

2022-1
DIURNO



Aula 11

Teoria de Voo

ESTS002-17: AERONÁUTICA I-A (AVIÕES)

Fernando Madeira

Roteiro da Aula

- **Forças que Agem num Avião em Voo**
- **Peso**
- **Sustentação (Parte 1/2)**

Capa: http://www.oregonlive.com/travel/index.ssf/2008/10/condors_spread_giant_wings_ove.html

The rust-colored sandstone cliffs and deep gorges abutting the Grand Canyon's northern fringe first welcomed condors bred in captivity in 1996.

FORÇAS QUE AGEM NUM AVIÃO EM VOO

Em voo, são quatro as forças que agem num avião:

- ✓ Peso (W)
- ✓ Sustentação (L)
- ✓ Arrasto (D)
- ✓ Tração (T)

Resultante Aerodinâmica: $\vec{R} = \vec{L} + \vec{D}$

FORÇAS QUE AGEM NUM AVIÃO EM VOO

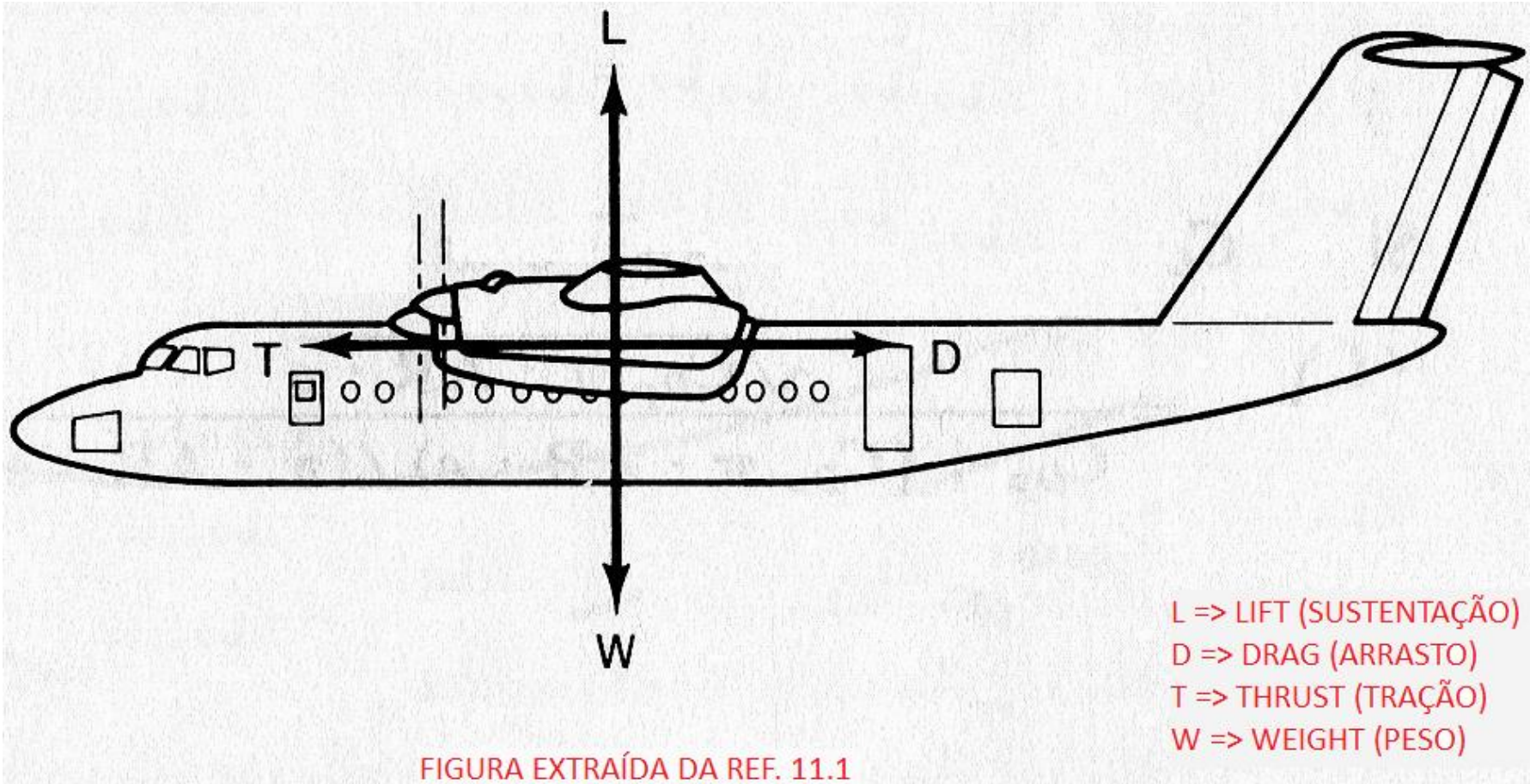


FIGURA EXTRAÍDA DA REF. 11.1

FORÇAS QUE AGEM NUM AVIÃO EM VOO



Exercícios

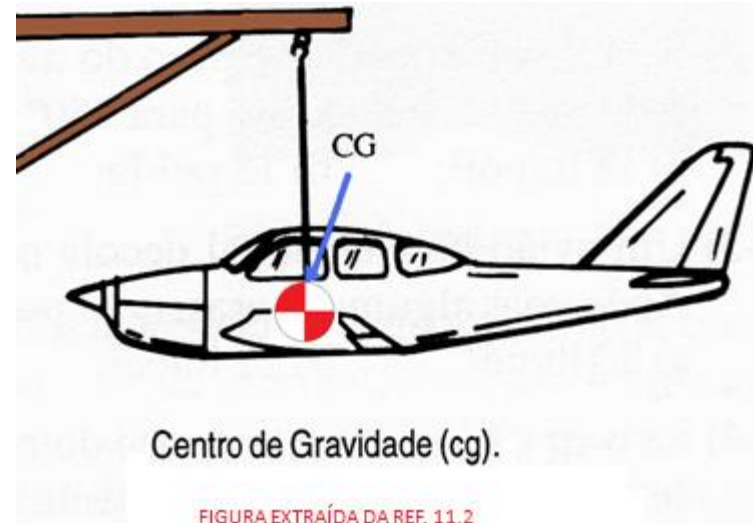


- 1) No vôo reto horizontal, com velocidade constante:
 - a) $L = T$ e $T > D$;
 - b) $L = W$ e $T = D$;
 - c) $L = D$ e $T = W$,
 - d) $L = T$ e $D = W$
- 2) Num vôo reto horizontal, a sustentação é equilibrada pelo/pela:
 - a) resistência ao avanço;
 - b) peso;
 - c) arrasto;
 - d) tração.
- 3) A força produzida pelo grupo moto-propulsor é o/a:
 - a) arrasto;
 - b) peso;
 - c) sustentação;
 - d) tração.
- 4) Num vôo reto horizontal, quando a Tração é maior que o Arrasto, o avião:
 - a) aumentará sua velocidade até o arrasto igualar a tração;
 - b) reduzirá sua velocidade para equilibrar arrasto e tração;
 - c) aumentará sua velocidade para equilibrar tração e peso;
 - d) reduzirá sua velocidade, para equilibrar peso e a gravidade.



