

TEORIA DE VOO



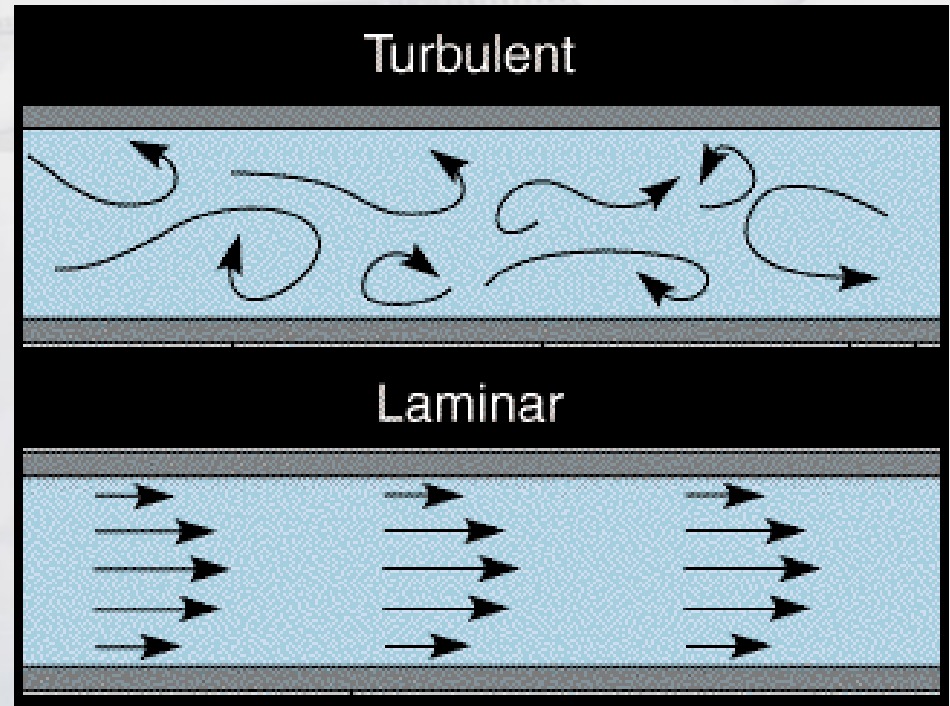
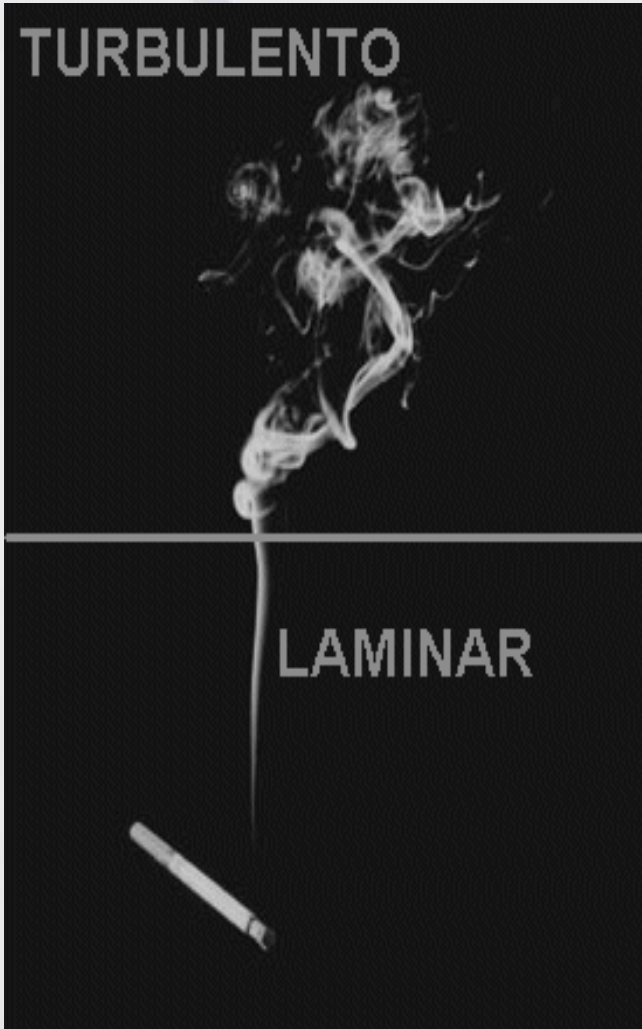
Vinícius Roggério da Rocha

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

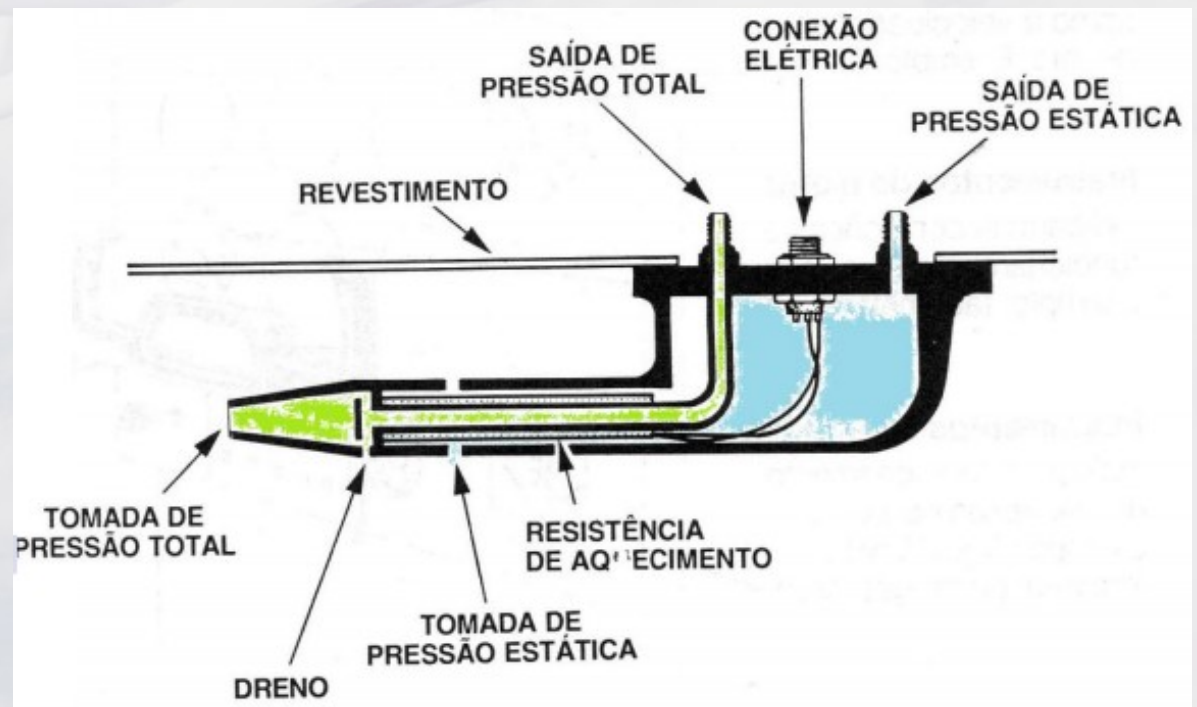
regular

Pressão

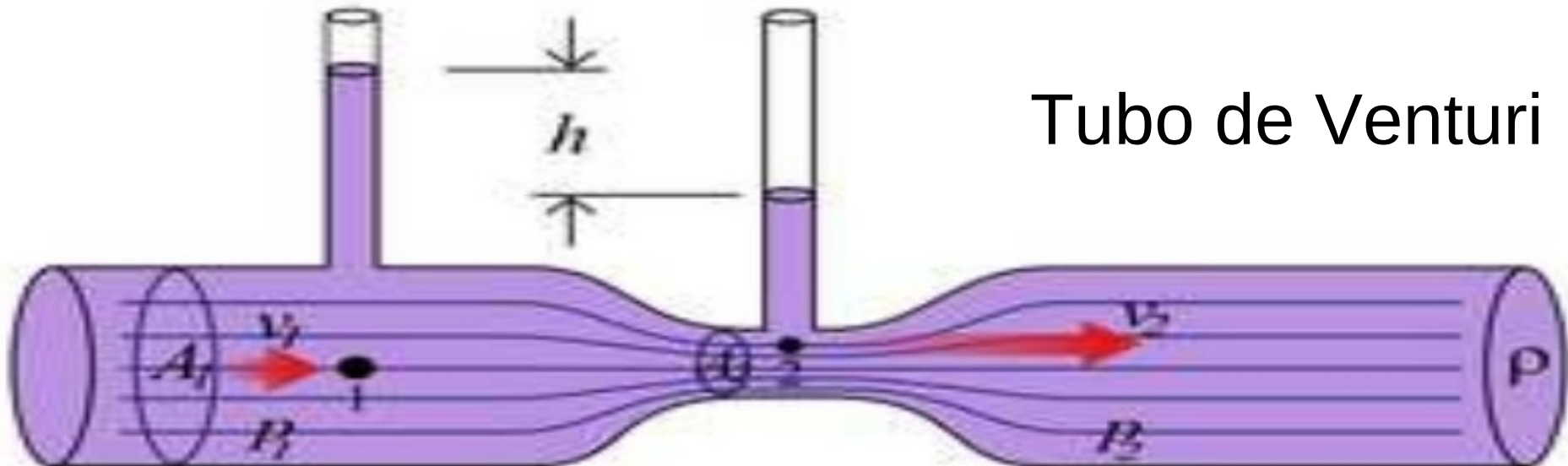
- **Pressão:** Força aplicada sobre uma área
- **Pressão estática:** exercida pelo ar em um corpo na atmosfera (ex.: pressão atmosférica – peso da coluna de ar)
- **Pressão dinâmica:** impacto do vento (aumentam com densidade e velocidade do vento)

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)

