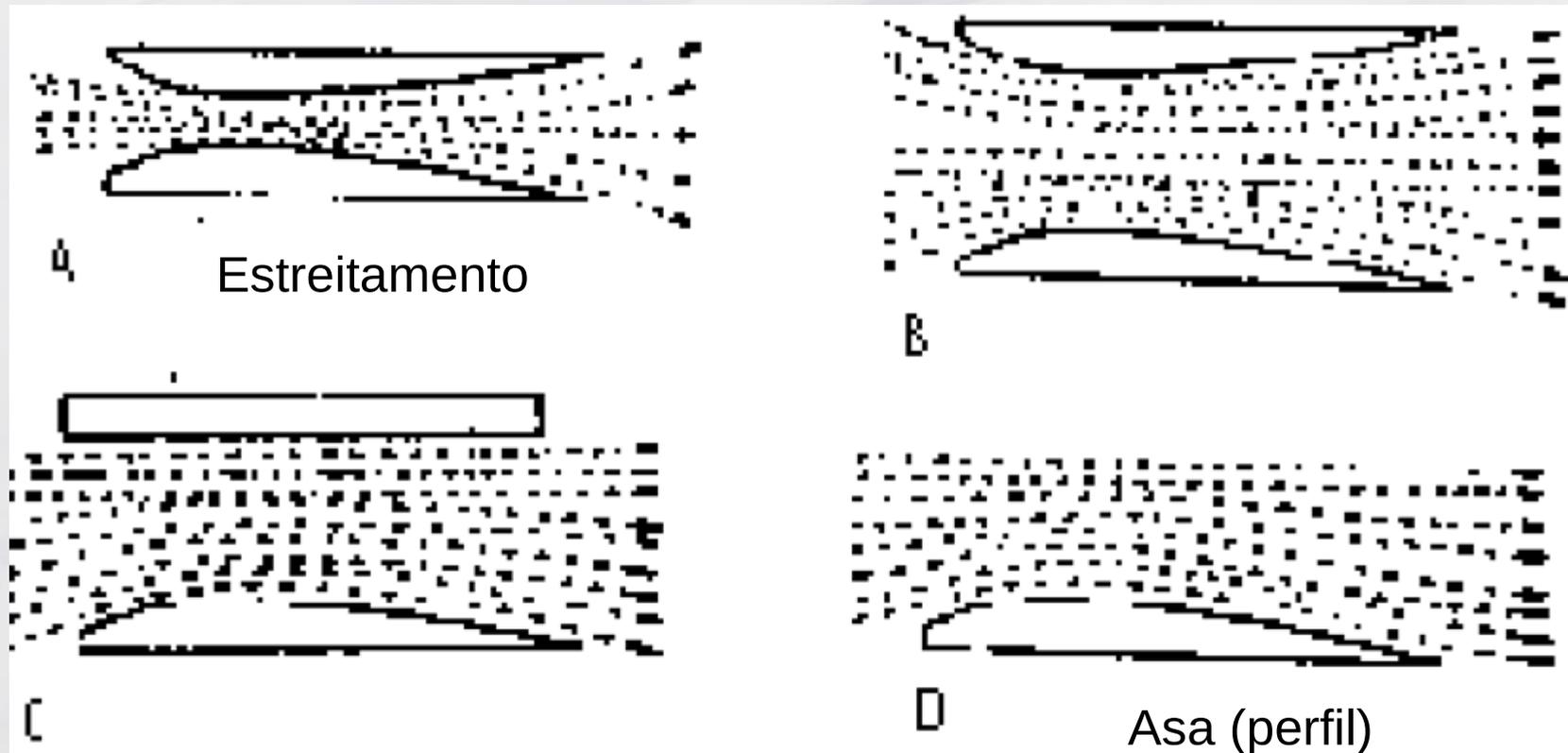


# Princípios físicos

- **Equação da continuidade:** se o fluido é constante, quanto mais estreito for o tubo de escoamento, maior será a velocidade do fluido e vice-versa
- **Teorema de Bernoulli:** quanto maior a velocidade de escoamento, maior será a pressão dinâmica e menor a pressão estática (conservação de energia)

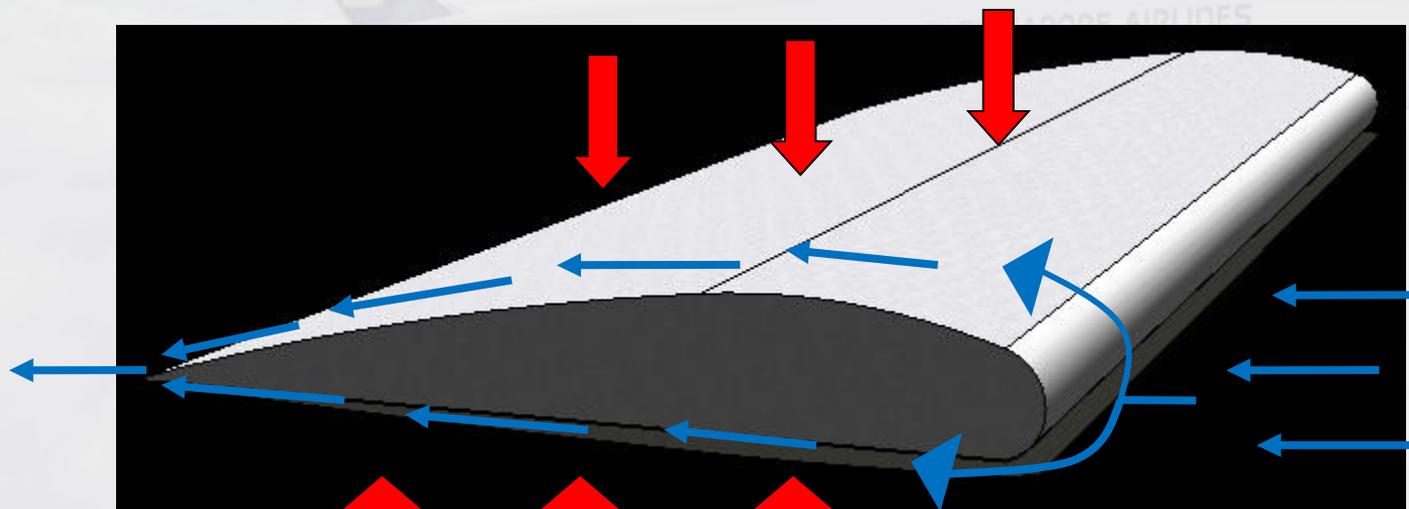
# Aerofólio

- Superfície aerodinâmica que produz reações úteis ao voo: sustentação/elevação



# Aerofólio (perfil de asa)

Pressão menor

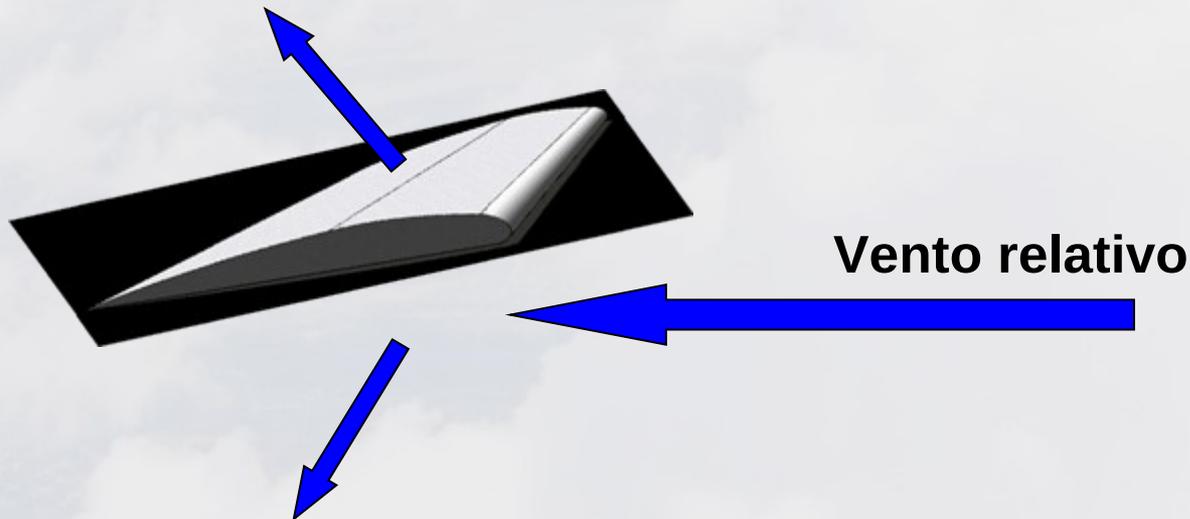


**Vento relativo**  
(mesma direção e intensidade, sentido contrário)

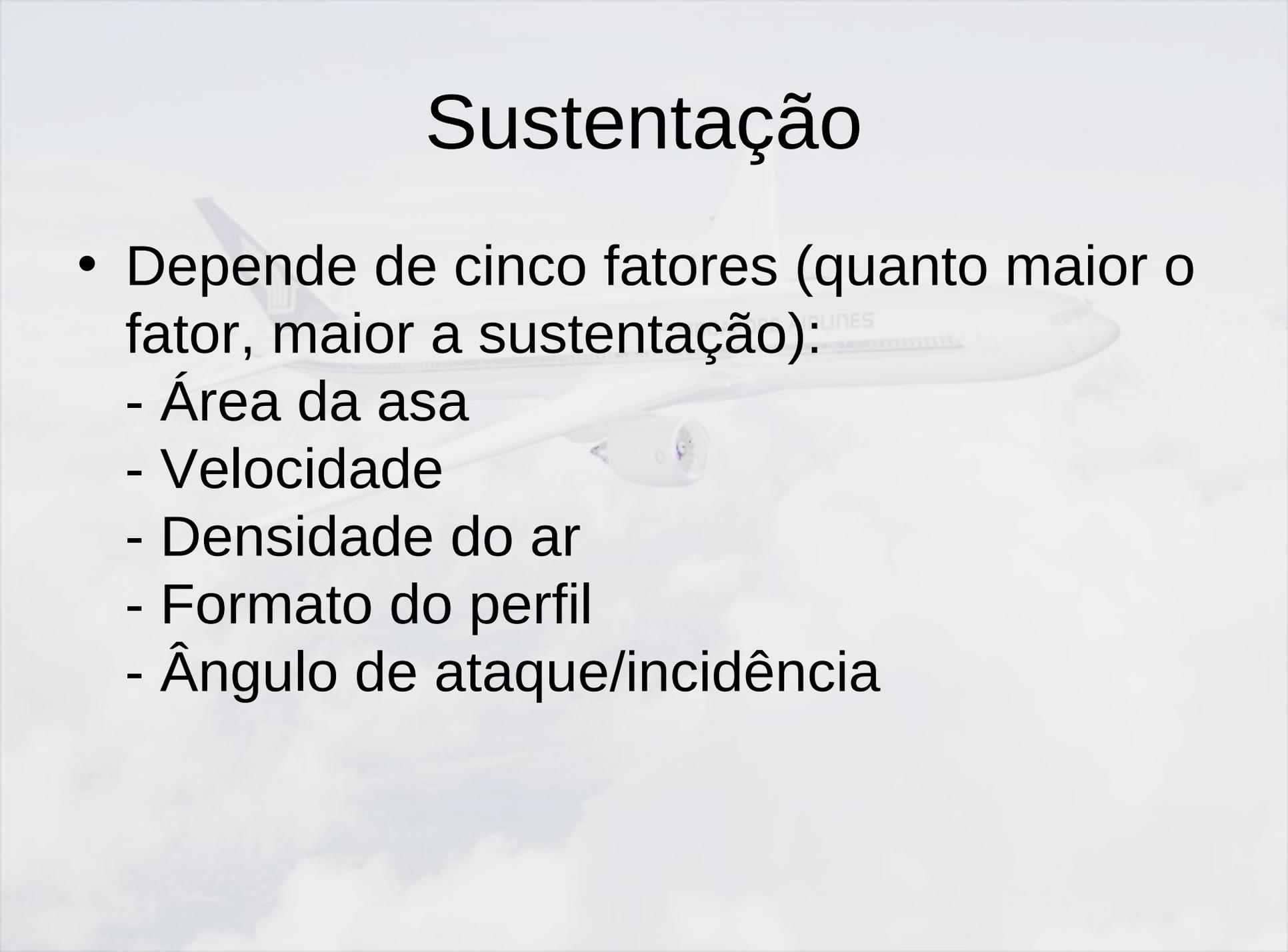
Pressão maior

# Sustentação

- A diferença de pressão é a principal fonte de sustentação do avião (aprox.  $\frac{3}{4}$ )
- Também ocorre deflexão para baixo do ar que atinge a parte de baixo da asa (aprox.  $\frac{1}{4}$ ), ocorrendo assim uma reação de subida