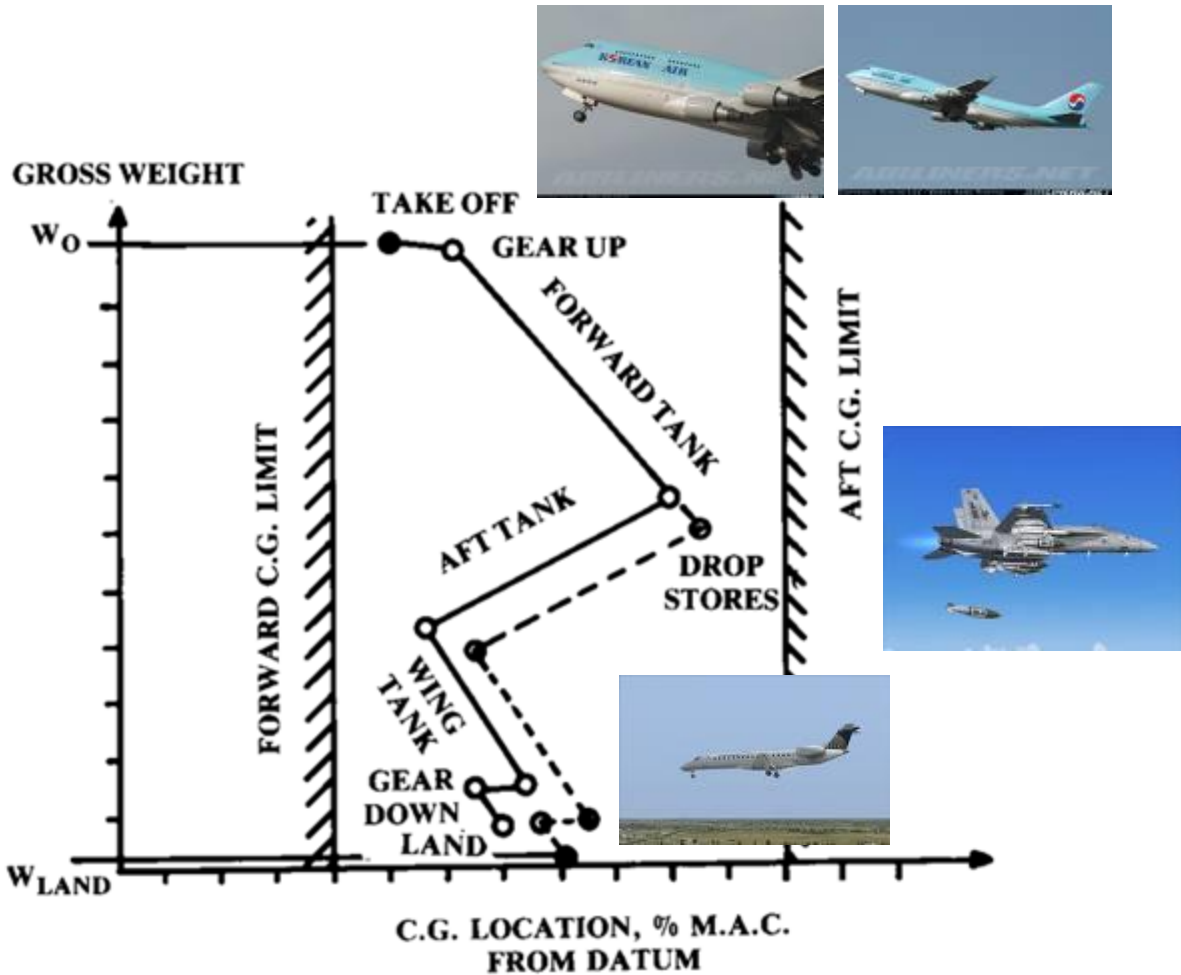
PESO

- ✓ Consideramos que o peso total do avião esteja concentrado no CG.
- ✓ A posição do CG depende da localização e do peso dos componentes fixos (estrutura, motor, sistemas, etc) e dos componentes não fixos (ocupantes, carga, combustível, etc).
- ✓ Tanto o peso do avião quanto a posição do CG são parâmetros muito importante para operação, desempenho e segurança do voo.
- ✓ O peso máximo de decolagem (MTOW – Maximum Take Off Weight) é limitado pela resistência estrutural do avião, pela meteorologia, e pelas condições da pista (comprimento, tipo de pavimentação, gradiente, etc).



- ✓ A posição do CG afeta a estabilidade & controle e a performance do avião.
- ✓ Carga alar (wing loading) $\Rightarrow W/S$ (Peso do avião/Área da asa).

PESO



C.G. envelope diagram.

PESO



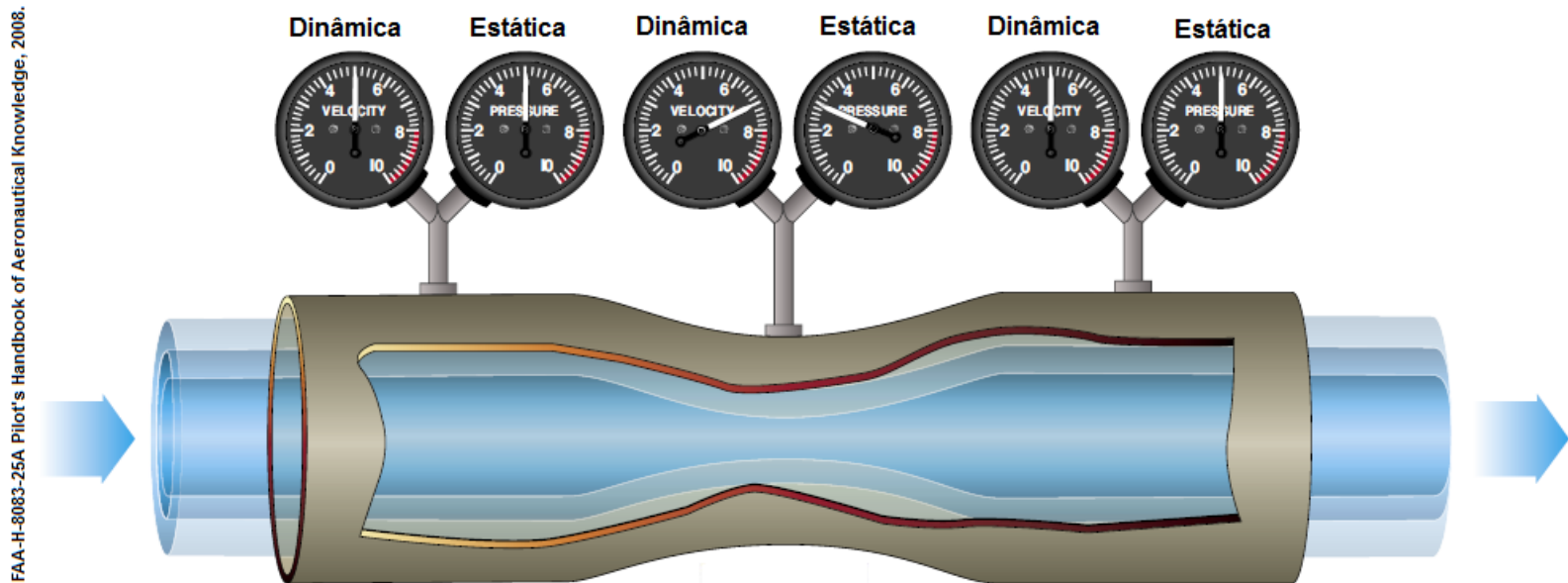
Exercícios

- 1) O peso bruto do avião PA-28-180 é de 2 400 libras, e a área da asa é de 160 pés quadrados. A carga alar é, portanto:
 - a) 15 lb/pé²;
 - b) 15 pé²/lb;
 - c) 15 HP/pé²;
 - d) 15 lb/pol²
- 2) Se a Piper aumentar o peso do avião PA-28-180 para 2 700 libras, reduzindo a área da asa para 150^o pé², qual será a nova carga alar?
 - a) 18 lb/pol²;
 - b) 18 pé²/lb;
 - c) 18 HP/pé²;
 - d) 18 lb/pé²
- 3) Um avião convencional decola com uma carga alar de 20 lb/pé². Após voar algumas horas, qual poderá ser a nova carga alar?
 - a) 20 lb/pé²;
 - b) 22 lb/pé²;
 - c) 18 lb/pé²;
 - d) 21 lb/pé²
- 4) Se o **cg** do avião está à frente do **cg** do seu tanque de gasolina, qual será a tendência de deslocamento do **cg** do avião durante o voo?
 - a) permanecer fixo;
 - b) deslocar-se para os lados,
 - c) deslocar-se para trás,
 - d) deslocar-se para frente.
- 5) O peso do avião age no/na.
 - a) **cg** do avião;
 - b) **cp** do avião;
 - c) asa do avião;
 - d) eixo de tração do motor
- 6) Se o **cg** de um avião coincide com o **cg** do tanque de combustível, durante o voo ele se deslocará.
 - a) para frente;
 - b) para trás,
 - c) para os lados;
 - d) não se moverá.
- 7) Por motivos de segurança, o piloto deve determinar peso e **cg** do avião:
 - a) esporadicamente;
 - b) frequentemente;
 - c) antes de cada voo;
 - d) a cada 100 horas de voo.



