

# **VIBROMETRIA**

## **Princípios e exemplos de aplicação**

Chedas Sampaio

## **Sumário**

- **Introdução.**
- **Quantificação da vibração.**
- **Vibração periódica.**
- **Ressonância e frequências naturais.**
- **Vibração versus Condição.**
- **Diagnóstico de avarias.**
- **Desequilíbrio.**
- **Ressonância.**
- **Desalinhamento.**

## Introdução

## Vibrações

### **Estudo das Vibrações...Porquê!!??**

**A VIBRAÇÃO ESTÁ SEMPRE PRESENTE. DE FACTO NADA ESTÁ PARADO NA NATUREZA.**

Geralmente a vibração não é boa. Ela causa desgaste excessivo das chumaceiras, causa fracturas, causa o alívio de apertos, causa o deficiente funcionamento de relés, causa a fractura de soldas em equipamentos electrónicos, causa ruído e causa incomodidade.

## Introdução

## Vibrações

### **Estudo das Vibrações...Porquê!!??**

Nem toda a vibração é má. Alguma é benigna. É o caso dos martelos pneumáticos, é o caso dos vibradores hidráulicos de betão, é o caso das vibrações normais das máquinas (turbulências hidráulicas, passagem de pás, desequilíbrio residual...).

**COMPETE AO ANALISTA DISTINGUIR A VIBRAÇÃO BOA DA MÁ. É A VIBRAÇÃO QUE RESULTARÁ EM AVARIA QUE NECESSITA SER IDENTIFICADA E CORRIGIDA.**

## Introdução

# Vibrações

## Estudo das Vibrações...Porquê!!??

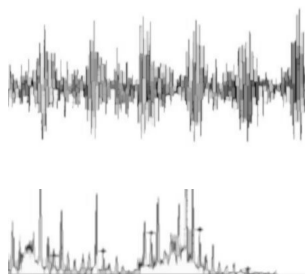
### BOAS RAZÕES:

- Terramotos e Vento
- Música
- Acústica
- Análise Modal
- Testes de vibração (análise modal, resistência de equipamentos, testes de recepção)
- Choques
- Isolamento (cancelamento activo e passivo)
- Controlo de Condição (Manutenção Industrial)

## Introdução

# Medição e Análise de Vibrações

É a técnica com **MAIOR APLICAÇÃO** Industrial.



## Introdução

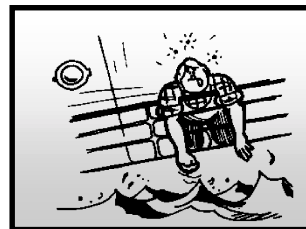
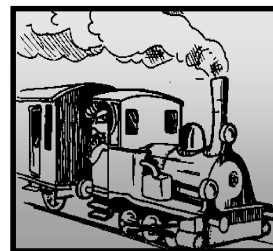
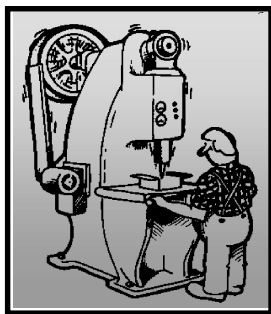
## Medição e Análise de Vibrações

## Vantagens:

- Detecta a maior parte das avarias.
- Detecta as avarias na sua fase incipiente (ideal para aplicação do método da análise de tendência).
- Detecta as avarias sem ser necessário parar a máquina.
- Permite diagnosticar a causa da avaria.

## Introdução

## Tipos de Vibrações



## Introdução

## Tipos de Vibrações

Vibração aleatória

Vibração transiente

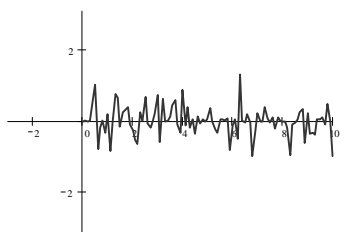
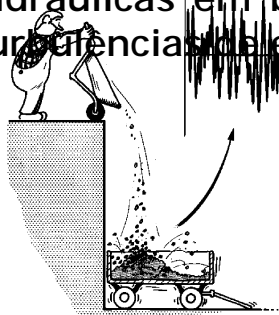
Vibração periódica

## Introdução

## Tipos de Vibrações

Vibração aleatória

Nas máquinas rotativas, são normalmente de origem hidráulica ou aerodinâmica. São exemplos a cavitação e certas instabilidades hidráulicas em bombas centrífugas, bem como turbulências e escoamento em ventiladores.

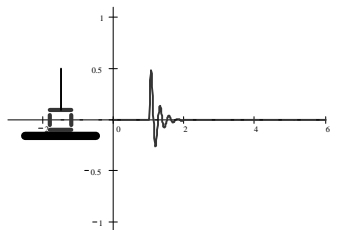
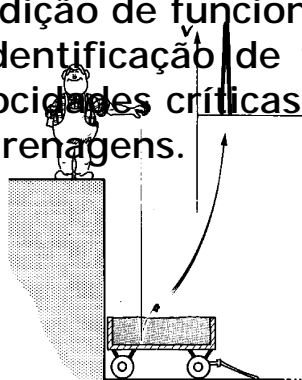


## Introdução

## Tipos de Vibrações

## Vibração transiente

Nas máquinas ocorrem normalmente nos arranques e paragens, ou quando muda a condição de funcionamento. Têm interesse para a identificação de frequências de ressonância, velocidades críticas e choques em rolamentos e engrenagens.