# Sustentação



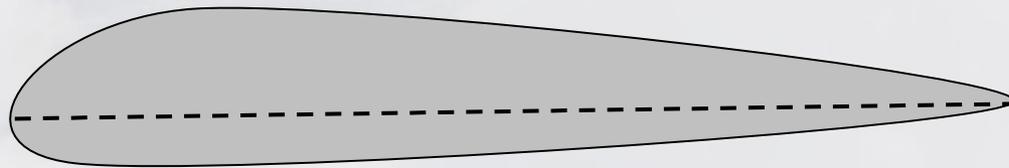
- Depende de cinco fatores (quanto maior o fator, maior a sustentação):
  - Área da asa
  - Velocidade
  - Densidade do ar
  - Formato do perfil
  - Ângulo de ataque/incidência

# Tipos de aerofólio

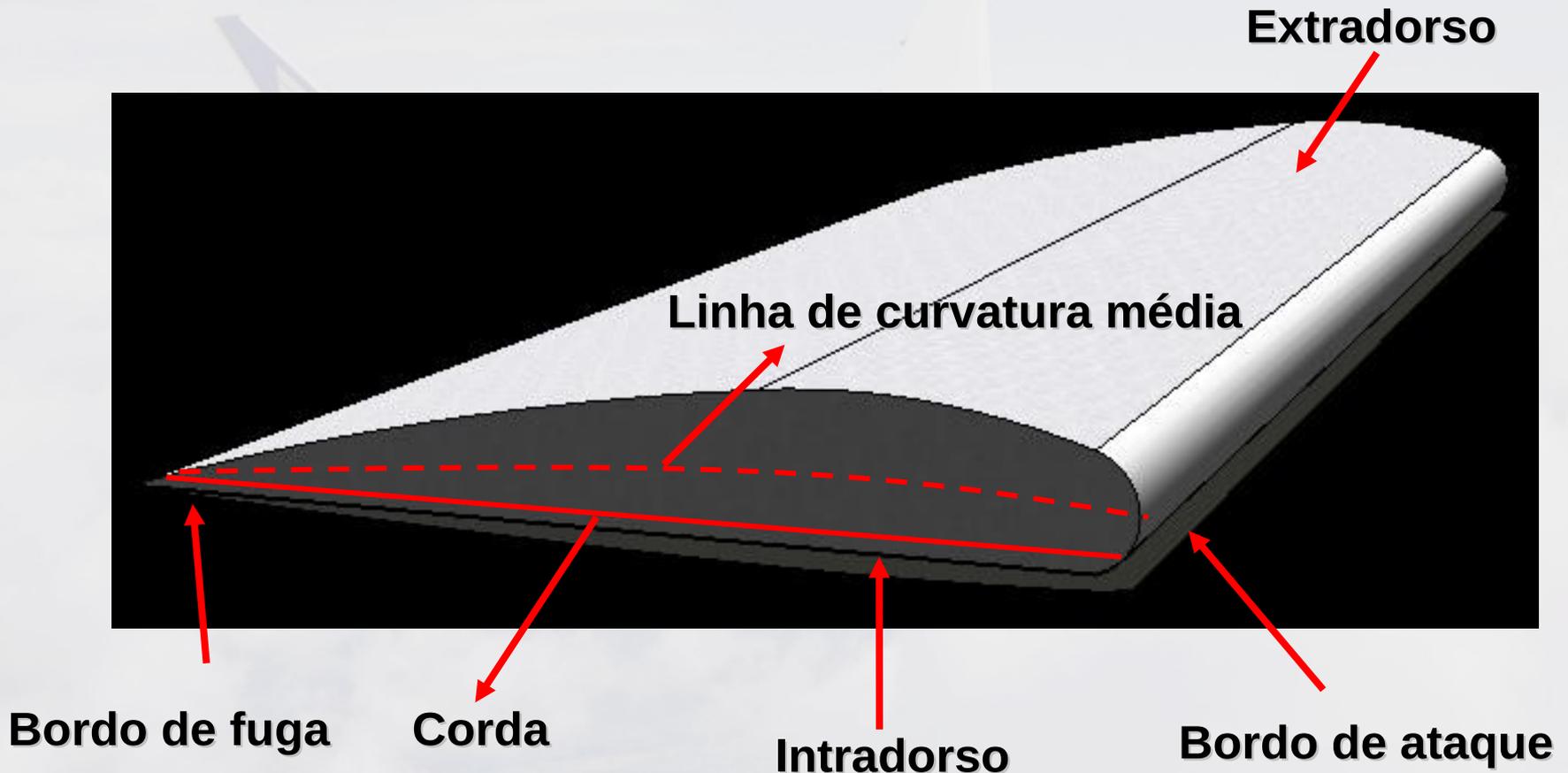
- Simétrico: pode ser dividido por uma linha reta gerando duas metades iguais (empenagem)



- Assimétrico: ao ser dividido por uma linha reta gera duas metades diferentes (asa)



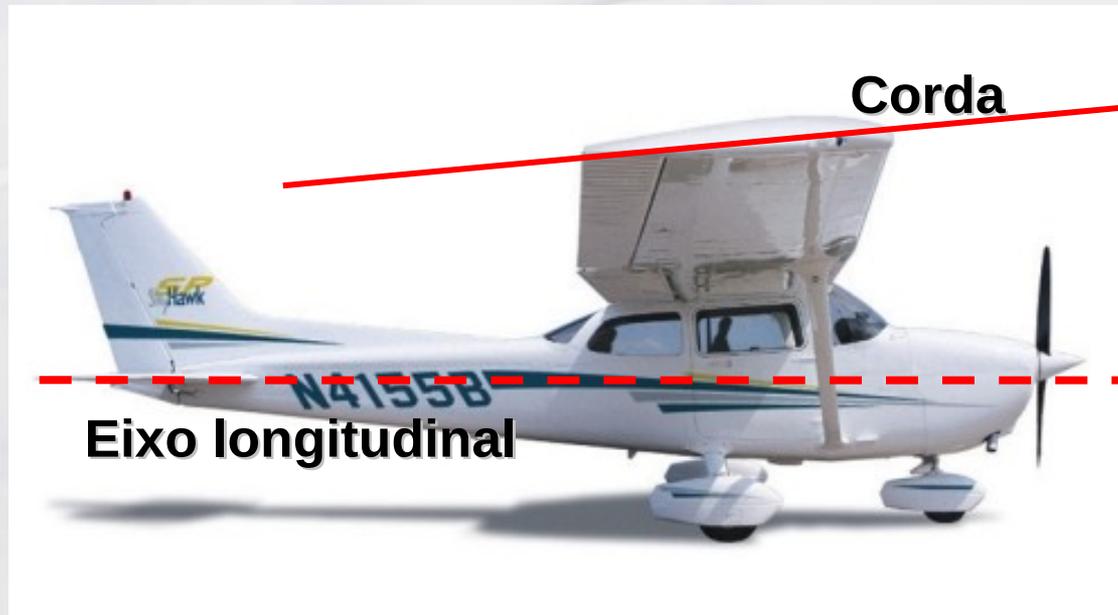
# Aerofólio (nomenclatura)



