



Parabéns! Você acaba de ter acesso a Versão Anotação dos Slides que fazem parte do Sistema de Ensino da Espaço Aéreo, presente nas principais Universidades, CIACs e Escolas de Aviação do Brasil.

Esse conteúdo foi desenvolvido usando metodologias ativas, gamificadas e conceitos de Sala Invertida, tudo para garantir que o aprendizado possibilite você a conectar a teoria com a prática.



SISTEMA DE ENSINO PARA AVIAÇÃO: FERRAMENTAS LÚDICAS QUE CONECTAM A TEORIA COM A PRÁTICA.

O futuro já chegou na sua aula. Tenho acesso a versão animada dos slides, vídeos de até 20 minutos de todo conteúdo, e-books, mapas mentais, estudos de caso, simulados, resumos, jogos e muito mais.

Verifique com seu professor o link de acesso específico para o material do seu curso ou então conheça todas nossas soluções em:

WWW.ESPACOAREO.COM



GAMIFICAÇÃO



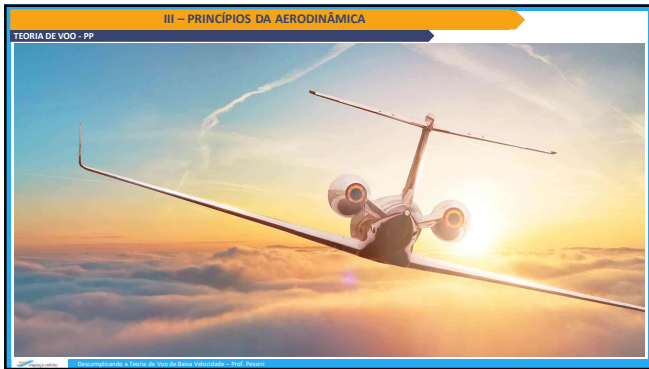
METODOLOGIAS ATIVAS



ESTUDOS DE CASO



SALA INVERTIDA



1

III - PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

TEORIA DE VOO - PP

OBJETIVO GERAL

Compreender como são geradas as forças aerodinâmicas, por meio do escoamento do ar nos aerofólios, além da alteração no campo de pressão entorno deles, de forma que o aluno/piloto sinta segurança durante o voo.

Universidade Católica e Teoria de Voo de Baixa Velocidade - Prof. Renato

2

III - PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

TEORIA DE VOO - PP

ROTEIRO

1- PRESSÃO DO ATMOSFÉRICA	3- PERFIS AERODINÂMICOS
1.1- Pressão Estática	3.1- Perfil Simétrico
1.2- Pressão Dinâmica	3.2- Perfil Assimétrico
1.3- Pressão Total	
2- ESCOAMENTO DOS FLUIDOS	4- GERAÇÃO DAS FORÇAS AERODINÂMICAS
2.1- Número de Reynolds	4.1- Ângulo de Ataque
2.2- Regime de Escoamento	4.2- Campo de Pressão
2.3- Equação de Bernoulli	

Universidade Católica e Teoria de Voo de Baixa Velocidade - Prof. Renato

3

1 - TIPOS DE PRESSÃO
PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

1.1 - Pressão Estática

ALTITUDE

1) O que é a Pressão Estática?

- Conhecida também como **piezométrica**.
- Igual em todas as direções naquela região.

4

1 - TIPOS DE PRESSÃO
PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

1.2 - Pressão Dinâmica

2) Qual é a diferença com a Pressão Dinâmica?

- Depende da **velocidade** do escoamento.
- Pressão percebida devido ao **impacto do ar**.

Pressão dinâmica = $\frac{1}{2} \times \text{Densidade do ar} \times \text{Velocidade Aerodinâmica}^2$

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

q - Pressão dinâmica
ρ - Densidade do ar
V - Velocidade do ar

5

1 - TIPOS DE PRESSÃO
PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

1.3 - Pressão Total

Pressão Total = Pressão estática + Pressão dinâmica

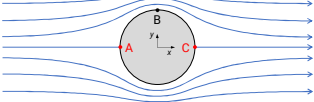
Pressão total = Pressão de Estagnação

6

2 - ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

2.1 - Número de Reynolds

O escoamento pode ser "previsto"



Considerações:

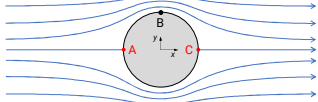
- Fluido Ideal.
- Sem viscosidade.

Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR - Instituto de Física - IFSCAR

7

2 - ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

2.1 - Número de Reynolds



A **PRESSÃO DINÂMICA** se "transforma" em **PRESSÃO ESTÁTICA!**

Considerações:

- Fluido Ideal.
- Sem viscosidade.

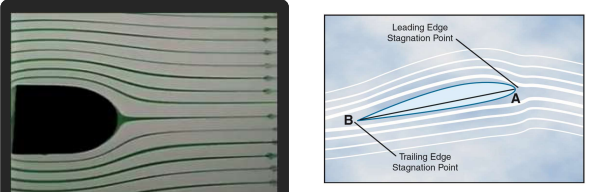
Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR - Instituto de Física - IFSCAR

8

2 - ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

2.1 - Número de Reynolds

➔ Ponto de Estagnação



Leading Edge Stagnation Point

Trailing Edge Stagnation Point

Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR - Instituto de Física - IFSCAR

9

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

2.1 - Número de Reynolds
 → Ponto de Estagnação

Considerações:

- Fluido Real.
- Com viscosidade.

10

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

2.2 - Regime de escoamento

O escoamento pode ser "previsto"

$$\text{Reynold} = \frac{\text{Forças Inerciais}}{\text{Forças Viscosas}} \quad \text{Re} = \frac{\rho V L}{\mu}$$

- Relação entre **forças de inércia** e **forças viscosas**.
- **Laminar** ou **Turbulento**.

ρ : Massa específica do fluido
 V : Velocidade relativa entre os corpos
 L : Comprimento característico estudado
 μ : Viscosidade do fluido

11

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

2.2- Regime de escoamento
 → Laminar

- **Trajétórias bem definidas.**
- **Lâminas ou camadas.**
- **Menor velocidade** de escoamento próximo à superfície da aeronave.
- **Menor arrasto de fricção.**

12

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

2.2 - Regime de escoamento
 → Laminar

$$\text{Reynold} = \frac{\text{Forças Inerciais}}{\text{Forças Viscosas}} = \frac{\rho V L}{\mu}$$



- **Trajétórias bem definidas.**
- **Lâminas ou camadas.**
- **Menor velocidade** de escoamento próximo à superfície da aeronave.
- **Menor arrasto de fricção.**

Universidade de São Carlos - Instituto de Física de São Carlos - Prof. Renato

13

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

2.2 - Regime de Escoamento
 → Turbulento



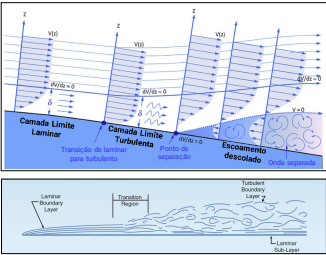
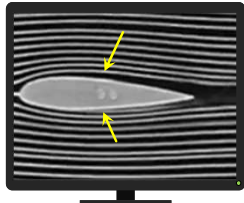
- **Trajétórias aleatórias e irregulares.**
- **Maior velocidade** de escoamento próximo à superfície da aeronave.
- **Maior arrasto de fricção.**

Universidade de São Carlos - Instituto de Física de São Carlos - Prof. Renato

14

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

2.2 - Regime de Escoamento
 → Turbulento

Universidade de São Carlos - Instituto de Física de São Carlos - Prof. Renato

15

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

2.2 - Regime de escoamento

→ **Transição**



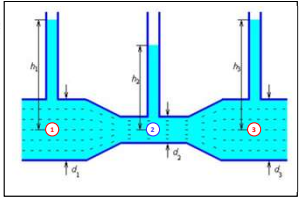

Introdução à Teoria de Voo de Baixa Velocidade – Prof. Renato

16

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

2.3 - Equação de Bernoulli

3) Como relacionar as **pressões** e as **velocidades**?