Escola Náutica I.D.Henrique

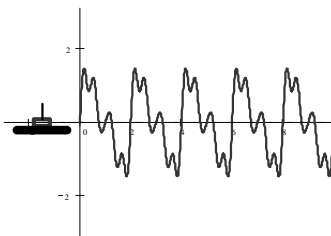
11

## Introdução

## Tipos de Vibrações

## Vibração periódica

São as mais importantes quando se trata de caracterizar a condição das máquinas. A cada ciclo de rotação dá-se uma repetição da ocorrência dos fenómenos na máquina, a maior parte dos quais se manifestam na forma de vibrações periódicas.

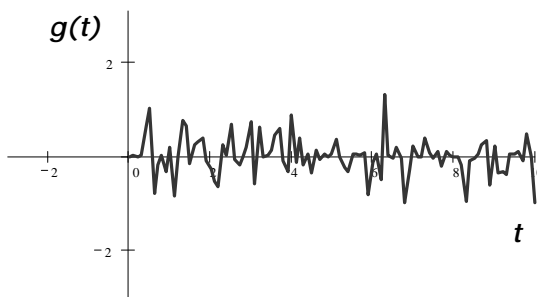


Escola Náutica I.D.Henrique

12

Quantificação da vibração

## Quantificação da Vibração

**COMO QUANTIFICAR A VIBRAÇÃO?**

Escola Náutica I.D.Henrique

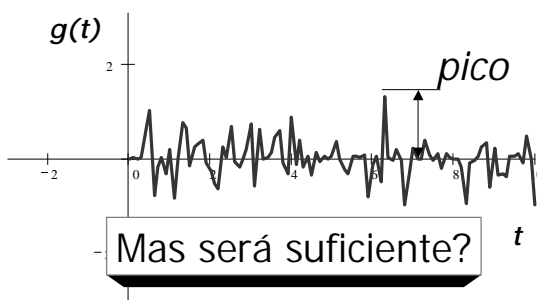
13

Quantificação da vibração

## Quantificação da Vibração

**COMO QUANTIFICAR A VIBRAÇÃO?**

Uma forma será obviamente medir a maior amplitude de vibração ou **PICO**.



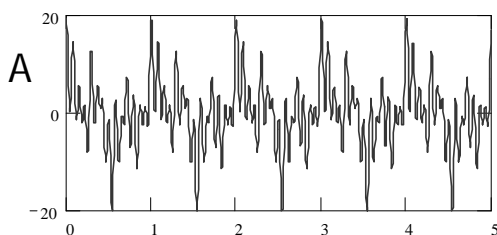
Escola Náutica I.D.Henrique

14

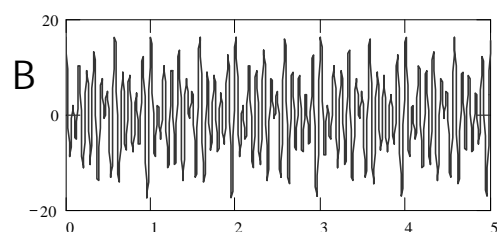
## Quantificação da vibração

## Pico

**Vejamos estas duas vibrações.**



Pico=19.3



Pico=16.4

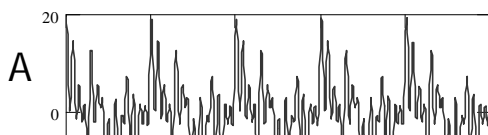
Escola Náutica I.D.Henrique

15

## Quantificação da vibração

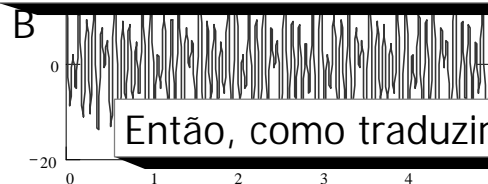
## Pico

**Vejamos estas duas vibrações.**



Pico=19.3

De facto A apresenta um pico superior. Mas, também é verdade que B apresenta valores superiores a maior parte do tempo.



Pico=16.4

Então, como traduzir esta situação?

Escola Náutica I.D.Henrique

16



## Quantificação da vibração

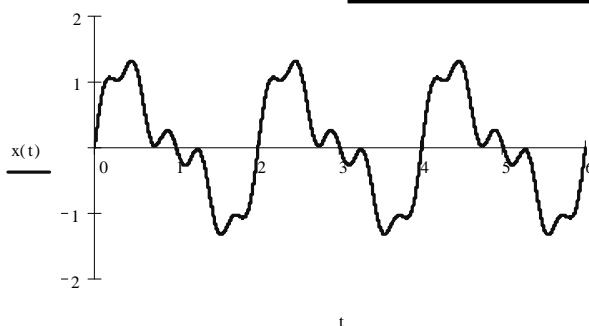
## RMS

A solução está no ROOT MEAN SQUARE ou VALOR EFICAZ.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

ou

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}}$$



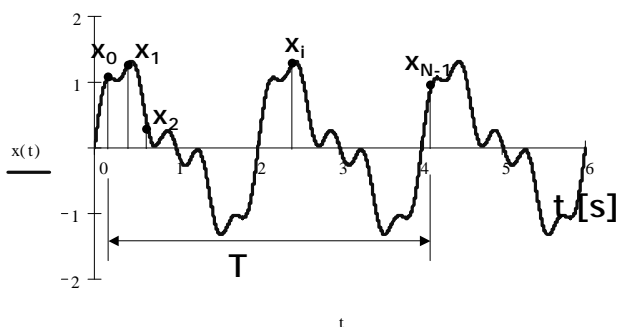
Escola Náutica I.D.Henrique

17

## Quantificação da vibração

## RMS

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_i^2 + \dots + x_{N-1}^2}{N}}$$