**Corda** = Linha reta que une os bordos de ataque e de fuga  
**Envergadura** = Linha de uma ponta de asa a outra

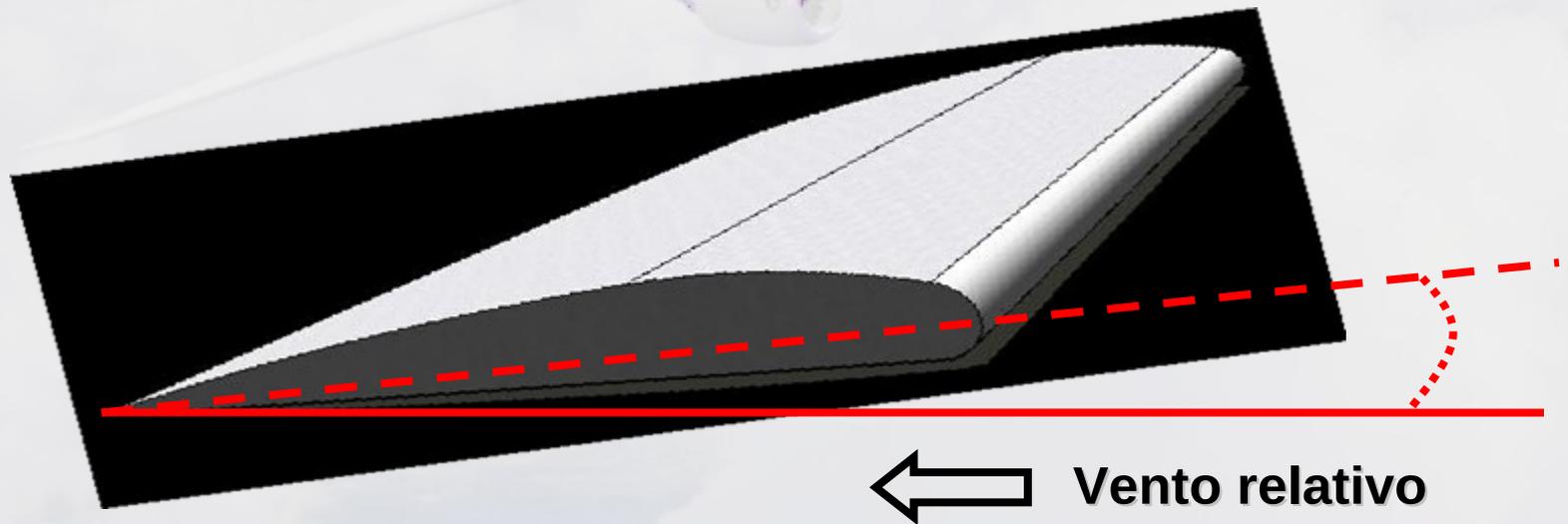
# Ângulo de incidência

- Ângulo formado entre a corda da asa e o eixo longitudinal do avião



# Ângulo de ataque

- Ângulo formado entre a corda de um aerofólio e a direção do vento relativo



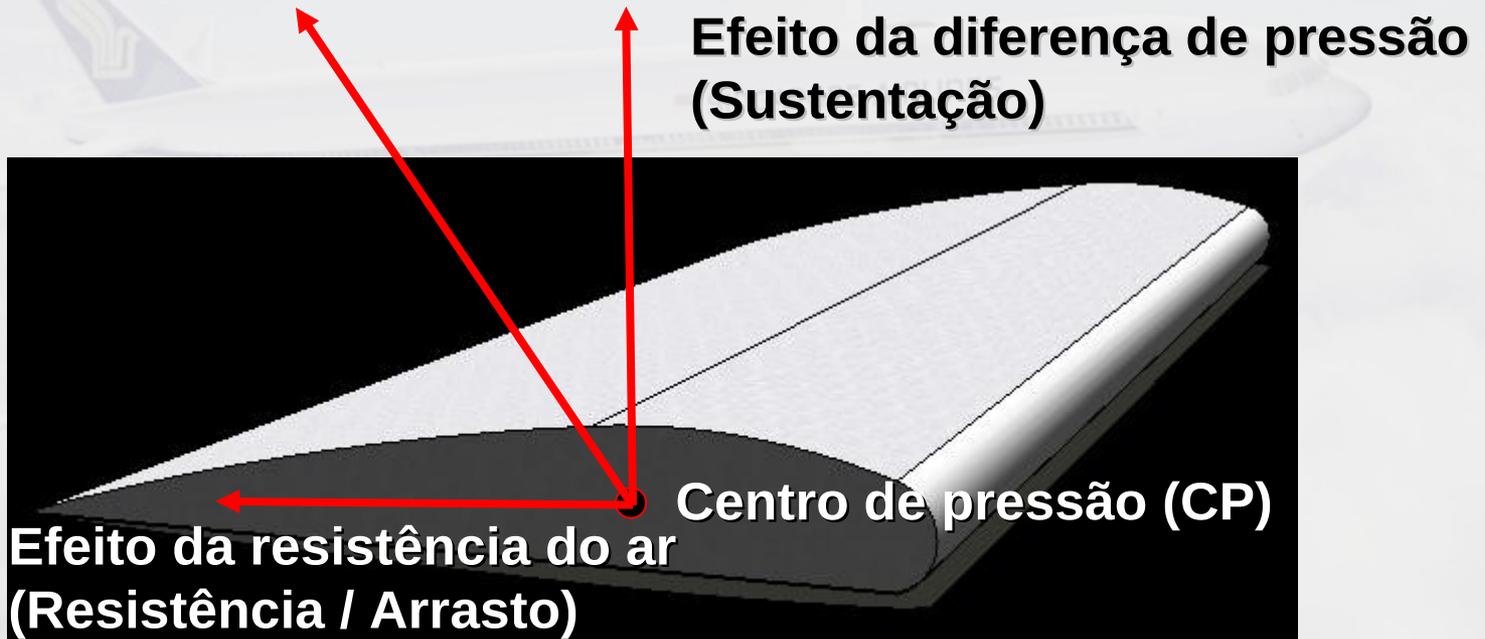
# Forças atuantes no avião



Voo horizontal:  $Sustentação = Peso$   
Velocidade constante:  $Tração = Arrasto$

# Resultante Aerodinâmica

Resultante aerodinâmica (RA)



- Superfície aerodinâmica: pouca resistência ao avanço
- Depende da área da asa, velocidade, densidade do ar, formato do perfil, ângulo de ataque e de incidência

# Forças atuantes no avião

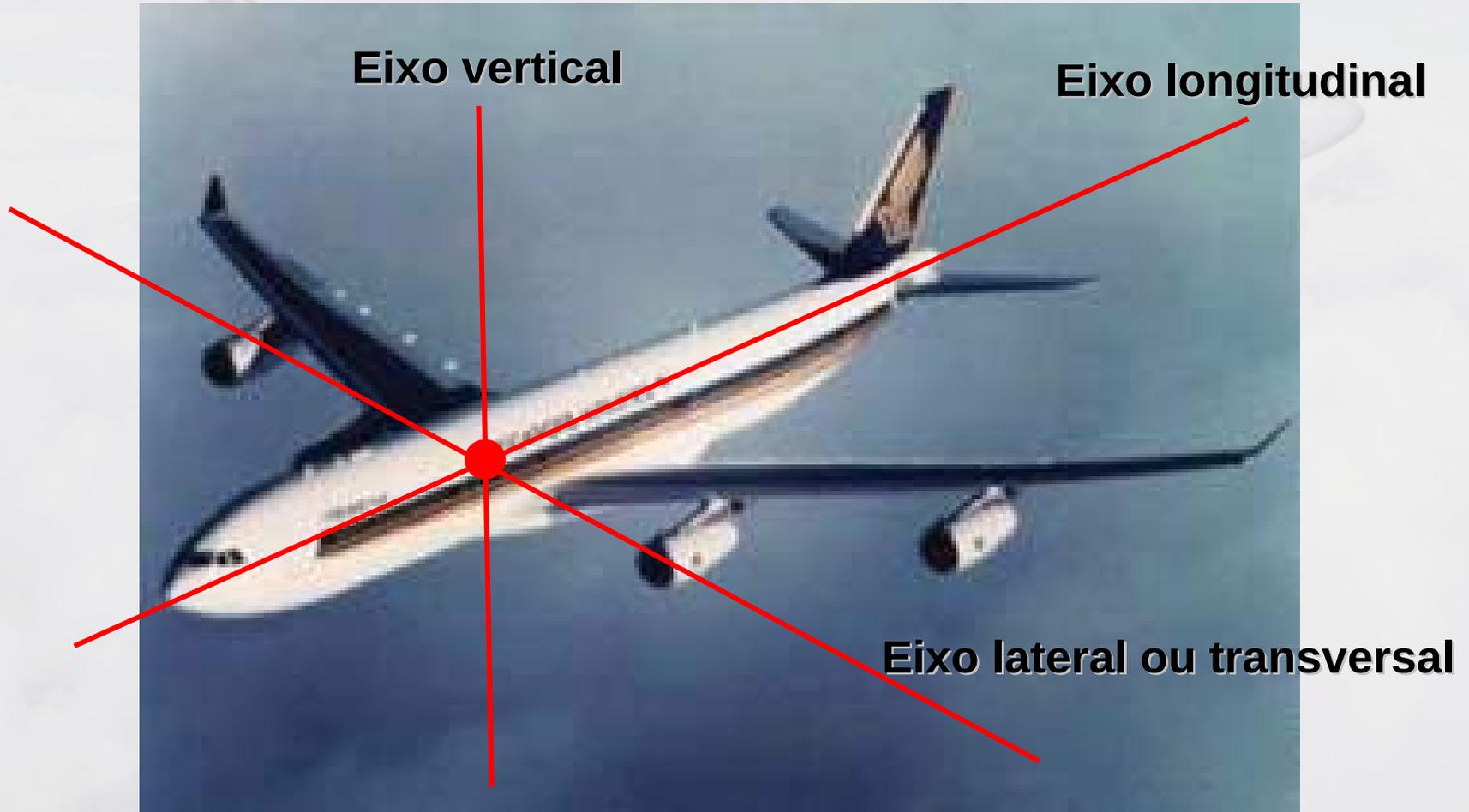
- Sustentação
  - Componente da RA perpendicular ao vento
  - Somente existe se estiver em movimento
- Arrasto (Resistência ao avanço)
  - Componente da RA paralela ao vento
  - Resistência ao avanço (partículas de ar no caminho)
- Tração (Empuxo)
  - Aceleração do avião (força motora)
- Peso
  - Peso da aeronave (força da gravidade)

# Forças atuantes no avião

- Cada força atua em um ponto:
  - $W$  (*Weight*, Peso) – centro de gravidade (CG)
  - $L$  (*Lift*, Sustentação) – centro de pressão (CP)
  - $T$  (*Thrust*, Tração) – centro de tração
  - $D$  (*Drag*, Arrasto) – centro de resistência ao avanço

Obs.: centro = ponto central da distribuição da variável em torno de toda a aeronave

# Centro de gravidade (CG)



Eixo: centro de um movimento giratório

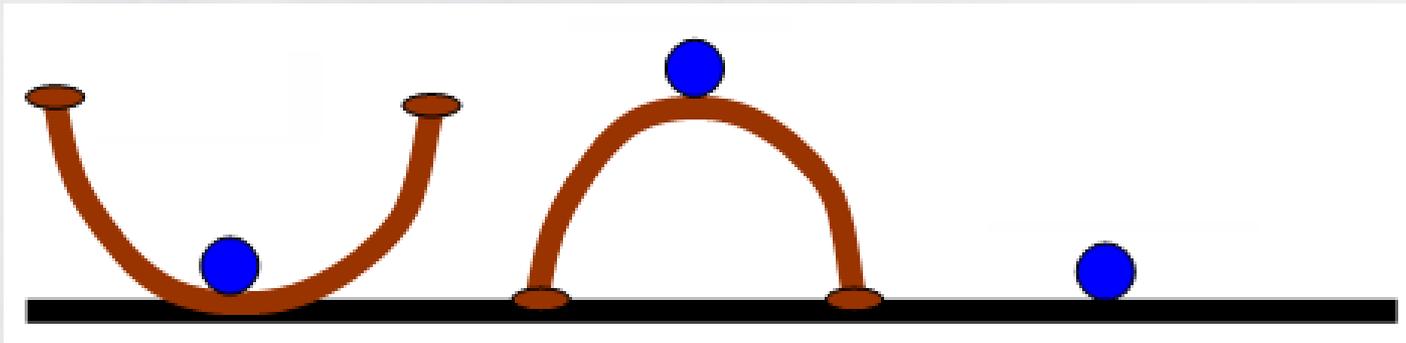
# Estabilidade

- Tendência permanente de um avião retornar à posição de **equilíbrio** após sofrer perturbação
- Depende da posição do centro de gravidade
- Tipos de equilíbrio:  ● = CG do avião

