

# Aeroelasticidade

Carlos De Marqui Junior

Departamento de Engenharia Aeronáutica

Escola de Engenharia de São Carlos

Universidade de São Paulo

2024

# Sumário

## 1. Introdução

## 2. Aeroelasticidade Estática 1

- Divergência da seção típica e efetividade/eficiência de comando

## 3. Aeroelasticidade Estática 2

- Asa de corda constante (solução exata), asa de corda variável (soluções aproximadas: Galerkin, Rayleigh-Ritz e métodos de colocação), problema de redistribuição de cargas, problema geral de asas 3D e enflechadas

# Sumário

## 4. Princípios da Dinâmica

- Sistemas com um e múltiplos graus de liberdade (DOF), problema do autovalor, coordenadas naturais, análise modal, GVT (Ground Vibration Test) de uma aeronave completa

## 5. Introdução à Aerodinâmica Não Estacionária

- Teoria de Theodorsen, aproximações quase-estacionárias. A “função de transferência aerodinâmica”, métodos numéricos modernos (doublet-lattice, CFD), escoamento transônico e a busca para modelos aeroelásticos de ordem reduzida

# Sumário

## 6. Aeroelasticidade Dinâmica

- Seção típica, flutter como um problema de estabilidade com realimentação, resposta dinâmica aeroelástica: buffeting, testes de flutter em voo

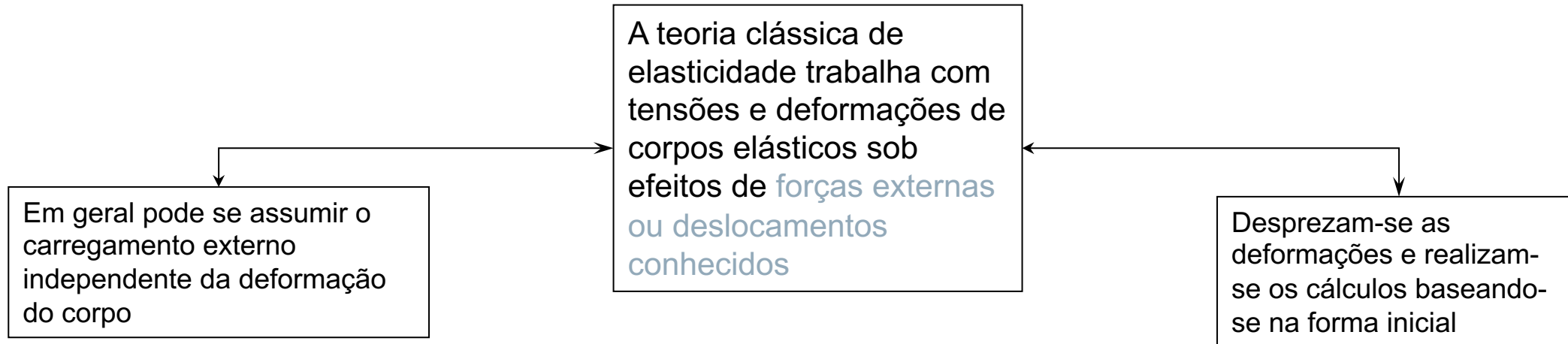
## 7. Métodos de Previsão de Flutter

- Problema de autovalor, método p, método k e método pk

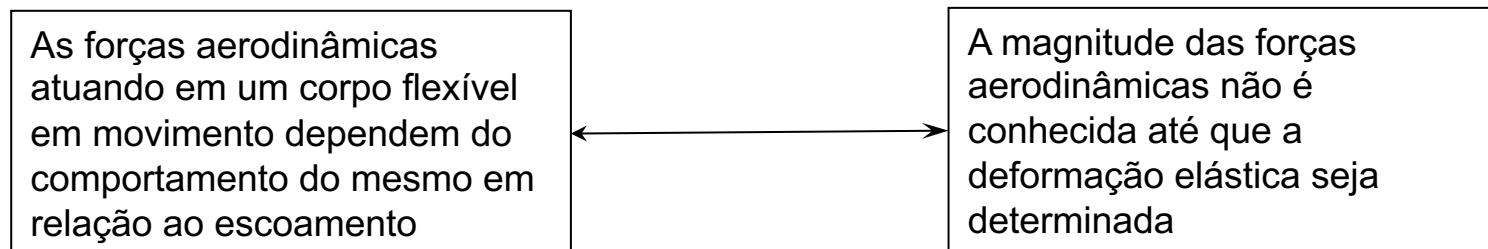
# 1. Introdução à Aeroelasticidade

- Aeroelasticidade é o estudo do efeito das forças aerodinâmicas em corpos elásticos.
- A teoria clássica da elasticidade lida com tensões e deformações de um corpo elástico sob cargas externas e deslocamentos prescritos. Supõe-se geralmente que as cargas externas são independentes das deformações.
- A situação é diferente, no entanto, nos problemas de aeroelasticidade. As forças aerodinâmicas são dependentes da deformação elástica da estrutura. A deformação da estrutura é uma função das forças aerodinâmicas aplicadas. Em geral, o valor de ambos os parâmetros não podem ser determinados até que o problema combinado seja resolvido.

