



Robótica Aérea

Princípios Básicos de Aeronáutica

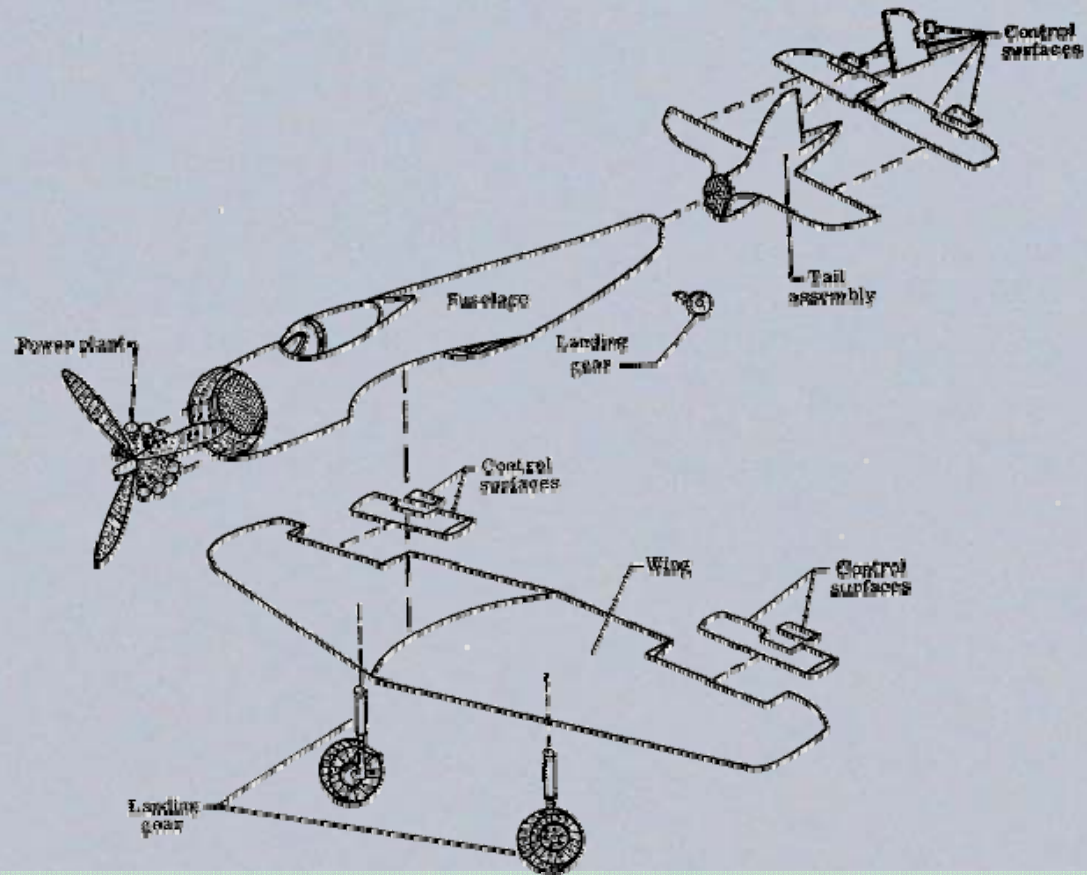
Por:

Prof. Paulo Iscold – CEA/UFMG

Nomenclatura

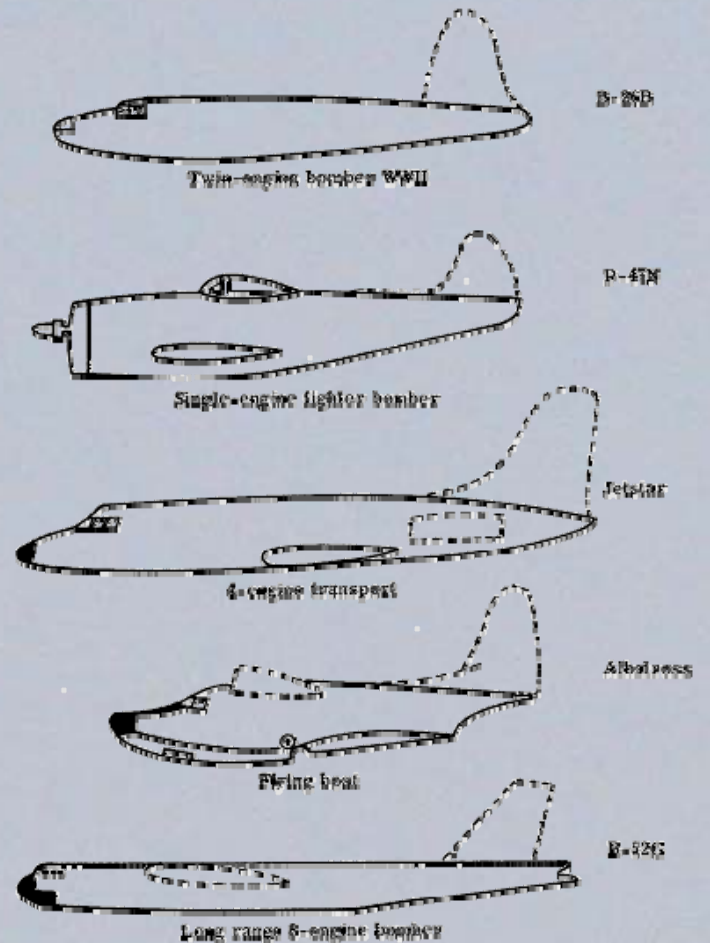
- Curso voltado para aeronaves, portanto antes de entrarmos em detalhes a respeito de aerodinâmica clássica, precisamos conhecer os componentes que compõem um avião.

- Fuselagem
- Asa
- Cauda
- Controles
- Trem de pouso
- Grupo moto-propulsor



Nomenclatura

- Fuselagem
 - Abrigar carga, tripulantes e passageiros
 - Pode ou não alojar o motor
 - Ligação entre asa e cauda
 - Formato aerodinâmico.



Nomenclatura

- Fuselagem



Nomenclatura

- Fuselagem



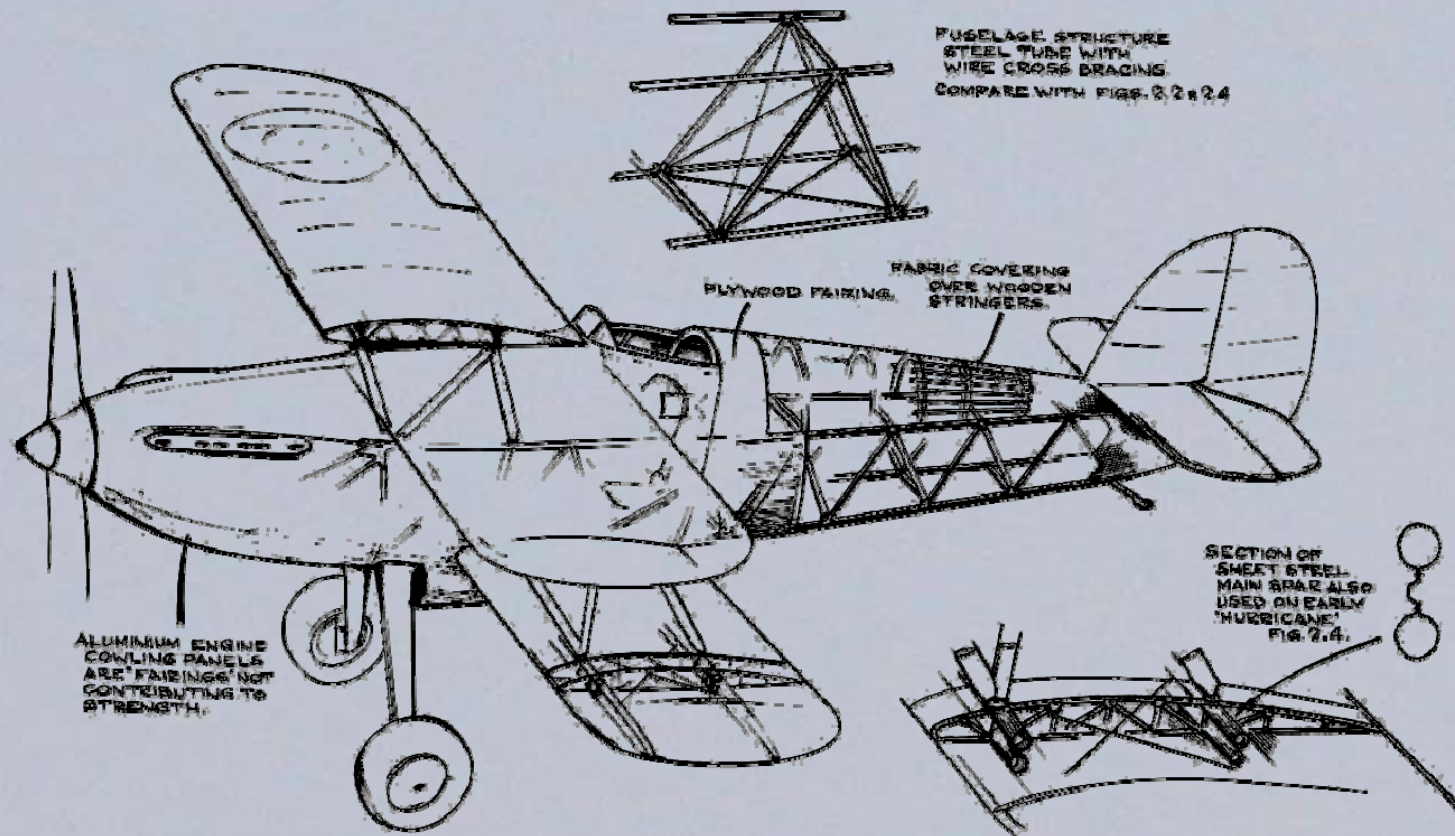
Nomenclatura

- Fuselagem



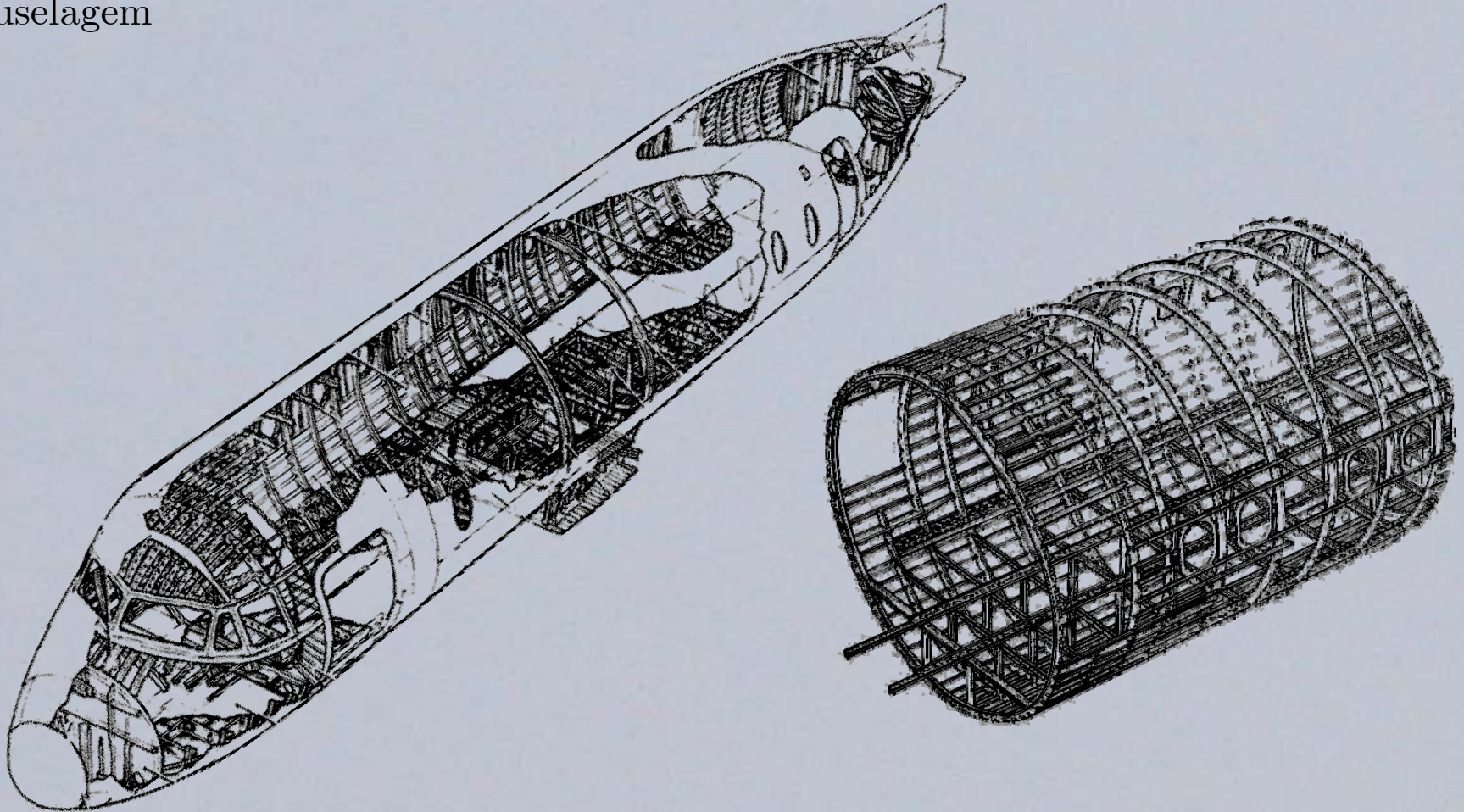
Nomenclatura

- Fuselagem



Nomenclatura

- Fuselagem



Nomenclatura

- Asa

- Força de sustentação
- Combustível, trem de pouso e motores
- Forma em planta - ângulo de enflechamento
- Seção transversal – Perfil / Aerofólio



Rectangular straight wing



Tapered straight wing



Rounded or elliptical straight wing



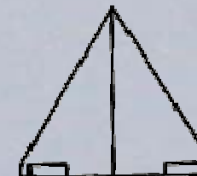
Slightly swept wing



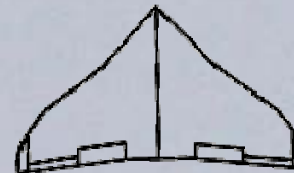
Moderately swept wing



Highly swept wing



Simple delta wing



Complex delta wing

Nomenclatura

- Asa
 - Posição em relação à fuselagem
 - Ângulo de diedro



Nomenclatura

- Asa

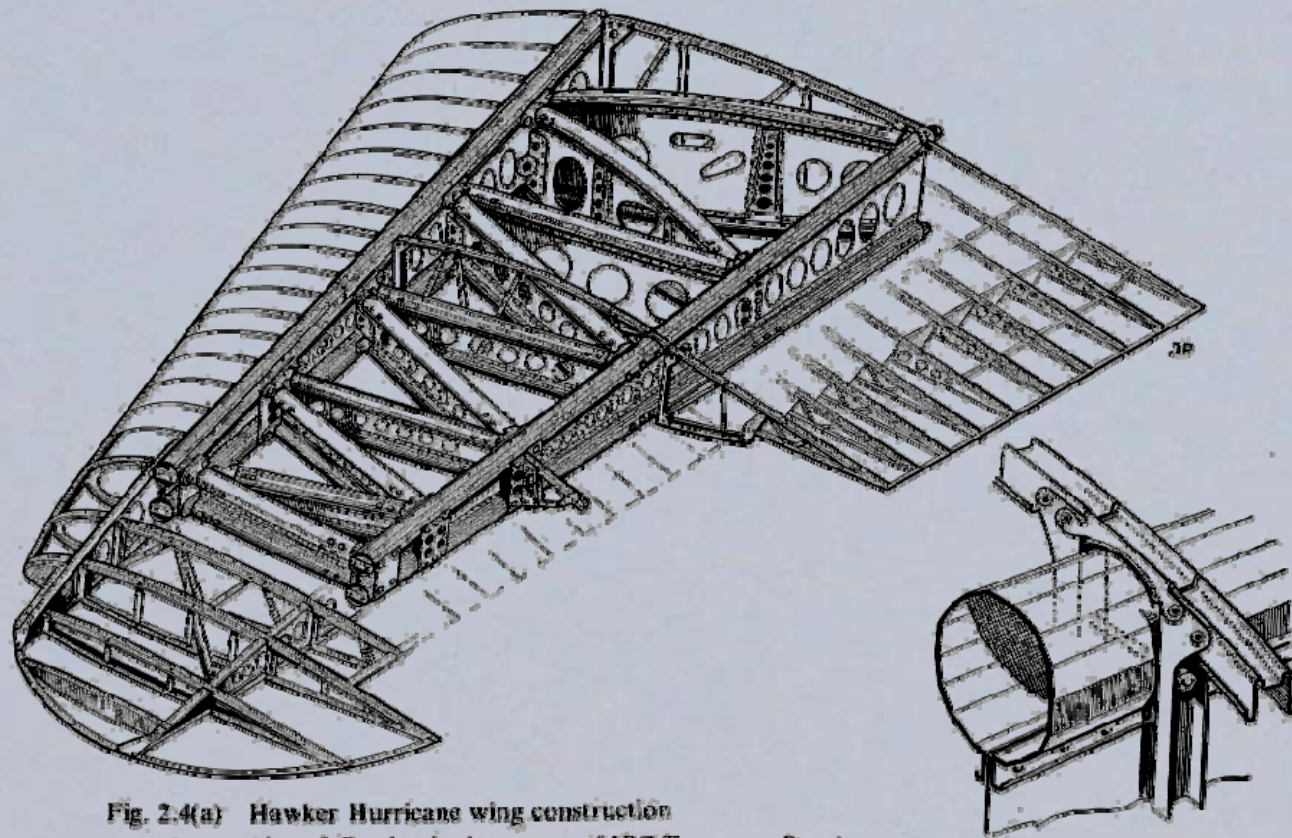
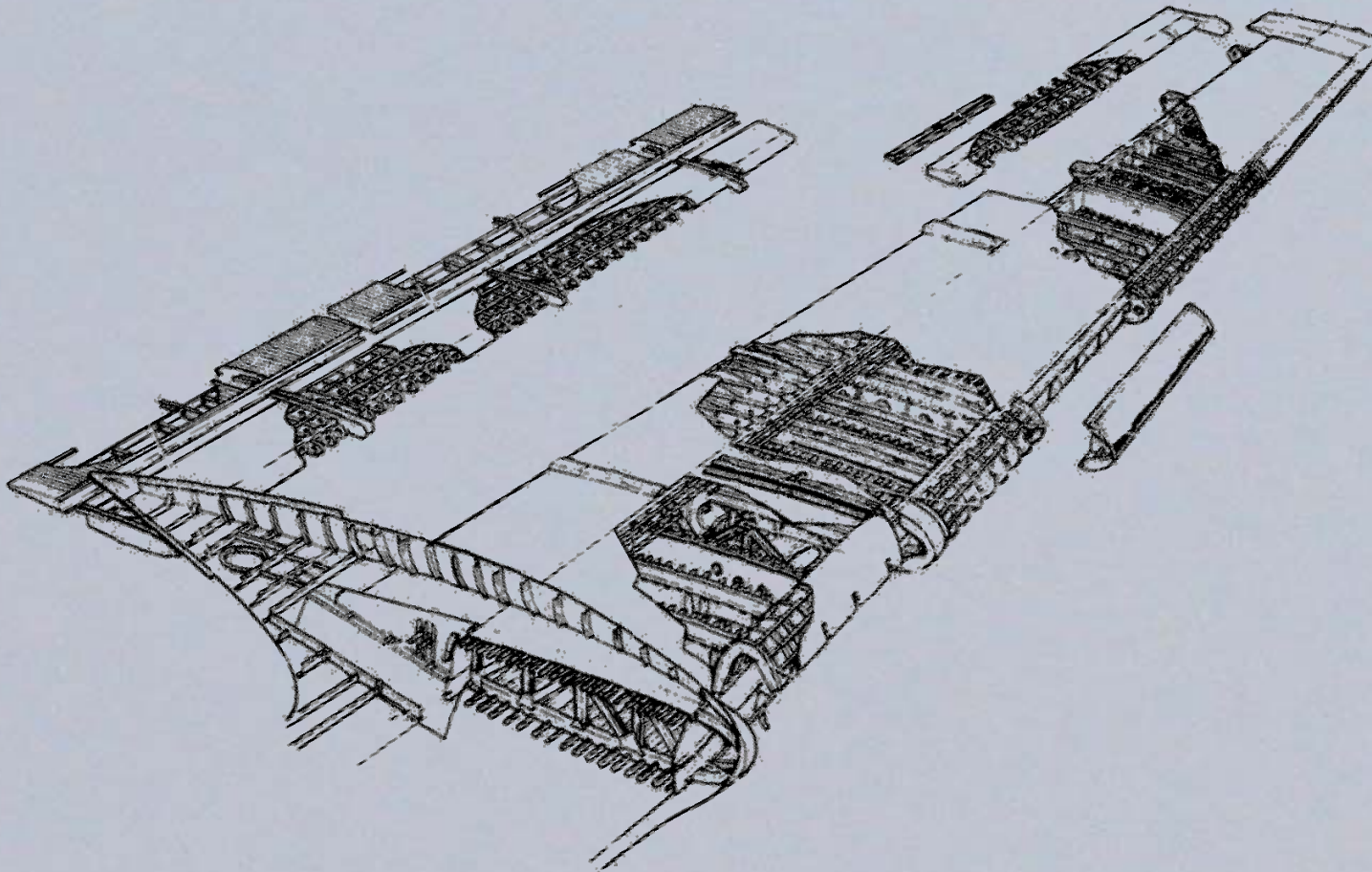


Fig. 2.4(a) Hawker Hurricane wing construction
(From 'Aircraft Production' courtesy of IPC Transport Press)

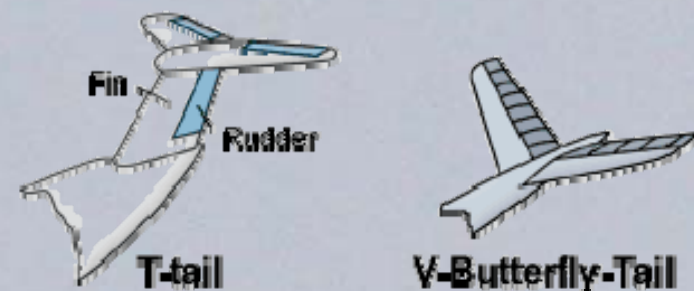
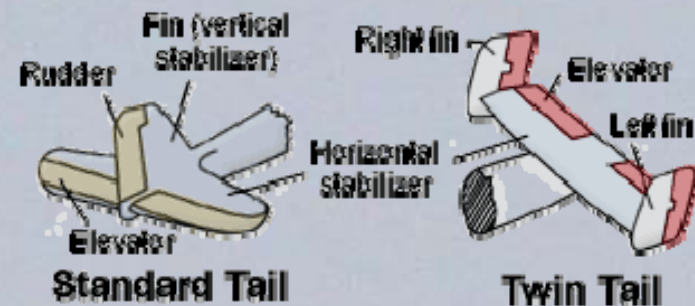
Nomenclatura

- Asa



Nomenclatura

- Cauda
 - Estabilidade da aeronave:
 - Longitudinal – subir e descer
 - Direcional
 - Empenagens
 - Horizontal
 - Vertical
 - em T
 - em H
 - em V



Nomenclatura

- Cauda
 - Convencional
 - Canard
 - Três superfícies
 - Sem cauda (asa voadora)



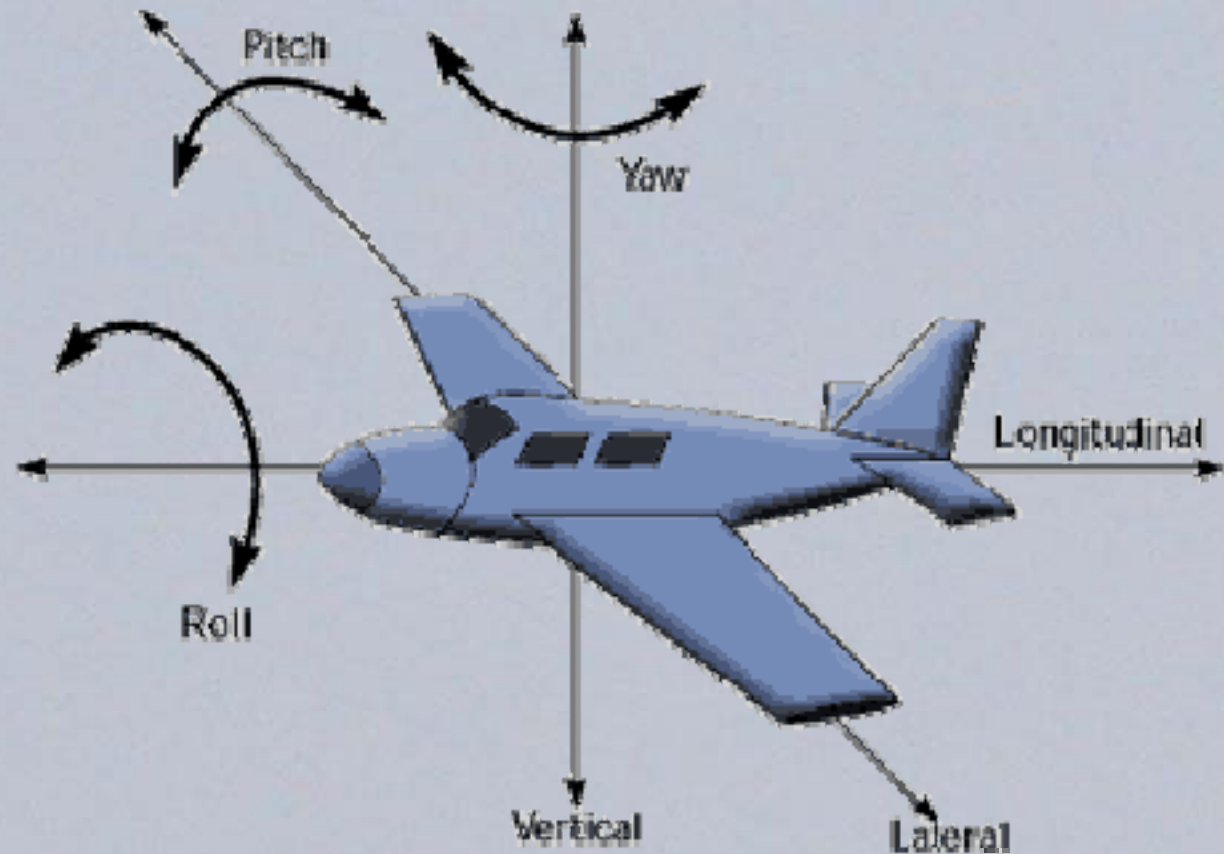
Nomenclatura

- Cauda



Nomenclatura

- Controles
 - Profundor
 - Leme
 - Aileron
 - Flapes
 - Spoilers
 - Compensadores

