



# AEROELASTICIDADE

---

**AE-249** – *Prof. Roberto **Gil** A. Silva*

([gil@ita.br](mailto:gil@ita.br)), R: 6482 - IAE/ALA-L  
(Túnel de Vento)

**Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA/IEA**

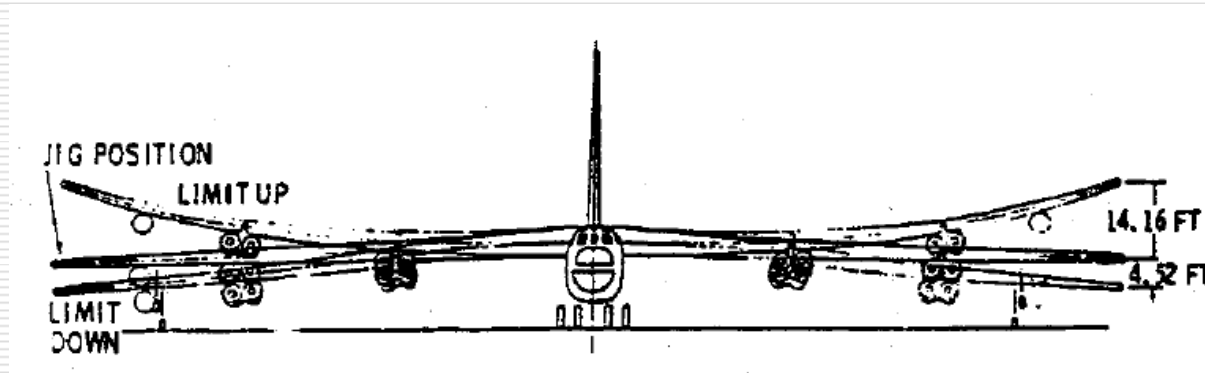
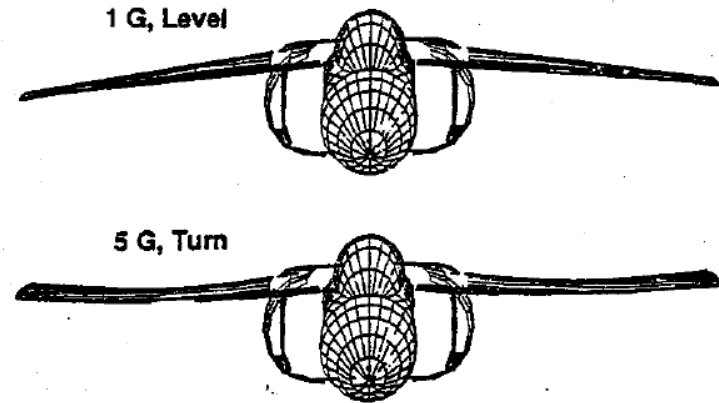
# Introdução

---

- ❑ ***AEROELASTICIDADE*** é a ciência que estuda as consequências da interação de forças de inércia, elásticas e aerodinâmicas, agindo simultaneamente na estrutura de um corpo.
  - ❑ Forças de inércia – decorrentes das acelerações às quais a massa do corpo está sujeita;
  - ❑ Forças elásticas – decorrentes das reações elásticas do corpo que se desloca (deforma);
  - ❑ Forças aerodinâmicas – decorrentes do escoamento de fluido ao qual o corpo está sujeito;
-

# Introdução

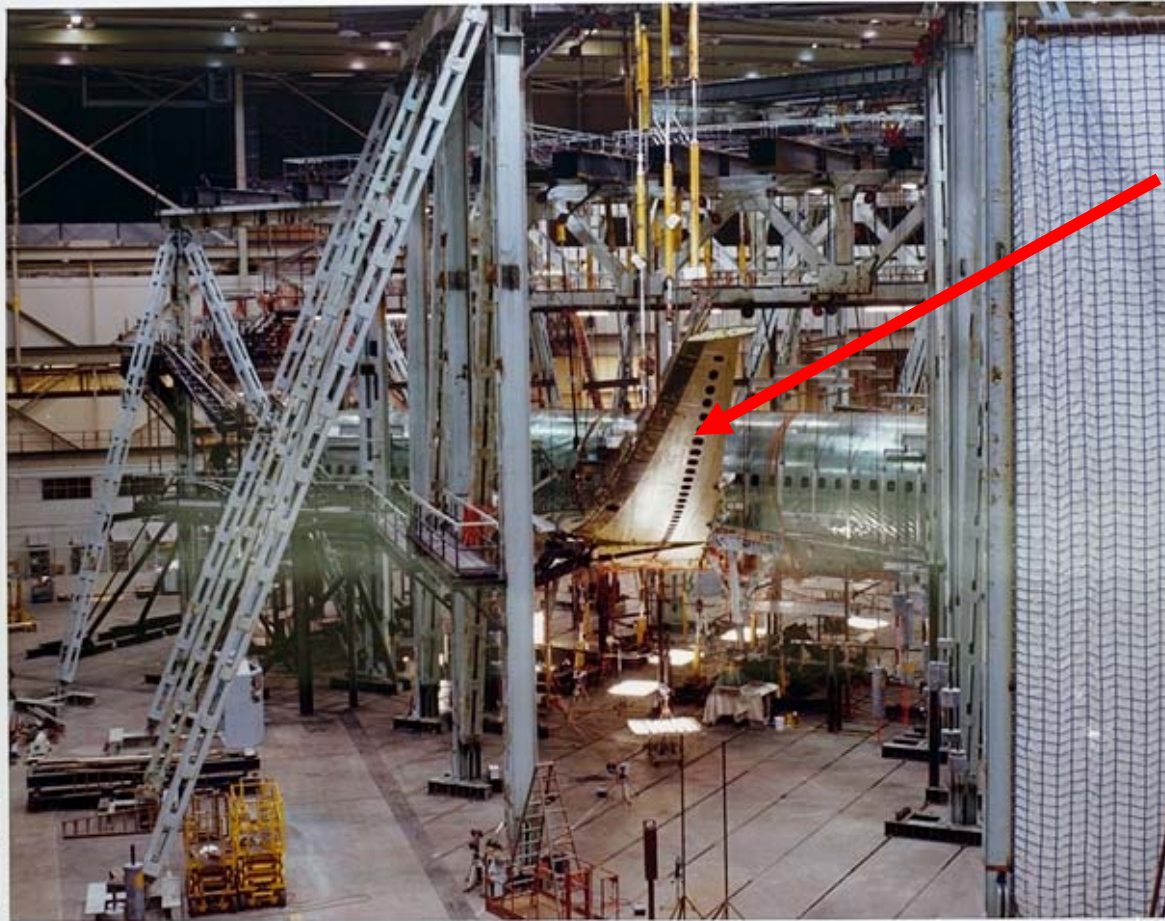
- ❑ **AEROELASTICIDADE ESTÁTICA:**
- ❑ Quando o movimento varia pouco com o tempo; sem aceleração e/ou velocidade significativas.