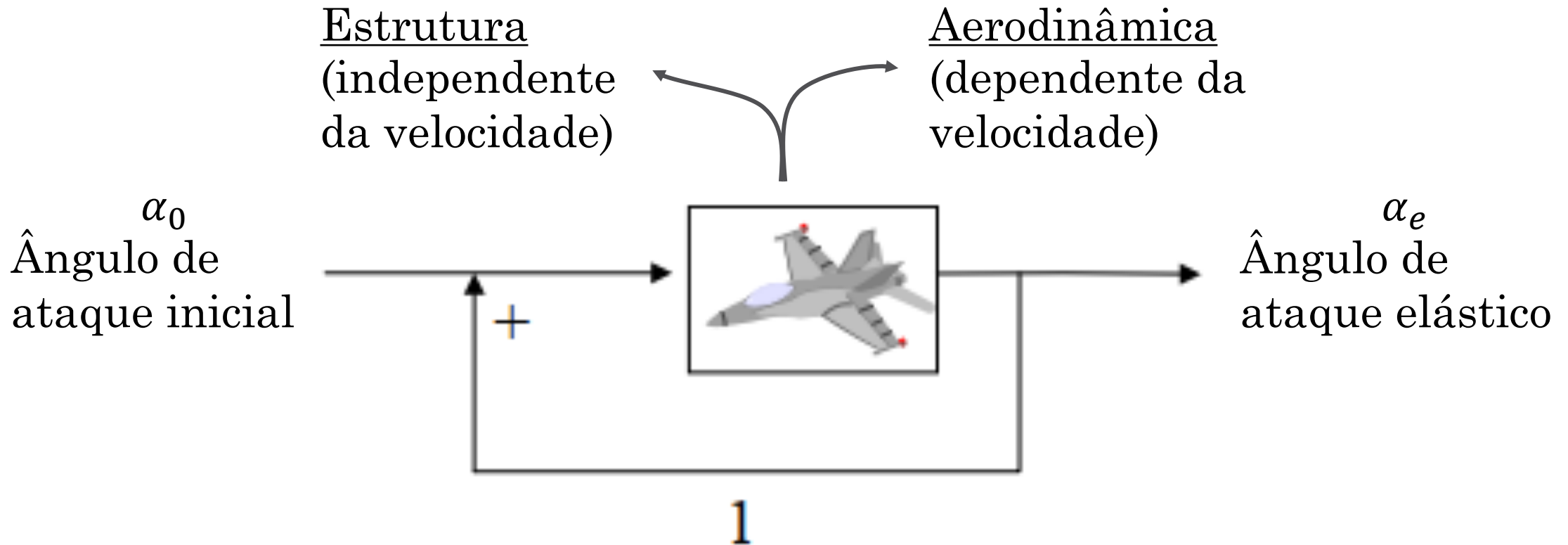
**Aeroelasticidade** é uma área do conhecimento que se refere ao estudo do efeito das forças aerodinâmicas nos corpos elásticos. Os efeitos aeroelásticos resultam da **interação entre forças elásticas, inerciais e aerodinâmicas**, ou seja, forças aerodinâmicas são induzidas por deformações estáticas ou oscilatórias da estrutura ou por forças externas resultantes de distúrbios.