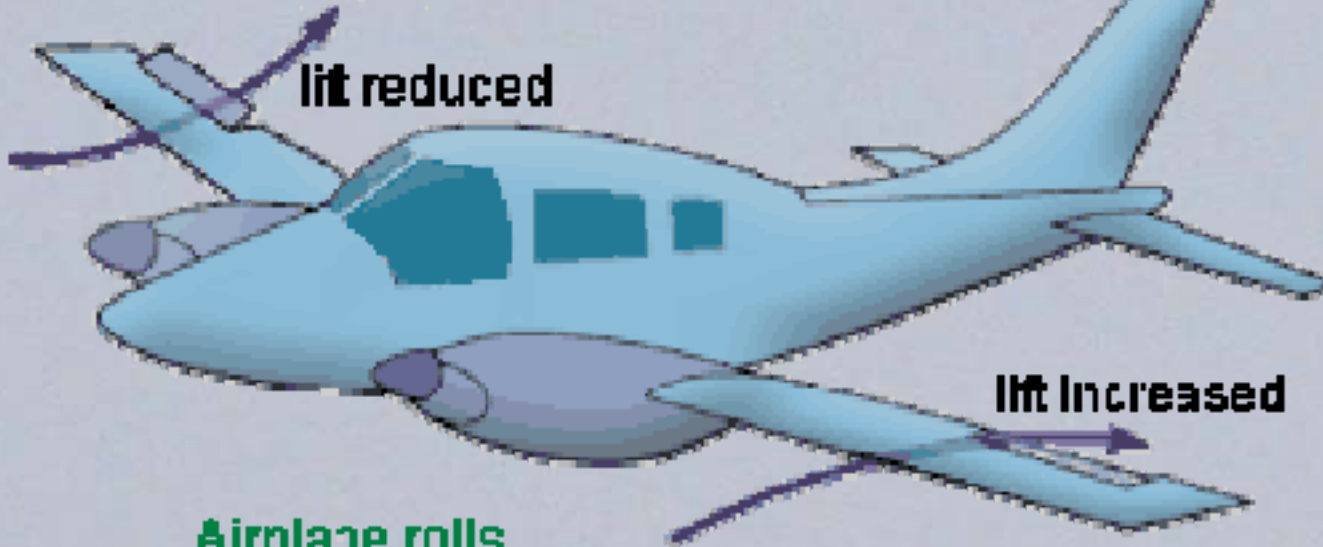


Nomenclatura

- Controles
 - Ailerons

aileron on right wing tilts up

lift reduced



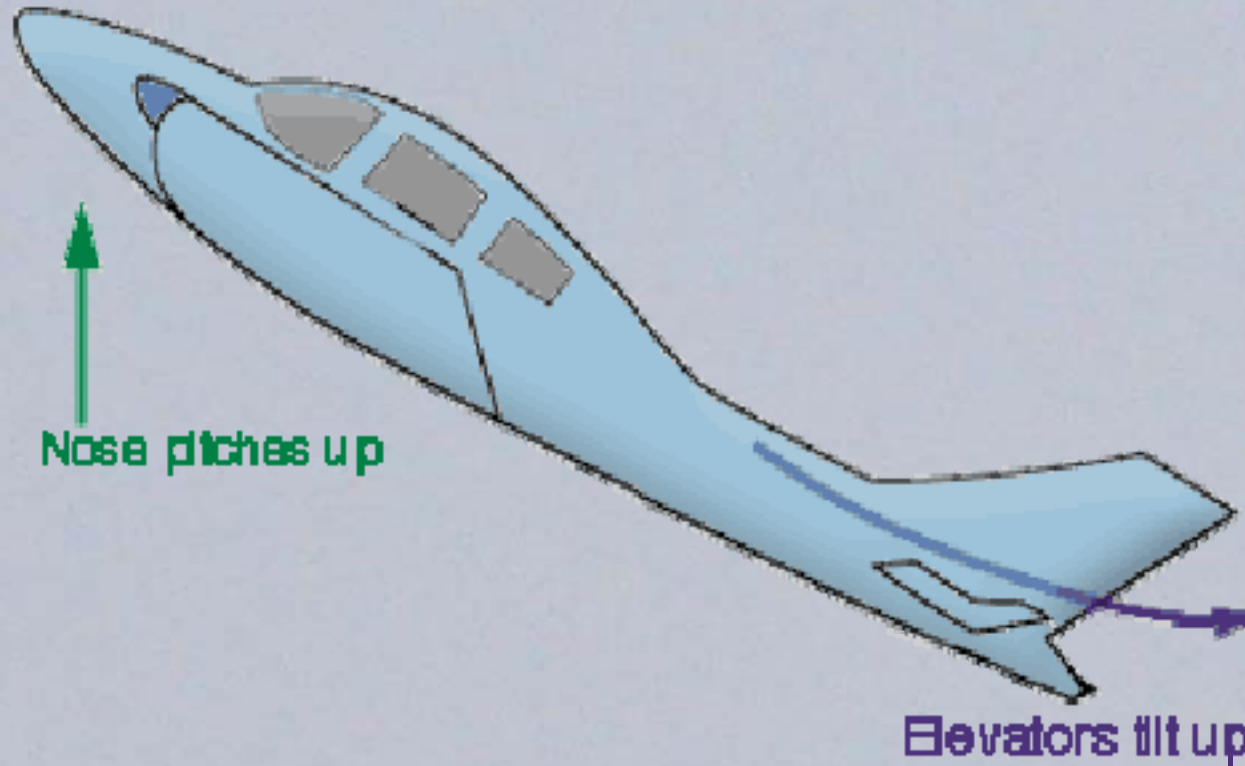
lift increased

Airplane rolls
to the right

aileron on left wing tilts down

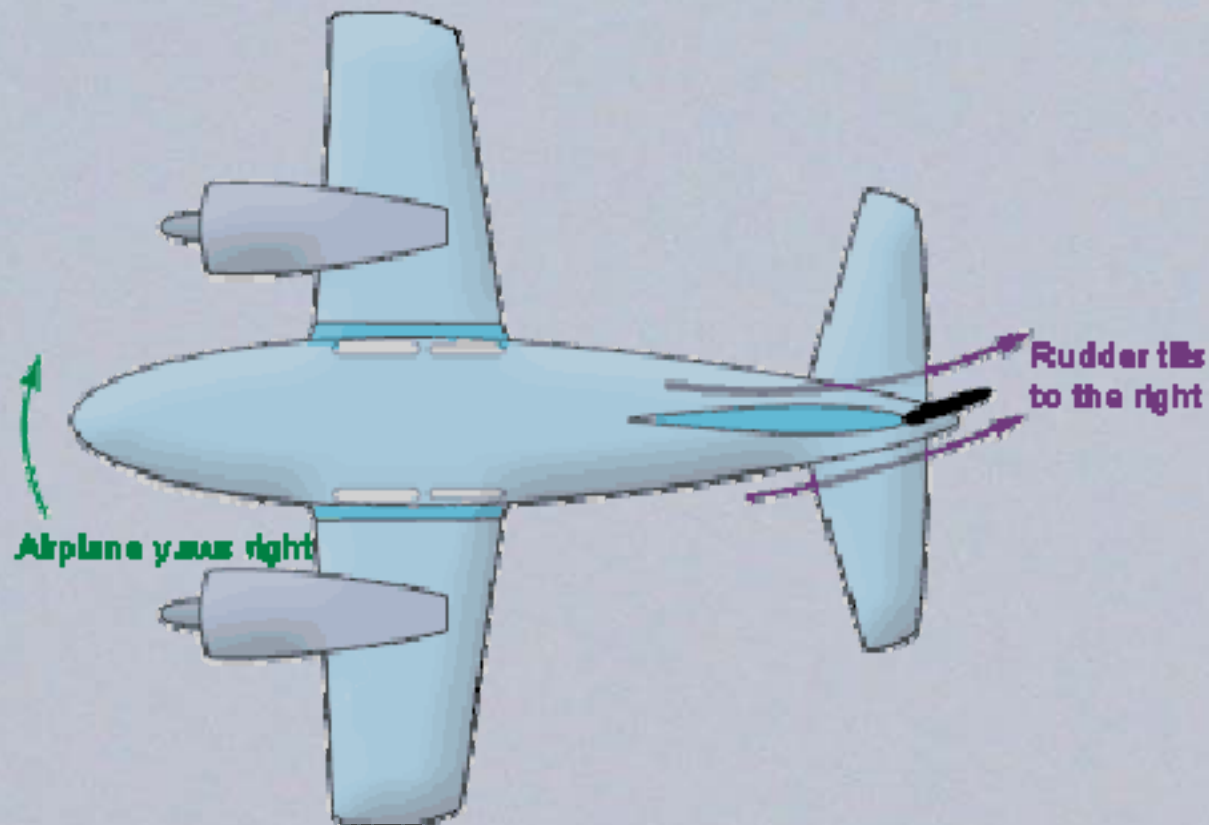
Nomenclatura

- Controles
 - Profundor



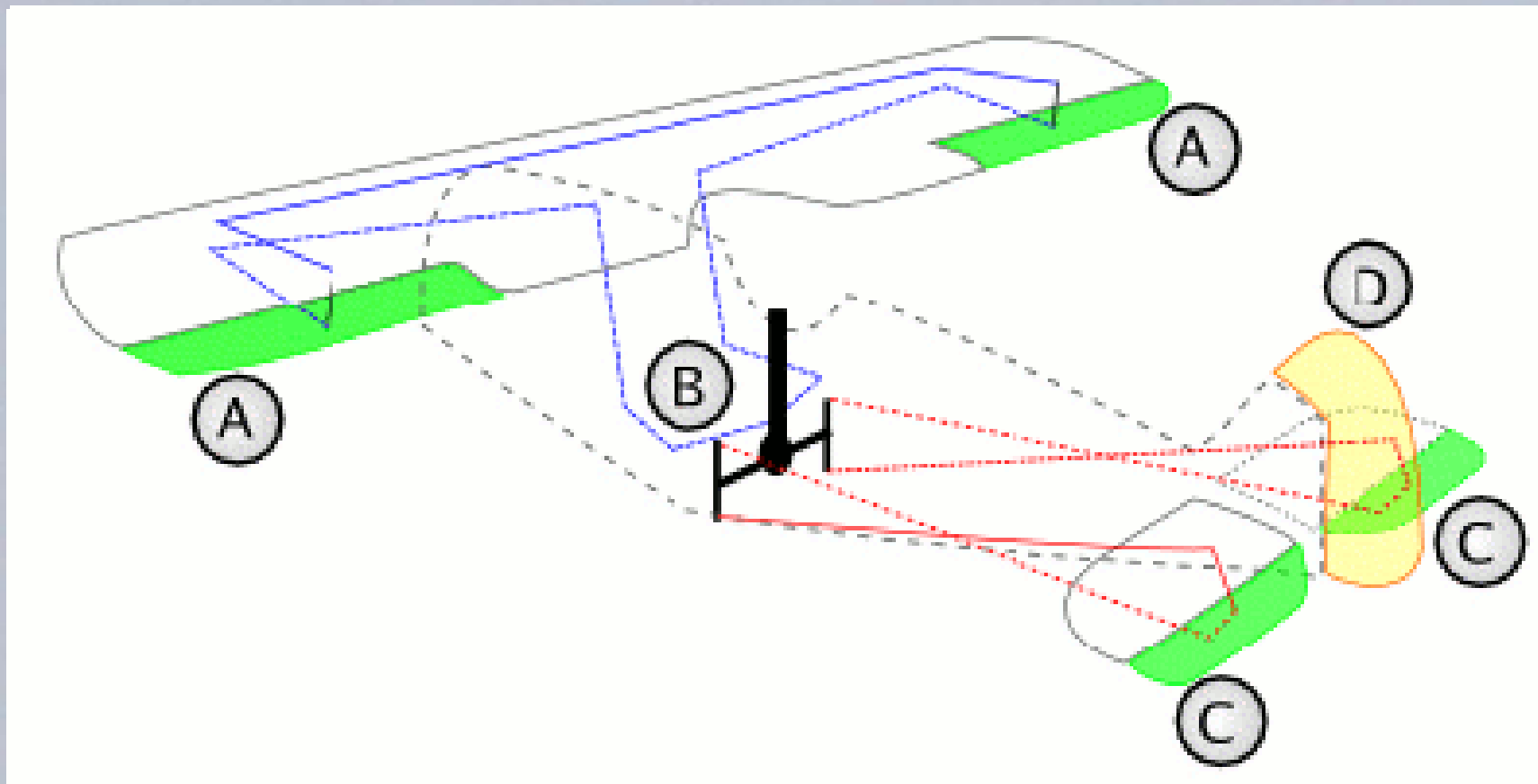
Nomenclatura

- Controles
 - Leme de direção



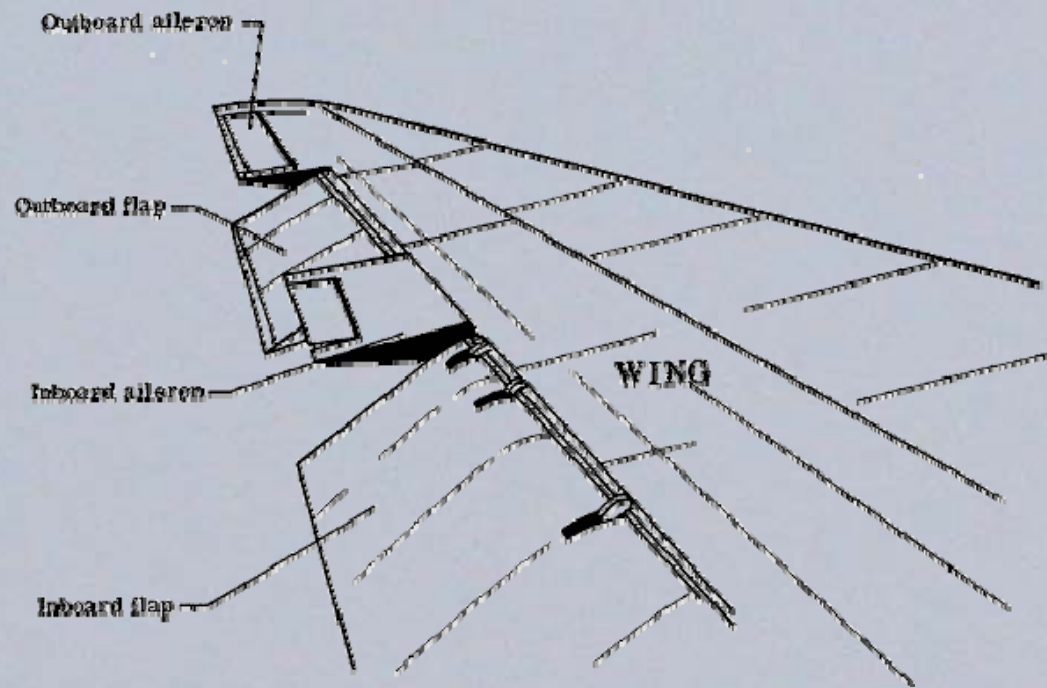
Nomenclatura

- Controles



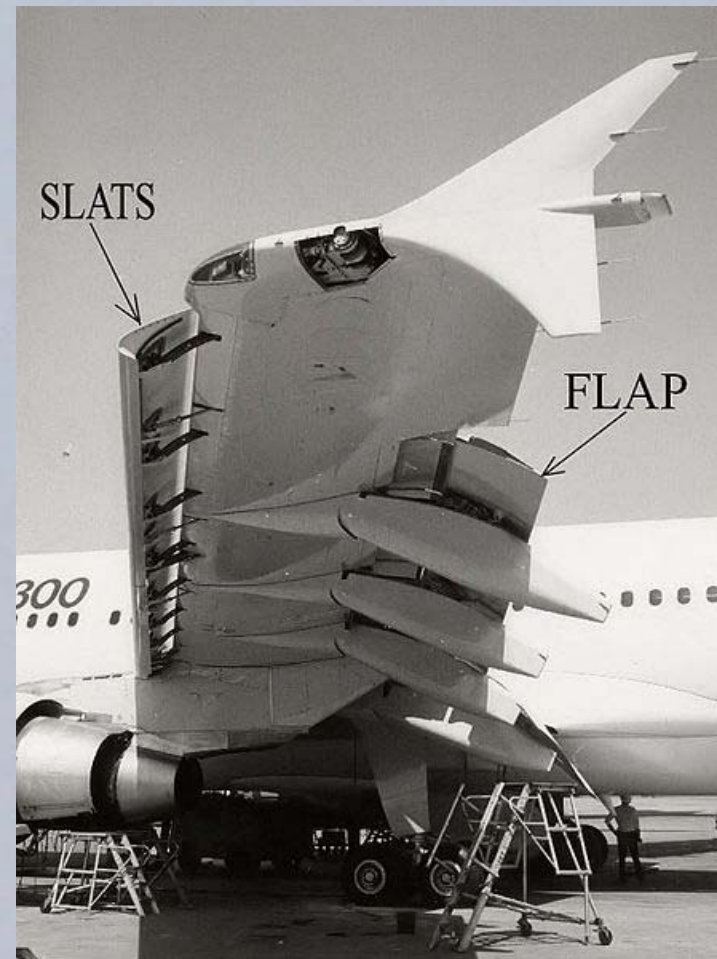
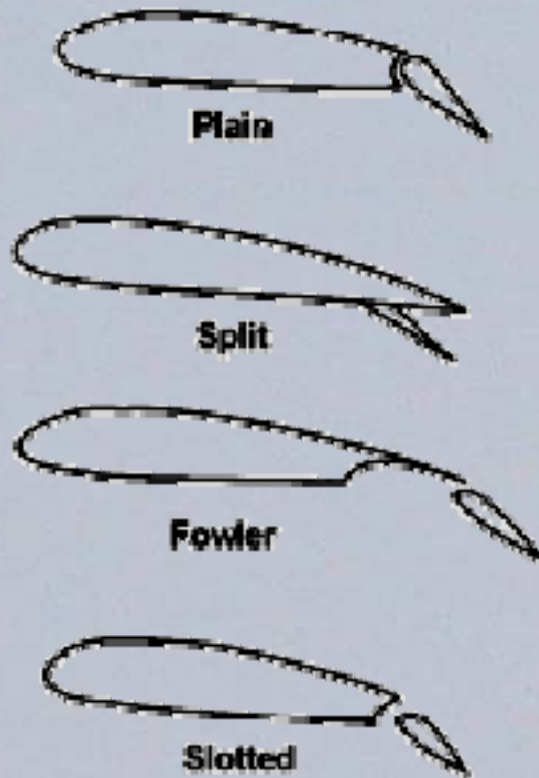
Nomenclatura

- Flapes
 - aumenta a sustentação da asa (benefício)
 - aumentar o arrasto da asa (prejuízo)



Nomenclatura

- Flapes



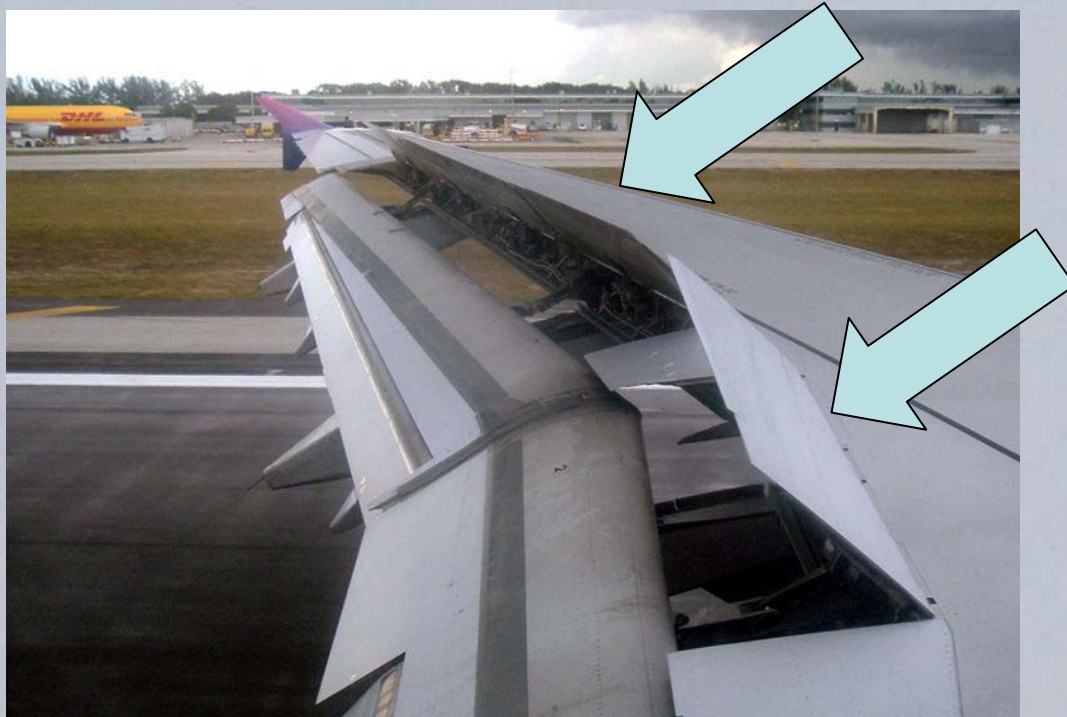
Nomenclatura

- Flapes – Slot
 - aumentar a sustentação da asa



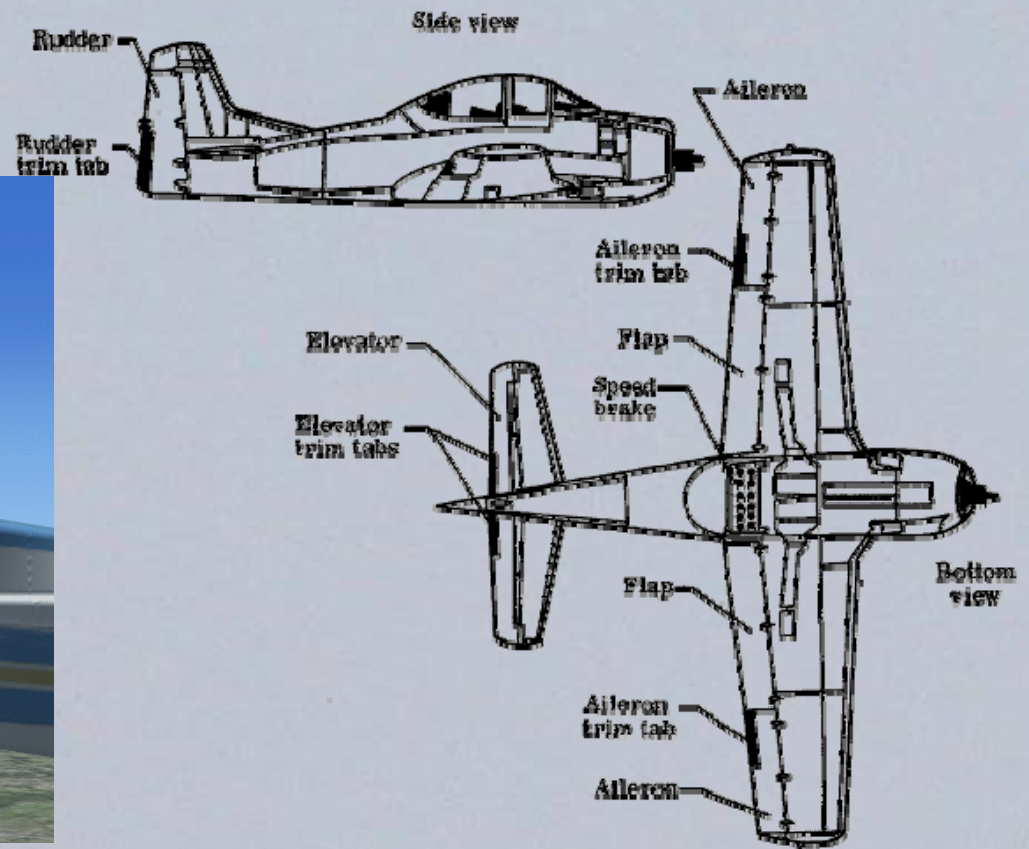
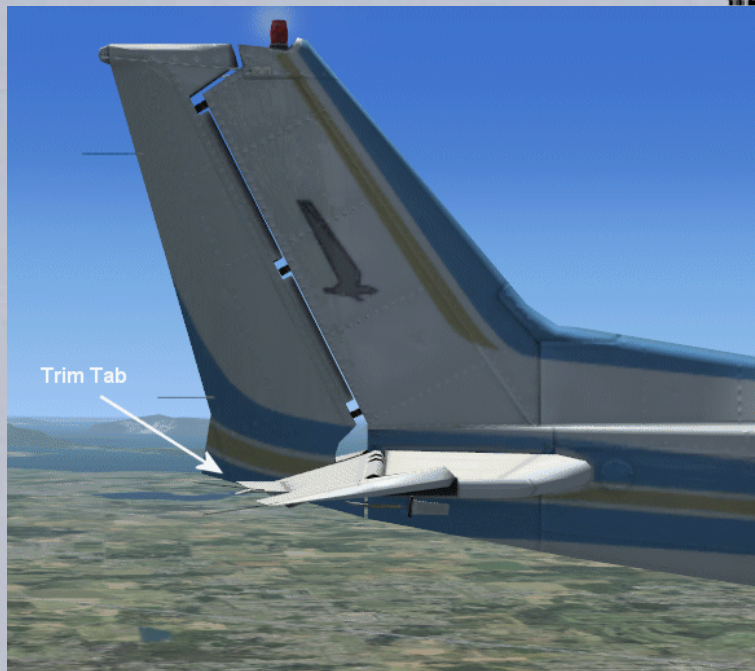
Nomenclatura

- Spoilers
 - aumentar o arrasto da asa (benefício)
 - diminuir a sustentação da asa (prejuízo)



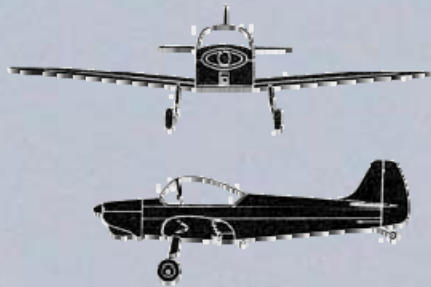
Nomenclatura

- Compensadores
 - ajuste fino dos comandos



Nomenclatura

- Trem de pouso
 - Triciclo ou convencional
 - Fixo, Escamoteável ou Retrátil



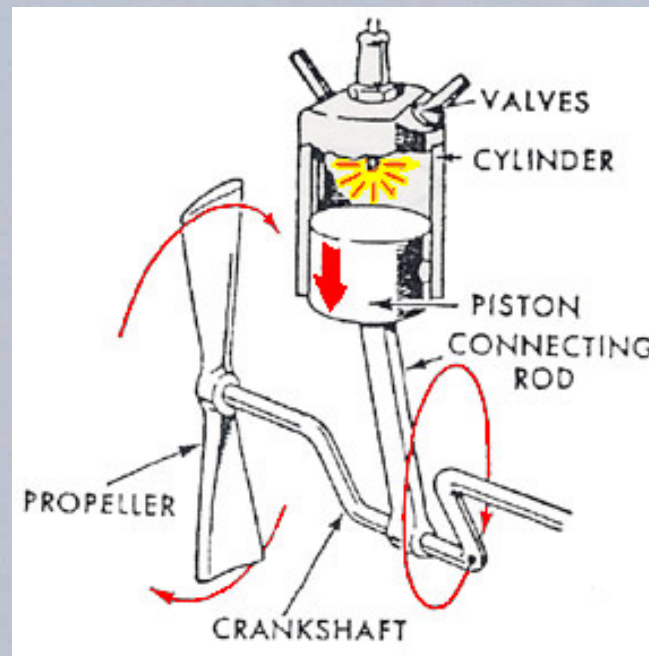
Nomenclatura

- Trem de pouso
 - Escamoteável



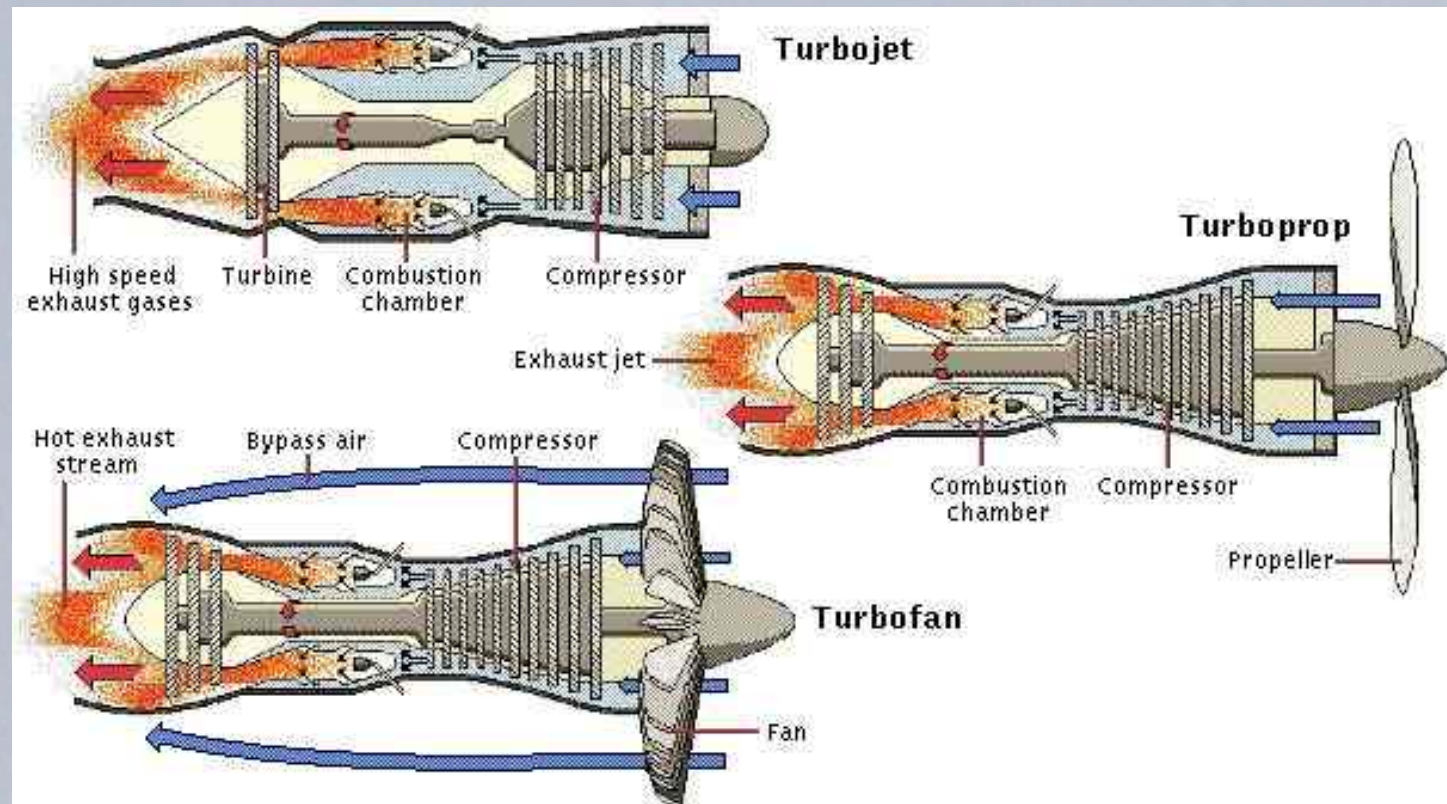
Nomenclatura

- Grupo moto-propulsor
 - Convencional
 - Jato
 - Turbo – Hélice
 - Turbo – Fan



Nomenclatura

- Grupo moto-propulsor



Nomenclatura

- Grupo moto-propulsor
 - Turbo – Hélice



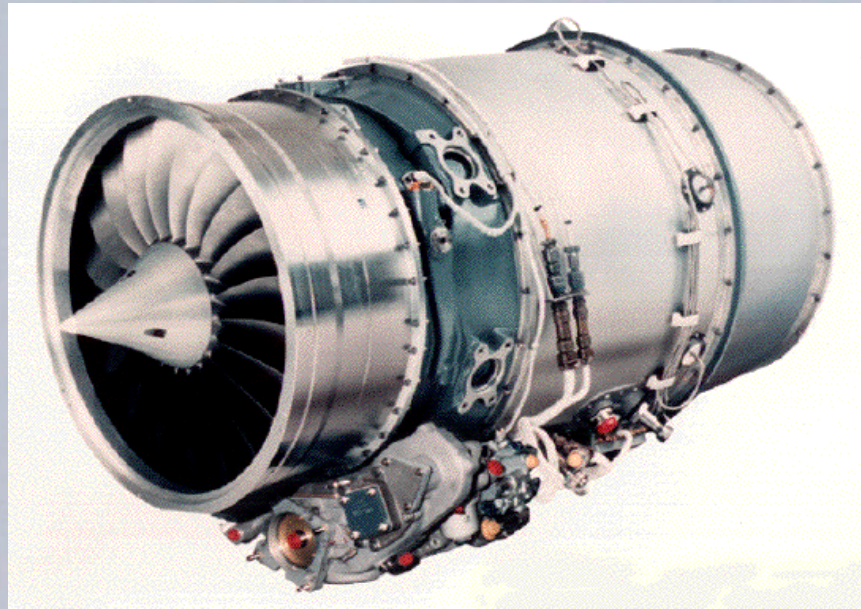
Nomenclatura

- Grupo moto-propulsor
 - Turbo – Jato



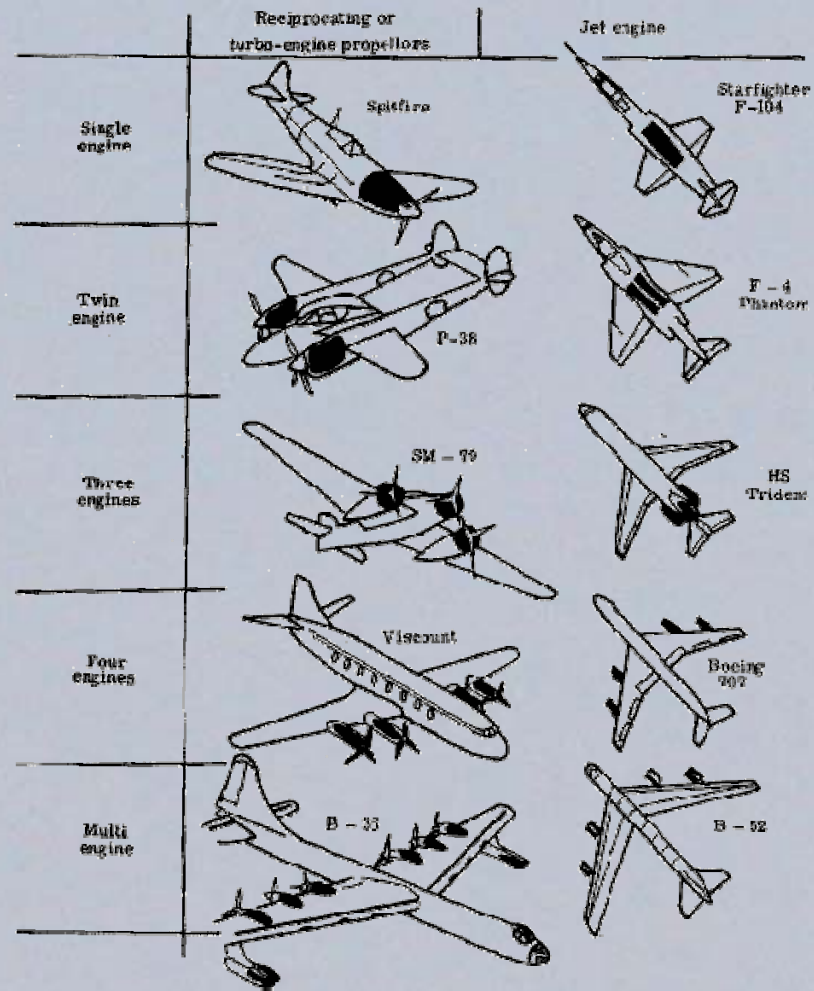
Nomenclatura

- Grupo moto-propulsor
 - Turbo – Fan



Nomenclatura

- Grupo moto-propulsor
 - Mono Motor
 - Bi Motor
 - Tri Motor
 - Quadri Motor
 - Multi Motor



Nomenclatura

- Grupo moto-propulsor



Nomenclatura

- Grupo moto-propulsor



Forças



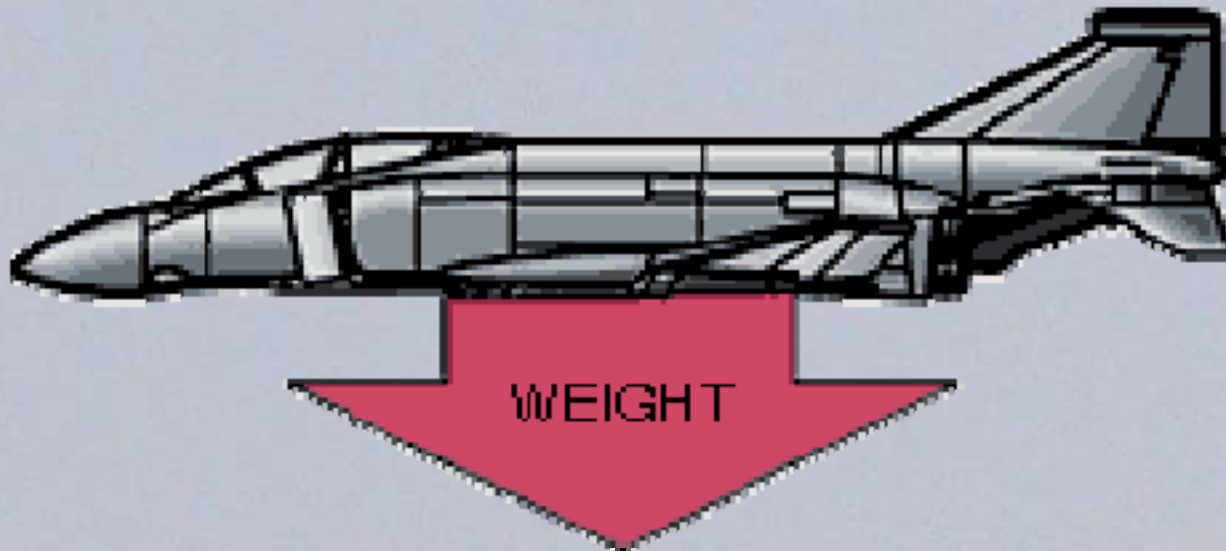
- Forças no avião
 - Peso
 - Tração
 - Sustentação
 - Arrasto

Forças



- Forças no avião

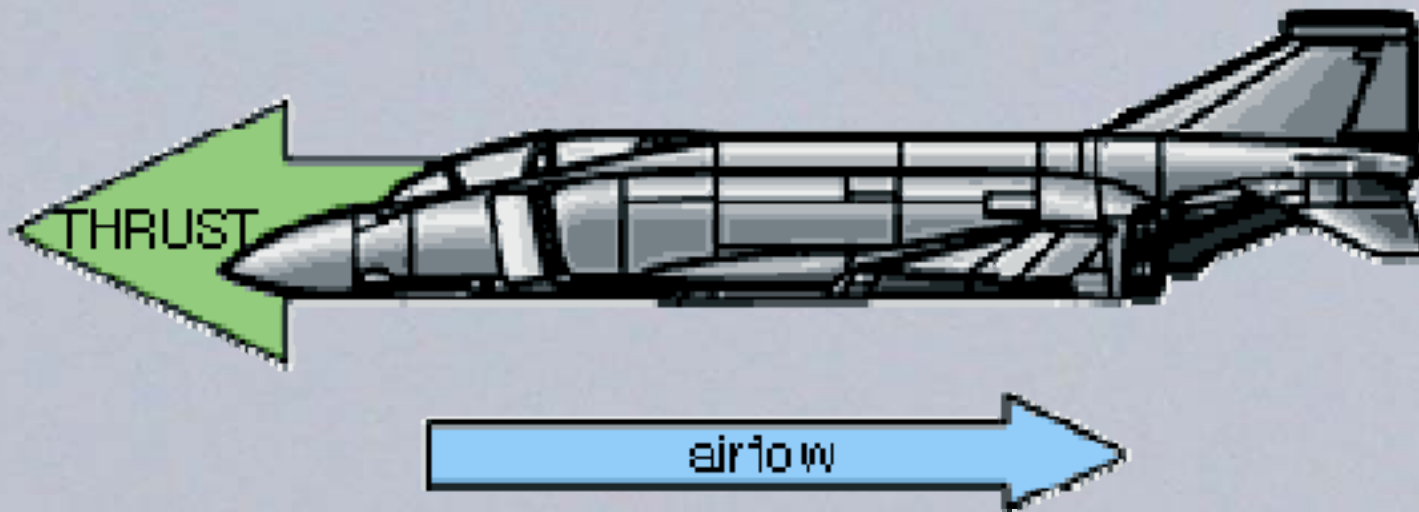
- Peso: inclui o próprio avião, a carga paga e o combustível. Como o combustível é consumido à medida que a aeronave voa, o peso decresce. O peso age na direção definida pelo centro de massa do corpo e o centro da Terra, apontando para esse último.



