

UNIVERSIDADE
BEIRA INTERIOR

Seleção do Perfil e da Geometria da Asa e da Cauda

Projeto de Aeronaves (15096)

Licenciatura em Engenharia Aeronáutica

2024

Pedro V. Gamboa

Departamento de Ciências Aeroespaciais

Faculdade de Engenharia



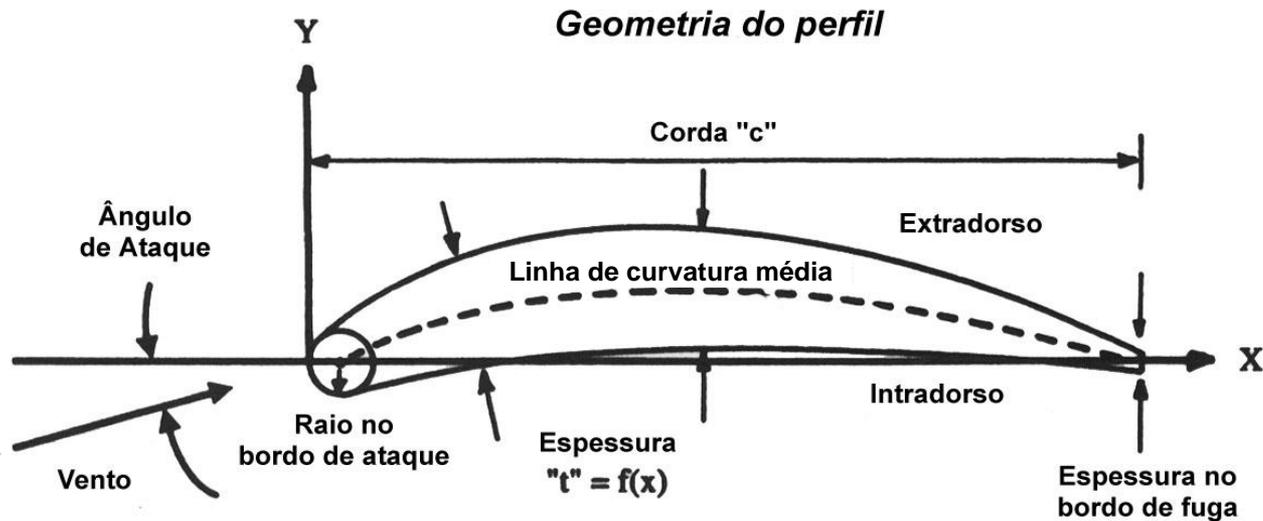
1. Introdução

- Antes de se iniciar o desenho da aeronave é necessário definir alguns parâmetros:
 - Perfil alar
 - Geometria da asa
 - Geometria da cauda
 - Carga alar
 - Tração específica ou potência específica
 - Peso à descolagem
 - Peso de combustível ou baterias
 - Dimensões da asa, cauda e motor
 - Dimensão e geometria da fuselagem
 - Etc..



2. Seleção do perfil alar

- Geometria do perfil:





2. Seleção do perfil alar

Geometria do perfil

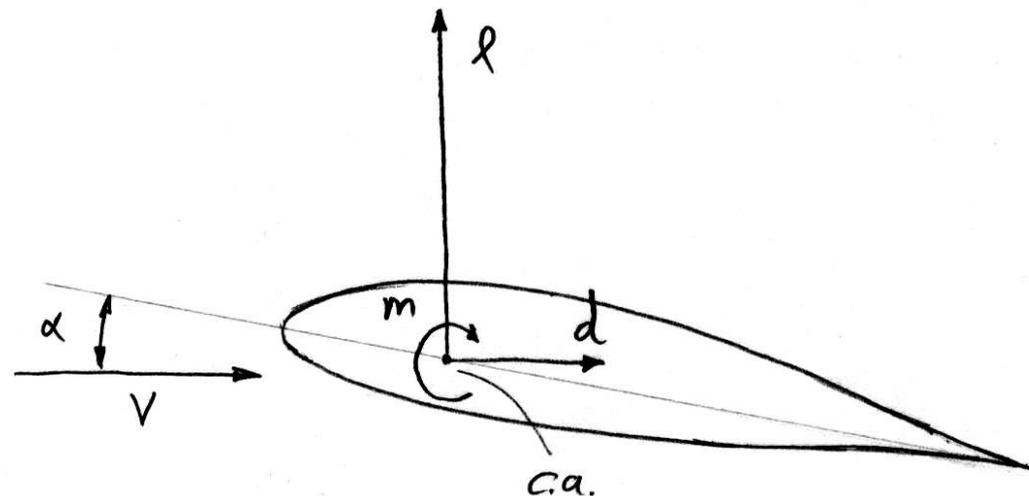
- A distribuição de espessura afeta o arrasto parasita
- A linha de curvatura média afeta a sustentação e o arrasto dependente da sustentação (arrasto de pressão)



2. Seleção do perfil alar

Coeficientes de sustentação e arrasto

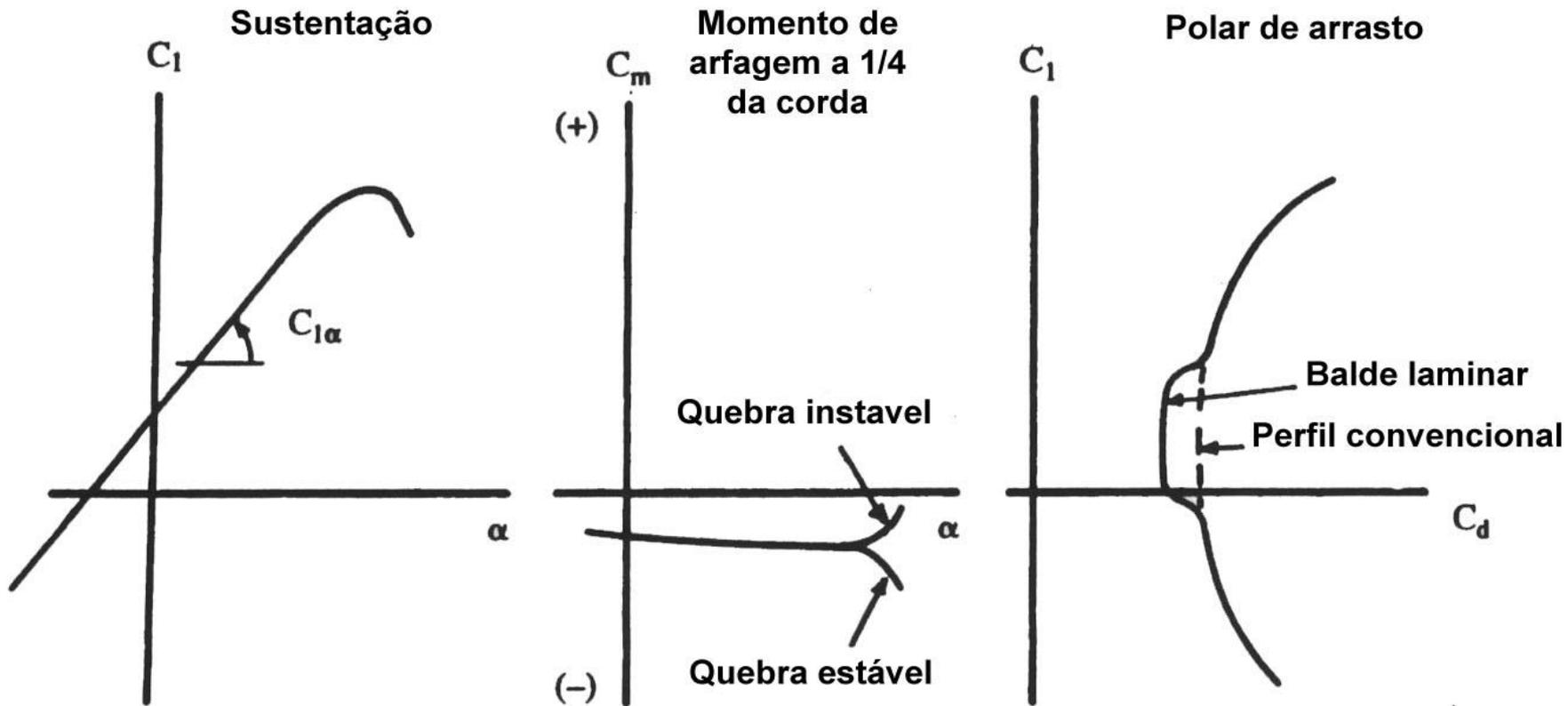
- Coeficiente de sustentação – $C_l = l/(qc)$
- Coeficiente de arrasto – $C_d = d/(qc)$
- Coeficiente de momento – $C_m = m/(qc^2)$
- $q = 0,5\rho V^2$ é a pressão dinâmica
- C_m é normalmente definido em torno de $c/4$ ($C_{mc/4}$)





2. Seleção do perfil alar

Coeficientes de sustentação e arrasto

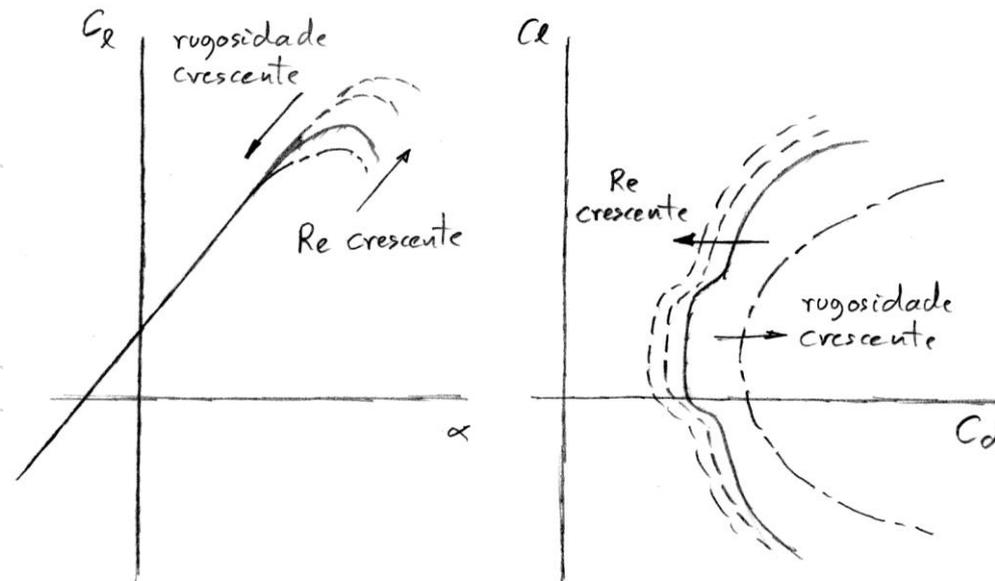


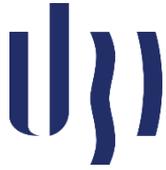


2. Seleção do perfil alar

Coeficientes de sustentação e arrasto

- Na escolha do perfil é necessário saber qual o tipo de acabamento da superfície da asa e qual o Re de operação da aeronave
- $Re = \text{forças de inércia} / \text{forças viscosas} = \rho Vc / \mu$
- Ao nível do mar $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 1,79 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$

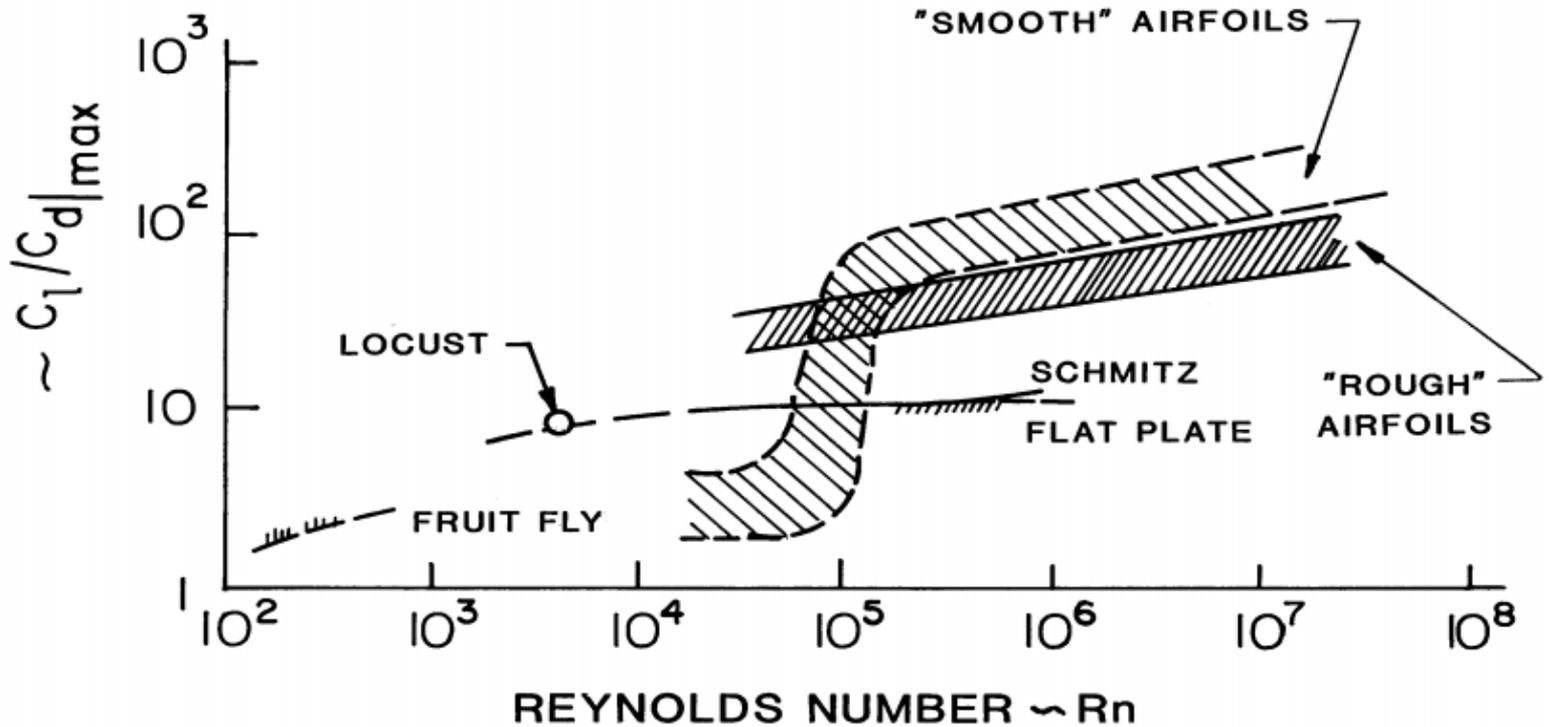




2. Seleção do perfil alar

Coeficientes de sustentação e arrasto

MAX. SECTION LIFT-DRAG RATIO



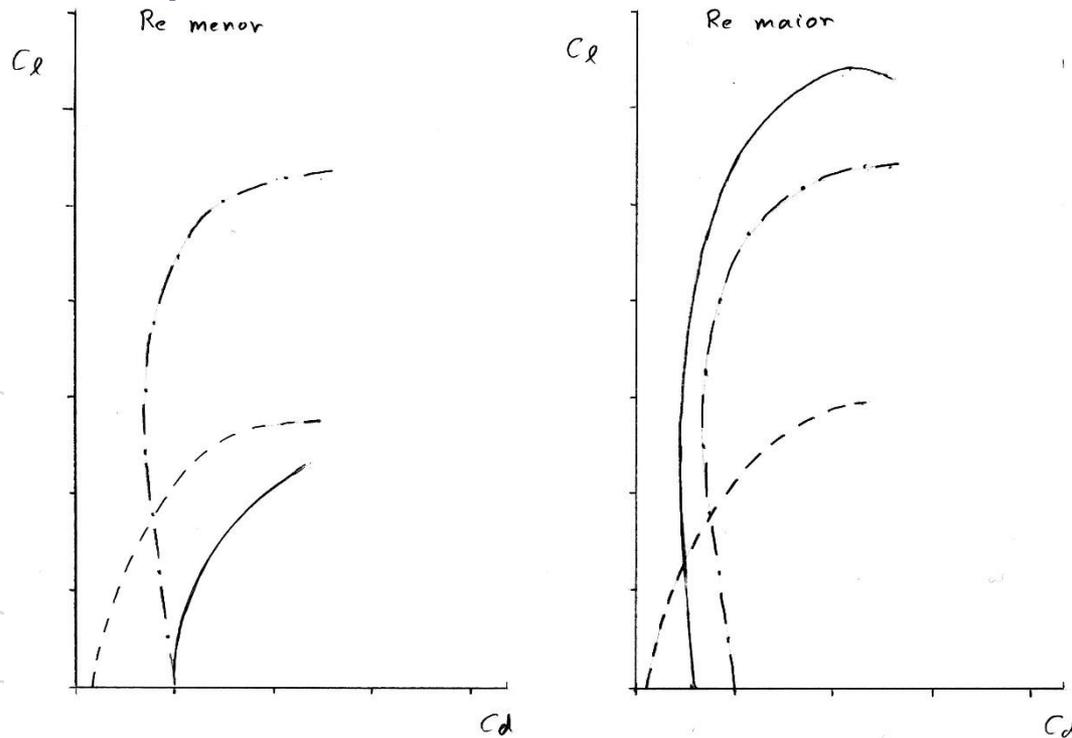


2. Seleção do perfil alar

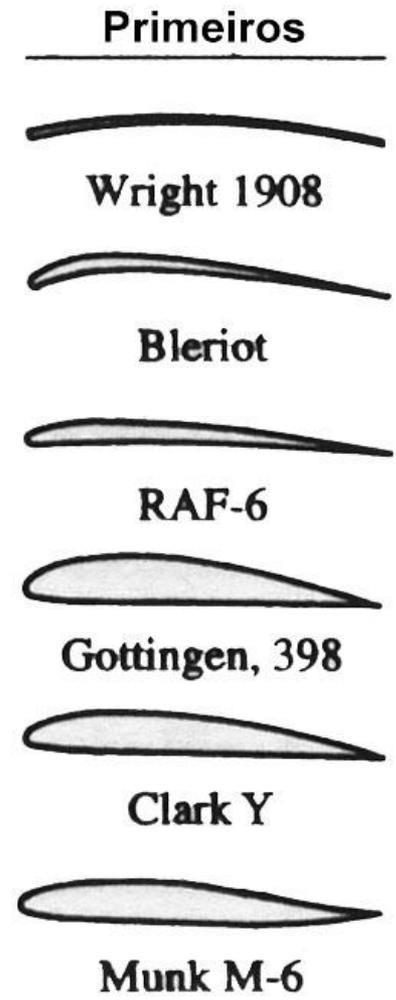
Famílias de perfis

- Primeiros perfis definidos em túnel de vento por tentativa e erro

Seleção do Perfil e da Geometria da Asa e da Cauda



--- perfil fino c/ pouco arqueamento
-.-.- perfil fino c/ muito arqueamento
— perfil espesso c/ arqueamento