SUSTENTAÇÃO

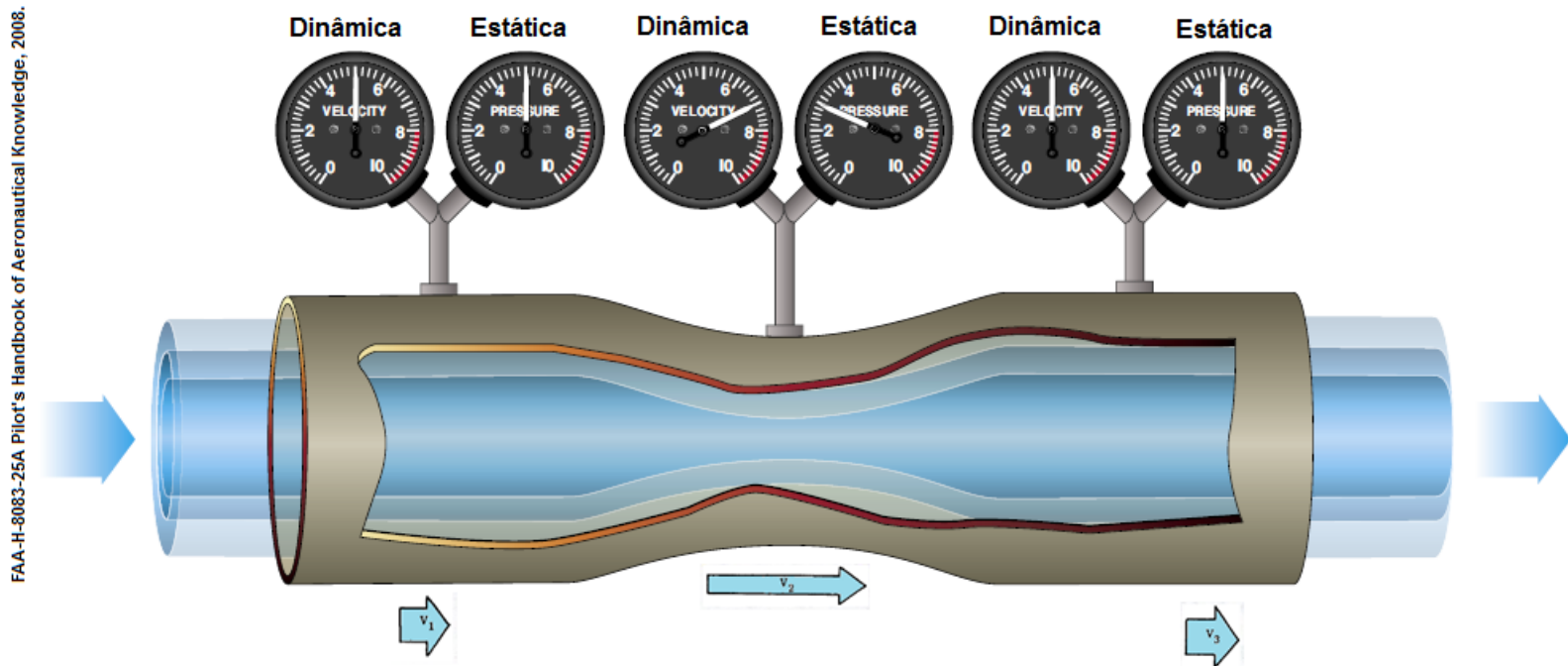
- ✓ É a componente da resultante aerodinâmica perpendicular ao vento relativo.
- ✓ Produção da sustentação => Princípio de Bernoulli.



Air pressure decreases in a venturi tube.

SUSTENTAÇÃO

- ✓ É a componente da resultante aerodinâmica perpendicular ao vento relativo.
- ✓ Produção da sustentação => Princípio de Bernoulli .

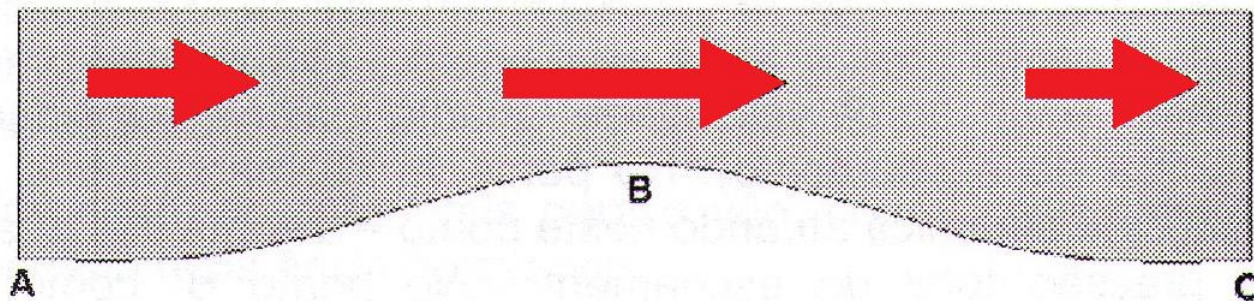


Air pressure decreases in a venturi tube.

FAA-H-8083-25A Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge, 2008.

SUSTENTAÇÃO

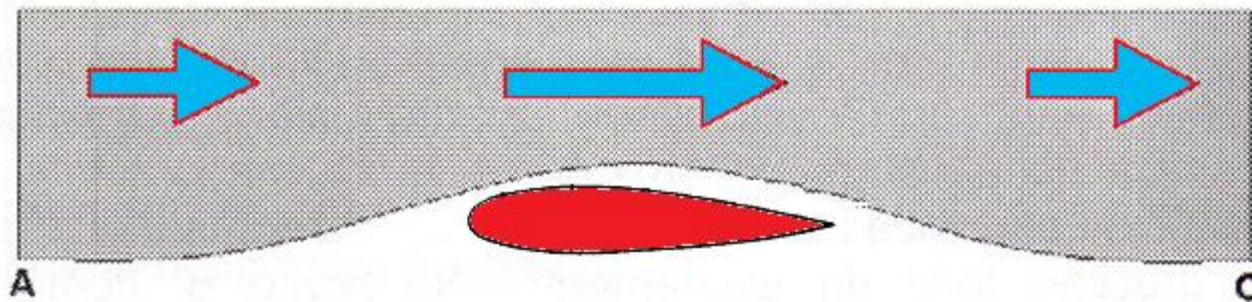
✓ Não é necessário que o ar passe por um tubo fechado para aplicação do princípio de Bernuille. Qualquer superfície que modifique o escoamento causará o mesmo efeito do Venturi. Mesmo se removemos a parte superior, a velocidade acima da curvatura será aumentada e a pressão diminuída.



Tubo de Venturi modificado.

SUSTENTAÇÃO

- ✓ Não é necessário que o ar passe por um tubo fechado para aplicação do princípio de Bernuille. **Qualquer superfície que modifique o escoamento causará o mesmo efeito do Venturi.** Mesmo se removemos a parte superior, a velocidade acima da curvatura será aumentada e a pressão diminuída.



Tubo de Venturi modificado.

SUSTENTAÇÃO

- ✓ O perfil da asa tem o nome de aerofólio.
- ✓ Ele é projetado de forma a aproveitar o princípio de Bernouille.
- ✓ A curvatura superior (extradorso) faz com que o ar seja mais acelerado que na parte inferior (intradorso) => A pressão é menor no extradorso que no intradorso.

