



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

IV - AERODINÂMICA DO VOO



OBJETIVO GERAL

Compreender e diferenciar as forças que agem na aeronave durante o voo, priorizando as forças aerodinâmicas, com isso, será possível distinguir como elas variam dentro dos limites impostos pelo escoamento do ar, isto posto, o aluno/piloto poderá fazer modificações nas superfícies aerodinâmicas de modo a reduzir o arrasto aerodinâmico.

2

TEORIA DE VOO - PP

IV - AERODINÂMICA DO VOO

ROTEIRO

1- TRAÇÃO	6- ESTOL
2- FOÇA PESO	7- IMPULSO DE PRESSÃO
3- RESULTANTE AERODINÂMICA	8- EFEITO SOLO
4- FORÇA DE SUSTENTAÇÃO	9- MOMENTO
4.1- Coeficiente de Sustentação	9.1- Centro Aerodinâmico
5- FORÇA DE ARRASTO	
5.1- Coeficiente DE Arrasto	

3

IV – AERODINÂMICA DO VOO

AERODINÂMICA DO VOO

Quais são as forças que atuam na aeronave durante o voo?

Cap. IV

Documentação e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

4

1 - TRACÃO

AERODINÂMICA DO VOO

Vamos começar com a força de TRACÃO...

Cap. IV

Documentação e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

5

1 - TRACÃO

AERODINÂMICA DO VOO

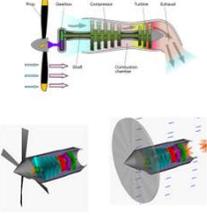
MOTOR + HÉLICE

Cap. IV

Documentação e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

6

1 - TRACÃO
AERODINÂMICA DO VOO

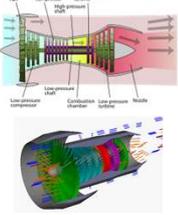


Cap. IV

Copyright 2010 Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

7

1 - TRACÃO
AERODINÂMICA DO VOO

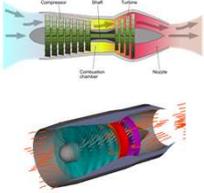


Cap. IV

Copyright 2010 Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

8

1 - TRACÃO
AERODINÂMICA DO VOO



Cap. IV

Copyright 2010 Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

100% da expansão → Tração

9

2 – FORÇA PESO
AERODINÂMICA DO VOO

Vamos recordar o conceito de PESO

TRACÃO (THRUST) SUSTENTAÇÃO (LIFT) ARRASTO (DRAG) PESO (WEIGHT)

Cap. IV

10

2 – FORÇA PESO
AERODINÂMICA DO VOO

Aeronave + Tripulação + Combustível + Passageiros + Bagagem

Gravidade terrestre - Local

Peso = Massa × Gravidade

Total da aeronave

Cap. IV

11

3 – RESULTANTE AERODINÂMICA
AERODINÂMICA DO VOO

O que é Resultante Aerodinâmica?

TRACÃO (THRUST) SUSTENTAÇÃO (LIFT) ARRASTO (DRAG) PESO (WEIGHT)

Cap. IV

12

3 – RESULTANTE AERODINÂMICA
AERODINÂMICA DO VOO

A Resultante Aerodinâmica é dividida em sustentação e arrasto

SUSTENTAÇÃO
RESULTANTE AERODINÂMICA
ARRASTO

ângulo de ataque
Linha da Corda
Vento relativo
Direção do vento relativo

SUSTENTAÇÃO
RESULTANTE AERODINÂMICA
ARRASTO

ângulo de ataque
Linha da corda
Vento Relativo
Direção do vento relativo

Cap. 09

13

3 – RESULTANTE AERODINÂMICA
AERODINÂMICA DO VOO

O Centro de Pressão se movimenta com o ângulo de ataque, mas somente no perfil assimétrico!

Vento relativo
Direção do vento relativo

ângulo de ataque
Vento Relativo
Direção do vento relativo

Cap. 09

14

3 – RESULTANTE AERODINÂMICA
AERODINÂMICA DO VOO

Por que o Centro de Pressão se move?

Campo de Pressão!

Cap. 09

15

3 – RESULTANTE AERODINÂMICA
AERODINÂMICA DO VOO Cap. IV

Pequeno Ângulo de Ataque Grande Ângulo de Ataque

Ângulo de Ataque Normal

© 2007 Airbus. Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

16

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO Cap. IV

Como podemos definir SUSTENTAÇÃO ?