Deflexão das asas de aeronaves em vôo em função do carregamento aerodinâmico.

# Introdução

---



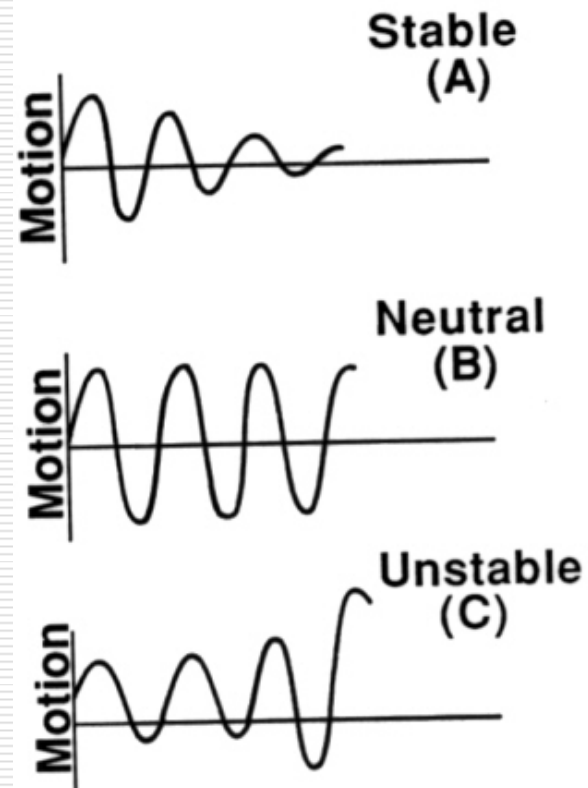
**Note que asas  
podem ser bastante  
flexíveis !**

(teste estrutural da  
asa do Boeing 747)

# Introdução

- ❑ ***AEROELASTICIDADE DINÂMICA:***
- ❑ Quando o movimento varia significativamente com o tempo;
- ❑ Acelerações e velocidades significativas o que implica no surgimento das componentes de inércia que interagem com as componentes elásticas e aerodinâmicas

## Time Histories



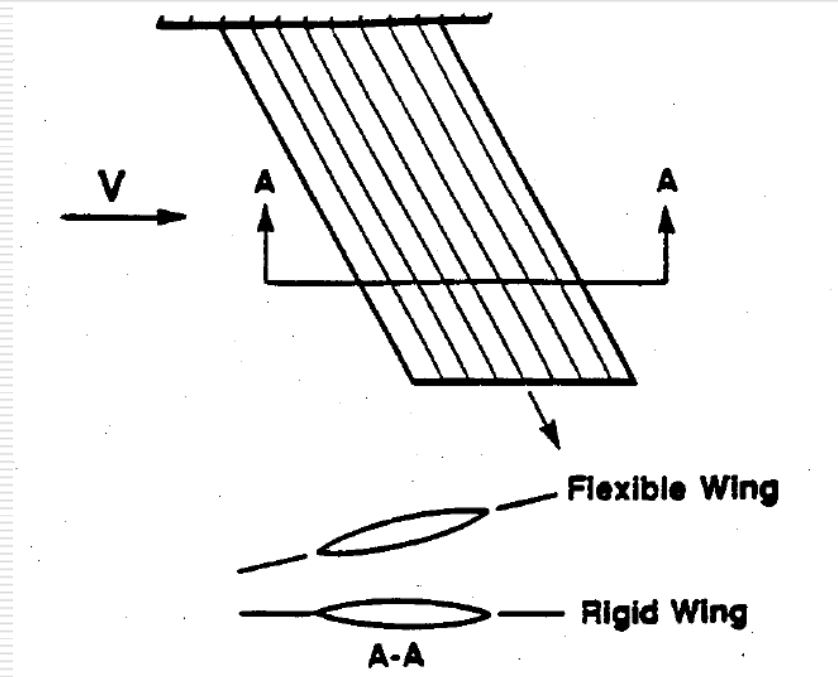
# Introdução

---

- ❑ Ou seja, uma aeronave é um corpo flexível, portanto pode ser deformada, sua aerodinâmica será alterada;
- ❑ Estas alterações aerodinâmicas em função das deformações da estrutura, caracterizam o comportamento aeroelástico;
- ❑ O **sistema dinâmico** que caracteriza o corpo e o meio que o envolve (escoamento de fluido), passa a ser chamado de **sistema aeroelástico**, e pode ser representado matematicamente através de modelos adequados, fundamentados na teoria a serem apresentadas neste curso.
- ❑ Obs: O termo ***AEROELASTICIDADE*** foi formalmente introduzido por Roxbee Cox e Pugsley – em 1932.

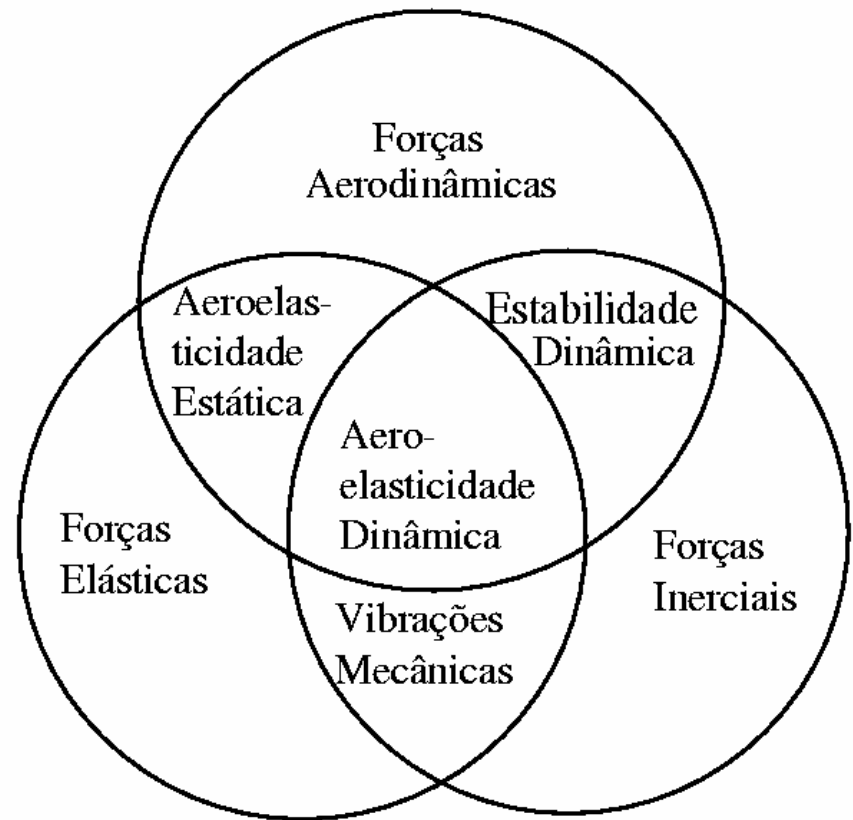
# Introdução

- Para o entendimento do fenômeno físico de uma forma elementar, note o esquema ao lado ->
- A mudança de ângulo de ataque devido a flexibilidade promove um aumento da sustentação, que por sua vez deforma ainda mais asa, realimentando o processo na forma do aumento do ângulo de ataque proporcionando novamente o aumento da sustentação.