**Em grande parte dos problemas aeroelásticos a situação ocorre de forma distinta da anterior**

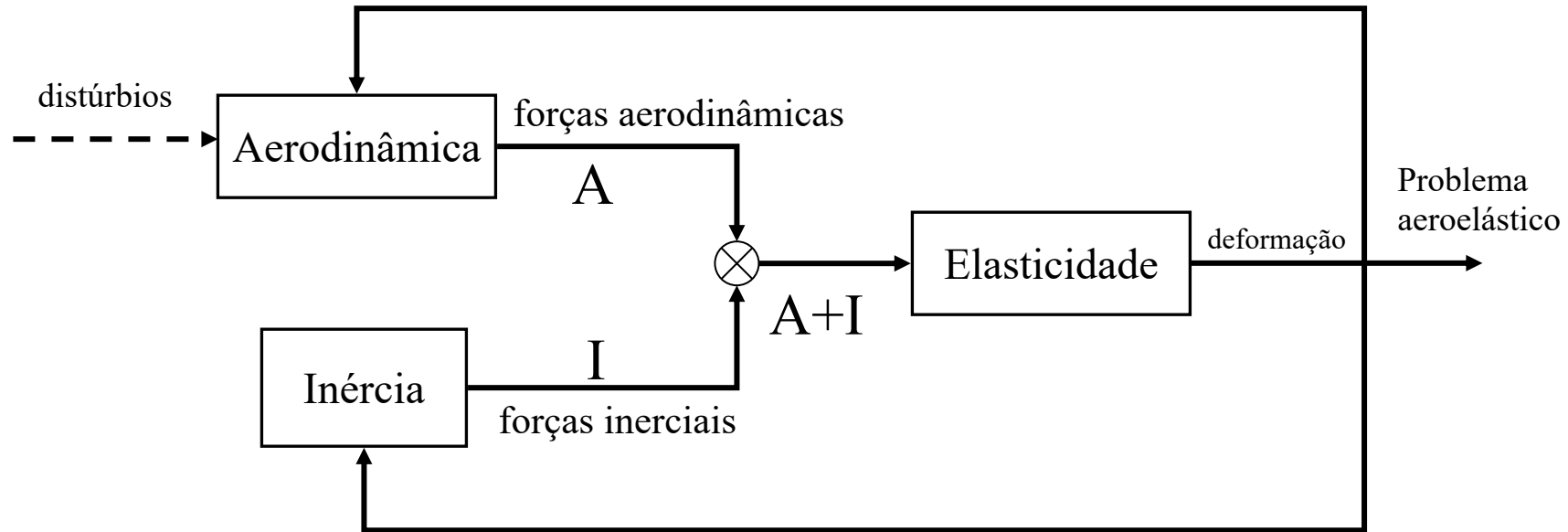


- O diagrama a seguir é representativo de um problema aeroelástico típico:



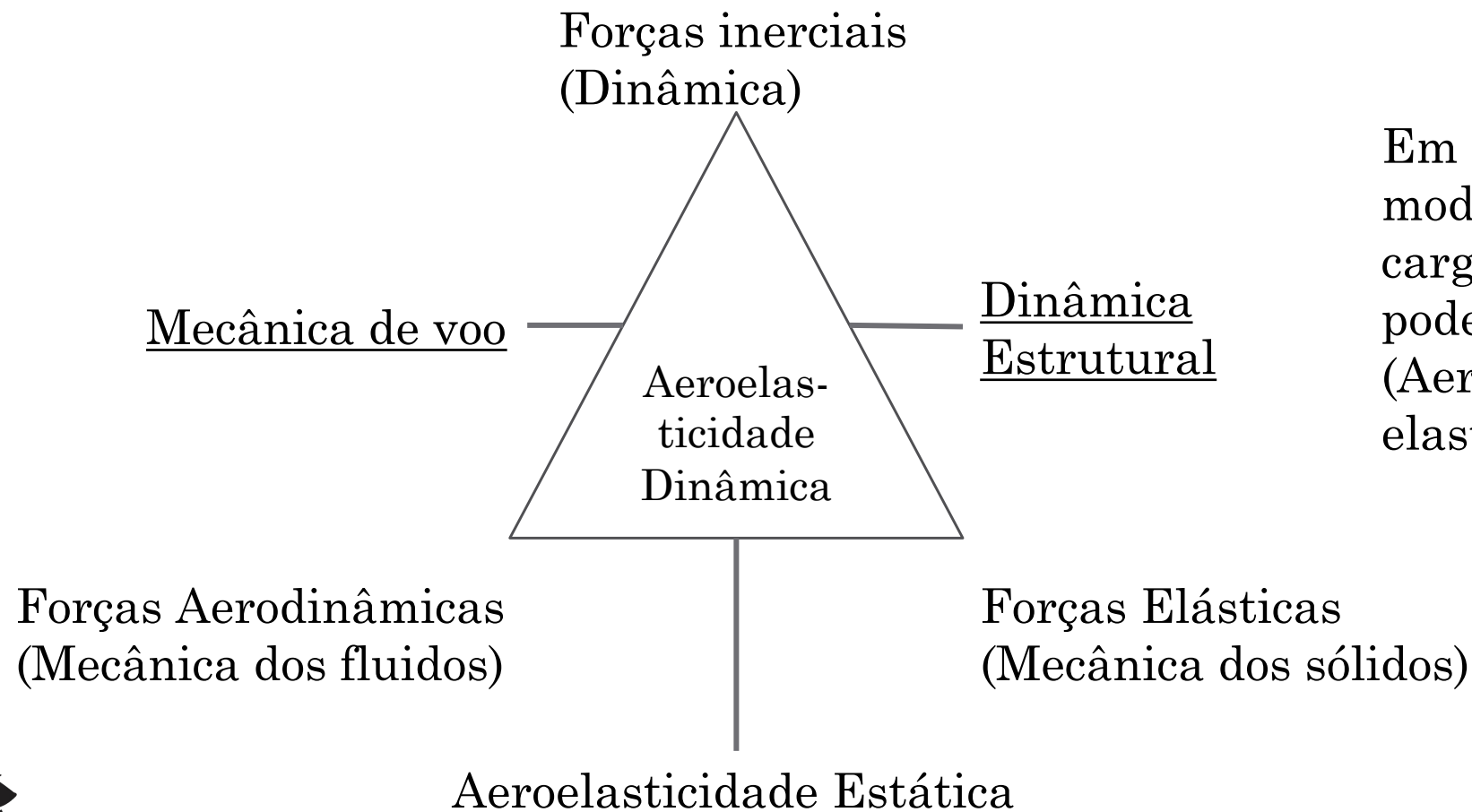
- O processo é iterativo até uma condição de equilíbrio ser atingida (em uma situação estável) ou uma falha estrutural ocorrer. A velocidade do escoamento é um fator fundamental, pois as forças aerodinâmicas são dependentes dela.