Escola Náutica I.D.Henrique

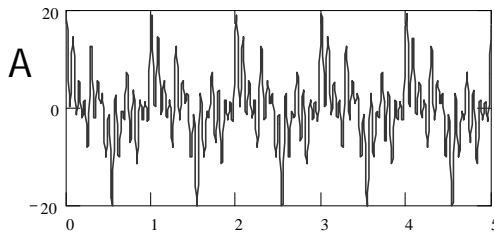
18

## Quantificação da vibração

## RMS

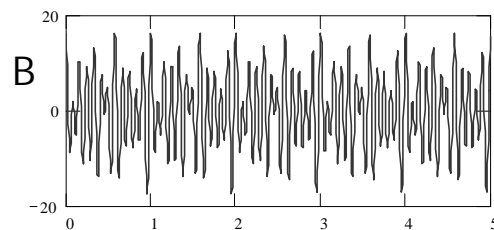
$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}}$$

Voltando ao nosso exemplo.



RMS=6.9

Pico=19.3



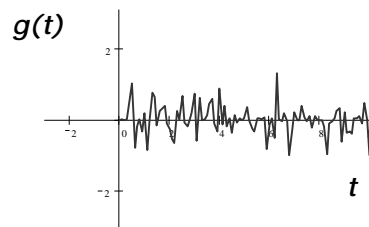
RMS=7.8

Pico=16.4

## Quantificação da vibração

## Unidades de medida da Vibração

Em que unidades se medirá a vibração?

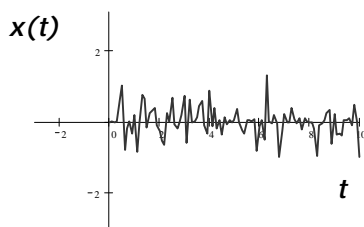


## Quantificação da vibração

## Unidades de medida da Vibração

Em que unidades se medirá a vibração?

O *deslocamento*,  $x(t)$  [ $\mu\text{m}$ ], será naturalmente a unidade mais óbvia pois é aquela que mais se aproxima da ideia de oscilação em torno de um ponto médio. Mais vibração pode significar, como é do senso comum, maiores amplitudes de deslocamento.



Escola Náutica I.D.Henrique

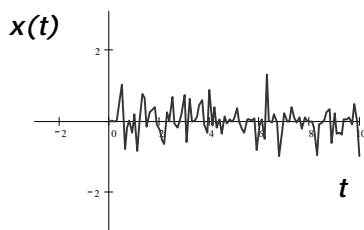
21

## Quantificação da vibração

## Unidades de medida da Vibração

Em que unidades se medirá a vibração?

Mas se a amplitude se mantiver e a frequência aumentar também costumamos considerar que há mais vibração. Então como descrever esta situação?



Escola Náutica I.D.Henrique

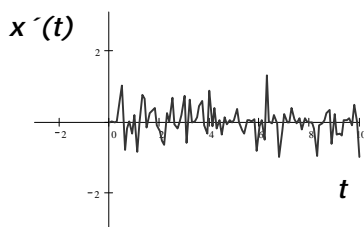
22

## Quantificação da vibração

## Unidades de medida da Vibração

Em que unidades se medirá a vibração?

Basta derivar uma vez a função *deslocamento* e, como sabemos, obtêm-se a *velocidade*  $x'(t)$  [mm/s]. A *velocidade* já contém informação sobre a frequência.



Escola Náutica I.D.Henrique

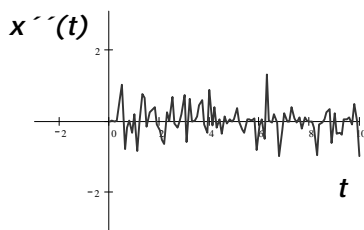
23

## Quantificação da vibração

## Unidades de medida da Vibração

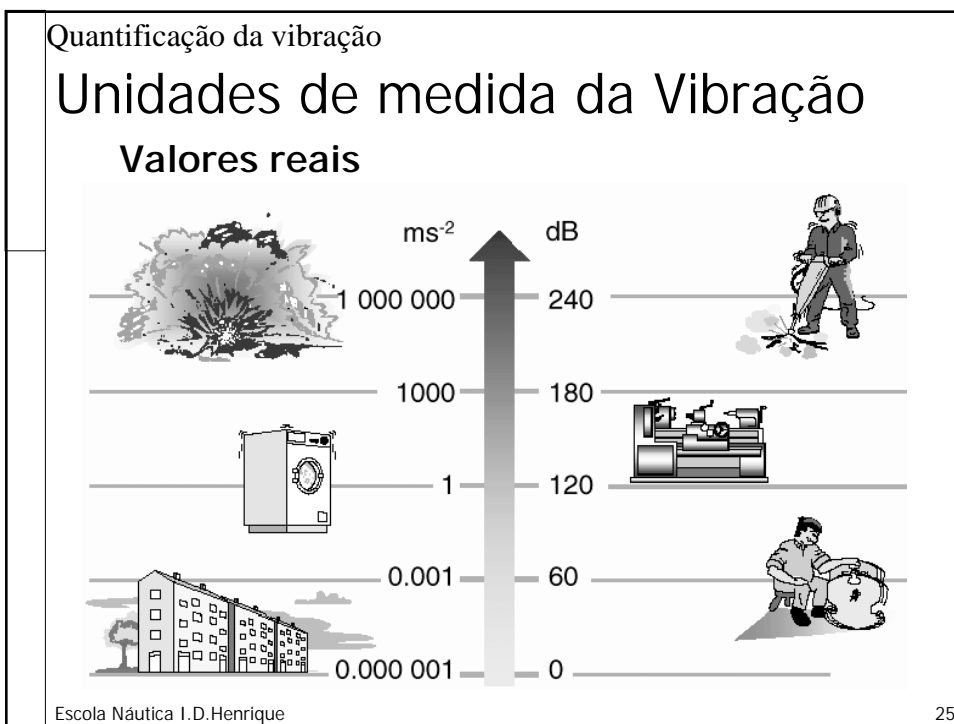
Em que unidades se medirá a vibração?