# Aeroelasticidade

- A interação mútua entre as forças elásticas, de inércia e aerodinâmicas pode ser representada graficamente através de um diagrama conhecido como **diagrama dos três anéis** ->
- Obs: Collar em 1946, inicialmente definiu aeroelasticidade em termos de um triângulo de forças análogo ao diagrama ao lado.





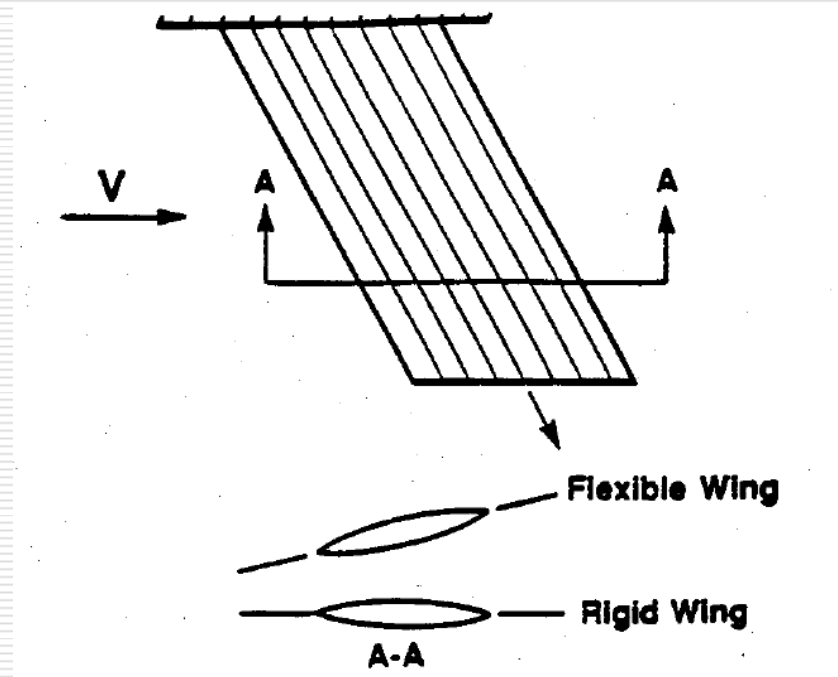
# Fenômenos Aeroelásticos

---

- ❑ Os fenômenos físicos associados aos dois tipos de comportamento de um sistema, estático ou dinâmico, podem ser subdivididos como:
  - Associados a estabilidade do sistema aeroelástico:
    - ❑ Divergência (estático)
    - ❑ Flutter (dinâmico)
  - Associados à resposta (aeroelástica) no tempo:
    - ❑ Redistribuição de Cargas (estático)
    - ❑ reversão de comandos (estático)
    - ❑ cargas de rajadas (dinâmico)
    - ❑ Buffeting (dinâmico)
- ❑ Cada um dos fenômenos físicos serão apresentados ao longo do curso, bem como a forma de modela-los matematicamente.

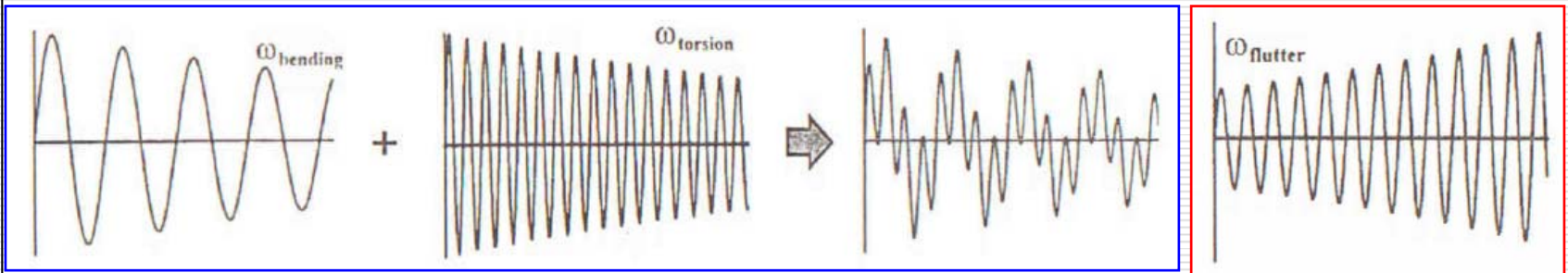
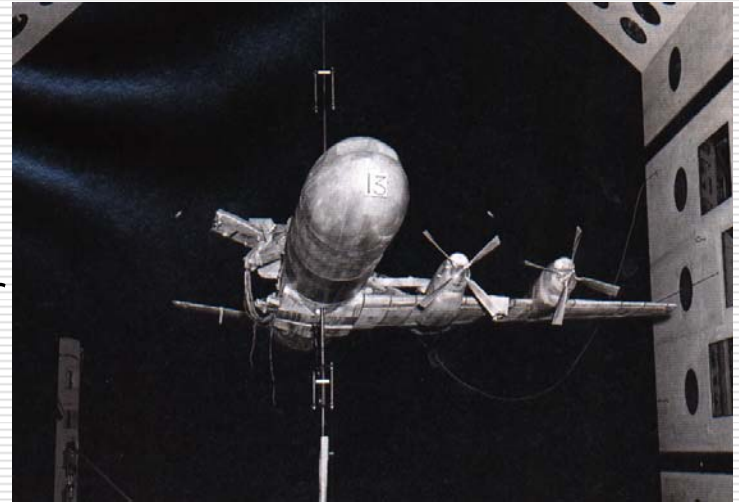
# Divergência

- ❑ Conforme apresentou-se anteriormente, o aumento de sustentação ocorre devido ao aumento do ângulo de ataque. ;
- ❑ Se a pressão dinâmica do escoamento for suficientemente alta, este processo realimentado pode levar ao colapso da estrutura devido a "**divergência**" do movimento da asa;
- ❑ Caso contrário, a asa permanece estaticamente deformada.