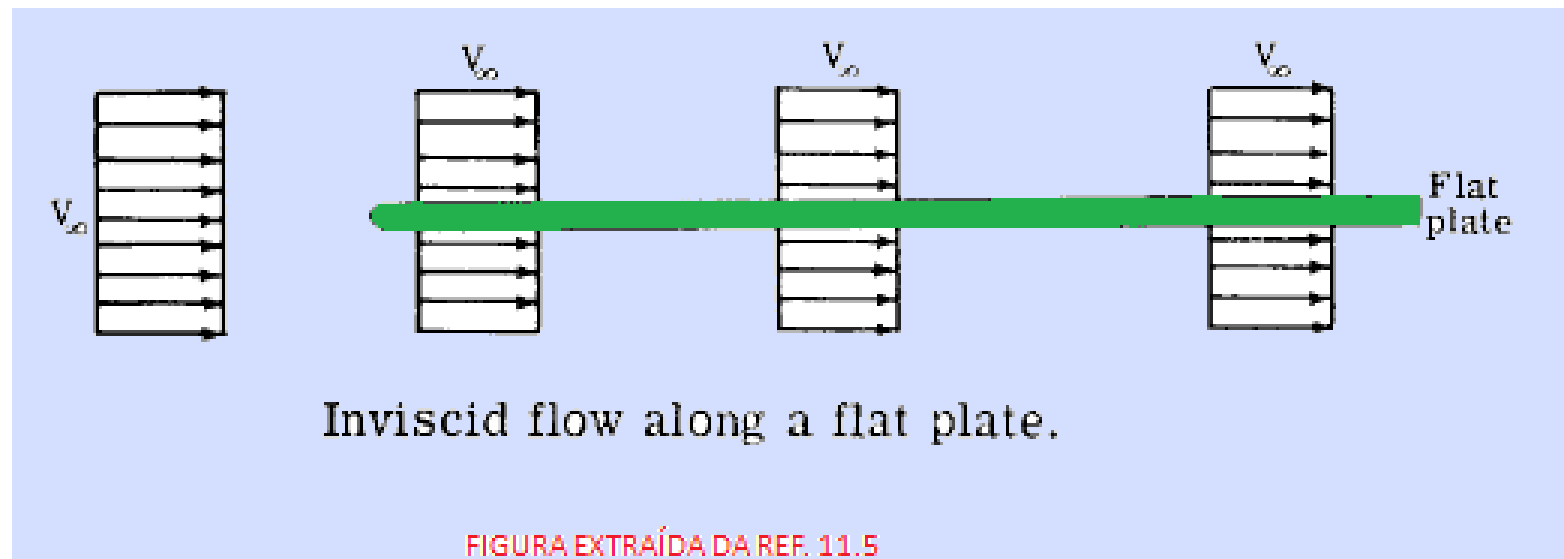


SUSTENTAÇÃO

Camada Limite (Boundary Layer)

É a parte do escoamento adjacente à superfície, formando uma camada onde os efeitos viscosos são dominantes.

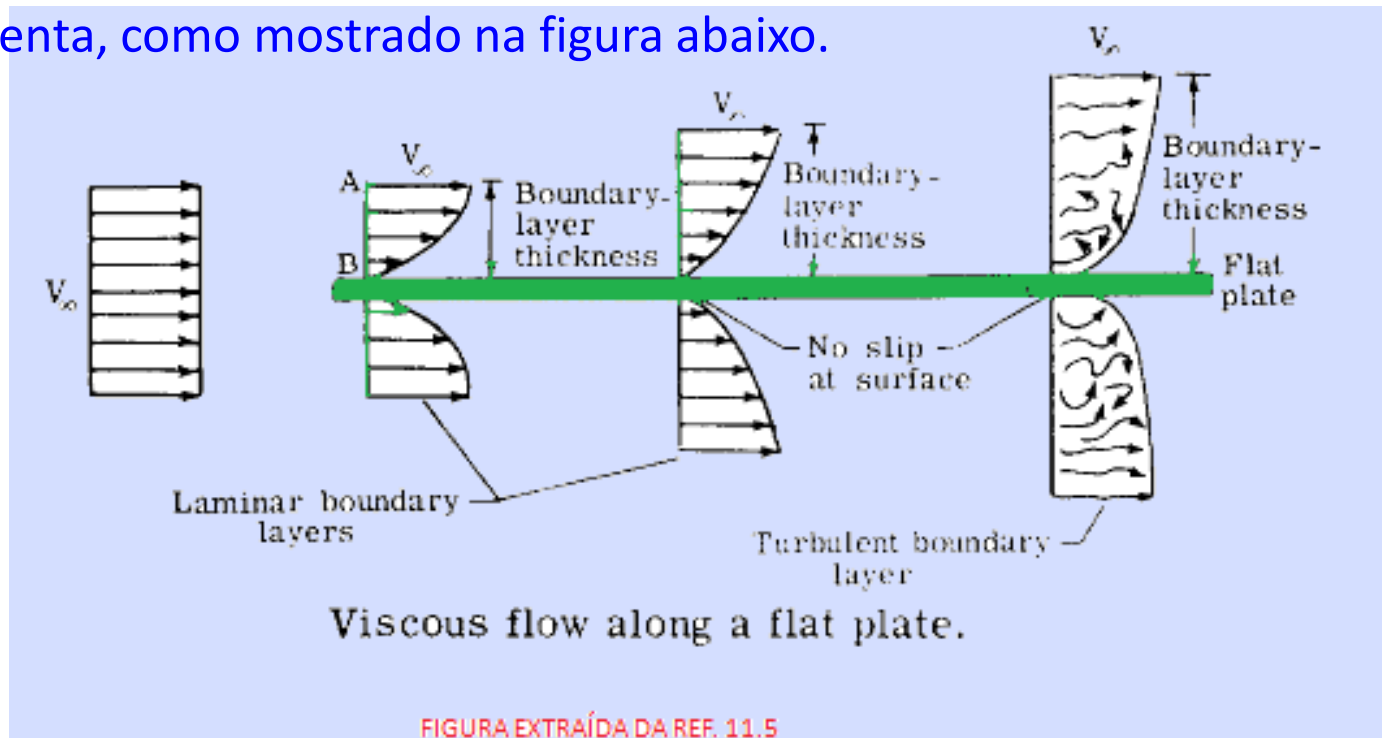
Se o ar fosse perfeito, sem viscosidade, quando entrasse em contato com uma superfície sólida, ele manteria sua velocidade, como na figura abaixo.



SUSTENTAÇÃO

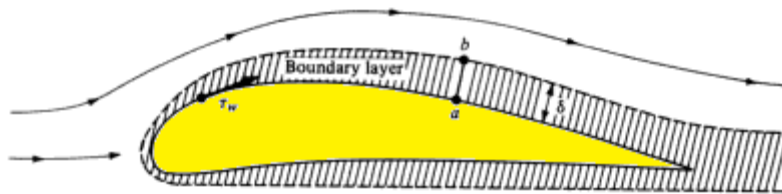
Camada Limite (Boundary Layer)

Entretanto, o ar é um fluido real, e este apresenta viscosidade. Assim, a parte da camada em contato com a superfície tem velocidade nula, e a medida que a distância entre a camada e a superfície aumenta, o perfil de velocidade também aumenta, como mostrado na figura abaixo.



SUSTENTAÇÃO

Camada Limite (Boundary Layer)



Flow in real life, with friction. The thickness of the boundary layer is greatly overemphasized for clarity.

FIGURA EXTRAÍDA DA REF. 11.6

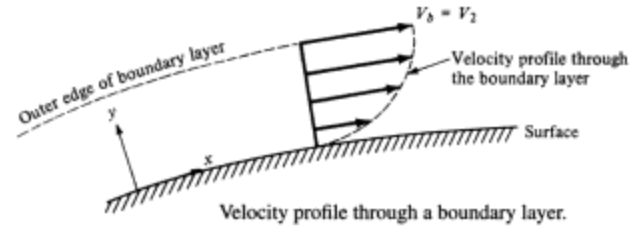


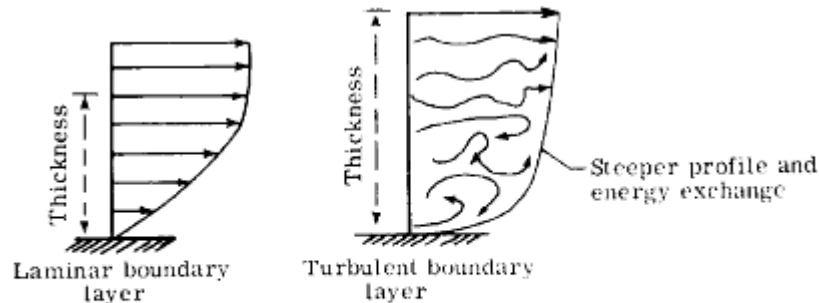
FIGURA EXTRAÍDA DA REF. 11.6

SUSTENTAÇÃO

Camada Limite (Boundary Layer)