Se medimos velocidade também podemos medir a *aceleração*  $x''(t)$  [m/s<sup>2</sup>] ou [g] (=9.8m/s<sup>2</sup>). Esta obtém-se derivando uma vez a *velocidade* e duas vezes o *deslocamento*.



Escola Náutica I.D.Henrique

24



Vibração periódica

## Vibração periódica

A forma mais simples de vibração periódica é a **VIBRAÇÃO HARMÓNICA**.

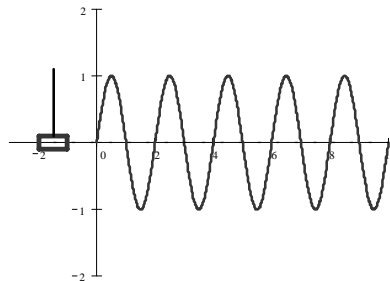
Este movimento pode ser visualizado na oscilação de uma massa suspensa numa mola cujo amortecimento seja praticamente nulo.

Escola Náutica I.D.Henrique

26

Vibração periódica

## Harmónica



Escola Náutica I.D.Henrique

27

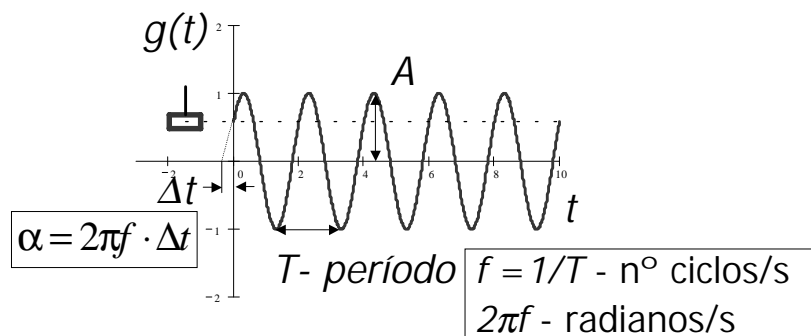
Vibração periódica

## Harmónica

## Caracterização

Matematicamente, uma função harmónica é uma função sinusoidal e escreve-se:

$$g(t) = A \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha)$$



Escola Náutica I.D.Henrique

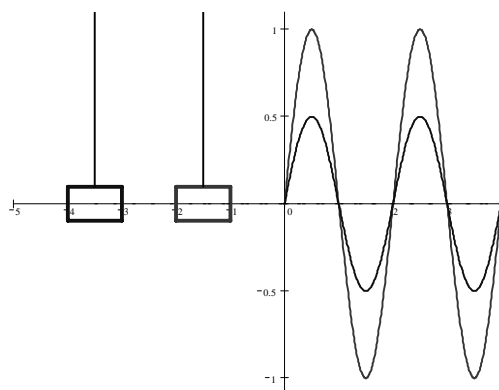
28

Vibração periódica

## Harmónica

Caracterização

$$g(t) = A \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha)$$

AMPLITUDE DE PICO,  $A$ 

Escola Náutica I.D.Henrique

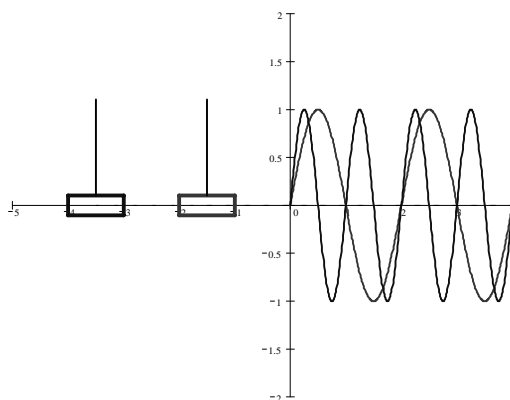
29

Vibração periódica

## Harmónica

Caracterização

$$g(t) = A \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha)$$

FREQUÊNCIA,  $f$ 

Escola Náutica I.D.Henrique

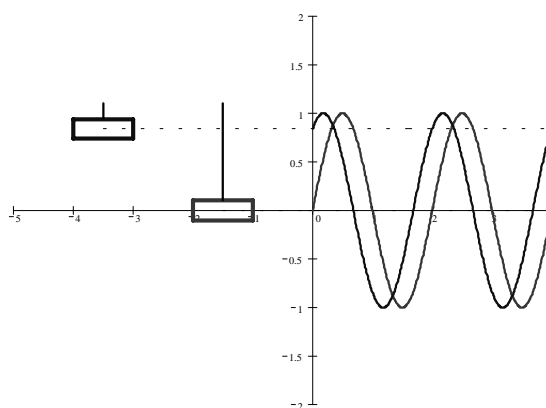
30

Vibração periódica

## Harmónica

## Caracterização

$$g(t) = A \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha)$$

FASE,  $\alpha$ 

Escola Náutica I.D.Henrique

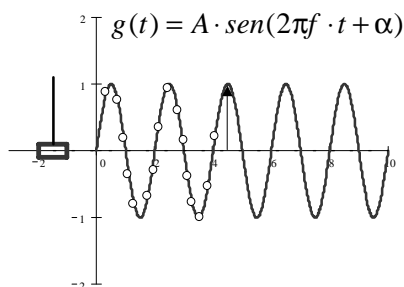
31

Vibração periódica

## Harmónica

## Quantificação

Tal como já vimos, quantifica-se a vibração medindo a sua amplitude máxima (*PICO*) e o seu valor eficaz (*RMS*):