Forças



- Forças no avião
 - Tração: independentemente do tipo de conjunto moto-propulsor que se utilize é a tração a força propulsiva da aeronave. Nos aviões (aeronaves de asa fixa) a tração atua ao longo de seu eixo longitudinal.

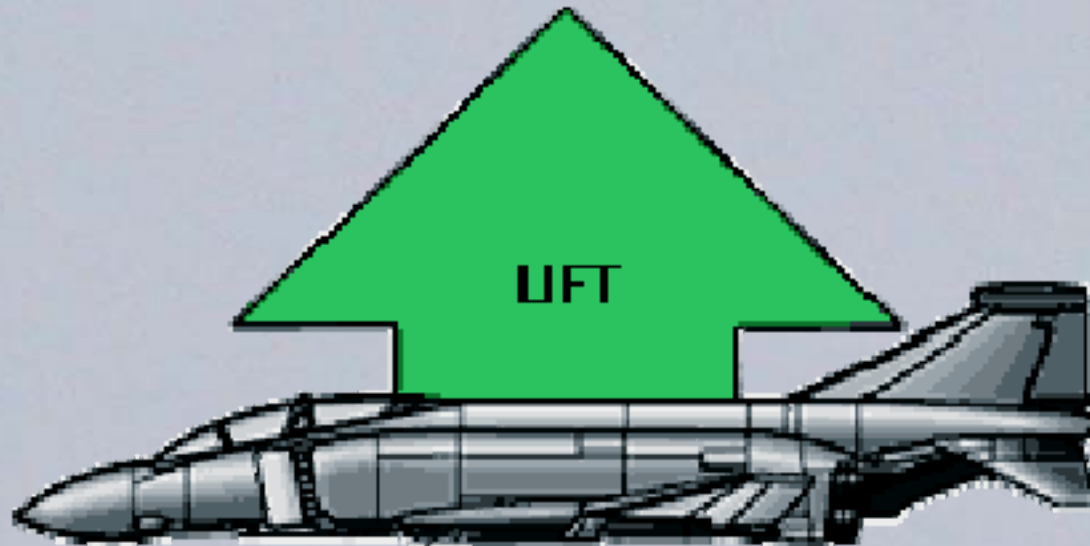


Forças



- Forças no avião

- Sustentação: é a principal componente da força resultante que atua na asa gerada pela reação do fluido que “ataca” o avião, sendo defletido ao passar pela asa. Representa a componente de força aerodinâmica resultante normal à trajetória de voo.

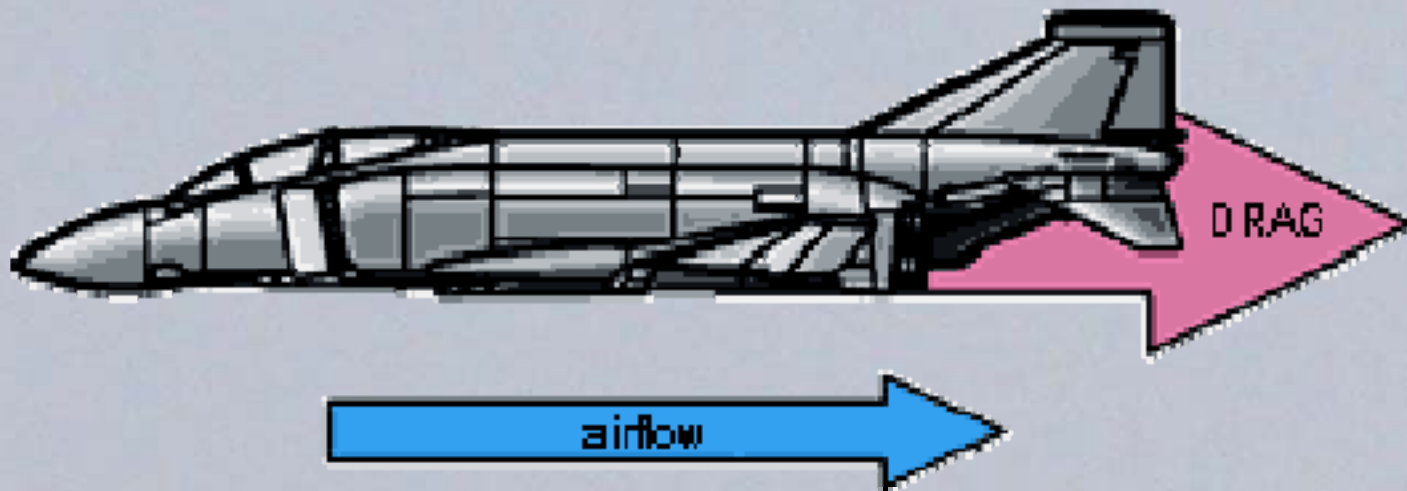


Forças



- Forças no avião

- Arrasto: assim como a sustentação, é também gerada pela reação do fluido que ataca o avião e é defletido ao passar pela asa. É a componente de força aerodinâmica resultante que atua ao longo da trajetória de voo.

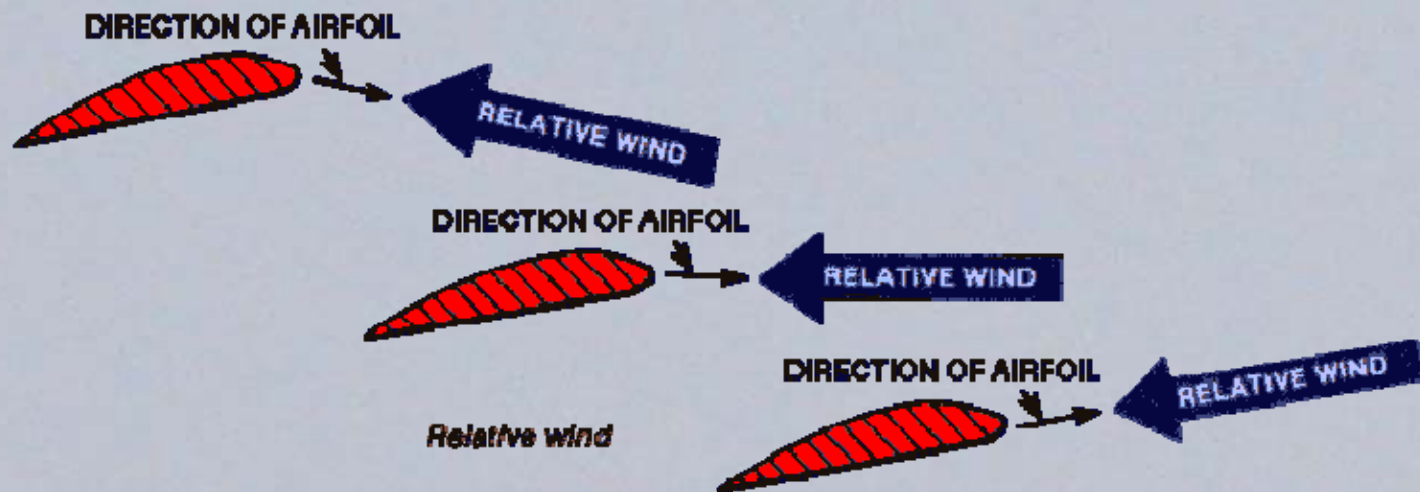


Forças



- Forças no avião

- Ângulo de ataque: é o ângulo formado entre a direção do escoamento e uma linha de referência da asa ou do avião. Todas as forças aerodinâmicas são medidas e calculadas para um dado ângulo de ataque.

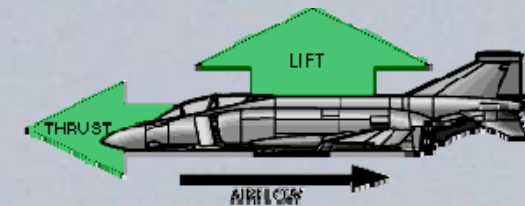


Forças

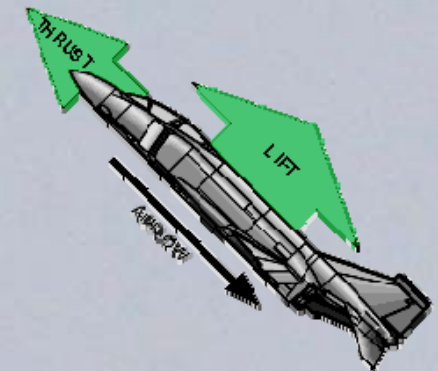


- Forças no avião

- Ângulo de ataque: é o ângulo formado entre a direção do escoamento e uma linha de referência da asa ou do avião. Todas as forças aerodinâmicas são medidas e calculadas para um dado ângulo de ataque.



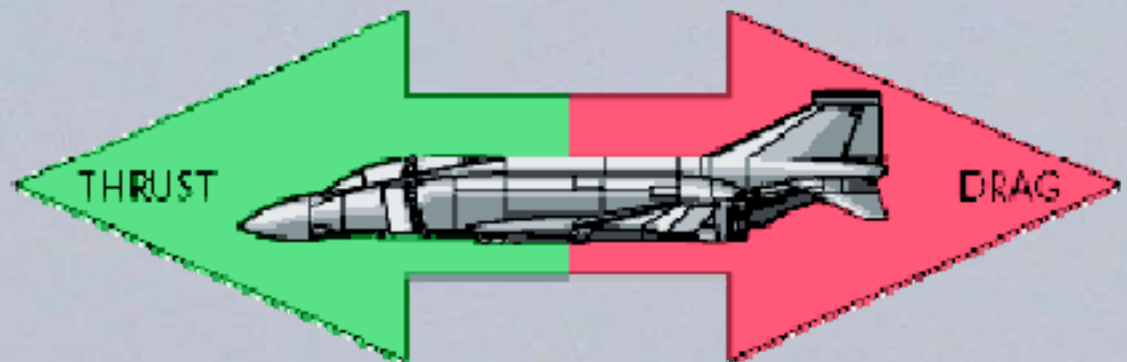
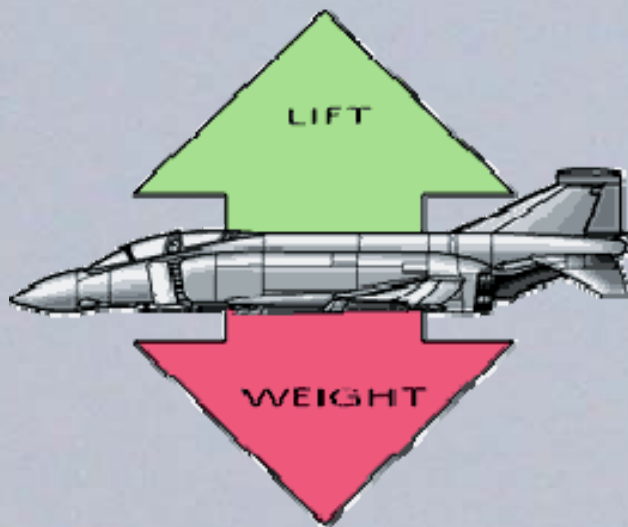
Lift occurs always at a 90° angle from the direction of thrust



Forças



- Forças no avião
 - Equilíbrio de forças



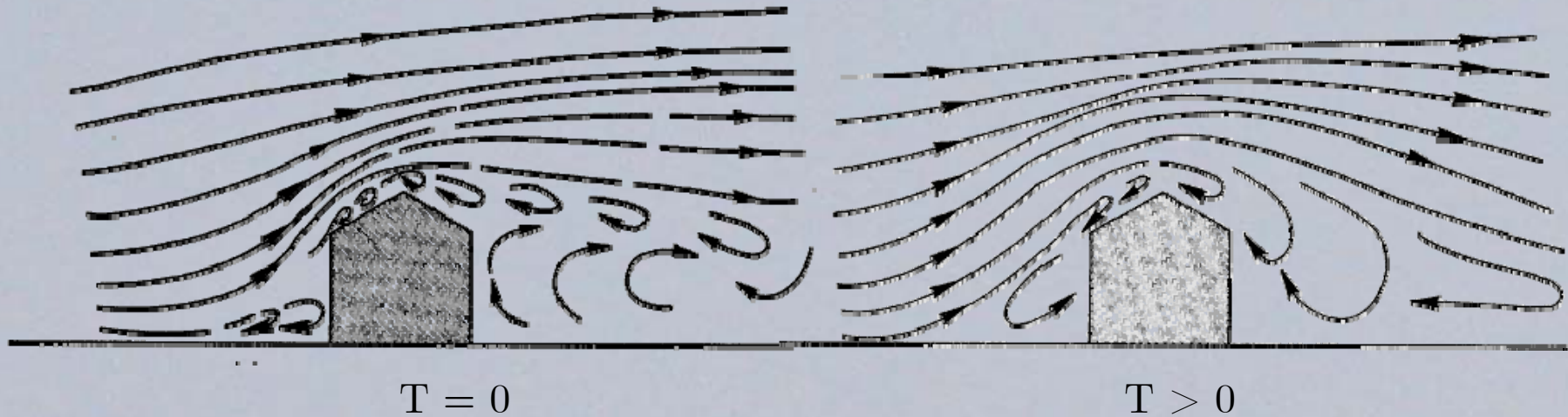
Forças



- Forças no avião
 - Vôo reto e nivelado
 - Vôo em Curva

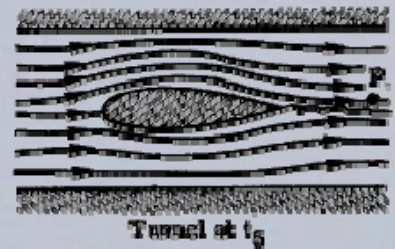
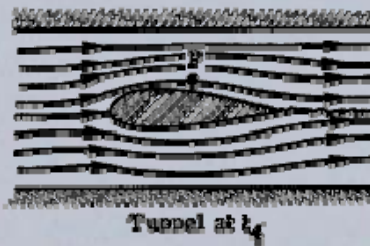
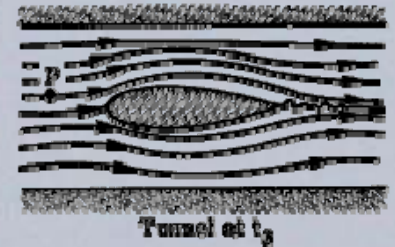
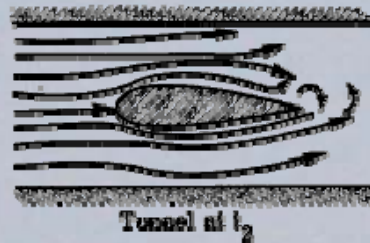
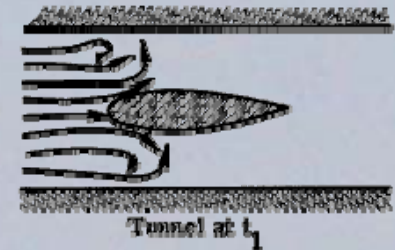
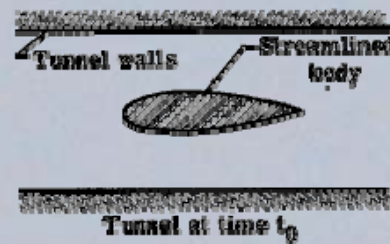
Aerodinâmica

- Conceitos
 - Escoamento estacionário
 - Escoamento transiente



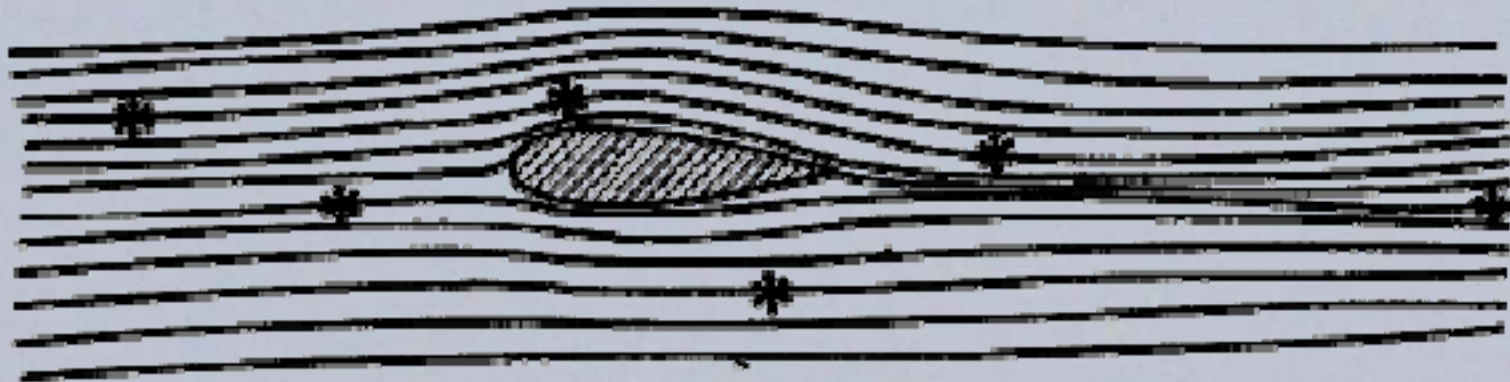
Aerodinâmica

- Conceitos
 - Escoamento estacionário
 - Escoamento transiente



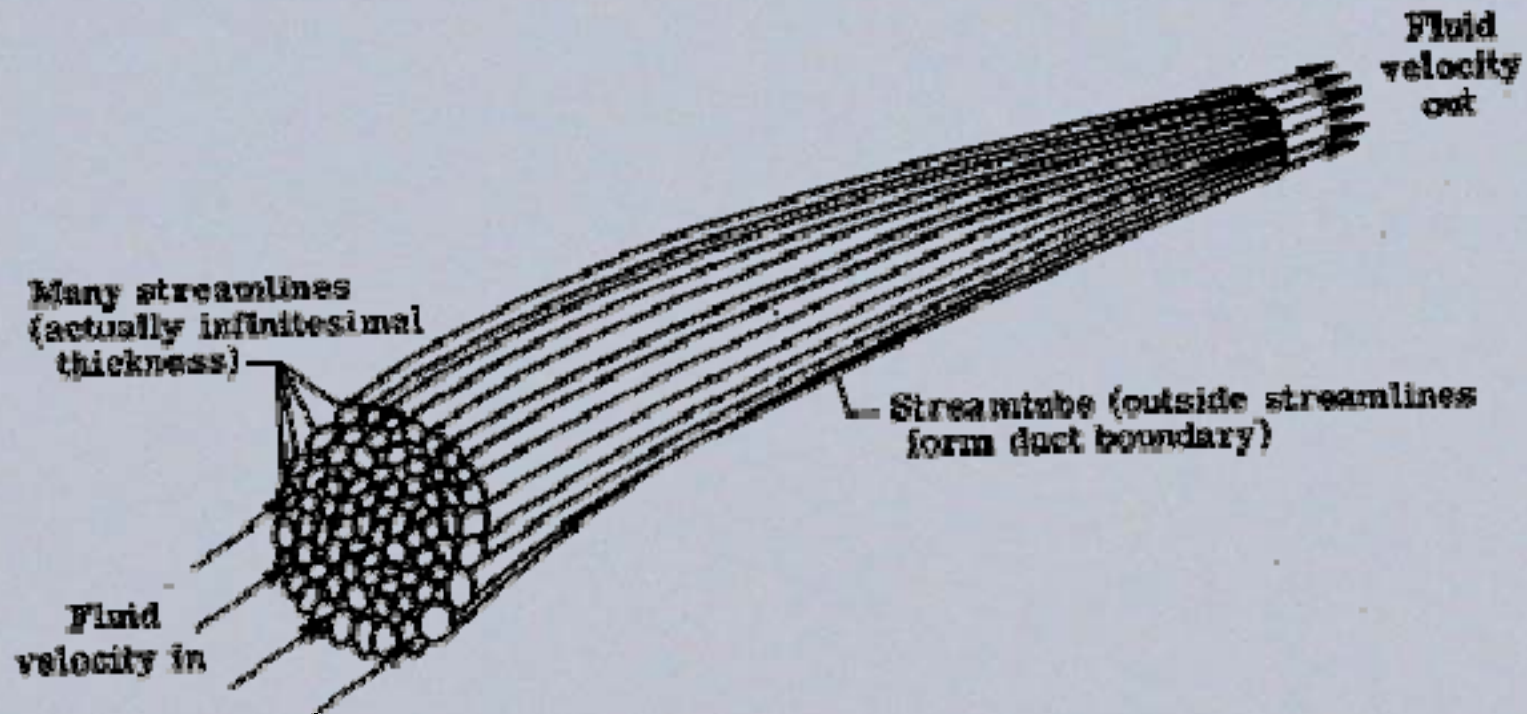
Aerodinâmica

- Conceitos
 - Escoamento rotacional
 - Escoamento irrotacional



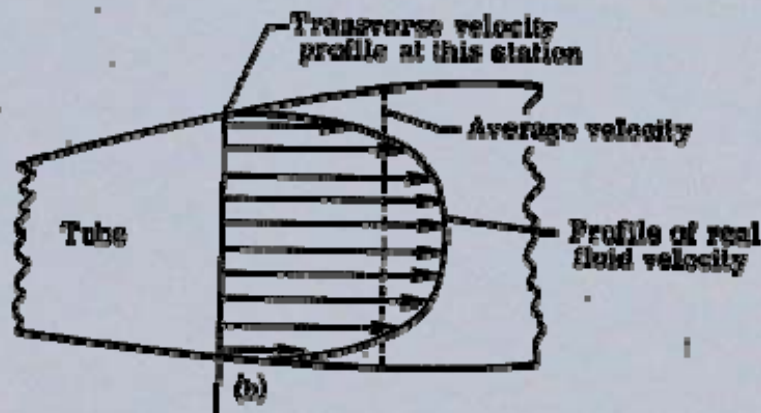
Aerodinâmica

- Conceitos
 - Escoamento uni-dimensional – linha de corrente

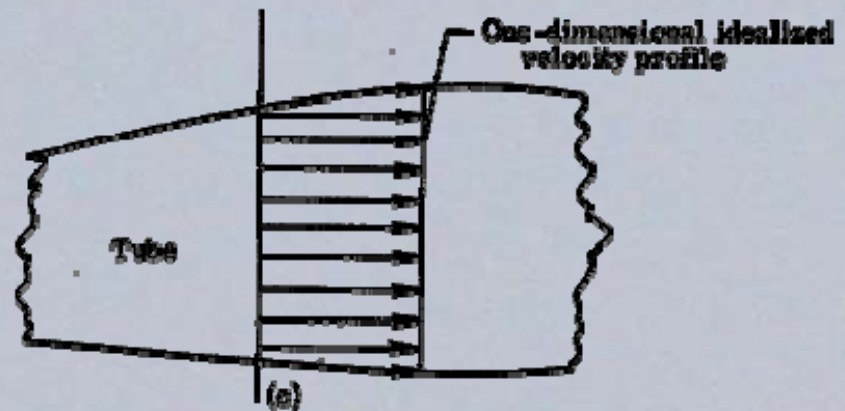


Aerodinâmica

- Conceitos
 - Escoamento uni-dimensional – linha de corrente



(b) perfil real da velocidade do escoamento.

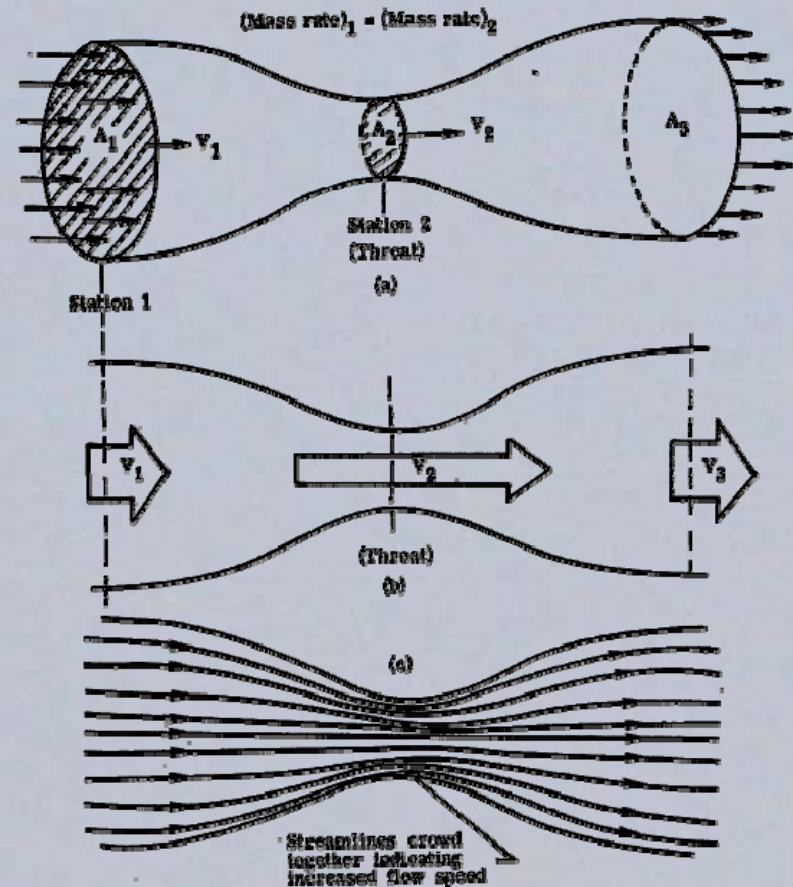


(c) perfil unidimensional de escoamento.

Aerodinâmica

- Fluido Ideal
 - Equação da continuidade

$$\begin{aligned}(\text{fluxo mássico})_1 &= (\text{fluxo mássico})_2 \\ \rho_1 V_1 A_1 &= \rho_2 V_2 A_2\end{aligned}$$



Aerodinâmica

- Fluido Ideal
 - Teorema de Bernoulli – Conservação de Energia
 - Energia cinética – devido a velocidade
 - Energia potencial – devido a posição da linha de corrente em relação a um referencial.
 - Energia de pressão – devido a natureza física dos gases
 - Soma das energias de um fluido se mantém constante ao longo de uma linha de corrente.

energia cinética + energia potencial + energia de pressão = constante

energia cinética + energia de pressão = constante - energia potencial

energia cinética + energia de pressão = constante

Aerodinâmica

- Fluido Ideal
 - Teorema de Bernoulli – Conservação de Energia
 - considerando energia por unidade de volume

$$\text{Energia} = \text{Força} \times \text{Distância}$$

$$E = F \cdot L$$

$$E = \frac{F}{L^2} \cdot L^3$$

$$\frac{E}{L^3} = \frac{F}{L^2} = \text{Pressão}$$

- energia cinética – pressão dinâmica
- energia pressão – pressão estática

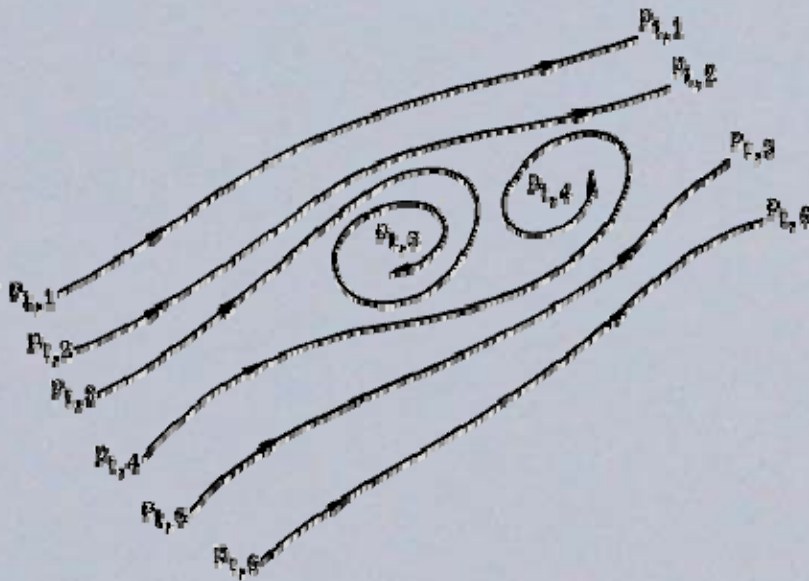
$$\frac{1}{2} \rho V^2 = q$$

$$p_{\text{estática}} = p$$

Aerodinâmica

- Fluido Ideal
 - Teorema de Bernoulli – Conservação de Energia

$$\frac{1}{2}\rho V^2 + p = p_{total}$$



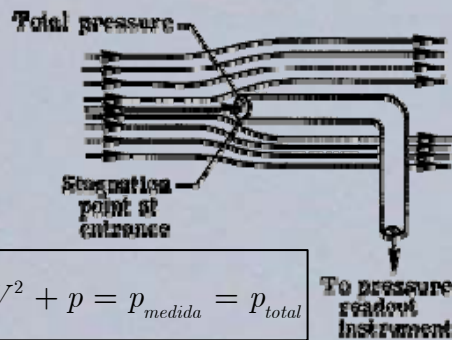
Rotacional



Irrotacional

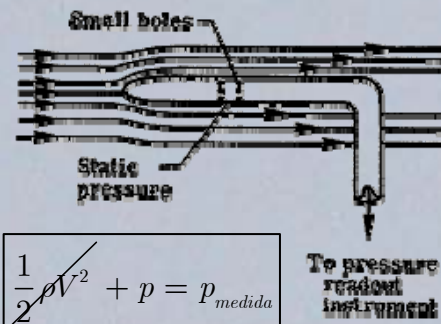
Aerodinâmica

- Fluido Ideal
 - Medida de Pressão – Tubo de Pitot



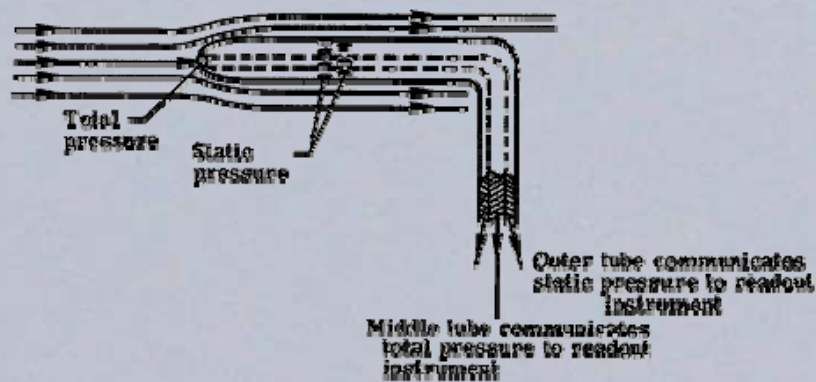
$$\frac{1}{2}\rho V^2 + p = p_{medida} = p_{total}$$

(a) tubo de pitot.



$$\frac{1}{2}\rho V^2 + p = p_{medida}$$

(b) tubo estático.