TRACÇÃO (THRUST) SUSTENTAÇÃO (LIFT) ARRASTO (DRAG)

PESO (WEIGHT)

© 2007 Airbus. Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

17

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO Cap. IV

SUSTENTAÇÃO (L) RESULTANTE AERODINÂMICA (RA)

ARRASTO (D)

Ângulo de ataque

Vento relativo Direção do vento relativo

$$L = \frac{1}{2} \rho V_A^2 S_W C_L = q S_W C_L$$

- L – Sustentação (do inglês Lift)
- ρ – Densidade do Ar (Letra grega "Rho")
- V_A – Velocidade Aerodinâmica
- S_W – Área da Asa (Wing Surface)
- C_L – Coeficiente de Sustentação (do inglês Lift Coefficient)
- q – Pressão dinâmica

© 2007 Airbus. Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

18

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO

4.1 - Coeficiente de Sustentação

$$L = \frac{1}{2} \rho V_A^2 S_w C_L = q S_w C_L$$

Formato do perfil

19

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO

4.1 - Coeficiente de Sustentação

ASSIMÉTRICO

SIMÉTRICO

Perfil assimétrico

Perfil simétrico

20

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO

4.1 - Coeficiente de Sustentação

PERFIL SIMÉTRICO

PERFIL ASSIMÉTRICO

Perfil assimétrico

Perfil simétrico

21

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO

4.1 - Coeficiente de Sustentação

$L = \frac{1}{2} \rho V_A^2 S_W C_L = q S_W C_L$

Formato do Perfil

Ângulo de Ataque

Vento relativo

22

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO

4.1 - Coeficiente de Sustentação

Atenção! No ângulo de ataque zero, apenas o perfil assimétrico produz sustentação!

$L = \frac{1}{2} \rho V_A^2 S_W C_L = q S_W C_L$

Varição do CL com Ângulo de Ataque

Vento relativo

23

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO

4.1 - Coeficiente de Sustentação

$L = \frac{1}{2} \rho V_A^2 S_W C_L = q S_W C_L$

Varição do CL com Ângulo de Ataque

Vento relativo

24

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO

4.1 - Coeficiente de Sustentação

The slide illustrates the lift coefficient for different airfoil profiles. On the left, two diagrams show airfoils at an angle of attack $\alpha = 0^\circ$. The top diagram is for an asymmetric profile, showing a resultant aerodynamic force vector pointing upwards. The bottom diagram is for a symmetric profile, showing a resultant force vector pointing horizontally. On the right, a graph plots the lift coefficient C_L against the angle of attack α . Two curves are shown: a red curve for the asymmetric profile and a green curve for the symmetric profile. The red curve intersects the α -axis at a point where $\alpha < 0^\circ$, indicating a positive lift coefficient at zero angle of attack. The green curve intersects the α -axis at $\alpha = 0^\circ$. A red warning triangle is present in the top right corner.

25

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO

4.1 - Coeficiente de Sustentação

This slide is similar to slide 25, showing the lift coefficient for asymmetric and symmetric airfoils. The graph on the right shows the red curve for the asymmetric profile intersecting the α -axis at $\alpha < 0^\circ$ and the green curve for the symmetric profile intersecting at $\alpha = 0^\circ$. A red warning triangle is present in the top right corner.

26

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO

4.1 - Coeficiente de Sustentação

This slide focuses on the zero-lift line for an asymmetric airfoil. The diagram on the left shows an asymmetric airfoil with a red line representing the 'LINHA DE SUSTENTAÇÃO NULA' (zero-lift line). The angle of attack is labeled as 'Ângulo de sustentação nula'. The relative wind direction is shown as 'Vento Relativo' and 'Direção do Vento Relativo'. On the right, the graph shows the red curve for the asymmetric profile intersecting the α -axis at $\alpha < 0^\circ$. A red warning triangle is present in the top right corner.

- Ângulo de ataque de sustentação nula
- Coeficiente de sustentação zero

27

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO

Em Resumo!

PERFIL ASSIMÉTRICO: Resultante Aerodinâmica → Redução Sustentação > 0

PERFIL SIMÉTRICO: Resultante Aerodinâmica → Arrasto Sustentação = 0 Ângulo de Sustentação Nula

$L = \frac{1}{2} \rho V_a^2 S_w C_L$

28

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO

Em Resumo!

PERFIL ASSIMÉTRICO: Resultante Aerodinâmica → Arrasto Sustentação = 0 Ângulo de Sustentação Nula

PERFIL SIMÉTRICO: Resultante Aerodinâmica → Aumenta Sustentação < 0

$L = \frac{1}{2} \rho V_a^2 S_w C_L$

29

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO

Em Resumo!