$$Pico = A$$


$$RMS = 0.707 \cdot Pico$$

Escola Náutica I.D.Henrique

32



|  |
|--|
| Vibração periódica   |
| <b>Harmónica</b>   |
| Quantificação. Unidades  |
| Já anteriormente vimos que $g(t)$  |
| $g(t) = A \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha)$   |
| pode ser medida em unidades de:  |
| $x(t) = X \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha)$ <div>deslocamento</div>                       |
| $x'(t) = X \cdot 2\pi f \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha + \pi / 2)$ <div>velocidade</div> |
| $x''(t) = X (2\pi f)^2 \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha + \pi)$ <div>aceleração</div>      |
| Escola Náutica I.D.Henrique <span style="float: right;">33</span>                                  |

|   |
|---|
| Vibração periódica  |
| <b>Harmónica</b>  |
| Quantificação. Unidades   |
| Reparando que a aceleração, $x''(t)$ , também   |
| pode ser escrita como:  |
| $x''(t) = -X (2\pi f)^2 \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha)$ <div style="text-align: center;">  </div> |
| $x''(t) = X (2\pi f)^2 \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha + \pi)$ <div>aceleração</div>   |
| Escola Náutica I.D.Henrique <span style="float: right;">34</span>   |

Vibração periódica

## Harmónica

Quantificação. Unidades

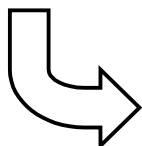
Conclui-se que:

$$x(t) = X \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha)$$

deslocamento

$$x''(t) = -X(2\pi f)^2 \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha)$$

aceleração



$$x''(t) = -(2\pi f)^2 \cdot x(t)$$

Escola Náutica I.D.Henrique

35

Vibração periódica

## Harmónica

Quantificação. Unidades

Para as amplitudes de pico podemos tirar as seguintes relações:

$$x'(t) = X \cdot 2\pi f \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha + \pi/2)$$

velocidade

$$X' = X \cdot 2\pi f$$

$$x''(t) = X(2\pi f)^2 \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha + \pi)$$

aceleração

$$X'' = X \cdot (2\pi f)^2$$

Escola Náutica I.D.Henrique

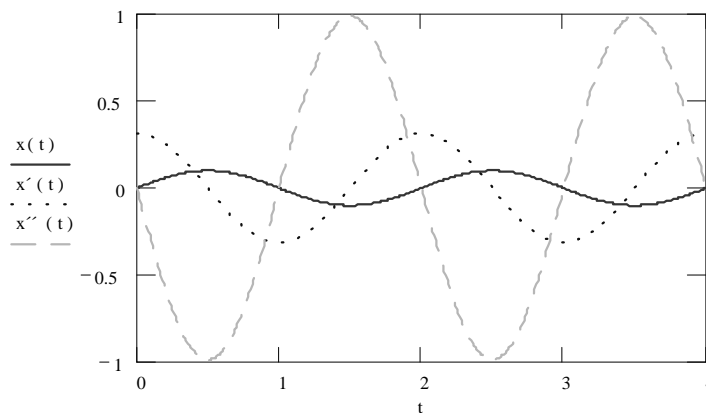
36

Vibração periódica

## Harmónica

Quantificação. Unidades

Graficamente, a relação entre as três unidades é:



Escola Náutica I.D.Henrique

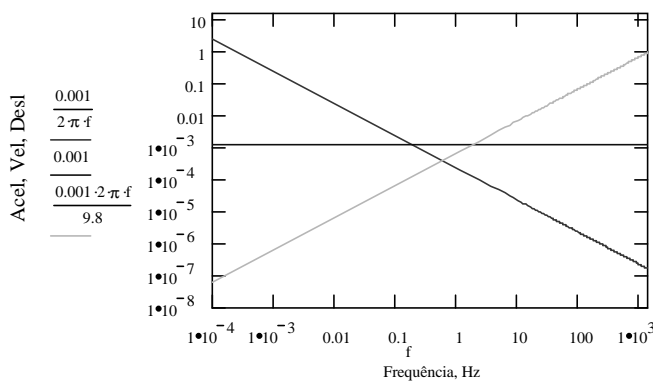
37

Vibração periódica

## Harmónica

Quantificação. Unidades

Deslocamento e aceleração para uma velocidade constante de 0.001 mm/s:



Escola Náutica I.D.Henrique

38

Vibração periódica

## Não Harmónica

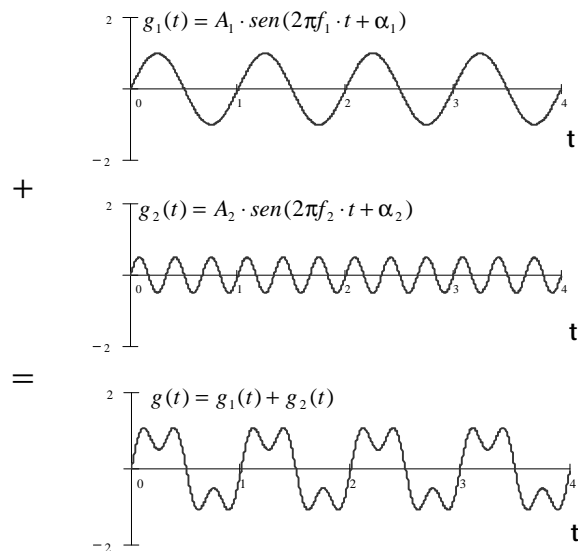
A soma de duas ou mais vibrações harmónicas de diferentes frequências produz uma vibração periódica não-harmónica.

Escola Náutica I.D.Henrique

39

Vibração periódica

## Não Harmónica



Escola Náutica I.D.Henrique

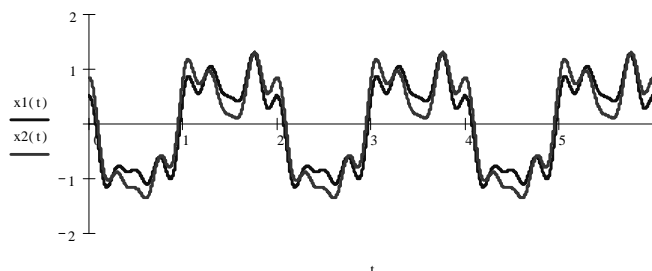
40

Vibração periódica

## Não Harmónica

### Caracterização

Já vimos que duas vibrações harmónicas se distinguem pela frequência, amplitude de pico e fase. Mas então como distinguir duas vibrações periódicas não-harmónicas?



Escola Náutica I.D.Henrique

41

Vibração periódica

## Não Harmónica

### Caracterização

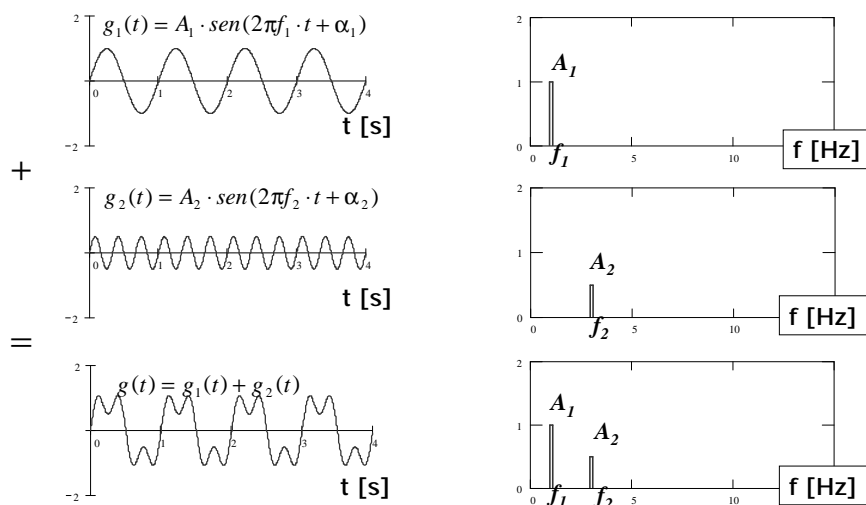
A RESPOSTA ESTÁ NA  
***ANÁLISE EM FREQUÊNCIA***