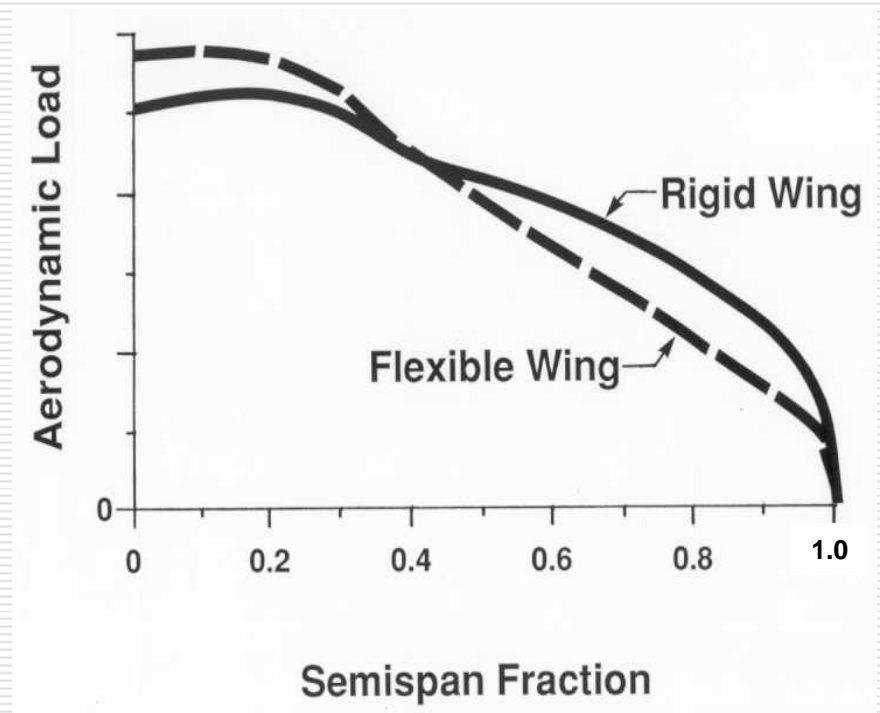
# Flutter

- ❑ **Flutter** é uma auto-excitação de dois ou mais modos de vibração de um sistema, devidamente alterada e realimentada pelo escoamento de um fluido. Pode vir a causar oscilações de amplitude que crescem exponencialmente levando a estrutura a uma falha dinâmica.



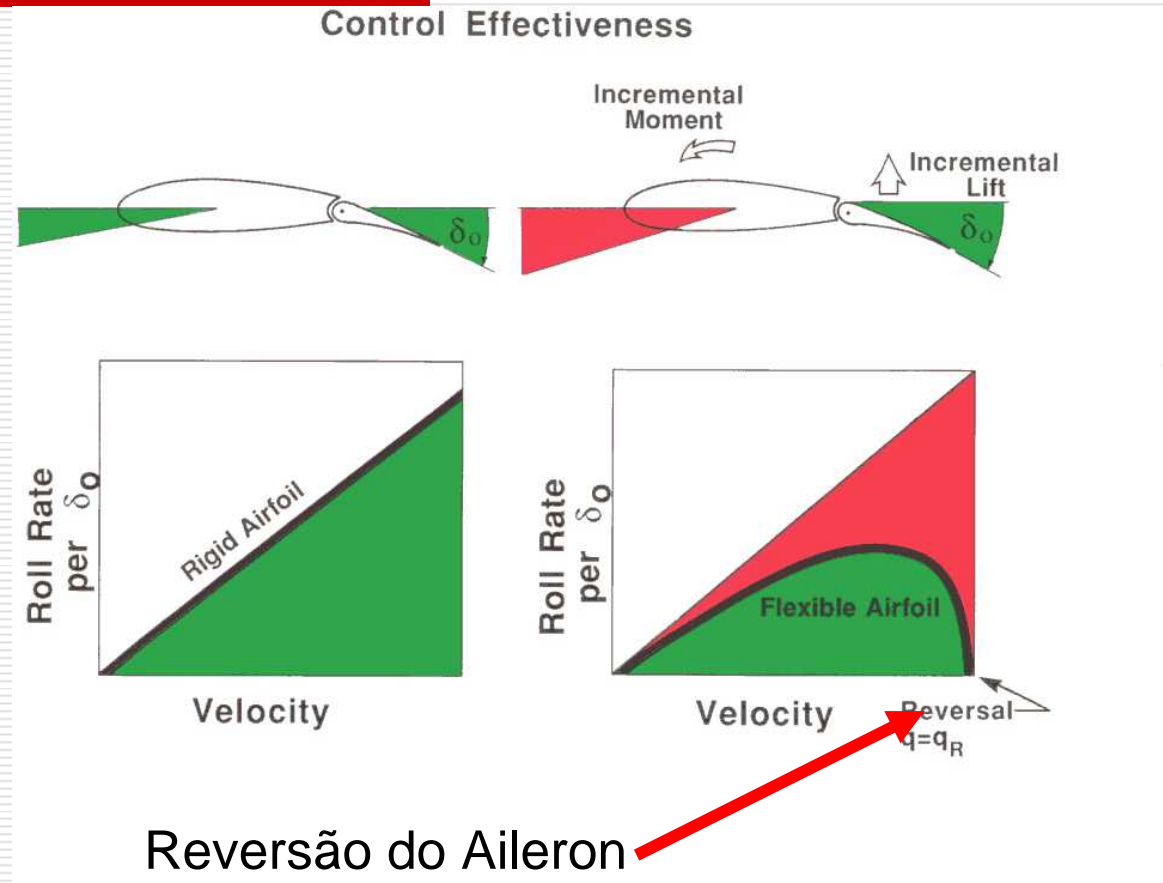
# Redistribuição de Cargas

- Quando a asa é flexível, o carregamento aerodinâmico ao longo da envergadura pode ser alterado devido a deformação da asa em ângulo de ataque.



# Reversão (eficiência) de comandos

- Pode causar ineficiência, perda ou até a reversão de uma ação de comando de uma superfície de controle



