



WORKSHOP DA COORD. DE CÂMARAS ESPECIALIZADAS DE ENGENHARIA INDUSTRIAL - CCEEI

*Formação de Engenheiros para o
Desenvolvimento Científico e Tecnológico de
Aerogeradores a partir da Tecnologia Aeronáutica*

Eng. Mec. Airton Nabarrete
Pesquisador e Professor
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA



WORKSHOP DA COORD. DE CÂMARAS ESPECIALIZADAS DE ENGENHARIA INDUSTRIAL - CCEEI

Programa:

1. Problemas da dinâmica de estruturas
2. Modelos analíticos e matemáticos
3. O que são vibrações mecânicas
4. Origem da vibração
5. Localização da vibração
6. Absorvedores de vibração



Problemas em dinâmica de estruturas

Ensaio
em túnel
de vento



Problemas em dinâmica de estruturas

Ensaio
em solo



Problemas em dinâmica de estruturas

Ensaio em voo



MODELAGEM ANALÍTICA



Modelagem analítica e matemática

- **Modelagem Analítica** – Metodologias que permitem a opção por representação *contínua* ou *discreta*
- **Modelagem Matemática** - Diversas técnicas que orientam como deduzir as equações de movimento

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



Modelagem Analítica

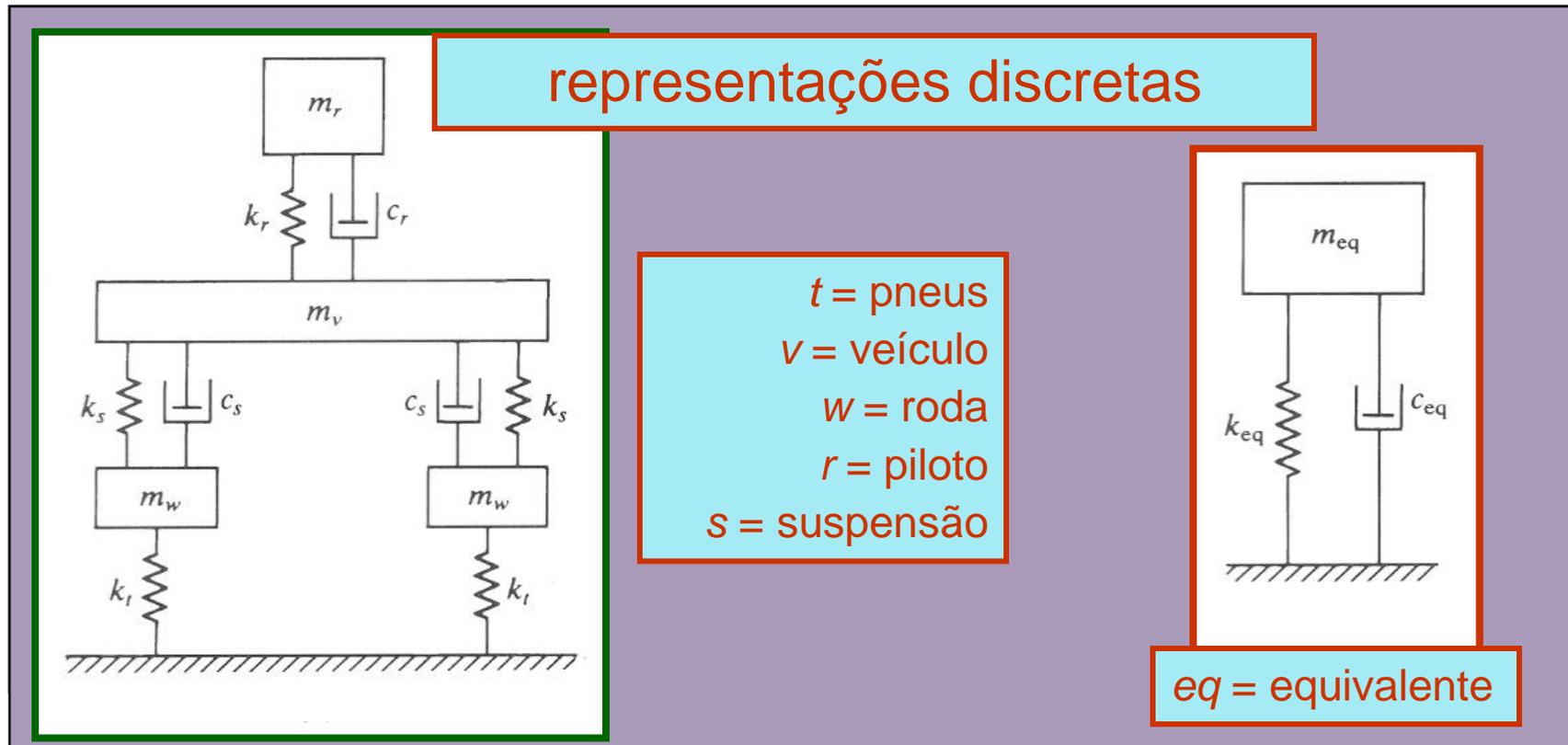
Está representada quando:

- Fazemos o desenho de uma estrutura no papel,
- Adotamos hipóteses simplificadoras como:
 - estrutura unidimensional ou bidimensional,
 - propriedades de inércia, rigidez, amortecimento, etc.,
 - carregamento equivalente aplicado à estrutura.



Modelagem de Estruturas Dinâmicas

- **Modelagem Analítica** – Metodologias com opção por representação *contínua* ou *discreta*



Modelagem de Estruturas Dinâmicas

Fenômenos energéticos

Características energética em componentes estruturais

Meios elásticos

- Armazenam energia potencial

Massas e inércias

- Armazenam energia cinética

Atritos

- Dissipam energia

energia de vibração :

energia potencial ↔ energia cinética

pode diminuir :



atritos

pode aumentar :



esforços atuantes

O QUE SÃO VIBRAÇÕES MECÂNICAS ?

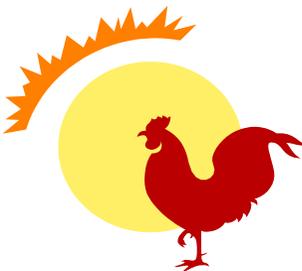


O que são Vibrações Mecânicas

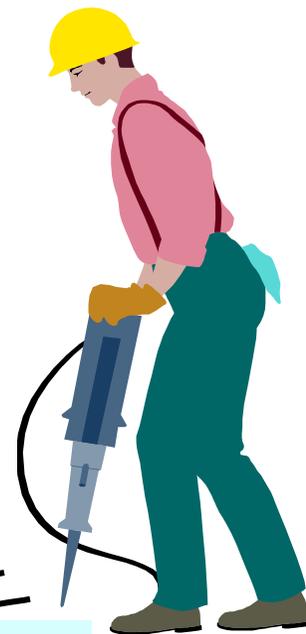
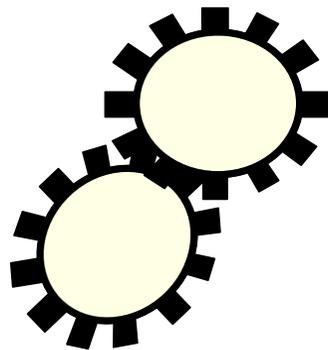