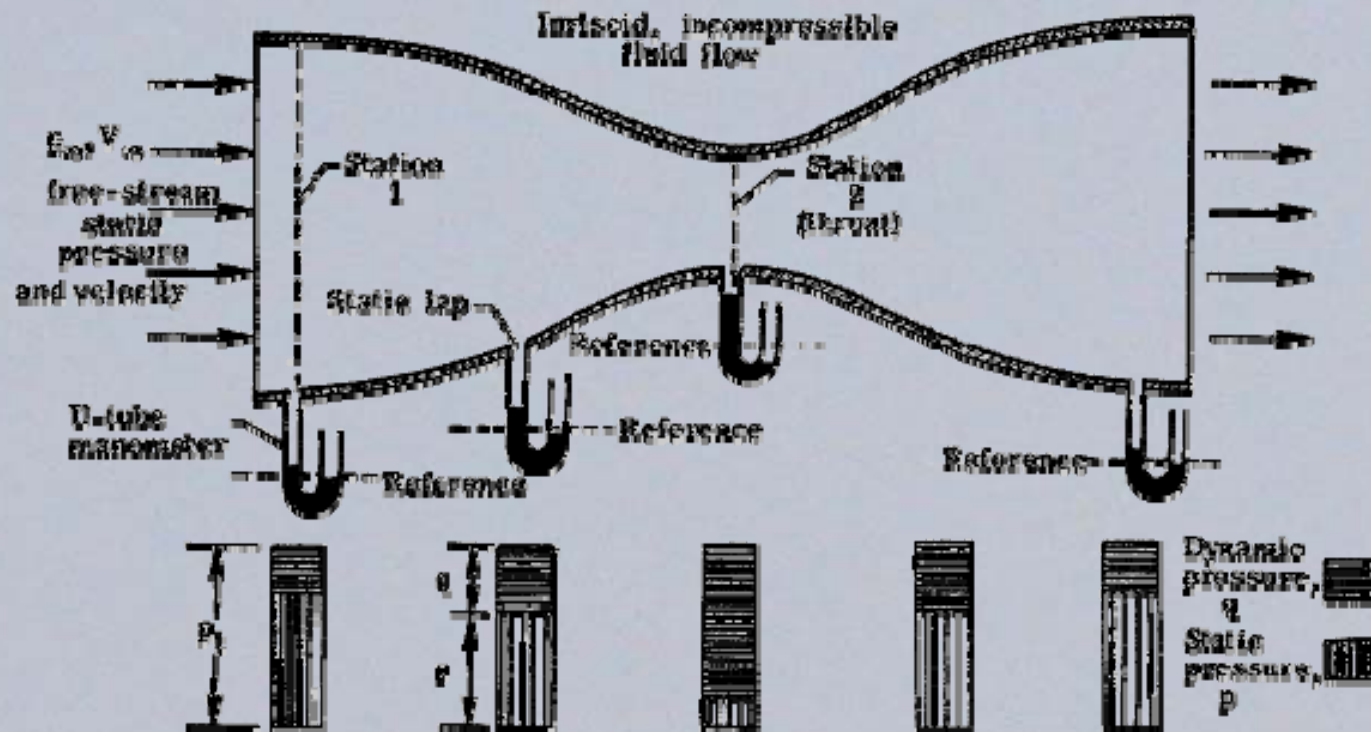


(c) tubo pitot-estático.

$$V = \sqrt{\frac{2(p_{total} - p)}{\rho}}$$

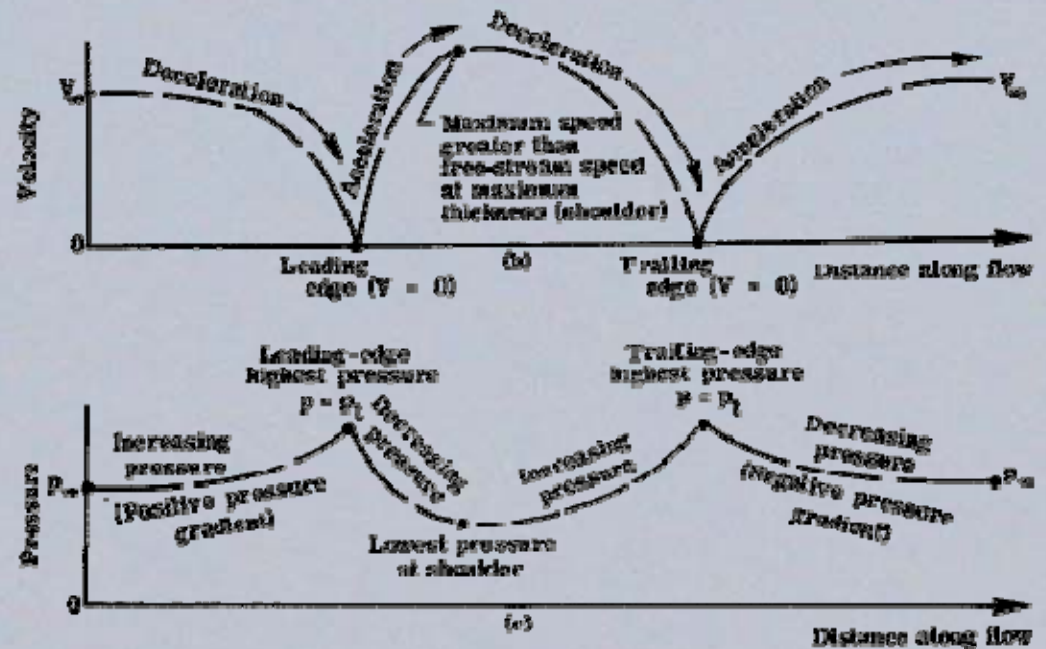
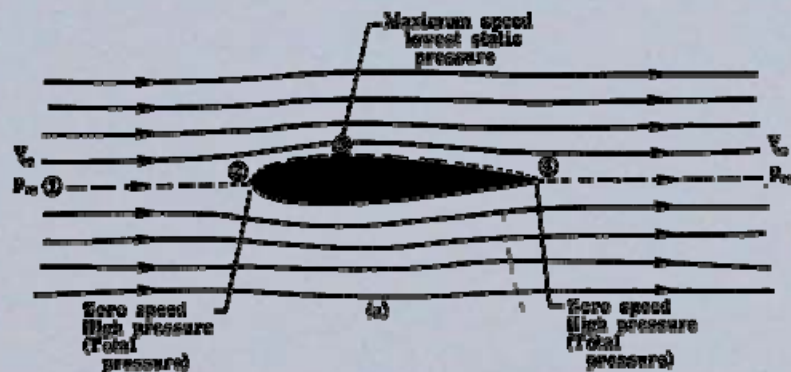
Aerodinâmica

- Fluido Ideal
 - Medida de Pressão – Tubo de Pitot



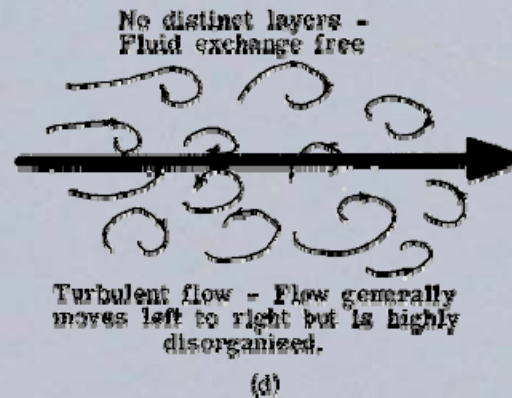
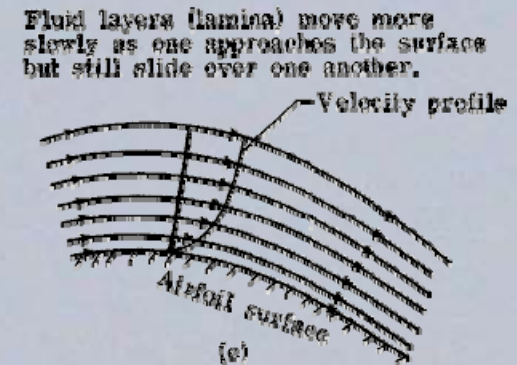
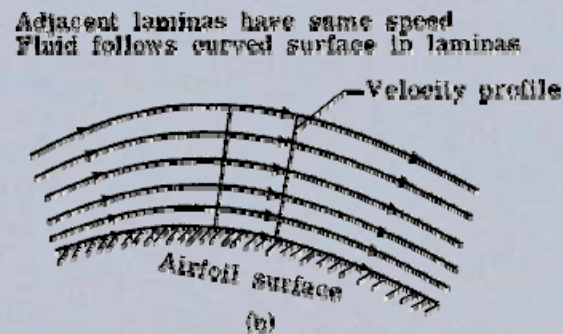
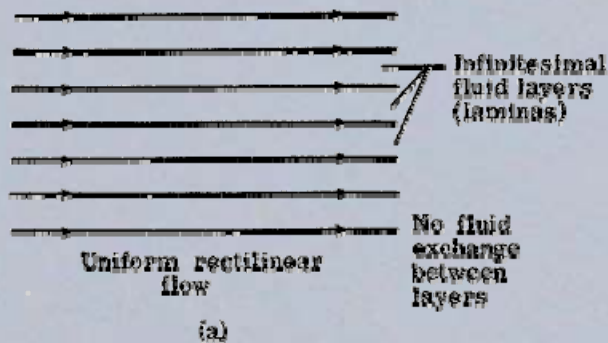
Aerodinâmica

- Fluido Ideal
 - Perfil em escoamento ideal



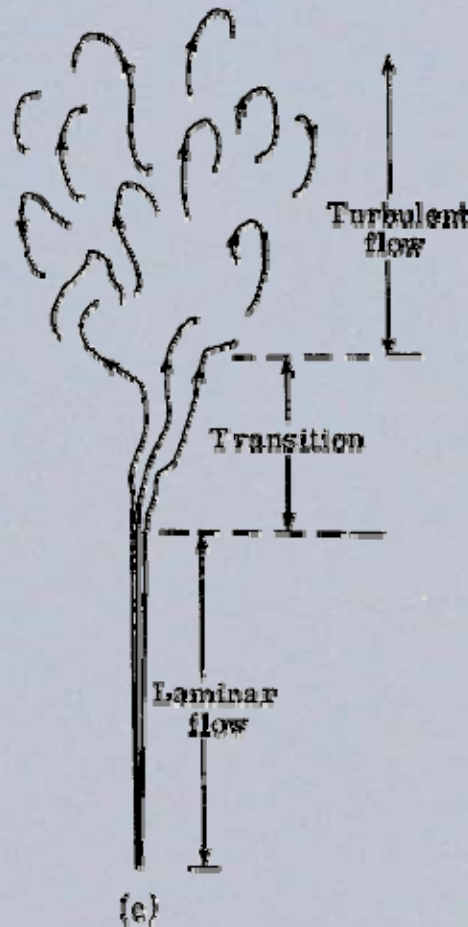
Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Escoamento turbulento
 - Escoamento laminar



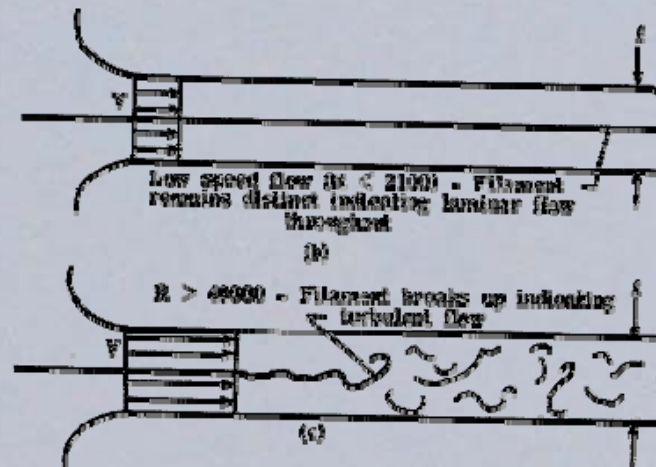
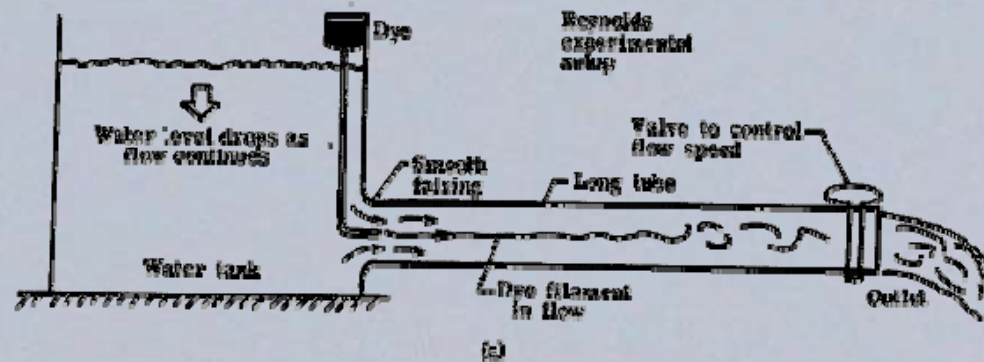
Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Escoamento turbulento
 - Escoamento laminar



Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Número de Reynolds

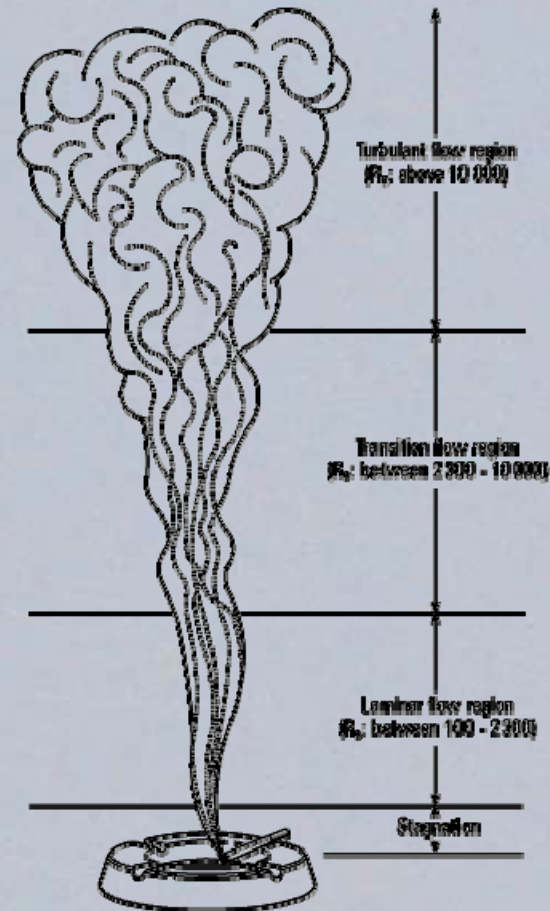


Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Número de Reynolds

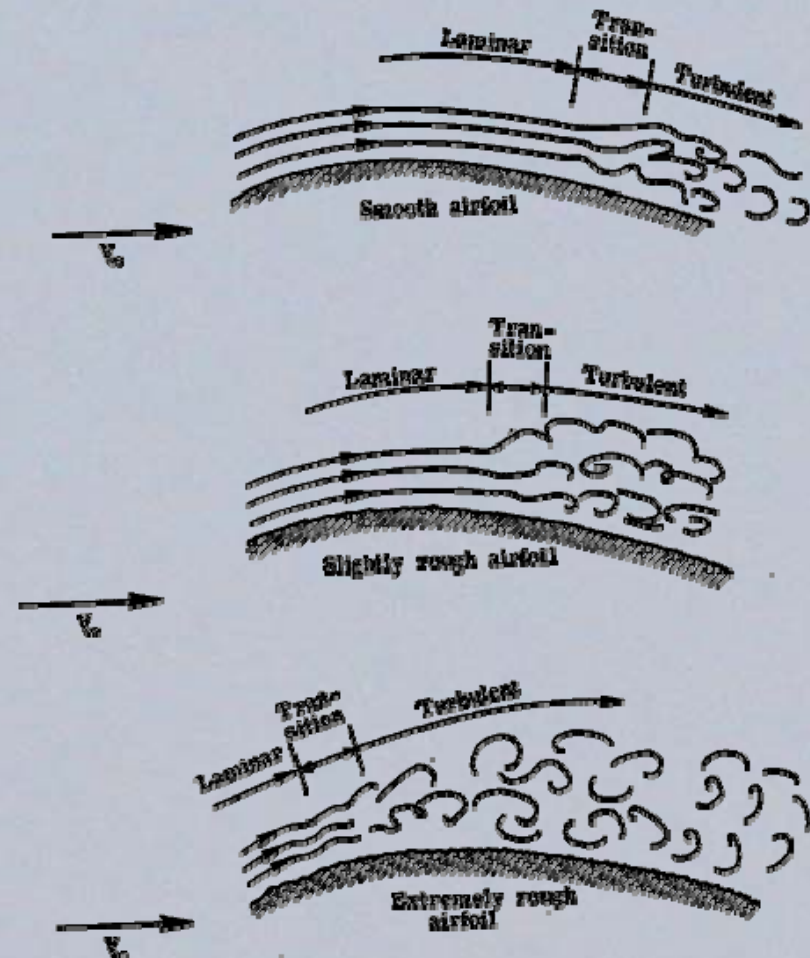
$$\text{Re} = \frac{\rho V l}{\mu}$$

- Relação entre forças de inércia e forças viscosas.



Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Transição
 - Efeito da rugosidade
 - Efeito do gradiente de pressão



Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Transição



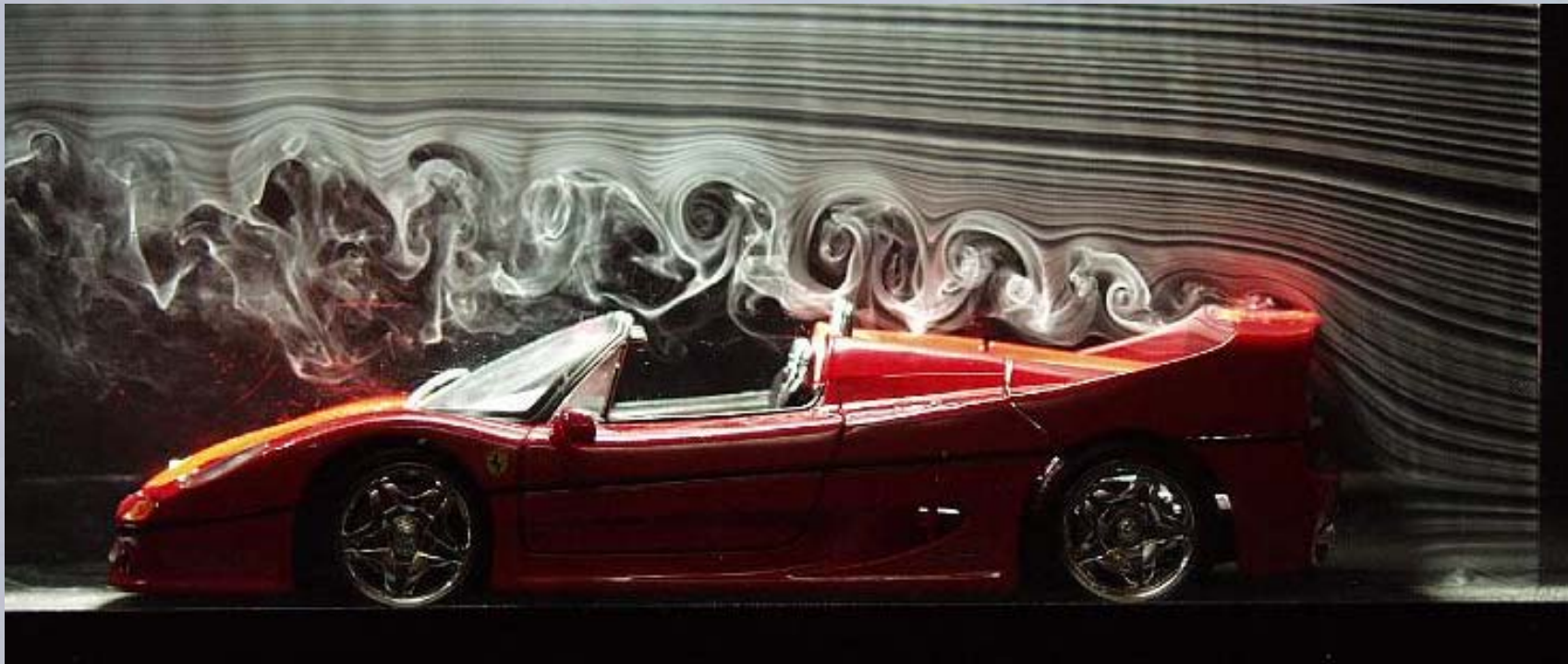
Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Transição



Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Transição

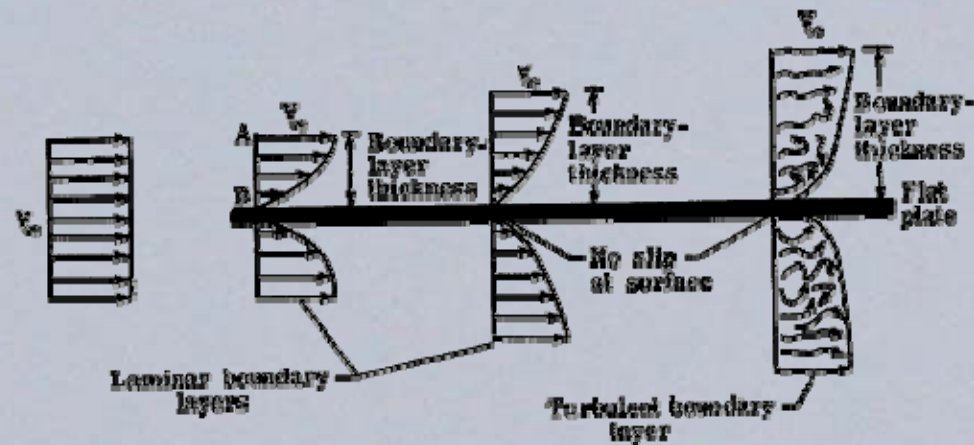


Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Camada limite

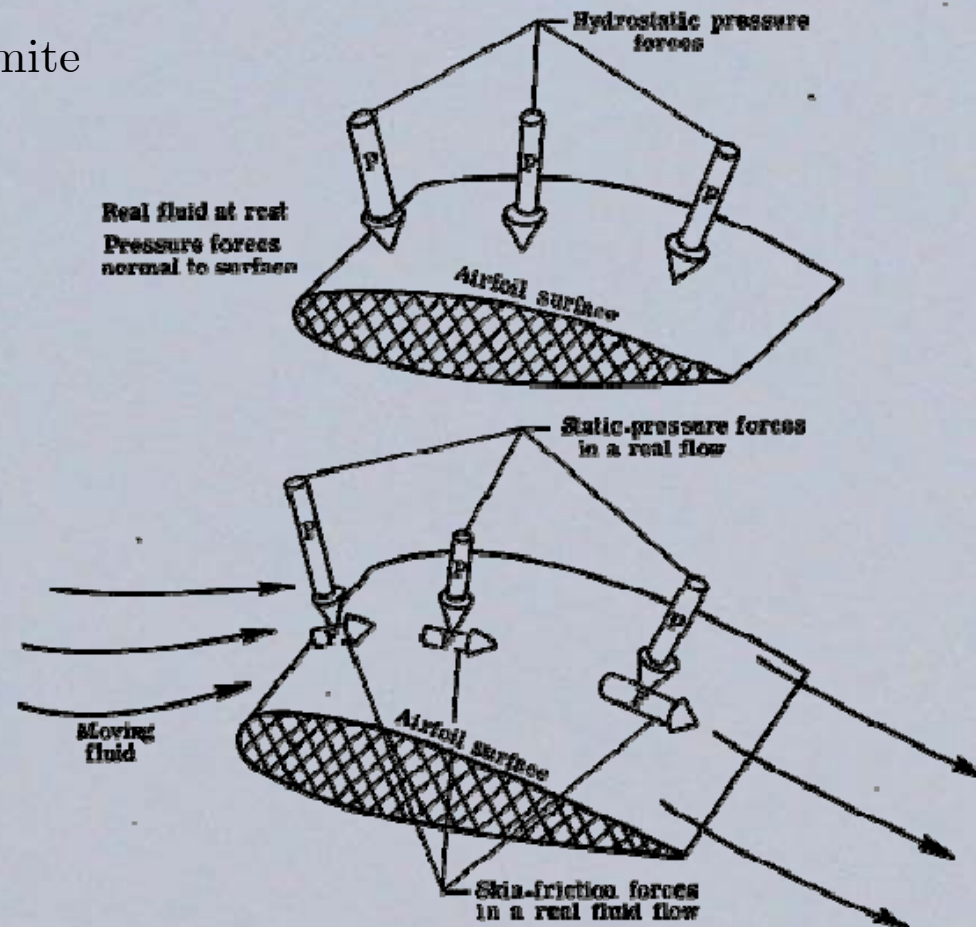


(a) escoamento não-viscoso ao longo de uma placa plana.



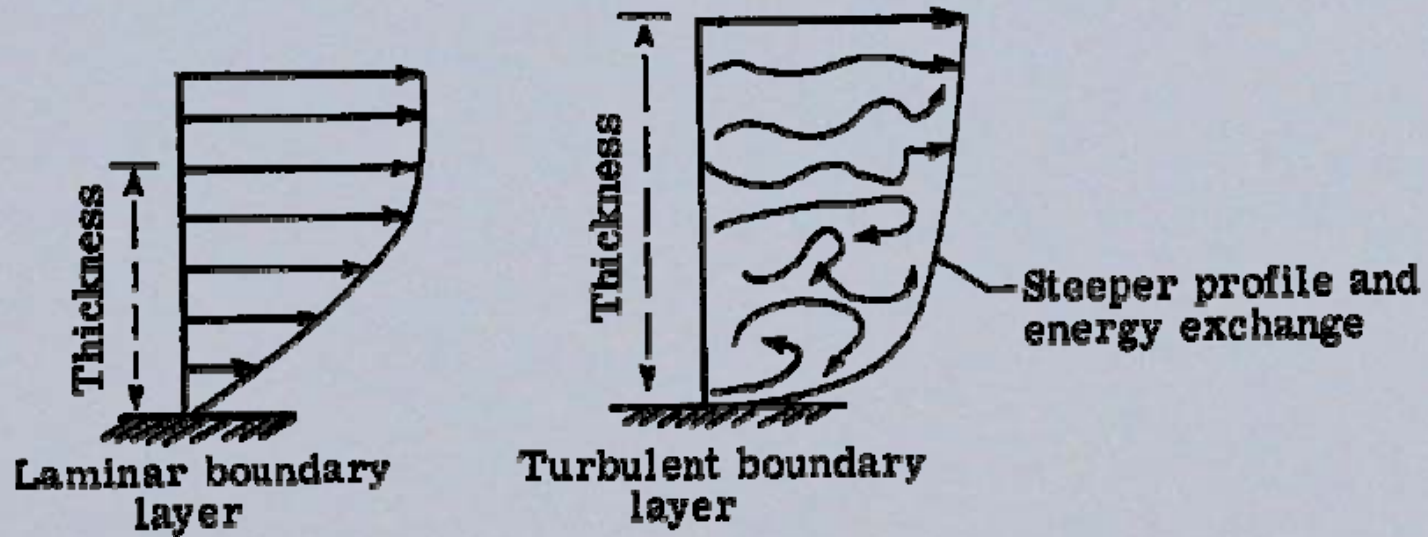
Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Camada limite



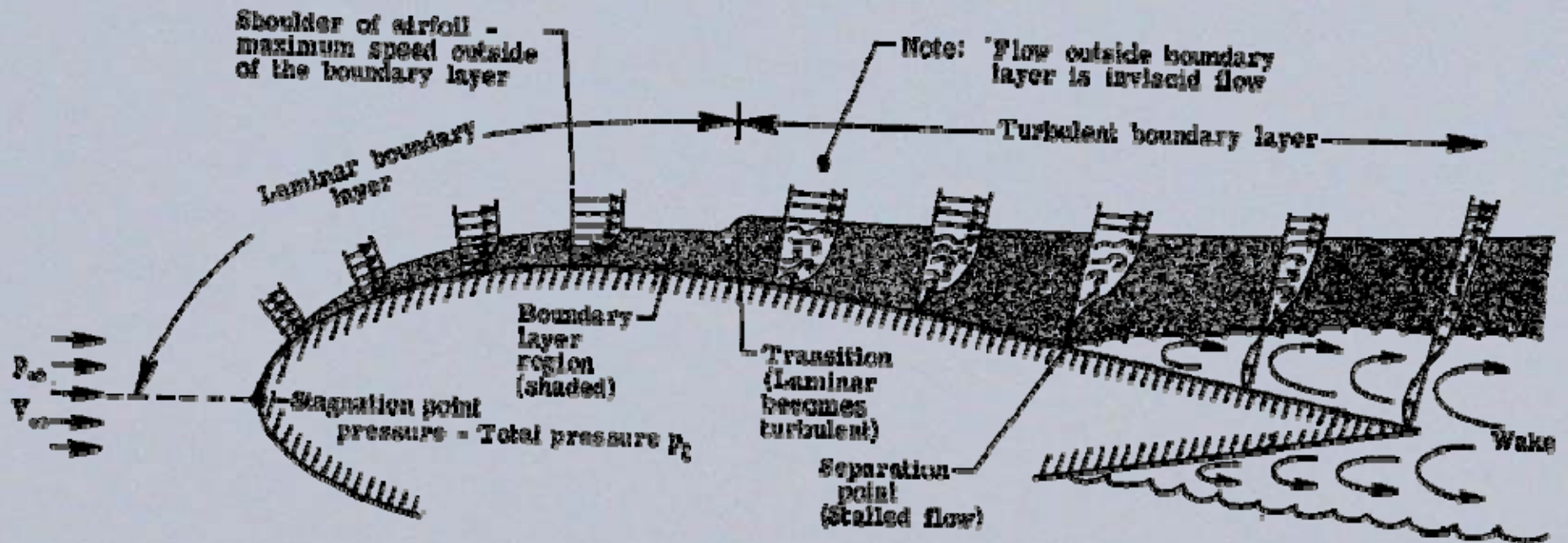
Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Camada limite



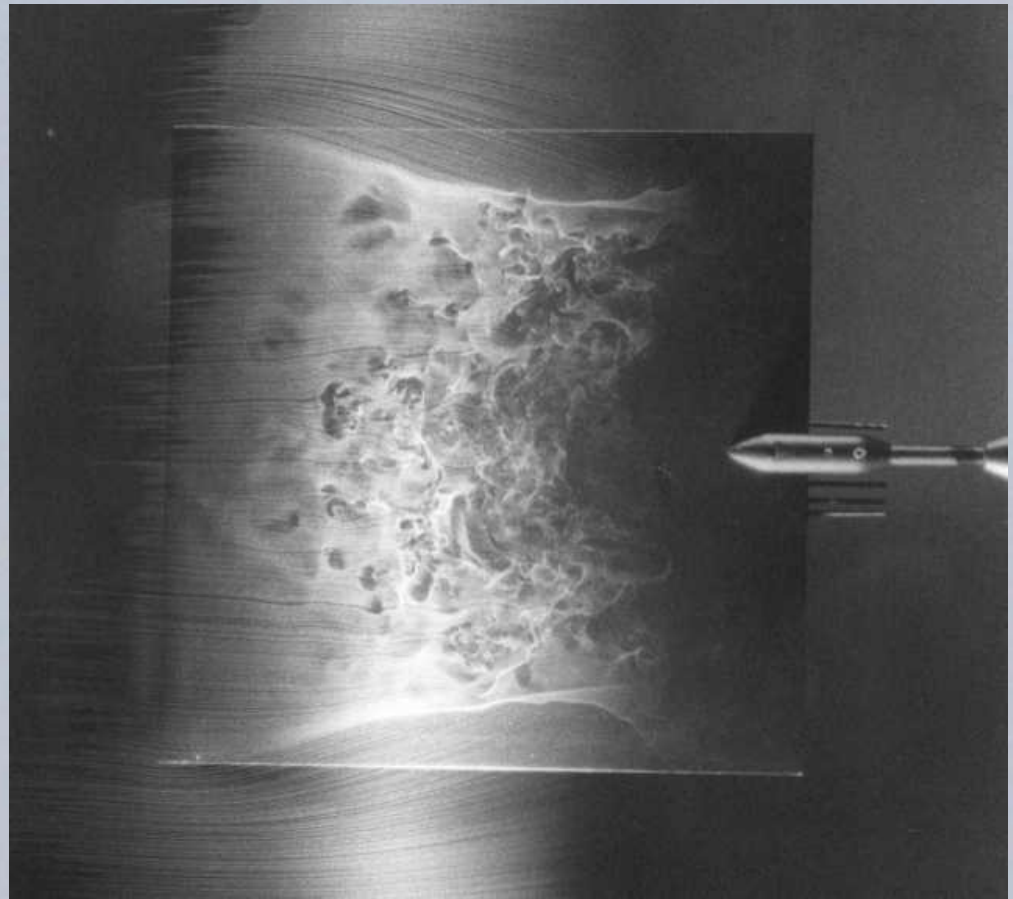
Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Escoamento em perfis



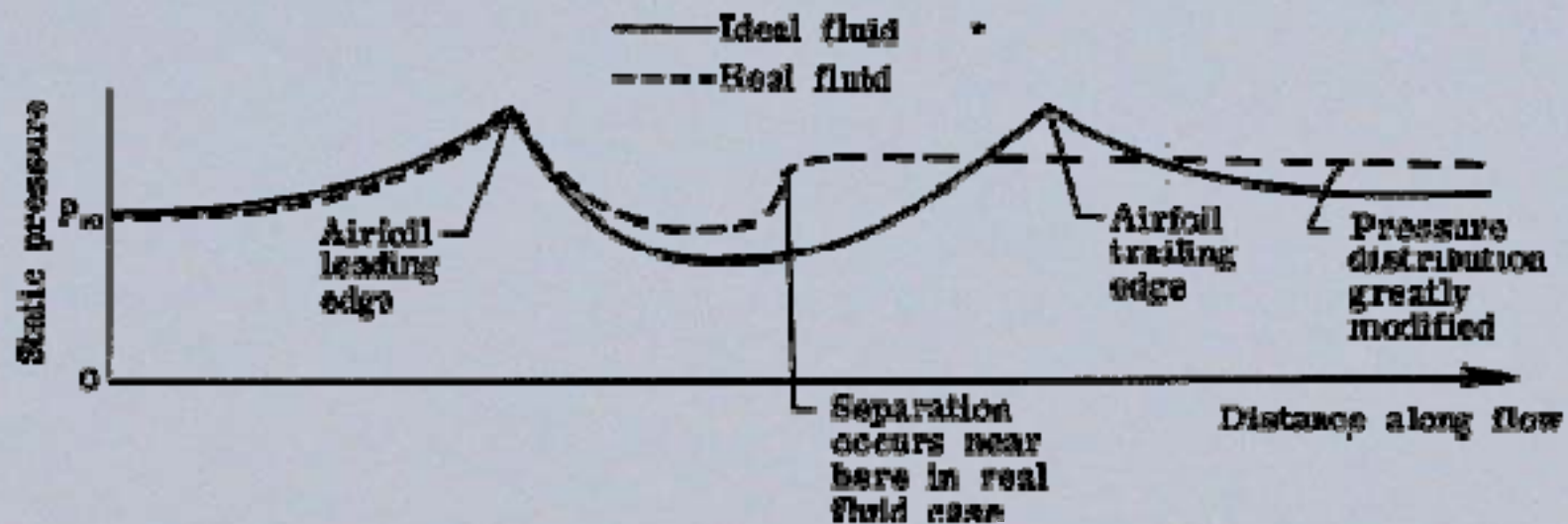
Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Escoamento em perfis