# Aeroelasticidade ↔ Interação fluido/estrutura



$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}(t)$$

- Os problemas aeroelásticos podem ser estáticos ou dinâmicos. O problema é dinâmico se a inércia tiver um papel fundamental no fenômeno. Em geral, o diagrama a seguir sugerido por Collar na década de 1940 se aplica:

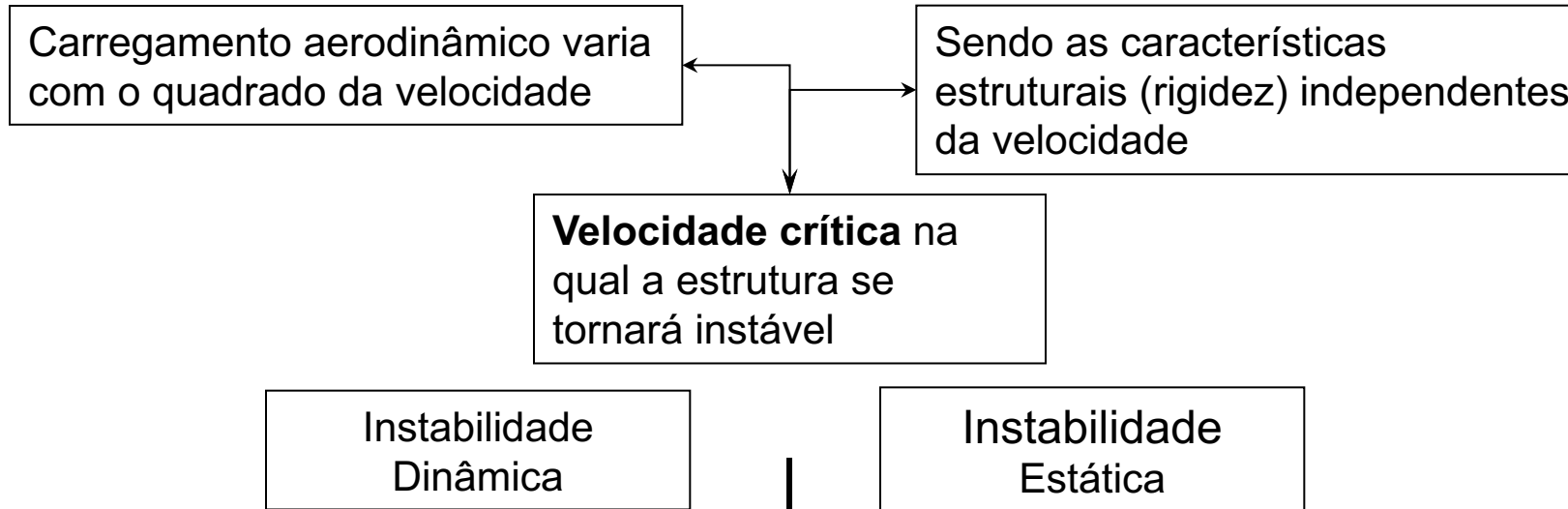


Em problemas modernos, o controle e as cargas térmicas também podem ser presentes (Aero-servo-termo-elasticidade).

# Classificação de problemas aeroelásticos

|                     | Estática                                                                        | Dinâmica                                                                                            |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Estabilidade</b> | Divergência                                                                     | Flutter;<br>Flutter de estol                                                                        |
| <b>Resposta</b>     | Distribuição de carregamento;<br>Efetividade de comando;<br>Reversão de comando | Resposta à rajada;<br>Resposta de comando;<br>Cargas dinâmicas de pouso;<br>Buffeting;<br>Galloping |

## Fenômenos Aeroelásticos de Estabilidade



**Flutter**, fenômeno aeroelástico dinâmico onde dois ou mais modos de vibrar estruturais estão acoplados e excitados por cargas aerodinâmicas. De um modo mais formal, o *flutter* ocorre quando um componente de uma aeronave, ou a aeronave inteira, apresenta característica oscilatória e auto-excitada a partir de uma determinada velocidade de voo.

O caso particular onde a inércia não possui um papel importante, é chamado de instabilidade aeroelástica estática, **divergência**.