Ruídos de Máquinas

Pássaros

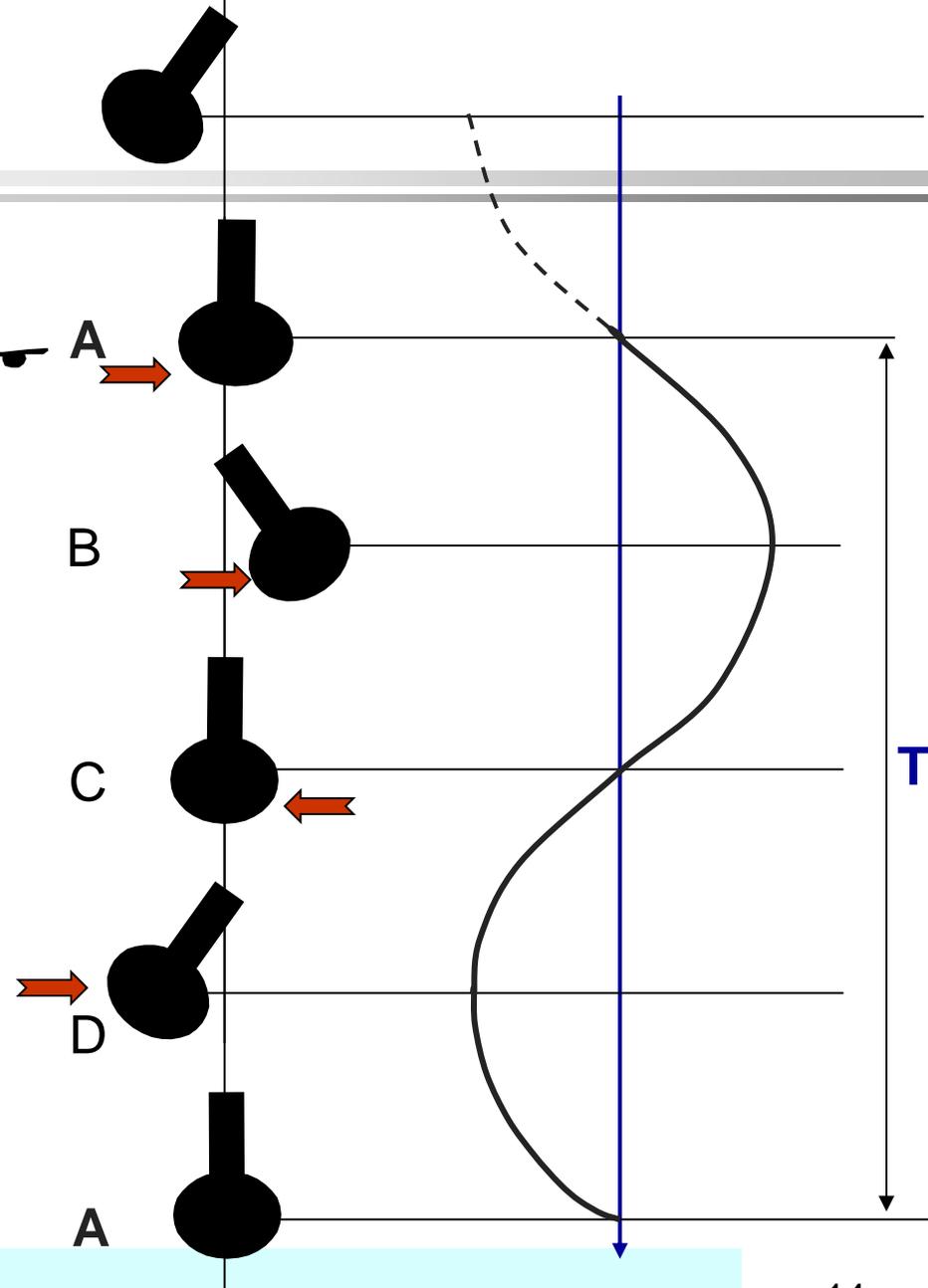
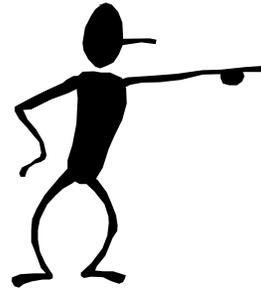
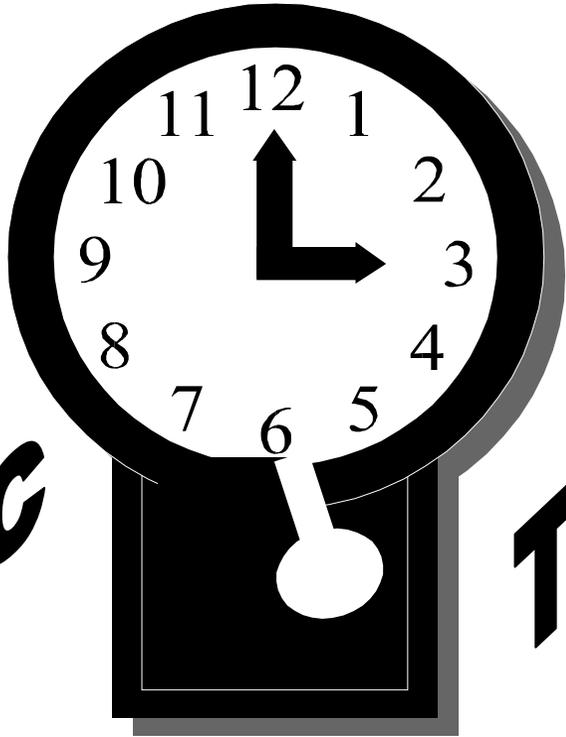