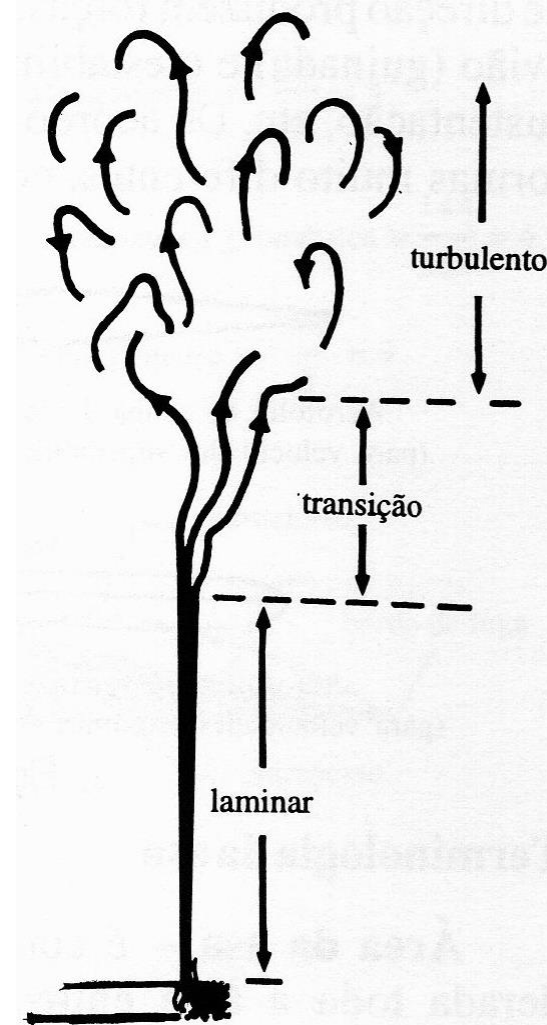
No início do escoamento, próximo ao bordo de ataque, a camada limite é laminar, pois os filetes de ar descrevem trajetórias paralelas e não se tocam. No decorrer do escoamento, os filetes vão perdendo energia devido aos efeitos viscosos, a camada limite aumenta de espessura, e o escoamento transiciona de laminar para turbulento.

No escoamento turbulento existe troca de energia entre as diferentes camadas. A transição de laminar para turbulento pode ser natural ou induzida.



Comparison of laminar and turbulent flow.

FIGURA EXTRAÍDA DA REF. 11.5

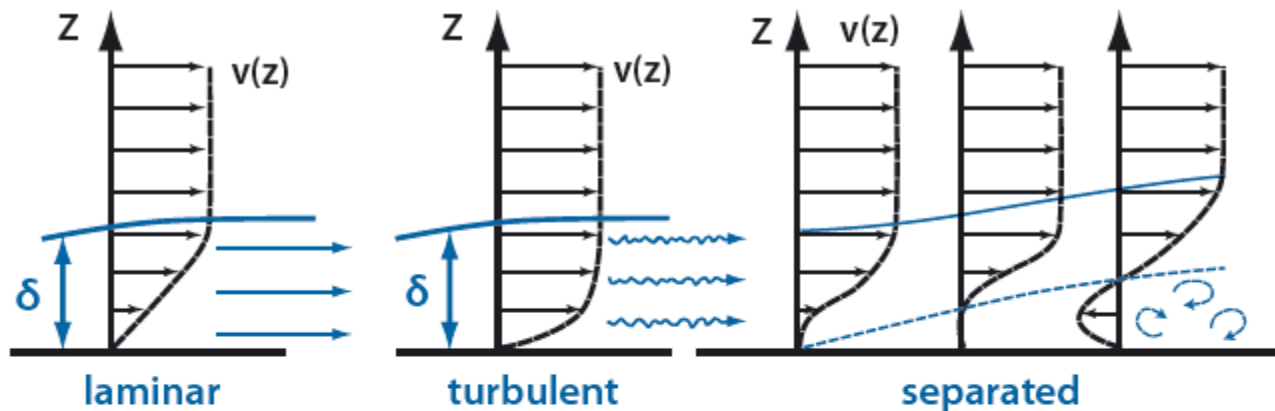


Escoamento laminar e turbulento.

FIGURA EXTRAÍDA DA REF. 11.2

SUSTENTAÇÃO

Camada Limite (Boundary Layer)



Boundary layer profile: three flow conditions.

Friction force $\sim \mu \, dv/dz$ (area) where μ is the fluid coefficient of viscosity and dv/dz is the velocity gradient evaluated at $z=0$. This force acts parallel to the surface.

Boundary layer starts out laminar and transitions to turbulent at

$Re_x \approx 5 \times 10^5$ where Re_x = local Reynold's Number = $\rho v x / \mu$

Laminar thickness $\delta_L = 5.2x / Re_x^{0.5}$ and turbulent thickness

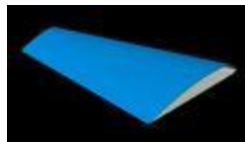
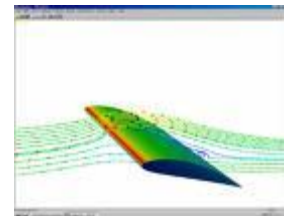
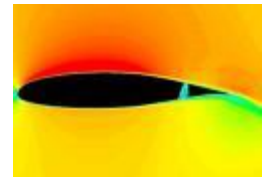
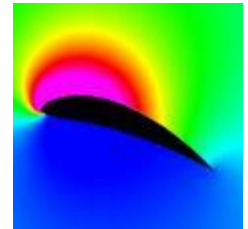
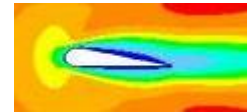
$\delta_L = 0.37x / Re_x^{0.2}$

Flow separates when $dv/dz = 0$ at the surface.

SUSTENTAÇÃO

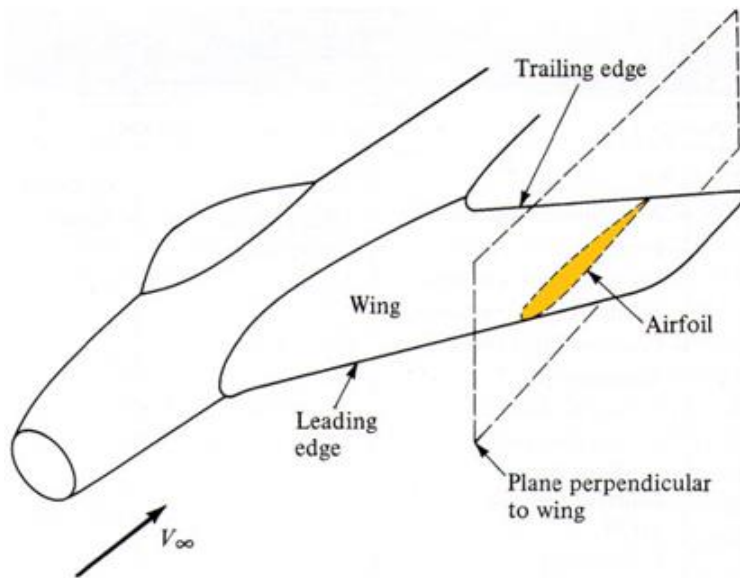
Aerofólio (Airfoil)

- ✓ Aerofólios são formas especialmente concebidas para produção de forças aerodinâmicas úteis na interação com o ar em movimento (vento relativo).
- ✓ Lembrando que a asa só produz sustentação (e arrasto) quando tem movimento relativo ao ar.
- ✓ Os aerofólios são usados na produção de reações úteis... Além na sustentação na asa, são usados pelas hélices para produção de tração, pelo estabilizador horizontal para produção de sustentação (positiva ou negativa), estabilizador vertical (minimização de arrasto), leme e profundor.