estável

instável

neutro



tende a voltar  
ao equilíbrio

tende a afastar-se  
do equilíbrio

fica em nova  
posição

# Estabilidade

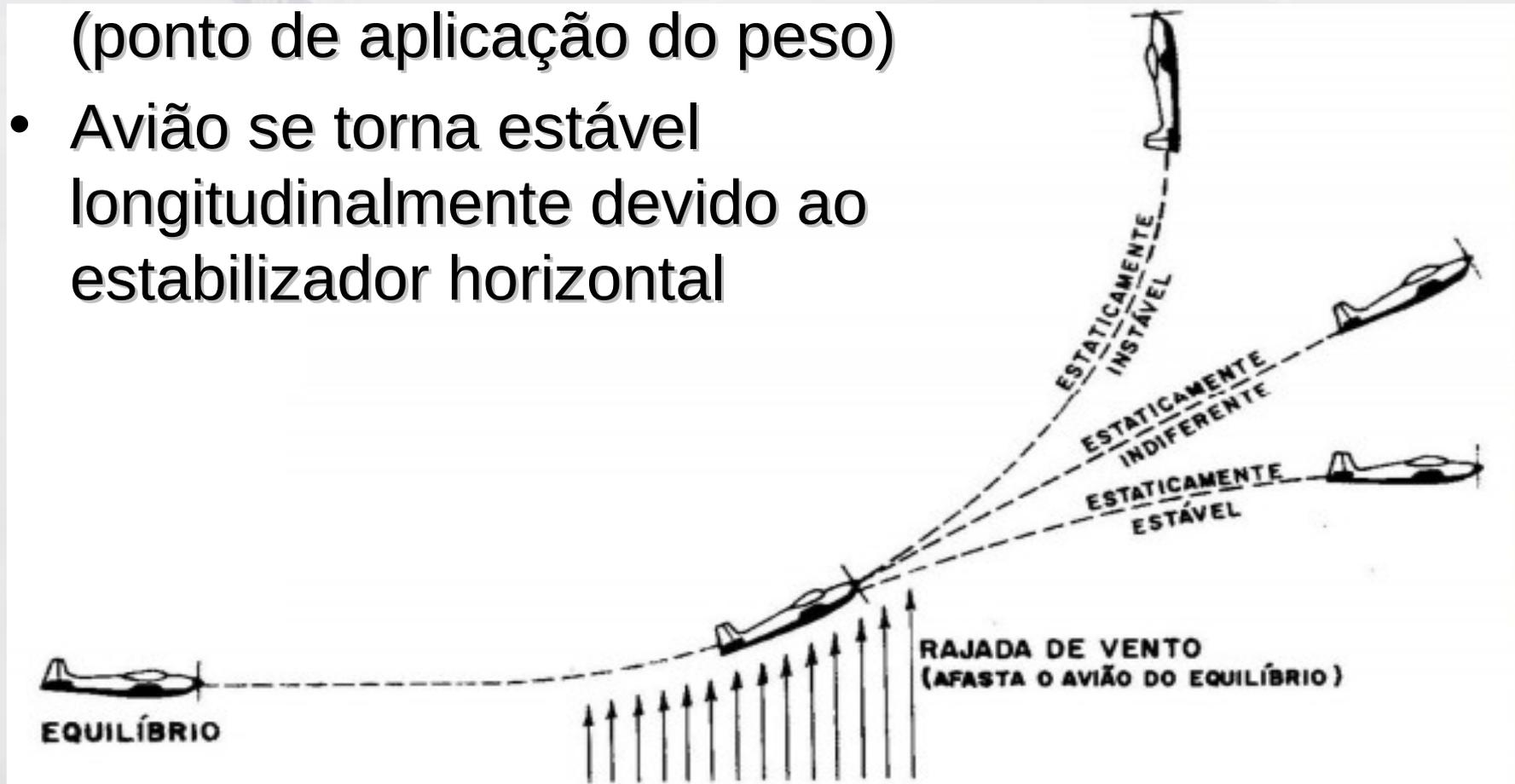
- **Estática:** tendência inicial do avião voltar ao ponto de equilíbrio
- **Dinâmica:** movimento resultante após a perturbação (ser afastado do ponto de equilíbrio)
- **Controlabilidade:** capacidade do avião em responder ao comando do piloto

# Estabilidade

- **Longitudinal:** equilíbrio do avião em relação ao eixo lateral (ao longo do eixo longitudinal) – “subindo/descendo”
- **Lateral:** equilíbrio do avião em relação ao eixo longitudinal (ao longo do eixo lateral) - “girando”
- **Direcional:** equilíbrio do avião em torno do eixo vertical – “pros lados”

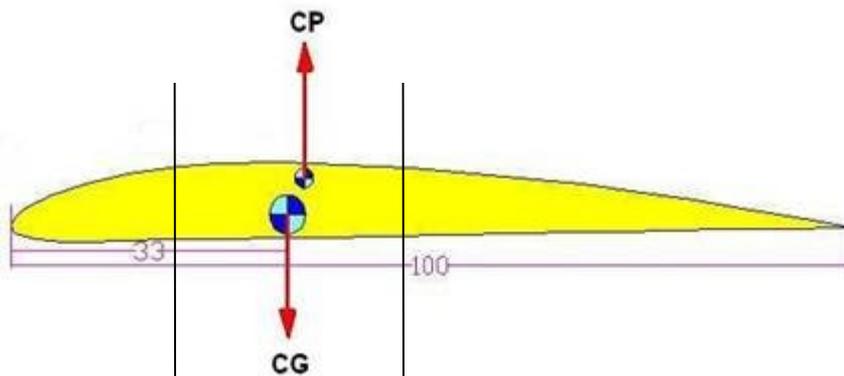
# Estabilidade longitudinal

- Mantido pela distribuição de forças (ponto de aplicação do peso)
- Avião se torna estável longitudinalmente devido ao estabilizador horizontal

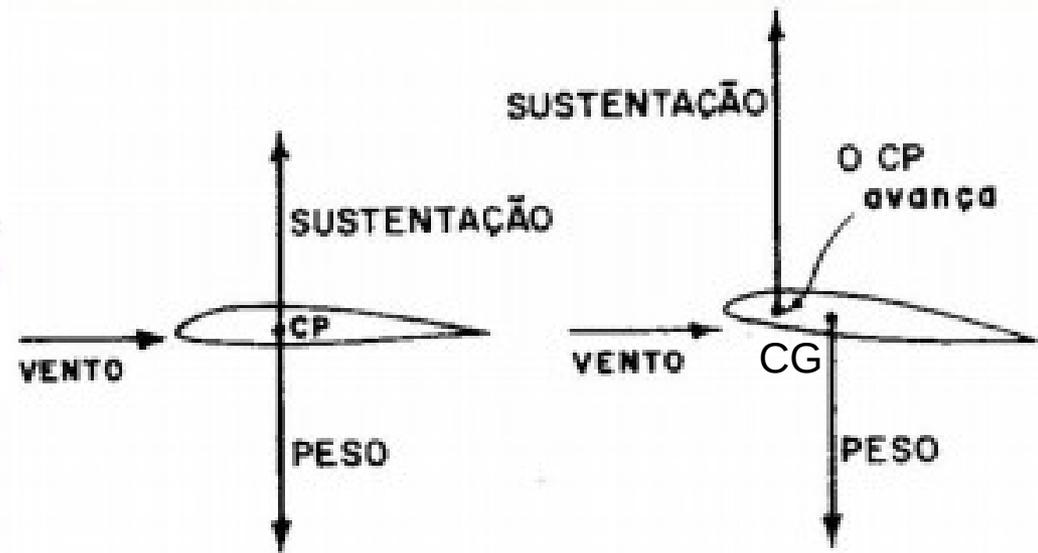


# Estabilidade longitudinal

- O CG deve ficar um pouco à frente do CP (mas não ultrapassar o limite dianteiro)



Limites dianteiro e traseiro do CG



CP desloca-se para frente com o aumento do ângulo de ataque

# Estabilidad longitudinal



# Estabilidade lateral



# Estabilidade lateral

- Diedro: ângulo formado entre o plano das asas e o eixo transversal do avião



**Diedro positivo**



**Diedro negativo**  
Efeito desestabilizante

# Estabilidade lateral

- Enflechamento: ângulo formado entre o eixo transversal e a linha do bordo de ataque



**Enflechamento positivo**



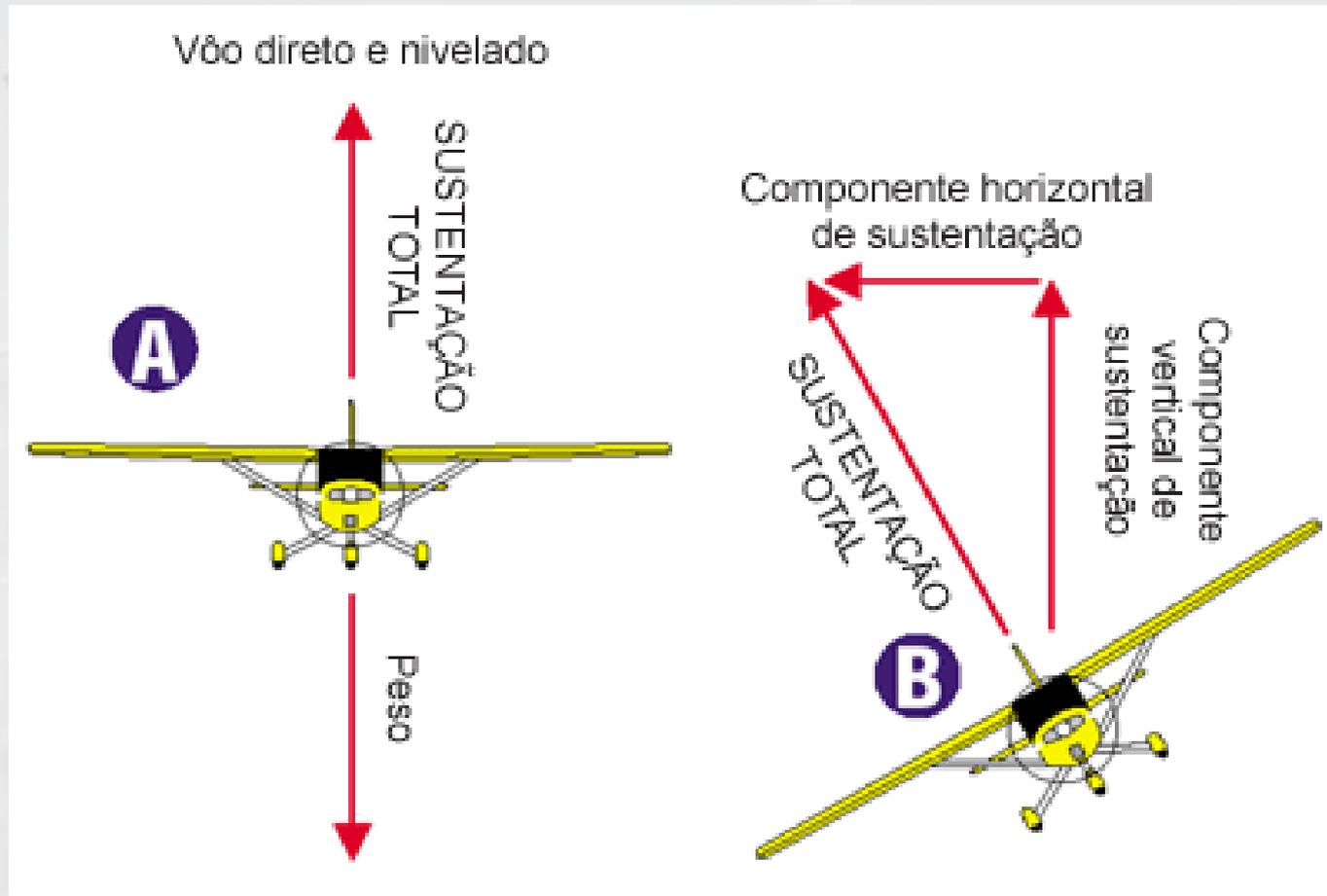
**Enflechamento negativo**

Efeito desestabilizante

# Estabilidad direccional



# Voo em curva



Quando avião inclina, componente horizontal da sustentação é dirigida ao centro e o avião desloca-se lateralmente (fazendo uma curva)

# Superfícies de comando

- Dão ao piloto o controle de voo
- **Pedais** => leme
- **Manche** => ailerons e profundor



# Eixo Longitudinal

- O movimento em torno deste eixo chama-se **ROLAMENTO, BANCAGEM** ou **INCLINAÇÃO LATERAL**

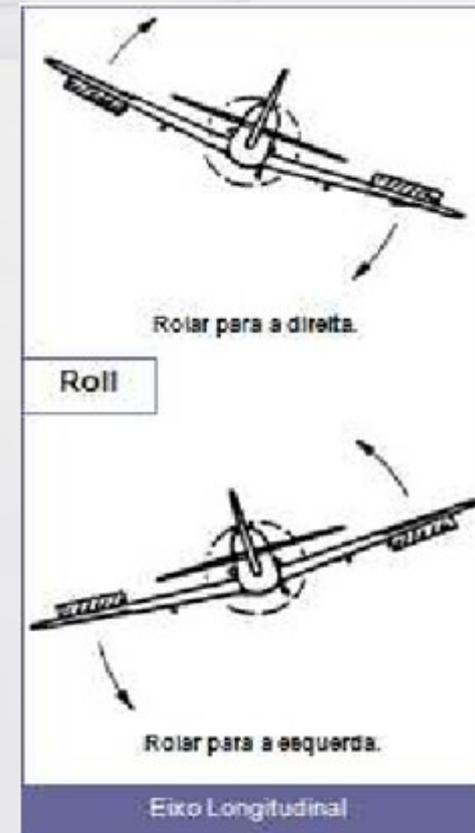
- Manche para direita: aileron direito sobe e esquerdo desce
- Manche para esquerda: aileron esquerdo sobe e direito desce