# Fenômenos Aeroelásticos de Resposta

Além dos problemas aeroelásticos de estabilidade existem os problemas aeroelásticos de **resposta**, no qual a resposta de um sistema aeroelástico a um carregamento externo deve ser encontrada

**Carregamento externo** pode ser causado por deformação de um corpo elástico ou distúrbios como rajadas, impactos no pouso ou turbulências atmosféricas

Fenômenos Dinâmicos

Forças inerciais, elásticas e aerodinâmicas são consideradas

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}(t)$$

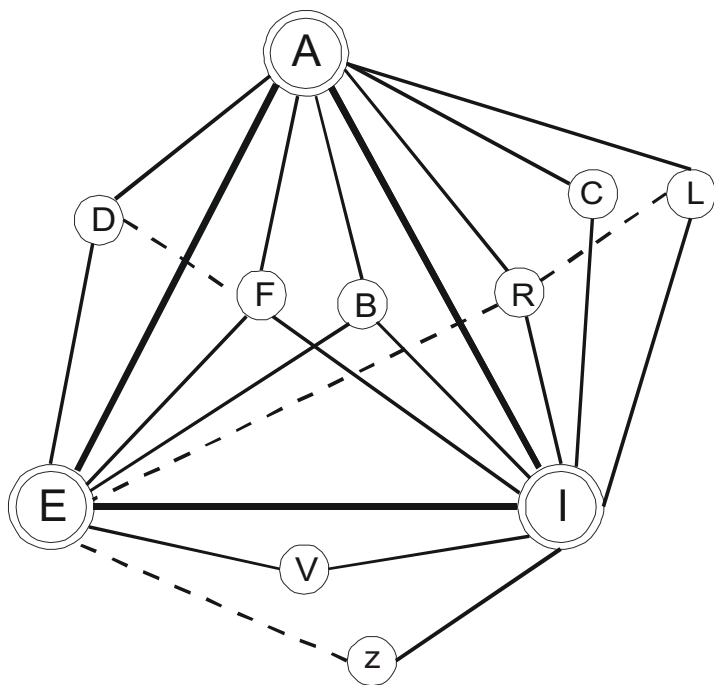
A **resposta** a ser encontrada pode ser o deslocamento, movimento ou as tensões induzidas no corpo elástico

Fenômenos Estáticos

Forças inerciais são desprezadas

$$\mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}(t)$$

**Diagrama proposto por Collar (1946)**, onde os problemas surgidos da interação entre as forças ficam claros. A Dinâmica (forças inerciais), Mecânica dos Fluidos (forças aerodinâmicas) e a Mecânica dos Sólidos (forças elásticas) são os vértices do triângulo, enquanto os lados que ligam os vértices são os problemas surgidos da interação entre estas disciplinas.



A forças aerodinâmicas  
E forças elásticas  
I forças de inércia  
F *flutter*  
B *buffeting*  
D divergencia  
R rajadas  
V vibrações mecânicas  
C estabilidade e controle  
L problemas de carregamento  
Z impactos

- Matematicamente, os problemas de estabilidade são resolvidos por equações homogêneas (problema de autovalor) e problemas de resposta são resolvidos por equações não homogêneas:

$$(S + A + I)[x] = \begin{cases} 0 & \text{para estabilidade} \\ f(t) & \text{para resposta} \end{cases} \quad (1.1)$$

Onde

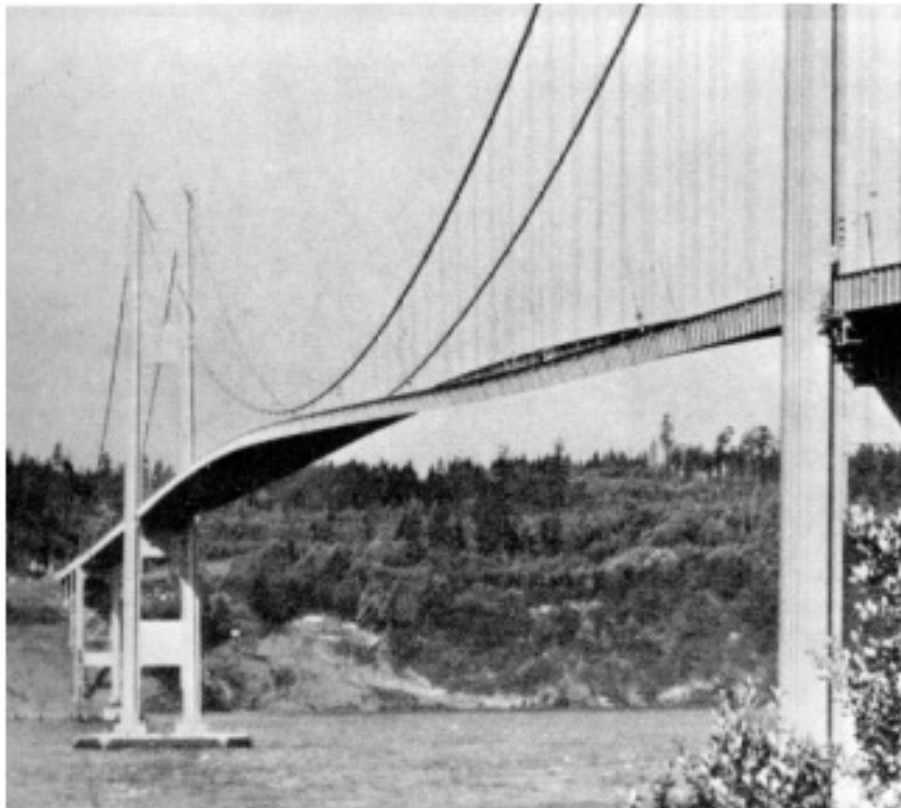
- A é um operador aerodinâmico, que é uma função do número Mach, geometria, velocidade e ângulo de ataque (no caso não linear)
- S é um operador estrutural, que pode ser diferente para diferentes subestruturas (vigas, placas, cascas ou sólidos estruturas)
- I é um operador inercial (lei de Newton) que é importante se o problema for dinâmico