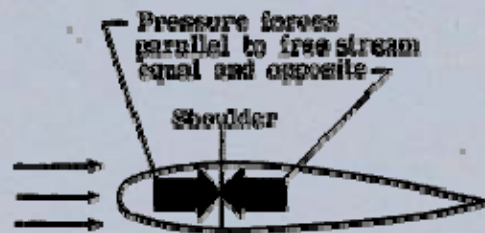
Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Escoamento em perfis

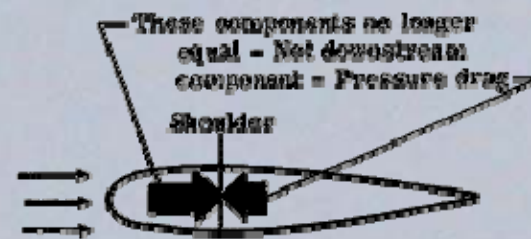


Aerodinâmica

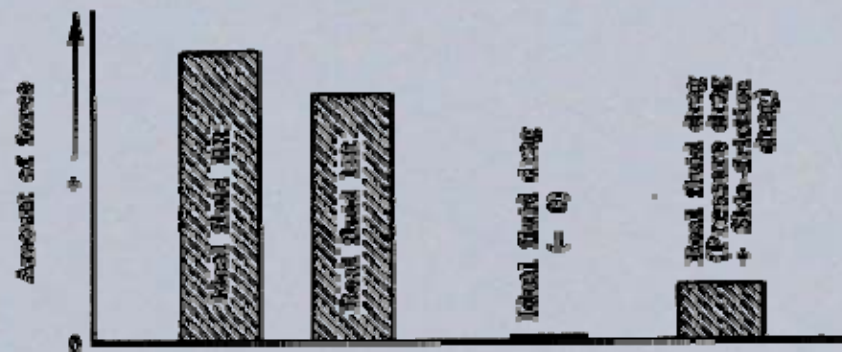
- Fluido Real
 - Escoamento em perfis



(b) perfil sujeito a escoamento de fluido ideal (sem "pressure drag")



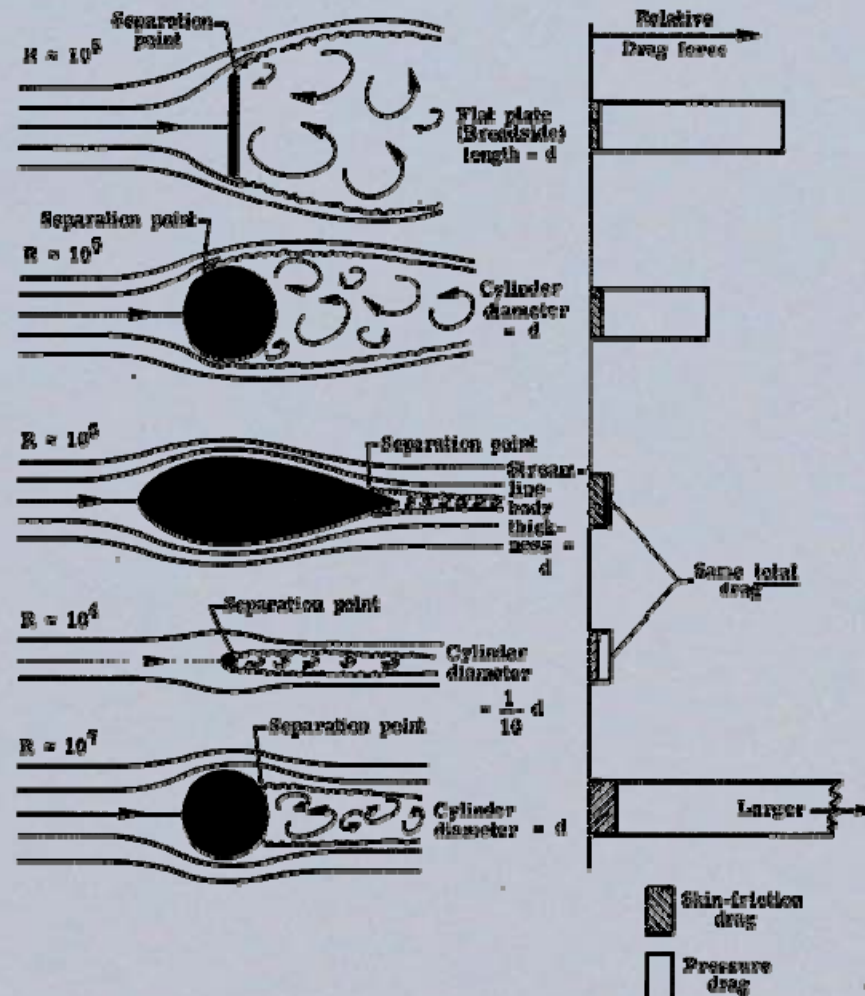
(c) perfil sujeito a escoamento de fluido real (valor líquido de "pressure drag")



(d) efeitos da viscosidade no perfil.

Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Efeito da forma



Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Coeficientes Aerodinâmicos
 - Velocidade
 - Densidade
 - Área

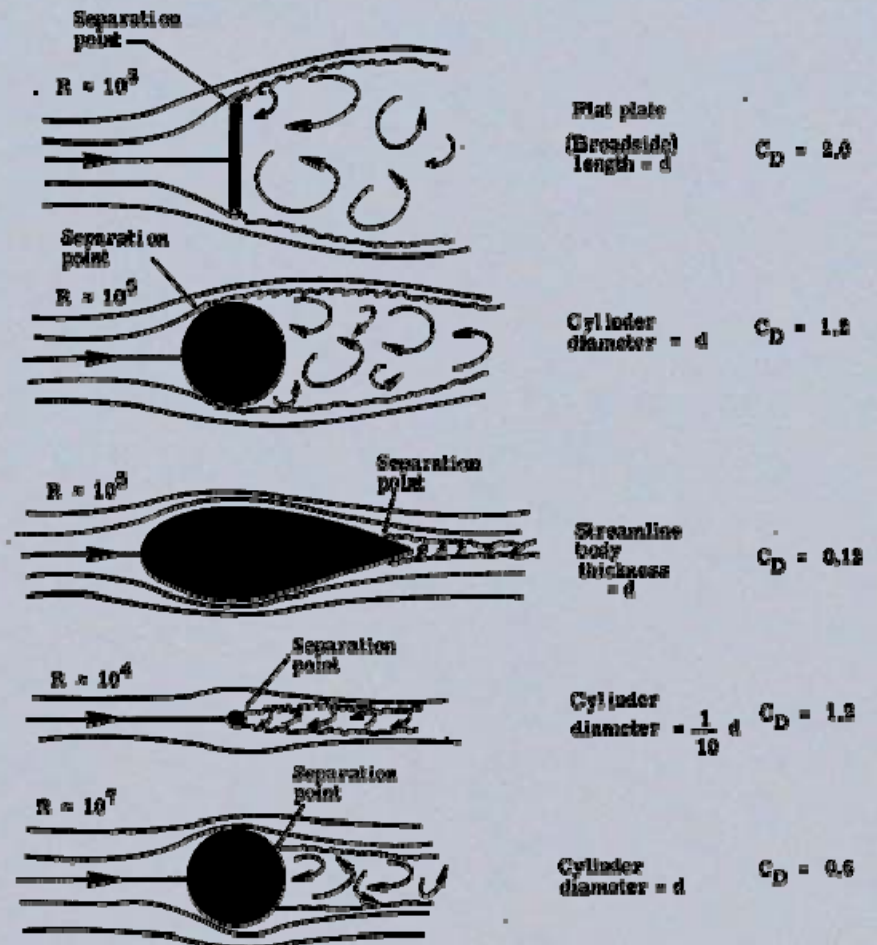
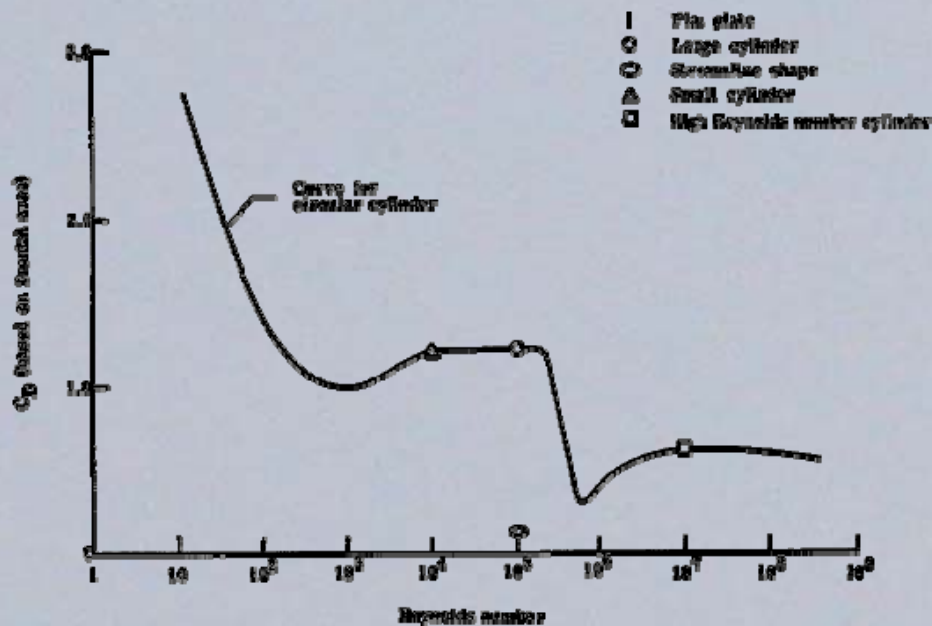
$$F \propto (V, \rho, S)$$

$$F \propto \rho V^2 S$$

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 S \cdot C_F$$

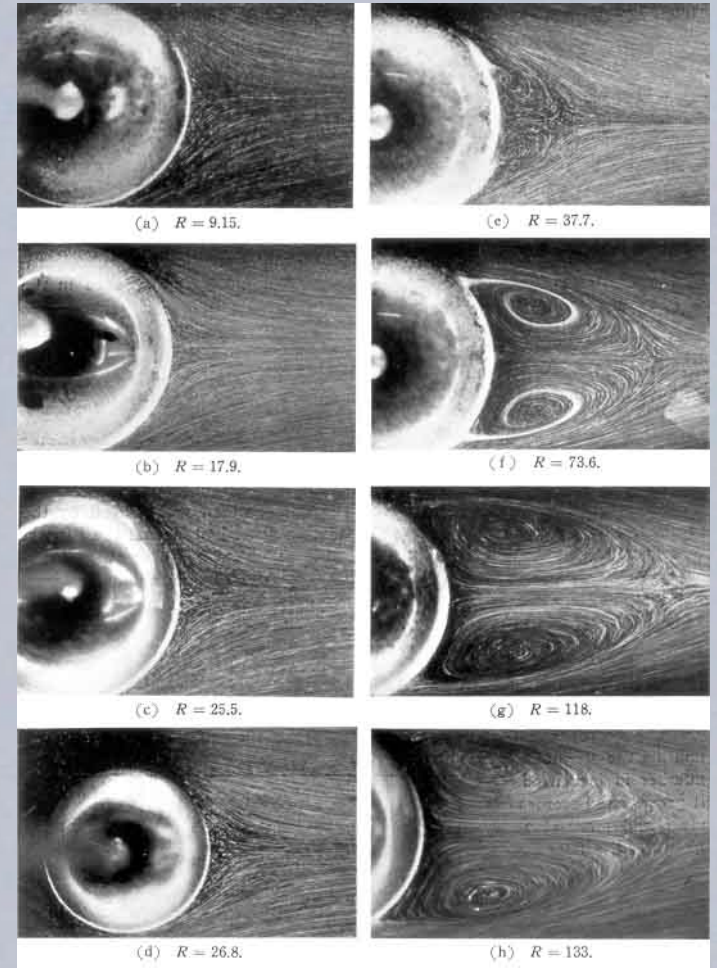
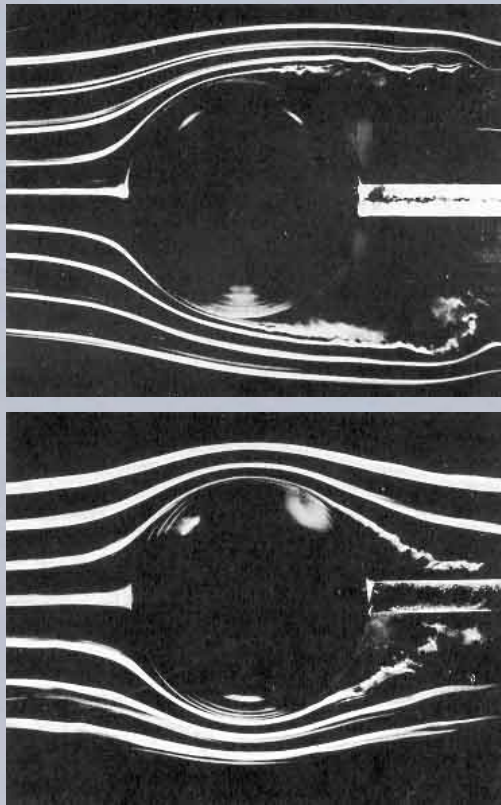
Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Coeficientes Aerodinâmicos



Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Coeficientes Aerodinâmicos



Aerodinâmica

- Fluido Real
 - Coeficientes Aerodinâmicos

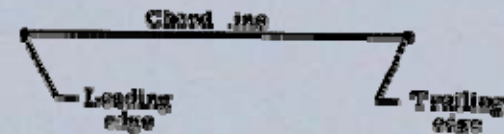


Aerodinâmica

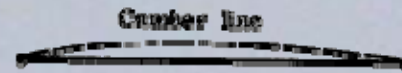
- Perfis Aerodinâmicos

- Corda
- Bordo de Ataque
- Bordo do Fuga
- Intra dorso
- Extra dorso
- Camber
- Espessura

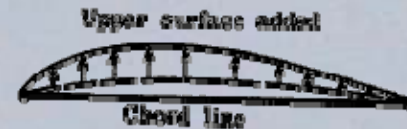
1. Set up leading edge and trailing edge and construct chord line between them.



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.



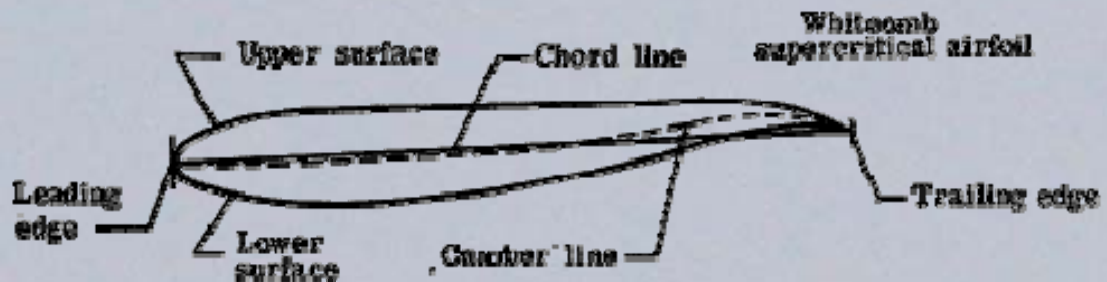
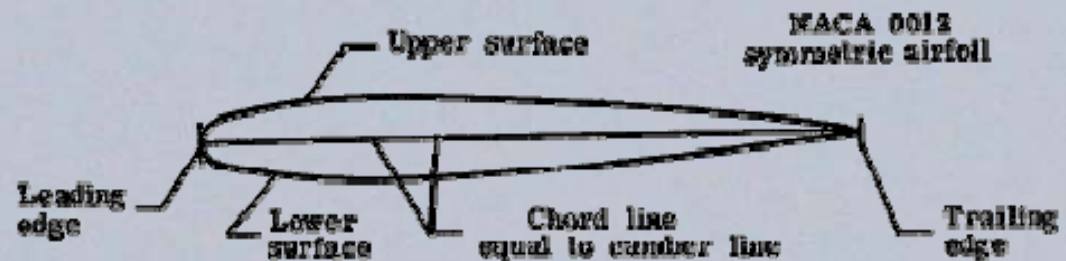
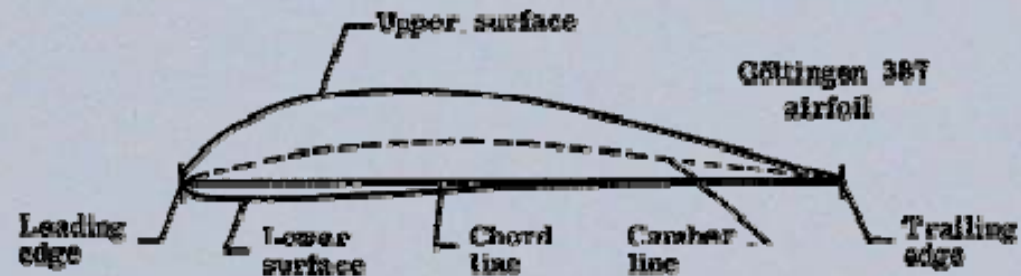
4. Final airfoil shape.



Aerodinâmica

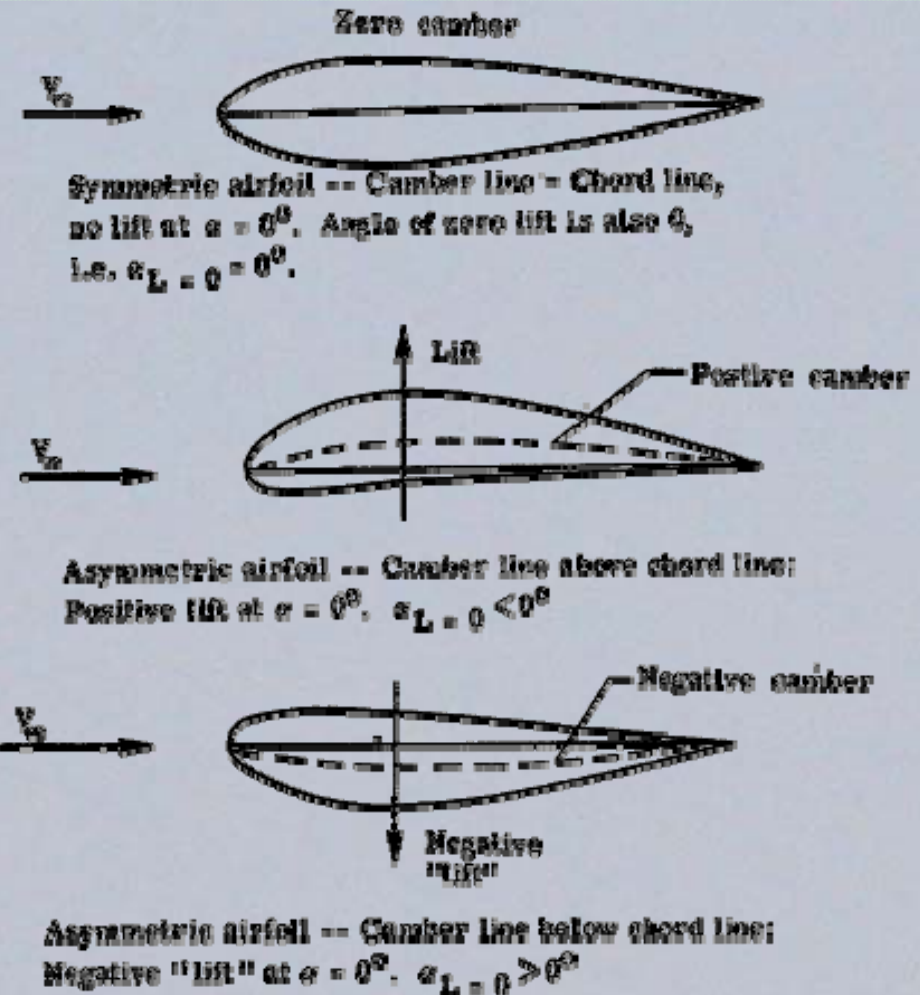
- Perfis Aerodinâmicos

- Corda
- Bordo de Ataque
- Bordo do Fuga
- Intra dorso
- Extra dorso
- Camber
- Espessura



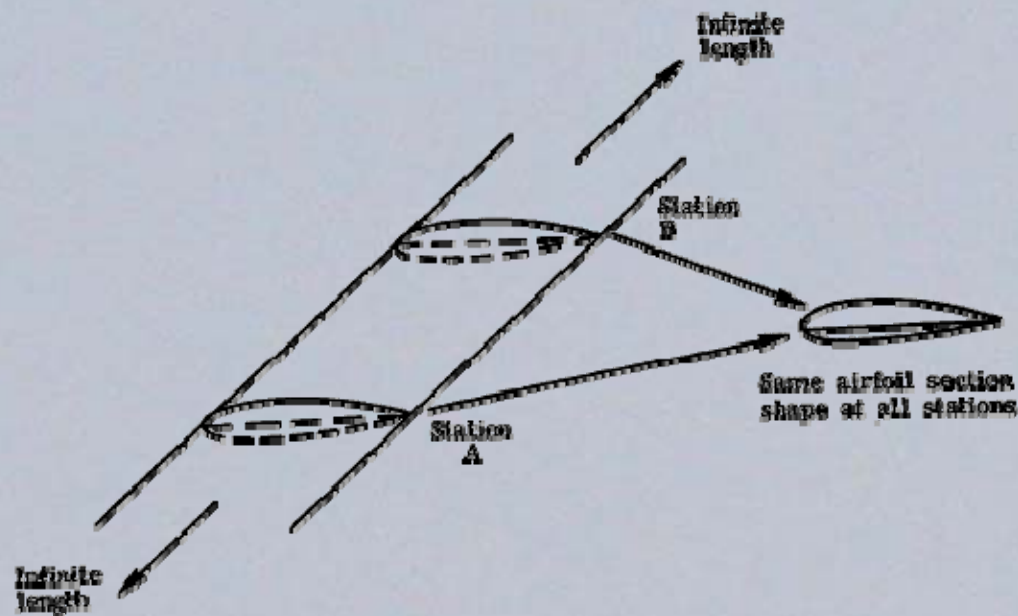
Aerodinâmica

- Perfis Aerodinâmicos
 - Linha de sustentação nula



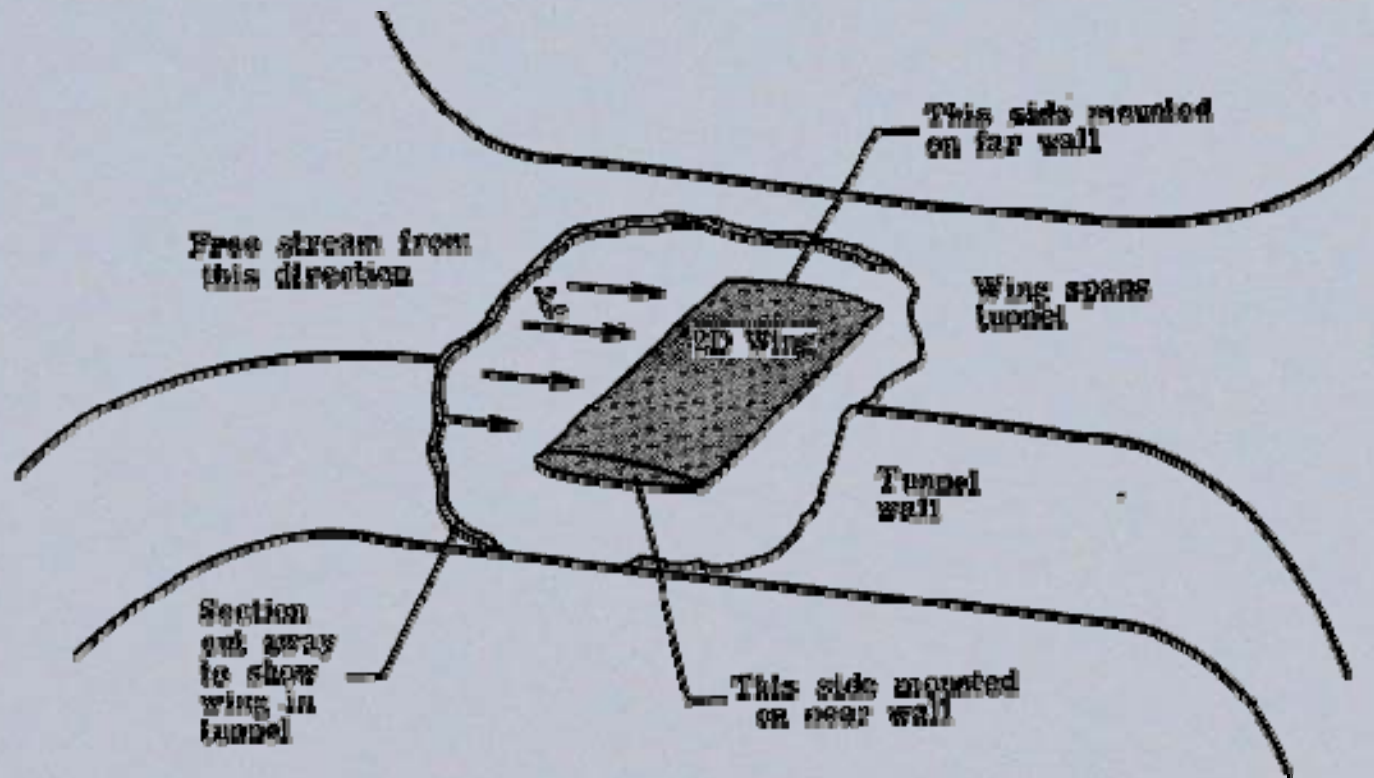
Aerodinâmica

- Perfis Aerodinâmicos
 - Asa – bidimensional – envergadura infinita



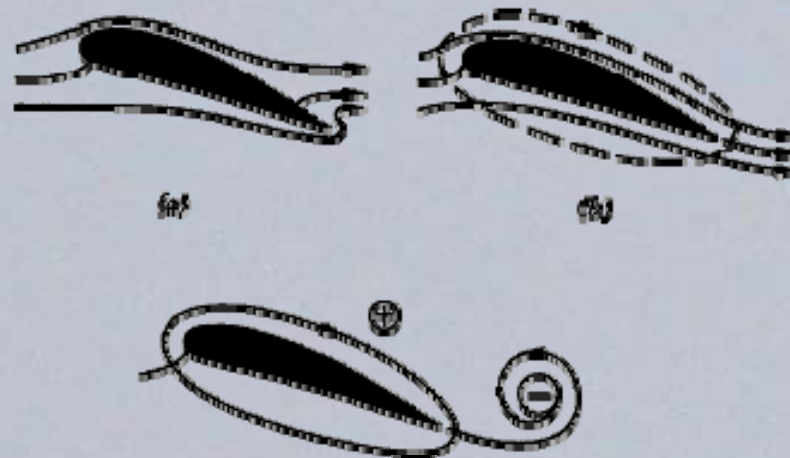
Aerodinâmica

- Perfis Aerodinâmicos
 - Asa – bidimensional – envergadura infinita



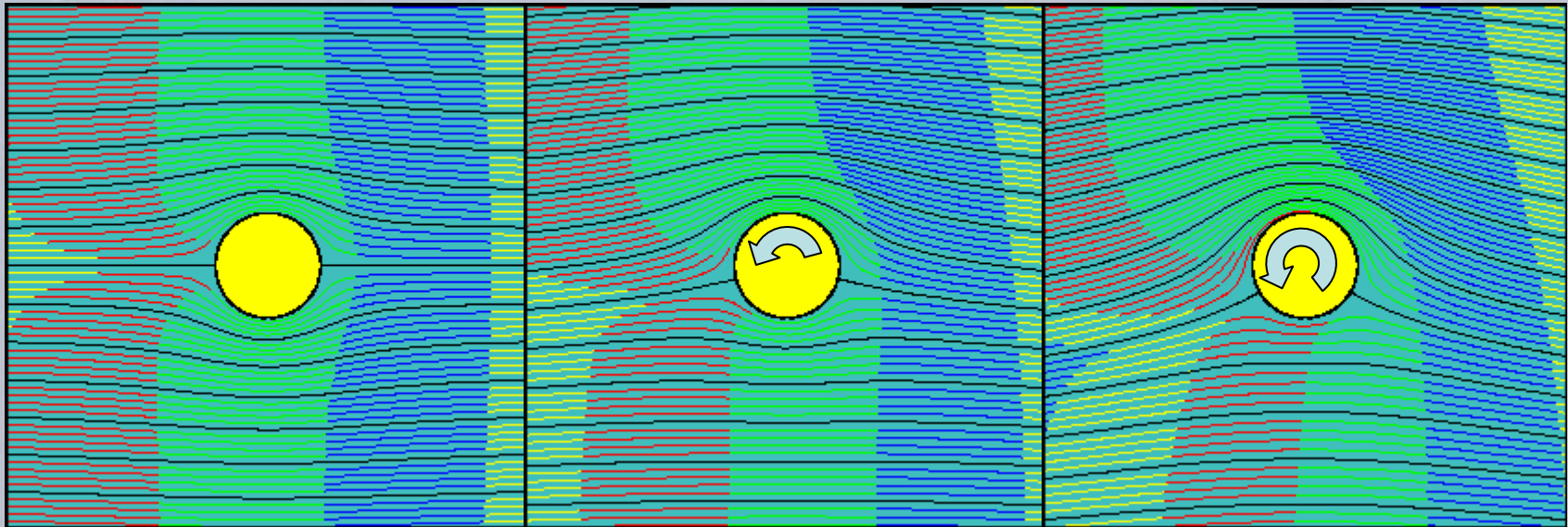
Aerodinâmica

- Perfis Aerodinâmicos
 - Modelo para geração de sustentação – circulação
 - Diferença de pressão (Bernoulli) – justificativa fraca
 - Mudança na direção da quantidade de movimento (Newton).
 - Teorema de Kutta-Joukowski – Kutta e Kelvin