**Eixo vertical**



**Eixo longitudinal**

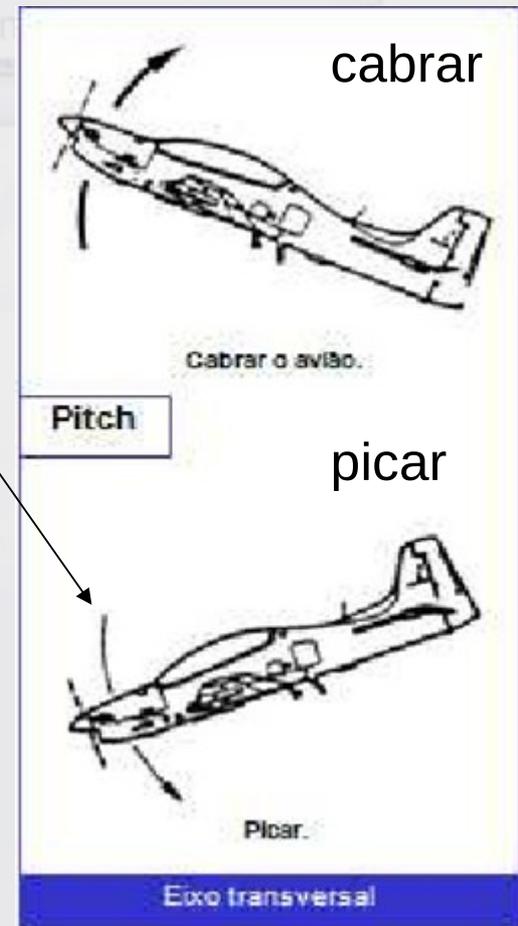
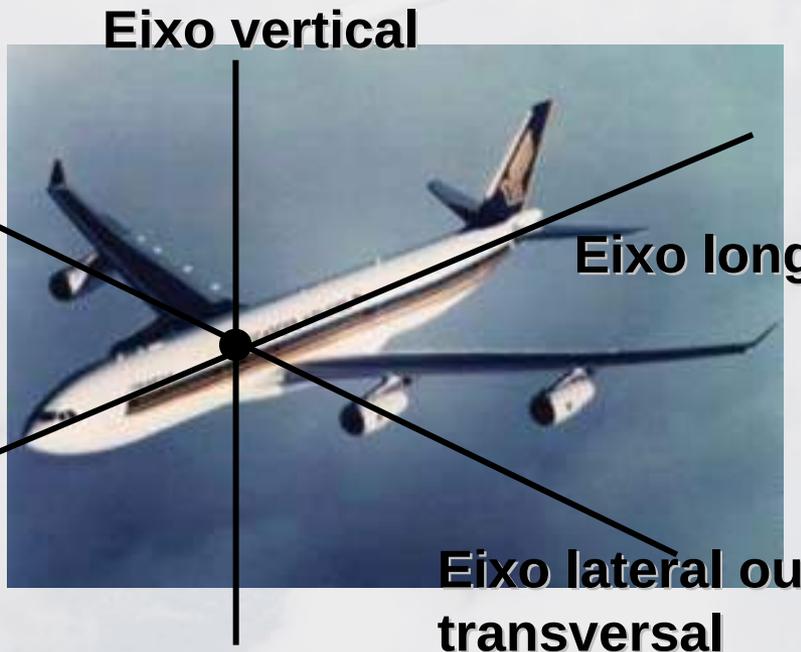
**Eixo lateral ou transversal**



# Eixo Transversal

- O movimento em torno deste eixo chama-se **ARFAGEM** ou **TANGAGEM**

- Manche para cima: profundor sobe
- Manche para baixo: profundor desce



# Eixo Vertical

- O movimento em torno deste eixo chama-se **GUINADA**

- Pedal esquerdo: leme vira para esquerda
- Pedal direito: leme vira para direita

**Eixo vertical**



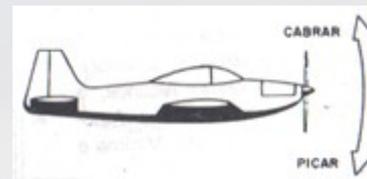
**Eixo longitudinal**

**Eixo lateral ou transversal**



# Superfícies de comando primárias

Eixos	Superfície de controle	Movimentos	Controle
<b>Vertical</b>	LEME DE DIREÇÃO	GUINADA DERIVA DERRAPAGEM	PEDAIS
<b>Longitudinal</b>	AILERON	BANCAGEM ROLAMENTO INCLINAÇÃO	MANCHE lateralmente
<b>Lateral ou Transversal</b>	PROFUNDOR (ou leme de profundidade)	TANGAGEM ARFAGEM CABRAR PICAR	MANCHE para frente ou para trás



# Superfícies de comando secundárias

- Função de aliviar as pressões dos comandos durante mudança prolongada
- Compensadores: localizados nos bordos de fuga das superfícies primárias (aileron, profundor e leme de direção)

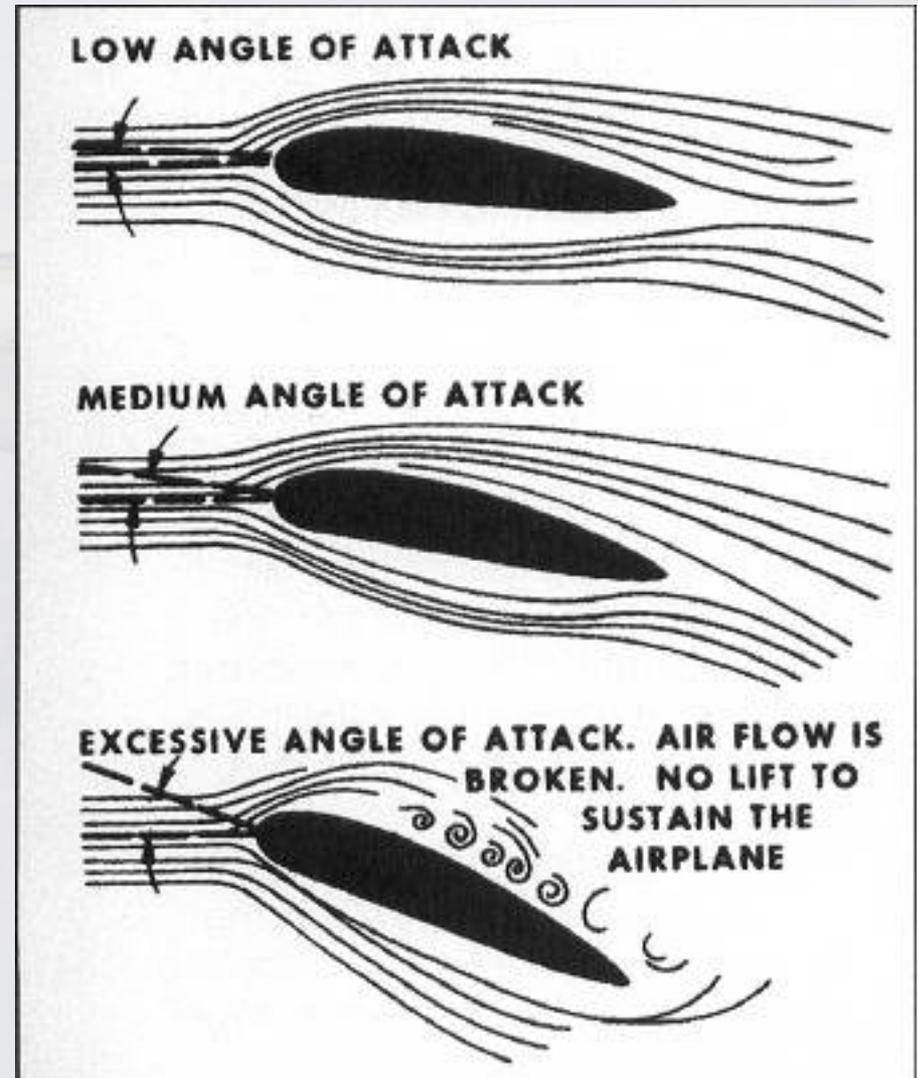


# Fases do voo

- **Decolagem** (vento de proa)
  - Ganhar velocidade
  - Ganhar sustentação
- **Voo em rota** (vento de cauda – “empurra”)
  - Manter grande velocidade
  - Baixo consumo de combustível
- **Pouso** (vento de proa – “ajuda a parar”)
  - Baixar velocidade
  - Manter sustentação

# STOL (do inglês *stall*)

- Perda de sustentação quando o ar deixa de acompanhar a curvatura da asa e o escoamento torna-se turbulento



# Dispositivos hiper sustentadores

- FLAP
  - Dispositivo instalado no bordo de fuga que aumenta a curvatura do perfil
  - Aumenta sustentação (ajuda a evitar STOL) e arrasto (funciona como freio aerodinâmico)
  - Possibilita pousar e decolar com velocidades menores
  - Três tipos: simples, ventral e fowler