- Na maioria dos problemas aeroelásticos, todos os operadores acima são considerados lineares (algébrico ou diferencial). Exemplo:

$$I \equiv -m \frac{\partial^2}{\partial t^2} \therefore I(a_1 x_1 + a_2 x_2) = a_1 I(x_1) + a_2 I(x_2)$$

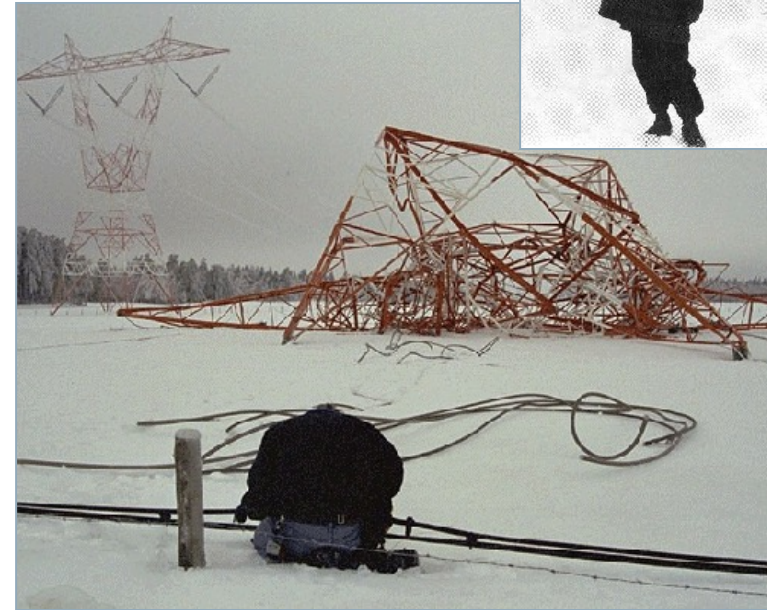
- Em um problema de estabilidade, a amplitude dos deslocamentos é irrelevante, ou seja, dada uma perturbação inicial arbitrária na estrutura, o problema consiste em determinar se a estrutura pode ou não atingir uma condição de equilíbrio (o deslocamento final permanece finito ou diverge para o infinito).
- Um exemplo desse problema é o flutter aeroelástico, que preocupou os projetistas, não apenas em engenharia aeronáutica, mas também em engenharia civil. Um exemplo é a famosa ponte Tacoma Narrows nos Estados Unidos, que falhou logo após sua inauguração, em novembro de 1940. A ponte era instável em flutter\* e entrou em colapso após ter sido excitada por fortes ventos laterais