# Cargas de rajada

---

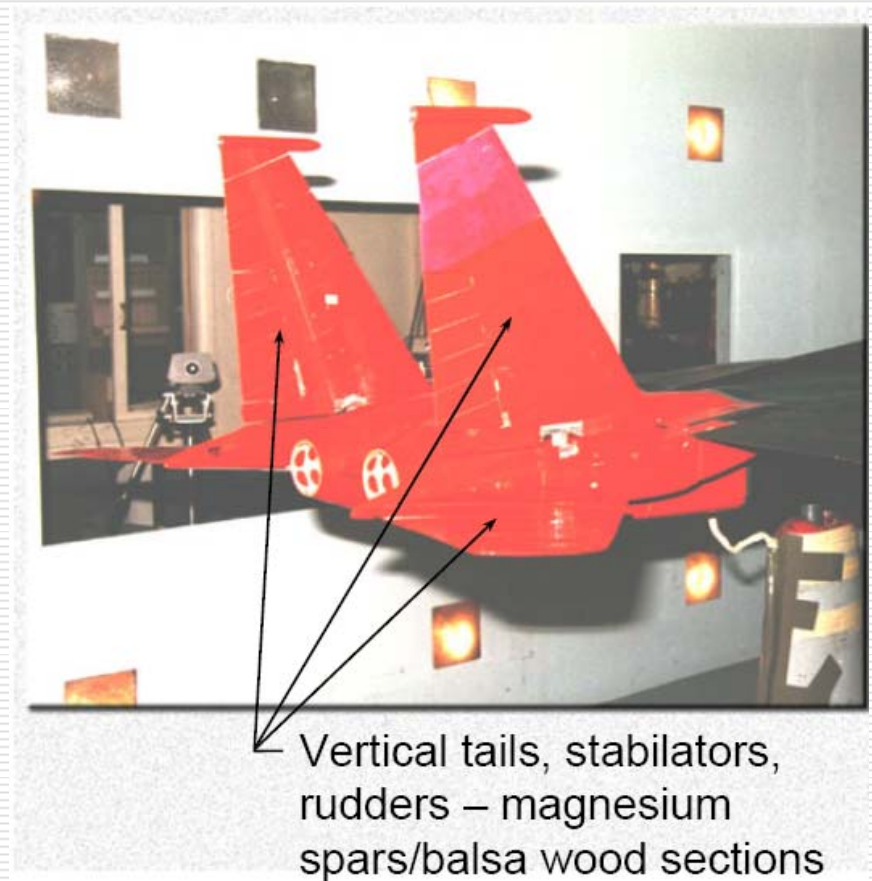
## □ Cargas dinâmicas:

- Devido rajadas de vento, pouso, disparo de armamentos, alijamento, choques e etc.;
  - O aumento do carregamento aerodinâmico devido uma rajada de vento ocorre devido ao aumento do ângulo de ataque instantâneo, podendo elevar o fator de carga a limites além dos autorizados para a aeronave;
  - Modela-se o sistema aeroelástico considerando a presença da rajada também para o projeto de sistemas de alívio de cargas desta natureza.
-

# Buffeting

---

- ❑ Fenômeno típico de aeronaves de alta manobrabilidade;
- ❑ Vibrações causadas pela esteira gerada por outras partes da aeronave, por exemplo interferência da esteira da asa na empenagem;
- ❑ Fenômeno altamente não linear, difícil de modelar matematicamente, sendo necessária investigação em túnel de vento

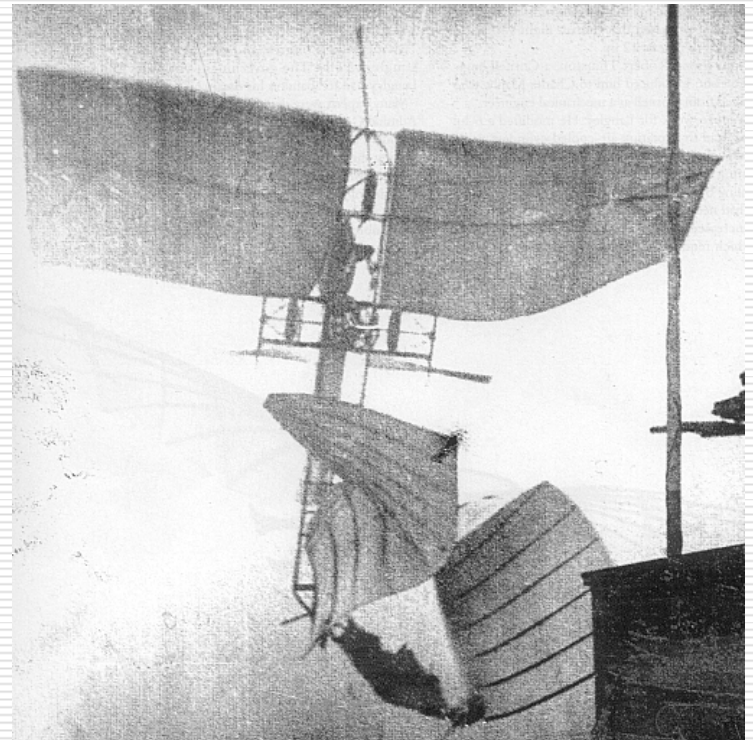
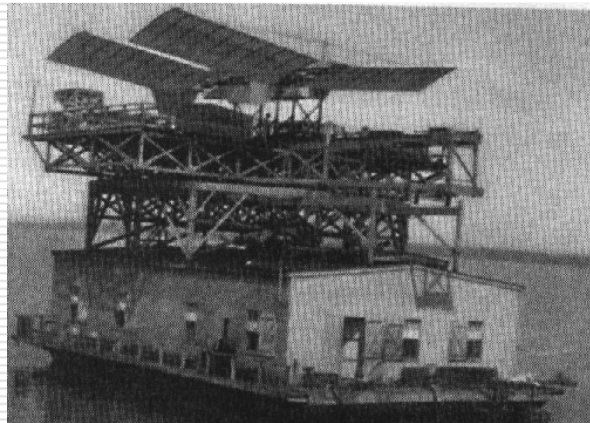