Ventral

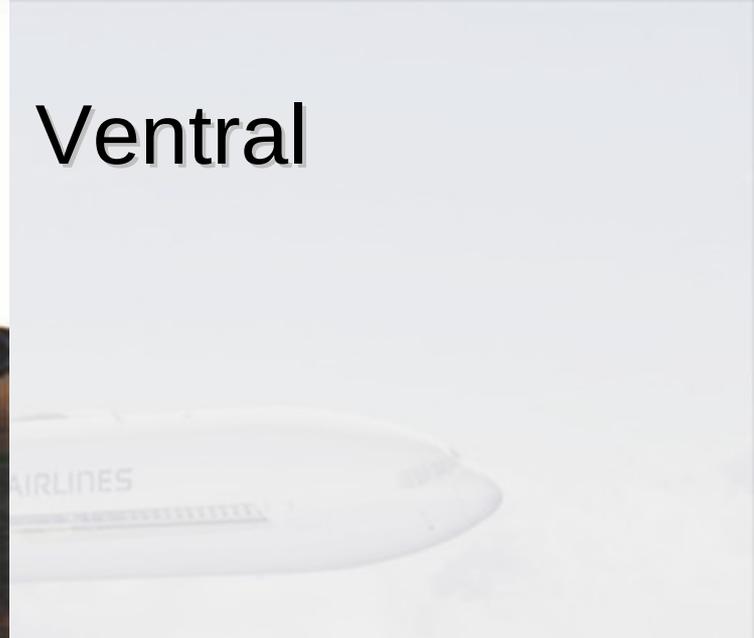


Photo Copyright © Stanislav Strokash

AIRLINERS.NET

Simples



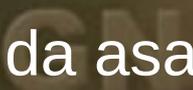
**Não Flapeado**



**Flapeado**

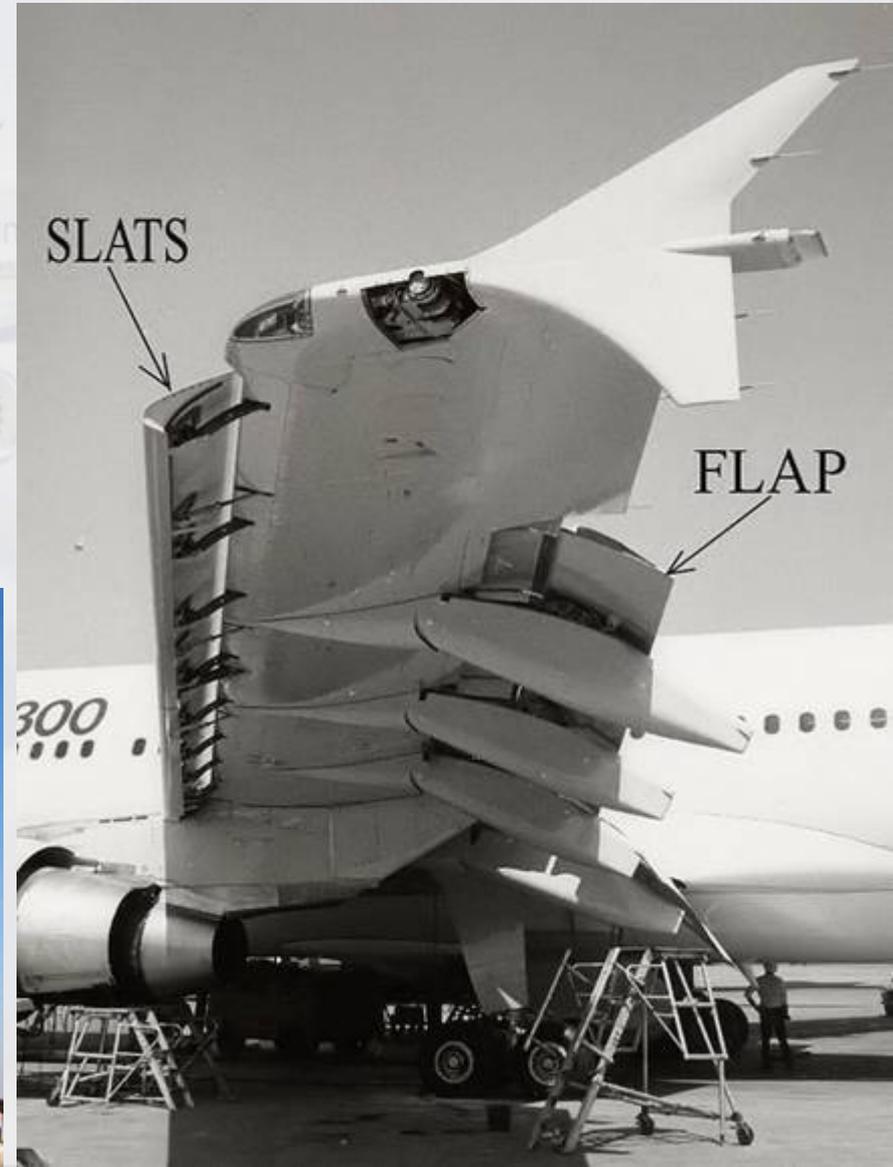
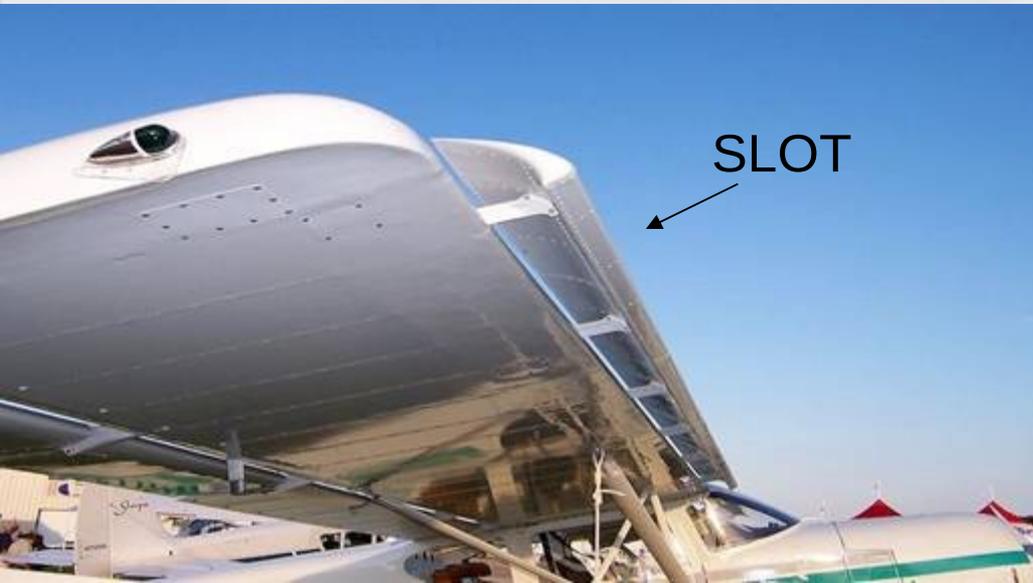


Fowler (melhor tipo de flap): aumenta curvatura e a área da asa



# Dispositivos hiper sustentadores

- Fendas fixas (SLOTs) ou móveis (SLATs) instalados no bordo de ataque para aumentar curvatura da asa



# Freios aerodinâmicos

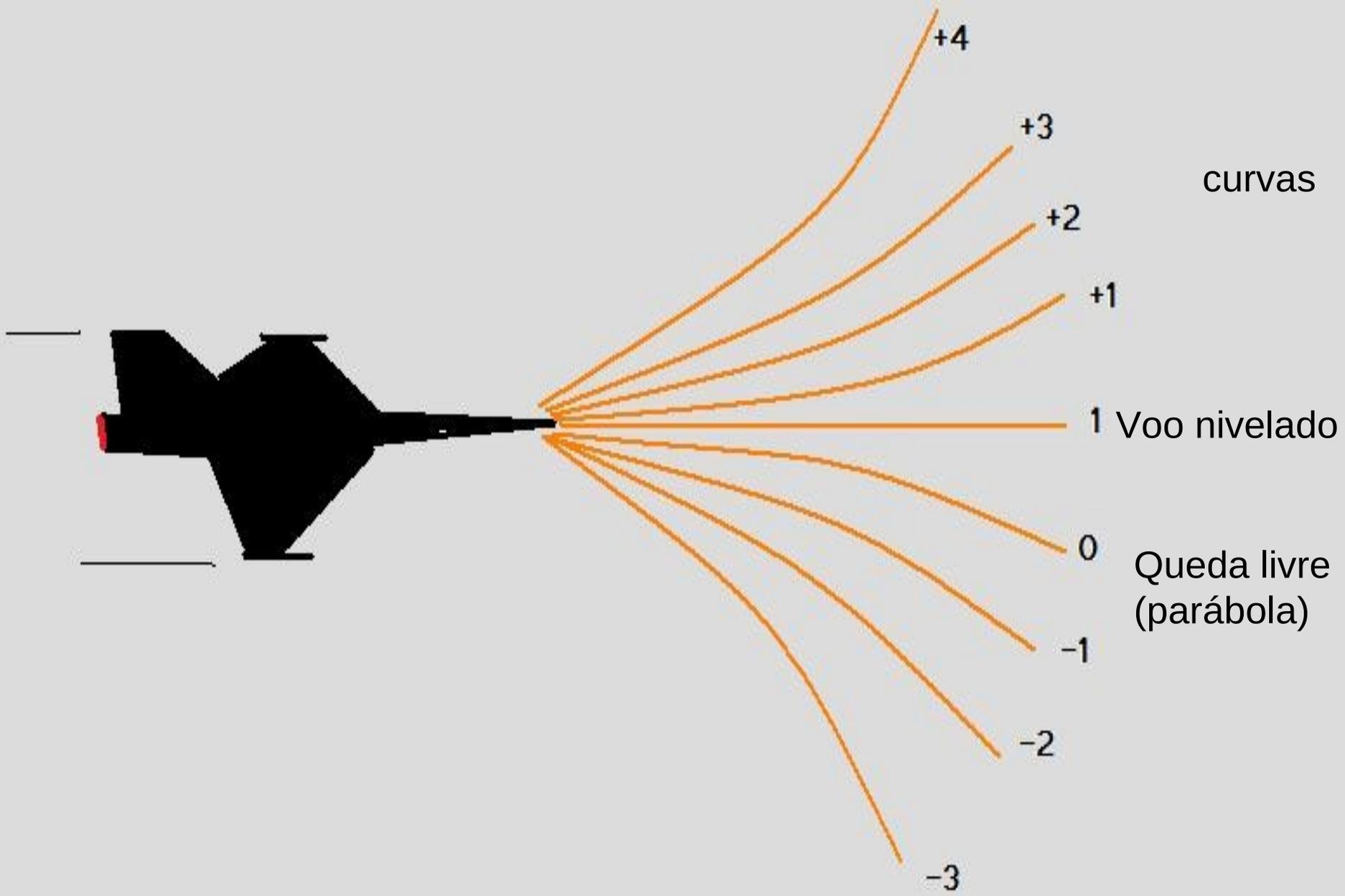
- SPOILERS (ou speed breakers)
  - Placas localizadas sobre as asas, que, ao serem levantadas, provocam perturbação no fluxo de ar
  - Podem ser usadas em vôo para diminuir a velocidade durante uma descida e em solo para frear o avião durante o pouso (tira sustentação e peso fica só sobre trem de pouso, melhorando eficiência dos freios)





# Fator carga

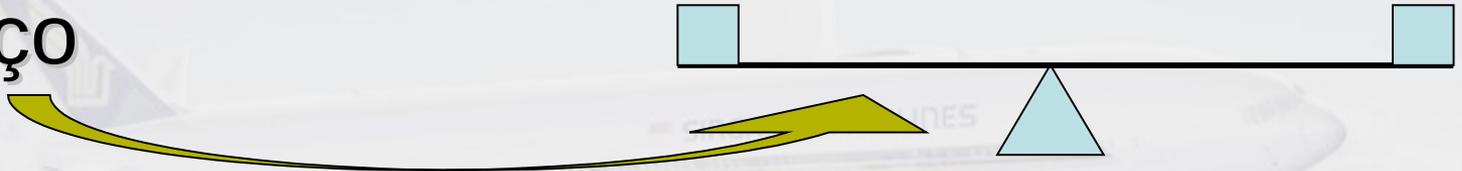
- O fator carga ( $G$ ) é a relação existente entre a sustentação produzida ( $L$ ) e o peso do avião ( $W$ )
- Em um vôo reto nivelado o fator carga é 1
- $G < 1$  o peso diminui (sensação de ser empurrado para cima)
- $G = 0$  flutua (caso se mantenha o vôo em parábola)
- $G > 1$  o peso aumenta ( $> 2$  pode desmaiar)