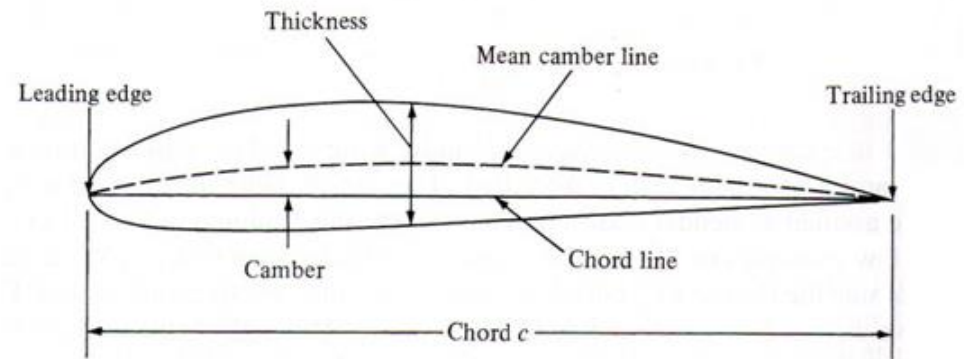


SUSTENTAÇÃO

Aerofólio (Airfoil)



Sketch of a wing and airfoil.



Airfoil nomenclature. The shape shown here is an NACA 4415 airfoil.

FIGURA EXTRAÍDA DA REF. 11.6

SUSTENTAÇÃO



SUSTENTAÇÃO

NAVWEPS 00-80T-80
BASIC AERODYNAMICS

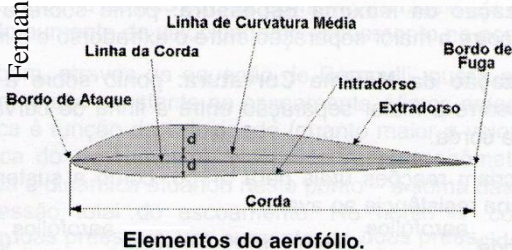
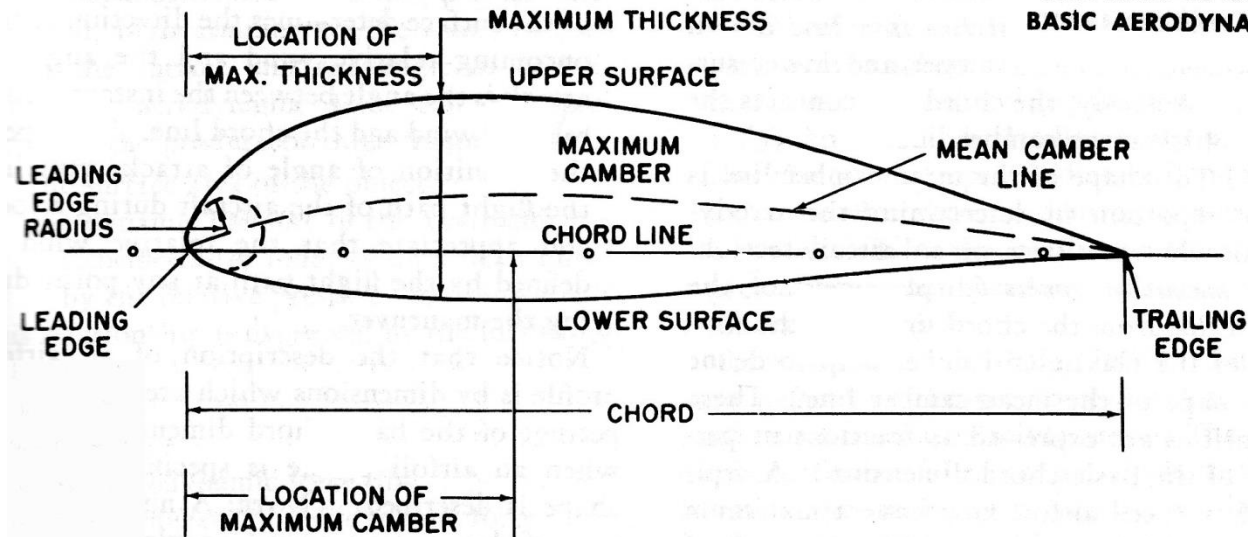
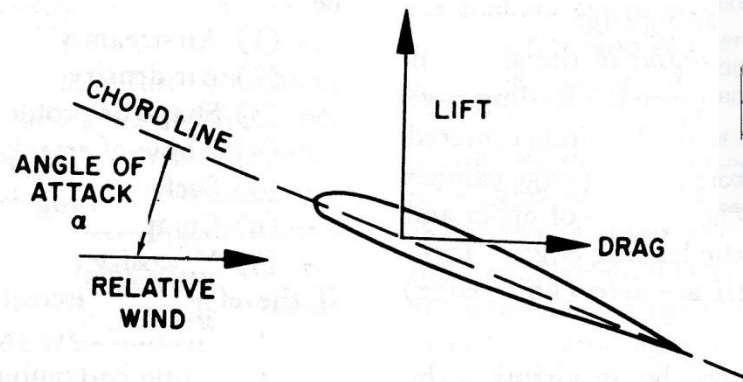


FIGURA EXTRAÍDA DA REF. 11.4



Airfoil Terminology

FIGURA EXTRAÍDA DA REF. 11.7

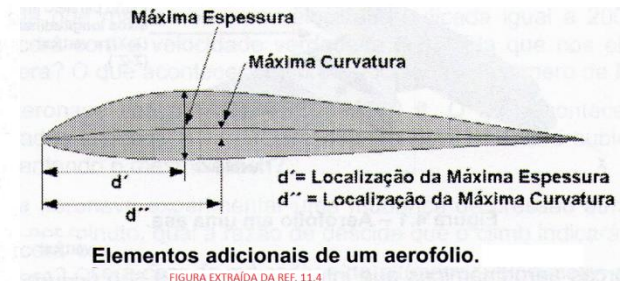


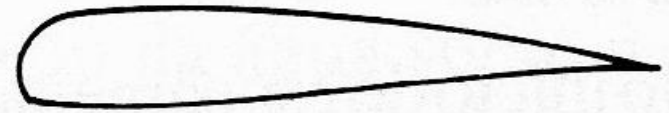
FIGURA EXTRAÍDA DA REF. 11.4

SUSTENTAÇÃO

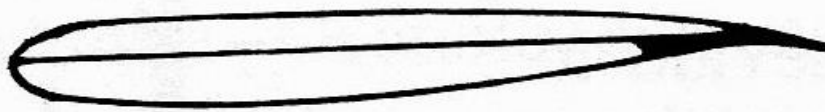
Aerofólio (Airfoil)



Aerofólio de cunha dupla
(para velocidades supersônicas)



Aerofólio com muita curvatura
(para aviões de baixa velocidade)



Aerofólio supercrítico
(para velocidades próximas do som)



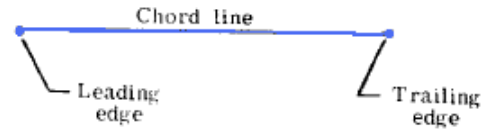
Aerofólio simétrico
(para superfícies de comando)

Tipos de aerofólio.

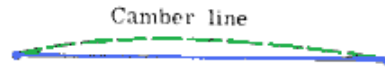
SUSTENTAÇÃO

Aerofólio (Airfoil)

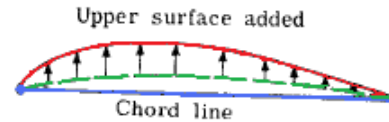
1. Set up leading edge and trailing edge and construct chord line between them.



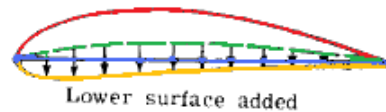
2. Add curvature with camber line.



3. Wrap thickness about camber line to form upper surface.



Wrap same thickness about camber line to form lower surface.



4. Final airfoil shape.



Geometric construction of an airfoil.