# Um Pouco de História da Aeroelasticidade....

---

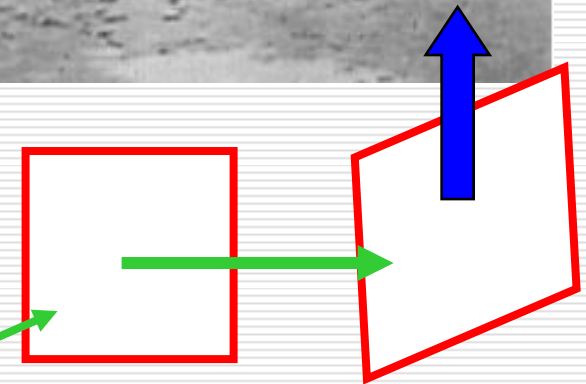
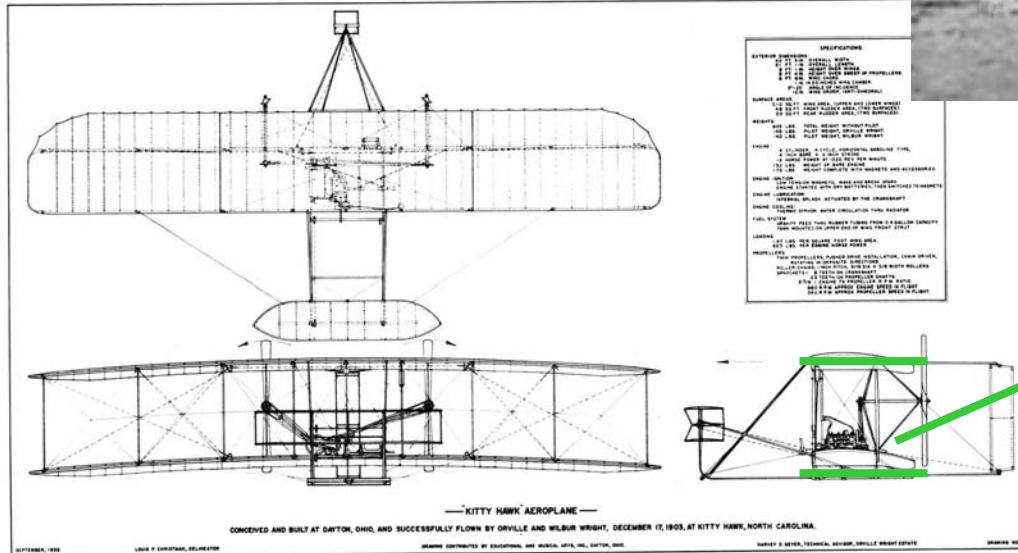
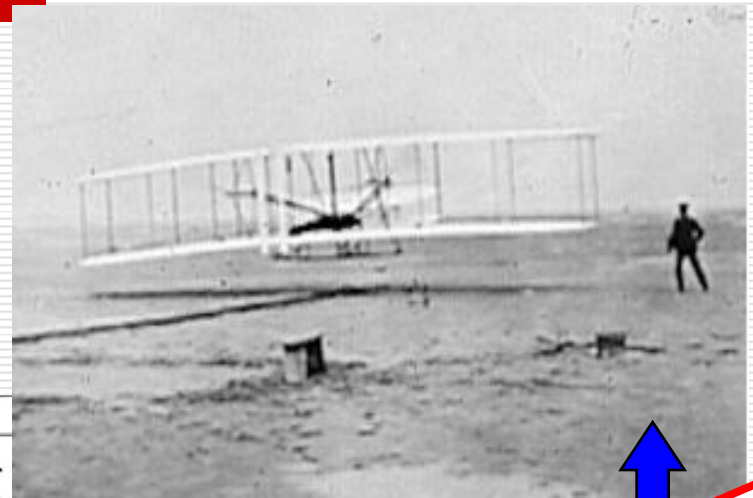
- ❑ O primeiro incidente aeronáutico documentado e relacionado a um problema aeroelástico implicou na catastrófica do Aerodrome de Samuel Langley, em 1903. O acidente foi causado por uma divergência devido ao alto camber da asa





# O "Wright Flyer"

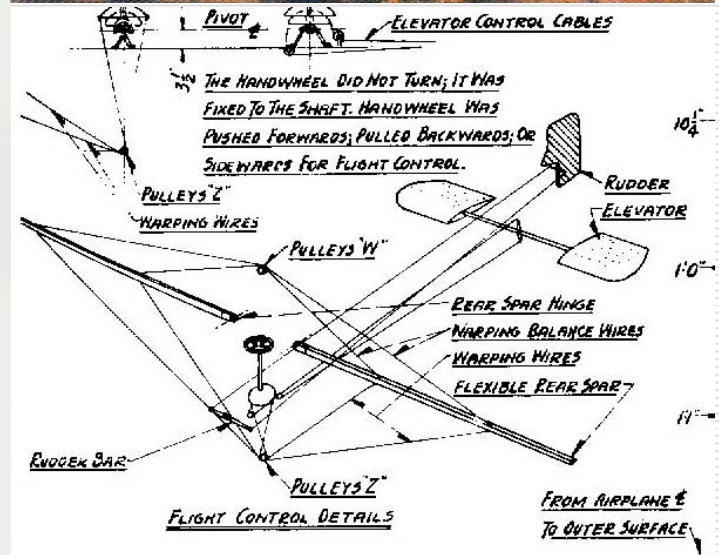
*Wing morphing* (*warping* = distorção) é um conceito que hoje está sendo estudado de novo.



## *Distorção da asa*

# Controle Aeroelástico

Bleriot XI – monoplano controlado por “*wing warping*”. Requer asa flexível em torção, muito sujeita a divergência !



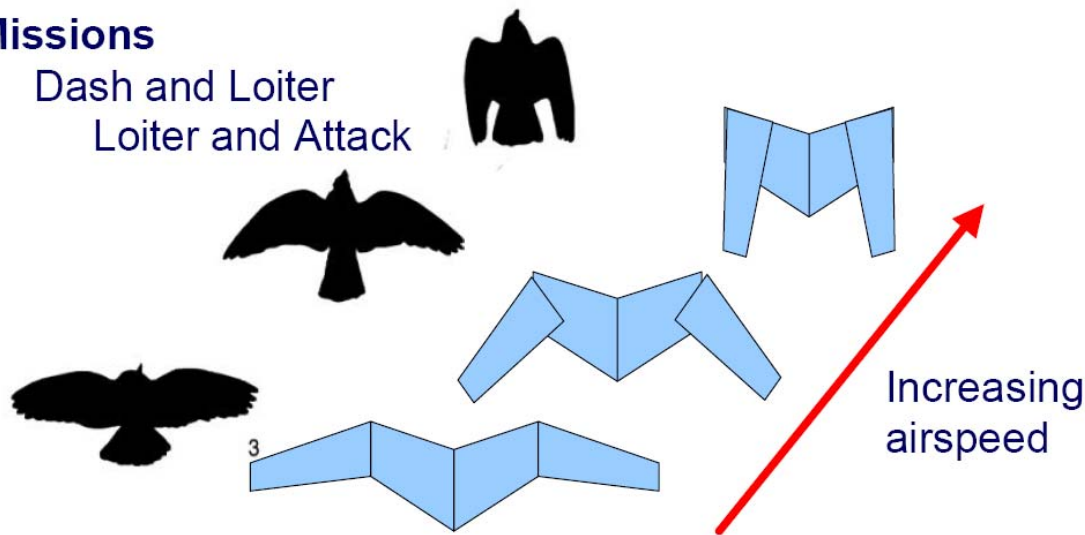
# Wing Morphing

---

- ❑ Modificação da forma em planta da asa, bem como do camber não é algo inédito, a natureza nos ensina...