Música



Vibrações Mecânicas

Movimento periódico



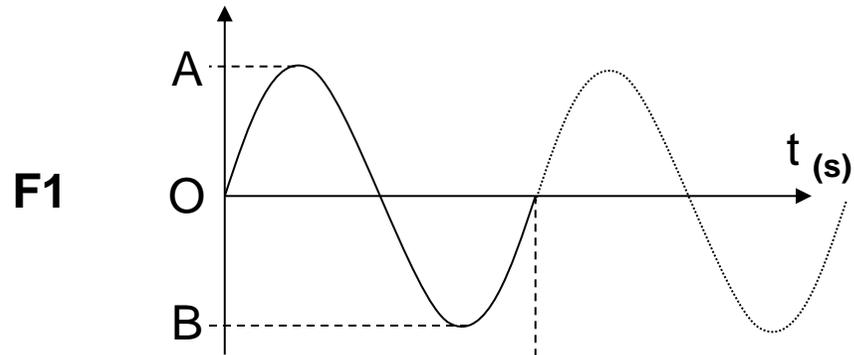
Tempo de ciclo "T" = Período



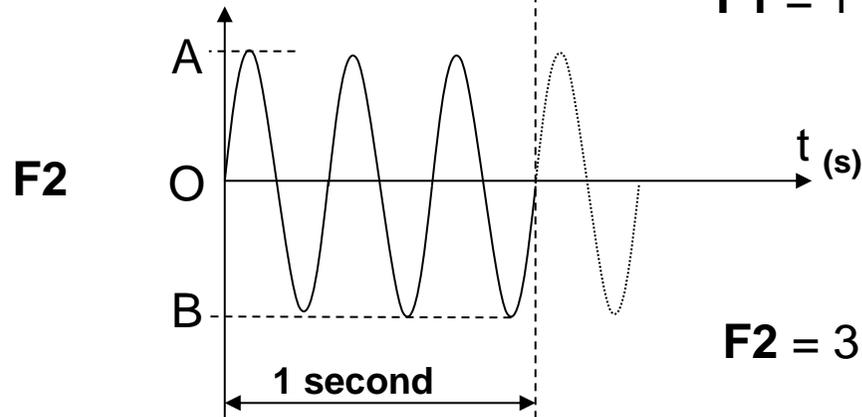
Características da Vibração

Frequência (F) = Número de ciclos por segundo (*Hertz*)

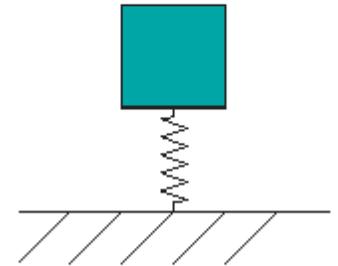
Exemplo :



F1 = 1 período em 1 segundo = 1 *Hertz*

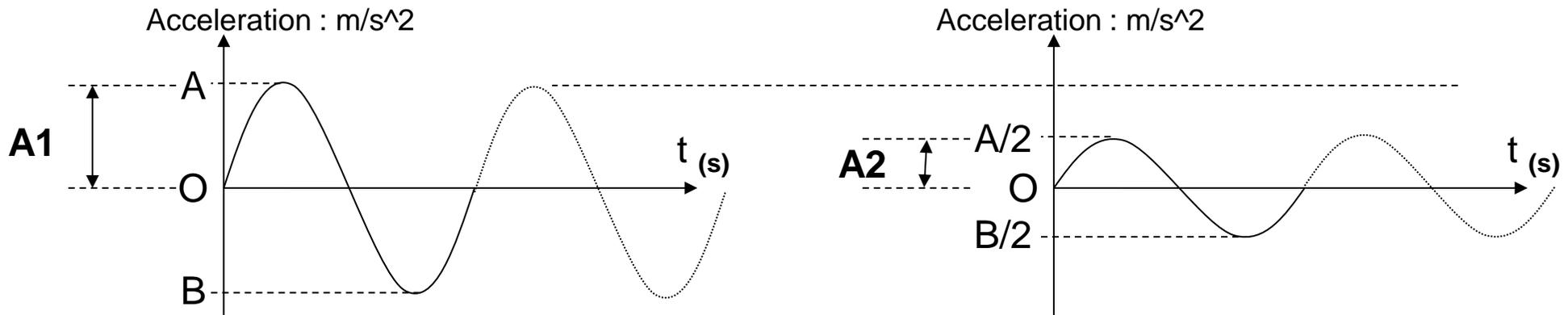


F2 = 3 períodos em 1 segundo = 3 *Hertz*

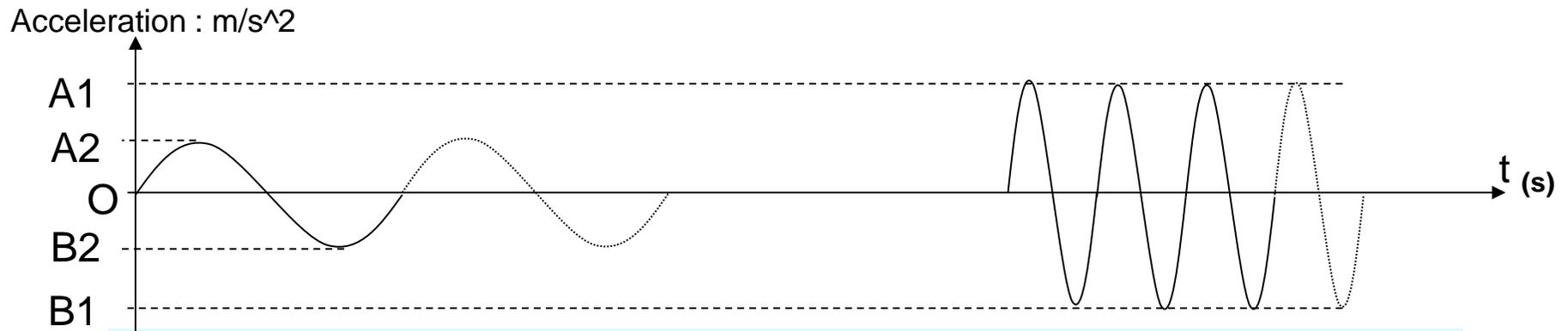


Características da Vibração

Amplitude (aceleração) = Máximo valor atingido (pode ser variável).