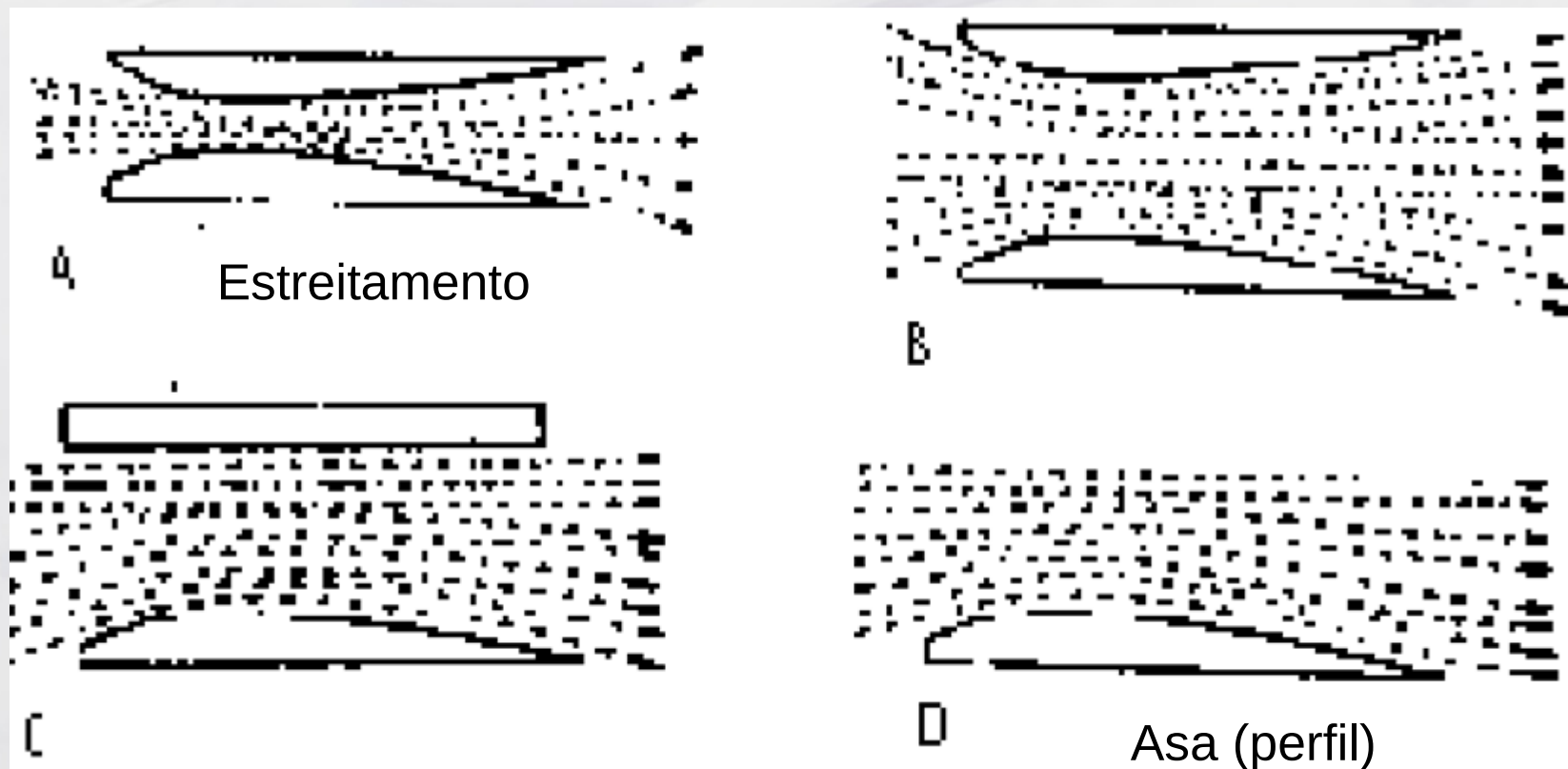


Princípios físicos

- **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)

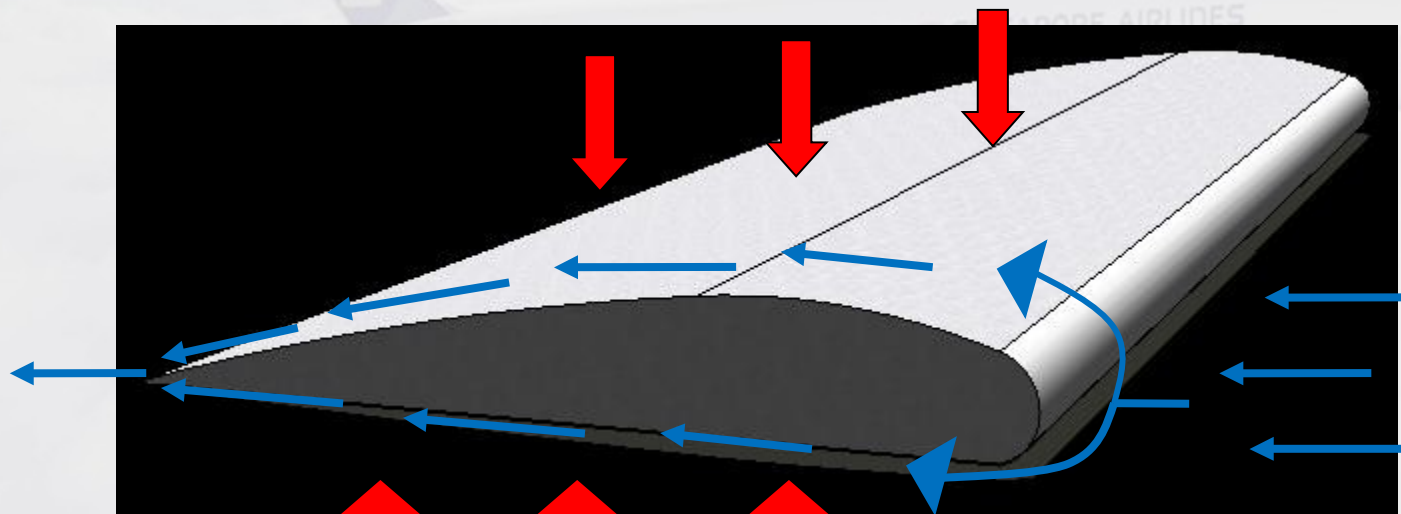
Aerofólio

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



Aerofólio (perfil de asa)

Pressão menor

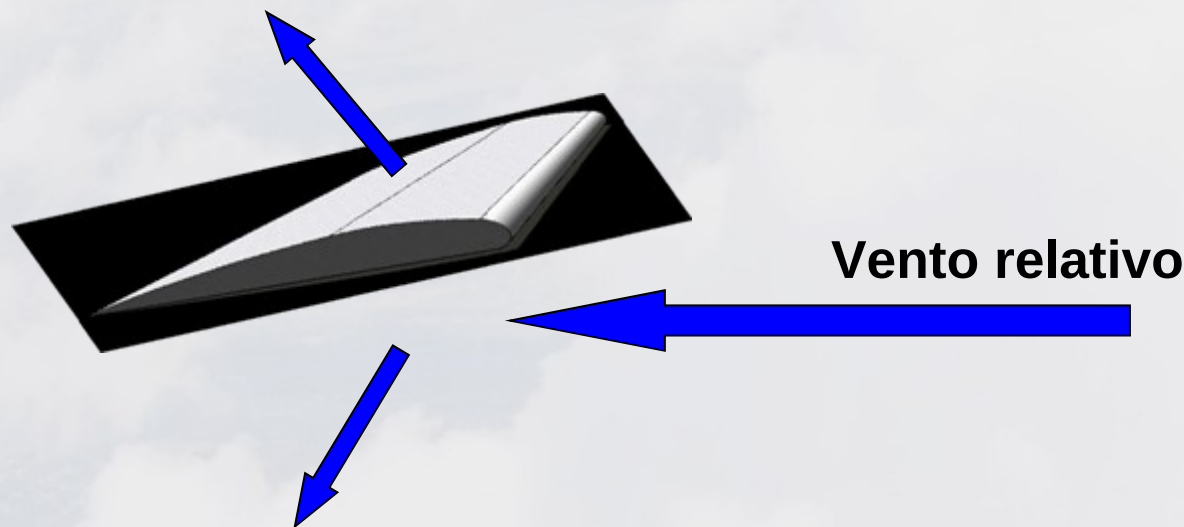


Vento relativo
(mesma direção e intensidade, sentido contrário)

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



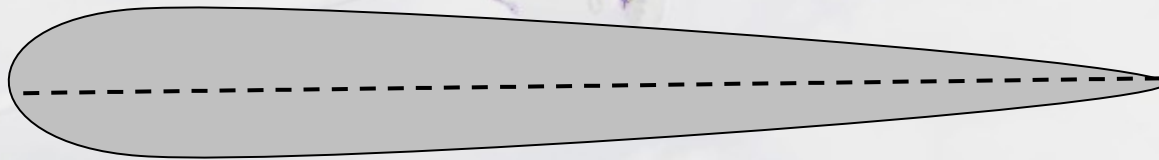
Sustentação



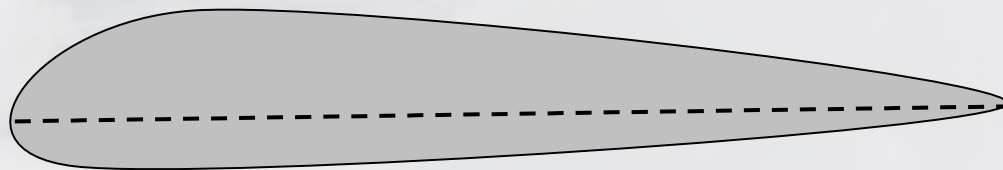
- Depende de cinco fatores (quanto maior o fator, maior a sustentação):
 - Área da asa
 - Velocidade
 - Densidade do ar
 - Formato do perfil
 - Ângulo de ataque/incidência

Tipos de aerofólio

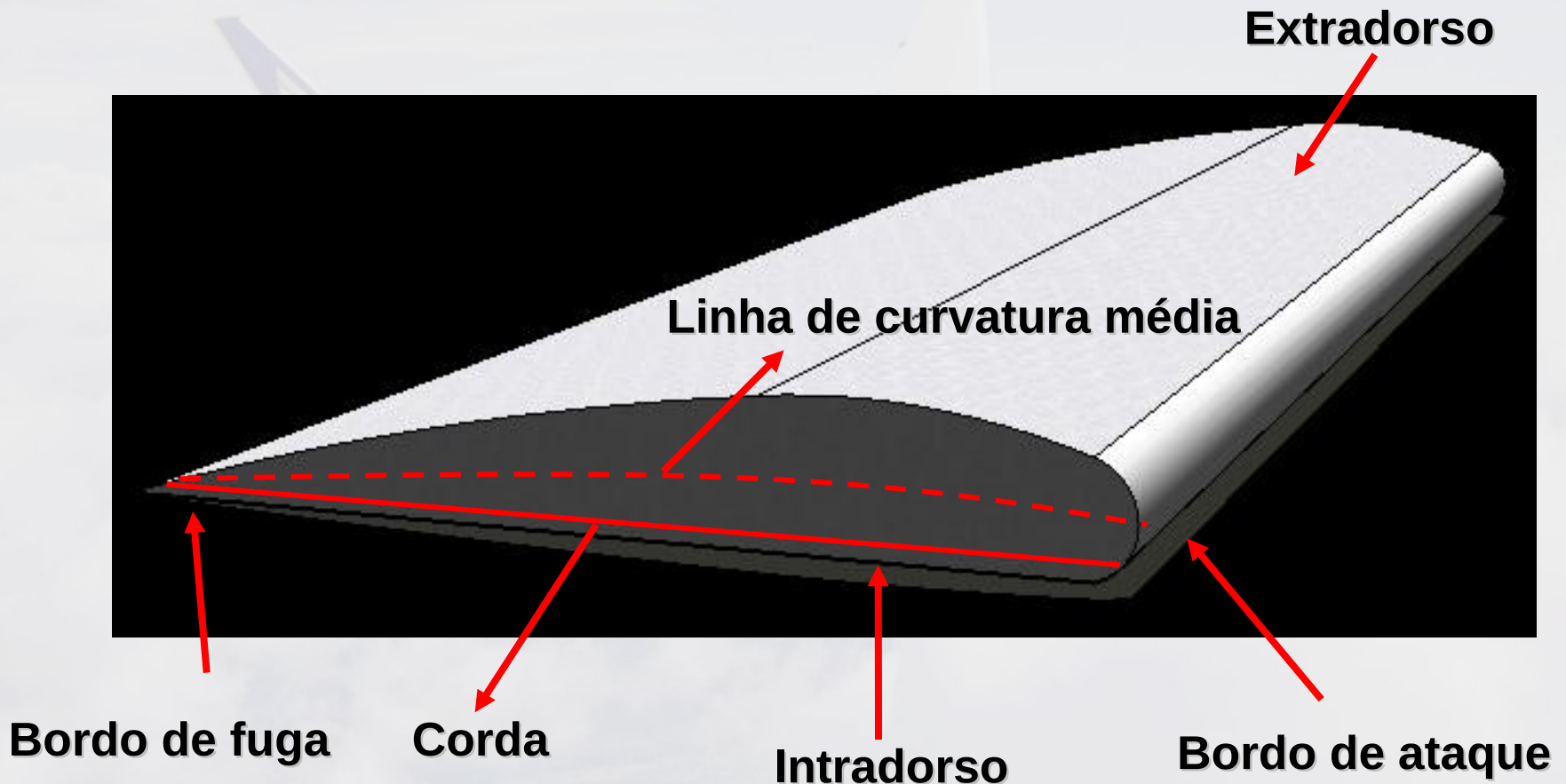
- Simétrico: pode ser dividido por uma linha reta gerando duas metades iguais (empenagem)



