

INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
SÃO PAULO

# Introdução ao Projeto de Aeronaves

## Aula 8 – Características Aerodinâmicas dos Perfis

**TAPERÁ**

**Aerodesign**

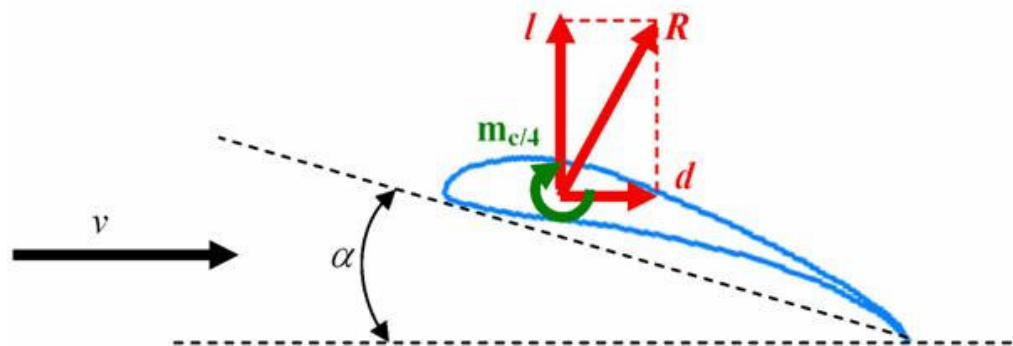


# Tópicos Abordados

- Forças aerodinâmicas e momentos em perfis.
- Centro de pressão do perfil.
- Centro aerodinâmico do perfil.
- Características dos perfis de alta sustentação.

# Forças Atuantes no Perfil

- Existem três características aerodinâmicas muito importantes para a seleção adequada de um perfil.
- a) Determinação da capacidade de geração de sustentação do perfil através do cálculo da força de sustentação;
- b) Determinação da correspondente força de arrasto;
- c) Determinação do momento resultante ao redor do centro aerodinâmico que influenciará decisivamente nos critérios de estabilidade longitudinal da aeronave.



# Interpretação das Forças

- A velocidade do escoamento não perturbado é definida por  $v$  e está alinhada com a direção do vento relativo.
- A força resultante  $R$  é inclinada para trás em relação ao eixo vertical e normalmente essa força não é perpendicular à linha da corda.
- Por definição, assume-se que a componente de  $R$  perpendicular à direção do vento relativo é denominada força de sustentação, e a componente de  $R$  paralela à direção do vento relativo denominada força de arrasto.

# Interpretação do Momento

- Também devido a diferença de pressão existente entre o intradorso e o extradorso do perfil, além das tensões de cisalhamento atuantes por toda a superfície do mesmo, existe a presença de um momento que tende a rotacionar o perfil.
- Geralmente os cálculos são realizados considerando-se que este momento atua em um ponto localizado a  $1/4$  da corda, medido a partir do bordo de ataque. Este ponto é denominado na aerodinâmica como centro aerodinâmico do perfil.
- Por convenção (regra da mão direita), um momento que tende a rotacionar o corpo no sentido horário é considerado como positivo.
- Normalmente os perfis utilizados para a construção de asas na indústria aeronáutica possuem um arqueamento positivo, o que acarreta em uma tendência de rotação no sentido anti-horário a conseqüentemente em coeficientes de momento negativos.

# Cálculo da Força de Sustentação

- A força de sustentação por unidade de envergadura gerada pela seção de um aerofólio pode ser calculada a partir da aplicação da equação a seguir.
- $\rho$  representa a densidade do ar,  $v$  é a velocidade do escoamento,  $c$  é a corda do perfil e  $c_l$  representa o coeficiente de sustentação da seção obtido a partir da leitura da curva característica  $c_l$  versus  $\alpha$ .

$$l = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c \cdot c_l$$

# Cálculo da Força de Arrasto

- De forma similar, a força de arrasto é obtida com a aplicação da equação a seguir, com o valor do coeficiente de arrasto obtido diretamente da leitura da curva característica  $c_d$  versus  $\alpha$  do perfil.