# Flutter de estol da Tacoma Narrows

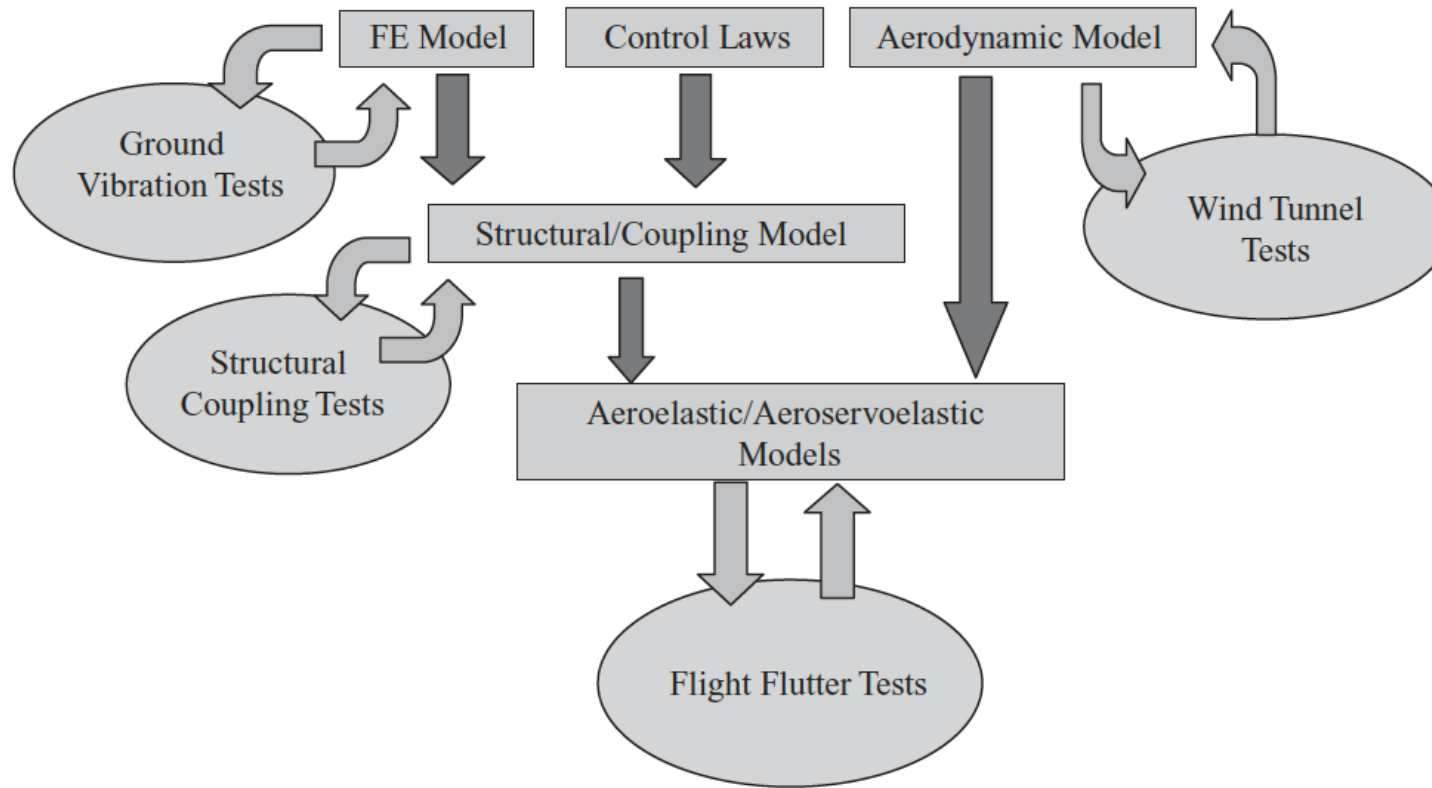


## ***Galloping***

Linhas de Transmissão



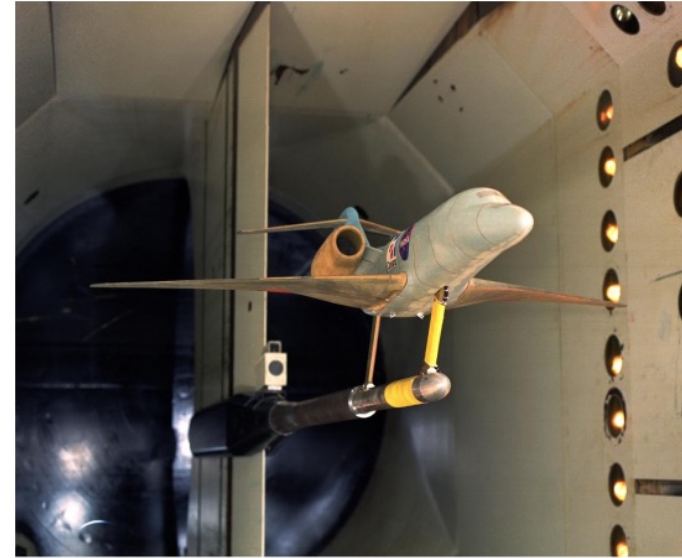
- Estruturas aeronáuticas são as mais suscetíveis a sofrer problemas de aeroelásticos de estabilidade, como divergência e flutter, porque são leves e, em geral, flexíveis - quando sujeitas a cargas aerodinâmicas podem falhar estática ou dinamicamente.
- Todos os novos projetos de aviões devem demonstrar estar livres de instabilidades aeroelásticas antes que possam ser certificadas pelo órgão regulador. Essas demonstrações incluem cálculos analíticos, simulações em computador e experimentos que podem incluir testes de túnel de vento de modelos em escala e ensaios de voo (obrigatórios).



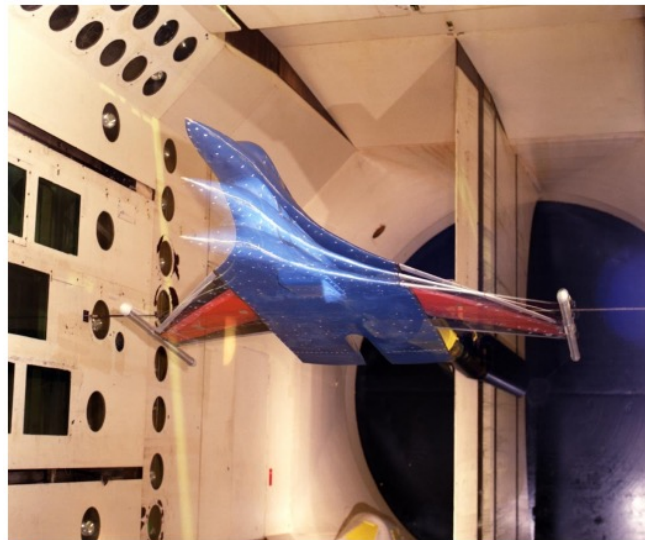
Processos de análise e certificação para aeroelasticidade.  
Wright and Cooper (2007)