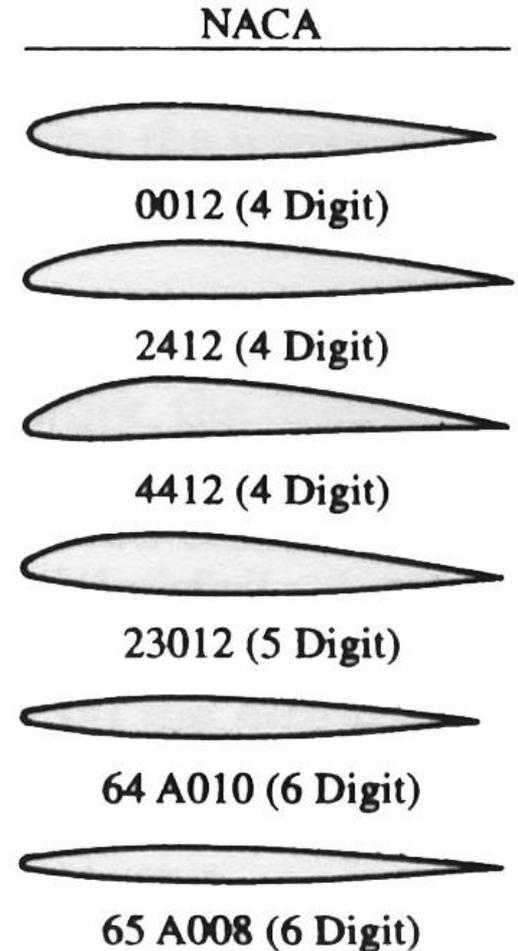
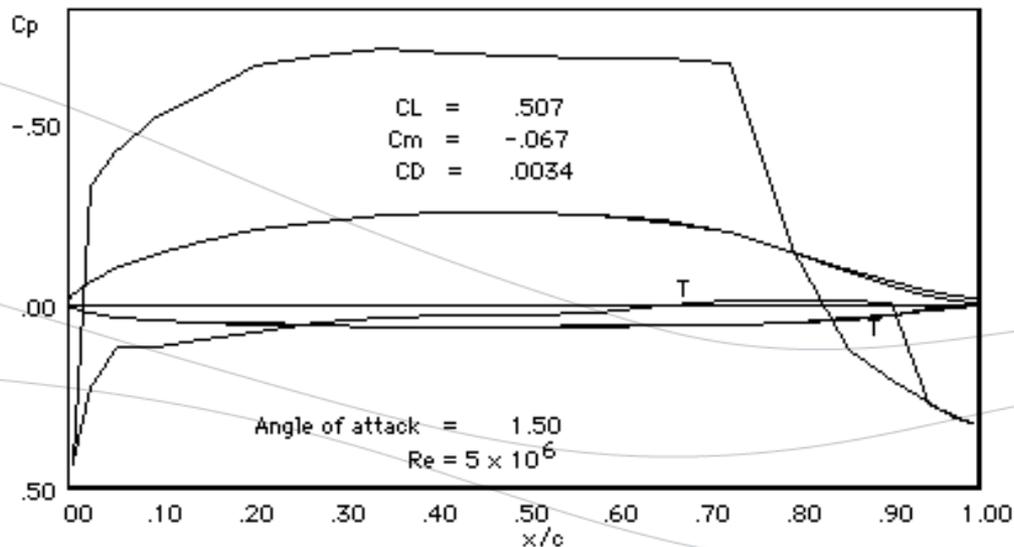




2. Seleção do perfil alar

Famílias de perfis

- Perfis NACA definidos matematicamente por métodos inversos (por exemplo a partir de uma distribuição de velocidade, o pressão, pré definida)

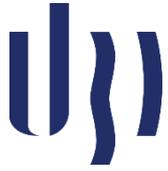




2. Seleção do perfil alar

Famílias de perfis

- NACA: 1930 – definidos matematicamente
 - Série 4 (4 dígitos):
 - 1 – percentagem de arqueamento
 - 2 – posição do arqueamento máximo (1 corresponde a 10 %)
 - 34 – percentagem de espessura (espessura relativa)
 - Série 5 (5 dígitos):
 - 1 – C_1 de máxima eficiência (1 corresponde a 0,15)
 - 23 – posição do arqueamento máximo (10 corresponde a 5 %)
 - 45 – percentagem de espessura (espessura relativa)



2. Seleção do perfil alar

Famílias de perfis

- NACA: 1930 – definidos matematicamente
 - Série 6 (6 dígitos) – perfis laminares:
 - 1 – série
 - 2 – posição de pressão mínima (1 corresponde a 10 %)
 - 3 – semi-largura do balde (1 corresponde a 0,1)
 - 4 – C_l no centro do balde (1 corresponde a 0,1)
 - 56 – percentagem de espessura (espessura relativa)



2. Seleção do perfil alar

Famílias de perfis

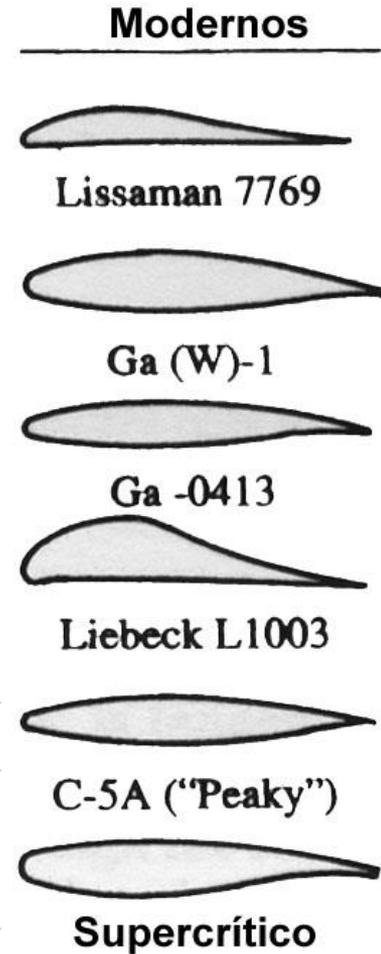
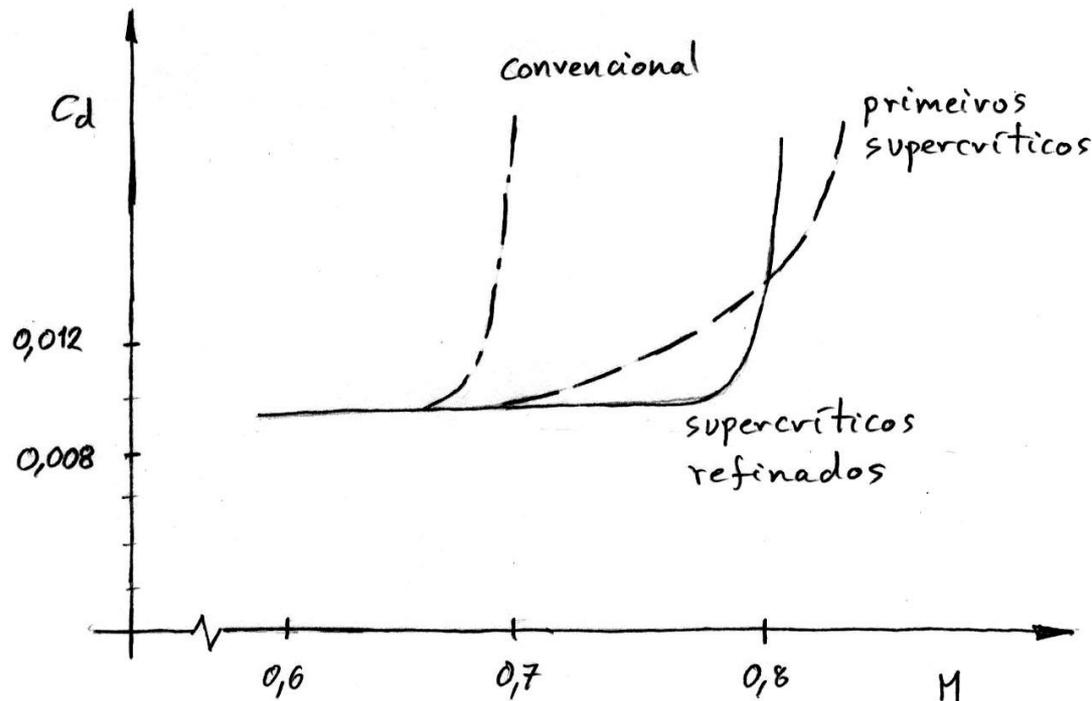
- NACA: perfis super críticos
 - Série 7 (7 dígitos):
 - 1 – série
 - 2 – posição no extradorso da pressão mínima (1 corresponde a 10%)
 - 3 – posição no intradorso da pressão mínima (1 corresponde a 10%)
 - 4 – letra que indica secções diferentes com a mesma designação numérica
 - 5 – C_1 de projeto (1 corresponde a 0,1)
 - 67 – percentagem de espessura (espessura relativa)



2. Seleção do perfil alar

Famílias de perfis

- Perfis modernos projetados numericamente para aplicações específicas – definidos em CFD e ensaiados em túnel de vento

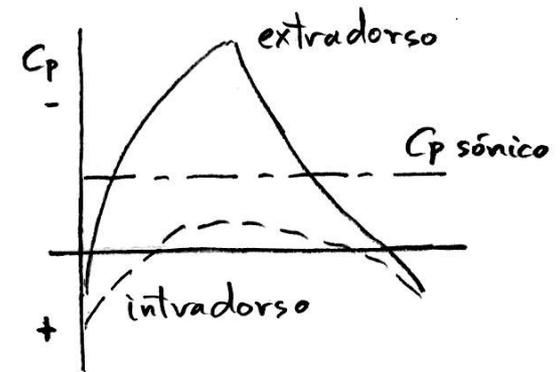




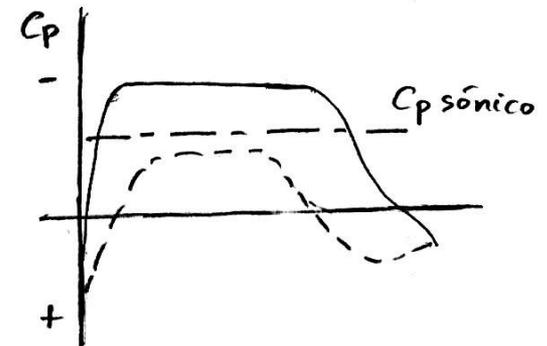
2. Seleção do perfil alar

Famílias de perfis

Perfil
Convencional
 $M=0,7$



Perfil
supercrítico
 $M=0,8$





2. Seleção do perfil alar

Famílias de perfis

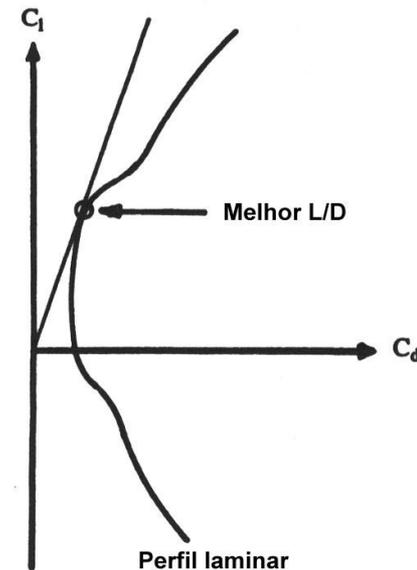
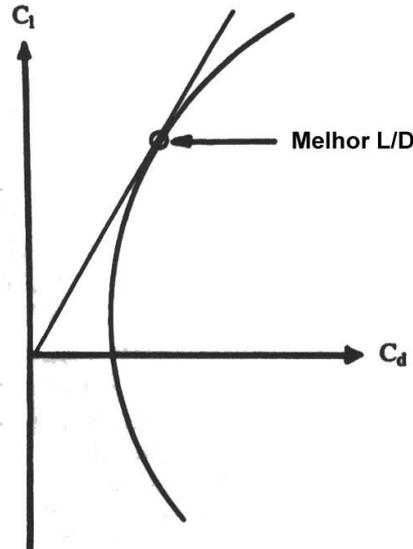
- Base de dados de perfis:
 - UIUC airfoil coordinate database (https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html)
 - Airfoil tools (<http://airfoiltools.com>)



2. Seleção do perfil alar

Coeficiente de sustentação de projeto

- A missão deve ser feita o mais próximo possível de $(L/D)_{\max}$
- Como primeira aproximação $C_L = C_l$
- Assim $W = L = qSC_L = qSC_l$
- E $C_l = (W/S)/q$



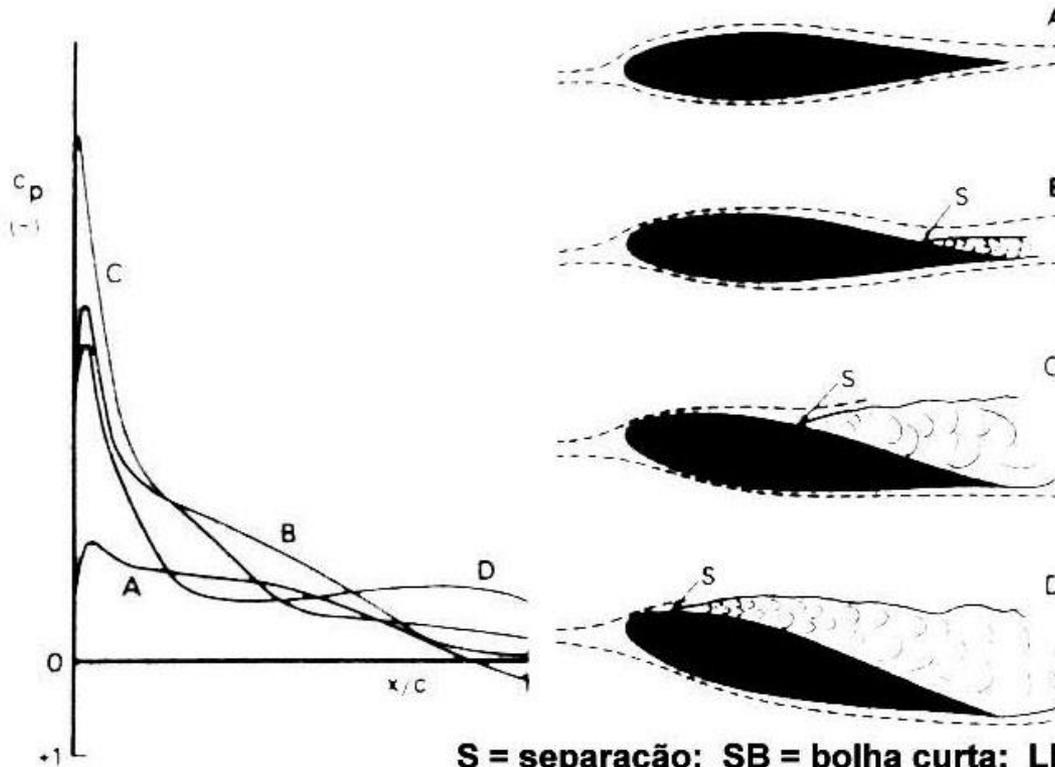


2. Seleção do perfil alar

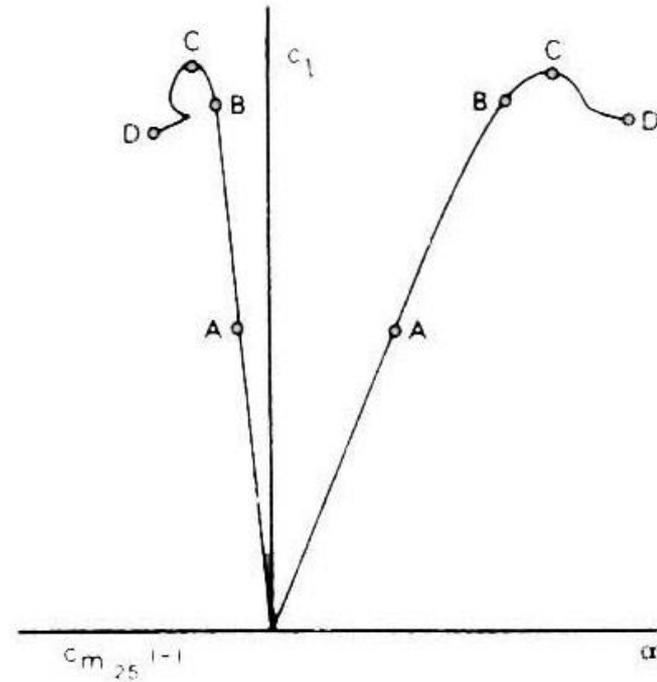
Comportamento de perda

Seleção do Perfil e da Geometria da Asa e da Cauda

TIPO I PERDA NO BORDO DE FUGA



S = separação; SB = bolha curta; LB = bolha longa



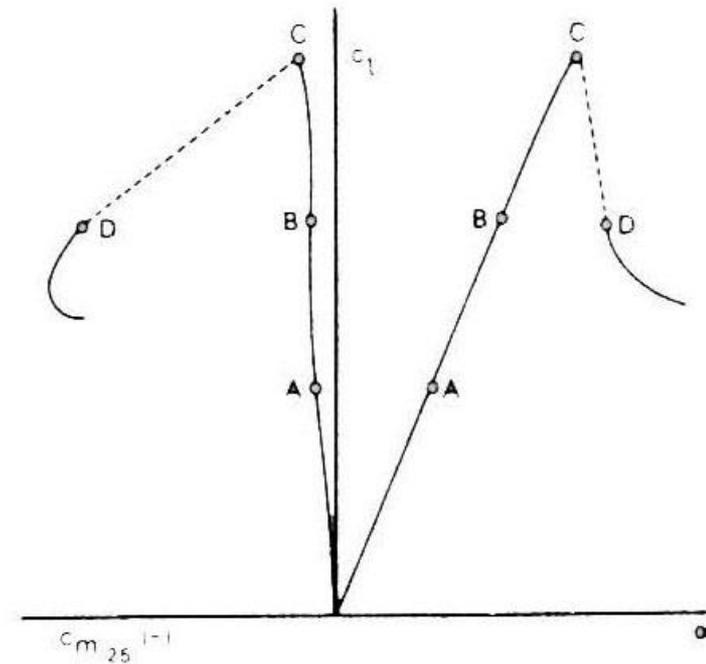
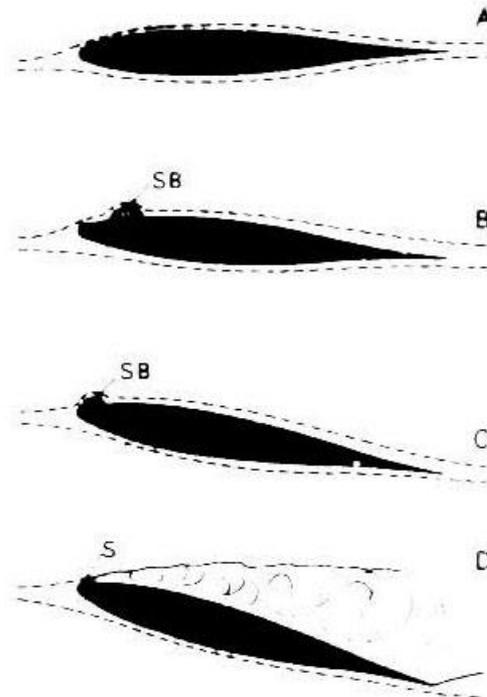
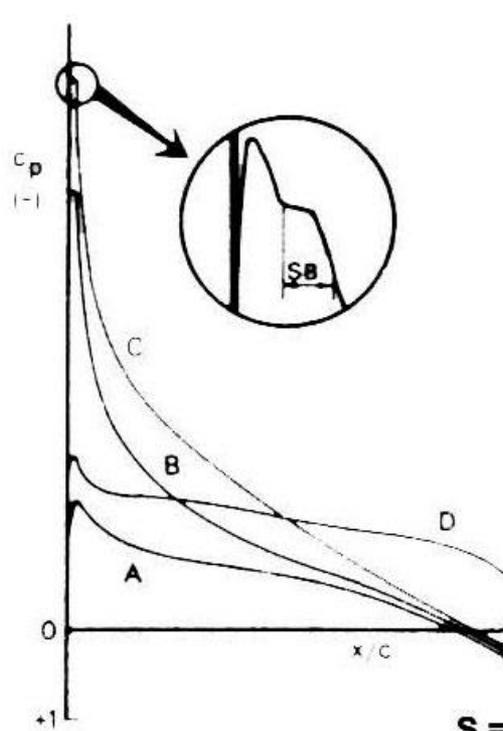