$$d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c \cdot c_d$$

# Cálculo do Momento

- O momento ao redor do centro aerodinâmico do perfil é determinado a partir da solução da equação a seguir com o valor do coeficiente de momento também obtido diretamente da leitura da curva característica  $c_m$  versus  $\alpha$  do perfil.

$$m_{c/4} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c^2 \cdot c_m$$

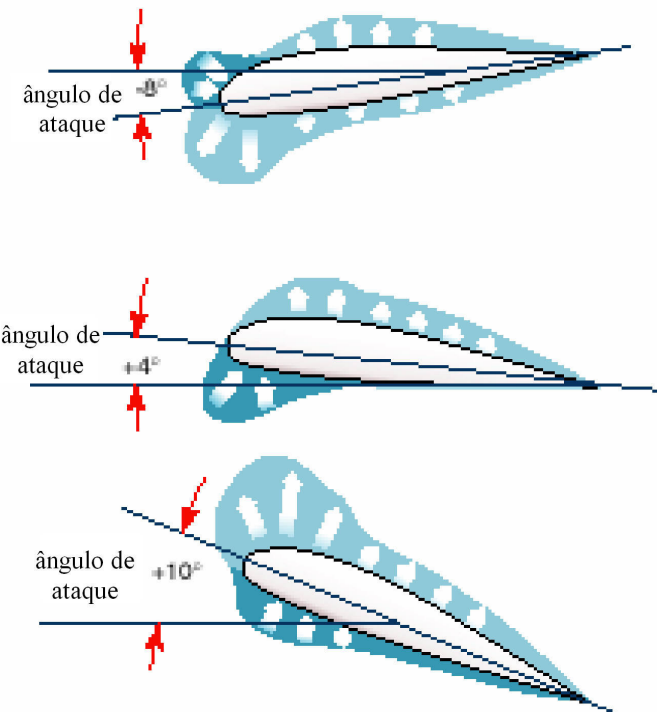
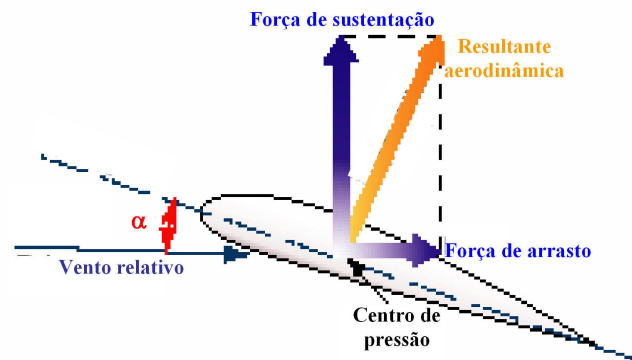


# Centro de Pressão do Perfil

- A determinação da distribuição de pressão sobre a superfície de um perfil é geralmente obtida a partir de ensaios em túnel de vento ou com a solução analítica de modelos matemáticos fundamentados na geometria do perfil em estudo.
- Os ensaios realizados em túnel de vento permitem determinar a distribuição de pressão no intradorso e no extradorso dos perfis em diferentes ângulos de ataque, e é justamente a diferença de pressão existente que é responsável pela geração da força de sustentação.

# Distribuição de Pressão no Perfil

- A força resultante é obtida a partir de um processo de integração da carga distribuída (pressão atuante) entre o bordo de ataque e o bordo de fuga do perfil para cada ângulo de ataque estudado.
- Essa força é denominada resultante aerodinâmica e o seu ponto de aplicação é chamado de centro de pressão (CP)