PERFIL ASSIMÉTRICO: Resultante Aerodinâmica → Aumento Sustentação < 0 Ângulo de Sustentação Nula

PERFIL SIMÉTRICO: Resultante Aerodinâmica → Aumenta Sustentação < 0

$L = \frac{1}{2} \rho V_a^2 S_w C_L$

30

4 – FORÇA DE SUSTENTAÇÃO
AERODINÂMICA DO VOO

Em Resumo!

$$L = \frac{1}{2} \rho V_A^2 S_W C_L$$

31

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

Como podemos definir ARRASTO ?

32

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

$$D = \frac{1}{2} \rho V_A^2 S_W C_D = q S_W C_D$$

D – Arrasto (Drag)
 ρ – Densidade do Ar
 V_A – Velocidade Aerodinâmica
 S_W – Área da Asa (Wing surface)
 C_D – Coeficiente de Arrasto (Drag Coefficient)

33

5 - FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

$$D = \frac{1}{2} \rho V_A^2 S_w C_D = q S_w C_D$$

D - Arrasto (Drag)
 ρ - Densidade do Ar
 V_A - Velocidade Aerodinâmica
 S_w - Área da Asa (Wing surface)
 C_D - Coeficiente de Arrasto (Drag Coefficient)

34

5 - FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

5.1 - Coeficiente de Arrasto

$$D = \frac{1}{2} \rho V_A^2 S_w C_D = q S_w C_D$$

$$C_{D\text{Total}} = C_{D\text{Parasita}} + C_{D\text{Induzido}}$$

35

5 - FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

5.1 - Coeficiente de Arrasto

$$C_{D\text{TOTAL}} = C_{D\text{PARASITA}} + C_{D\text{INDUZIDO}}$$

Própria superfície da aeronave que esteja em contato como escoamento

36

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO Cap. IV

5.1 - Coeficiente de Arrasto

$$C_{D\text{TOTAL}} = C_{D\text{PARASITA}} + C_{D\text{INDUZIDO}}$$




- Quinas
- Entradas
- Aberturas
- Corpos rombudos

Copyright © 2010. Desenvolvimento e Teoria de Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

37

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO Cap. IV

5.1 - Coeficiente de Arrasto

$$C_{D\text{TOTAL}} = C_{D\text{PARASITA}} + C_{D\text{INDUZIDO}}$$




- Rebites
- Parafusos
- **Sujeira**
- Ressaltos
- Reforços estruturais
- Fendas/Ranhuras
- Antenas
- Dissipadores

Copyright © 2010. Desenvolvimento e Teoria de Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

38

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO Cap. IV

5.1 - Coeficiente de Arrasto

$$C_{D\text{TOTAL}} = C_{D\text{PARASITA}} + C_{D\text{INDUZIDO}}$$




Copyright © 2010. Desenvolvimento e Teoria de Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

39

5 – FORÇA DE ARRASTO
 AERODINÂMICA DO VOO Cap. IV

5.1 - Coeficiente de Arrasto

$C_{D\text{TOTAL}} = C_{D\text{PARASITA}} + C_{D\text{INDUZIDO}}$

Provocado pelo turbilhamento induzido



Copyright © 2010. Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

40

5 – FORÇA DE ARRASTO
 AERODINÂMICA DO VOO Cap. IV

5.1 - Coeficiente de Arrasto

$C_{D\text{TOTAL}} = C_{D\text{PARASITA}} + C_{D\text{INDUZIDO}}$



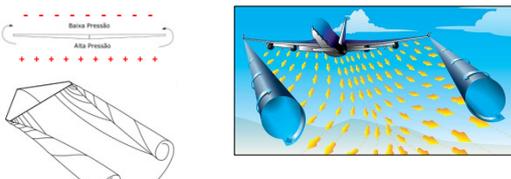
Copyright © 2010. Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

41

5 – FORÇA DE ARRASTO
 AERODINÂMICA DO VOO Cap. IV

5.1 - Coeficiente de Arrasto

$C_{D\text{TOTAL}} = C_{D\text{PARASITA}} + C_{D\text{INDUZIDO}}$



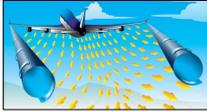
Copyright © 2010. Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