2. Seleção do perfil alar

Comportamento de perda

Seleção do Perfil e da Geometria da Asa e da Cauda

TIPO II PERDA NO BORDO DE ATAQUE



S = separação; SB = bolha curta; LB = bolha longa

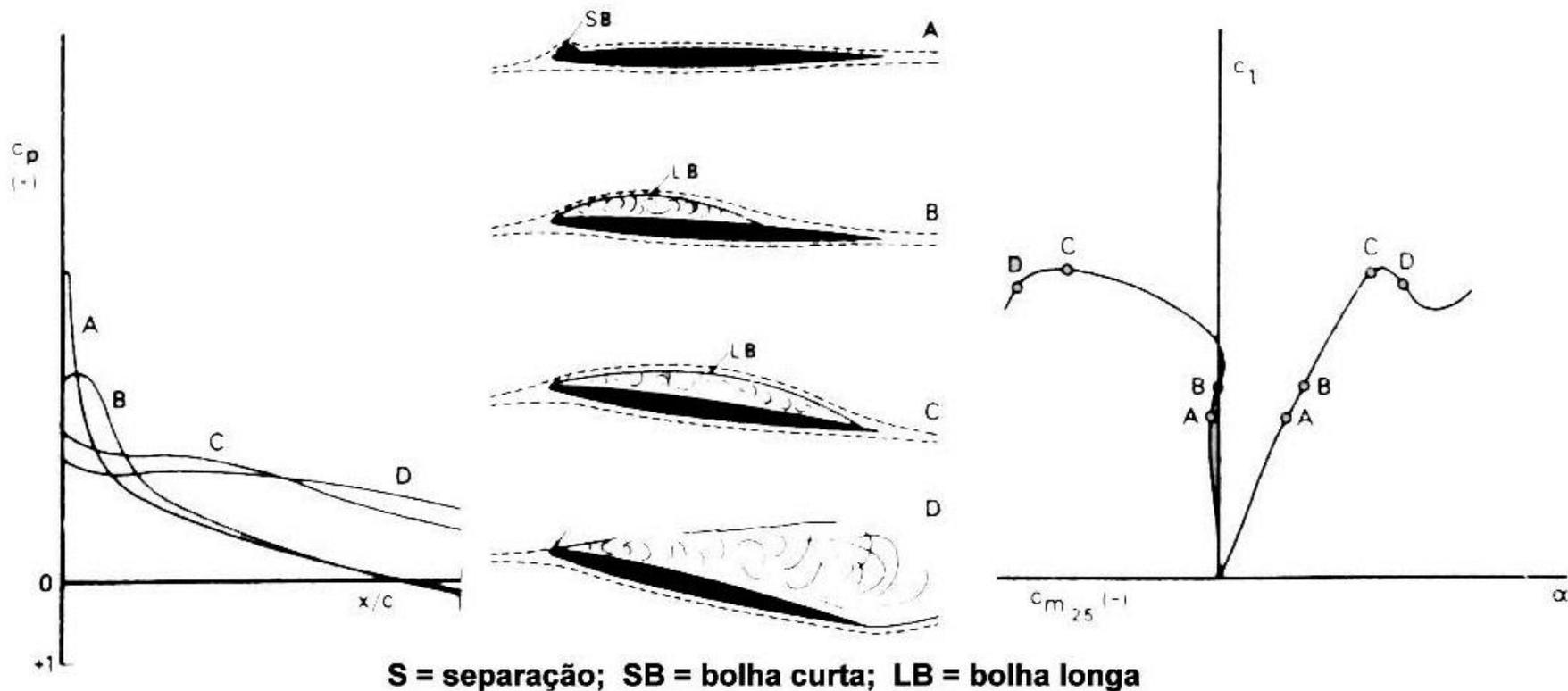


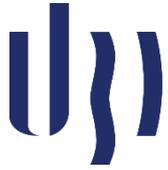
2. Seleção do perfil alar

Comportamento de perda

Seleção do Perfil e da Geometria da Asa e da Cauda

TIPO III PERDA DE PERFIL FINO



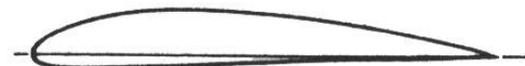


2. Seleção do perfil alar

Comportamento de perda

- Comportamento de perfis NACA para Re de 6×10^6 :

Seleção do Perfil e da Geometria da Asa e da Cauda



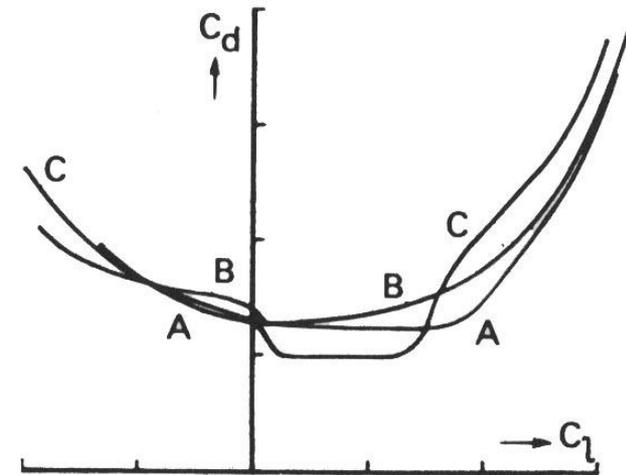
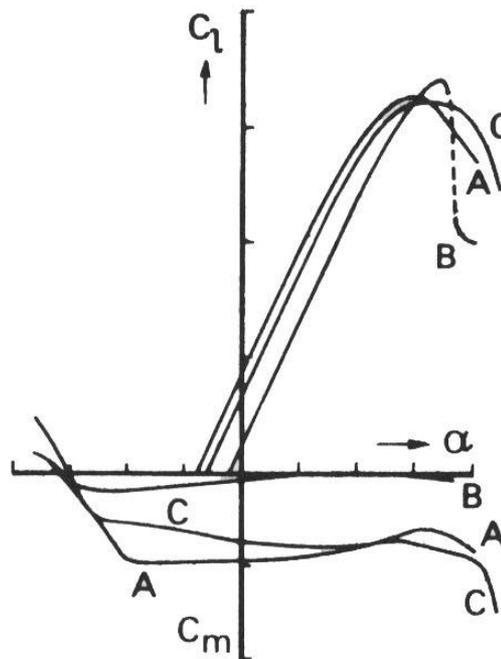
A : NACA 4412



B : NACA 23015



C : NACA 64₂-415





2. Seleção do perfil alar

Comportamento de perda

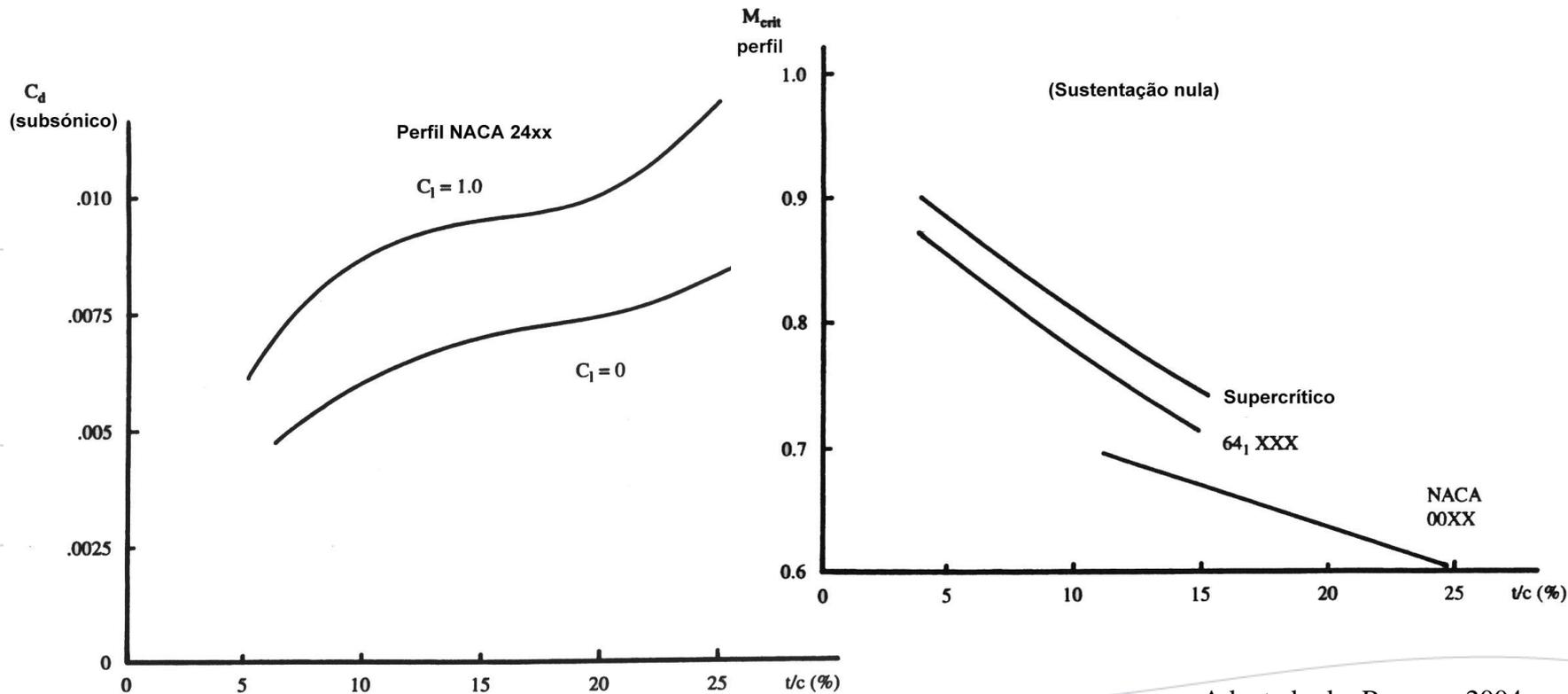
- A geometria da asa pode modificar o comportamento na perda:
 - Efeito da torção geométrica ou aerodinâmica:
 - Reduzindo a incidência na ponta pode atrasar a perda na ponta em relação à raiz proporcionando uma perda mais suave
 - Por outro lado mantém-se a autoridade dos ailerons em atitudes extremas
 - O uso de perfis diferentes ao longo da envergadura pode ser usado com o mesmo objetivo
 - Efeito do alongamento e enflechamento:
 - Para A elevados e Λ reduzidos as características de perda do perfil são mais importantes (efeito 2D)
 - Para A reduzidos e Λ elevados os efeitos tridimensionais do escoamento são mais importantes (efeito 3D)



2. Seleção do perfil alar

Espessura relativa

- Efeito de t/c no arrasto
- Efeito de t/c no Mach crítico



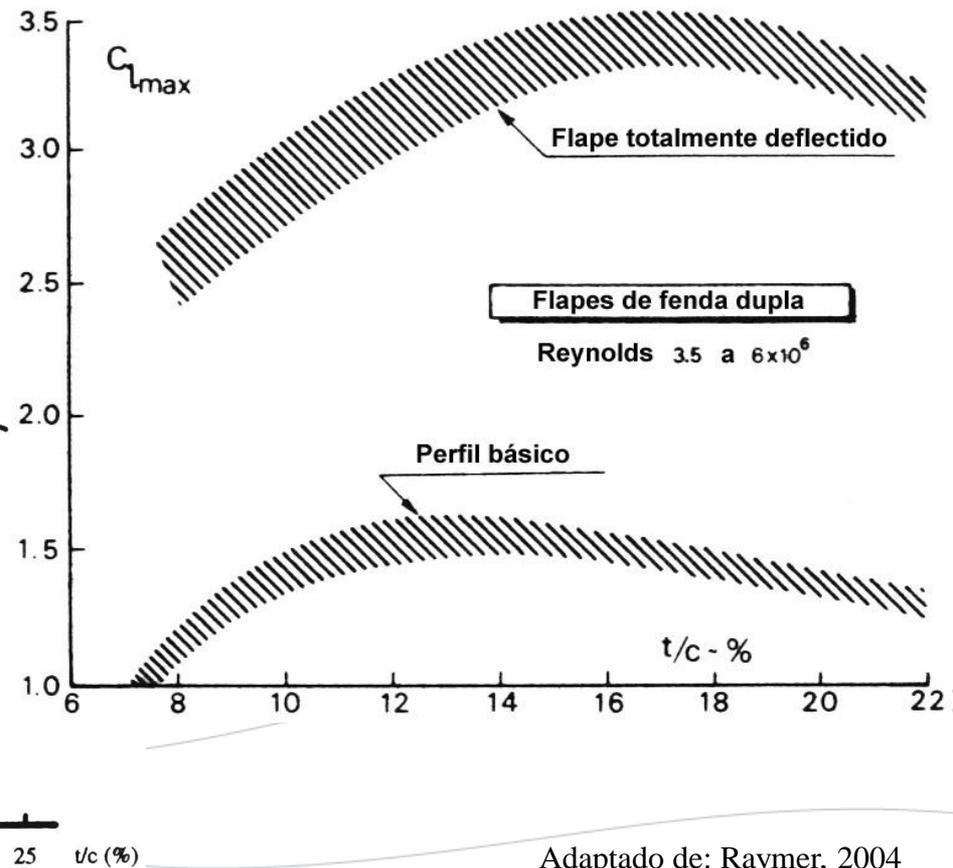
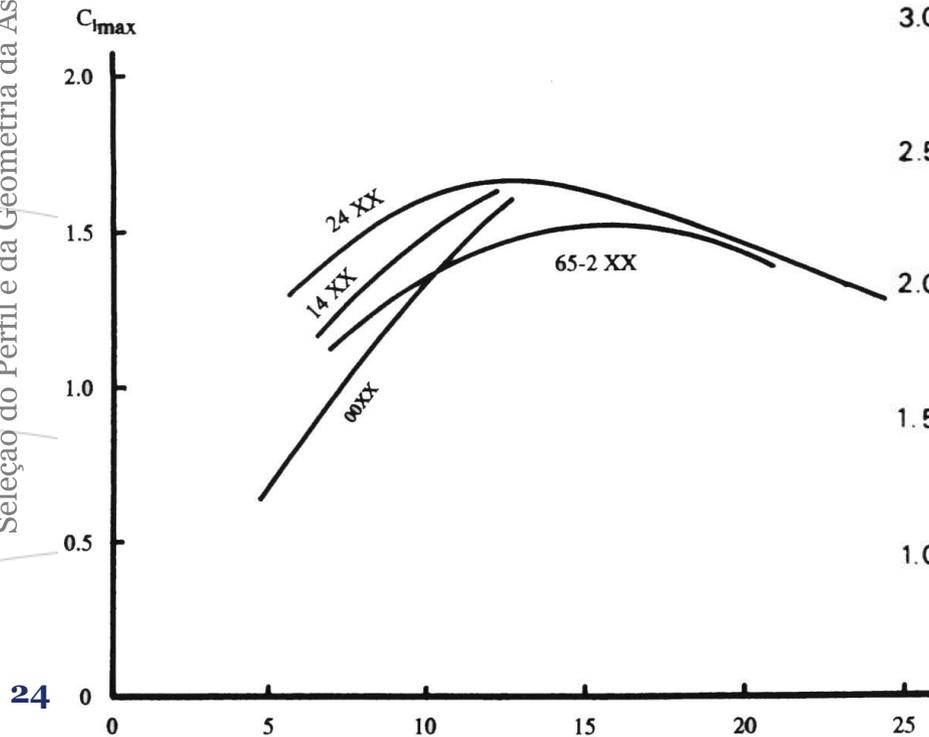