# Peso e balanceamento

- Braço

$r$



- Momento

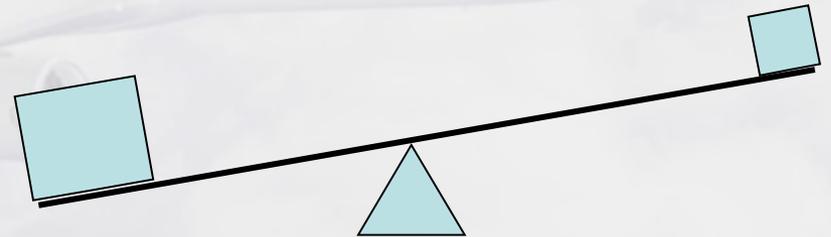
$$L = P \times r$$

- Equilíbrio

*Momentos iguais*

- Balanceamento

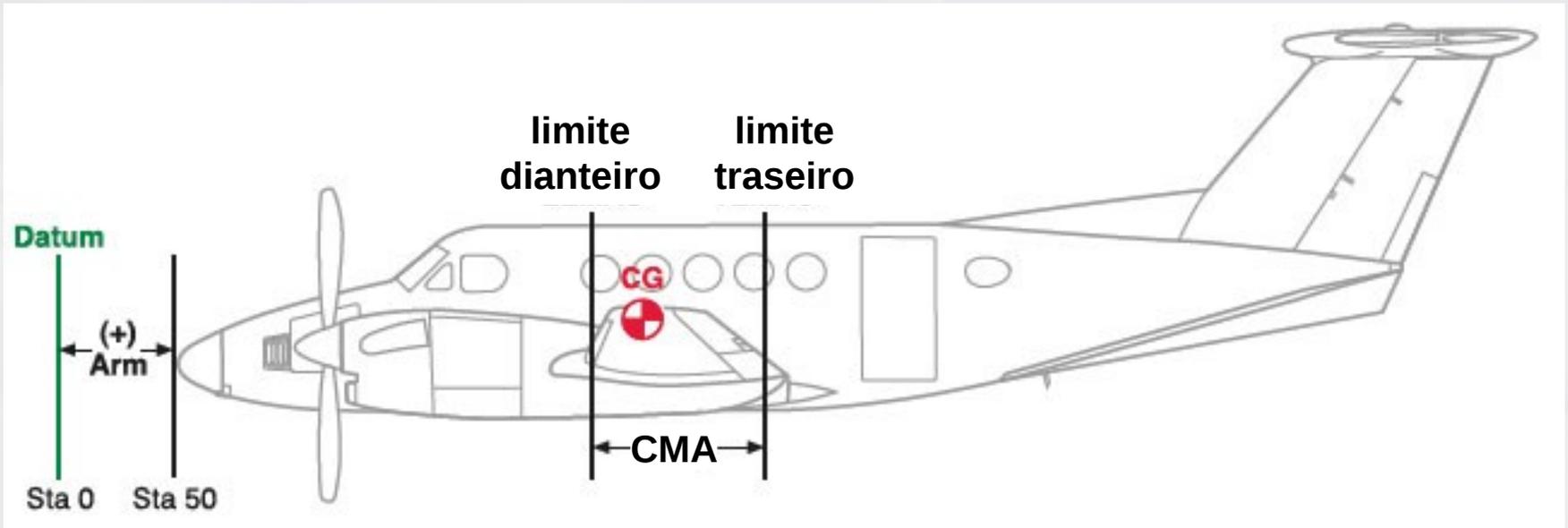
*Distribuição correta*



# Balanceamento

- Distribuição correta da carga no interior do avião respeitando os limites estabelecidos pelo fabricante (de acordo com a posição do CG ao longo do eixo longitudinal)
- Baseia-se na CMA (corda média aerodinâmica): corda onde se encontra a resultante das forças de sustentação de todos os aerofólios

# Balanceamento



- Estações (STAs): distâncias horizontais do avião a partir da Linha Datum, determinadas pelo fabricante da aeronave
- Linha Datum: linha imaginária de referência de onde são contadas as estações

# Manifesto de Peso e Balanceamento

- Peso médio dos passageiros: 75 kg (70 + 5 de bagagem de mão)
- Bagagens despachadas: valor anotado no check-in
- Total é transmitido para despachante técnico (DT) ou Despachante Operacional de Voo (DOV), que finaliza os cálculos utilizando programa de computador

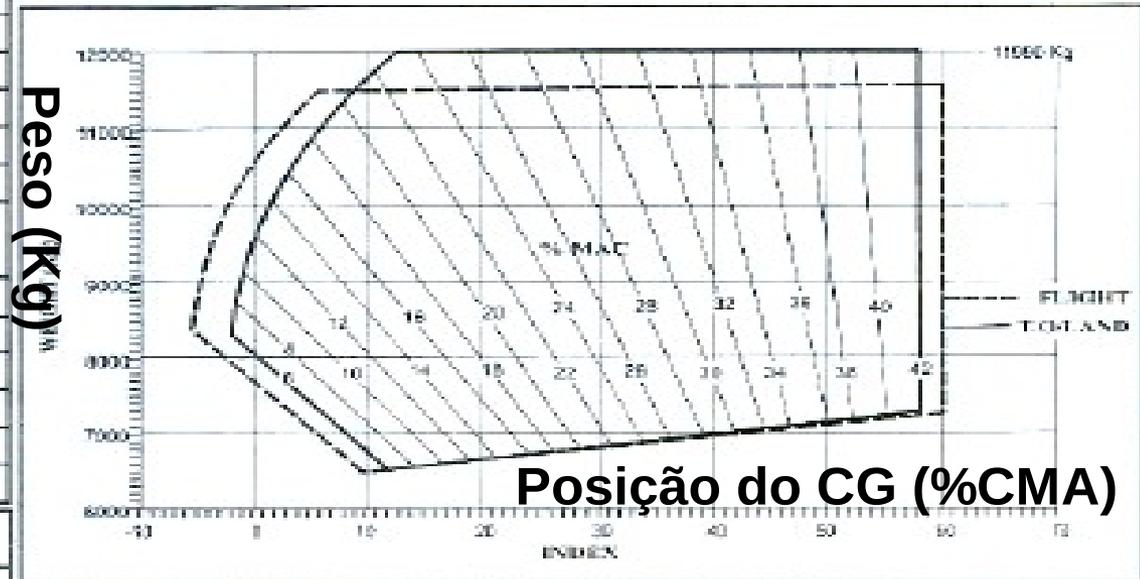


# BALANCE MANIFEST EMB-120

	WEIGHT (KG)			INDEX		
BASIC OPERATIVO						*
BAG	+		+			*
PAX "A"	+		+			*
ZERO FUEL MAX. 10900 Kg	=		=			*
TAKE OFF FUEL	+			NO FUEL INDEX		
TAKE OFF MAX. 11990 Kg	=		=			*
LMC CORRECTION	+		+			*
TAKE OFF CORRECTED	=		=			*
BURN OFF	-		-			
LANDING MAX. 11700 Kg	=		=			

FLIGHT: \_\_\_\_\_  
 DATE: \_\_\_\_\_  
 A/C REG: \_\_\_\_\_

FROM: \_\_\_\_\_  
 TO: \_\_\_\_\_  
 CAPTAIN: \_\_\_\_\_



Temp: \_\_\_\_\_  
 RWY: \_\_\_\_\_  
 Wind: \_\_\_\_\_

Time on board: \_\_\_\_\_

REMARKS:

MTOW \_\_\_\_\_  
 Limitado por: \_\_\_\_\_  
 C/G POSITION (% MAC)  
 ZERO FUEL WEIGHT \_\_\_\_\_  
 TAKE OFF WEIGHT \_\_\_\_\_

DESTINO	PAX			BAG	CARGA		FORAÇO
	ADT	CHO	INF	LIVRE	PAÇA	GC	
	T						
	L						
	T						
	L						
	T						
	L						
TOTAL							

PREPARED BY \_\_\_\_\_  
 CAPT SIGNATURE \_\_\_\_\_

Compensador para variações do  
balanceamento (aumento da sustentação)



# Balanceamento

- O CG varia levemente em vôo com o deslocamento de pessoas a bordo e o consumo de combustível
- O CG possui os limites dianteiro e traseiro
- Voo balanceado: estação do CG deve ficar entre os limites na CMA e o momento do nariz deve ser igual ao da cauda





# CG fora dos limites dianteiros

- Aumento do consumo de combustível
- Dificuldade em manter a cauda baixa no pouso
- Sobrecarga na roda do nariz
- Comandos pesados, dificultando a decolagem
- Maior potência requerida para manter certa velocidade



# CG fora dos limites traseiros

- Tendência de aumentar a velocidade de STOL, fazendo com que o avião fique instável após a decolagem
- Tendência em sair do chão antes de atingir a VR (velocidade de rotação)



# Pesos operacionais

- **Peso básico (PB):** peso do avião, considerando seus itens básicos (fuselagem, asas, motores, assentos, equipamentos...)
- **Peso básico operacional (PBO):** PB mais tripulação, bagagem, copa
- **Peso operacional (PO):** PBO mais combustível de decolagem
- **Peso atual zero combustível (PAZC):** PBO mais carga paga

# Pesos operacionais

- **Peso de decolagem (PAD):** PAZC mais combustível de decolagem ou também PO mais carga paga
- **Peso de pouso (PAP):** PAD menos combustível consumido (trip fuel)

**Carga paga (pay load):**  
passageiros, bagagem,  
carga, correio

**Carga útil:** carga paga  
mais combustível de  
decolagem

**PB**  
Peso básico



**PBO**  
Peso básico  
operacional



**PO**

Peso operacional



**Carga paga**



**PAZC**

Peso Zero Combustível

**PAD**

Peso de decolagem

**PAD – trip fuel = PAP**    Peso de pouso

# Pesos estruturais

- **Peso máximo estrutural de decolagem (PMED)** – limitado pela estrutura (determinado pelo fabricante)
- **Peso máximo zero combustível (PMZC)** – peso máximo de um avião totalmente carregado, faltando apenas o combustível
- **Peso máximo estrutural de pouso (PMEP)**
- **Peso máximo de táxi (PMT)**

# Aerodinâmica de alta velocidade

- Ultrapassar a barreira do som (340 m/s ISA)
- Som: vibração das moléculas de ar conforme uma onda (onda sonora)
- Quando objeto se move no ar, produz ondas sonoras (audíveis ou não)