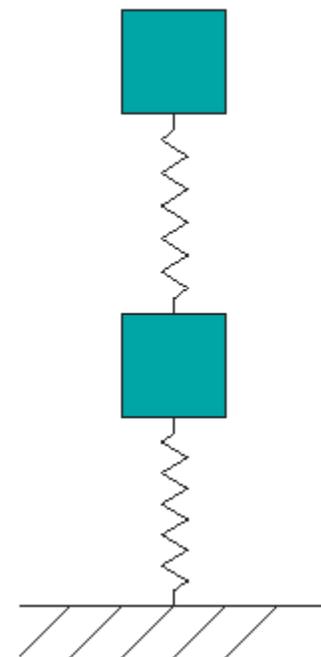
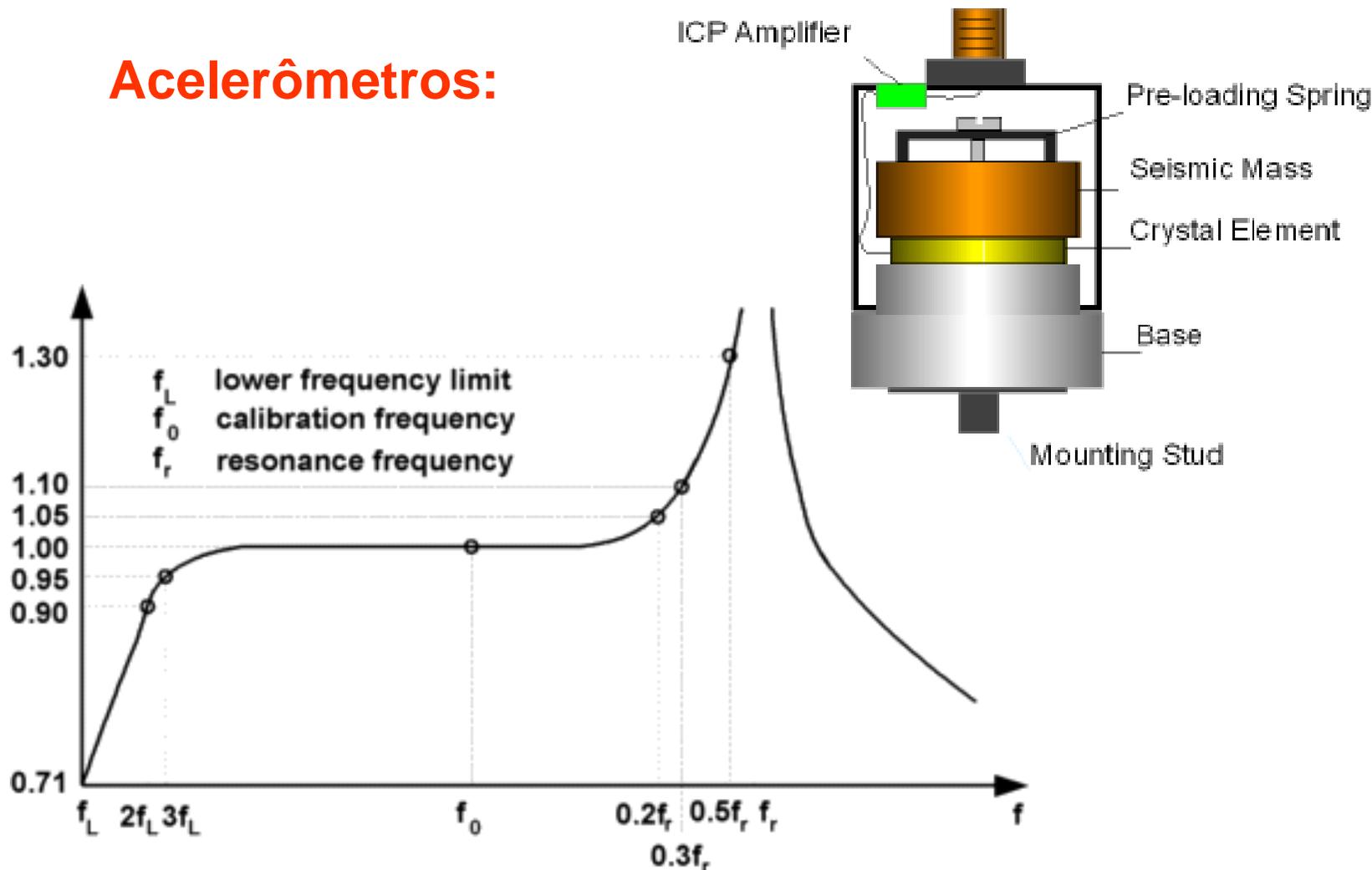


Comparações entre vibrações com amplitudes e frequências diferentes :



Medição da Vibração Mecânica

Acelerômetros:



MODELAGEM MATEMÁTICA



Análise de Estruturas Dinâmicas

- **Modelagem Matemática** – Diversas técnicas que orientam como deduzir as equações de movimento

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

- ✓ 2ª lei de Newton .
- ✓ princípio de D'Alembert .
- ✓ princípio dos deslocamentos virtuais .
- ✓ princípio da conservação da energia .
- ✓ equações de Lagrange .
- ✓ princípio de Hamilton .

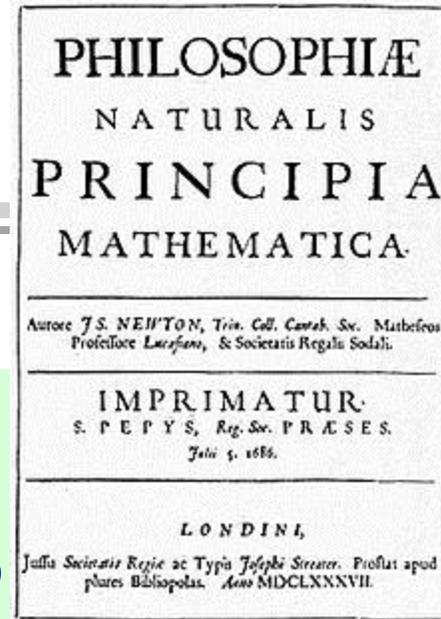


Mecânica Newtoniana

2ª Lei de Newton

(1687 em *Principia*)

“ Vista de um referencial inercial, a resultante das forças aplicadas ao centro de massa de um sistema é igual à variação temporal da quantidade de movimento linear do mesmo”.



linear :

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(\vec{p}) = \frac{d}{dt}(m\vec{v})$$

sendo a massa constante,

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

rotativo :

$$\vec{M} = \frac{d}{dt}(\vec{h}) = \frac{d}{dt}(I\vec{\omega})$$

$$\vec{M} = I\vec{\alpha}$$

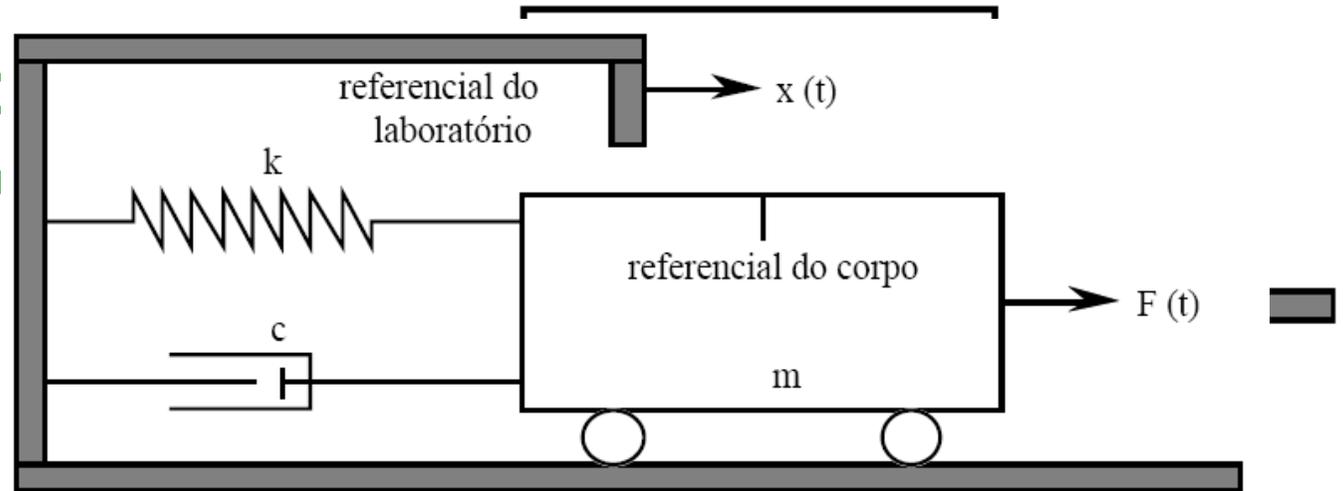


Mecânica Newtoniana

2ª Lei de Newton

considerando
oscilador pro

equilíbrio :



equação final :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

Mecânica Lagrangeana

Princípio da conservação da energia:

“A variação temporal da energia mecânica de um sistema é igual à potência instantânea absorvida ou dissipada pelo sistema”.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d}{dt}(T + V) = P$$

P incorpora as forças dissipadas e forças externas aplicadas ao sistema.

$$P = (F(t) - c \dot{x}(t)) \dot{x}(t)$$

no caso do sistema protótipo:

$$T = \frac{1}{2} m \dot{x}^2(t)$$

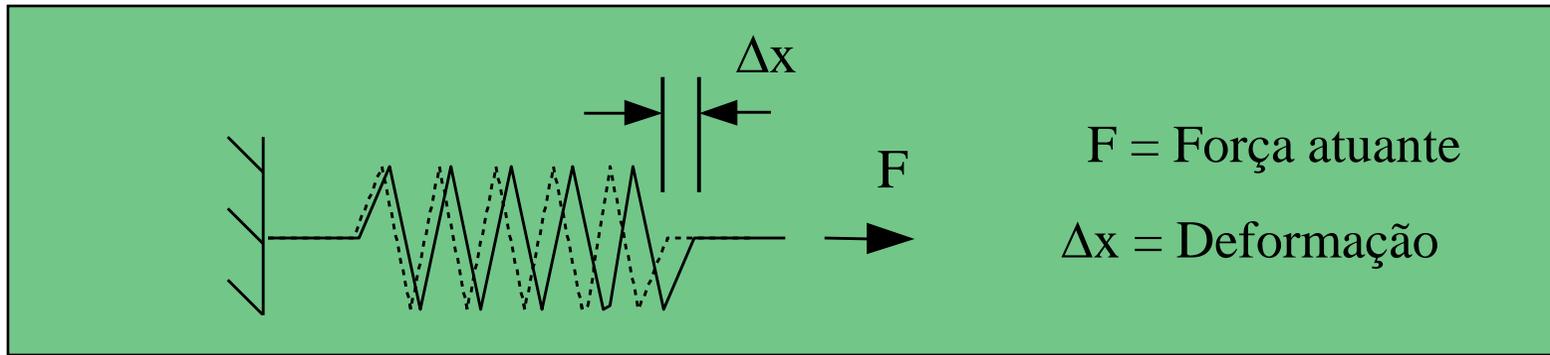
$$V = \frac{1}{2} k x^2(t)$$

$$\rightarrow [F(t) - m\ddot{x}(t) - c\dot{x}(t) - kx(t)] \dot{x}(t) = 0$$

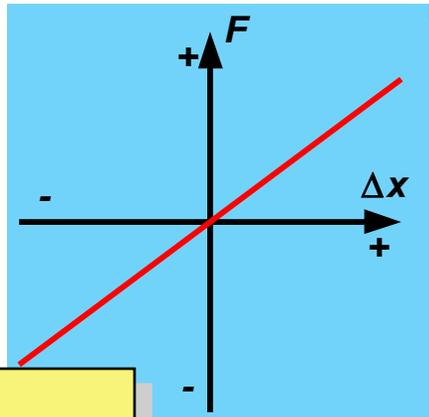


Sistema Linear x Não Linear

Elemento elástico discreto: **Mola comercial**

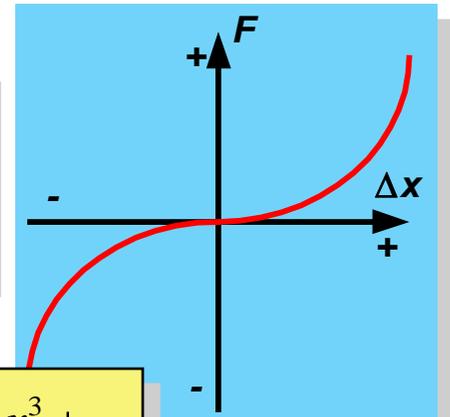


Mola de comportamento linear:



$$F = k x$$

Mola de comportamento não linear:



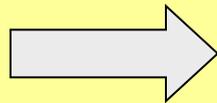
$$F = k_1 x + k_2 x^2 + k_3 x^3 + \dots$$

Métodos de Solução do Modelo

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = F(t)$$

$$m \ddot{x}(t) + \left\{ c_1 \dot{x}(t) + c_2 \dot{x}^2(t) + \dots \right\} + \left\{ k_1 x(t) + k_2 x^2(t) + \dots \right\} = F(t)$$