SUSTENTAÇÃO

Aerofólio (Airfoil)

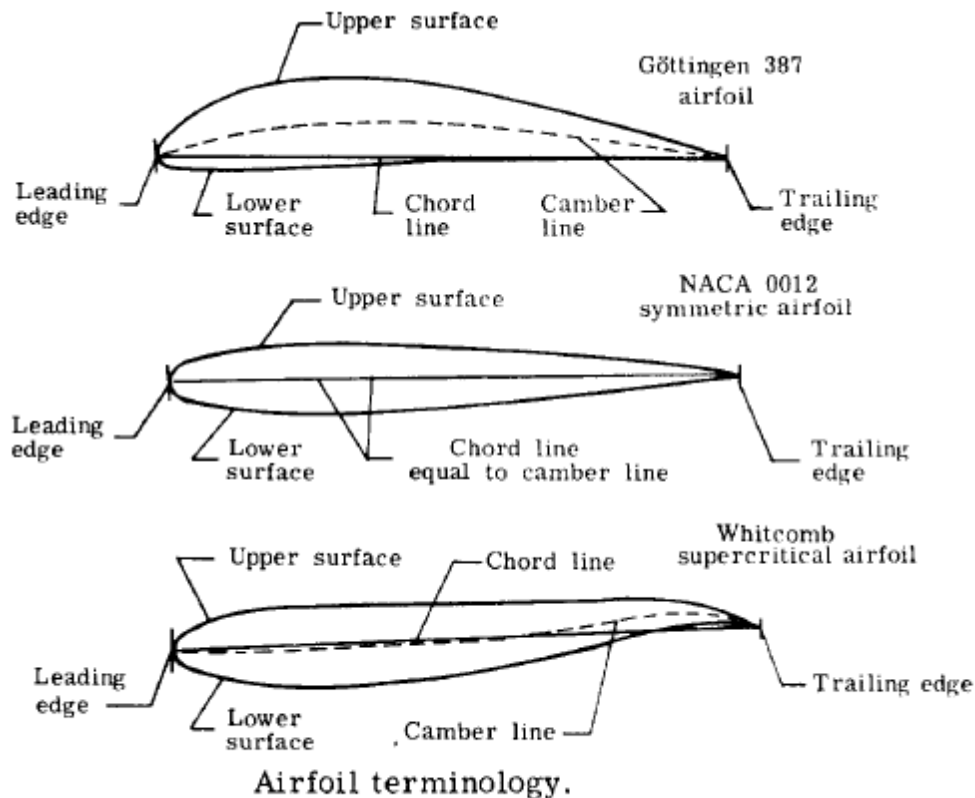


FIGURA EXTRAÍDA DA REF. 11.5

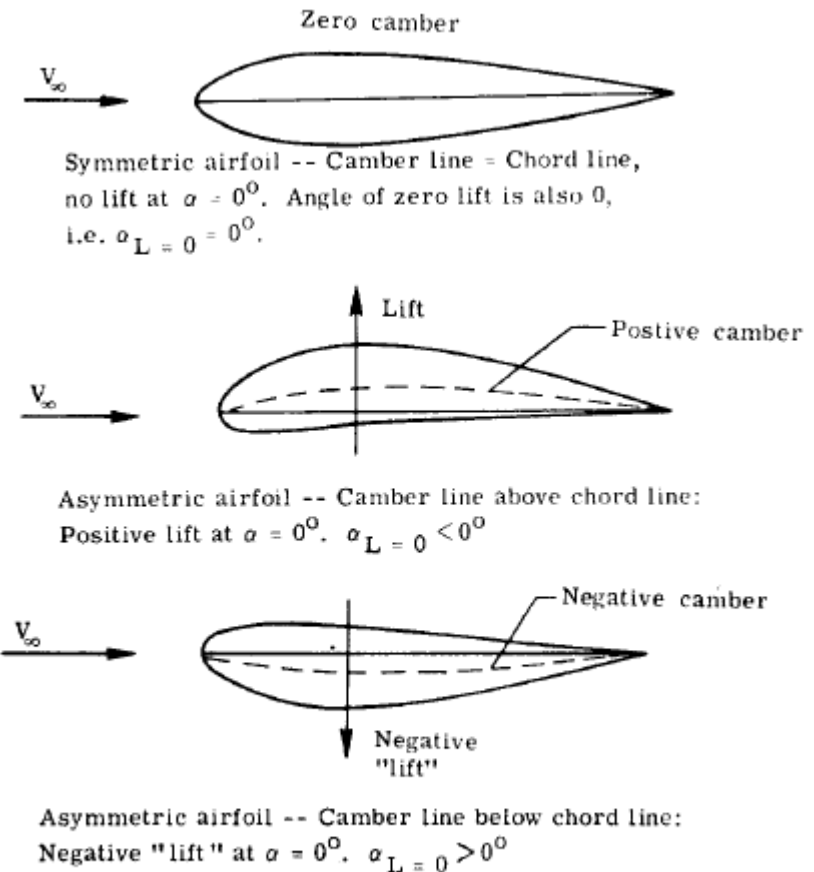


FIGURA EXTRAÍDA DA REF. 11.5

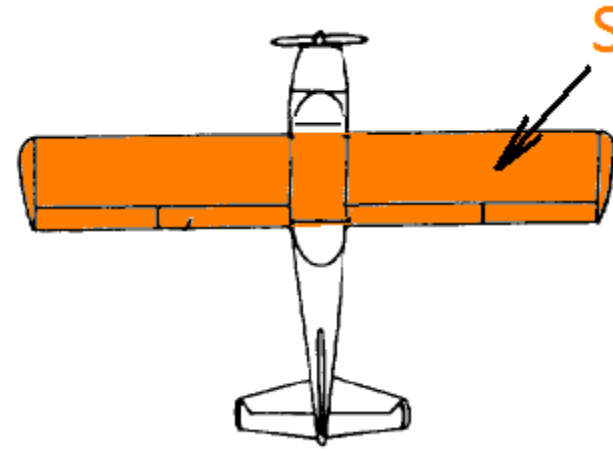
SUSTENTAÇÃO

Terminologia da Asa

Área da asa: É toda área entre os bordos de ataque e fuga, de ponta a ponta, incluindo a parte compreendida entre a fuselagem. (S)

Envergadura (wing span): É a distância de uma ponta da asa à outra. (b)

Alongamento (Aspect Ratio): é razão entre o quadrado da envergadura pela área da asa.
 $AR = b^2/S$

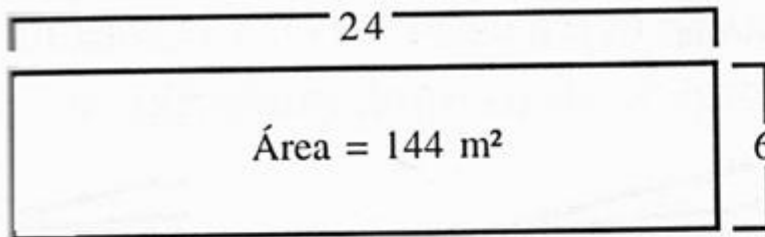


Quanto maior o alongamento, maior a capacidade da asa produzir sustentação e reduzir o arrasto. Porém, um alongamento muito elevado pode ocasionar esforços aeroelásticos críticos que podem demandar um aumento no peso estrutural.

Corde média geométrica: S/b

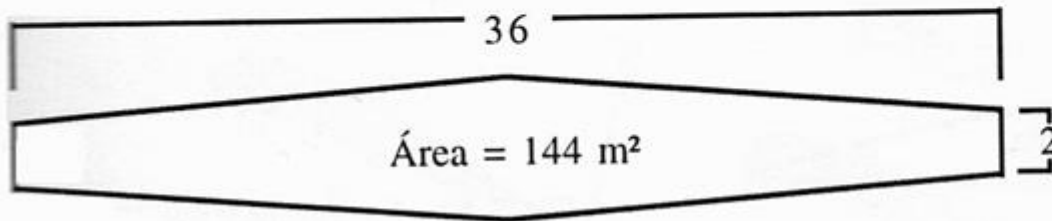
SUSTENTAÇÃO

Terminologia da Asa



$$\text{corda média geométrica} = \frac{144}{24} = 6 \text{ m}$$

$$\text{alongamento} = \frac{24}{6} = 4$$



$$\text{corda média geométrica} = \frac{144}{36} = 4 \text{ m}$$

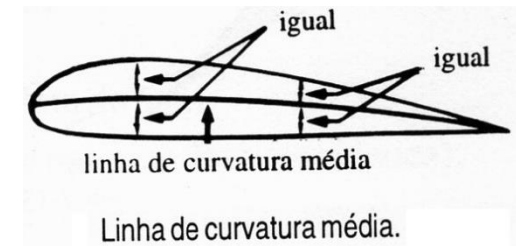
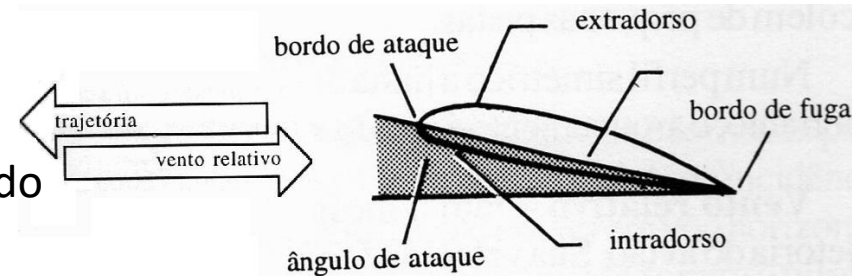
$$\text{alongamento} = \frac{36}{4} = 9$$

Alongamento.