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



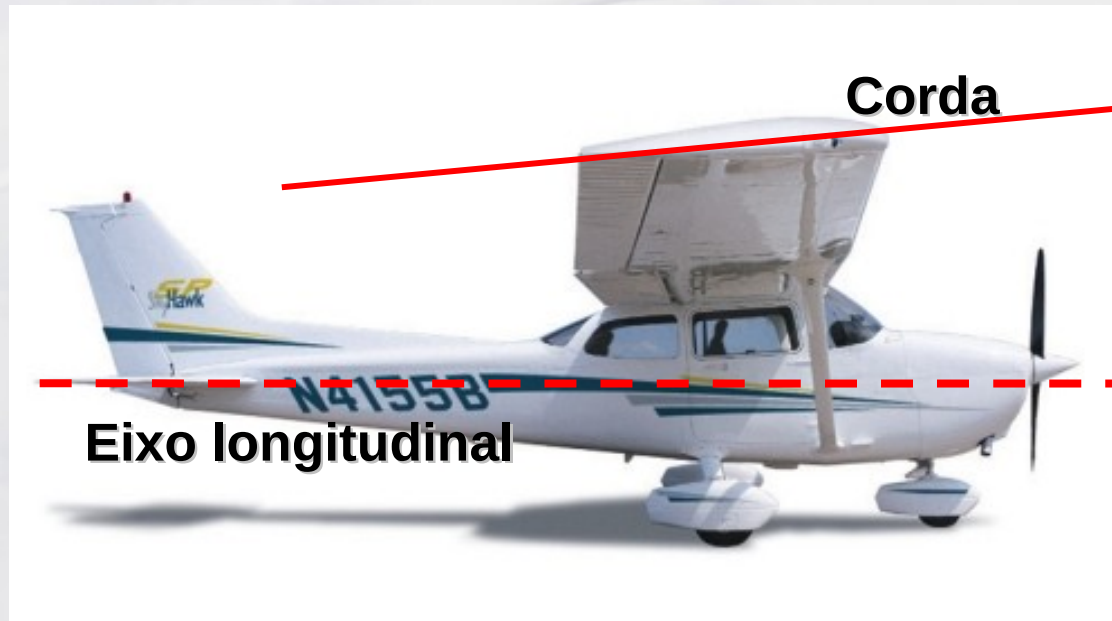
Aerofólio (nomenclatura)