# Aerodinâmica de baixa velocidade

- Partículas de ar se deslocam conforme avião passa



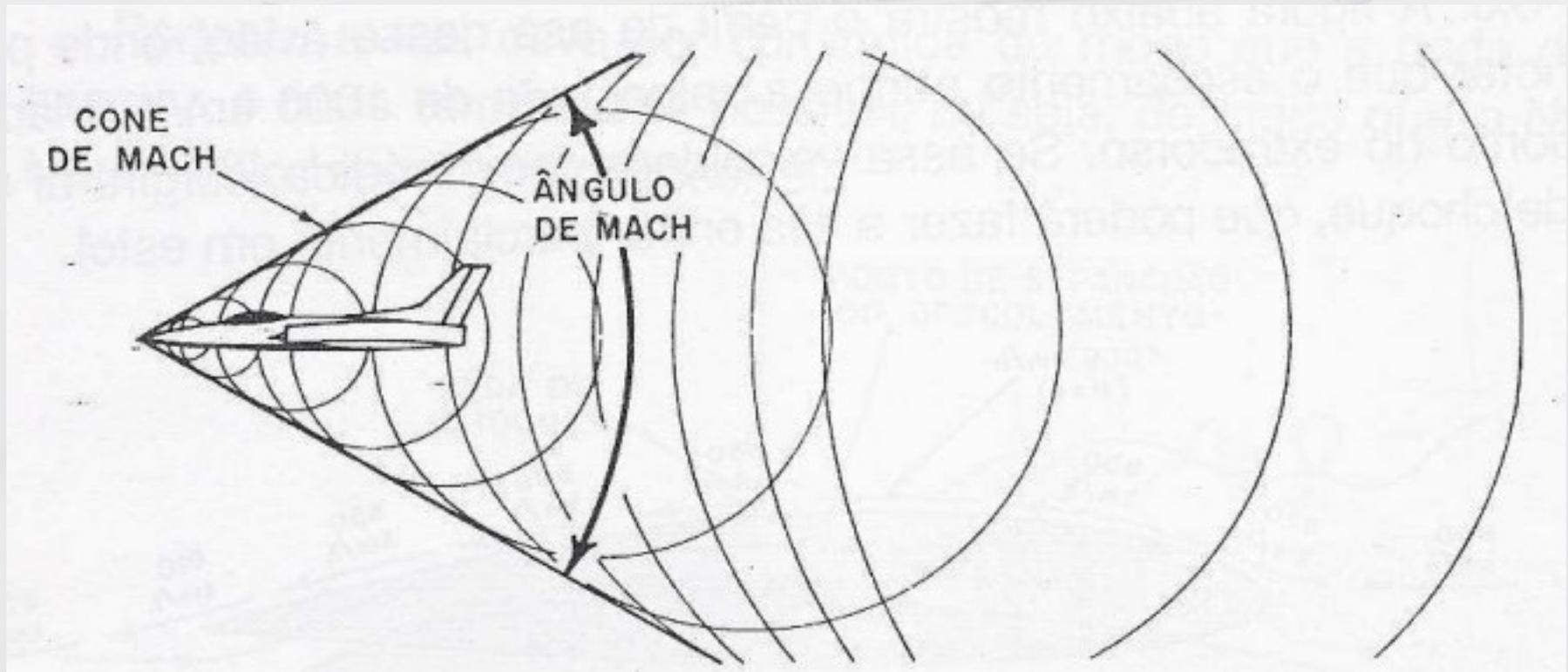
# Aerodinâmica de alta velocidade

- Ondas de pressão não conseguem se afastar do avião



# Aerodinâmica de alta velocidade

- Voo acima da velocidade do som



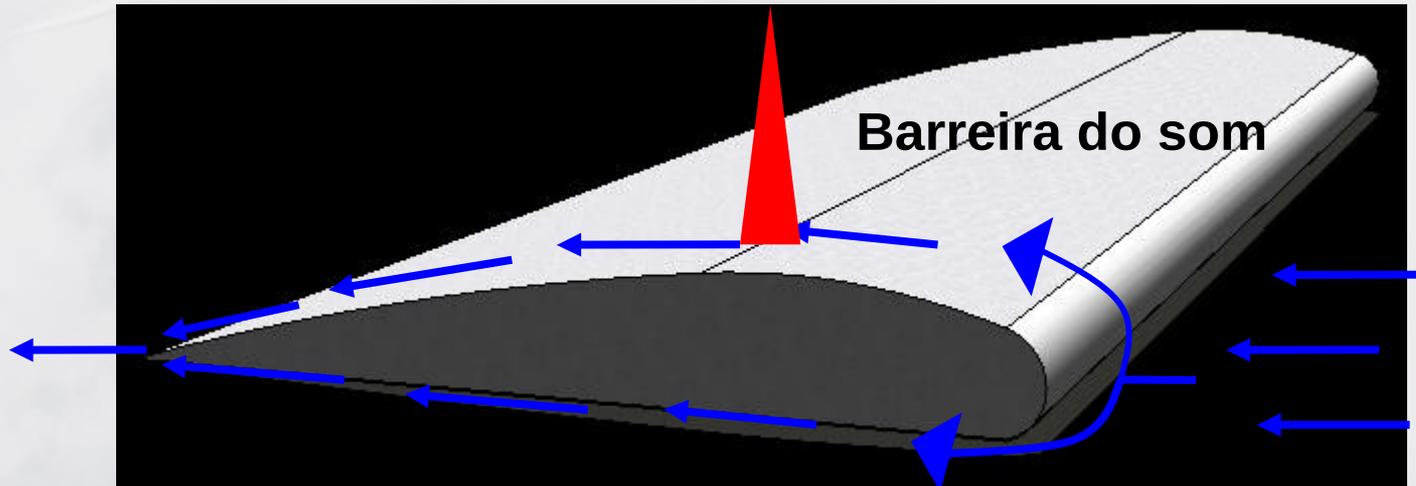
# Voo supersônico x subsônico

- Voo subsônico: velocidades abaixo da velocidade do som (maioria dos voos)
- Voo supersônico: velocidades acima da velocidade do som (ultrapassa barreira do som)



# Alta velocidade na asa

- Velocidade maior é no extradorso (primeira região que ultrapassa barreira do som)
- **Vôo transônico:** subsônico no avião e supersônico no extradorso da asa



# Machímetro

- Mede a velocidade do avião em relação à velocidade do som: número MACH

Exemplos:

- Mach 0.83 (B-747)
  - Mach 0.80 (F-100)
  - Mach 0.78 (A320)
- A velocidade do som varia com a temperatura



# Aeronave supersônica

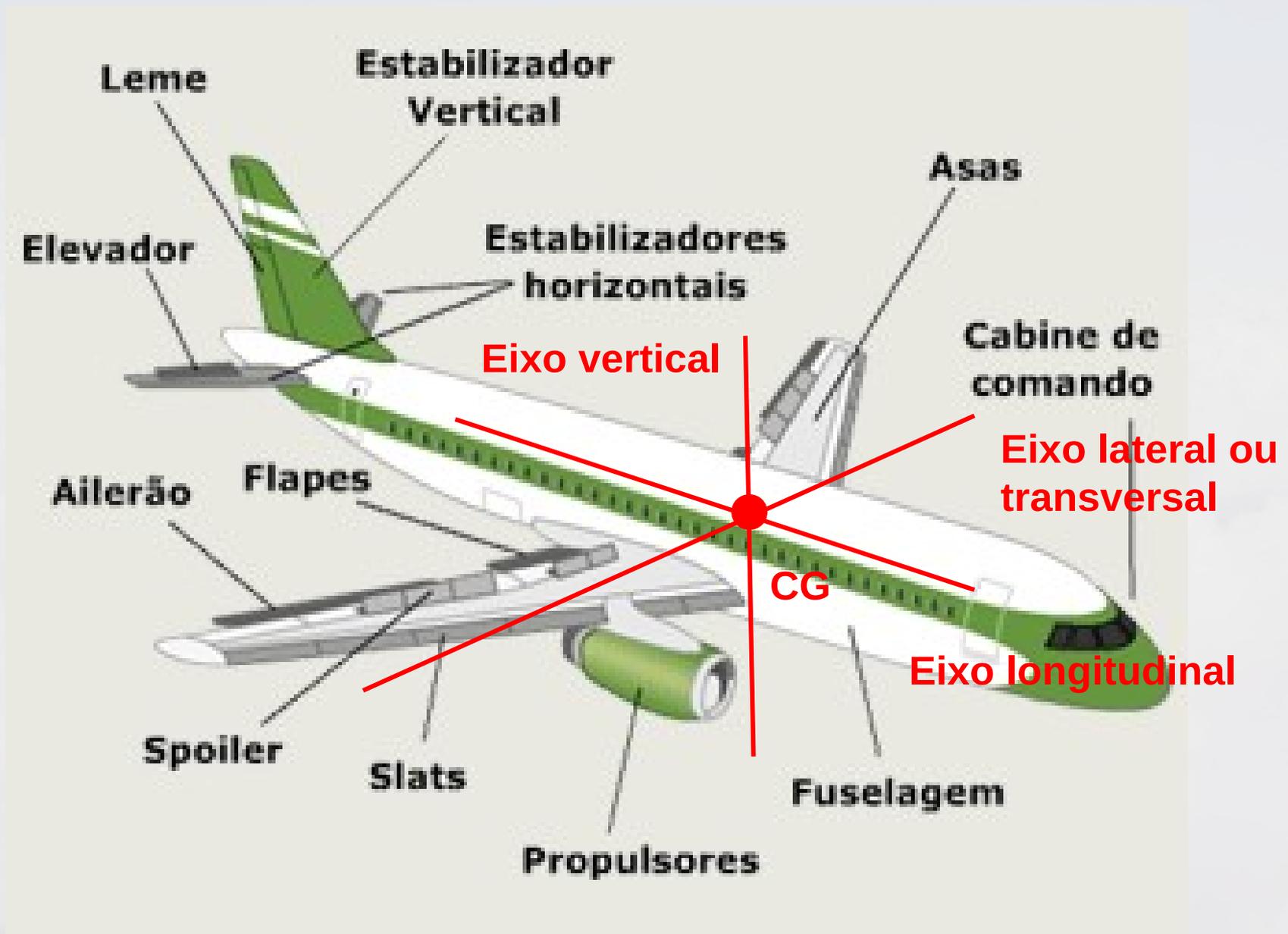
- Concorde



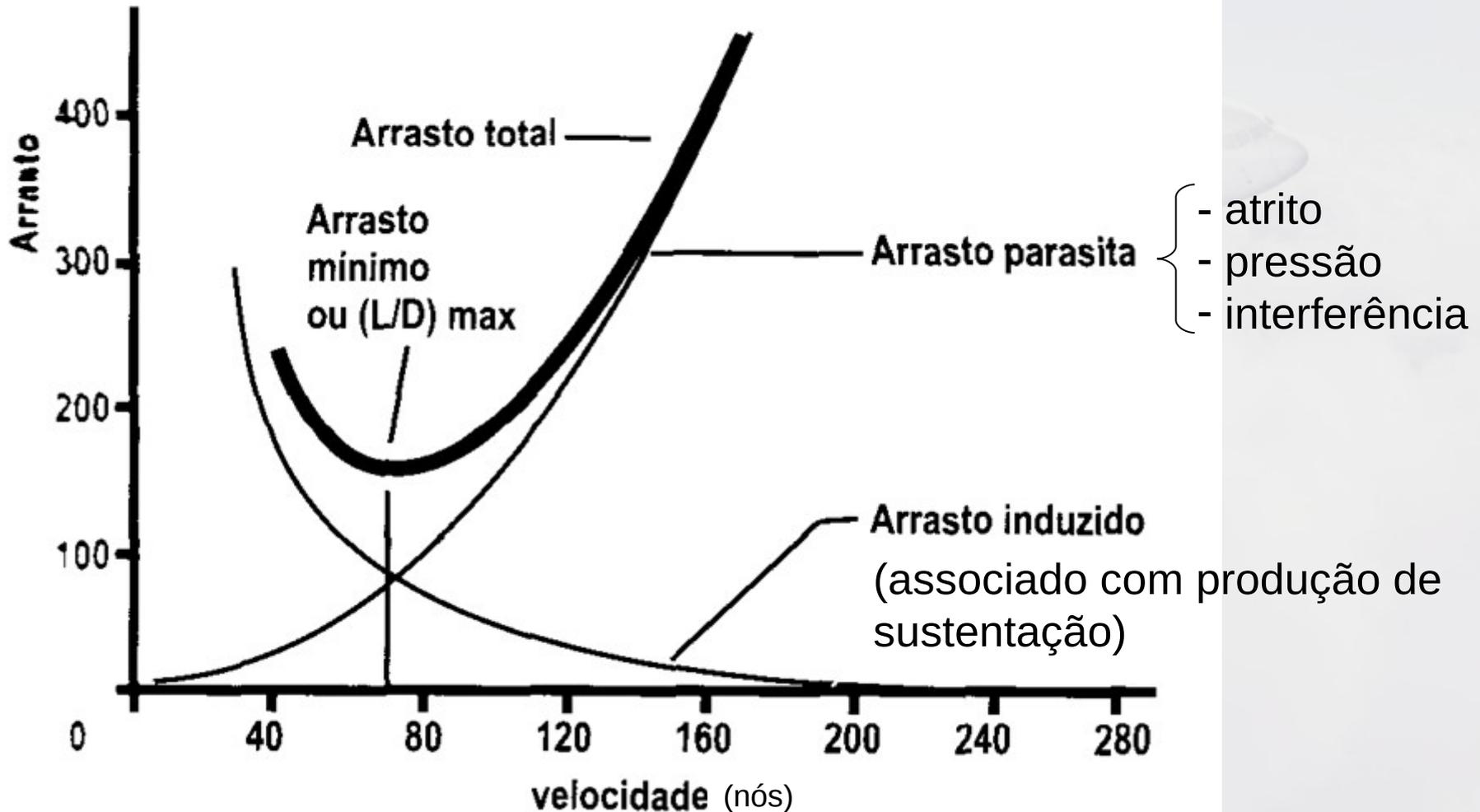
Vôo Paris - Rio de Janeiro:

- normal: 12 horas

- Concorde: 6  
horas



# Arrasto



(diretamente proporcional à tração)