## Missions

Dash and Loiter  
Loiter and Attack



# Opção pelos Biplanos

---

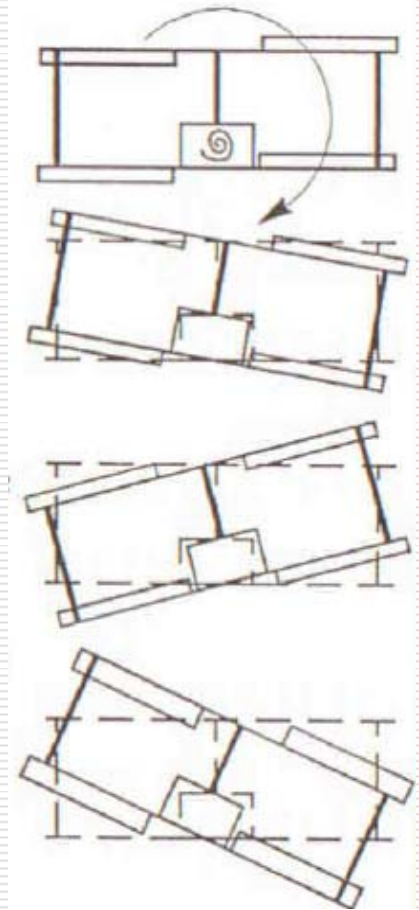
- ❑ Possivelmente, a falha de Langley com seu monoplano e o sucesso dos irmãos Wright com o seu biplano influenciou a preferência por biplanos;
  - ❑ Porém, analisando tecnicamente, a montagem das asas de um biplano gera um conjunto de superfícies de sustentação mais rígido em torção do que uma asa única. O lembre-se que o maior problema das asas na ocasião era a rigidez em torção.
  - ❑ A rigidez em um biplano era aumentada pelos estais e barras que conectam as duas asas, compondo uma caixa rígida.
-



# Flutter na I Guerra Mundial

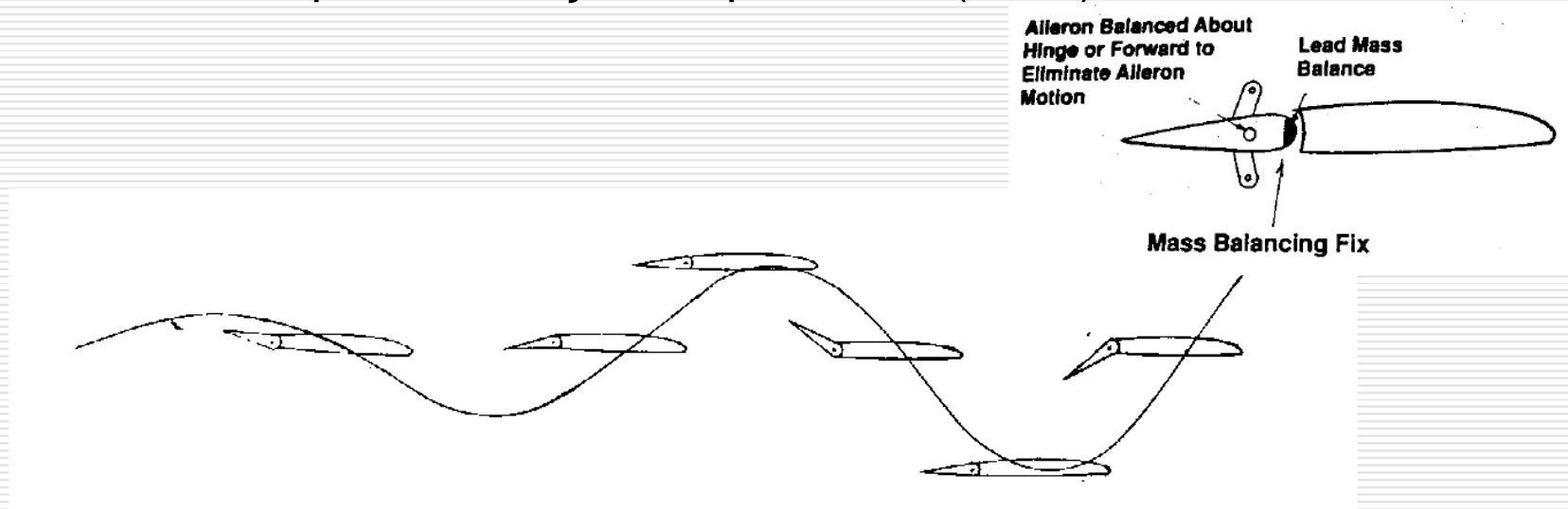
- ❑ Lanchester e Bairstow – flutter dos aviões Handley Page O-400 e DeHavilland DH-9 (1916);
- ❑ Este de fato foi um flutter resultante da coalescência de dois modos estruturais, um associado a torção da fuselagem a rotação anti-simétrica do profundor.

“ ... at certain critical speeds of flight a tail wobble is set up, involving heavy torsional stresses on the fuselage, the type of vibration being an angular oscillation approximately about the axis of the fuselage; I am informed that the angular magnitude of this oscillation amounts at times to something approaching  $15^\circ$ , and is undoubtedly extremely dangerous to the structure of the machine. I gather that the experience of the pilots when this vibration is at its worst is terrifying ... ”



# Flutter de superfícies de controle

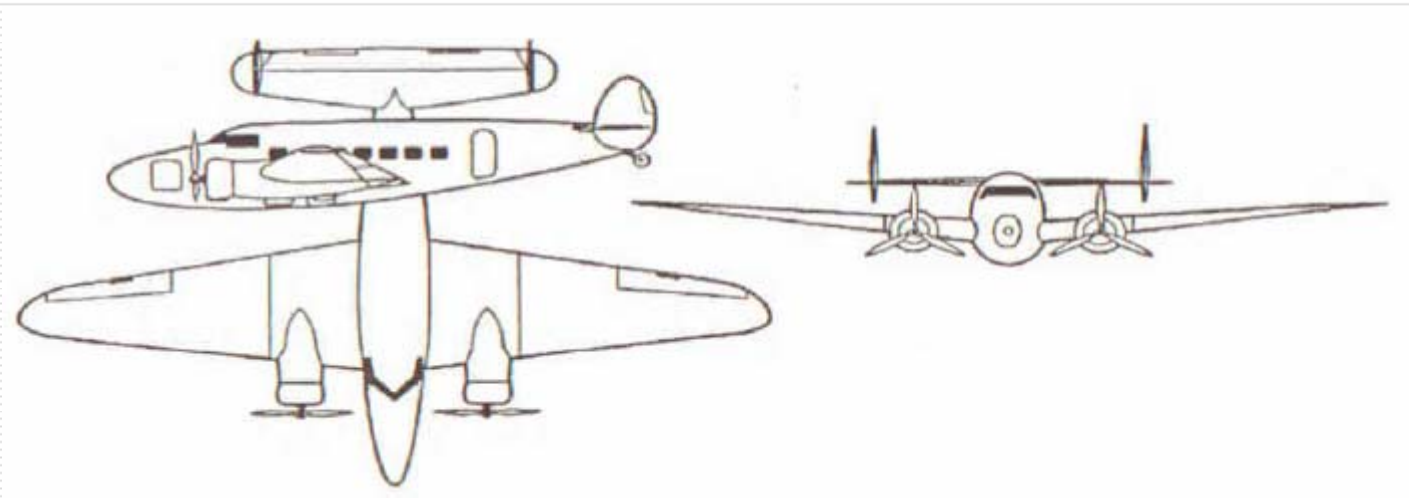
- ❑ von Baumhauer e Köning – flutter de aileron do van Berkel WB Seaplane causado pelo acoplamento dinâmico entre o modo de flexão da asa com o modo de rotação do aileron
- ❑ Este problema está relacionado com a posição do centro de gravidade do aileron, e para tal empregou-se o balanceamento mássico para a solução do problema (1923).