Escola Náutica I.D.Henrique

42

## Vibração periódica

## Análise em Frequência

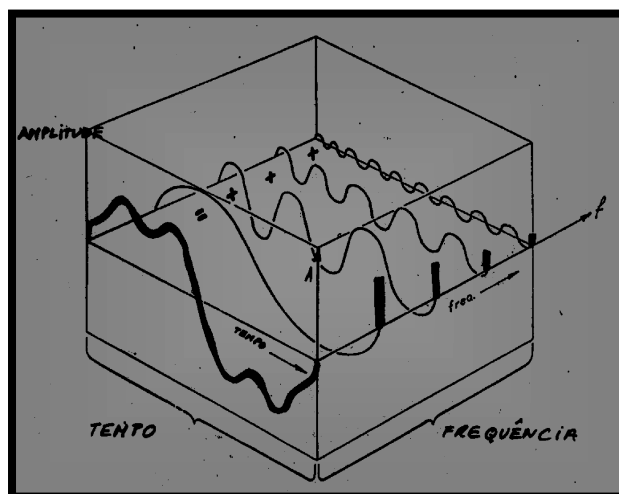


Escola Náutica I.D.Henrique

43

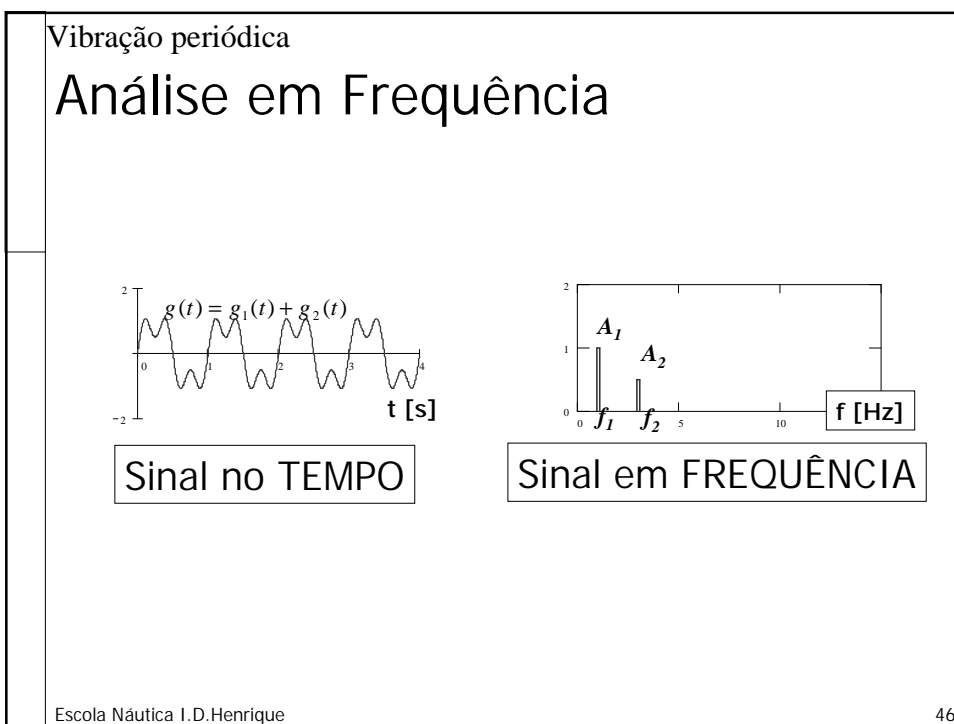
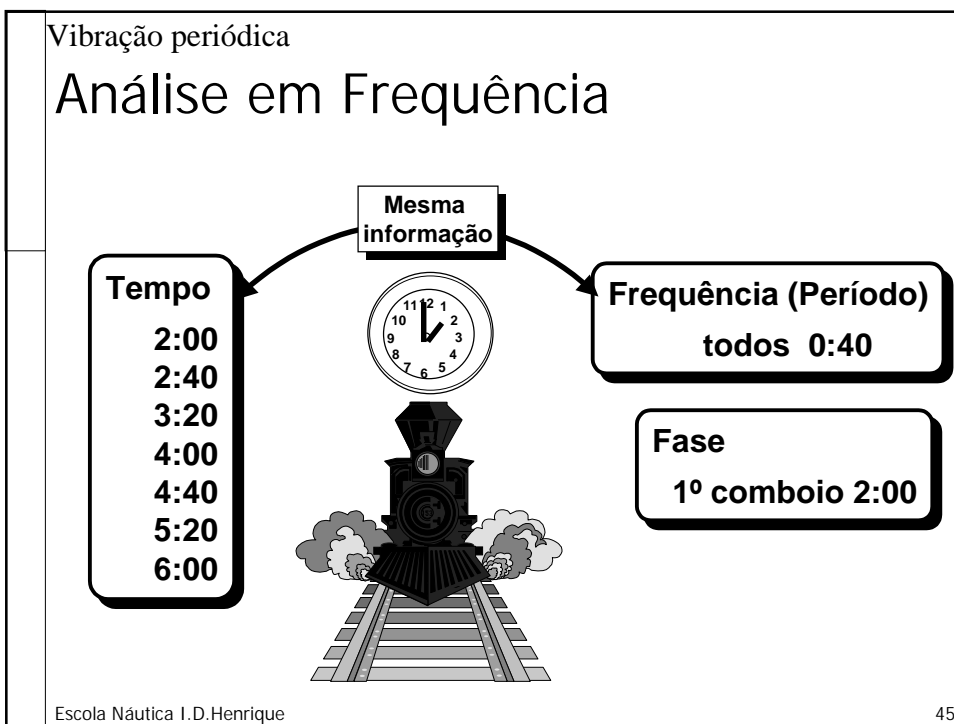
## Vibração periódica

## Análise em Frequência



Escola Náutica I.D.Henrique

44



Vibração periódica

## Análise em Frequência

Transformadas de Fourier

Segundo *Jacques Fourier* (1768-1830), qualquer função complexa, periódica ou não periódica, pode ser decomposta numa série de componentes harmónicas de diferentes frequências. Esta técnica baseia-se nas conhecidas *Transformadas de Fourier* :

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft} df$$

Escola Náutica I.D.Henrique

48

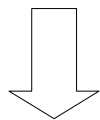
Vibração periódica

## Análise em Frequência

Transformadas de Fourier

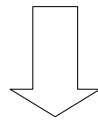
As *Transformadas de Fourier* assumem no processamento de sinal digital a seguinte forma:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j2\pi ft} dt$$



$$G_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} g_i e^{-j \frac{2\pi i k}{N}}$$

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft} df$$



$$g_i = \sum_{k=0}^{N-1} G_k e^{j \frac{2\pi i k}{N}}$$

Escola Náutica I.D.Henrique

49



Vibração periódica

## Análise em Frequência

Transformadas Discretas de Fourier

... sendo conhecidas como *Transformadas Discretas de Fourier*, ou *DFT(discrete fourier transforms)*.