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

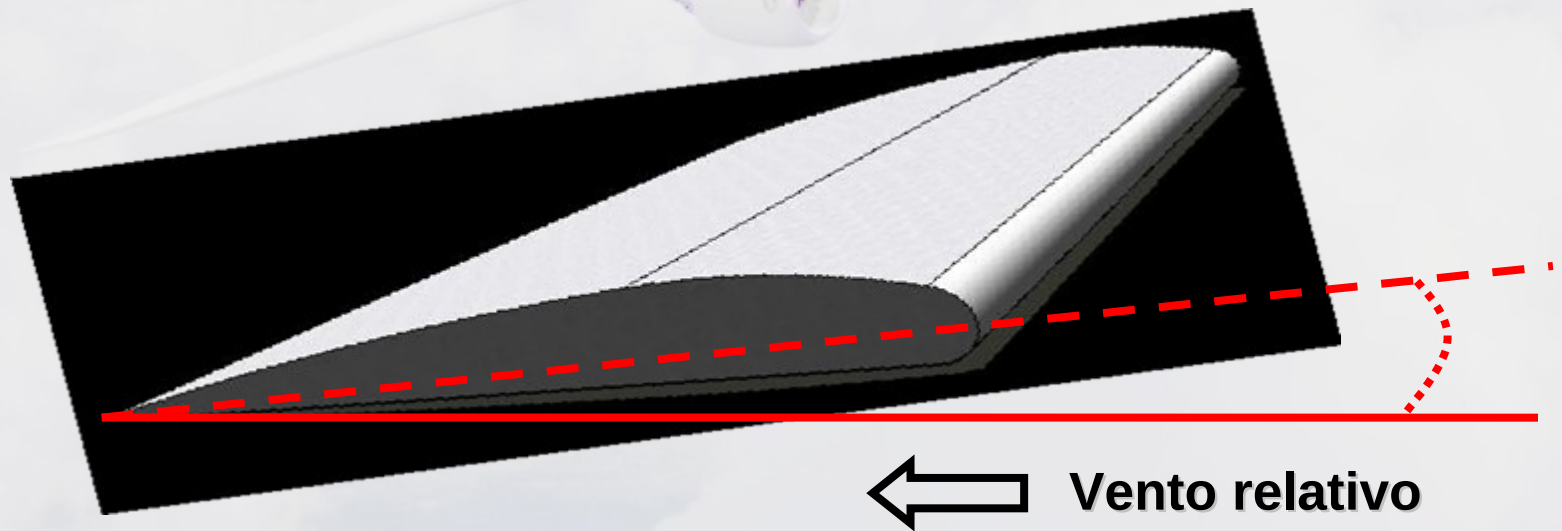
Ângulo de incidência

- 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



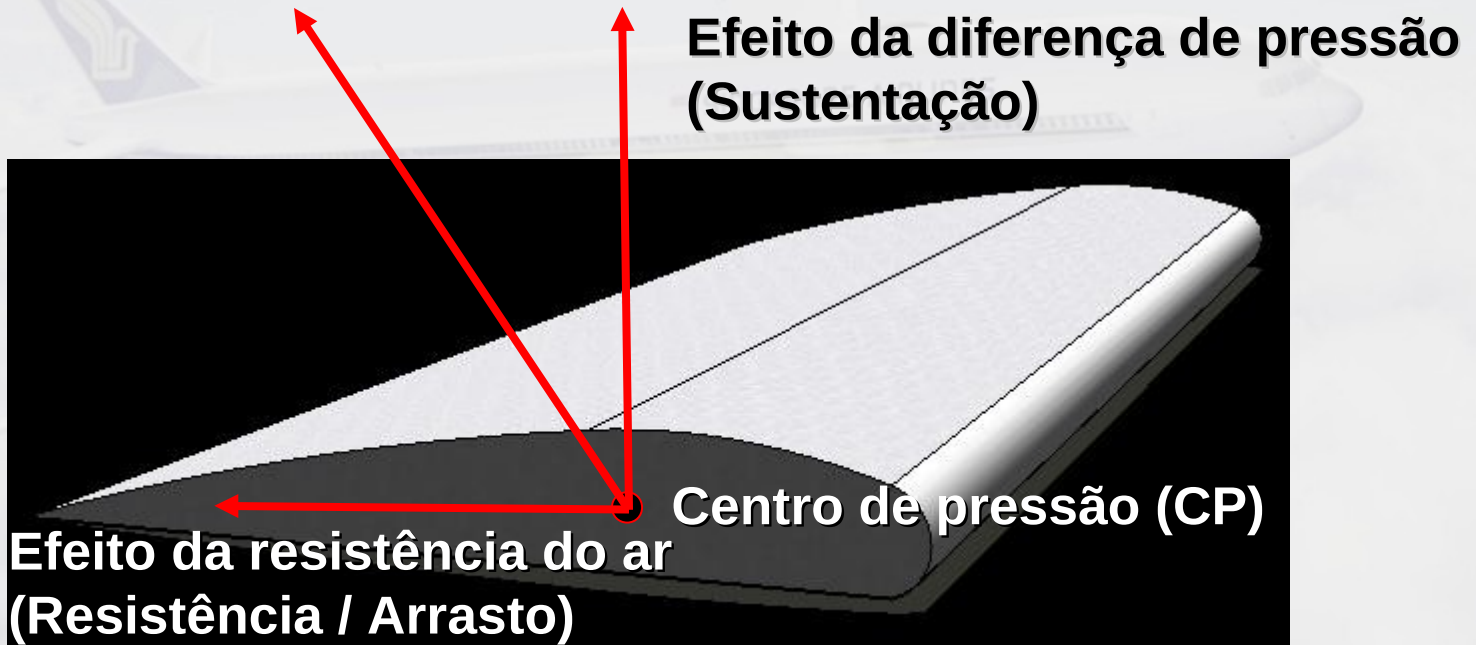
Forças atuantes no avião



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

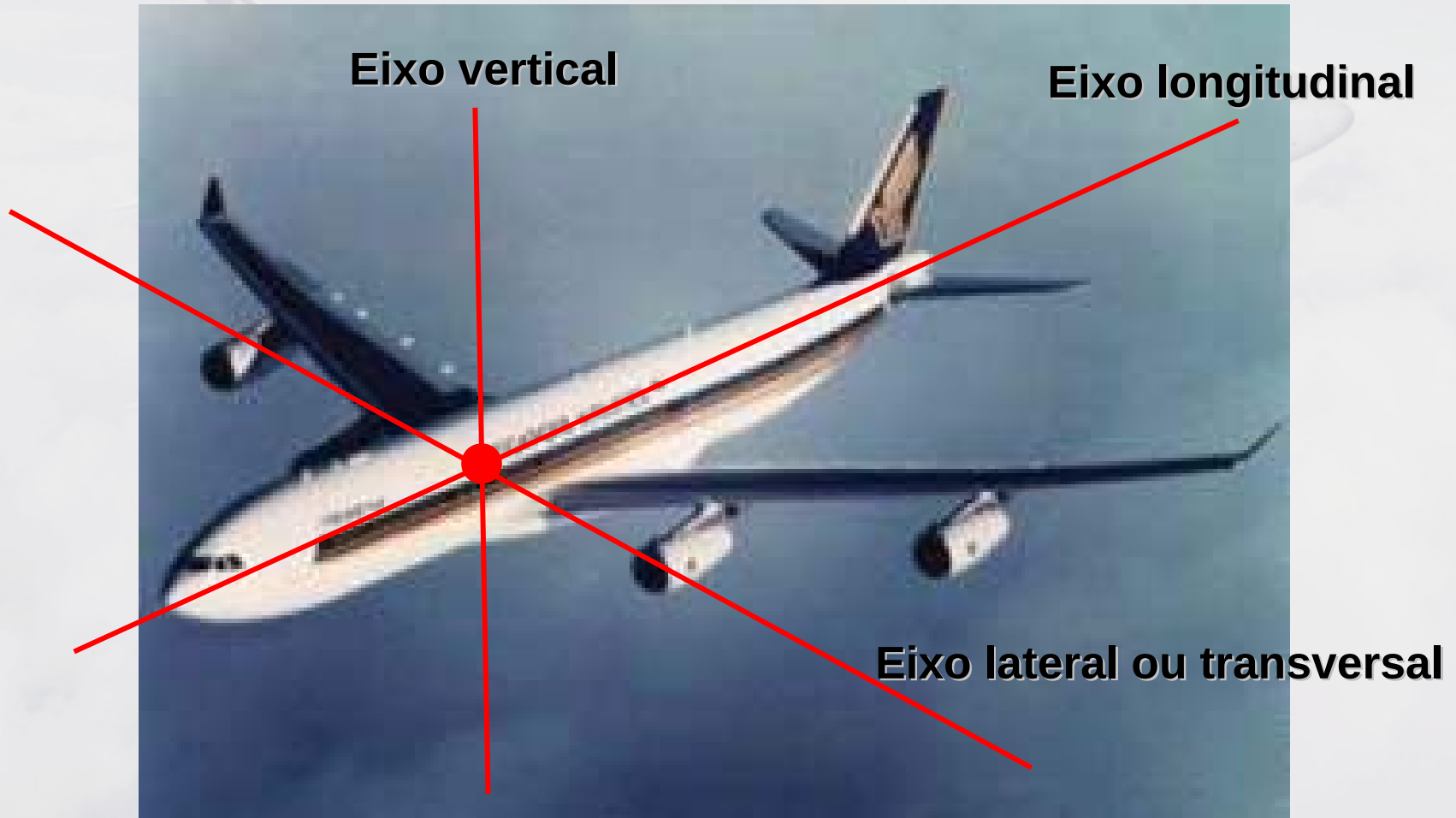
- Sustentação
 - Componente da RA perpendicular ao vento
 - Somente existe se estiver em movimento
- Arrasto (Resistência ao avanço)
 - Componente da RA paralela ao vento
 - Resistência ao avanço (partículas de ar no caminho)
- Tração (Empuxo)
 - Aceleração do avião (força motora)
- Peso
 - Peso da aeronave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

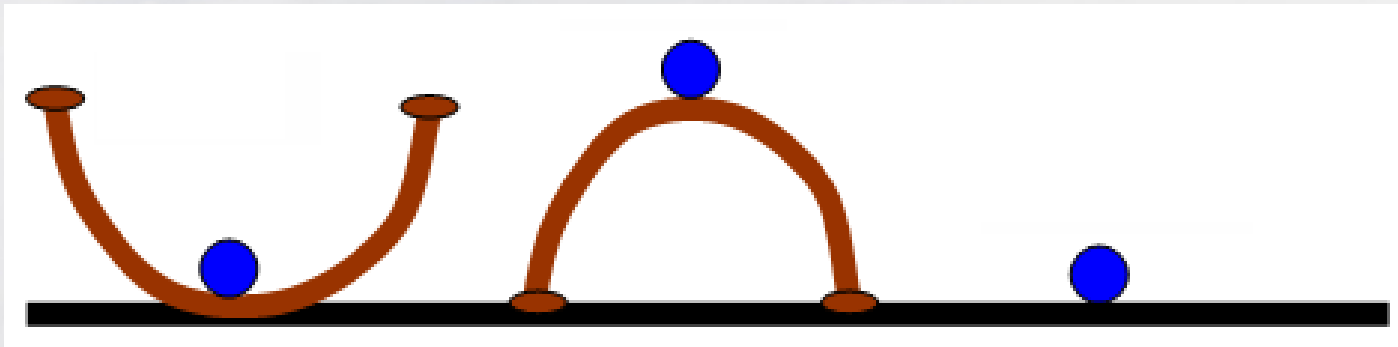
Estabilidade

- 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”