# Flutter de superfícies de controle

---

- ❑ Lockheed 14H Super Electra (1938), apresentou problemas de flutter no leme. Uma tentativa prévia de correção antes da entrega da aeronave mostrou-se ineficaz, causando um acidente com vítimas fatais.



# Outros incidentes

---

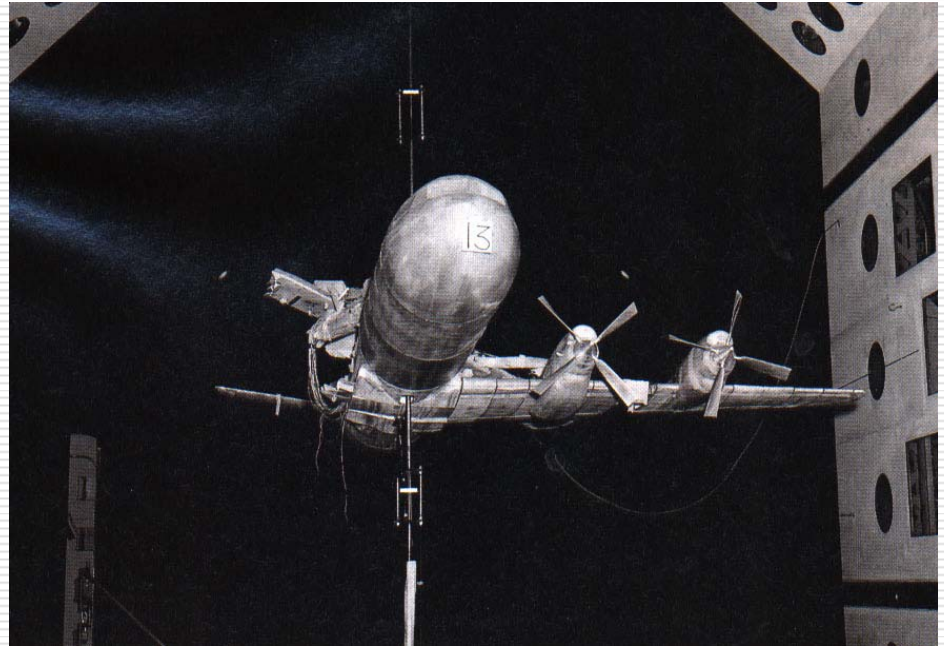
- ❑ Jato T-33 durante teste em vôo com tanques nas pontas das asas. Flutter resultante do acoplamento entre modos de torção e flexão da asa
  - ❑ Flutter do tipo “ciclo limite” da empenagem vertical do KC-135.
  - ❑ E-6A TACAMO, perda da metade superior empenagem vertical. Problema “resolvido”, nova falha no vôo seguinte.
  - ❑ Aeronave de transporte militar ARAVA (Israel) – Flutter devido a uma parafuso de fixação da asa com torque inadequado.
-



# Whirl Flutter

---

- ❑ Decorrente da interação entre a hélice e a asa.
- ❑ Caso clássico – Lockheed Electra
- ❑ Muitos acidentes fatais.



# Programa do Curso AE-249

---

- ☐ **Introdução e conceitos básicos**
  - ☐ **Aeroelasticidade estática**
    - Divergência
    - Redistribuição de cargas
    - Reversão de comandos
  - ☐ **Aerodinâmica não estacionária**
    - Equação do Potencial Aerodinâmico Linearizado
    - Modelos de Theodorsen, Wagner, Küssner e Sears
  - ☐ **Aeroelasticidade dinâmica**
    - Estabilidade Aeroelástica (flutter)
    - Resposta Aeroelástica
  - ☐ **Formulação do problema aeroelástico na base modal.**
    - Modelo dinâmico estrutural
    - Métodos de elementos discretos em aeroelasticidade
  - ☐ **Aeroelasticidade no Espaço de Estados**
    - Aproximação aerodinâmica por funções racionais
    - Modelo aeroservoelástico
-

# O que não veremos no curso

---

- ☐ Aeroelasticidade não linear (devido ao regime de escoamento e/ou a estrutura);
  - ☐ Aeroelasticidade de placas e cascas;
  - ☐ Aeroelasticidade de asas rotativas e sistemas rotativos (hélices);
  - ☐ Dinâmica do voo integrada a aeroelasticidade.
-

# Cronograma Tentativo

<b>Dia</b>	<b>Assunto</b>	<b>S E M A N A  d e  R E C U P E R A Ç Ã O</b>	<b>Dia</b>	<b>Assunto</b>
29/07	Introdução e Histórico		30/09	Aeroelasticidade dinâmica
05/08	Aeroelasticidade estática.		07/10	Aeroelasticidade dinâmica
12/08	Aeroelasticidade estática.		14/10	Aeroelasticidade dinâmica.
19/08	Aeroelasticidade estática.		21/10	Resposta Aeroelástica.
<b>27/08</b>	<b>Prova 1 (com consulta)</b>		28/10	Exemplo de Aplicação.
02/09	Aerodinâmica não-estacionária.		<b>4/11</b>	<b>Prova 2 (com consulta)</b>
09/09	Aerodinâmica não-estacionária.		11/11	Aeroelasticidade no espaço de estados
16/09	Aerodinâmica não-estacionária.		18/11	Aeroelasticidade no espaço de estados
			<b>02/12</b>	<b>Exame (sem consulta)</b>

# Avaliação

---

- Preparo para as provas baseado na distribuição de séries nas seguintes datas:

- 1ª Série em 13/08
- 2ª Série em 17/09
- 3ª Série em 22/10

- Duas provas
- Exame Final

$NP_1$  = nota prova 1  
 $NP_2$  = nota prova 2  
 $NE$  = nota do exame  
 $MF$  = média final

$$\frac{\left( \frac{NP_1 + NP_2}{2} \right) + NE}{2} = MF$$

# Bibliografia e referências

---

- Textos básicos do curso:
    - Bismarck-Nasr, M. N. ***Structural Dynamics in Aeronautical Engineering***. Reston, VA: AIAA, 1999. (AIAA Education Series).
    - Bisplinghoff, R.L. Ashley, H. and Halfman, R. ***Aeroelasticity***. Addison Wesley, 1955.
    - Dowell, E. H. et al. ***A Modern Course in Aeroelasticity***. 4. ed. Kluwer Academic, 2005.
    - Fung, Y. C. ***An Introduction to the Theory of Aeroelasticity***, Wiley, 1955
  - Mais um conjunto de referências a serem passadas durante o curso, de acordo com o assunto.
-