SUSTENTAÇÃO

Terminologia do Aerofólio

- ✓ Bordo de ataque (Leading edge): Parte dianteira do aerofólio.
- ✓ Bordo de fuga (Trailing edge): Parte traseira do aerofólio.
- ✓ Linha da corda (Chord line): Linha reta que passa pelos bordos de ataque e fuga.
- ✓ Corda (Chord): Distância entre os bordos de ataque e fuga. É a dimensão característica do aerofólio.
- ✓ Extradorso (Upper surface): Parte superior do aerofólio.
- ✓ Intradorso (Lower surface): Parte inferior do aerofólio.
- ✓ Ângulo de ataque (Angle of attack): É o ângulo formado entre a linha de corda e o vento relativo.



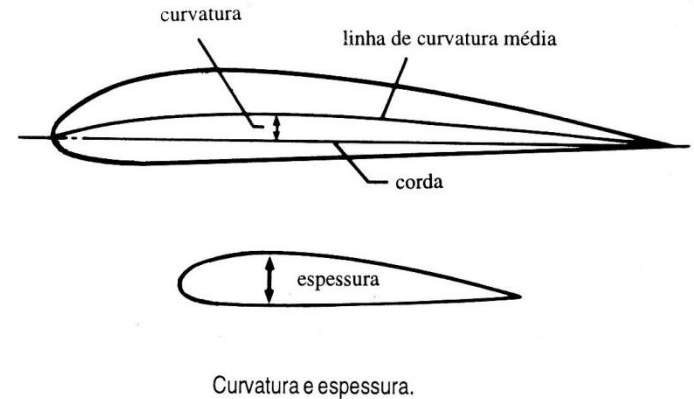
- ✓ Linha de curvatura média (Mean camber line): É a linha média entre o extradorso e o intradorso.
- ✓ Curvatura ou arqueamento (Camber): É a distância máxima da linha de curvatura média à corda, medida em porcentagem da corda.

SUSTENTAÇÃO

Terminologia do Aerofólio

✓ Espessura (Thickness): É a maior distância entre o extradorso e o intradorso.

Num perfil simétrico, a linha de curvatura média coincide com a corda, e, portanto, o arqueamento é igual a zero.



Vento Relativo

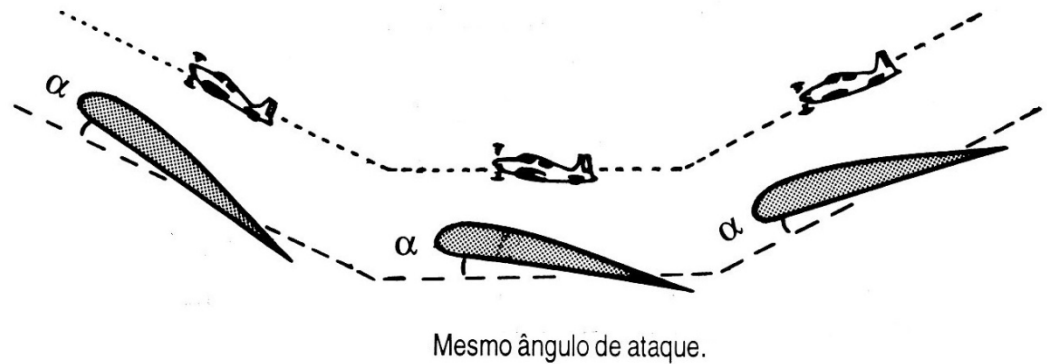
✓ Tem a mesma direção, porém sentido contrário à trajetória da aeronave. Sua velocidade é a mesma da aeronave.



SUSTENTAÇÃO

Ângulo de Ataque

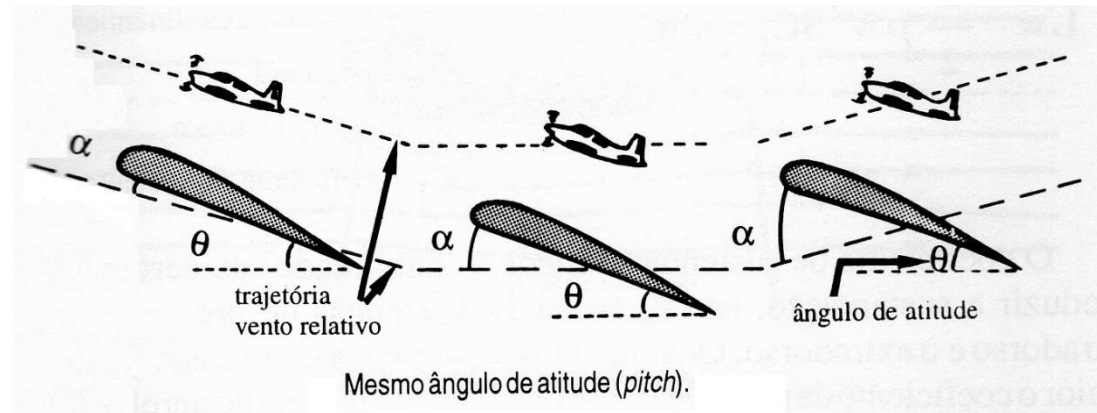
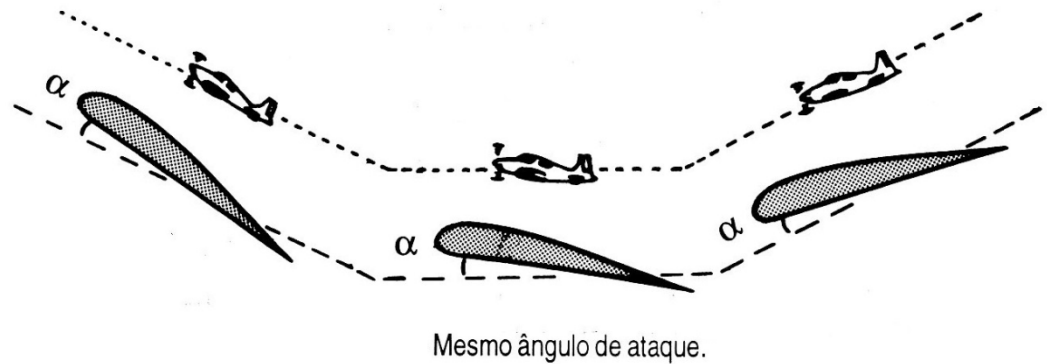
✓ Não confundir o **ângulo de ataque** α com o **ângulo de arfagem** (pitch angle) θ .



SUSTENTAÇÃO

Ângulo de Ataque

✓ Não confundir o **ângulo de ataque** α com o **ângulo de arfagem** (pitch angle) θ .



SUSTENTAÇÃO

Ângulo de Incidência

✓ Formado pela linha de corda e o eixo longitudinal do avião.



REFERÊNCIAS

- 11.1 – Richard S. Shevell, Fundamentals of Flight, Printice-Hall, 1983.
- 11.2 – Newton Soler Saintive, Teoria de Voo, Editora Asa, 3ª Edição, 2001.
- 11.3 – Daniel P. Raymer, Aircraft Design: A Conceptual Approach, AIAA Education Series, 2nd Edition, 1992.
- 11.4 - Luiz Pradines, Fundamentos da Teoria de Voo, Edições Inteligentes, 2004.
- 11.5 – Theodore A. Talay, Introduction to the Aerodynamics of Flight, NASA SP-367, 1975.
- 11.6 – John D. Anderson Jr, Introduction to Flight, 5th Edition, McGraw Hill, 2005.
- 11.7 – H. H. Hurt Jr, Aerodynamics for Naval Aviators, Direction of Commander, Naval Air Systems Command, 1965.
- 11.8 - FAA-H-8083-25A Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge, 2008.