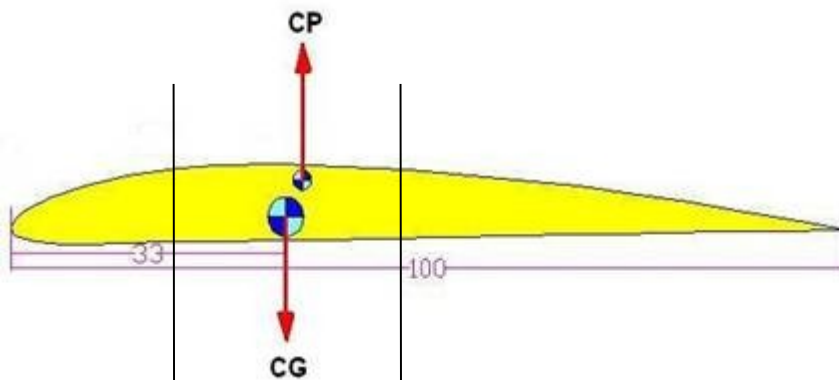
Estabilidade longitudinal

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

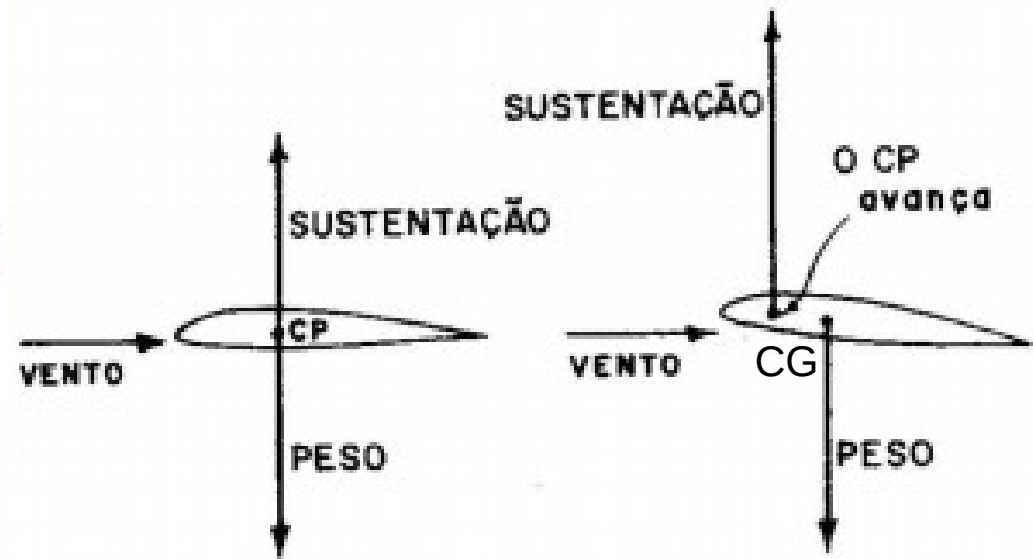


Estabilidade longitudinal

- 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



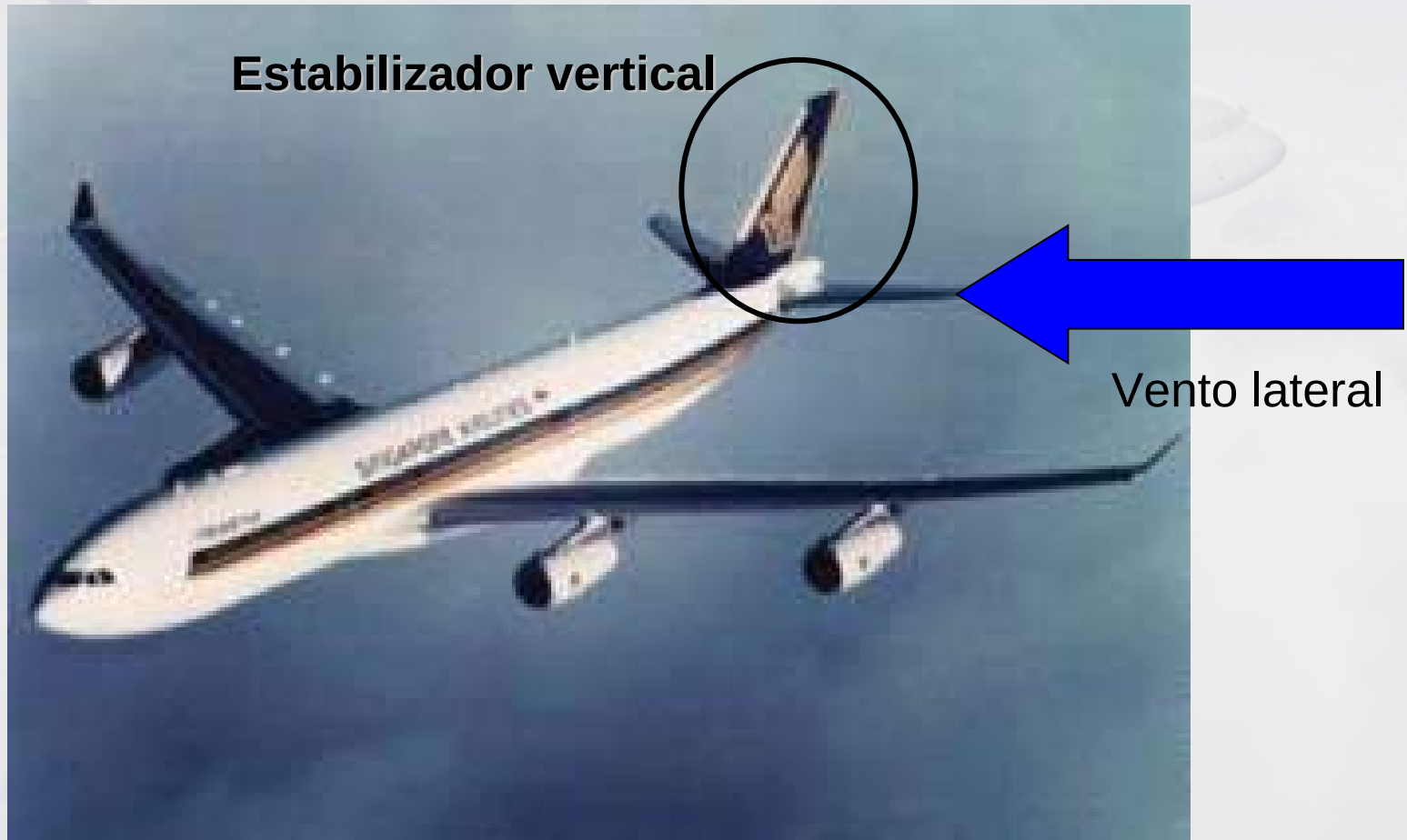
Enflechamento positivo



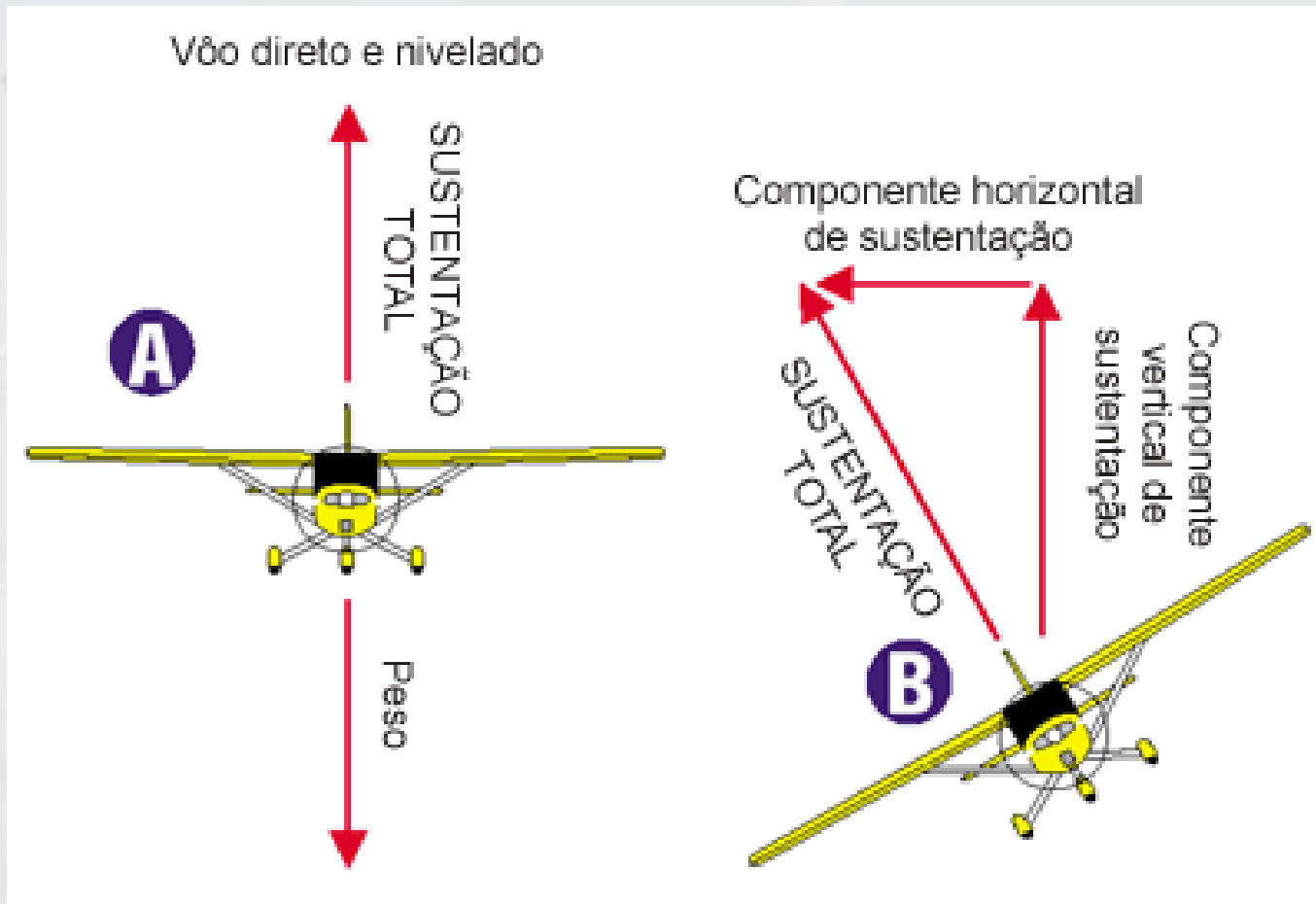
Enflechamento negativo

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**

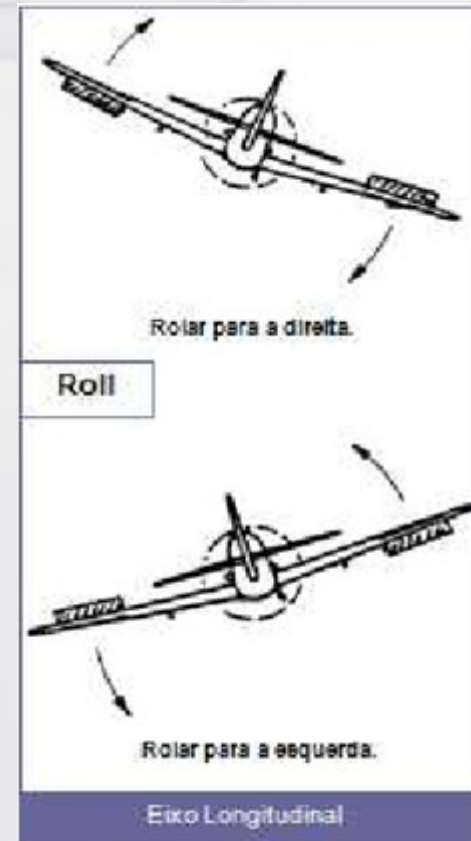
- Manche para direita: aileron direito sobe e esquerdo desce
- Manche para esquerda: aileron esquerdo sobe e direito desce

Eixo vertical



Eixo longitudinal

Eixo lateral ou transversal



Rolar para a direita.

Roll

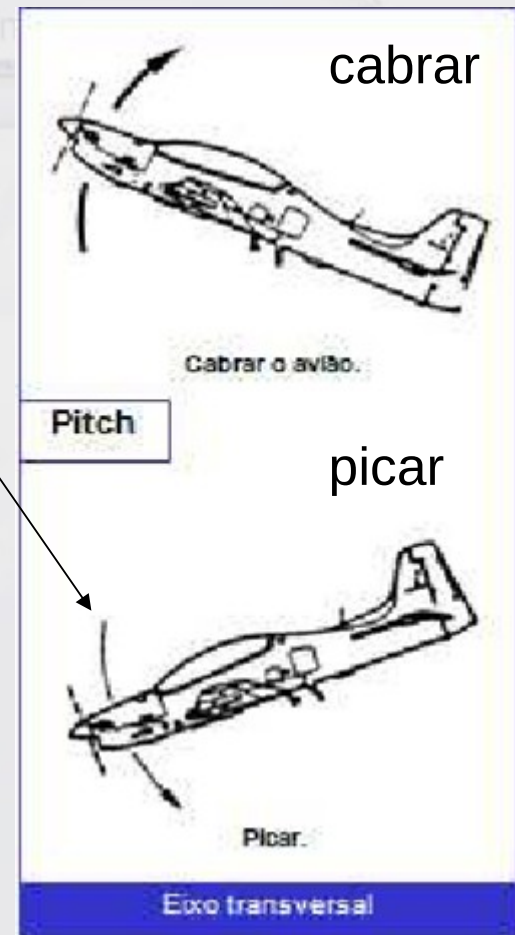
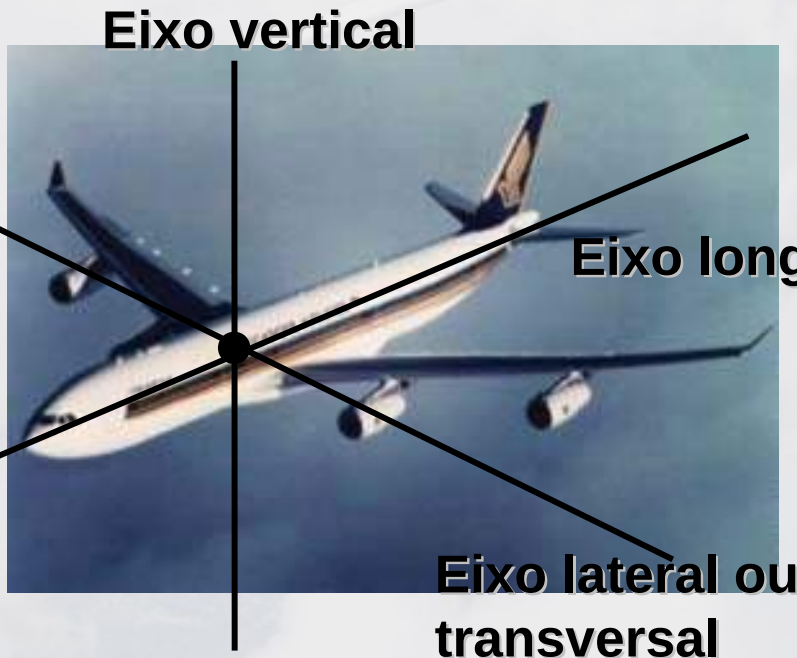
Rolar para a esquerda.

Eixo Longitudinal

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



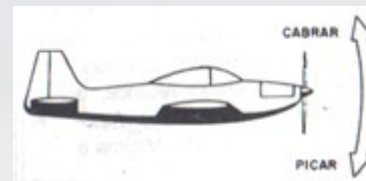
Eixo longitudinal

Eixo lateral ou transversal



Superfícies de comando primárias

Eixos	Superfície de controle	Movimentos	Controle
Vertical	LEME DE DIREÇÃO	GUINADA DERIVA DERRAPAGEM	PEDAIS
Longitudinal	AILERON	BANCAGEM ROLAMENTO INCLINAÇÃO	MANCHE lateralmente
Lateral ou Transversal	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)