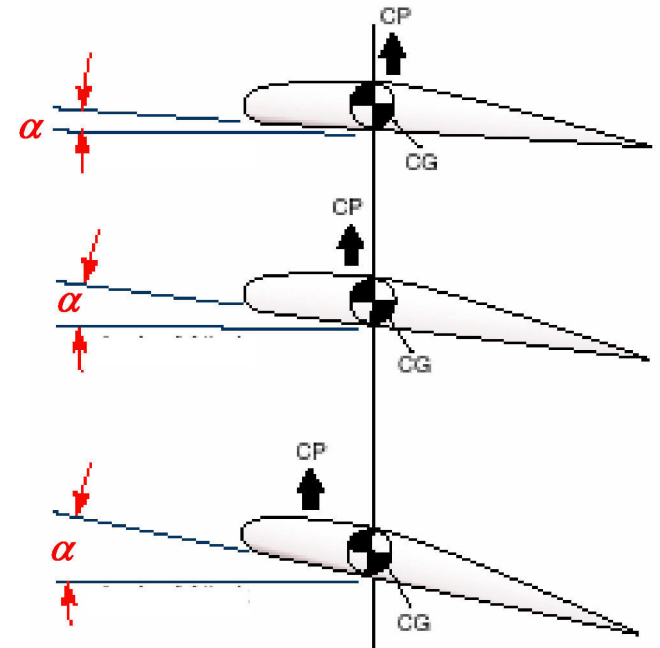


# Variação de Posição do CP

- Geralmente, para elevados ângulos de ataque, o centro de pressão se desloca para frente, enquanto que para pequenos ângulos de ataque o centro de pressão se desloca para trás.
- O passeio do centro de pressão é de extrema importância para o projeto de uma nova asa, uma vez que sua variação com o ângulo de ataque, proporciona drásticas variações no carregamento total que atua sobre a asa, acarretando em um cuidado especial quanto ao cálculo estrutural da mesma.
- O balanceamento e a controlabilidade da aeronave são governados pela mudança da posição do centro de pressão, sendo esta posição determinada a partir de cálculos e validada com ensaios em túnel de vento.
- Em qualquer ângulo de ataque, o centro de pressão é definido como o ponto no qual a resultante aerodinâmica intercepta a linha de corda. Geralmente a posição do centro de pressão é expressa em termos de porcentagem da corda. Para um projetista, seria muito importante que a posição do centro de pressão coincidissem com a posição do centro de gravidade da aeronave, pois dessa forma o avião estaria em perfeito balanceamento, porém existe uma dificuldade muito grande para que isto ocorra, pois como citado, a posição do (CP) varia com a mudança do ângulo de ataque.

# Passeio do CP

- Para um avião em diferentes atitudes de vôo, quando o ângulo de ataque é aumentado, o centro de pressão move-se para frente; e quando é diminuído, o (CP) move-se para trás.
- Como a posição do centro de gravidade é fixa em um determinado ponto, fica evidente que um aumento do ângulo de ataque leva o centro de pressão para uma posição à frente do centro de gravidade, fazendo dessa forma que um momento desestabilizante seja gerado ao redor do centro de gravidade afastando a aeronave de sua posição de equilíbrio, do mesmo modo, uma redução do ângulo de ataque faz com que o centro de pressão se desloque para trás do centro de gravidade e novamente um momento desestabilizante é gerado ao redor do centro de gravidade afastando a aeronave de sua posição de equilíbrio.



## Influência do Passeio do CP na Estabilidade

- Uma asa por si só, é uma superfície instável e que não proporciona uma condição balanceada de vôo.
- Portanto, como forma de se garantir a estabilidade longitudinal de uma aeronave, o profundor é um elemento indispensável, pois é justamente essa superfície sustentadora que produzirá um momento efetivo ao redor do centro de gravidade de forma a restaurar a condição de equilíbrio de uma aeronave após qualquer alteração ocorrida na atitude de vôo.
- O balanceamento de uma aeronave em vôo depende, conseqüentemente, da posição relativa do centro de gravidade (CG) e da localização do centro da pressão (CP), experiências mostram que um avião com o centro de gravidade localizado entre 20% e 35% da corda da asa possui um balanceamento satisfatório e pode voar com boas condições de estabilidade.