42

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

5.1 - Coeficiente de Arrasto

$$C_{D\text{TOTAL}} = C_{D\text{PARASITA}} + C_{D\text{INDUZIDO}}$$

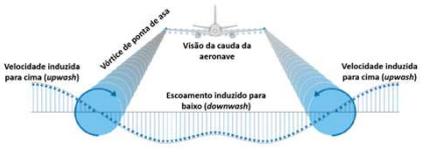


Intensidade e Dissipação do Turbilhonamento Induzido

43

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

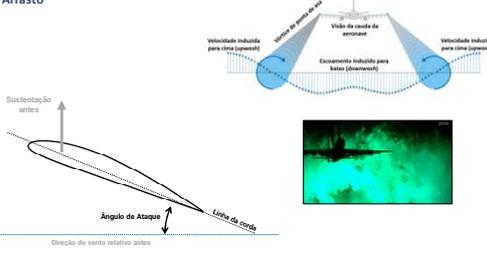
5.1 - Coeficiente de Arrasto

$$C_{D\text{TOTAL}} = C_{D\text{PARASITA}} + C_{D\text{INDUZIDO}}$$


44

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

5.1 - Coeficiente de Arrasto



Sustentação antes

Angulo de Ataque

Linha da corda

Vento relativo inicial devido a velocidade da aeronave

Direção do vento relativo antes

45

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

5.1 - Coeficiente de Arrasto

Copyright © 2010 Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Dr. Renato

46

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

5.1 - Coeficiente de Arrasto

Copyright © 2010 Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Dr. Renato

47

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

5.1 - Coeficiente de Arrasto

Copyright © 2010 Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Dr. Renato

48

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

5.1 - Coeficiente de Arrasto

CURIOSIDADE

49

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

5.1 - Coeficiente de Arrasto

$$C_{D\text{TOTAL}} = C_{D\text{PARASITA}} + C_{D\text{INDUZIDO}}$$

$$C_{D\text{Induzido}} = \frac{C_L^2}{AR} \times \frac{1}{\pi \cdot e}$$

- Alongamento (ou Razão de Aspecto)
- Geometrias diferentes nas pontas das asas

CURIOSIDADE

50

5 – FORÇA DE ARRASTO
AERODINÂMICA DO VOO

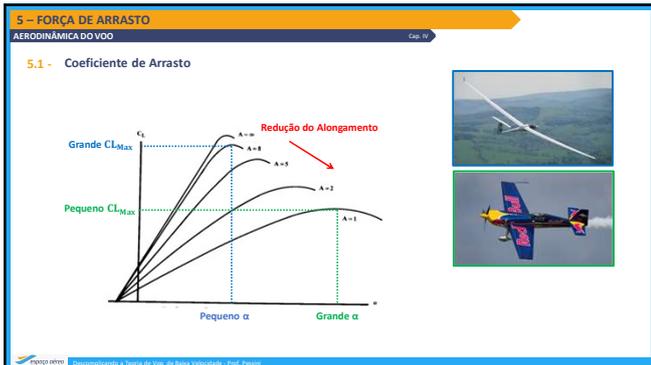
5.1 - Coeficiente de Arrasto

$$AR = \frac{b^2}{S} = \frac{b}{CMG}$$

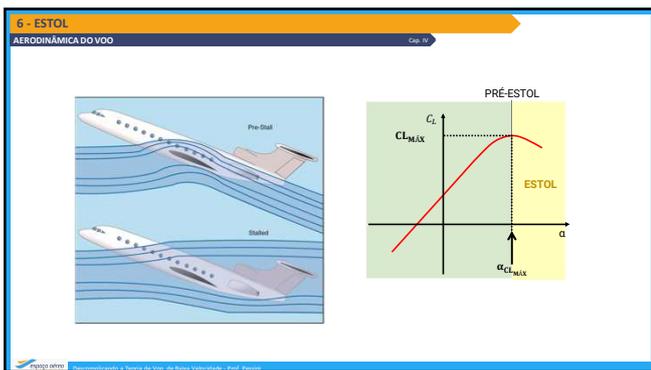
AR – Razão de aspecto (Aspect Ratio)
b – Envergadura da asa
S – Área da asa
CMG – Corda Média Geométrica