Considerações:

- Fluido Inviscido.
- Vazão constante.

$$\left(\frac{\rho V^2}{2} + P_{\text{estática}}\right)_1 = \left(\frac{\rho V^2}{2} + P_{\text{estática}}\right)_2$$

ρ – Massa específica do fluido (kg/m³)
 V – Velocidade de escoamento (m/s)
 P – Pressão estática no local (kPa)

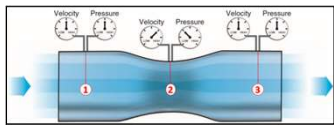
Introdução à Teoria de Voo de Baixa Velocidade – Prof. Renato

17

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

2.3 - Equação de Bernoulli

→ **Tubo de Venturi**



Considerações:

- Fluido Inviscido.
- Vazão constante.

$$\left(\frac{\rho V^2}{2} + P_{\text{estática}}\right)_1 = \left(\frac{\rho V^2}{2} + P_{\text{estática}}\right)_2$$

ρ – Massa específica do fluido (kg/m³)
 V – Velocidade de escoamento (m/s)
 P – Pressão estática no local (kPa)

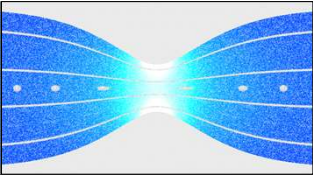
Introdução à Teoria de Voo de Baixa Velocidade – Prof. Renato

18

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

2.3 - Equação de Bernoulli

→ Tubo de Venturi



Considerações:

- Fluido Inviscido.
- Vazão constante.

$$\left(\frac{\rho V^2}{2} + P_{\text{estática}}\right)_1 = \left(\frac{\rho V^2}{2} + P_{\text{estática}}\right)_2$$

ρ – Massa específica do fluido (kg/m³)
 V – Velocidade de escoamento (m/s)
 P – Pressão estática no local (kPa)

19

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

2.3 - Equação de Bernoulli




Aqui está a prova!

- A velocidade aumenta.
- Pressão estática diminui.

20

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

2.3 - Equação de Bernoulli



21

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. II

2.3 - Equação de Bernoulli

→ Equação da continuidade



Redução da área → Maior velocidade → Menor pressão estática → Maior pressão dinâmica

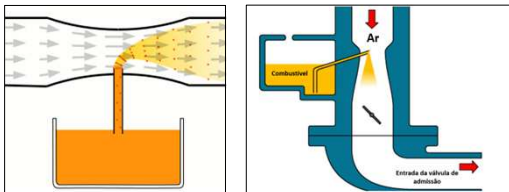
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

22

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. II

2.3 - Equação de Bernoulli

→ Carburador



Entrada da válvula de admissão

Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

23

2 – ESCOAMENTO DOS FLUIDOS
PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. II

2.3 - Equação de Bernoulli

→ Túnel de vento



Entrada de ar

Modelo em teste

Medição em estufa

Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

24

3 – PERFIL AERODINÂMICO
PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

EXTRADORSO
Região superior da asa

INTRADORSO
Região inferior da asa

LINHA DE CURVATURA MÉDIA
Linha que equidista o extradorso e o intradorso.

BORDO DE ATAQUE
Região frontal da asa

BORDO DE FUGA
Região posterior da asa

LINHA DA CORDA
Segmento de reta que liga o bordo de ataque ao bordo de fuga

25

3 – PERFIL AERODINÂMICO
PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

3.1 - Perfil Simétrico

A linha da corda é a mesma da linha de curvatura média

26

3 – PERFIL AERODINÂMICO
PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA

3.2- Perfil Assimétrico

A linha da corda é NÃO É IGUAL a linha de curvatura média

Possui uma curvatura, arqueamento (camber)

27

4 – GERAÇÃO DAS FORÇAS AERODINÂMICAS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. 10

4.1- Ângulos de Ataque

➔ Positivo

O que é ângulo de ataque?

ÂNGULO DE ATAQUE (+)

VENTO RELATIVO

DIREÇÃO DO VENTO RELATIVO

CORDA

O limite é o ângulo de estol

28

4 – GERAÇÃO DAS FORÇAS AERODINÂMICAS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. 10

3.2- Ângulos de Ataque

➔ Negativo

Tem ângulo de ataque negativo?