• sistemas
não lineares

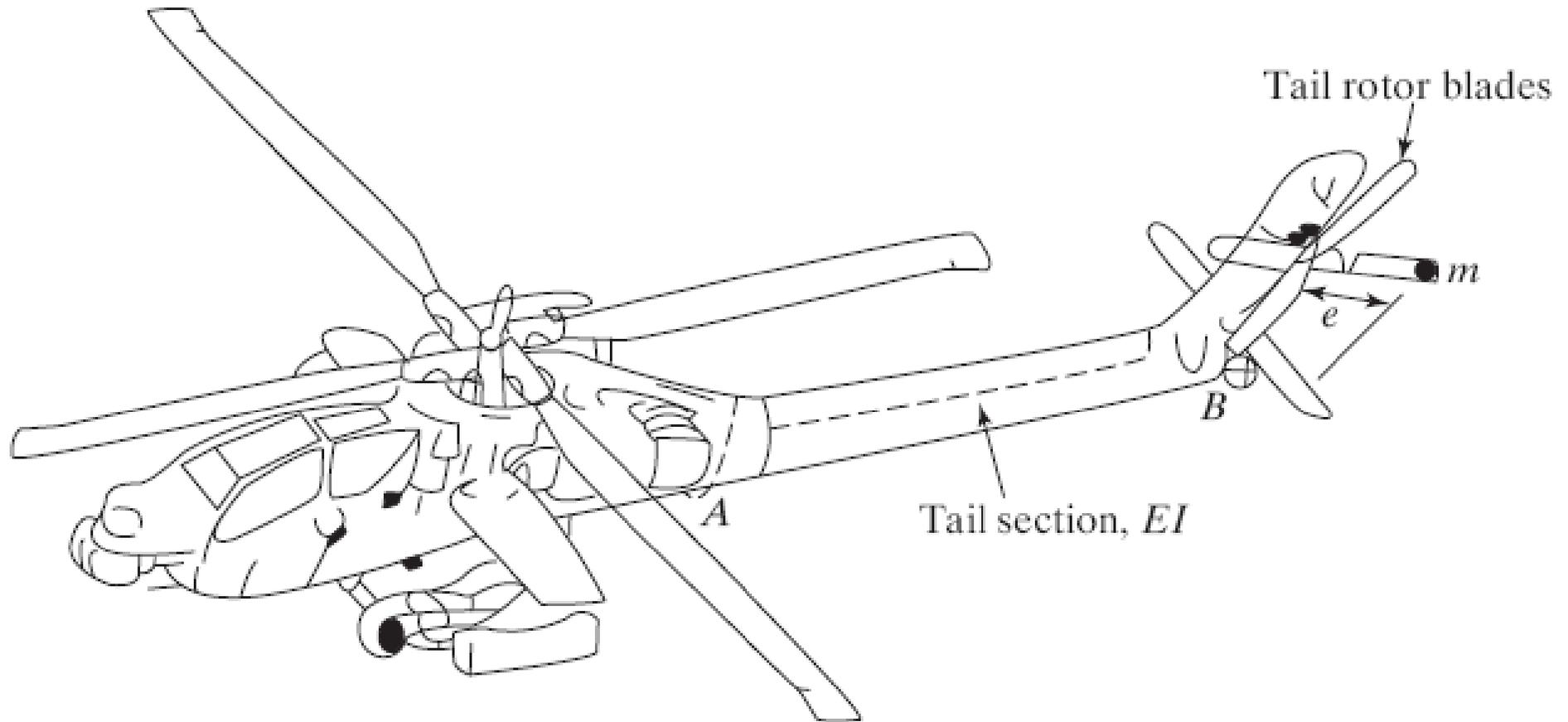


- métodos numéricos
- métodos de perturbação

AVALIAÇÃO DO APRENDIZADO



Exercício proposto



APROVADO!

Vamos para as aplicações!



Origem da Vibração

Helicóptero é um sistema sofisticado que inclui uma grande quantidade de sistemas simples.

Cada sistema simples gera uma frequência de vibração específica e em amplitude específica.



Algumas respostas gráficas permitem identificar as fontes de vibração, sem valores de amplitude, como :

Por exemplo,

(em helicópteros Esquilo)

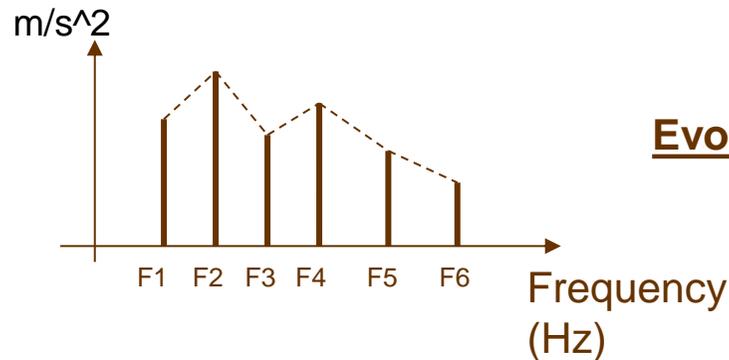
Frequency	Origin
6.56 Hz	Main rotor (393.82 rpm)
34.79 Hz	Tail rotor (2088.19 rpm)
102.10 Hz	Tail transmission (6125.38 rpm)
1531.40 Hz	TGB gears

Origem da Vibração

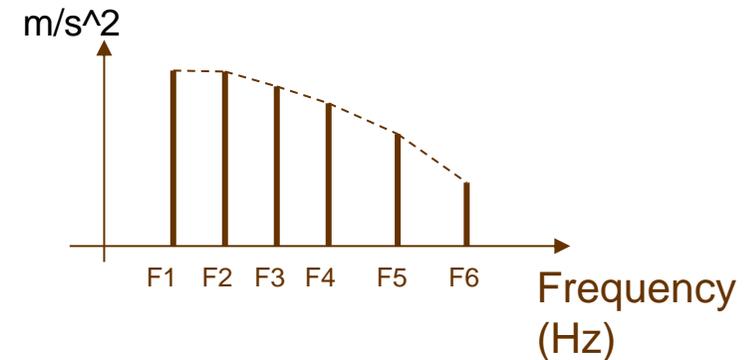
Helicóptero é um sistema sofisticado que inclui uma grande quantidade de sistemas simples.

Cada sistema simples gera uma frequência de vibração específica e em amplitude específica.

Para melhorar a manutenção, analisa-se a frequência de vibração / evolução da amplitude (ou na aparição de novas vibrações) o sistema precisa ser inspecionado (análise do grafico).



Evolução →



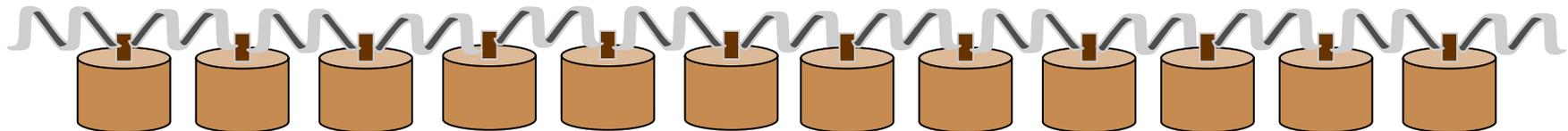
Localização da Vibração



Fuselagem do Helicóptero é comparável com uma viga :



Viga é como uma combinação de massas ligadas por molas :



As **MASSAS** se movimentam por **EXTENSÃO** e por **FLEXÃO**, ou ainda como **TORÇÃO**.

MOLAS apresentam rigidez, se opondo à **EXTENSÃO**, **FLEXÃO** ou **TORÇÃO**.

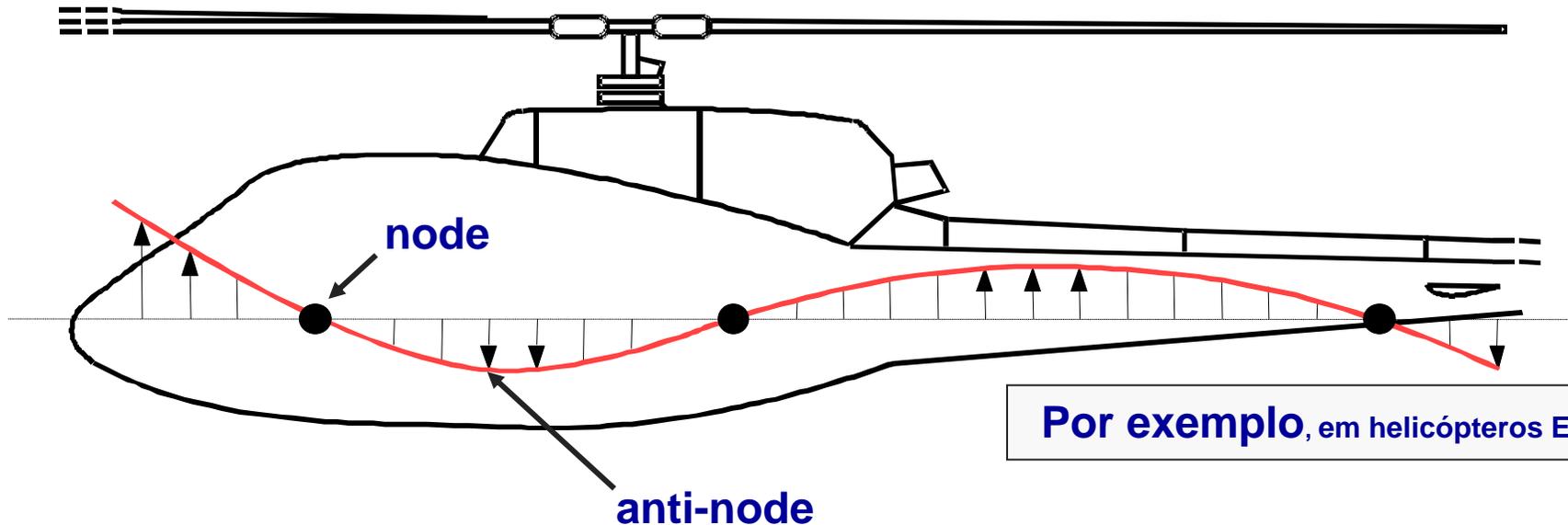
A fuselagem do Helicóptero tem que ser projetada com modos de vibração específicos **QUE NÃO SEJAM EXCITADOS** pelas frequências das rotações.