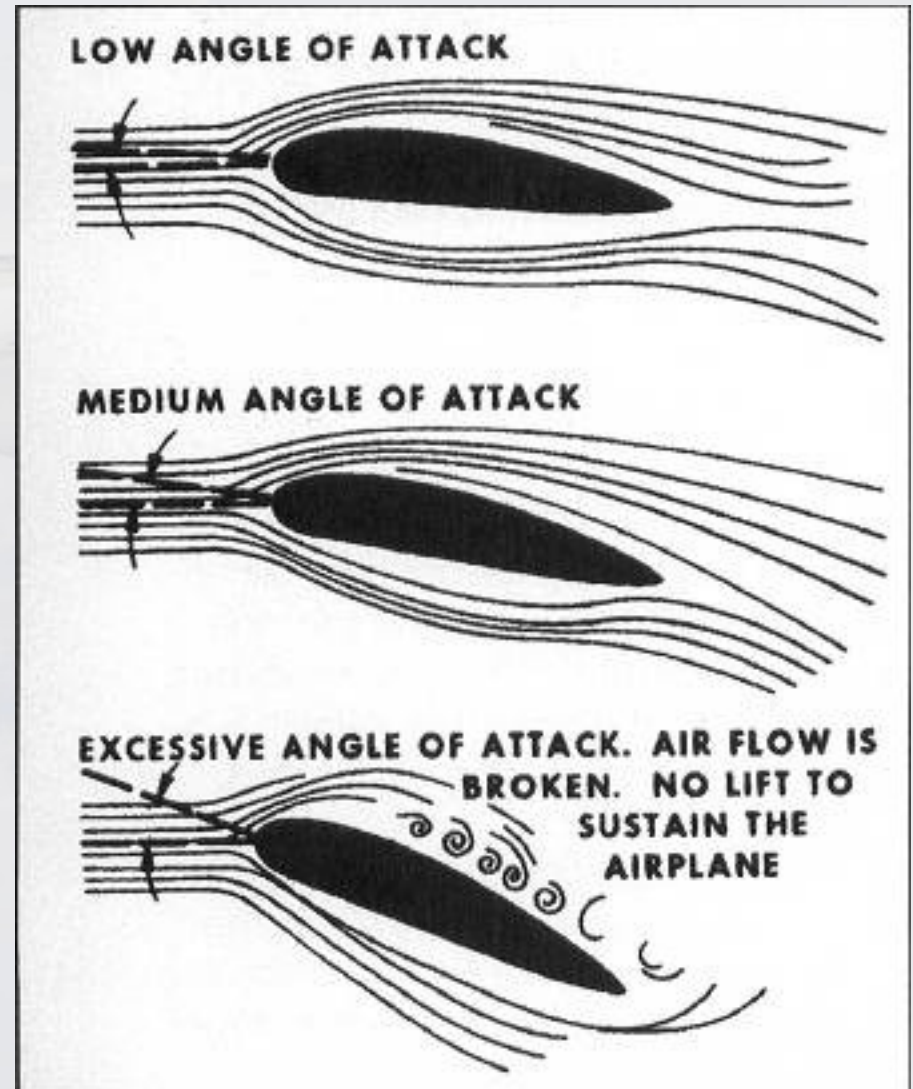


Fases do voo

- **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



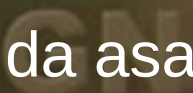
Não Flapeado



Flapeado

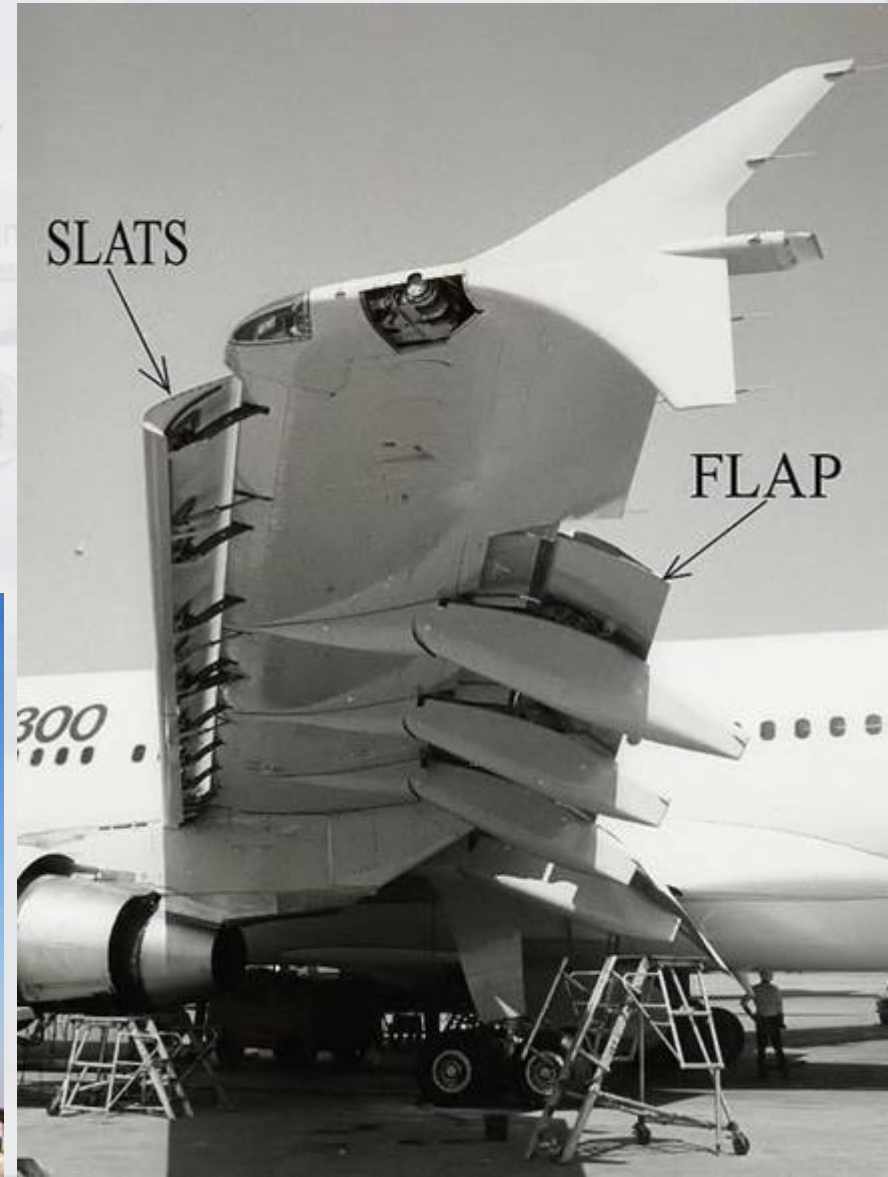
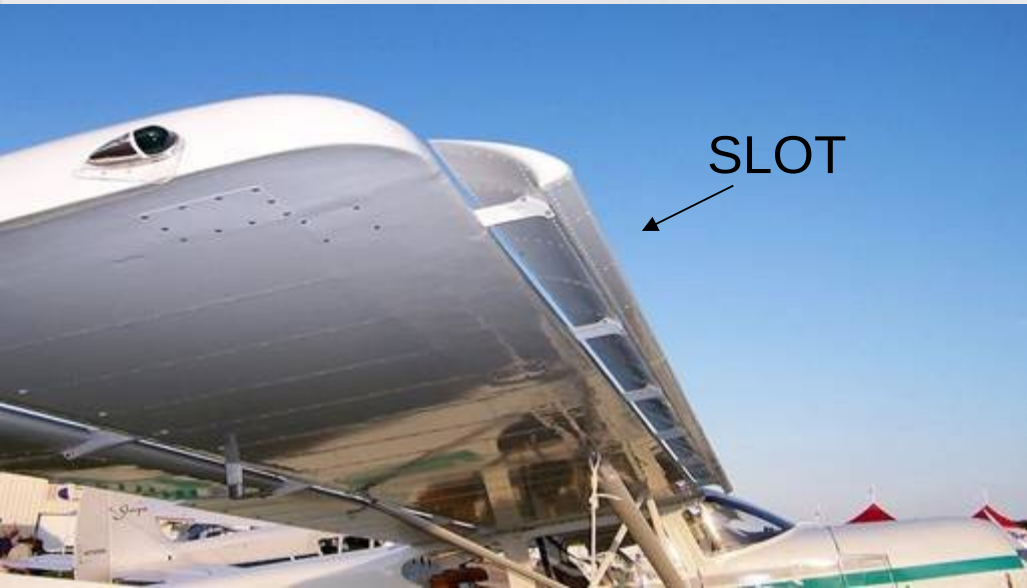


Fowler (melhor tipo de flap): aumenta curvatura e a área da asa



Dispositivos hiper sustentadores

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



Freios aerodinâmicos

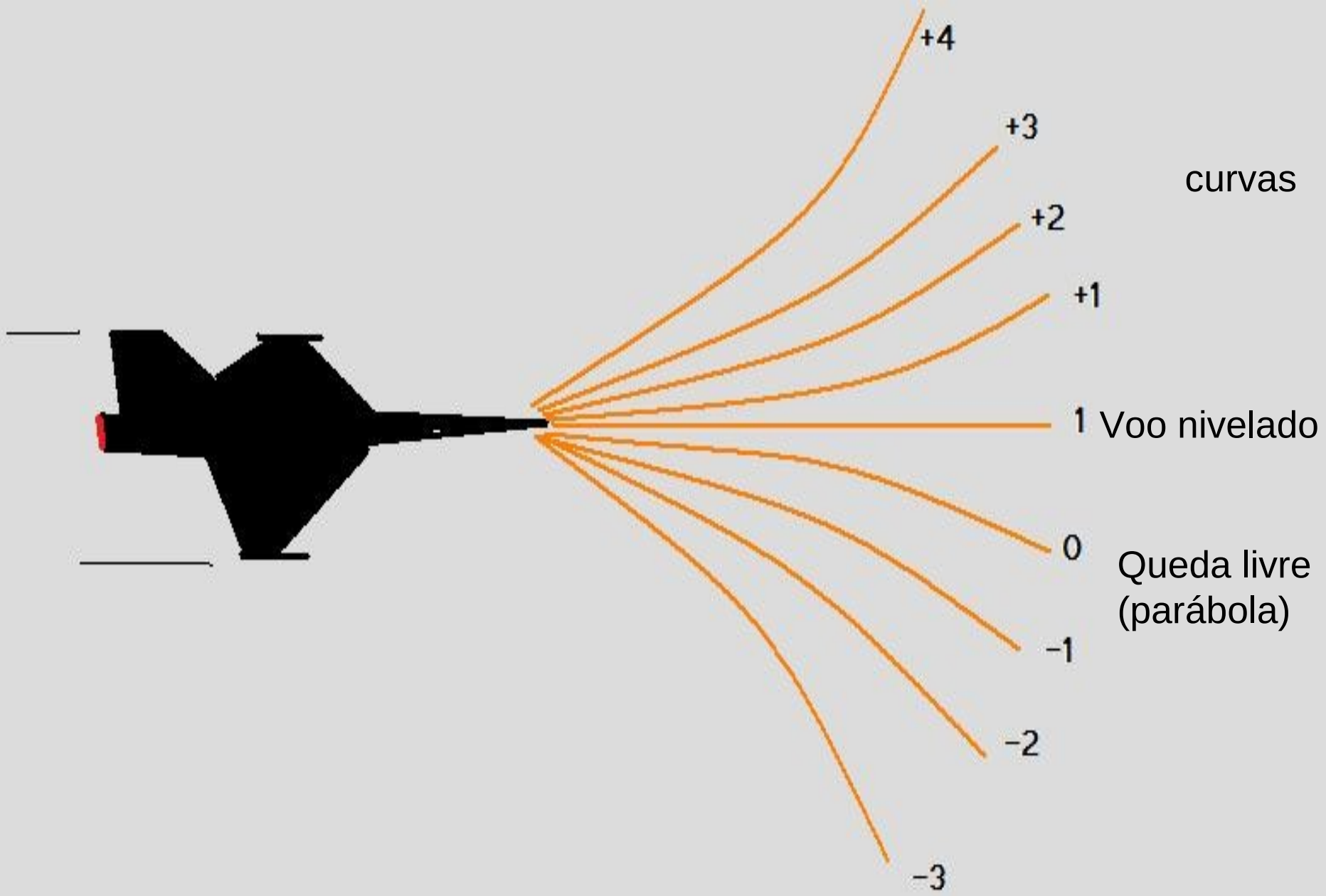
- SPOILERS (ou speed breakers)
 - Placas localizadas sobre as asas, que, ao serem levantadas, provocam perturbação no fluxo de ar
 - Podem ser usadas em vôo para diminuir a velocidade durante uma descida e em solo para frear o avião durante o pouso (tira sustentação e peso fica só sobre trem de pouso,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