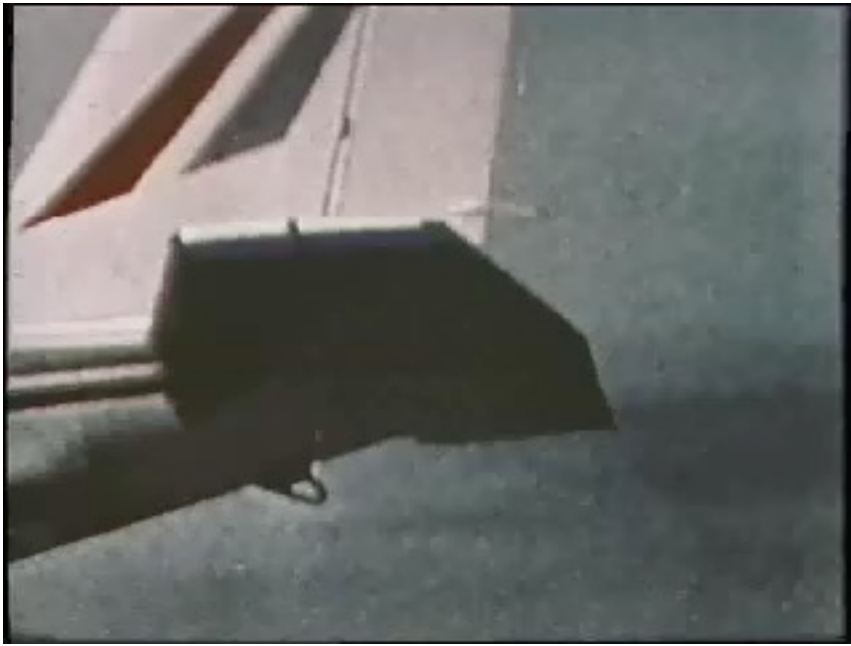
 F/A-18 E/F flutter clearance model in the Langley TDT  
 NASA Langley Research Center 7/27/1994 Image # EL-1996-00024



 Cessna GX Flutter Model  
 NASA Langley Research Center 1/21/1994 Image # EL-1996-00105



 Active Flexible Wing model mounted in the Langley TDT  
 NASA Langley Research Center 3/1/1991 Image # EL-1996-00022



- Em um problema aeroelástico de estabilidade, como o flutter, mesmo que a excitação da estrutura seja removida ( $f(t) = 0$  na Equação (1.1)), a resposta estrutural não é atenuada, porque a vibração é autossustentada. A única maneira de cessar a vibração é alterando o próprios operadores, ou seja, propriedades estruturais (rigidez ou massa) ou os parâmetros das condições de voo (velocidade, altitude, etc.)

$$(S + A + I)[x] = \begin{cases} 0 \\ f(t) \end{cases}$$

- Em um problema de resposta aeroelástica, a magnitude das deformações estruturais e do campo de tensão são importantes. Isso tem impacto no projeto da estrutura, determinando sua tensão de ruptura e vida em fadiga. Em muitos casos de resposta aeroelástica problemas aerodinâmicos não lineares devem ser consideradas.
- Um exemplo importante de problema de resposta em aeroelasticidade é o buffeting, que tem um grande impacto na longevidade das estruturas aeronáuticas. Ocorre normalmente quando uma seção da estrutura está sujeita à ação de vórtices que emanam de outra parte da aeronave, especialmente durante manobras e em condições de voo de alto ângulo de ataque

- Em um problema de resposta, como o buffeting, se a excitação é removida (esteira atingindo a deriva do F18 no caso anterior), a vibração cessa com o tempo, naturalmente amortecido pelas cargas aerodinâmicas e/ou amortecimento estrutural.



$$(S + A + I)[x] = \begin{cases} 0 \\ f(t) \end{cases}$$

# Classificação de problemas aeroelásticos

|                     | Estática                                                                        | Dinâmica                                                                                            |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Estabilidade</b> | Divergência                                                                     | Flutter;<br>Flutter de estol                                                                        |
| <b>Resposta</b>     | Distribuição de carregamento;<br>Efetividade de comando;<br>Reversão de comando | Resposta à rajada;<br>Resposta de comando;<br>Cargas dinâmicas de pouso;<br>Buffeting;<br>Galloping |

# Referências

An Introduction to the Theory of Aeroelasticity

Y.C. Fung

A leitura da Introdução do Livro auxiliará no estudo e compreensão dos tópicos aqui discutidos.