# Centro Aerodinâmico do Perfil

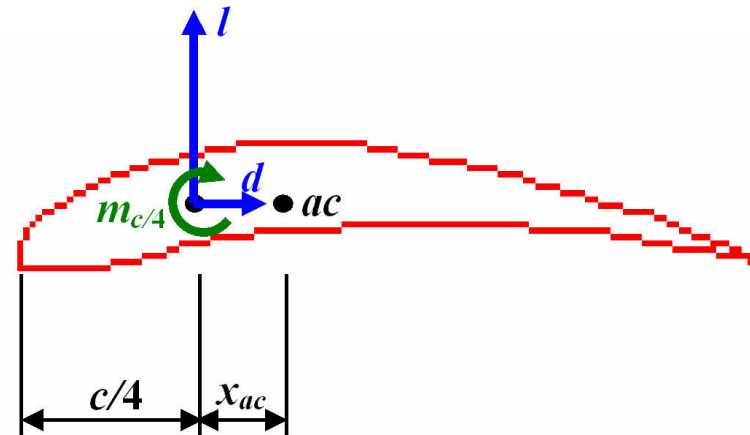
- Uma forma mais confortável e muito utilizada atualmente para se determinar a localização do centro de gravidade de uma aeronave é o conceito do centro aerodinâmico do perfil que pode ser definido como o ponto no qual o momento atuante independe do ângulo de ataque e portanto é praticamente constante.
- A curva característica  $c_m$  versus  $\alpha$  de um perfil representa o coeficiente de momento ao redor do centro aerodinâmico.

## Como Determinar o Centro Aerodinâmico

- As perguntas principais são feitas em relação ao centro aerodinâmico de um perfil são:
- Este ponto pode existir?
- Se existe, como ele é encontrado?

# Existência do Centro Aerodinâmico

- A primeira pergunta a ser respondida é se o centro aerodinâmico existe.
- Para tal resposta, considere sua existência e a sua localização a partir da posição  $c/4$ .
- Uma vez definida sua existência, pode-se verificar que as forças aerodinâmicas tendem a gerar um momento ao redor do centro aerodinâmico.
- Como a força de arrasto está alinhada com o eixo longitudinal do centro aerodinâmico, o efeito do momento provocado por ela pode ser desprezado durante o cálculo, e, dessa forma, o momento resultante ao redor do centro aerodinâmico do perfil pode ser determinado a partir da solução a equação mostrada.



$$m_{ac} = l \cdot x_{ac} + m_{c/4}$$



# Adimensionalização da Equação

- Neste ponto, é interessante colocar esta equação na forma de coeficientes aerodinâmicos, isto pode ser feito com a adimensionalização da referida equação pelo termo  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c^2$ .

$$\frac{m_{ac}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c^2} = \frac{l}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c} \cdot \frac{x_{ac}}{c} + \frac{m_{c/4}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c^2}$$

$$C_{mac} = C_l \cdot \left( \frac{x_{ac}}{c} \right) + C_{mc/4}$$

## Solução da Equação

- Como a definição proposta prediz que no centro aerodinâmico do perfil o momento independe do ângulo de ataque, pode ser utilizado um processo de diferenciação da equação adimensionalizada em relação ao ângulo de ataque com a finalidade de se obter a posição do centro aerodinâmico.

$$\frac{dc_{mac}}{d\alpha} = \frac{dc_l}{d\alpha} \cdot \left( \frac{x_{ac}}{c} \right) + \frac{dc_{mc/4}}{d\alpha}$$

# Análise da Equação

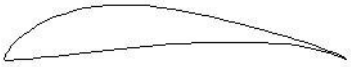
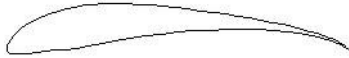
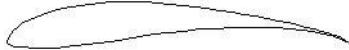

- Analisando-se a equação anterior, nota-se que o ponto que define o centro aerodinâmico existe e representa uma situação no qual o momento independe o ângulo de ataque, portanto, a solução da equação é realizada partindo-se do pressuposto que o termo  $\frac{dc_{mac}}{d\alpha}$  deve ser igual a zero, ou seja o momento ao redor do centro aerodinâmico é constante e independe o ângulo de ataque.
- a posição do centro aerodinâmico do perfil depende do coeficiente angular da curva  $c_l$  versus  $\alpha$  e do coeficiente angular da curva  $c_m$  versus  $\alpha$  do perfil analisado.

$$0 = \frac{dc_l}{d\alpha} \cdot \left( \frac{x_{ac}}{c} \right) + \frac{dc_{mc/4}}{d\alpha} \quad \longrightarrow \quad \frac{x_{ac}}{c} = \frac{-dc_{mc/4}/d\alpha}{dc_l/d\alpha} = \frac{-m_0}{a_0}$$