2. Seleção do perfil alar

Espessura relativa

- Efeito de t/c no C_{lmax}

Seleção do Perfil e da Geometria da Asa e da Cauda



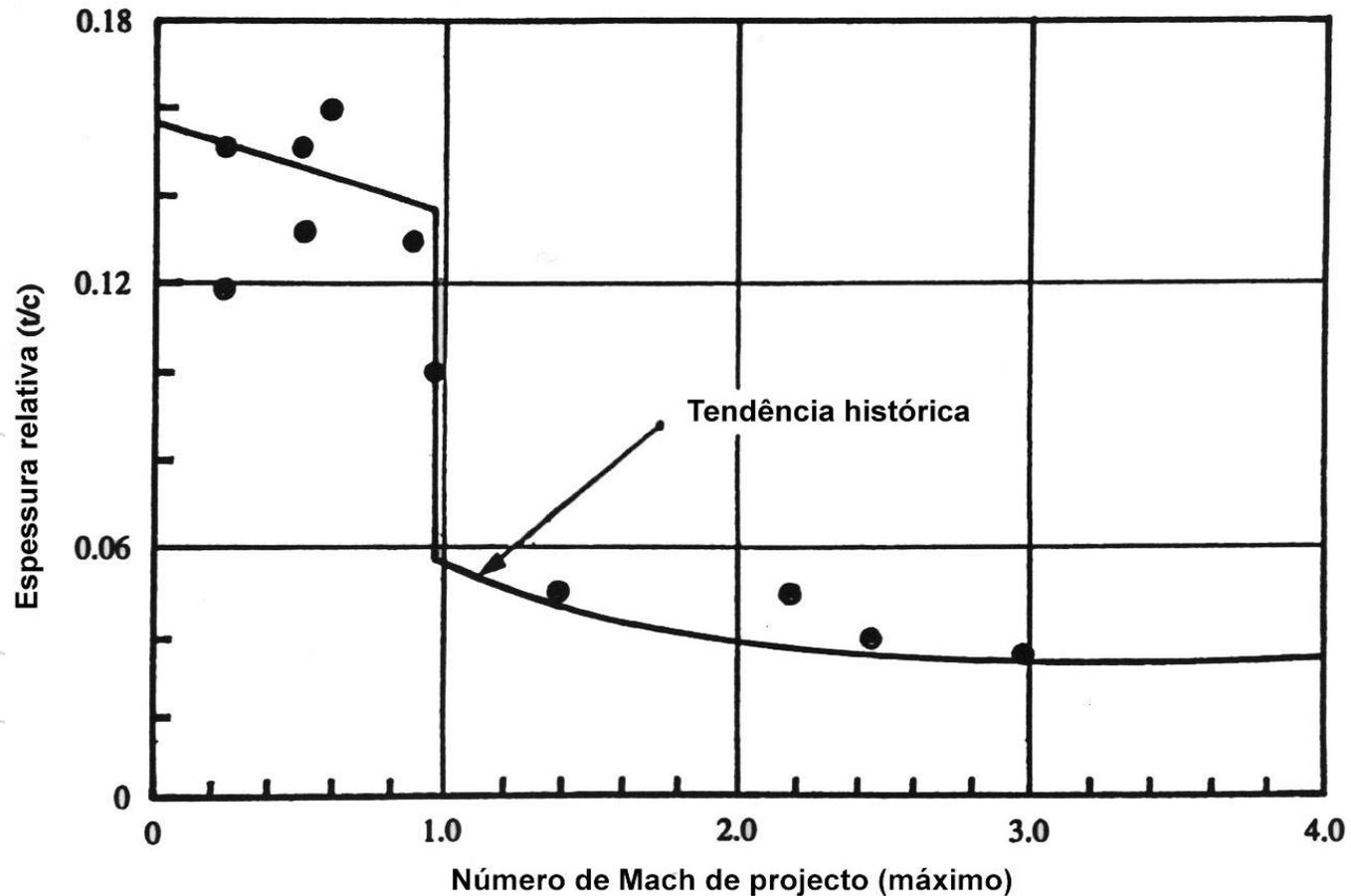
Adaptado de: Raymer, 2004



2. Seleção do perfil alar

Espessura relativa

- Tendência histórica de t/c





2. Seleção do perfil alar

Espessura relativa

- t/c afeta o raio do bordo de ataque, logo influencia o C_{lmax} e as características de perda:
 - t/c elevados para A elevados e Λ baixos
 - t/c reduzidos para A reduzidos e Λ elevados
- Efeito de t/c no peso:

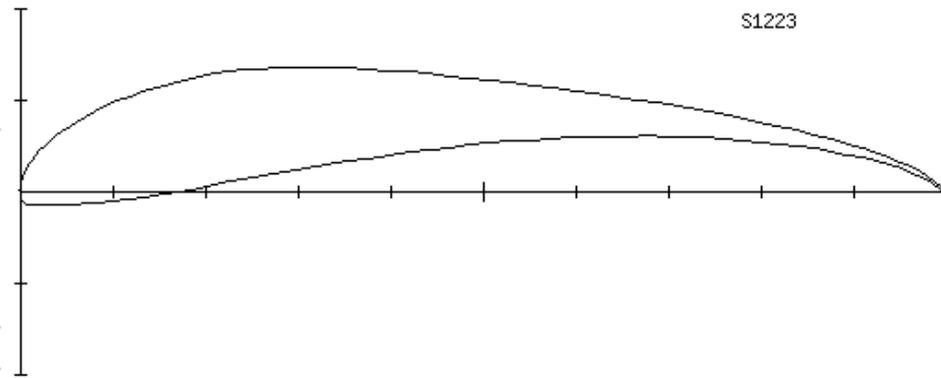
$$W_{wing} \propto \frac{1}{\sqrt{t/c}}$$



2. Seleção do perfil alar

Outros aspectos importantes

- Espessura (espessura relativa do perfil) – resistência e rigidez estrutural
- Volume interno (área do perfil) – espaço para combustível, por exemplo
- Forma do bordo de fuga - facilidade de fabricação





2. Seleção do perfil alar

Função de seleção

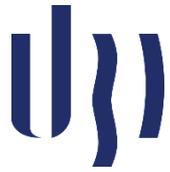
- Definir uma função de mérito para selecionar entre perfis diferentes.
- Por exemplo, maximizar:

$$f = \sum_{j=1}^{n_1} w_j \left(\frac{a}{a_{ref}} \right)_j + \sum_{j=n_1+1}^{n_1+n_2} w_j \left(\frac{b_{ref}}{b} \right)_{(j-n_1)}$$

$$1 = \sum_{j=1}^{n_1+n_2} w_j$$

$a_j, j = 1, n_1$, parâmetros a maximizar

$b_{(j-n_1)}, j = n_1 + 1, n_1 + n_2$, parâmetros a minimizar



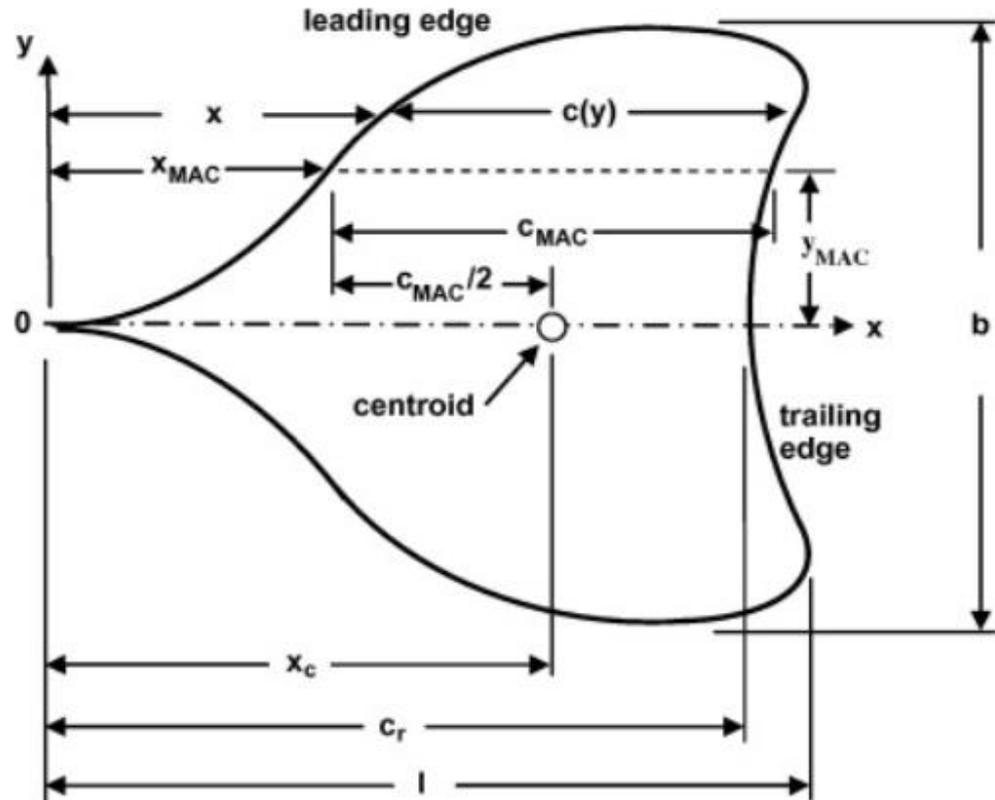
3. Geometria da asa

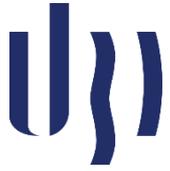
$$S = \int_{-b/2}^{b/2} c(y) dy = 2 \int_0^{b/2} c(y) dy$$

$$c_{MAC} = \frac{\int_0^{b/2} c^2 dy}{\int_0^{b/2} c dy} = \frac{2}{S} \int_0^{b/2} c^2 dy$$

$$x_c = \frac{2}{S} \int_0^{b/2} (cx_{LE} + \frac{1}{2}c^2) dy$$

$$x_c = x_{MAC} + \frac{1}{2}c_{MAC}$$

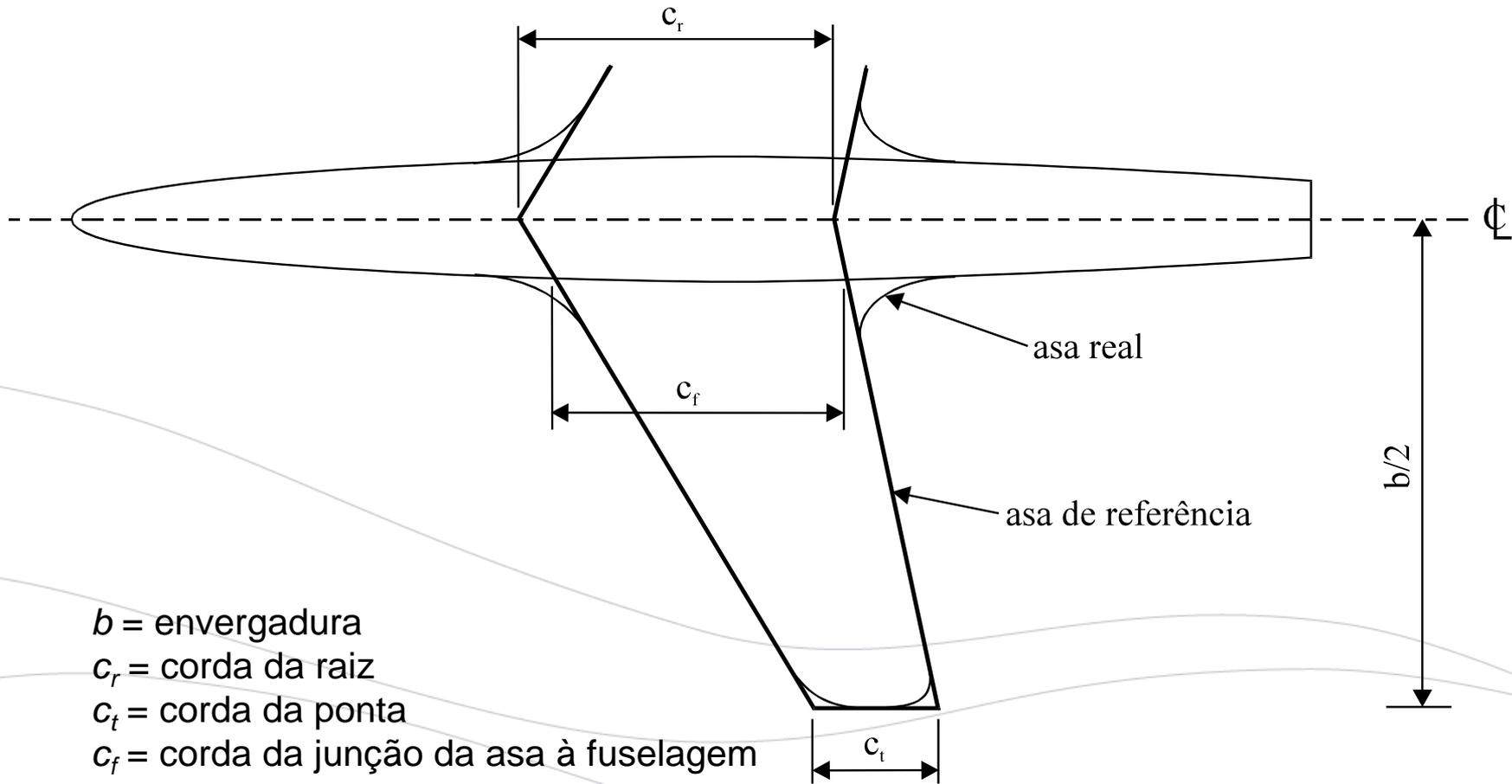




3. Geometria da asa

Forma em planta

Seleção do Perfil e da Geometria da Asa e da Cauda

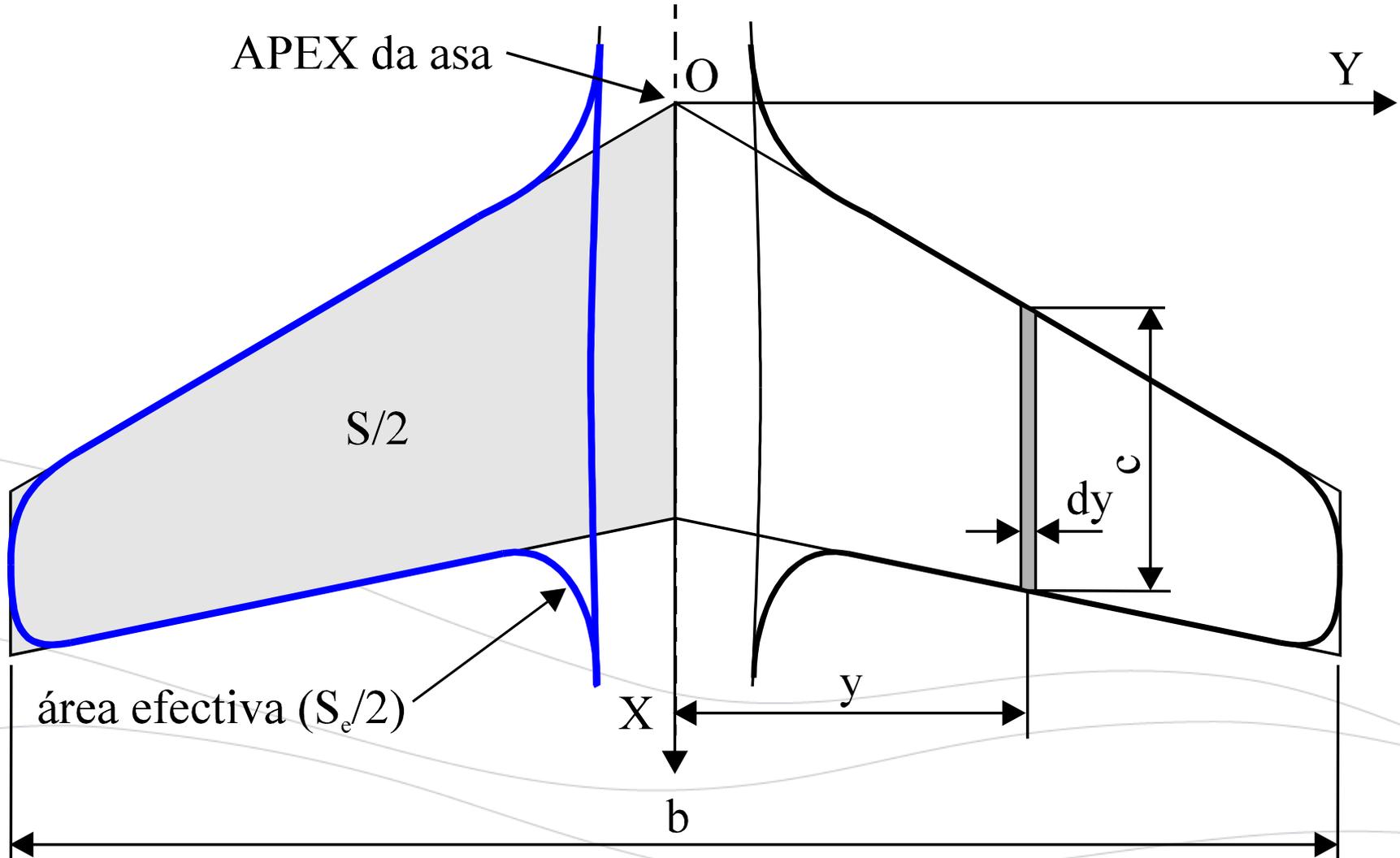




3. Geometria da asa

Forma em planta

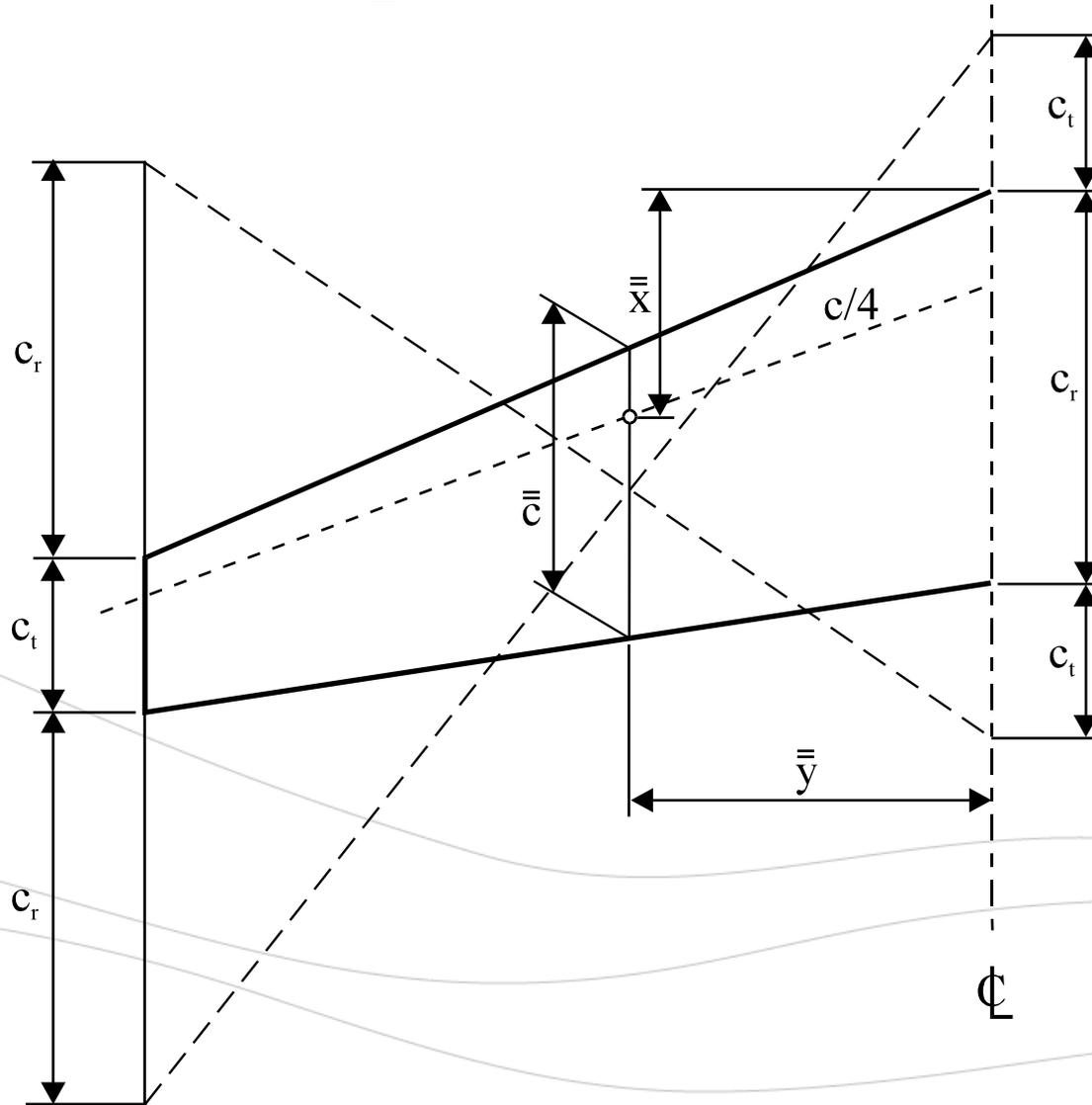
Seleção do Perfil e da Geometria da Asa e da Cauda