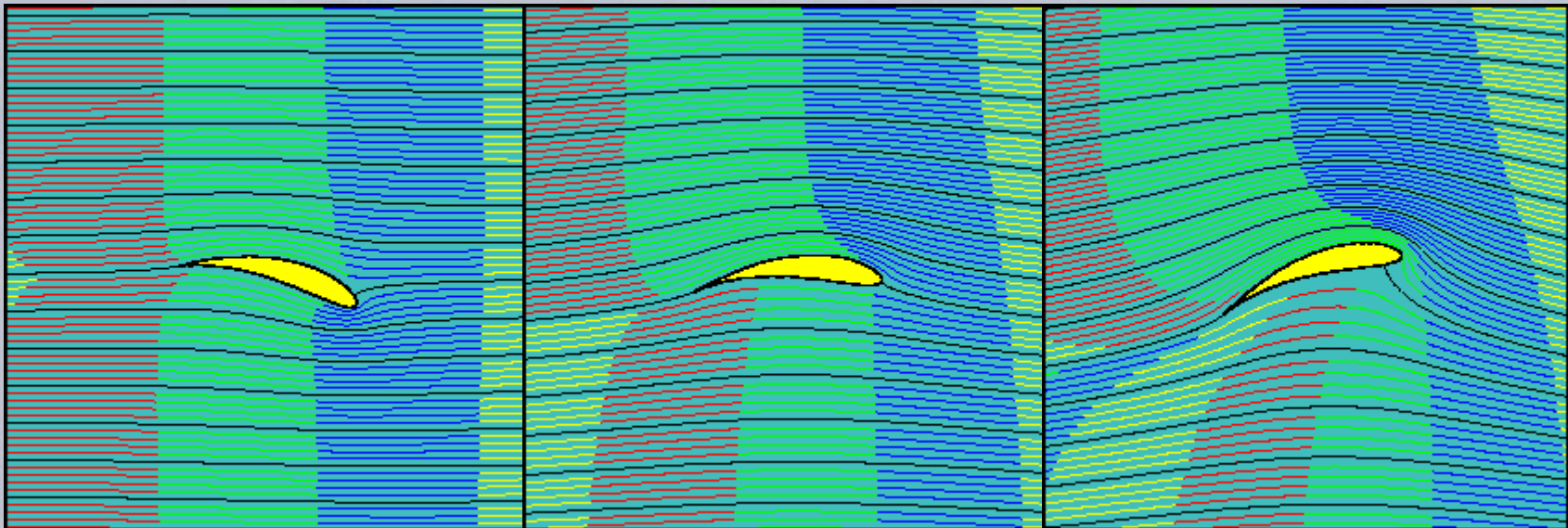
Aerodinâmica

- Perfis Aerodinâmicos
 - Geração de Sustentação



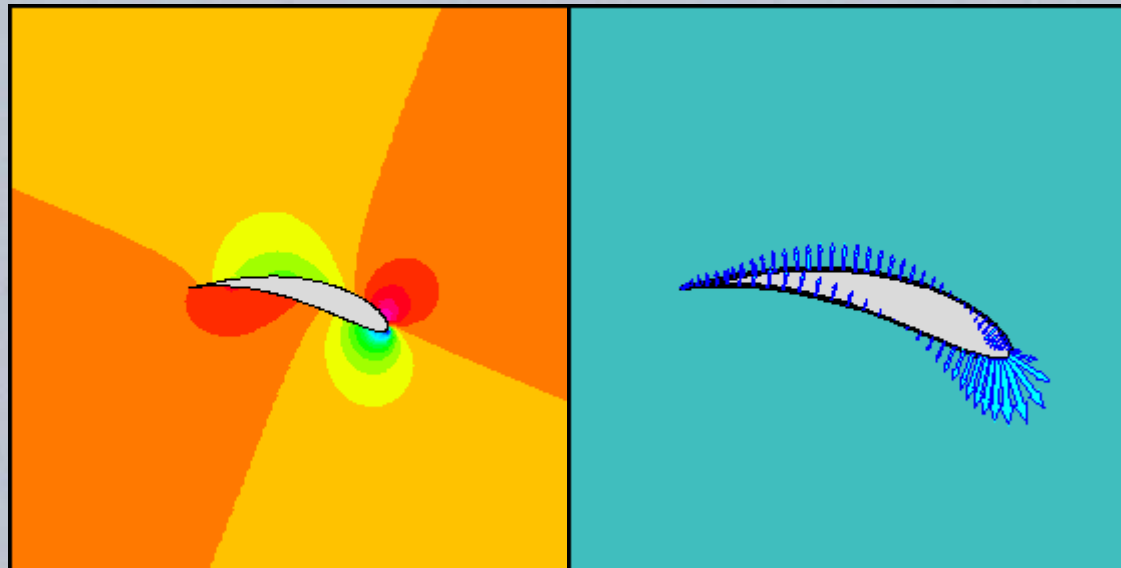
Aerodinâmica

- Perfis Aerodinâmicos
 - Geração de Sustentação



Aerodinâmica

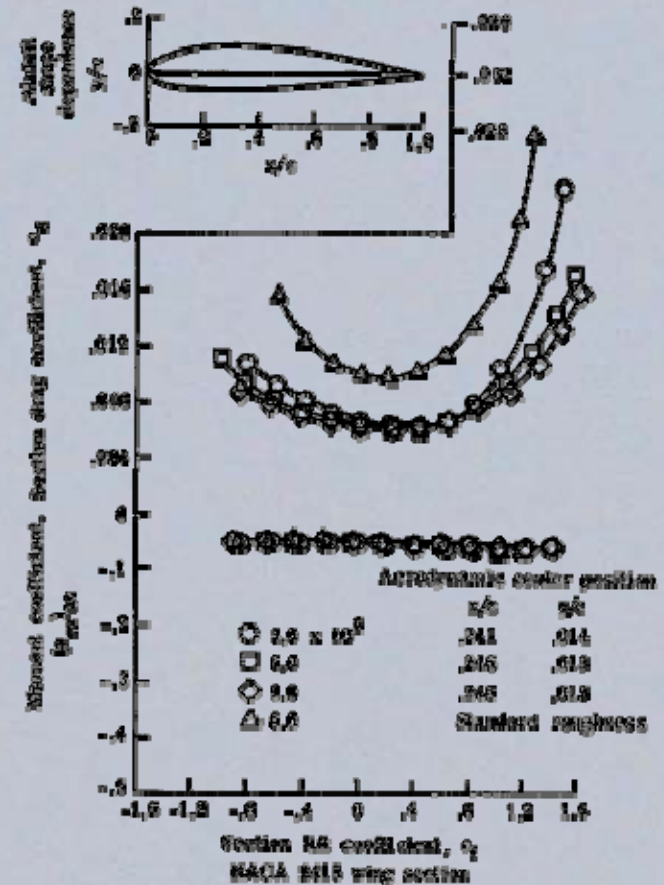
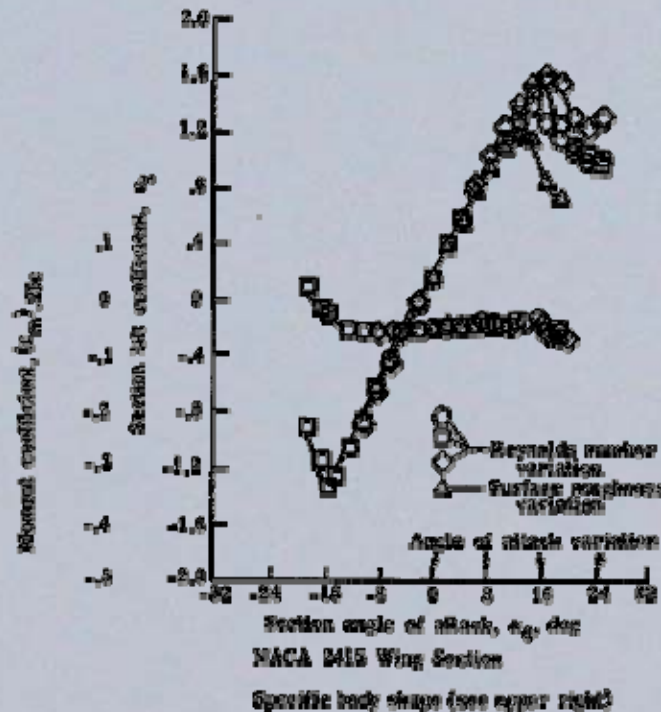
- Perfis Aerodinâmicos
 - Geração de Sustentação



Aerodinâmica

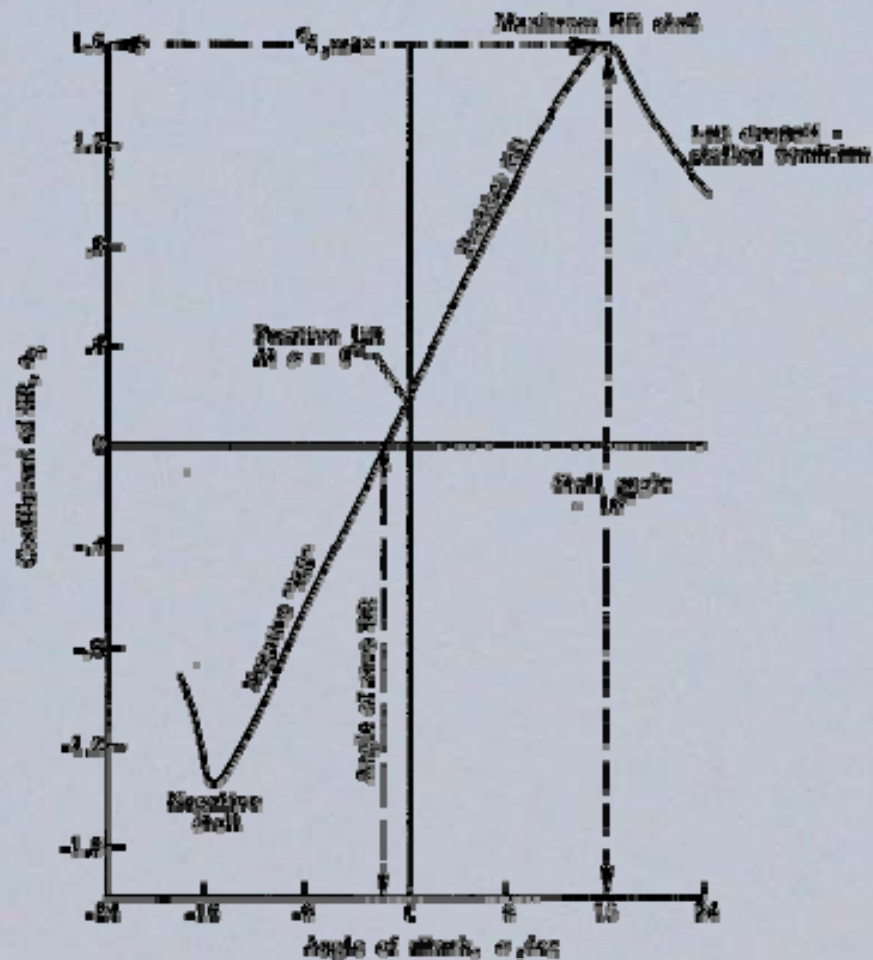
- Perfis Aerodinâmicos
 - Coeficientes e ensaios

This indicates the dependence of c_L , c_D , and c_m on airfoil shape, angle of attack, Reynolds number, and surface roughness. Air turbulence is included in the Reynolds number and roughness dependency. Mach number effects not included.



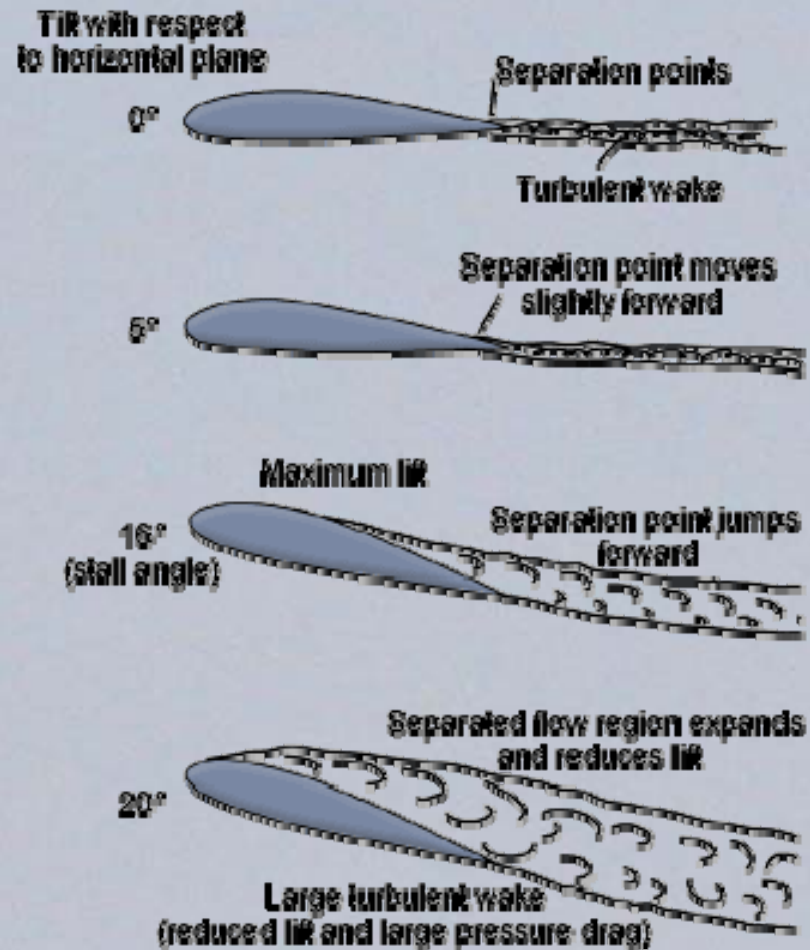
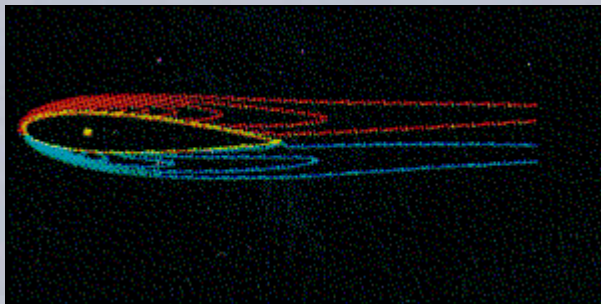
Aerodinâmica

- Perfis Aerodinâmicos
 - Coeficientes e ensaios



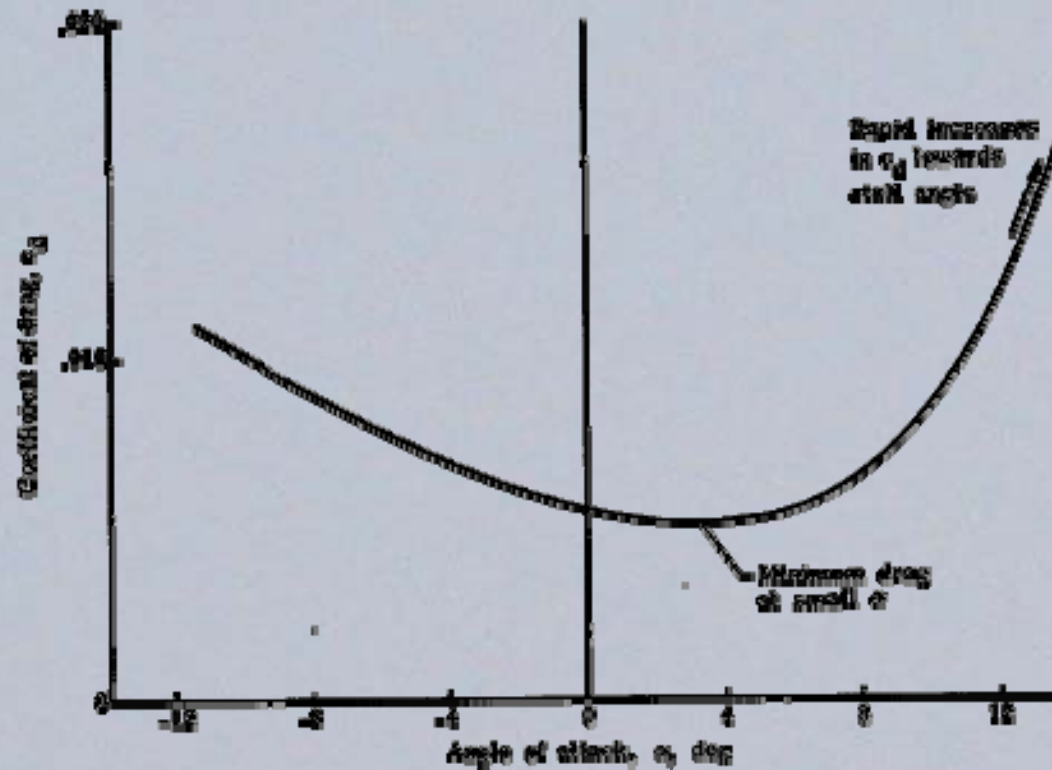
Aerodinâmica

- Perfis Aerodinâmicos
 - Coeficientes e ensaios



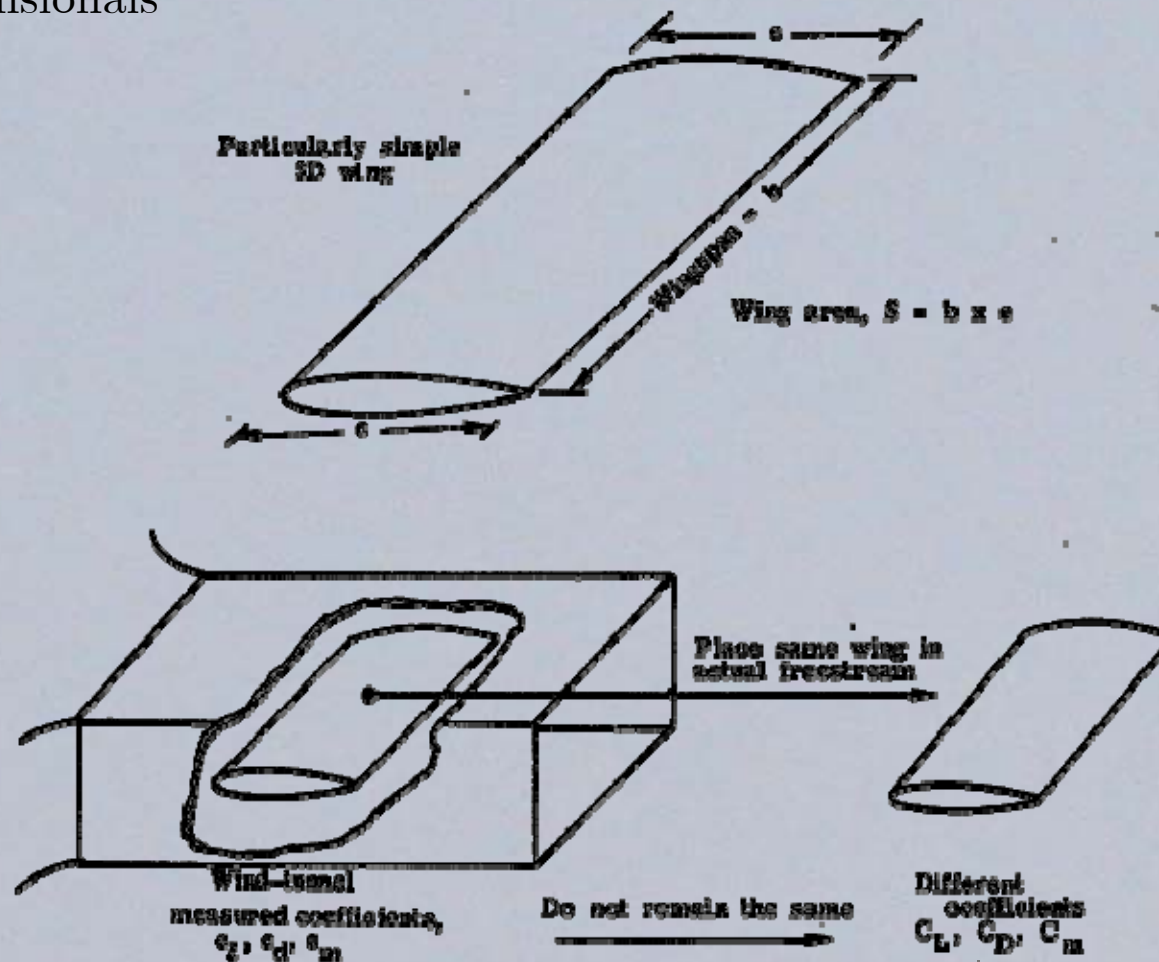
Aerodinâmica

- Perfis Aerodinâmicos
 - Coeficientes e ensaios



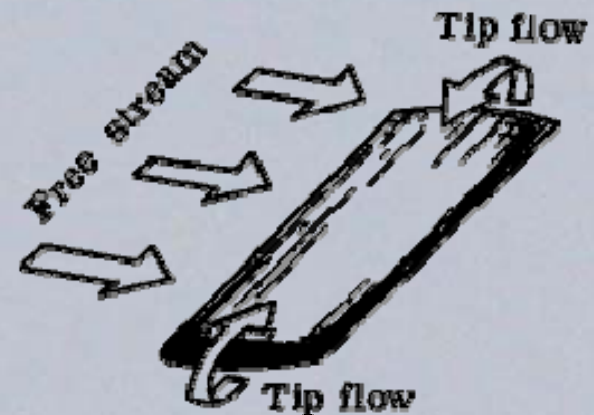
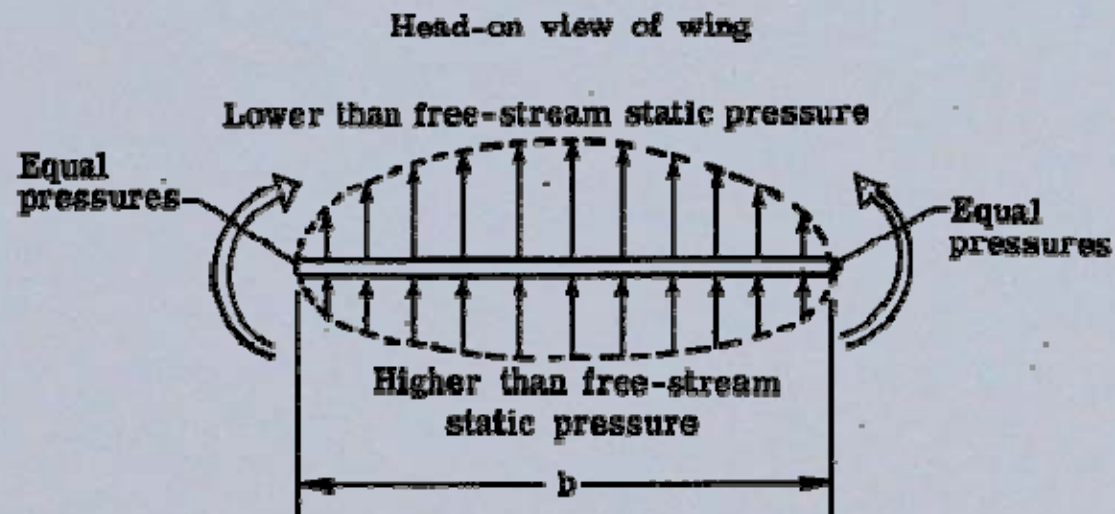
Aerodinâmica

- Asas tridimensionais



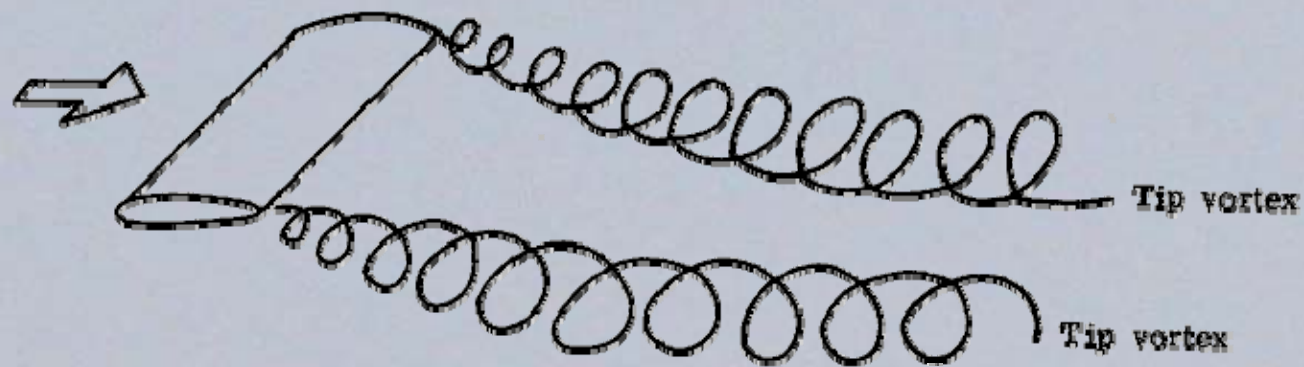
Aerodinâmica

- Asas tridimensionais



Aerodinâmica

- Asas tridimensionais



Aerodinâmica

- Asas tridimensionais



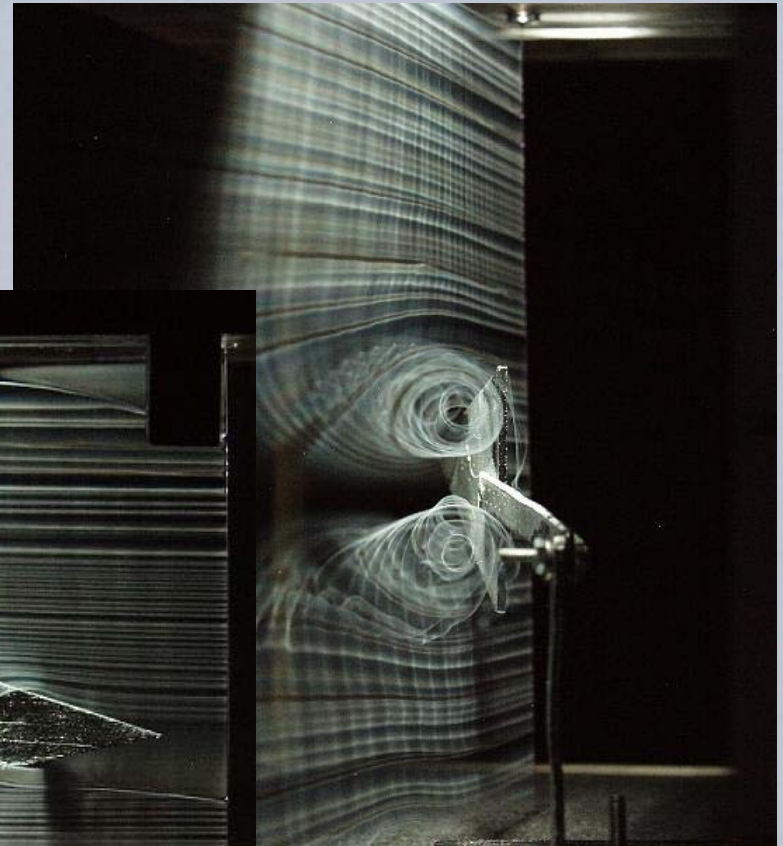
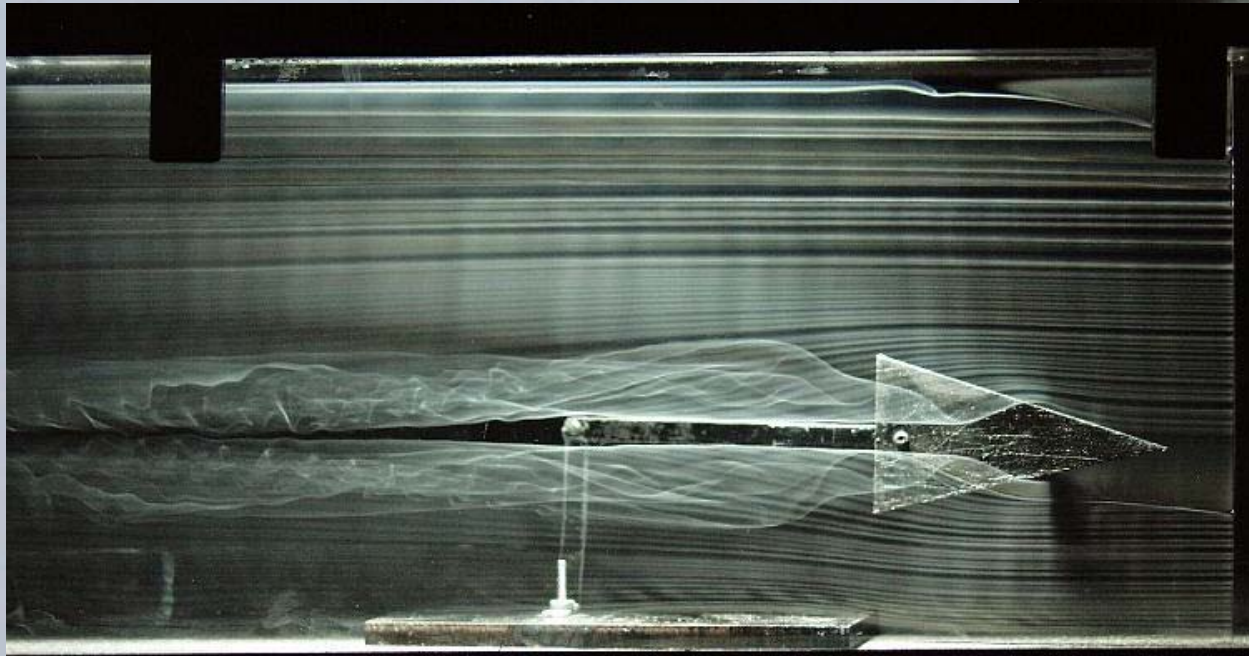
Aerodinâmica