CURIOSIDADE

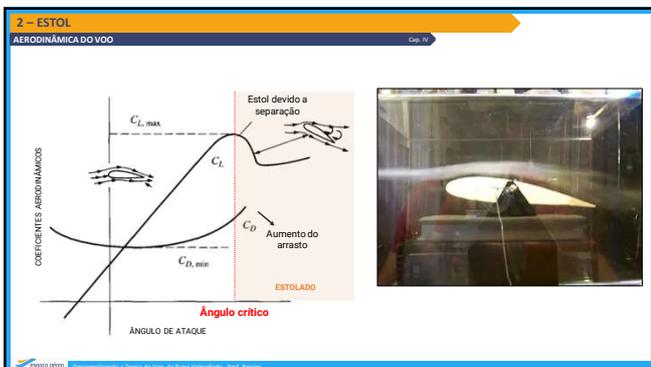
51



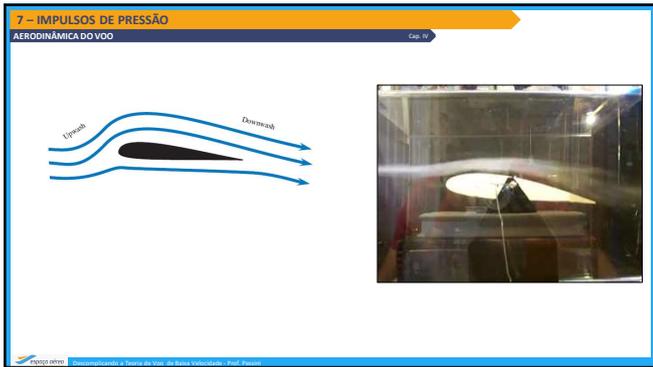
52



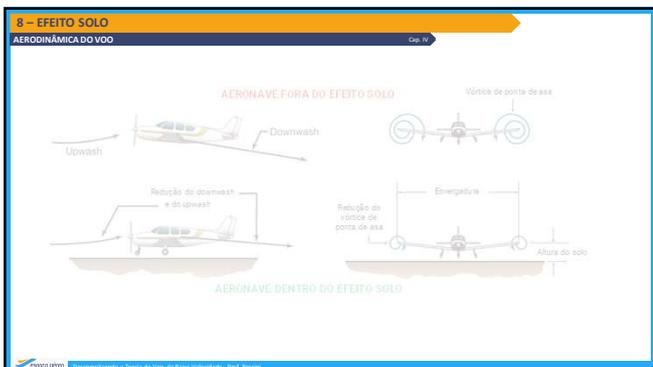
53



54







8 – EFEITO SOLO
AERODINÂMICA DO VOO

Cap. IV



Aeronave de asa baixa flutua mais quando arredonda para o pouso.

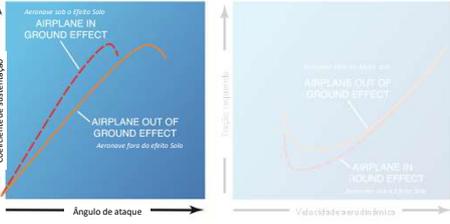


UNICAMP (UNICAMP) Desenvolvimento e Teoria de Voo de Alta Velocidade - Prof. Dr. Renato

58

8 – EFEITO SOLO
AERODINÂMICA DO VOO

Cap. IV



Coeficiente de sustentação

Ângulo de ataque

AIRPLANE IN GROUND EFFECT
Aeronave sob o Efeito Solo

AIRPLANE OUT OF GROUND EFFECT
Aeronave fora do efeito Solo

Tráfego requerido

Velocidade aerodinâmica

AIRPLANE OUT OF GROUND EFFECT
Aeronave fora do Efeito Solo

AIRPLANE IN GROUND EFFECT
Aeronave sob o Efeito Solo

UNICAMP (UNICAMP) Desenvolvimento e Teoria de Voo de Alta Velocidade - Prof. Dr. Renato

59

8 – EFEITO SOLO
AERODINÂMICA DO VOO

Cap. IV



Coeficiente de sustentação

Ângulo de ataque

AIRPLANE IN GROUND EFFECT
Aeronave sob o Efeito Solo

AIRPLANE OUT OF GROUND EFFECT
Aeronave fora do Efeito Solo

Tráfego requerido

Velocidade aerodinâmica

AIRPLANE OUT OF GROUND EFFECT
Aeronave fora do Efeito Solo

AIRPLANE IN GROUND EFFECT
Aeronave sob o Efeito Solo

UNICAMP (UNICAMP) Desenvolvimento e Teoria de Voo de Alta Velocidade - Prof. Dr. Renato

60

9 – MOMENTO
AERODINÂMICA DO VOO

Upwash

MOMENTO

Reação no aerofólio

Reação no aerofólio

Downwash

3ª Lei de Newton, lembra?

Copyright © 2015. Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

61

9 – MOMENTO
AERODINÂMICA DO VOO

9.1 - Centro Aerodinâmico

MOMENTO PICADOR

CG

FORÇA ESTABILIZADORA

O estabilizador horizontal estabiliza a aeronave

Copyright © 2015. Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

62

9 – MOMENTO
AERODINÂMICA DO VOO

9.1 - Centro Aerodinâmico

Tração acima do eixo longitudinal causa um momento picador

Tração abaixo do eixo longitudinal causa um momento cabrador

Copyright © 2015. Desenvolvimento e Teoria do Voo de Alta Velocidade - Prof. Paulo

63