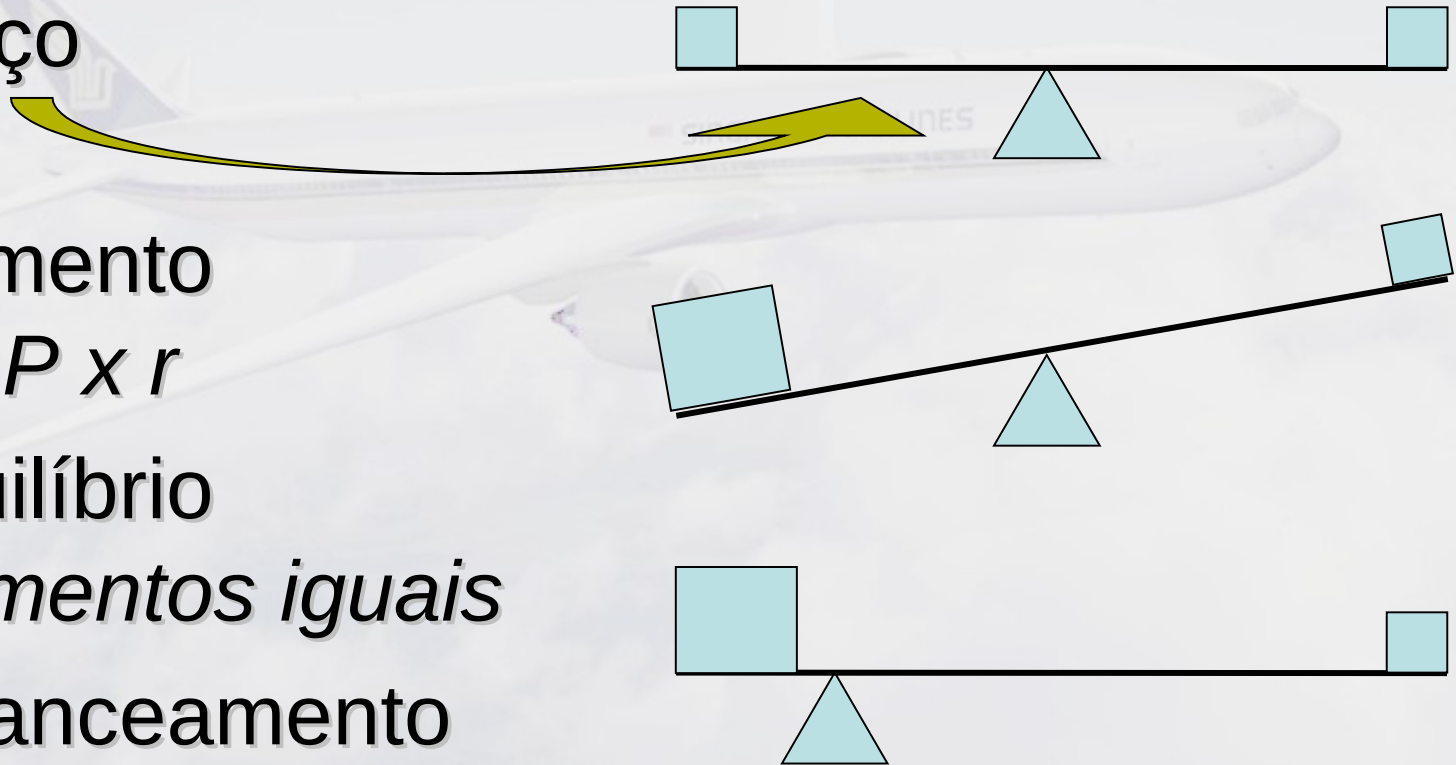
$$L = P \times r$$

- Equilíbrio

Momentos iguais

- Balanceamento

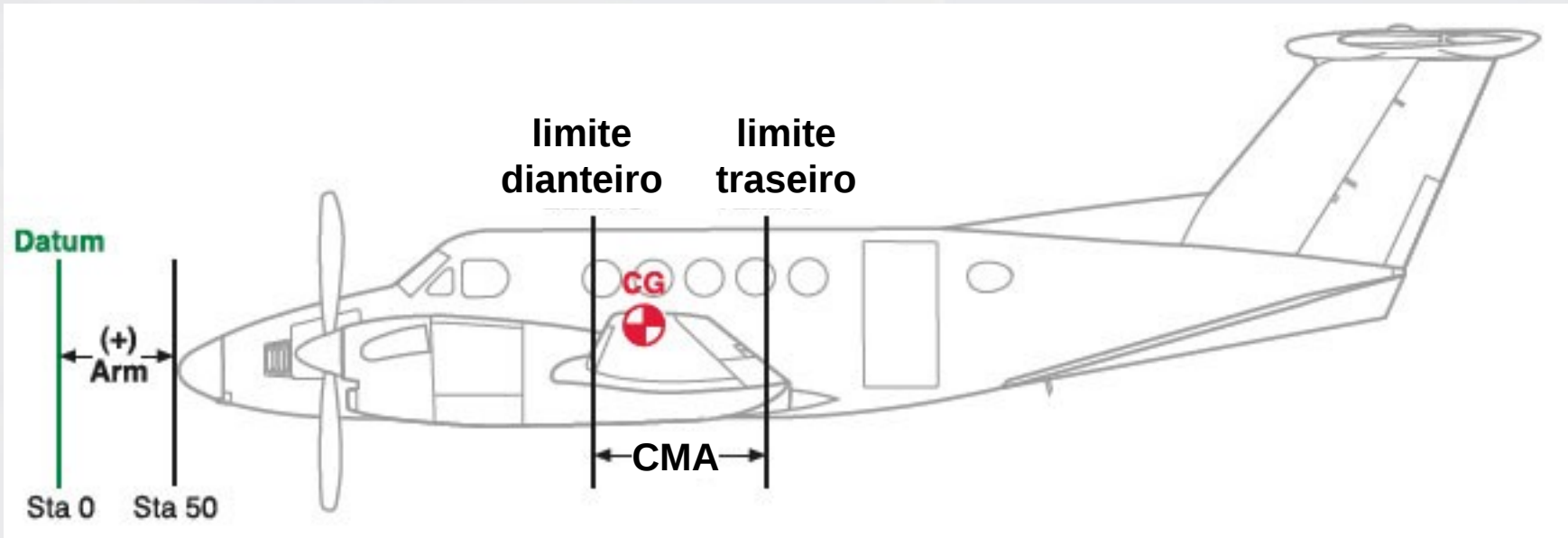
Distribuição correta



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

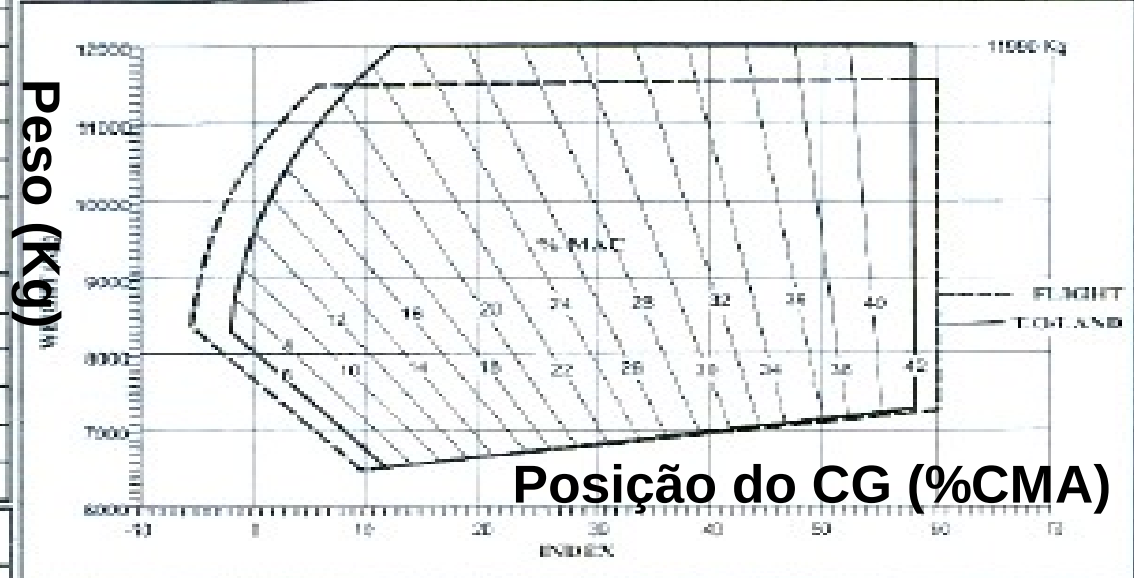


BALANCE MANIFEST EMB-120

	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	QC	
	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