Absorvedores de Vibração

Em helicópteros as vibrações principais são geradas pelos rotores. Entretanto, os rotores giram com rotação Nr .

As vibrações provocadas pelos rotores excitam vários sistemas e elementos que reagem em função das suas frequências naturais.

Conhecendo-se estes parâmetros, pode-se localizar os nós de vibração (nodes) e também os pontos de amplitude máxima (anti-node).



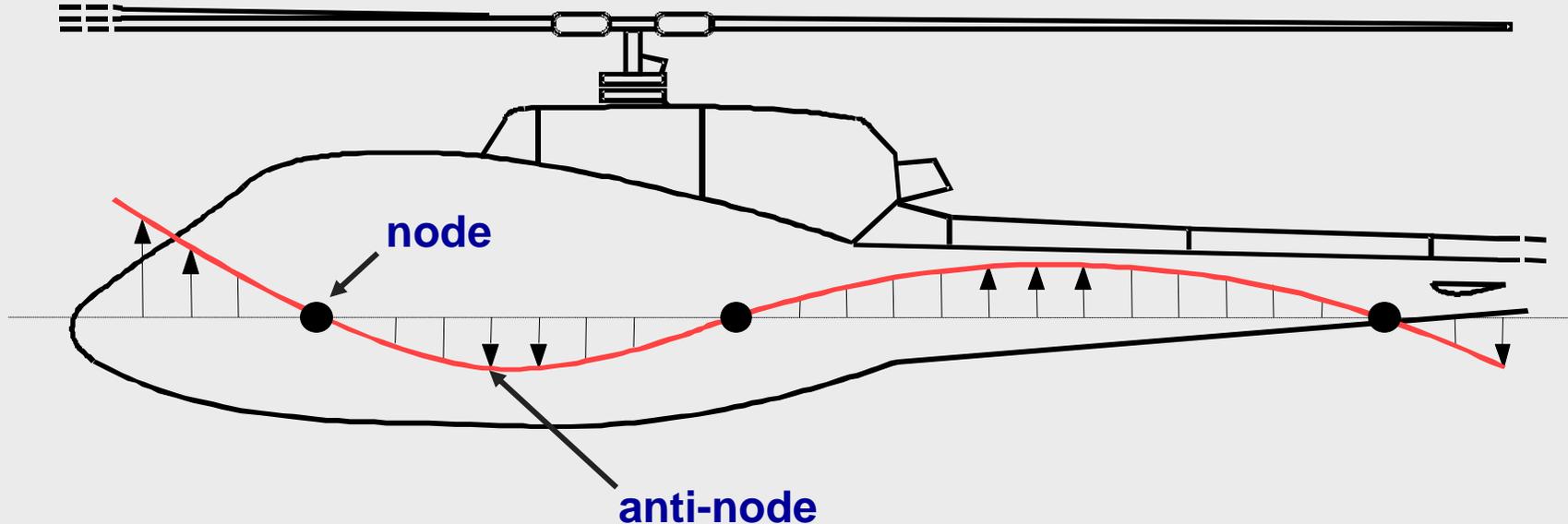
Esta figura dá idéia de como a amplitude da vibração vertical varia quando não há absorvedores de vibração na cabine.

Absorvedores de Vibração

Cargas cíclicas periódicas agem nas pás em flexão transversal (FLAPPING) e no plano da pá (DRAG).

As tensões no eixo do rotor e, também as reações dos mancais, oscilam repetidamente como função da rotação e passagem de cada pá.

Por exemplo, na aeronave Esquilo, a frequência de passagem de pás é 3Ω (3 pás com rotação Ω).

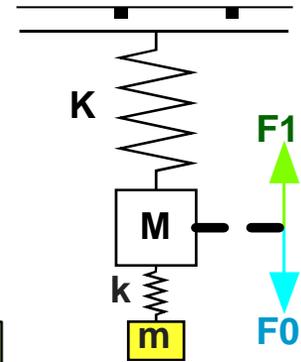


Absorvedores de Vibração

Princípio do Absorvedor Dinâmico de Vibração :

Se uma massa m é adicionada ao sistema com uma mola k à massa M ($m < M$), as características da vibração são alteradas.

A frequência do absorvedor de vibração é igual a frequência de excitação.



→ A fuselagem não responde já que a massa M não vibra, ou seja, o absorvedor dinâmico de vibração cancela a vibração.