## Perfis da Alta Sustentação para AeroDesign

- Em projetos destinados a participar da competição SAE-AeroDesign é muito importante que o perfil selecionado possua um elevado coeficiente de sustentação aliado a baixos coeficientes de arrasto e momento de modo que possua uma elevada eficiência aerodinâmica.
- Algumas equipes já destinam um tempo extra apenas para estudar melhores perfis que podem ser utilizados, esses novos perfis geralmente requerem um grande número de horas destinada ao estudo e modificação da geometria dos mesmos até se atingir um perfil aerodinâmico ótimo para ser utilizado na confecção da asa da aeronave.
- Outro método que também pode ser utilizado é criar um novo perfil a partir da junção entre dois perfis existentes, gerando um terceiro perfil com características intermediárias entre os dois originais, esta solução pode em muitas vezes gerar um ganho de eficiência, pois são utilizadas apenas as melhores características de cada perfil.

# Perfis Usuais no AeroDesign

Perfil	Características Principais
 Wortmann FX 74-CL5-140	Espessura máxima: 13,08% a 27,1% da corda. Curvatura máxima: 9,72% a 41,6% da corda. Raio de curvatura do bordo de ataque: 0,9850%. Espessura do bordo de fuga: 0,0120%
 Selig 1223	Espessura máxima: 12,13% a 20,3% da corda. Curvatura máxima: 8,67% a 49,9% da corda. Raio de curvatura do bordo de ataque: 3,0850%. Espessura do bordo de fuga: 0,0000%
 Selig 1210	Espessura máxima: 11,99% a 23,2% da corda. Curvatura máxima: 7,2% a 51,9% da corda. Raio de curvatura do bordo de ataque: 1,8006%. Espessura do bordo de fuga: 0,0000%
 Eppler 423	Espessura máxima: 12,51% a 23,7% da corda. Curvatura máxima: 10,03% a 41,4% da corda. Raio de curvatura do bordo de ataque: 2,6584%. Espessura do bordo de fuga: 0,0120%

## Fatores que Afetam a Sustentação no Perfil

- **Relação de espessura:** O valor do coeficiente de sustentação máximo para um determinado aerofólio é afetado diretamente pela relação de espessura  $t/c$ . Modernos perfis de alta sustentação possuem valores de  $cl_{máx}$  consideravelmente maiores que os perfis mais tradicionais, como por exemplo os da série NACA. Para perfis da série NACA, uma relação de espessura da ordem de 13% produz os maiores valores de  $cl_{máx}$ , já para os perfis de alta sustentação este valor pode chegar até a ordem de 15%.
- **Raio do bordo de ataque:** O efeito do raio do bordo de ataque do perfil na geração da sustentação é mais ou menos refletido por um parâmetro determinado por  $Z_5/t$ , onde  $Z_5$  representa a espessura do perfil em um ponto localizado a 5% da corda e  $t$  representa a máxima espessura do perfil. Um alto valor da relação  $Z_5/t$  indica um perfil com alto valor do raio do bordo de ataque, o que em baixas velocidades pode ser benéfico para a geração de sustentação.
- **Efeitos do arqueamento e da localização da máxima espessura do perfil:** dados experimentais mostram que o máximo coeficiente de sustentação de um perfil arqueado não depende somente da quantidade de arqueamento ou do modelo da linha de arqueamento, mas também é influenciado pela espessura do perfil e pelo raio do bordo de ataque. Em geral, a adição de arqueamento no perfil é benéfica para a produção de sustentação, porém o aumento do arqueamento deve ser realizado com a redução do raio do bordo de ataque e com uma diminuição da espessura do perfil com a finalidade de se obter melhores resultados. Outro ponto importante é o deslocamento à frente do ponto de máximo arqueamento, ou seja, com o máximo arqueamento localizado mais próximo do bordo de ataque consegue-se maiores coeficientes de sustentação para o perfil.

# Tema da Próxima Aula

- Asas de Envergadura Finita.
- Forma Geométrica e Localização da Asa na Fuselagem.
- Alongamento e Relação de Afilamento.
- Corda Média Aerodinâmica.
- Forças Aerodinâmicas e Momentos em Asas Finitas.
- Coeficiente de Sustentação em Asas Finitas.