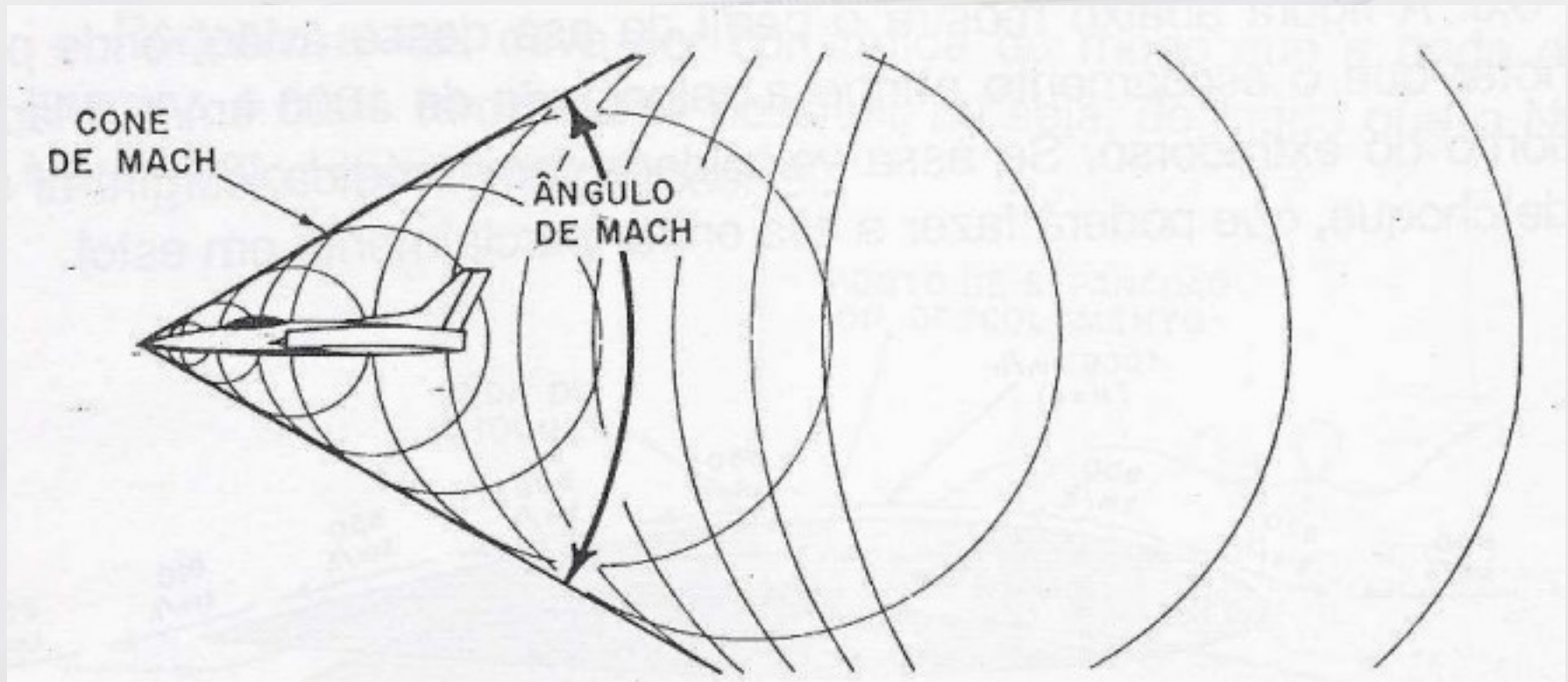
Aerodinâmica de alta velocidade

- Ondas de pressão não conseguem se afastar do avião



Aerodinâmica de alta velocidade

- Voo acima da velocidade do som



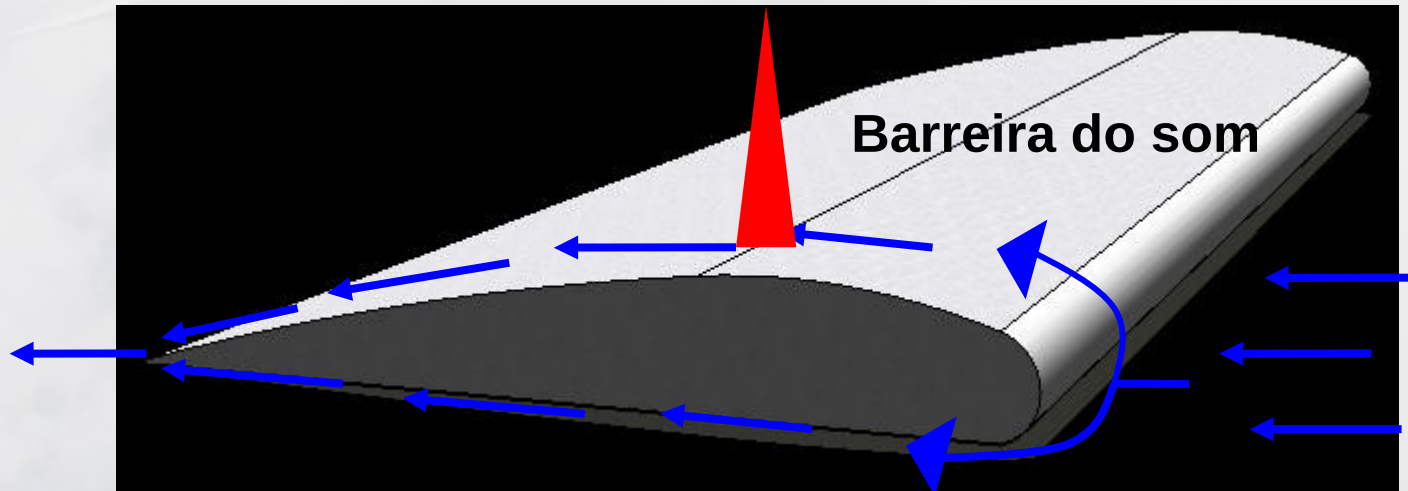
Voo supersônico x subsônico

- 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

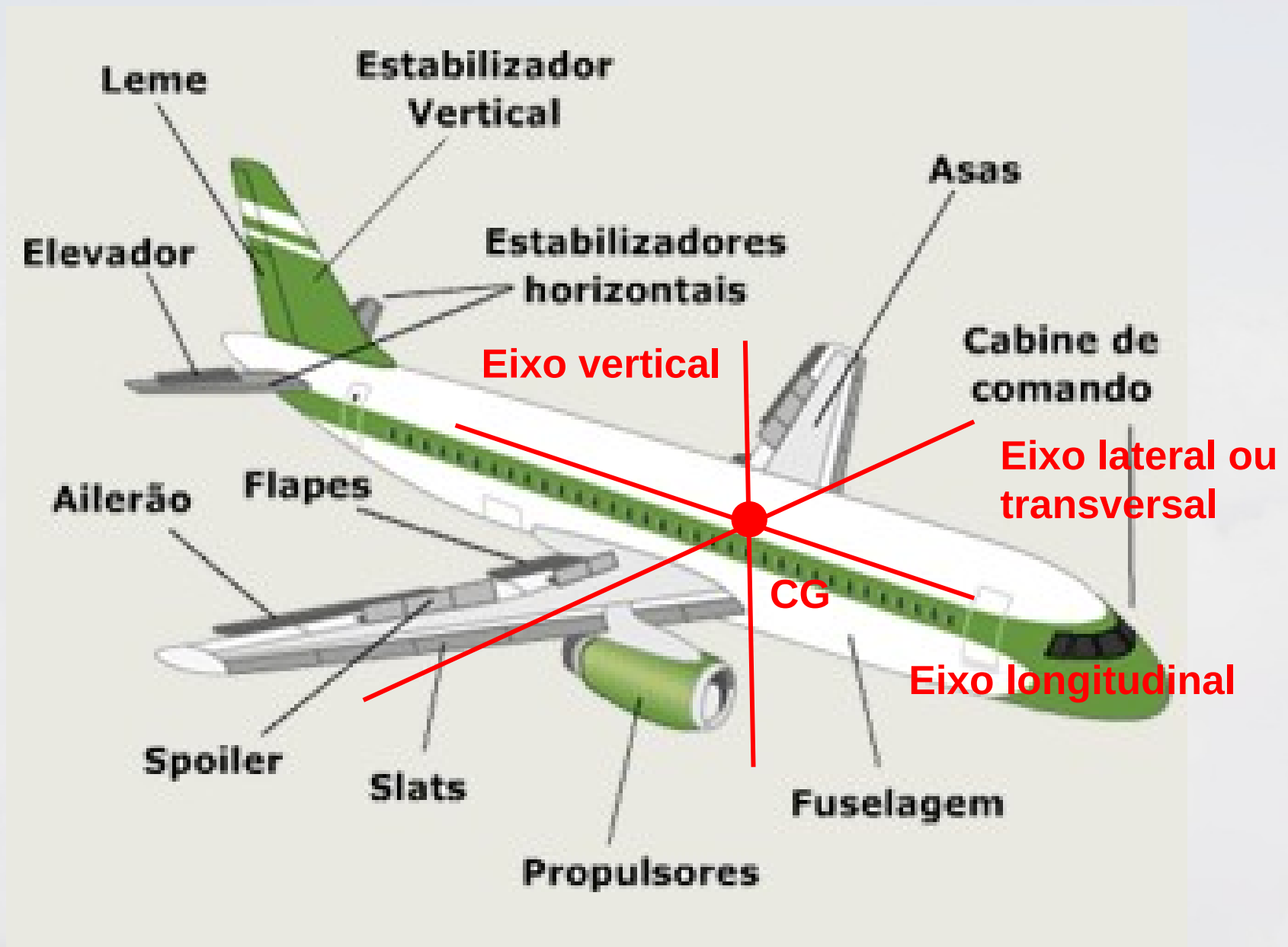
- Concorde



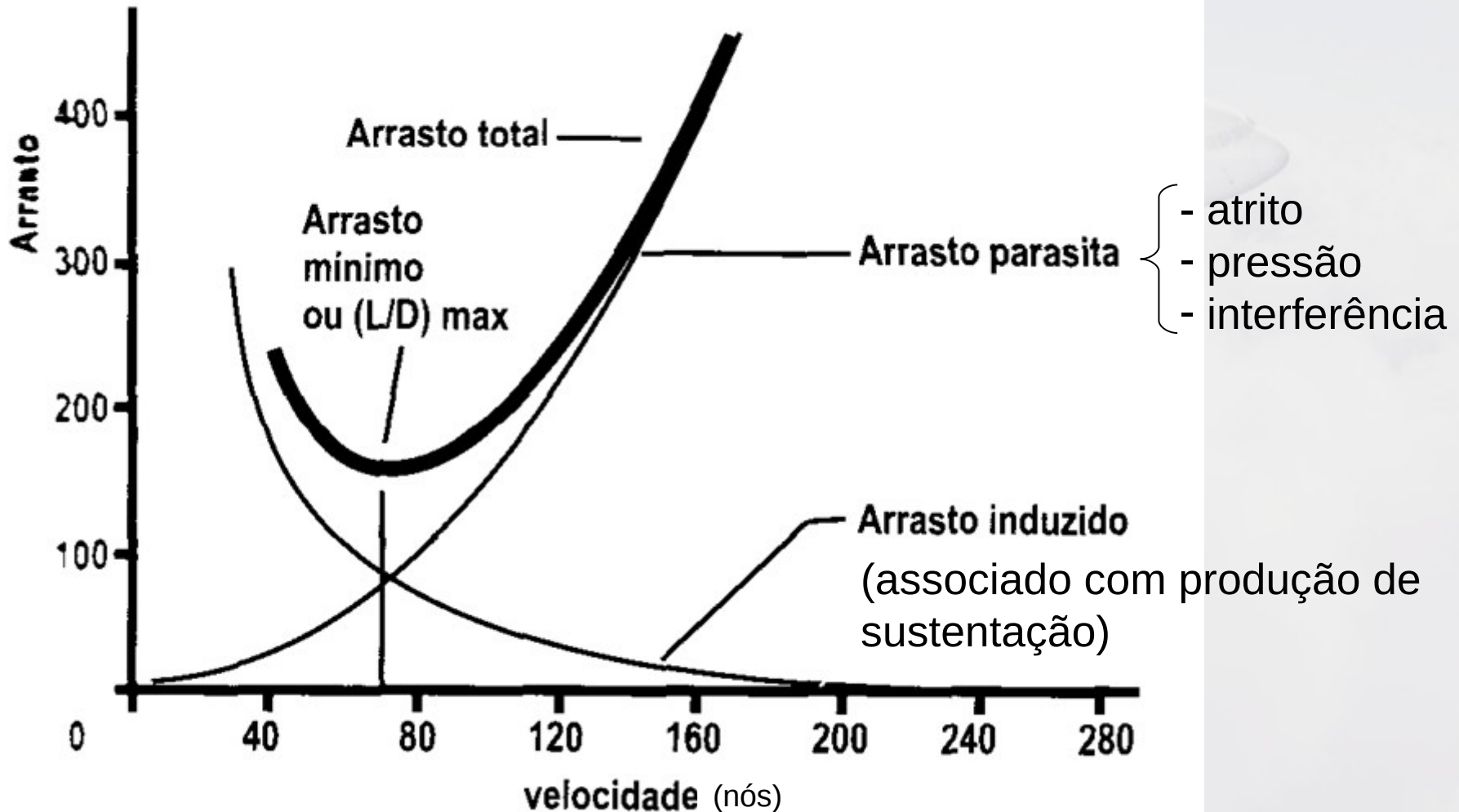
Vôo Paris - Rio de Janeiro:

- normal: 12 horas

- Concorde: 6
horas



Arrasto



(diretamente proporcional à tração)