- Asas tridimensionais



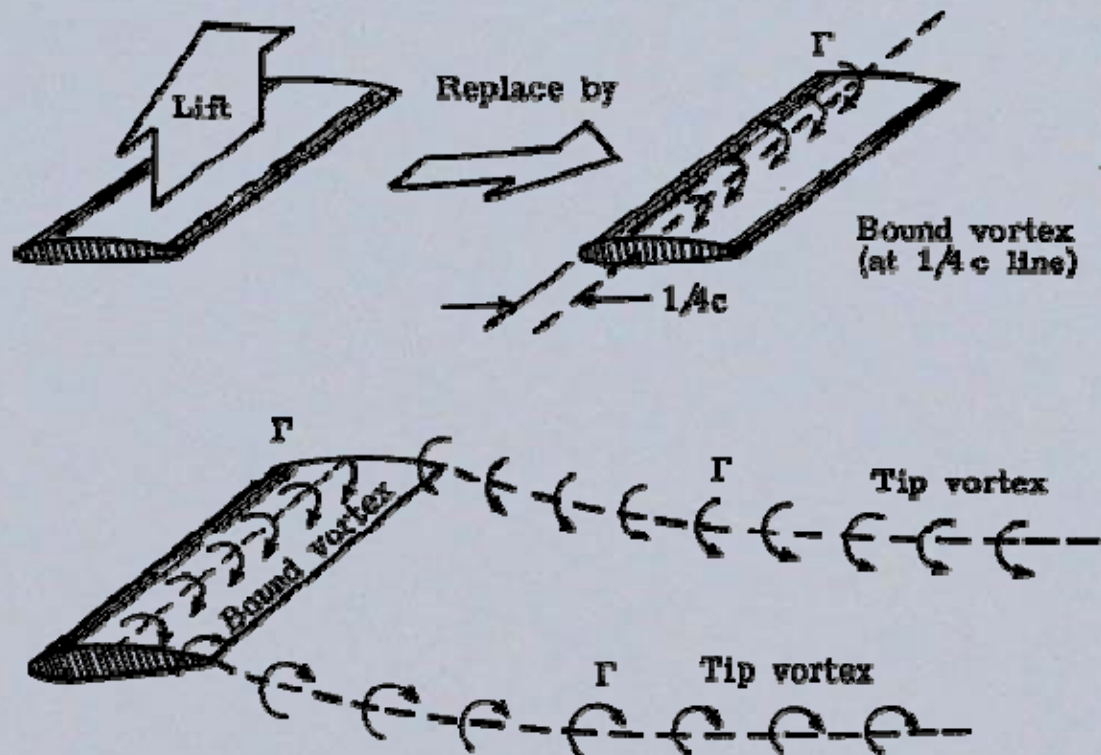
Aerodinâmica

- Asas tridimensionais



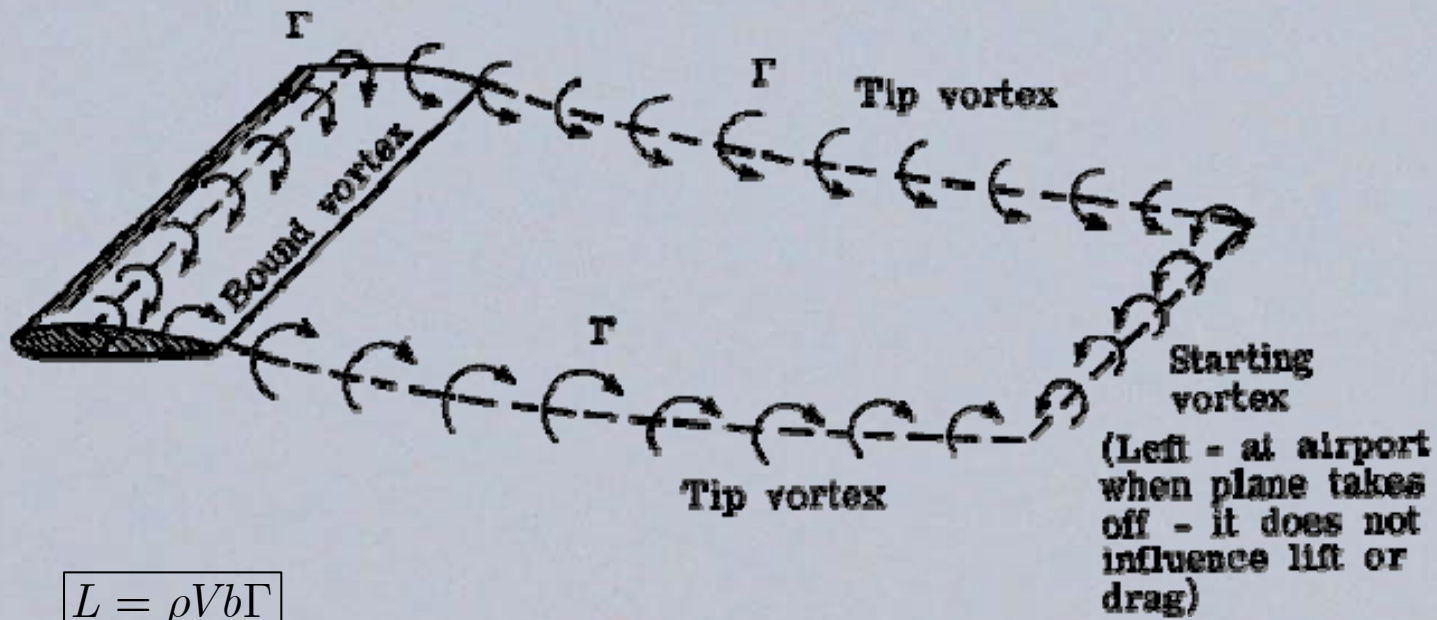
Aerodinâmica

- Asas tridimensionais



Aerodinâmica

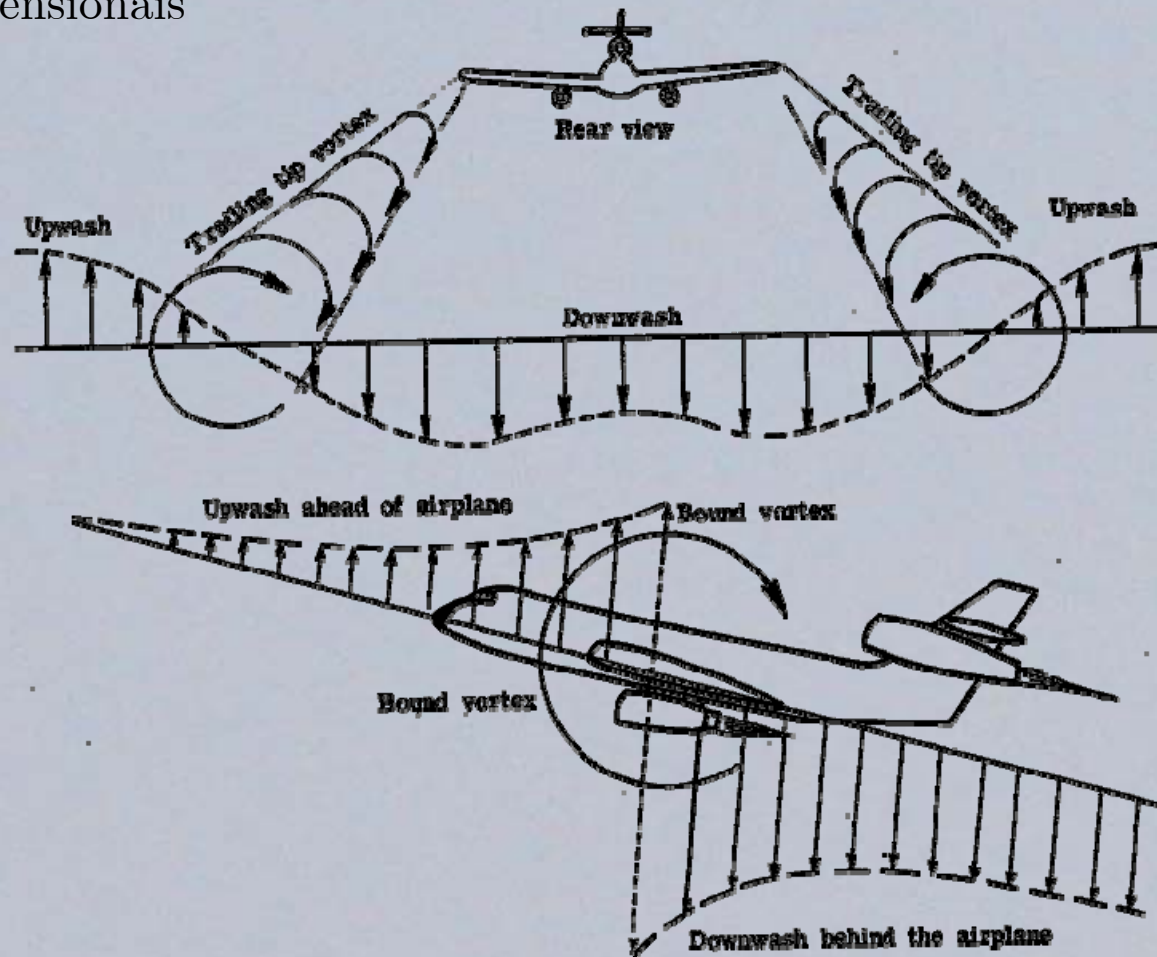
- Asas tridimensionais



$$L = \rho V b \Gamma$$

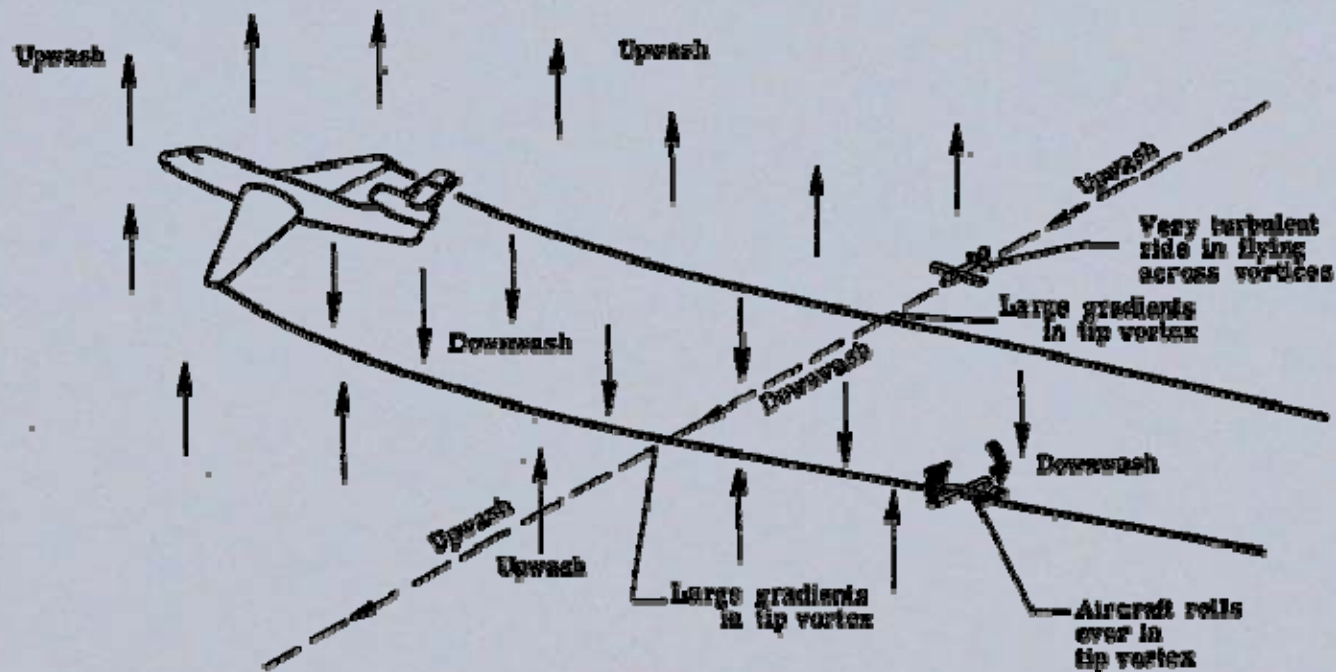
Aerodinâmica

- Asas tridimensionais



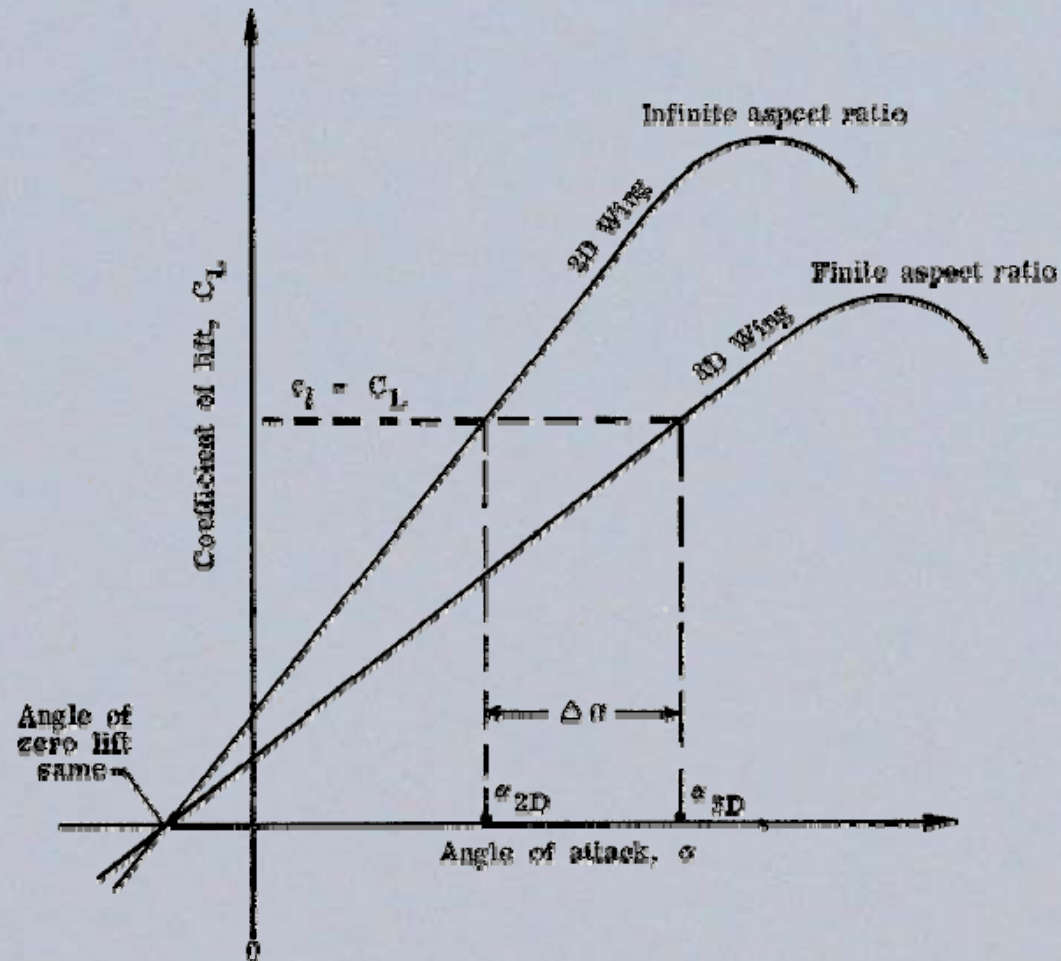
Aerodinâmica

- Asas tridimensionais



Aerodinâmica

- Asas bidimensionais x tridimensionais

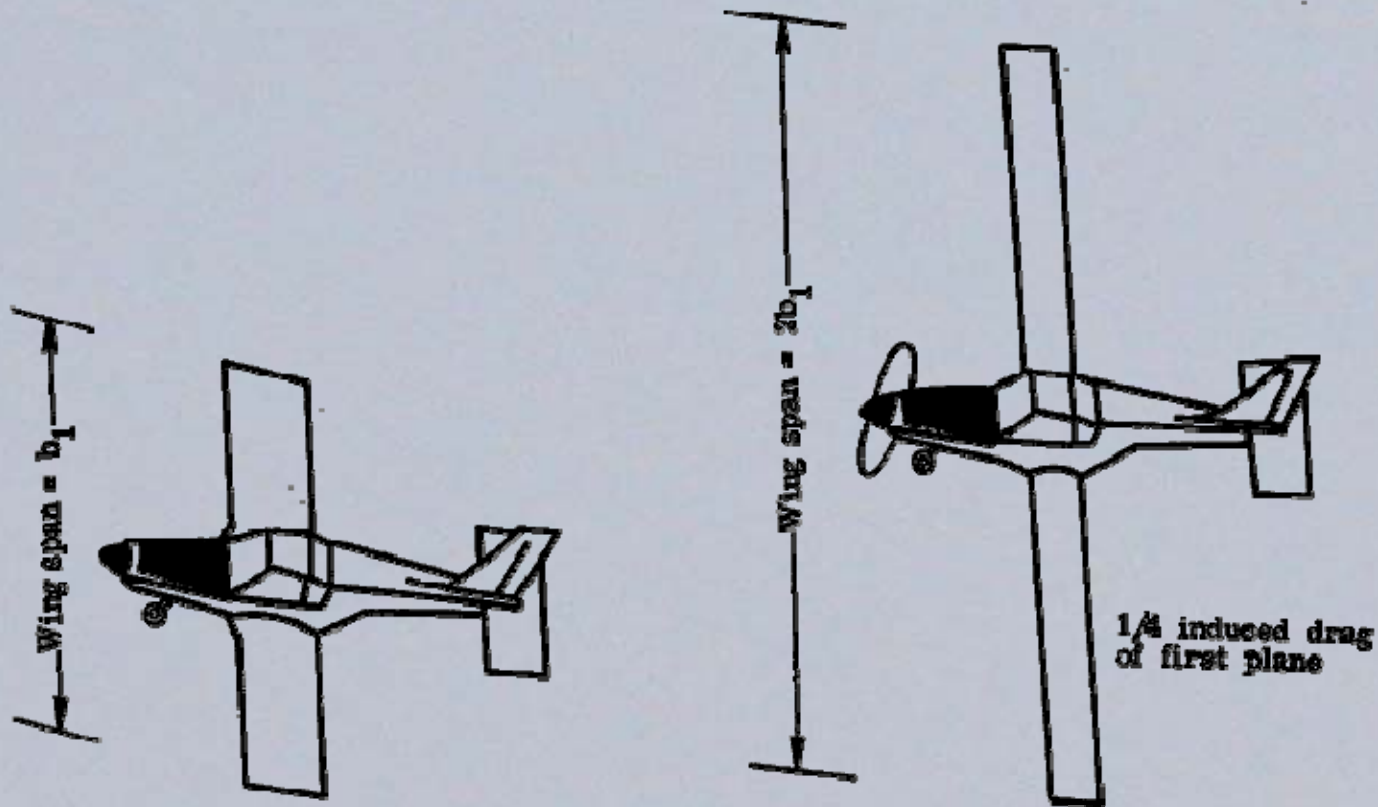


Aerodinâmica

- Efeitos tridimensionais
 - Arrasto parasita
 - Arrasto induzido

Aerodinâmica

- Redução de arrasto induzido



Aerodinâmica

- Redução de arrasto induzido



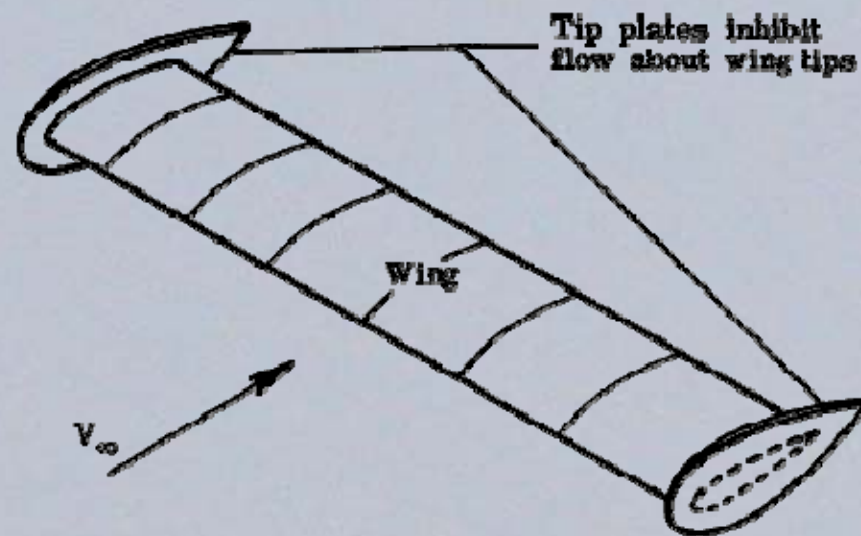
Aerodinâmica

- Redução de arrasto induzido



Aerodinâmica

- Redução de arrasto induzido



Aerodinâmica

- Redução de arrasto induzido



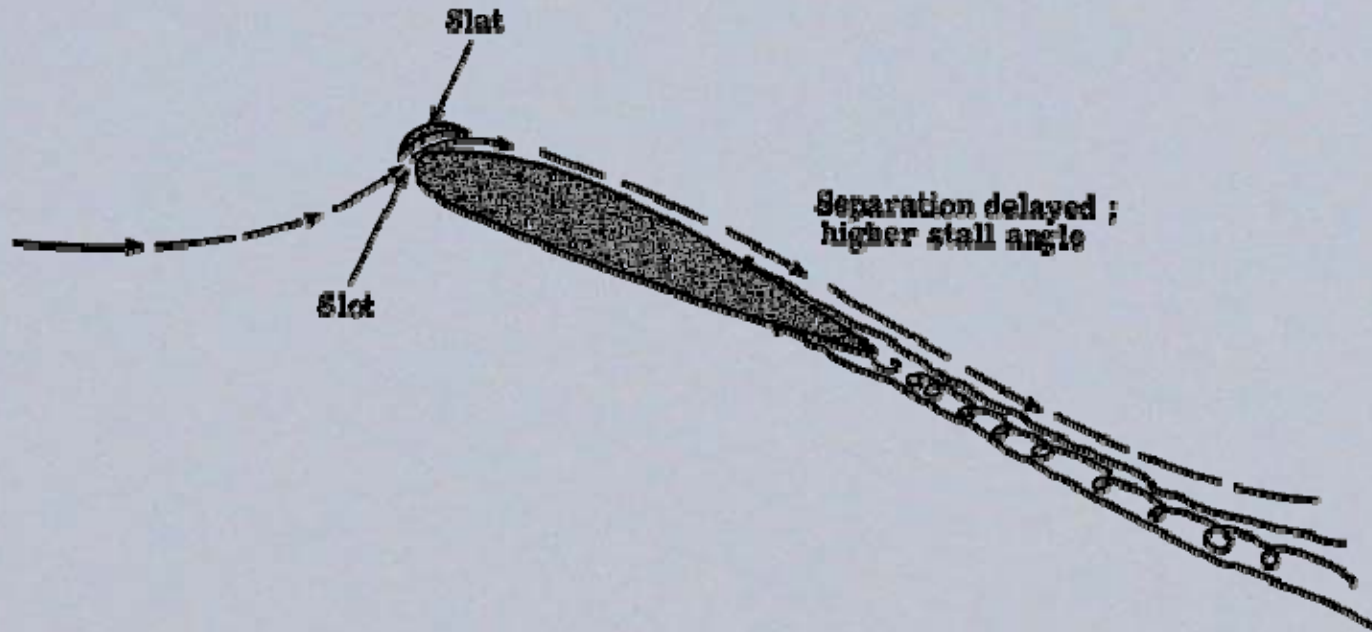
Aerodinâmica

- Redução de arrasto induzido



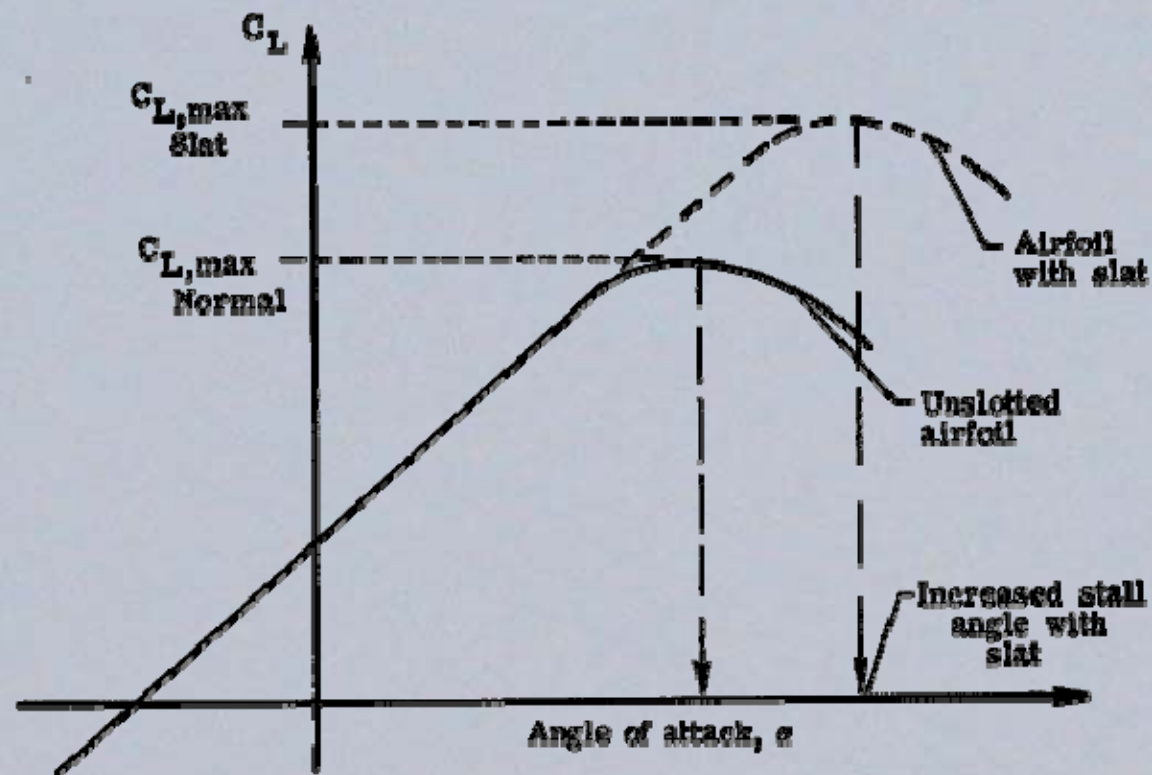
Aerodinâmica

- Funcionamento dos dispositivos de controle de sustentação
 - Slat



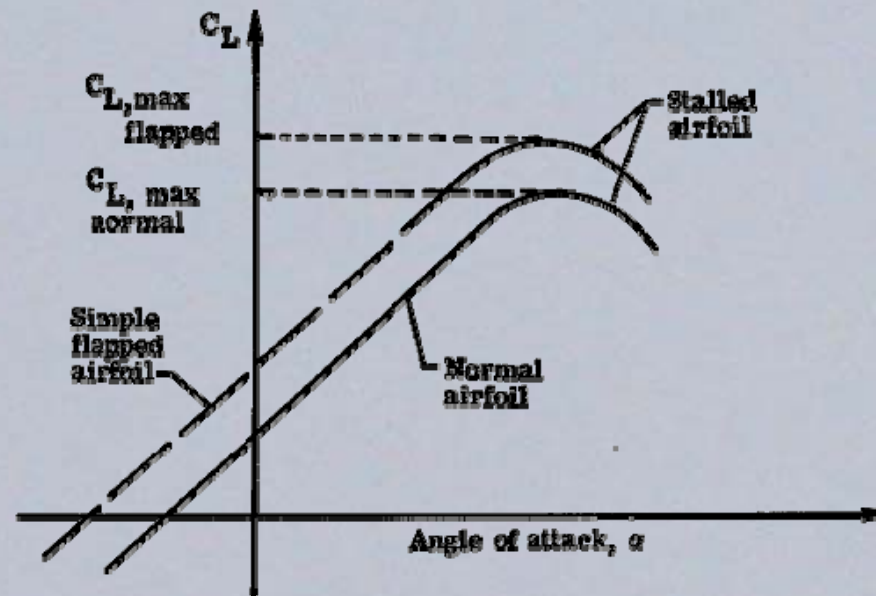
Aerodinâmica

- Funcionamento dos dispositivos de controle de sustentação
 - Slat



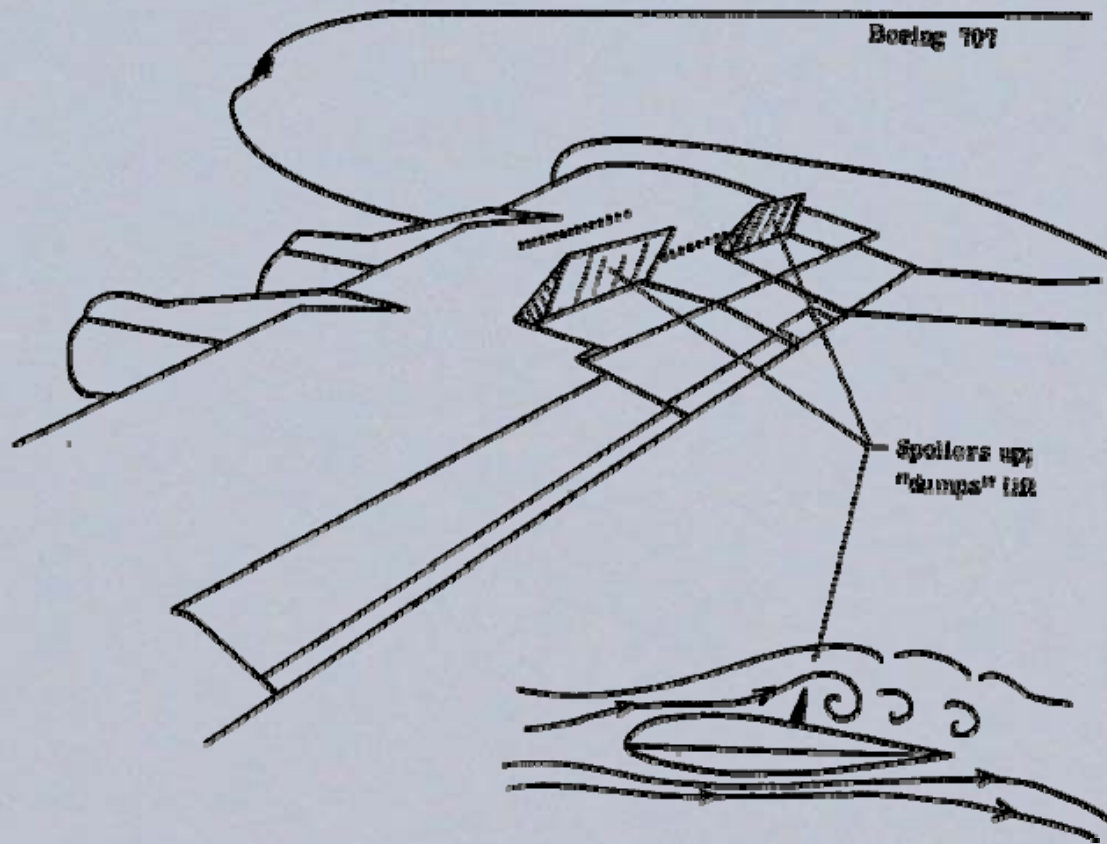
Aerodinâmica

- Funcionamento dos dispositivos de controle de sustentação
 - Flap



Aerodinâmica

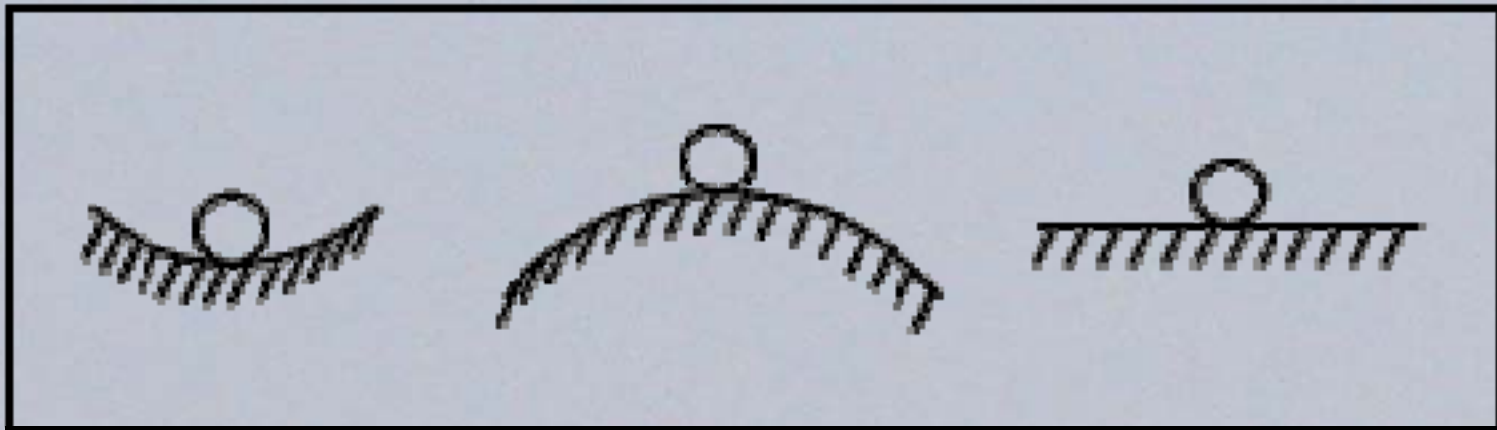
- Funcionamento dos dispositivos de controle de sustentação
 - Spoilers



Controle



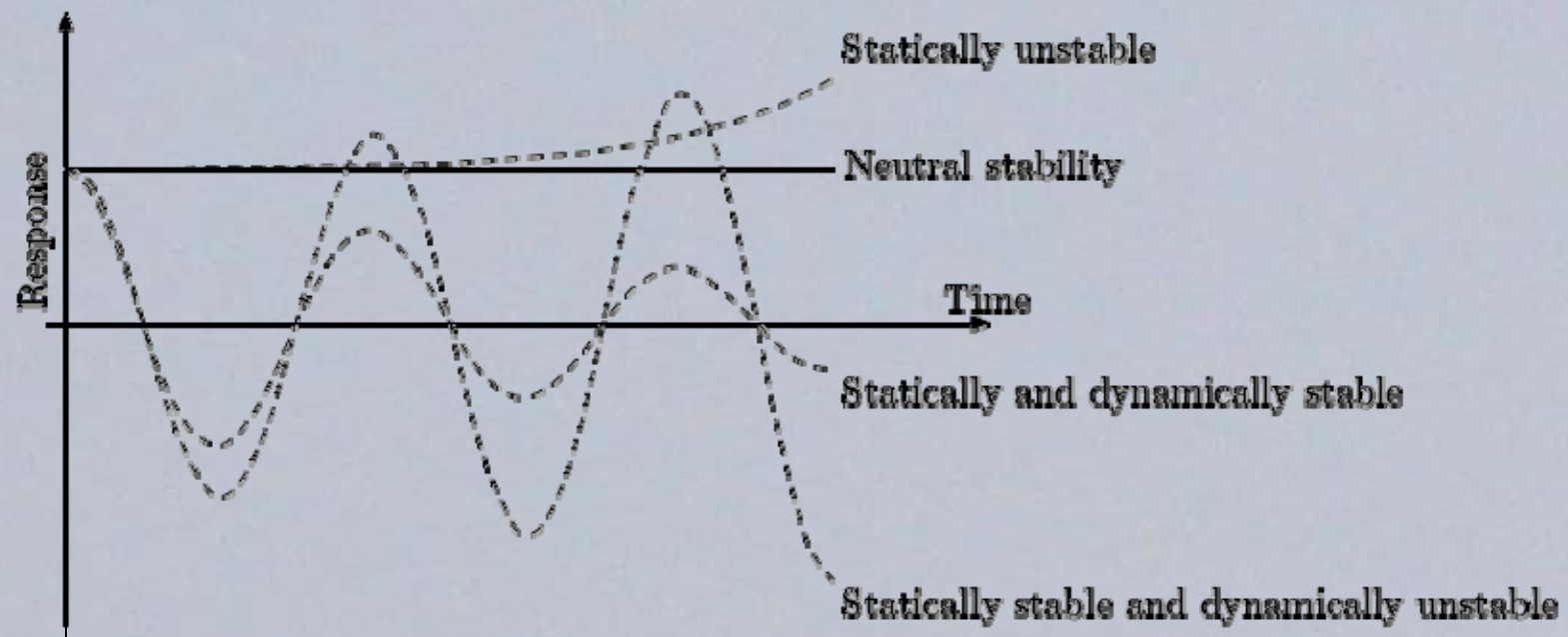
- Conceitos básicos
 - Estabilidade estática
 - Estabilidade dinâmica



Controle



- Conceitos básicos

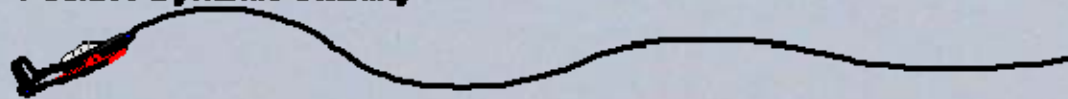


Controle

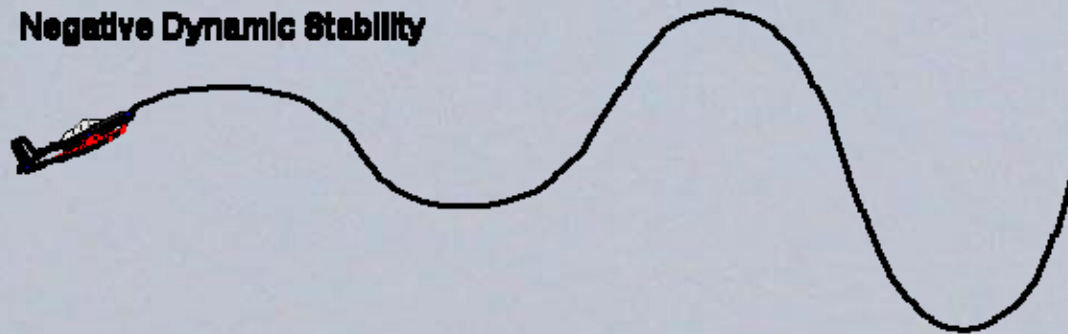


- Conceitos básicos

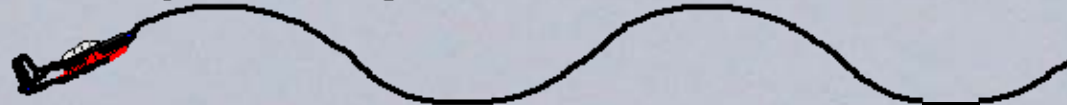
Positive Dynamic Stability



Negative Dynamic Stability



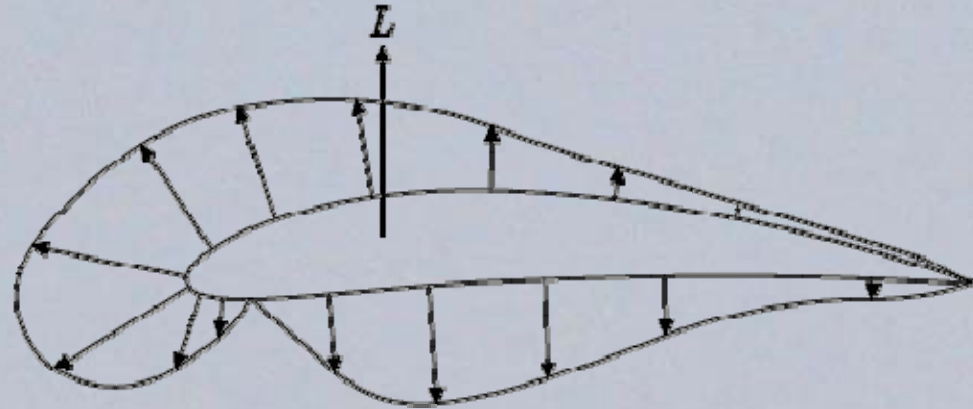
Neutral Dynamic Stability



Controle



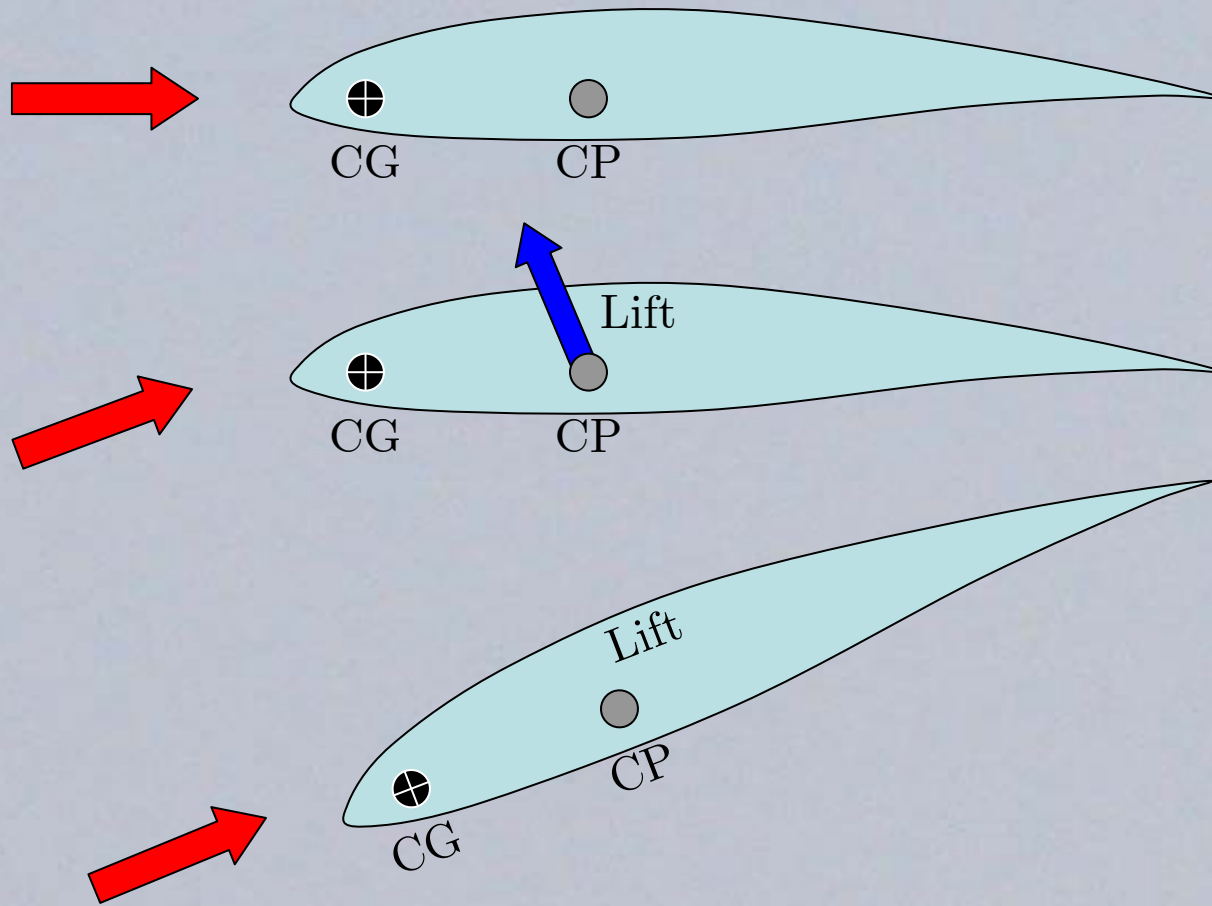
- Conceitos básicos
 - Centro de pressão
 - Centro aerodinâmico
 - Centro de gravidade