VENTO RELATIVO

ÂNGULO DE ATAQUE (-)

DIREÇÃO DO VENTO RELATIVO

CORDA

29

4 – GERAÇÃO DAS FORÇAS AERODINÂMICAS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. 10

4.1- Campo de Pressão

NewScientist

Intradorso

Extradorso

Intradorso

30

4 – GERAÇÃO DAS FORÇAS AERODINÂMICAS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

4.1- Campo de Pressão

- MAIOR VELOCIDADE DO AR
- MENOR PRESSÃO ESTÁTICA
- MAIOR PRESSÃO DINÂMICA

- MENOR VELOCIDADE DO AR
- MAIOR PRESSÃO ESTÁTICA
- MENOR PRESSÃO DINÂMICA

Universidade de São Carlos - Instituto de Física - Prof. Renato

31

4 – GERAÇÃO DAS FORÇAS AERODINÂMICAS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

4.1- Campo de Pressão

4) Então vão ter pressões diferentes em todo o aerofólio?

Universidade de São Carlos - Instituto de Física - Prof. Renato

32

4 – GERAÇÃO DAS FORÇAS AERODINÂMICAS
 PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

4.1- Campo de Pressão

→ Sustentação

VENTO RELATIVO

CP

CP

A SUSTENTAÇÃO SEMPRE SERÁ PERPENDICULAR AO VENTO RELATIVO!

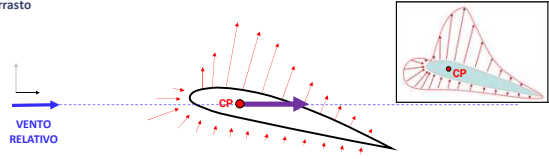
Universidade de São Carlos - Instituto de Física - Prof. Renato

33

4 – GERAÇÃO DAS FORÇAS AERODINÂMICAS
PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

4.1- Campo de Pressão

→ Arrasto



O ABRASTO SEMPRE SERÁ PARALELO AO VENTO RELATIVO!

Transmissão e Teoria de Voo de Baixa Velocidade – Prof. Renato

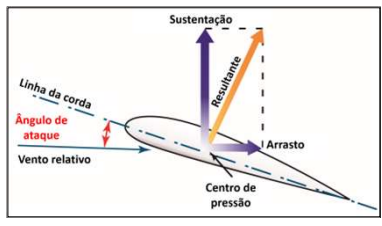
34

4 – GERAÇÃO DAS FORÇAS AERODINÂMICAS
PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA Cap. III

4.1- Campo de Pressão

→ Resultante aerodinâmica

A resultante aerodinâmica é a soma dos dois vetores!



Transmissão e Teoria de Voo de Baixa Velocidade – Prof. Renato

35



Mapa Mental

 espaço aéreo

Transmissão e Teoria de Voo de Baixa Velocidade – Prof. Renato

36

Princípios da Aerodinâmica

PRESSÃO

- Pressão estática — Pressão atmosférica que não depende do movimento
- Pressão dinâmica — Pressão que depende da velocidade e direção do vento
- Pressão total — soma entre as pressões estática e dinâmica
- Pressão de sustentação — Resulta da combinação da velocidade e entre a distribuição dinâmica e a geometria do objeto

Pressão Dinâmica $q = \frac{\rho}{2} v^2$

Pressão Total = Pressão Estática + Pressão Dinâmica

NÚMERO DE REYNOLDS

Reynold = $\frac{\text{Força Inercial}}{\mu} = \frac{\rho v L}{\mu}$

Força Inercial = ρv^2

Viscosidade = μ

- Em números baixos:
 - Esquemas baseados em linhas curvas arredondadas, menor arrasto de fricção
 - Transição turbulenta
 - Esquemas arredondados, menor arrasto de fricção

P: Pressão dinâmica
 ρ: Densidade do fluido
 v: Velocidade do fluido
 L: Comprimento característico
 μ: Viscosidade do fluido

Equação de Bernoulli e Equação da Continuidade

- Tubo de Venturi, carburador, nível de vento, aerofólio...
- No movimento: Pressão estática, dinâmica, Pressão Dinâmica aparente, Pressão estática aparente
- Valido somente em tubos ou seções

$\rho_1 v_1^2 + p_1 = \rho_2 v_2^2 + p_2 = \left(\frac{\rho}{2} v^2 + p \right)_p$

Vento Estático

- Conceito de pressão gerada pelo movimento
- Centro de pressão e ponto de aplicação das forças aerodinâmicas
- Importância da geometria e do arrasto relativo
- Atuação e parâmetros contra rotativa

espaço aéreo
Sociedade de Estudos