3. Geometria da asa

Forma em planta





3. Geometria da asa

Parâmetros da asa

- Asa trapezoidal
 - A – razão de aspecto – b^2/S
 - t/c – espessura relativa
 - λ – afilamento – c_t/c_r
 - Dados W/S , A e λ :
 - $S = W/(W/S)$, $b = (AS)^{0,5}$, $c_r = 2S/[b(1+\lambda)]$, $c_t = \lambda c_r$
 - $\text{tg}(\Lambda_{LE}) = \text{tg}(\Lambda_{c/4}) + (1-\lambda)/[A(1+\lambda)]$
 - $c_{AERO} = (2/3)c_r(1+\lambda+\lambda^2)/(1+\lambda)$
 - $y_{AERO} = (b/6)(1+2\lambda)/(1+\lambda)$
 - Posição típica do c. a.: $0,25c_{AERO} - M < 1$; $0,40c_{AERO} - M > 1$

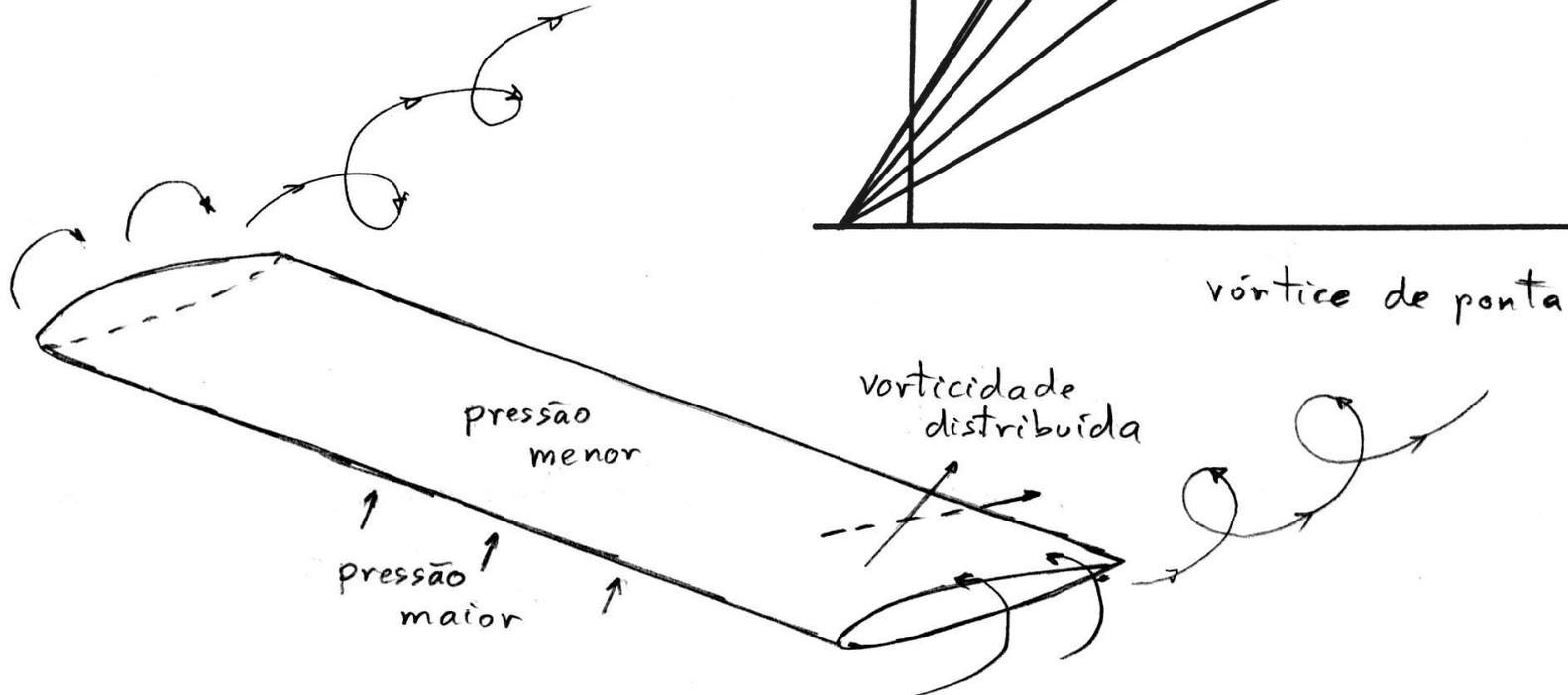
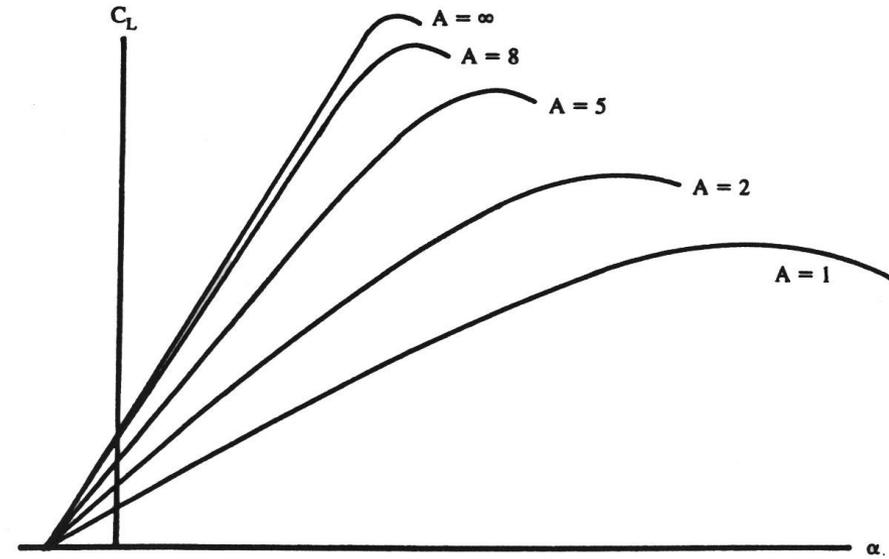


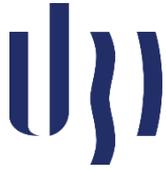
3. Geometria da asa

Razão de aspecto

- $A = b^2/S$;
- Efeito de A no peso:

$$W_{wing} \propto \sqrt{A}$$





3. Geometria da asa

Razão de aspecto

- Valores de razão de aspecto típicos:

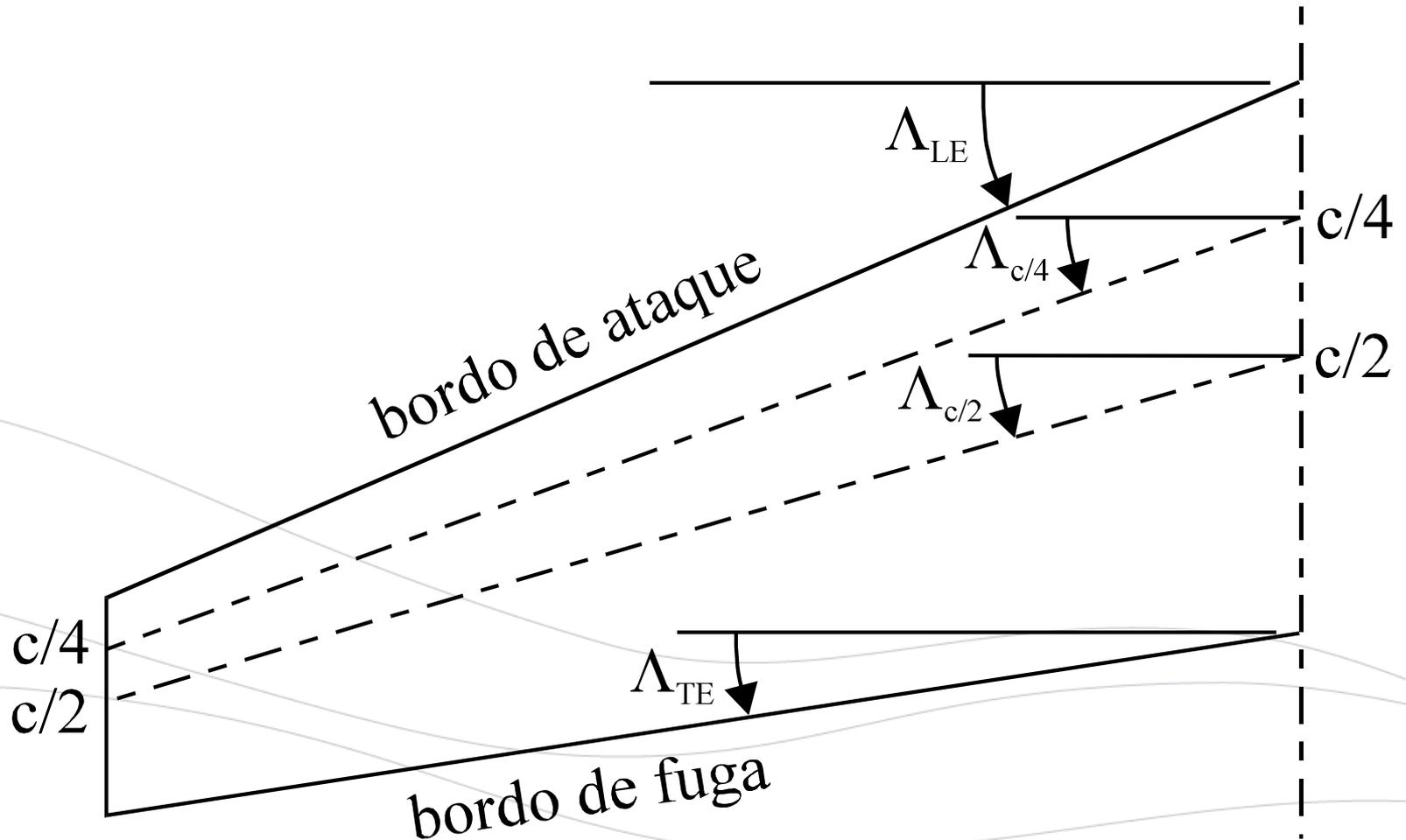
| Alongamento equivalente para planadores = $4,464(L/D)_{\max}^{0,69}$ | | |
|--|--------------------------------|----------|
| <u>Aviões a hélice</u> | <u>Alongamento equivalente</u> | |
| Homebuilt | 6,0 | |
| Aviação geral – monomotor | 7,6 | |
| Aviação geral – bimotor | 7,8 | |
| Agrícola | 7,5 | |
| Turbohélice bimotor | 9,2 | |
| Hidroavião | 8,0 | |
| Alongamento equivalente = aM_{\max}^c | | |
| <u>Jactos</u> | <u>a</u> | <u>C</u> |
| Treino | 4,737 | -0,979 |
| Caça (combate corpo-a-corpo) | 5,416 | -0,622 |
| Caça (outro) | 4,110 | -0,622 |
| Transporte militar/bombardeiro | 5,570 | -1,075 |
| Transporte civil | 7,500 | 0,000 |



3. Geometria da asa

Enflechamento

Seleção do Perfil e da Geometria da Asa e da Cauda



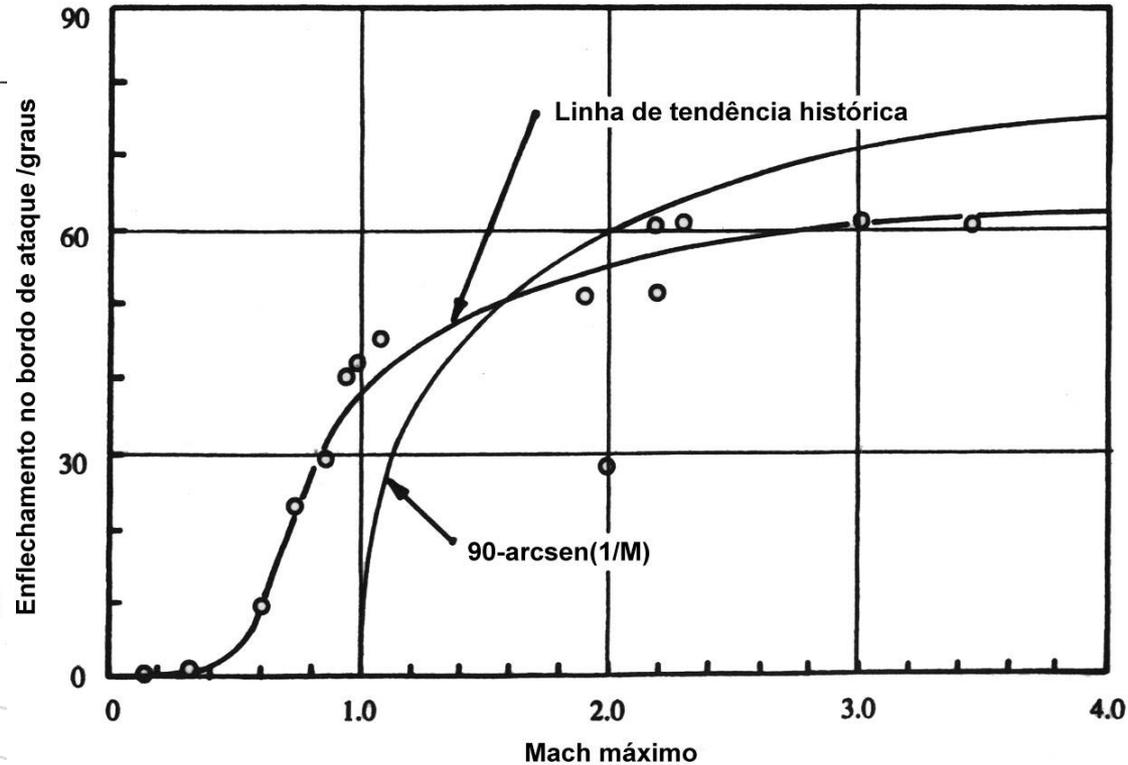
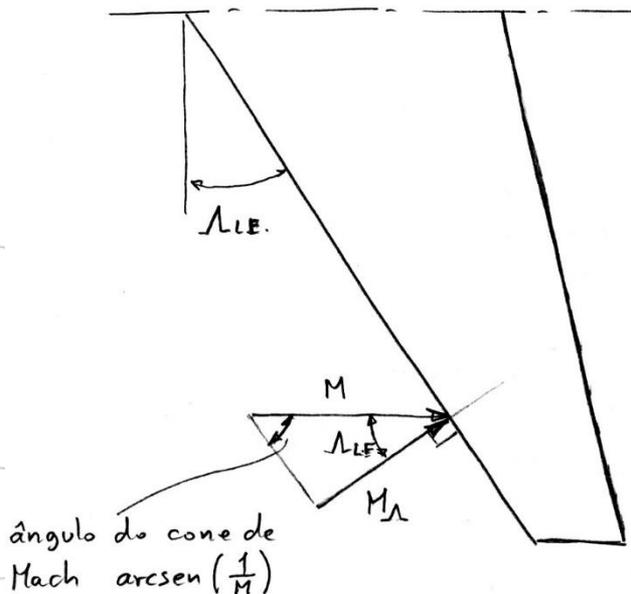


3. Geometria da asa

Enflechamento

- Tendência histórica do enflechamento:

Seleção do Perfil e da Geometria da Asa e da Cauda

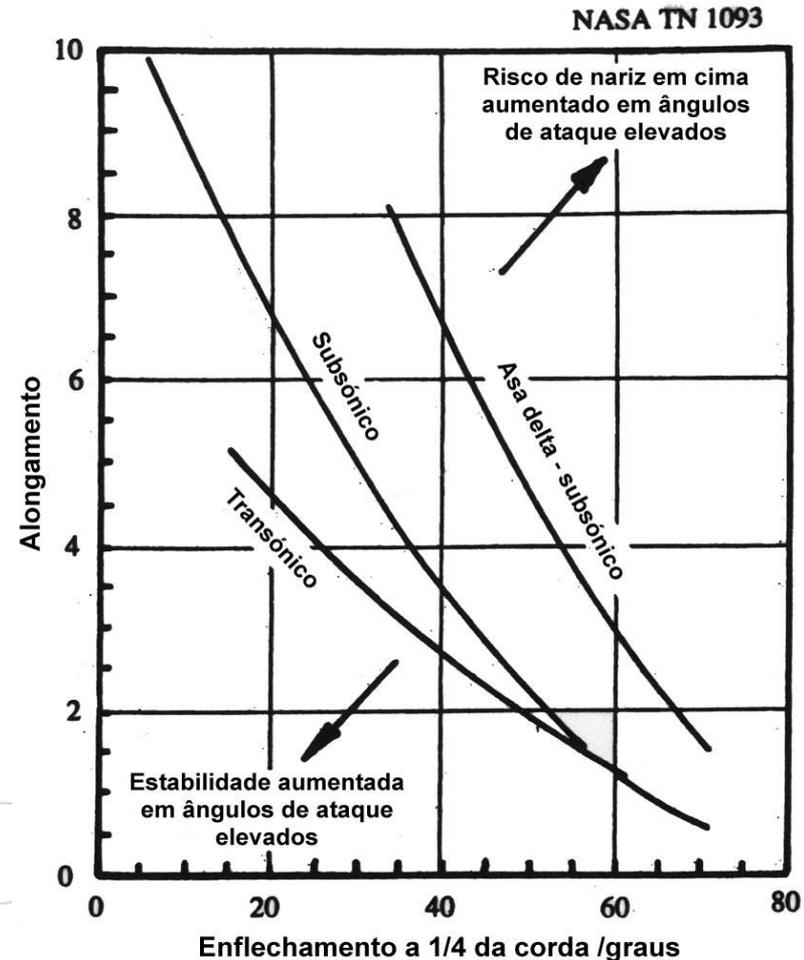




3. Geometria da asa

Enflechamento

- Aspectos a considerar na escolha do enflechamento:
 - $C_{Lmax} = C_{Lmax\Lambda=0} \cos \Lambda$;
 - Efeito da estrutura e fixação da asa à fuselagem;
 - Estabilidade lateral: 10° de enflechamento correspondem a 1° de diedro;
 - Estabilidade em ângulos de ataque elevados;
 - Localização do ca e do cg;
 - Velocidades elevadas – enflechamento elevado;
 - Cruzeiro, descolagem e aterragem – enflechamento reduzido.