Controle



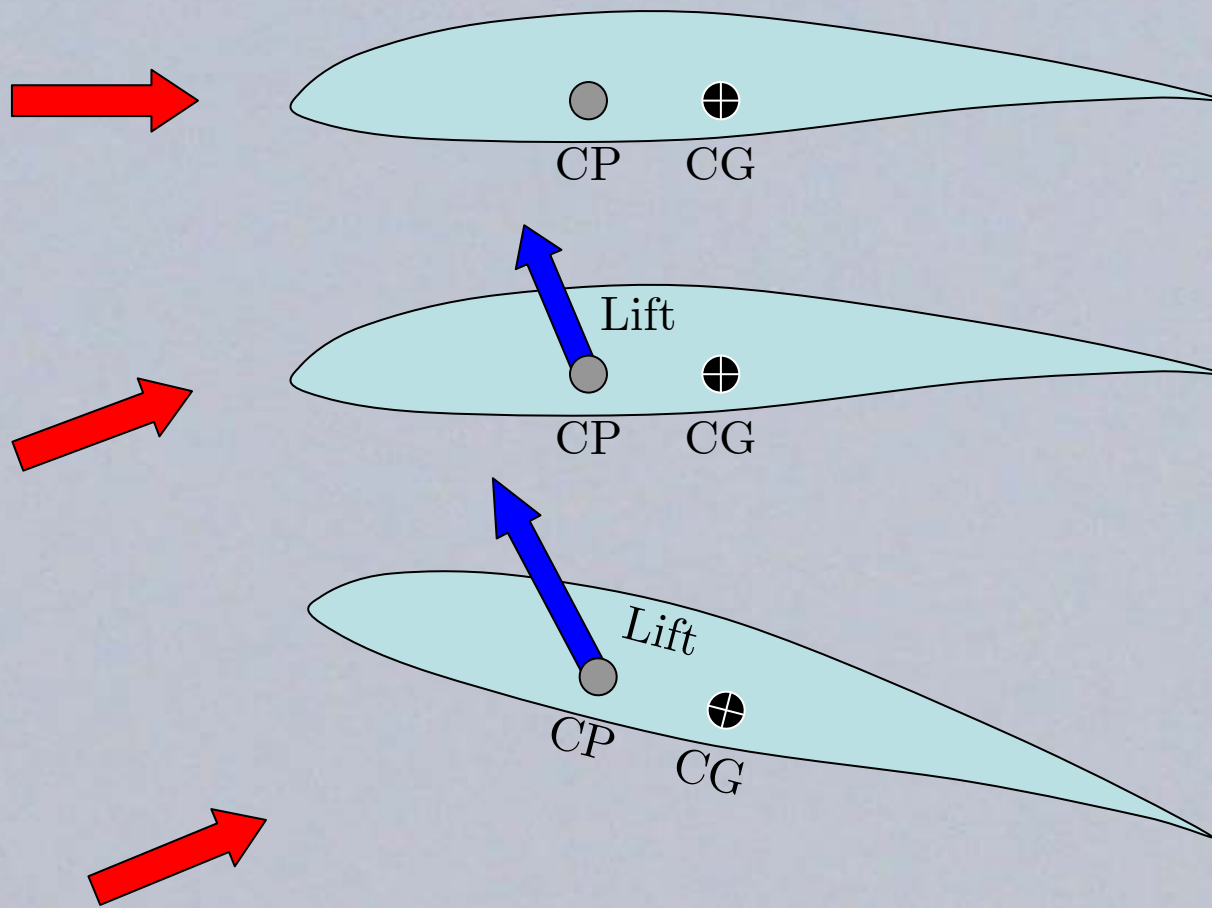
- Conceitos básicos



Controle



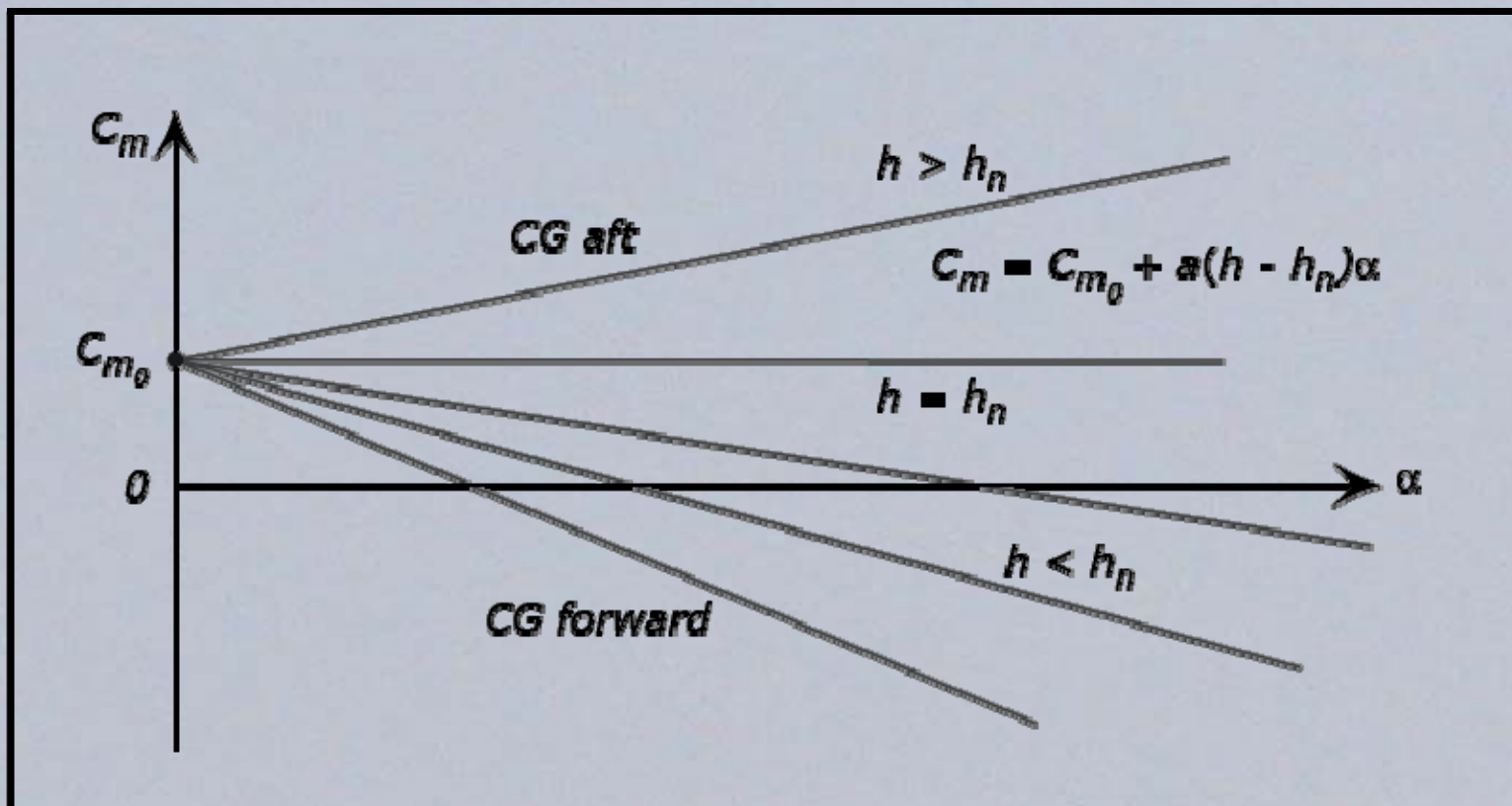
- Conceitos básicos



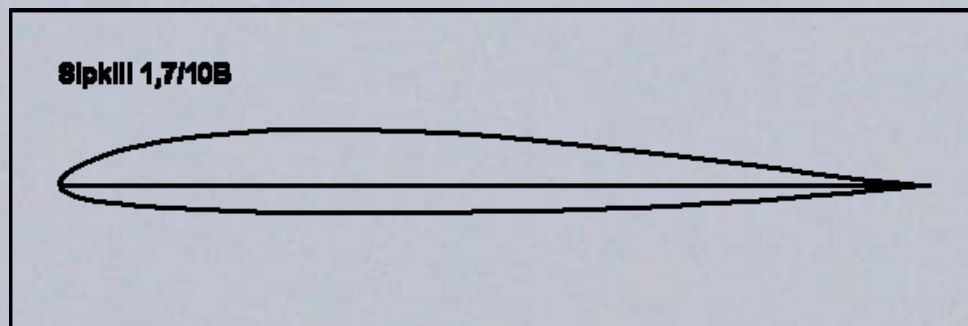
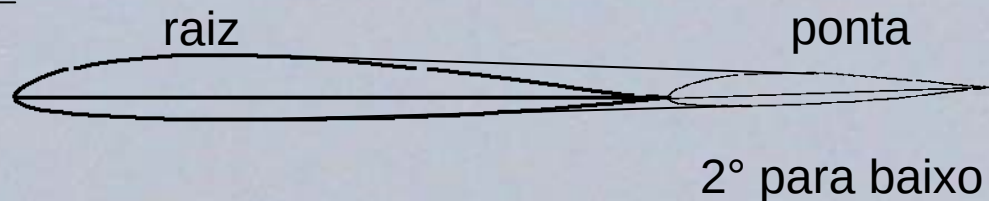
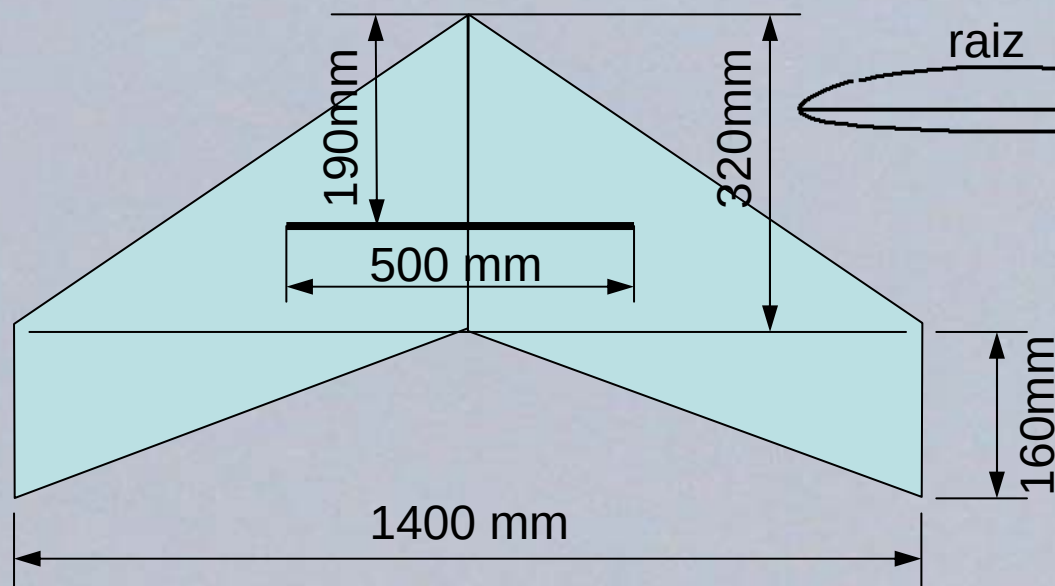
Controle



- Conceitos básicos



Zagi - Projeto

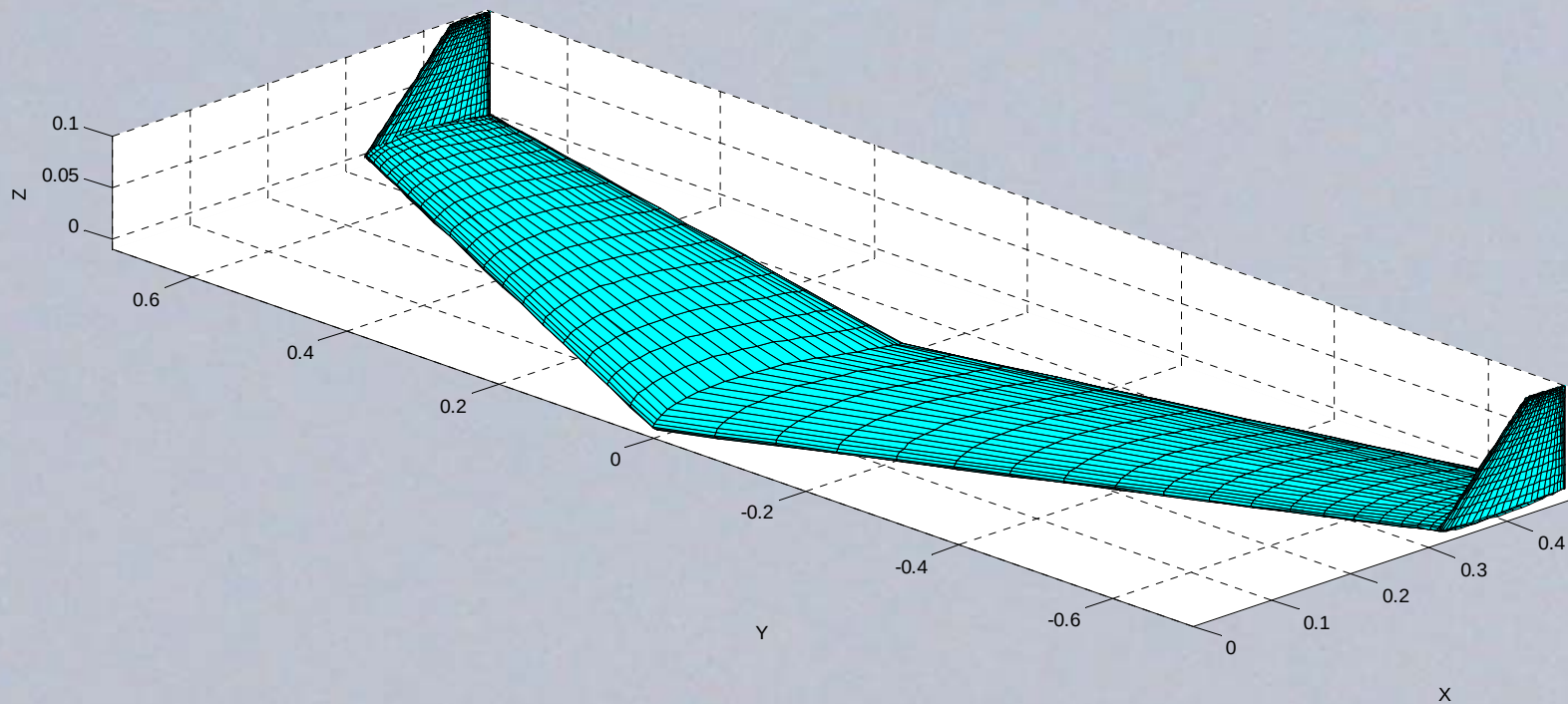


Zagi - Projeto

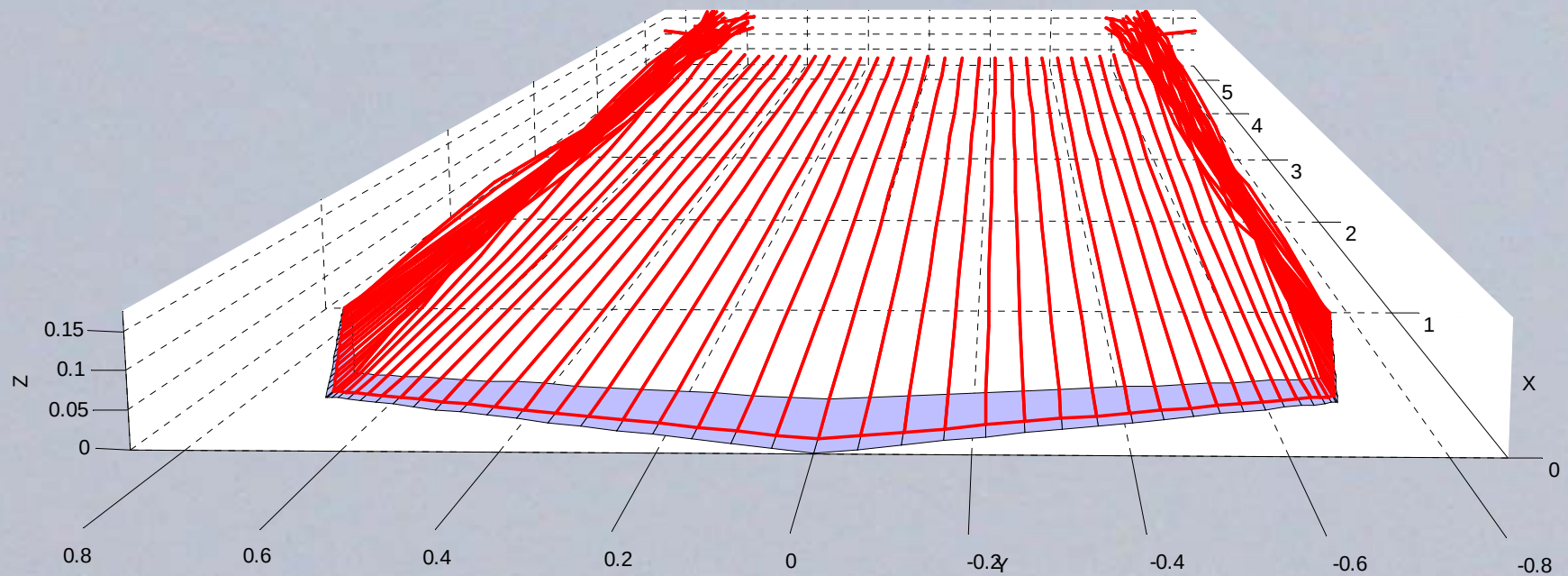


Sipkill 1.7/10B	0.29663 0.06651	0.20611 -0.03090	0.99726 -0.00028
1.00000 0.00000	0.25000 0.06531	0.25000 -0.03188	1.00000 0.00000
0.99726 0.00028	0.20611 0.06284	0.29663 -0.03249	
0.98907 0.00113	0.16543 0.05901	0.34549 -0.03277	
0.97553 0.00255	0.12843 0.05404	0.39604 -0.03270	
0.95677 0.00460	0.09549 0.04803	0.44774 -0.03230	
0.93301 0.00733	0.06699 0.04097	0.50000 -0.03157	
0.90451 0.01074	0.04323 0.03320	0.55226 -0.03042	
0.87157 0.01481	0.02447 0.02497	0.60396 -0.02885	
0.83457 0.01949	0.01093 0.01630	0.65451 -0.02689	
0.79389 0.02471	0.00274 0.00764	0.70337 -0.02454	
0.75000 0.03039	0.00000 0.00000	0.75000 -0.02186	
0.70337 0.03638	0.00274 -0.00485	0.79389 -0.01893	
0.65451 0.04247	0.01093 -0.01013	0.83457 -0.01582	
0.60396 0.04837	0.02447 -0.01490	0.87157 -0.01268	
0.55226 0.05382	0.04323 -0.01885	0.90451 -0.00964	
0.50000 0.05858	0.06699 -0.02225	0.93301 -0.00683	
0.44774 0.06234	0.09549 -0.02517	0.95677 -0.00442	
0.39604 0.06499	0.12843 -0.02756	0.97553 -0.00251	
0.34549 0.06643	0.16543 -0.02947	0.98907 -0.00112	

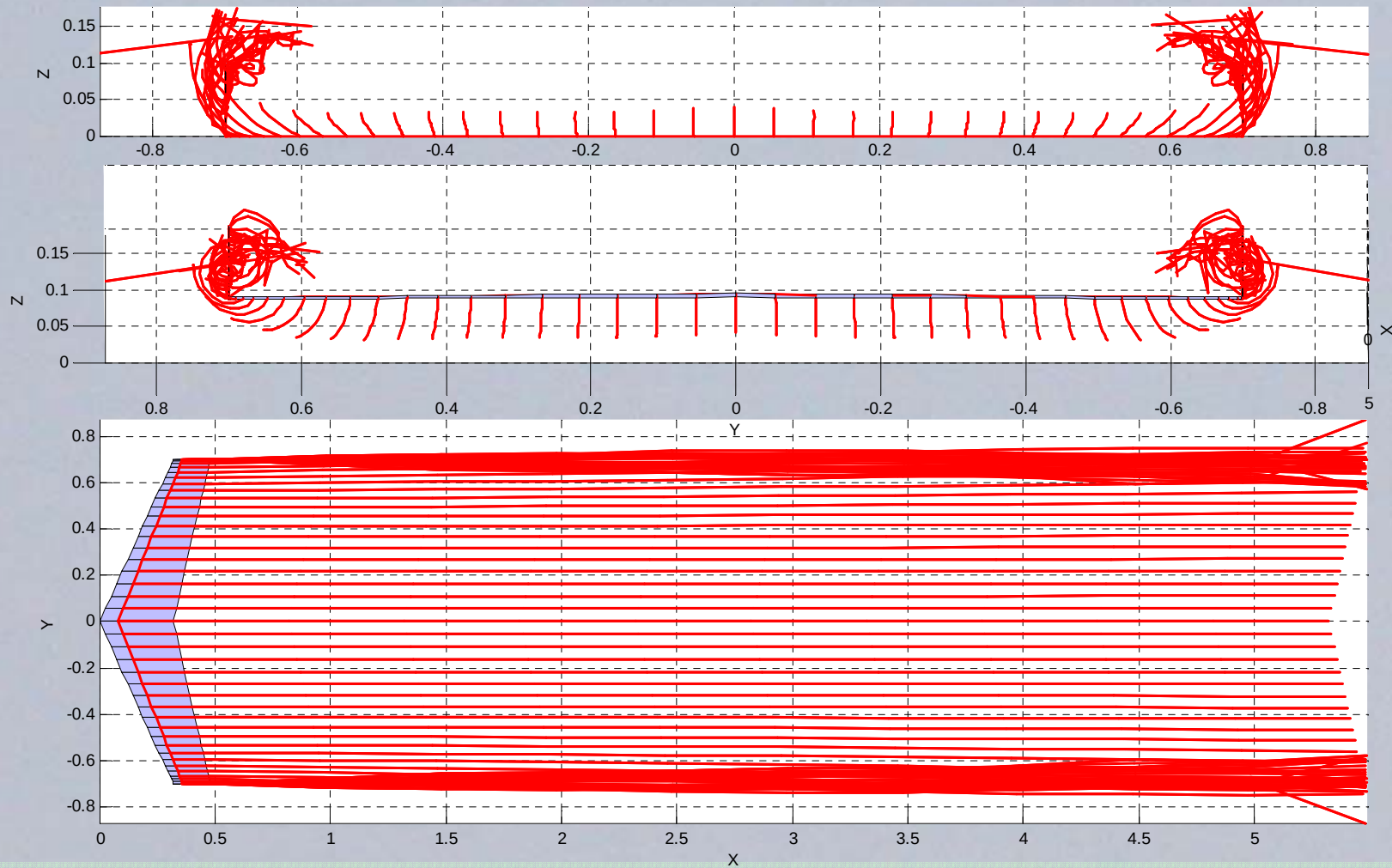
Zagí - Análise



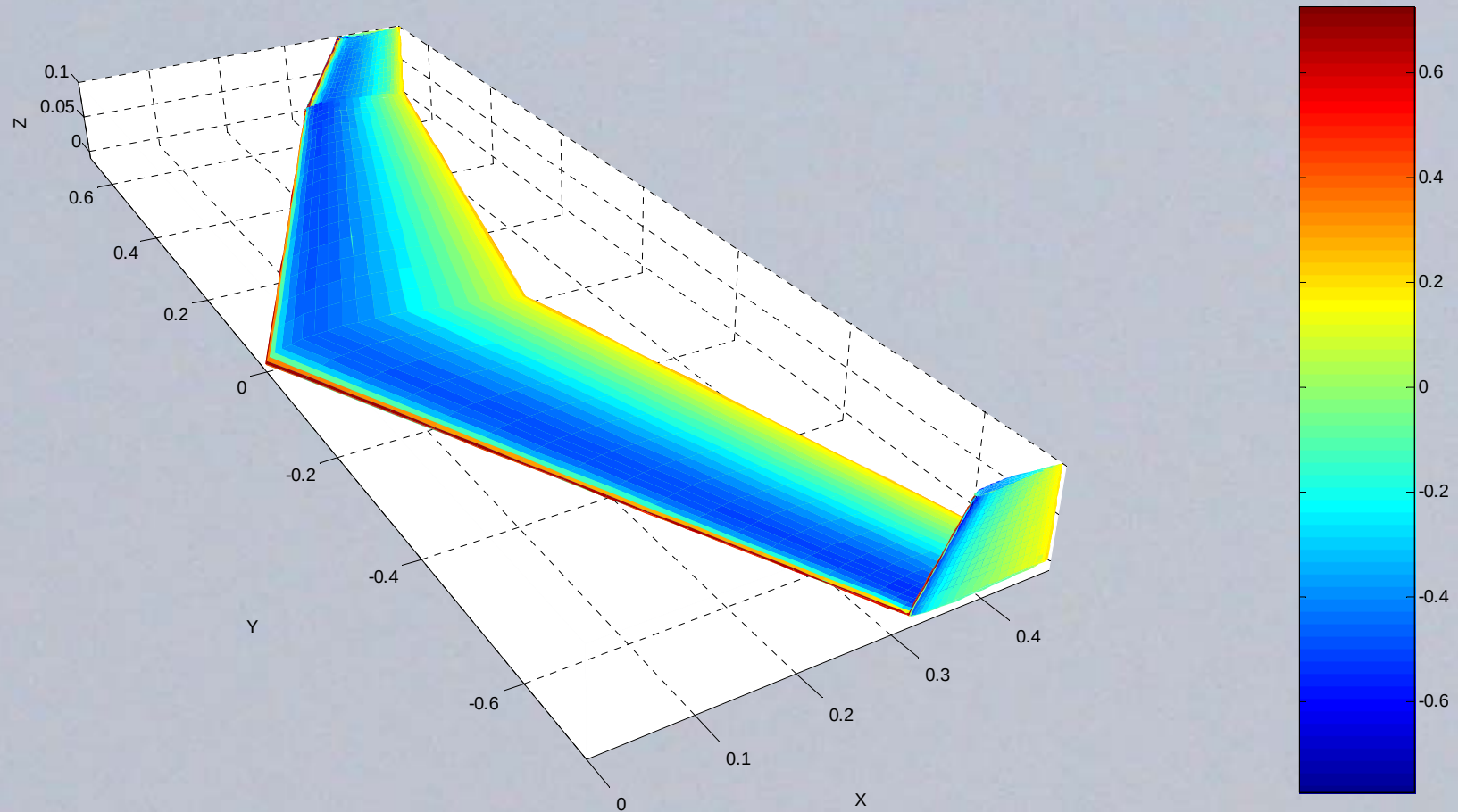
Zagi - Análise



Zagi - Análise

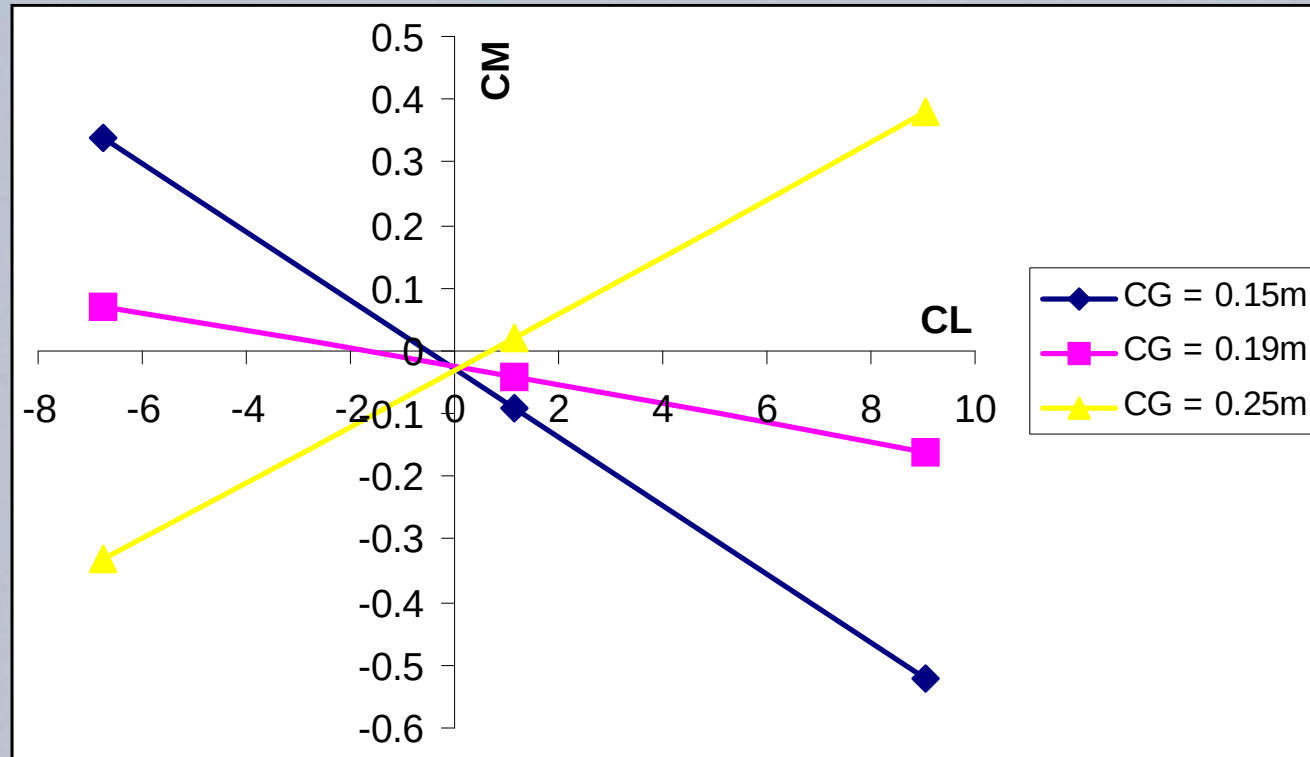


Zagí - Análise



Zagí - Análise

- Variação do ângulo de ataque para diferentes posições do Centro de Gravidade
- Observação do Momento



Zagí - Análise

- Posição do Centro de Gravidade onde a inclinação da curva se torna nula.