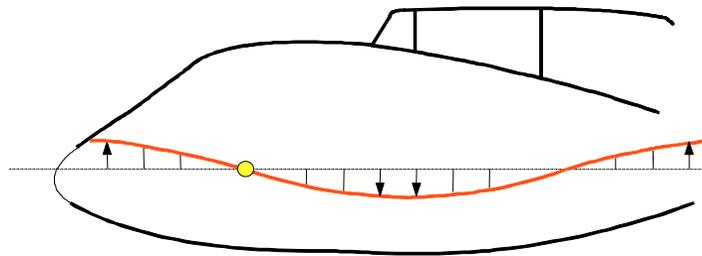
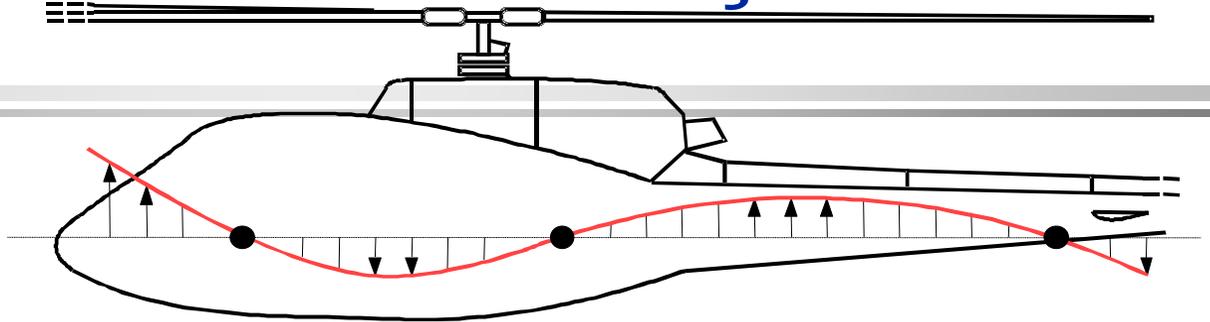
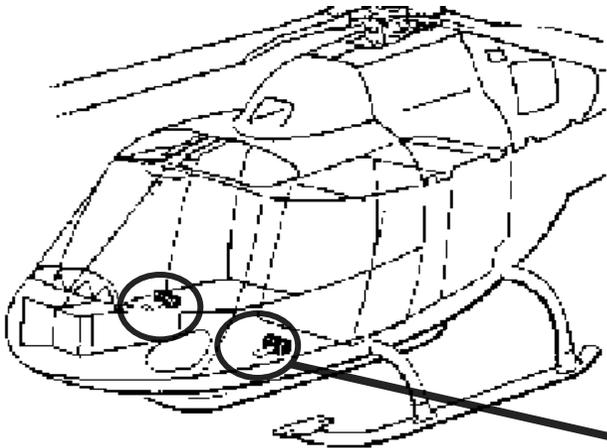
Obviamente, este sistema tão simplificado não existe. Do ponto de vista dinâmico, a estrutura da aeronave consiste de uma série de massas e molas; então, para filtrar todas as vibrações será necessário ter um absorvedor dinâmico para cada excitação, o que devido ao peso desta correção não é possível.

Entretanto, o que se faz é limitar a quantidade de absorvedores localizando-os de forma otimizada para minimizar a componente de vibração vertical da cabine.

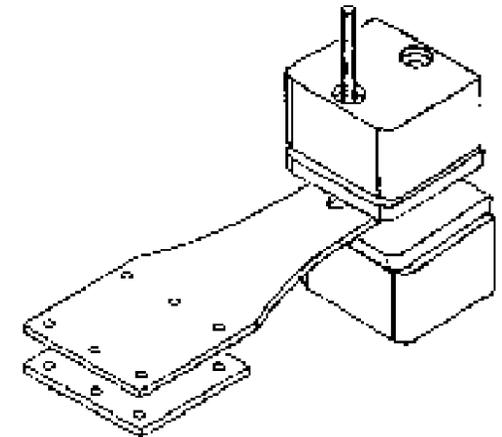
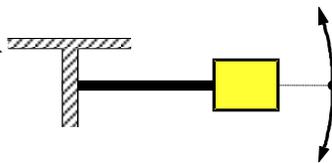


Absorvedores de Vibração

Pode-se ver que o nível de vibração na cabine é elevado.



Os absorvedores de vibração da cabine estão localizados sob o assento do piloto e co-piloto.



Se os absorvedores são regulados para frequência 3Ω , eles cancelam a vibração no ponto onde estão fixados,

Desta forma contribuindo para aparecer um nó (node) de vibração sob os assentos do piloto e co-piloto, reduzindo o nível de vibração.

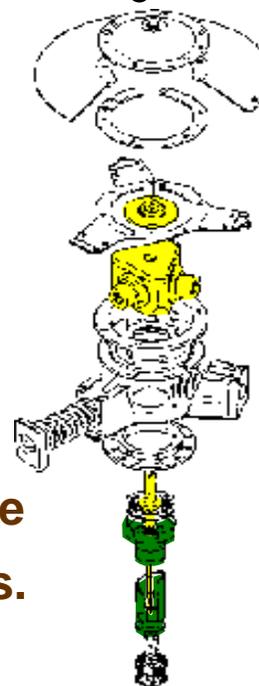
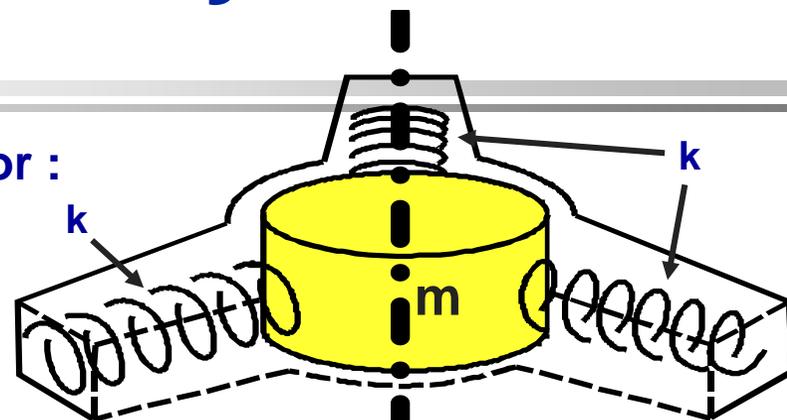


Absorvedores de Vibração

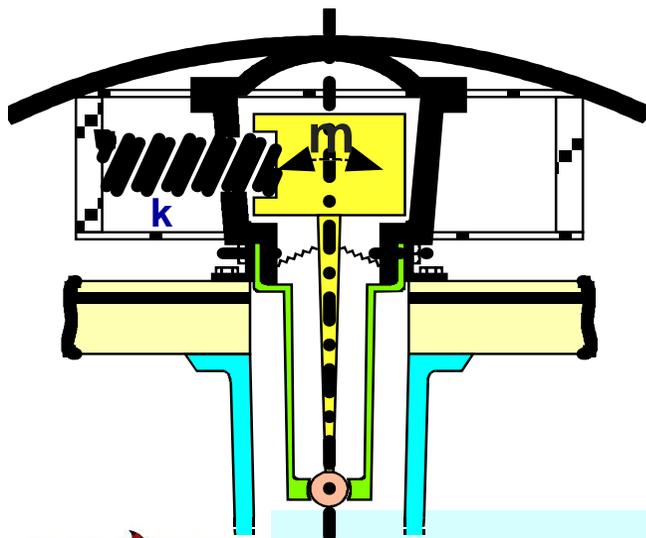
Princípio do absorvedor de vibração do eixo do rotor :

Neste caso, o absorvedor age diretamente onde atuam as cargas de excitação.

Uma massa m está localizada on eixo do rotor e suportada por 3 molas k permitindo oscilar lateralmente vibrando em todas as direções no plano horizontal.



O sistema (massa m / mola k) é excitado pela força periódica que age no rotor,
e responde na mesma frequência de excitação contrapondo estas forças.



WORKSHOP DA COORD. DE CÂMARAS ESPECIALIZADAS DE ENGENHARIA INDUSTRIAL - CCEEI

Obrigado pela atenção da platéia.

Contatos:

Prof. Airton Nabarrete

nabarret@ita.br

Tel.: 12-3947-5978