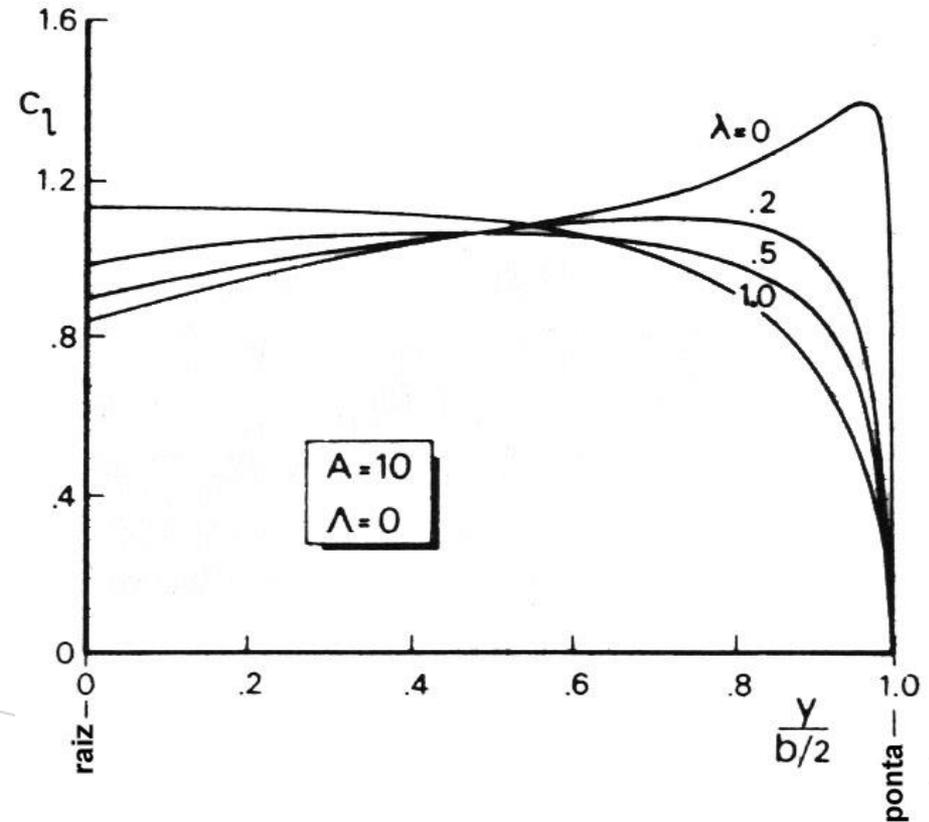




3. Geometria da asa

Afilamento

- $\lambda = c_t/c_r$
- Efeito na distribuição do C_l
- Posição do início da perda:
 - $\eta = 1-\lambda, \eta=y/(b/2)$

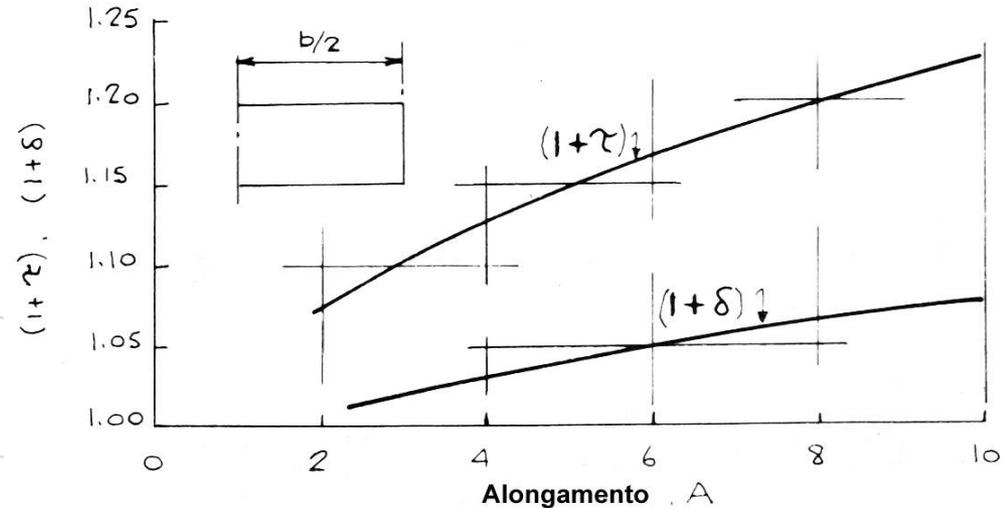
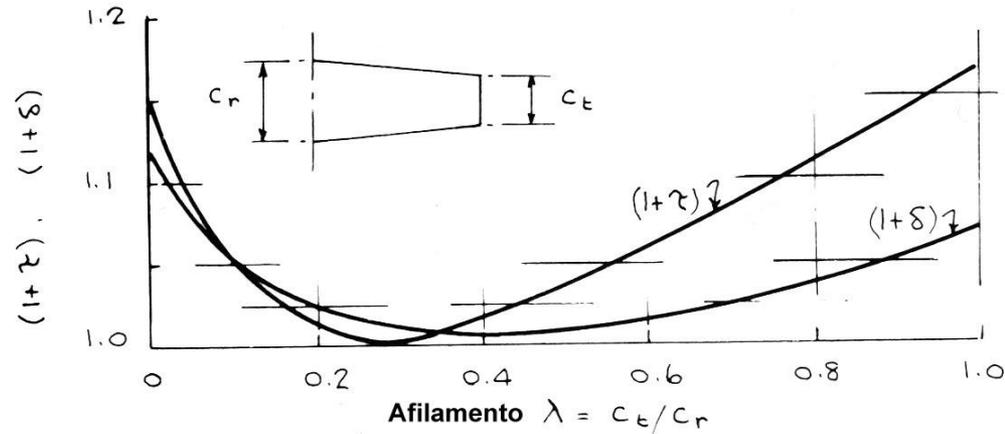




3. Geometria da asa

Afilamento

- Influência na eficiência aerodinâmica:
 - $1/e = (1+\delta)$
 - $C_{Di} = C_L^2 / (\pi A)(1+\delta)$
 - $C_D = C_{D0} + C_{Di}$
 - $1/\varepsilon = (1+\tau)$
 - $\alpha_i = C_L / (\pi A)(1+\tau)$
 - $\alpha = \alpha_0 + \alpha_i$

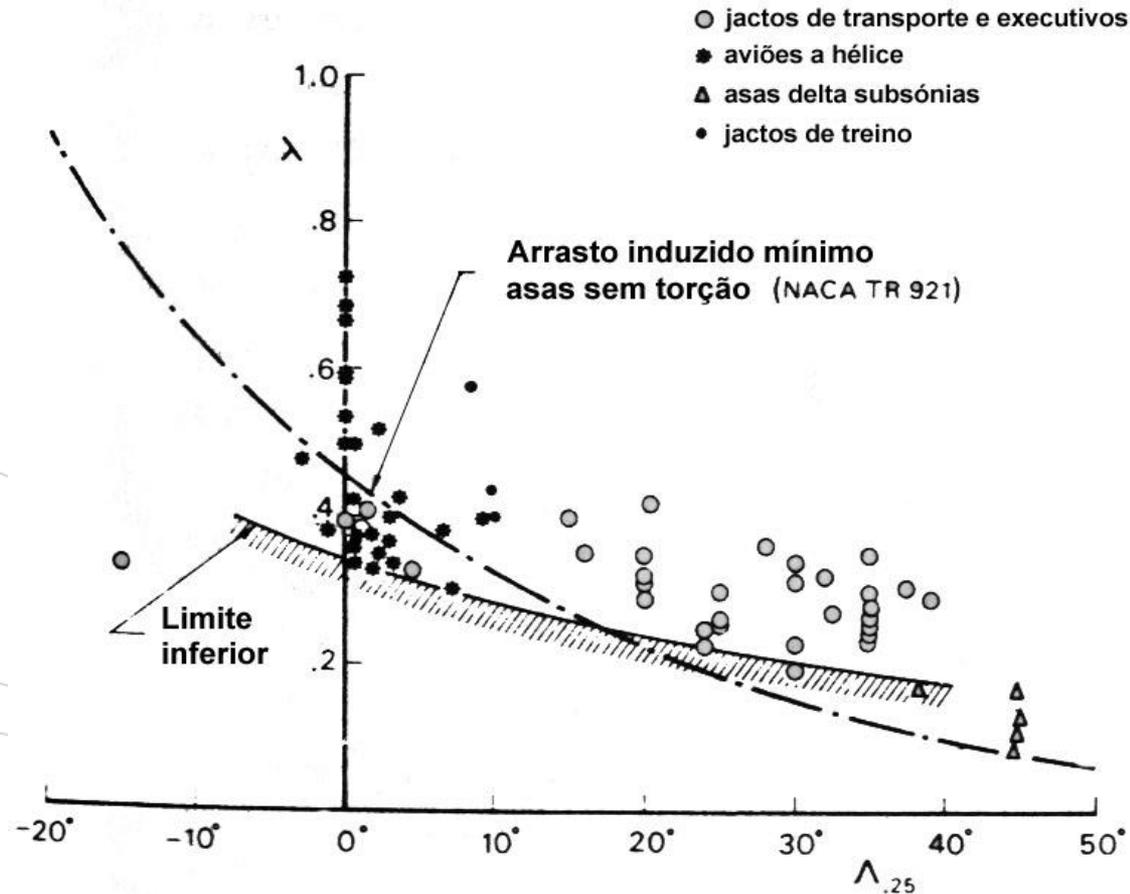




3. Geometria da asa

Afilamento

- Efeito do enflechamento no afilamento:

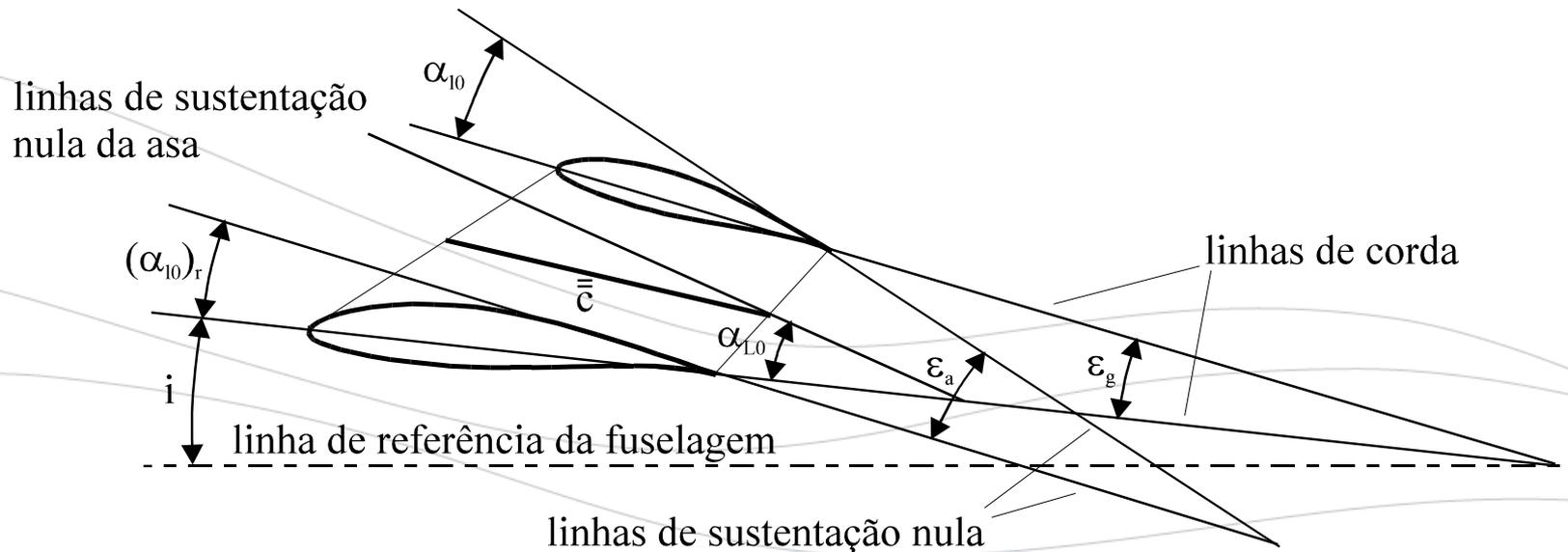




3. Geometria da asa

Torção

- Torção geométrica: $\varepsilon_g = \alpha_t - \alpha_r$
- Torção aerodinâmica : $\varepsilon_a = \varepsilon_g + \alpha_{ot} - \alpha_{or}$
- A torção serve para reduzir o C_l na ponta para evitar a perda e aproximar à distribuição elíptica
- Tipicamente $\varepsilon = -3^\circ$ para asas afiladas

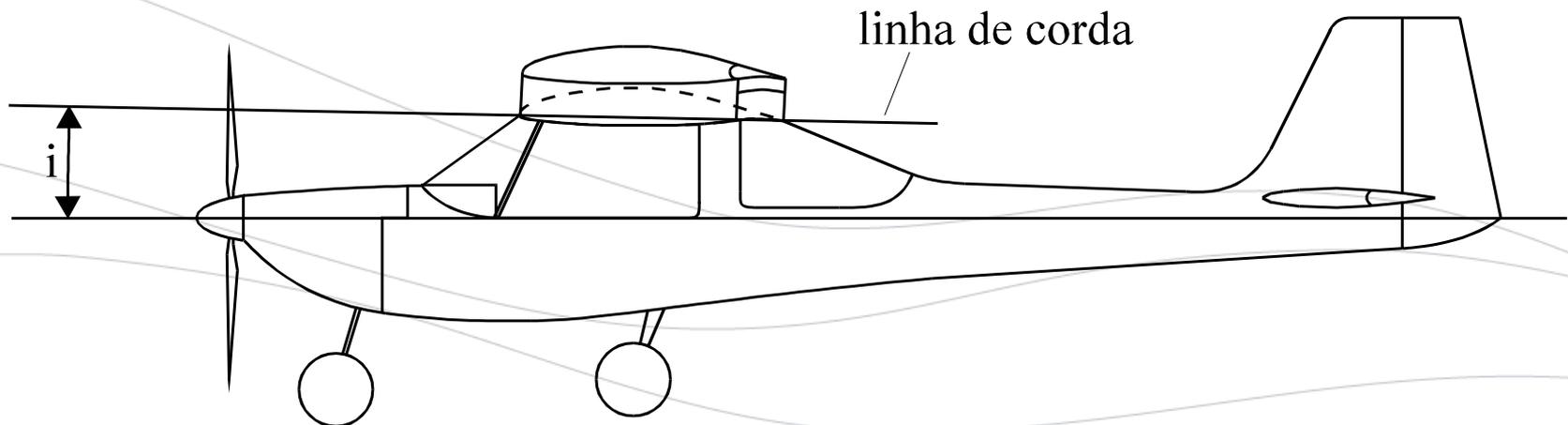




3. Geometria da asa

Incidência

- A incidência na raiz da asa é escolhida para otimizar L/D numa condição de voo tendo em conta a fuselagem
- Para uma asa sem torção tem-se os valores típicos:
 - Aviação geral: 2°
 - Transportes: 1°
 - Aviões militares: 0°
 - Havendo torção (negativa), tem que se aumentar a incidência

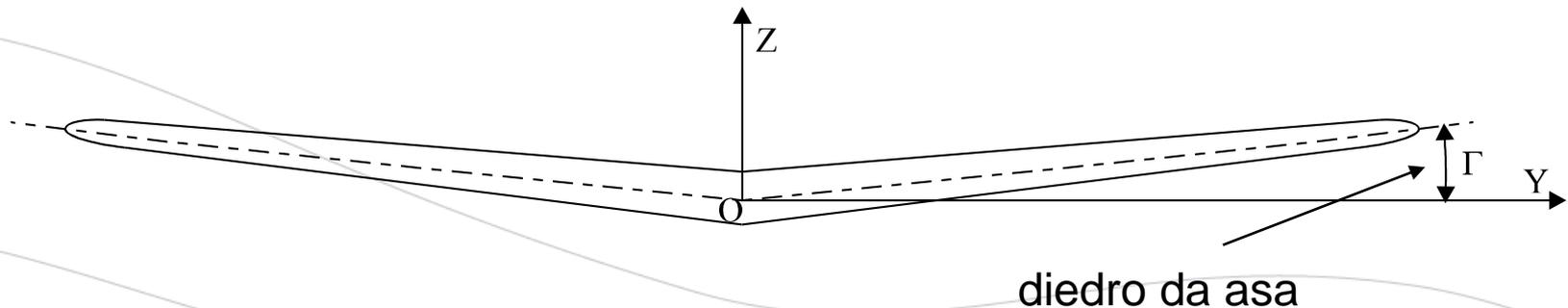




3. Geometria da asa

Diedro

- O diedro é o ângulo formado entre a linha de quarto da corda da asa e o eixo lateral
- O diedro serve para proporcionar estabilidade lateral
- Pode conseguir-se efeito de diedro através da configuração e geometria da aeronave, para além do ângulo de diedro
- Excesso de efeito de diedro produz “Dutch Roll”





3. Geometria da asa

Diedro

- Valores típicos de diedro:

| | Posição da asa | | |
|-------------------------------|----------------|--------|---------|
| | Baixa | Média | Alta |
| Sem enflechamento (civil) | 5 a 7 | 2 a 4 | 0 a 2 |
| Com enflechamento subsónica | 3 a 7 | -2 a 2 | -5 a -2 |
| Com enflechamento supersónica | 0 a 5 | -5 a 0 | -5 a 0 |

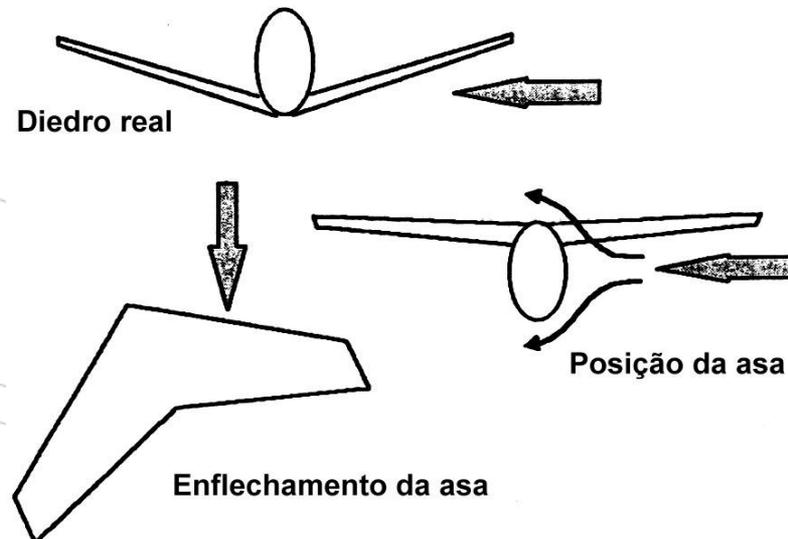


3. Geometria da asa

Diedro

- Contribuições para o efeito de diedro:

| contribuição | ângulo de diedro equivalente [graus] |
|------------------------|--------------------------------------|
| asa alta | 2,0 |
| asa baixa | -3,0 |
| 10 ° de enflechamento | 1,0 |
| E.V. sobre a fuselagem | + |
| E.V. sob a fuselagem | - |





3. Geometria da asa

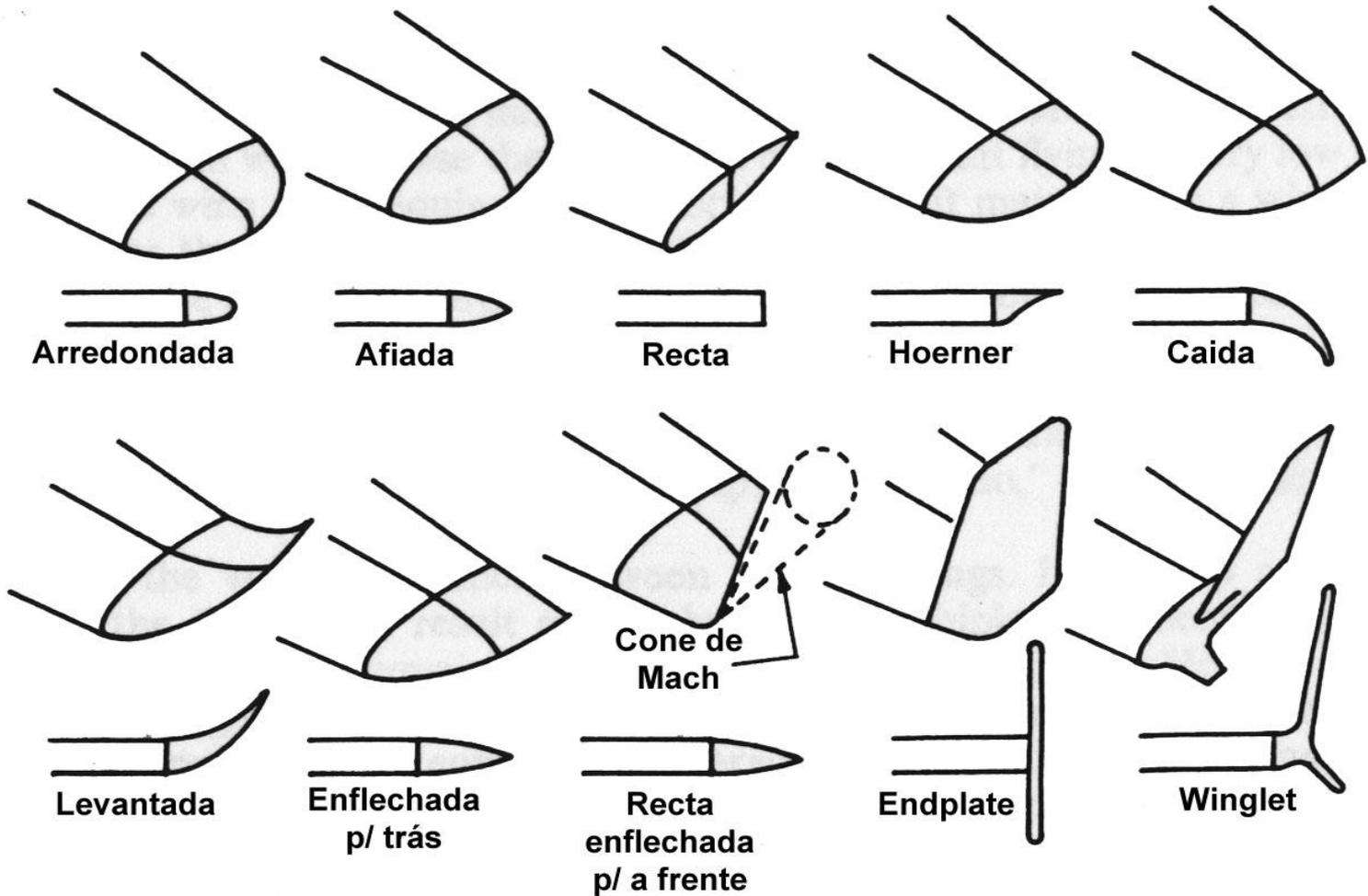
Posição vertical das asas

- A escolha da posição vertical da asa tem em conta os seguintes fatores:
 - Espaço na cabina
 - Espaço para o trem de aterragem
 - Altura do trem de aterragem
 - Estrutura
 - Posição dos motores
 - Distância ao solo
 - Flutuação em caso de amaragem
 - Resistência numa queda
 - Visibilidade em volta
 - Etc..



3. Geometria da asa

Pontas de asa

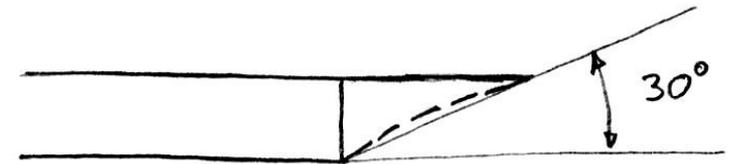




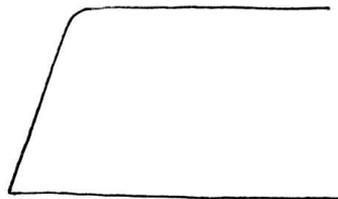
3. Geometria da asa

Pontas de asa

- A forma da ponta de asa deve ter em conta a eficiência aerodinâmica:
 - Incremento da área molhada
 - Facilidade com que permite a passagem do ar do intradorso para o extradorso

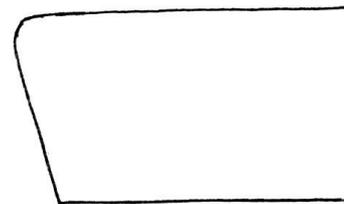


ponta de asa tipo Hoerner



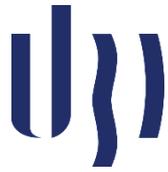
C_D menor

torgão maior



C_D maior

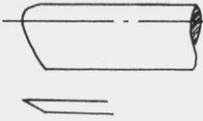
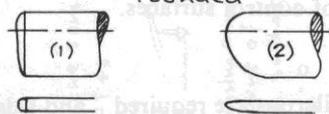
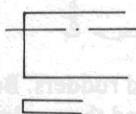
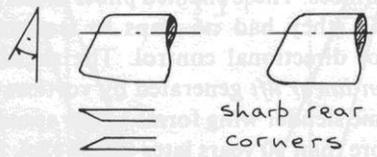
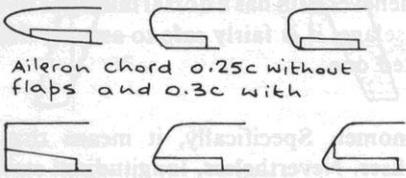
torgão menor



3. Geometria da asa

Pontas de asa

- Efeito no arrasto induzido :

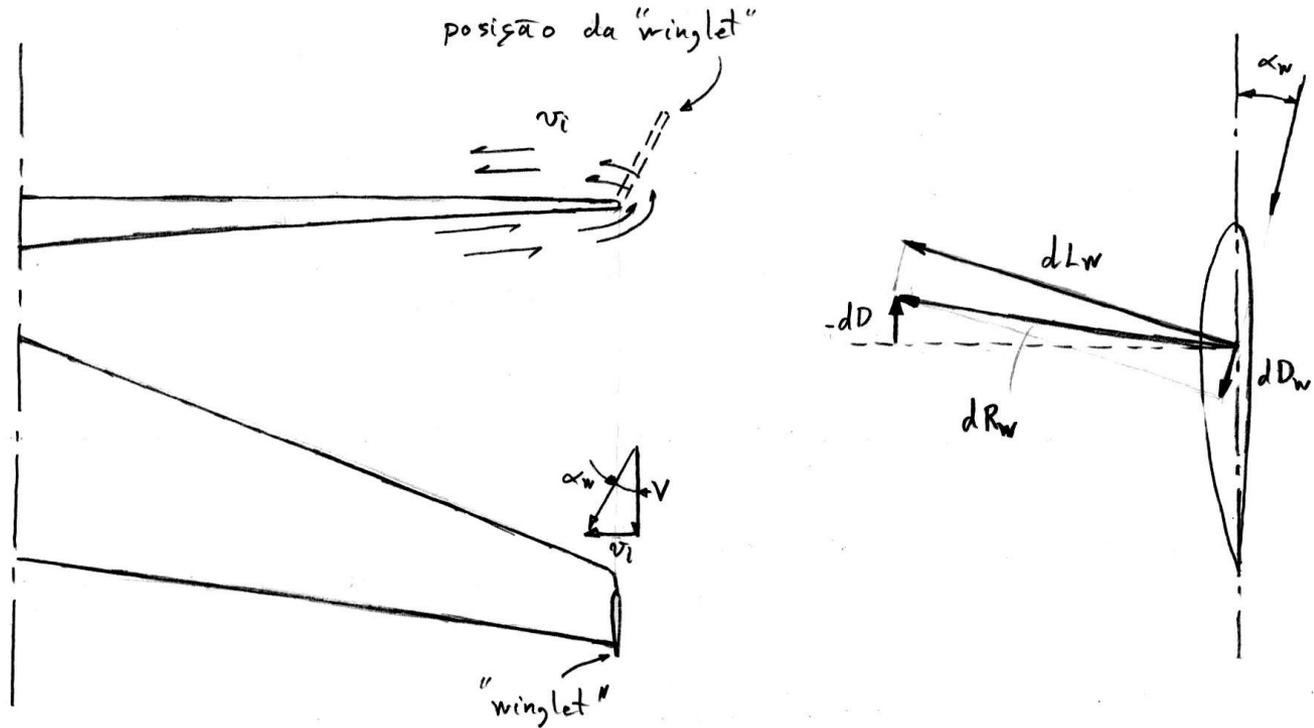
| Tip Shape | Oswald efficiency e percent | $K:K' = 1/e$ |
|---|--|---|
|  <p>Hoerner tip sharp rear corners</p> | 80 | 1.25 |
|  <p>rounded (1) (2)</p> | (1) 75 + (2) 75 - | about 1.33 with (1) slightly more efficient than (2) |
|  <p>square with sharp edges</p> | 81 | 1.23 |
|  <p>sharp rear corners Rake angle $A = 0^\circ$ for $A = \infty$ 2° for $A = 6$ 25° for $A = 1$ to 5</p> | 82 | 1.22 |
|  <p>Aileron chord 0.25c without flaps and 0.3c with</p> | <p>Most efficient region for aileron in terms of: rolling moment/hinge moment is 2/3 to 3/4 semispan outboard Ailerons on the top row are desirable, while those on the bottom row are undesirable because of the high control loads (hinge moments)</p> | |



3. Geometria da asa

Pontas de asa

- “Winglet”:
 - Este dispositivo, para determinados C_L , cria uma força para a frente aproveitando o vento induzido gerado na ponta da asa





3. Geometria da asa

Pontas de asa

- “End plate”:
 - Este dispositivo mantém o C_l mais alto até à ponta sem aumentar a intensidade do vórtice de ponta de asa
 - Aumenta da área molhada

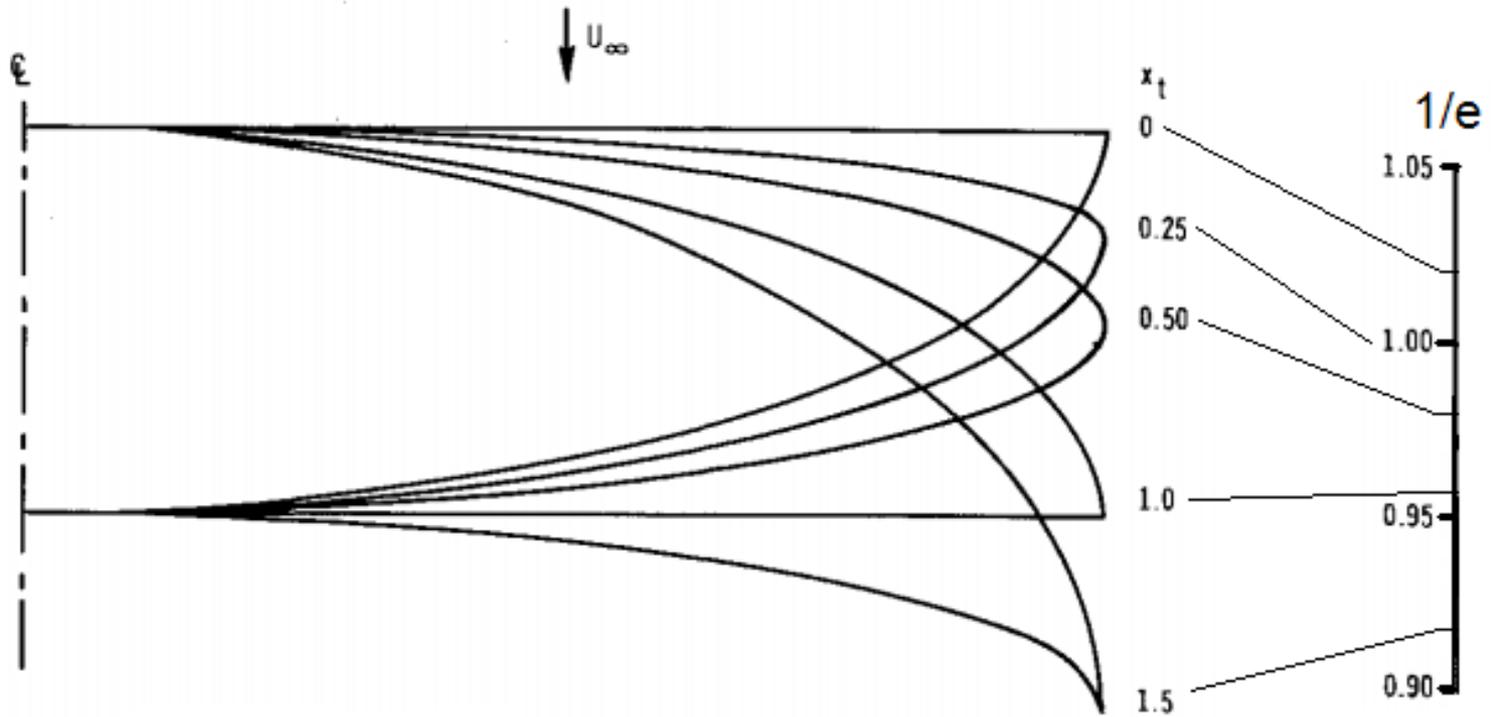




3. Geometria da asa

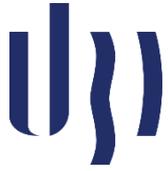
Asas elíticas

Seleção do Perfil e da Geometria da Asa e da Cauda



elliptical wings of $AR=7$.

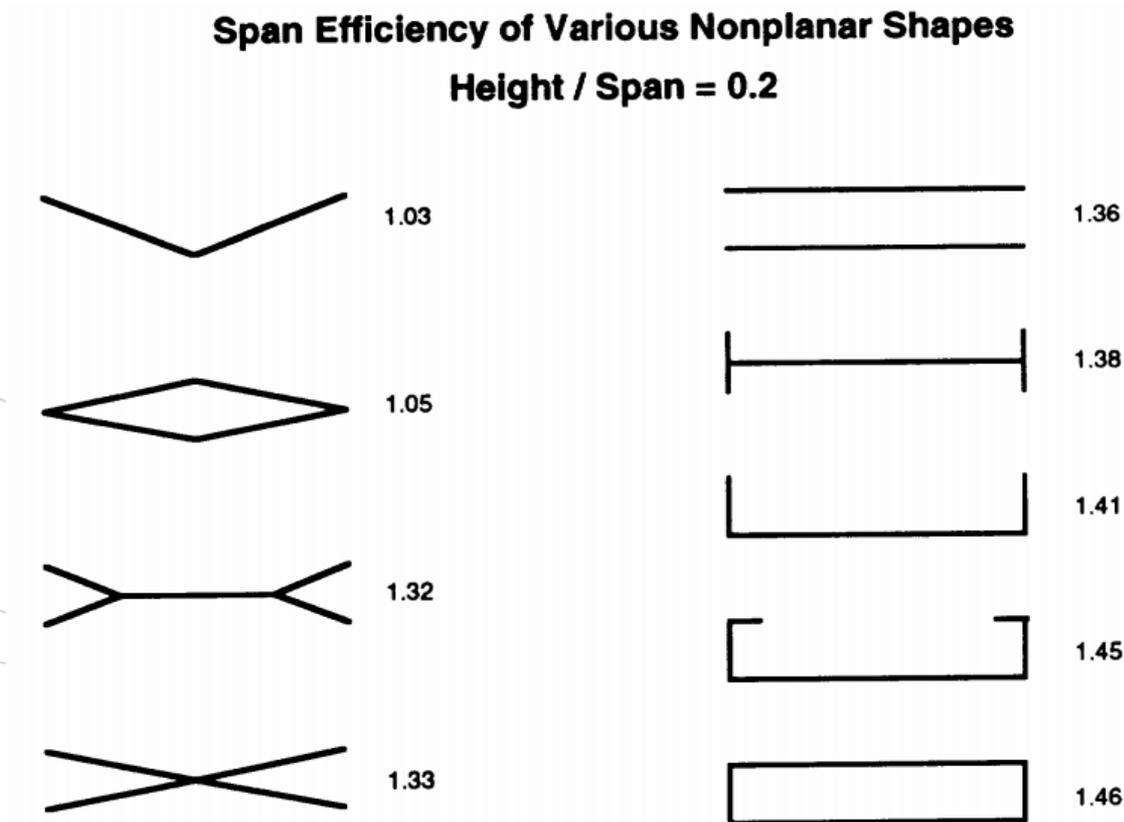
$\alpha = 4^\circ$



3. Geometria da asa

Asas não planares

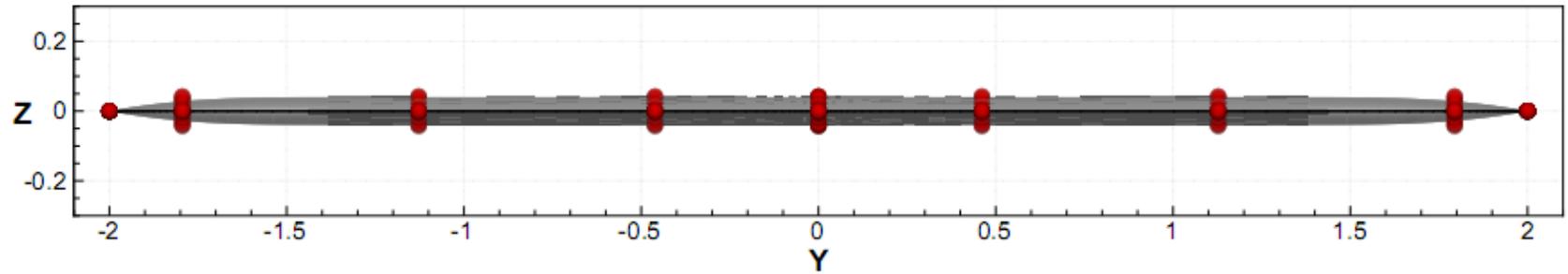
- Resultados para distribuições de sustentação otimizadas:



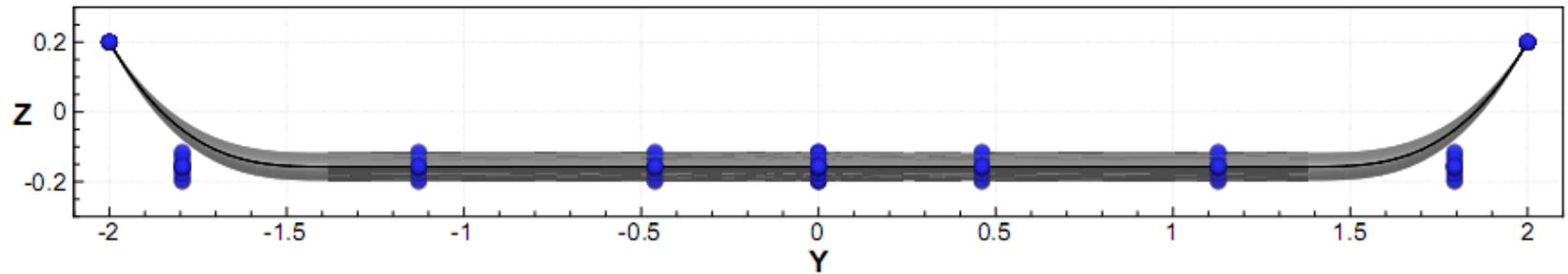


3. Geometria da asa

Asas não planares



(a) Initial flat wing: $C_D = 0.00752$



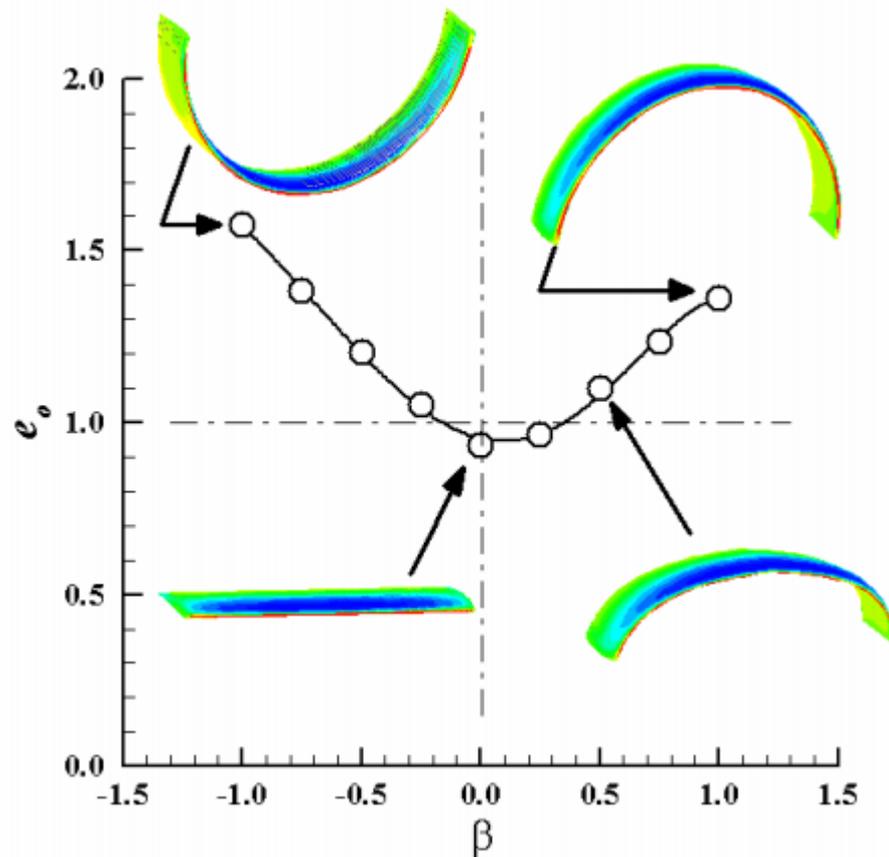
(b) Optimized spanwise vertical shape: $C_D = 0.0069$



3. Geometria da asa

Asas não planares

- Fator de Oswald em função da excentricidade de uma distribuição de diedro elítica:





3. Geometria e configuração da cauda

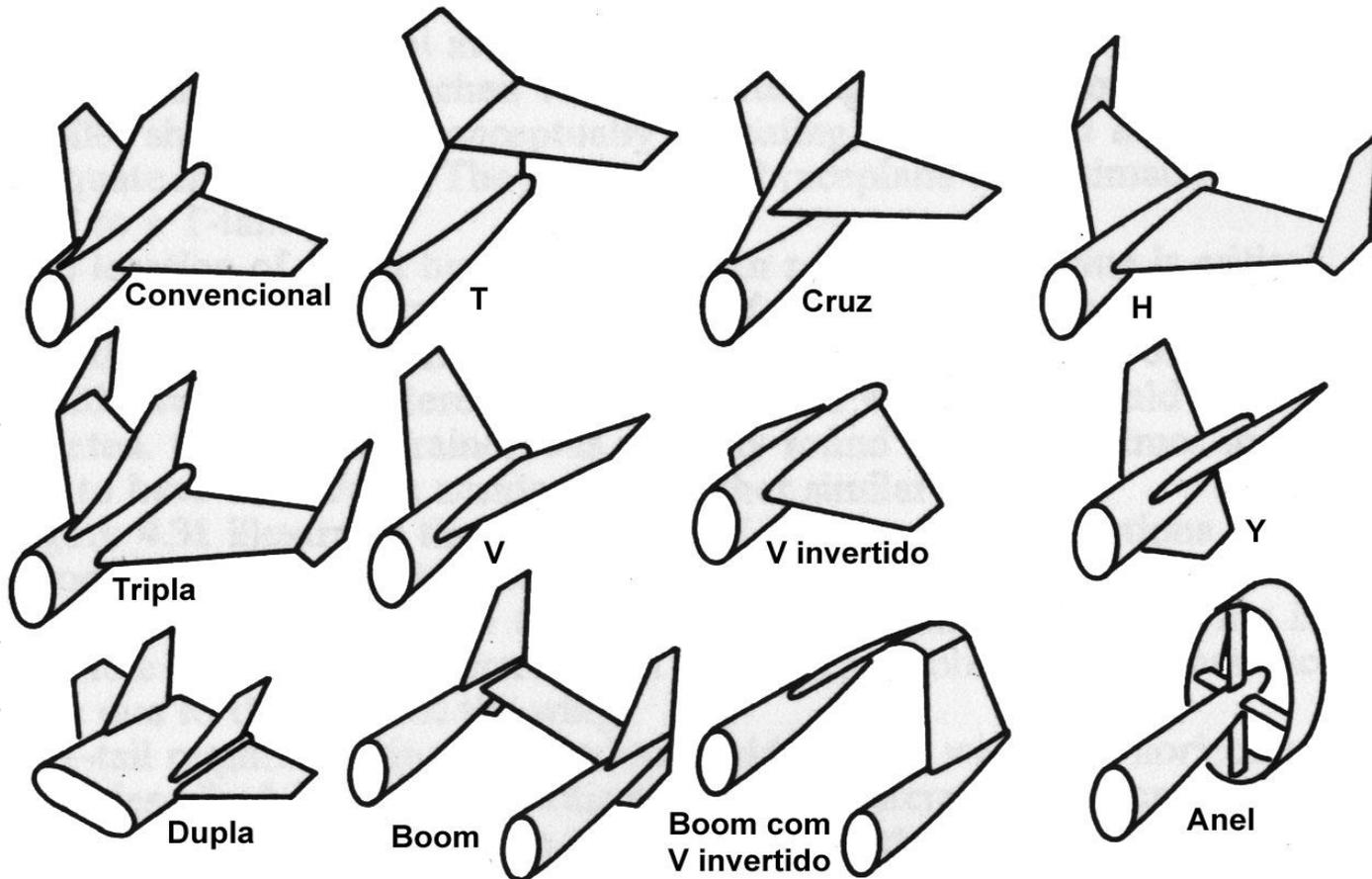
- Funções da cauda:
 - Estabilizar a aeronave (tornar o momento em torno do CG nulo)
 - Efeito da hélice – efeito de guinada e esteira da hélice
 - Falha de motor
 - Vento cruzado
 - Controlar (manobrar) a aeronave em arfagem (empenagem horizontal) e em guinada (empenagem vertical)



3. Geometria e configuração da cauda

Configuração da cauda

- Tipos de cauda:

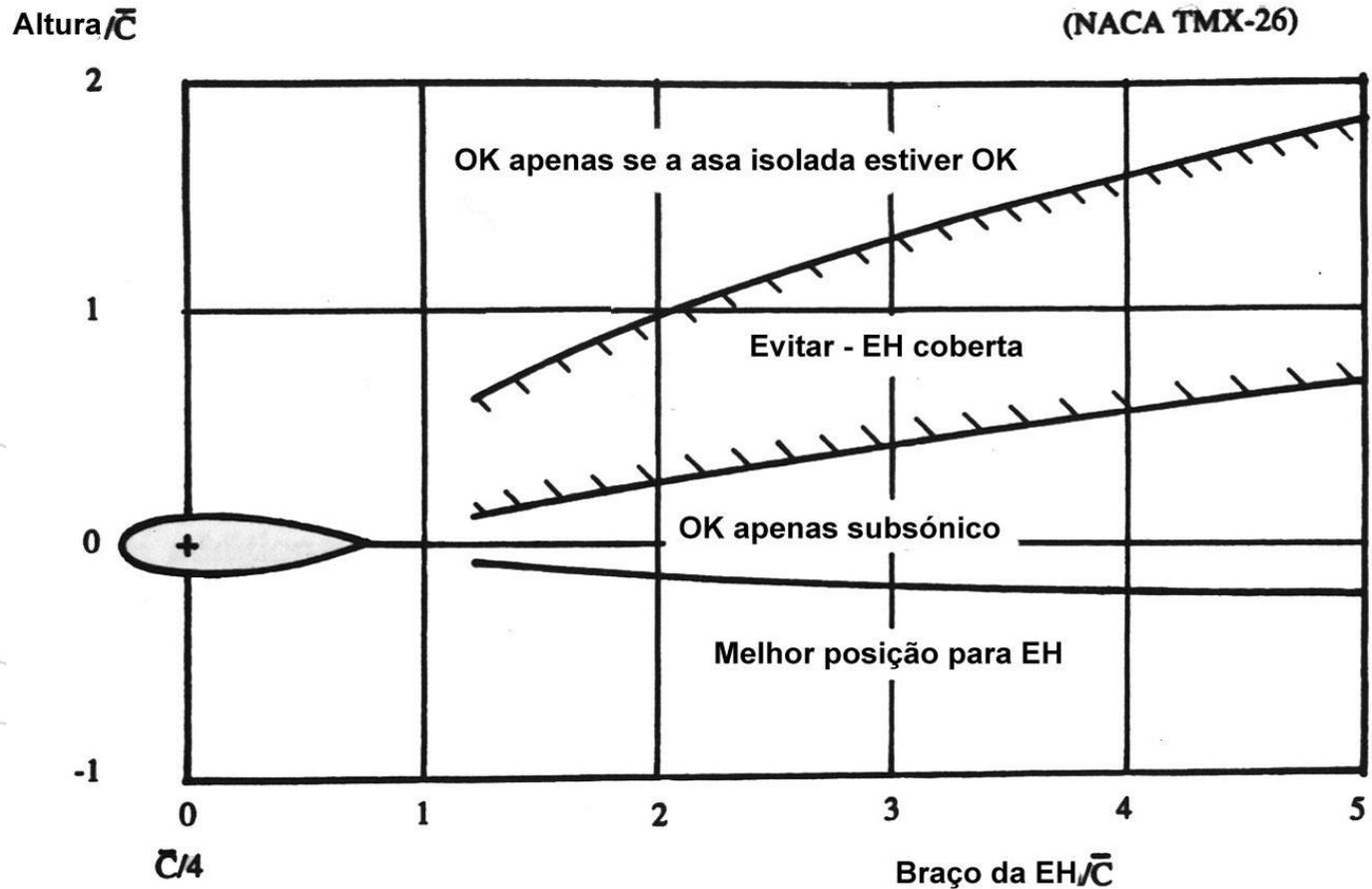




3. Geometria e configuração da cauda

Configuração da cauda

- Posição da empenagem horizontal:

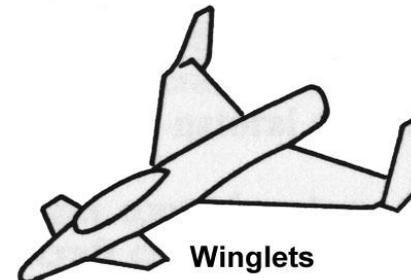
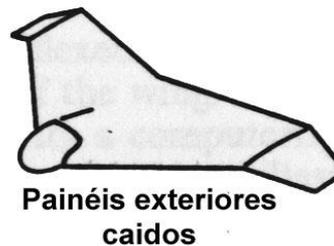
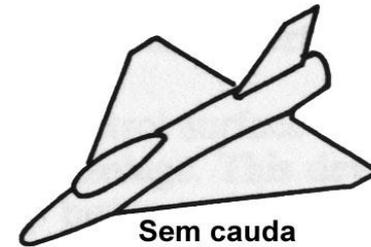
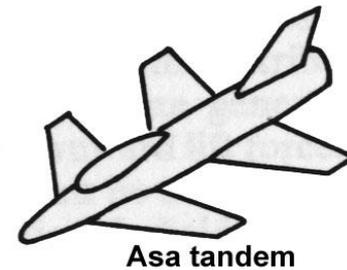
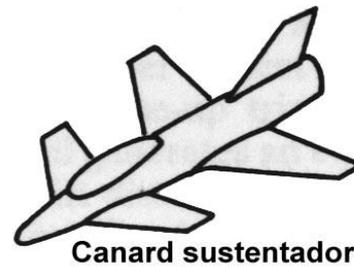




3. Geometria e configuração da cauda

Configuração da cauda

- Outras configurações:

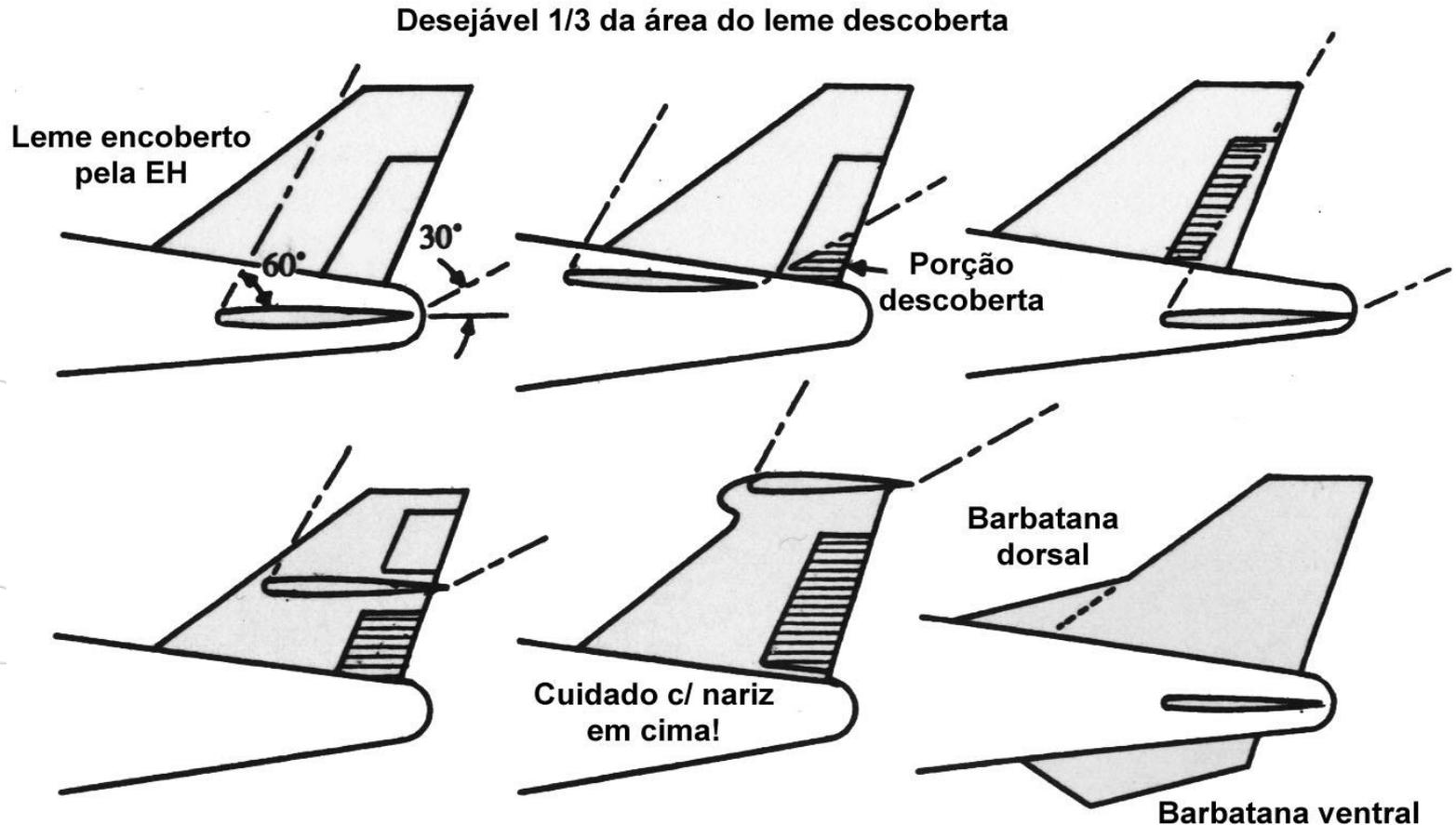




3. Geometria e configuração da cauda

Configuração da cauda

- Configuração para recuperação de parafuso:





3. Geometria e configuração da cauda

Configuração da cauda

- Razão de aspecto e afilamento da cauda :

| | <u>Epenagem horizontal</u> | | <u>Empenagem vertical</u> | |
|----------|----------------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| | A | λ | A | λ |
| Caça | 3,0 a 4,0 | 0,2 a 0,4 | 0,6 a 1,4 | 0,2 a 0,4 |
| Planador | 6,0 a 10,0 | 0,3 a 0,5 | 1,5 a 2,0 | 0,4 a 0,6 |
| Outros | 3,0 a 5,0 | 0,3 a 0,6 | 1,3 a 2,0 | 0,3 a 0,6 |
| Cauda T | - | - | 0,7 a 1,2 | 0,6 a 1,0 |