**DFT Directa**  
tempo  $\rightarrow$  frequência

**DFT Inversa**  
frequência  $\rightarrow$  tempo

$$G_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} g_i e^{-j \frac{2\pi i k}{N}}$$

$$g_i = \sum_{k=0}^{N-1} G_k e^{j \frac{2\pi i k}{N}}$$

Escola Náutica I.D.Henrique

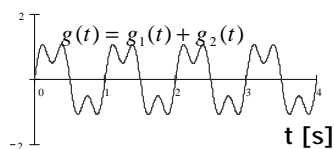
50

Vibração periódica

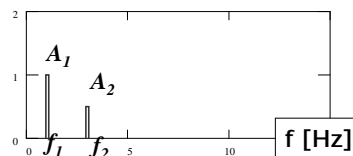
## Análise em Frequência

Transformadas Discretas de Fourier

É a *DFT* que permite o cálculo do *espectro de frequência* a partir do sinal no tempo:



Sinal no TEMPO



Espectro de Frequência



Escola Náutica I.D.Henrique

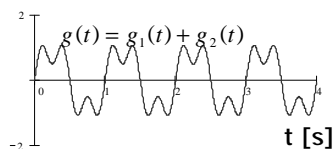
51

Vibração periódica

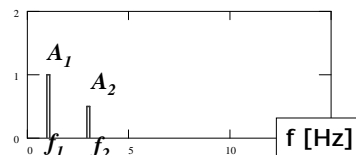
## Análise em Frequência

Transformadas Discretas de Fourier

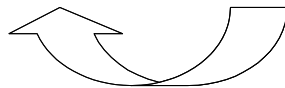
... ou a reconstituição do *signal no tempo* a partir do espectro:



Sinal no TEMPO



Espectro de Frequência



Escola Náutica I.D.Henrique

52

Vibração periódica

## Análise em Frequência

Fast Fourier Transform

... ou FFT, é o nome que se dá à Transformada Discreta de Fourier quando é calculada segundo um algoritmo engenhoso, desenvolvido nos anos 60, e que hoje é implementado em todos os analisadores de vibrações.

Escola Náutica I.D.Henrique

53

Ressonância e frequências naturais

## Frequência natural

Todos os objectos físicos, quando afastados da sua posição de equilíbrio estático, têm tendência para vibrar a determinadas frequências.

Especialmente nos metais, essas frequências são bem evidentes no tom característico que emitem (diapasão, sino, ...).

Estes tons únicos dependem da rigidez do material, da sua forma e da sua massa. Estes tons são as chamadas Frequências Naturais.

Escola Náutica I.D.Henrique

54

Ressonância e frequências naturais

## Frequência natural

Se dermos um impacto num objecto verificamos que os tons se mantêm à mesma frequência mas as suas amplitudes vão-se reduzindo até deixarem de soar.

Mas, se forcarmos o mesmo objecto a vibrar àquelas frequências naturais, à custa de qualquer força externa, então as amplitudes de vibração aumentarão para valores muito elevados

Este fenómeno é chamado de  
**Ressonância.**

Escola Náutica I.D.Henrique

55

Ressonância e frequências naturais

## Frequência natural

Tacoma Bridge – USA 1940



Este fenómeno é chamado de  
**Ressonância.**

Escola Náutica I.D.Henrique

56

Ressonância e frequências naturais

## Frequência natural

Normalmente as primeiras 3 ou 4 frequências naturais são as mais preocupantes uma vez que necessitam de menor energia para serem forçadas.

A primeira frequência natural é muitas vezes próxima do valor dado pela fórmula:

$$\omega_n = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [rad/s]}$$

Escola Náutica I.D.Henrique

57

## Ressonância e frequências naturais

## Frequência natural

Normalmente as primeiras 3 ou 4 frequências naturais são as mais preocupantes uma vez que necessitam de menor energia para serem forçadas.

A primeira frequência natural é a mais próxima do valor dado pela

Rigidez  
 $k$  [N/m]

zes

$$\omega_n = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Massa  
 $m$  [kg]

## Ressonância e frequências naturais

## Frequência natural

Por esta fórmula podemos ver que se aumentarmos a rigidez do objecto ou dos seus apoios, aumentamos a frequência natural. Se aumentarmos a sua massa diminuímos a frequência natural.

$$\omega_n = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

[rad/s]

## Ressonância e frequências naturais

## Frequência natural

Estas conclusões aplicam-se também aos componentes das máquinas, às estruturas, aos edifícios, etc...

Quando um jarro está rachado soa a chocho (som mais grave <> frequências naturais inferiores), isto porque a rigidez diminuiu.

$$\omega_n = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [rad/s]}$$

## Ressonância e frequências naturais

## Frequência natural

Se uma conduta vibra demais é provável que esteja em ressonância. Para alterar esta situação basta alterar-lhe as suas frequências naturais.

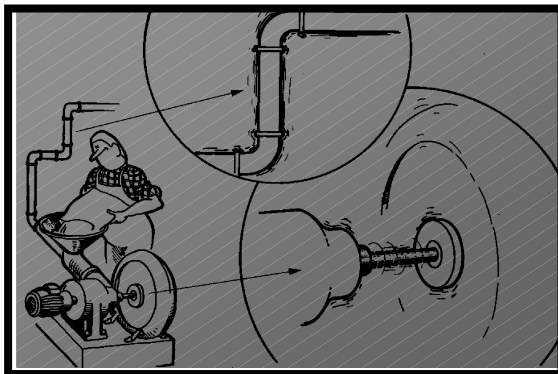
Se soldarmos massas diminuimos as freq.naturais, se aumentarmos os pontos de fixação aumentamos a rigidez e também as freq.naturais.

$$\omega_n = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [rad/s]}$$

Vibrações versus Condição

## Vibrações das Máquinas

A vibração das máquinas é normalmente periódica porque o seu funcionamento é cíclico .



Escola Náutica I.D.Henrique

62

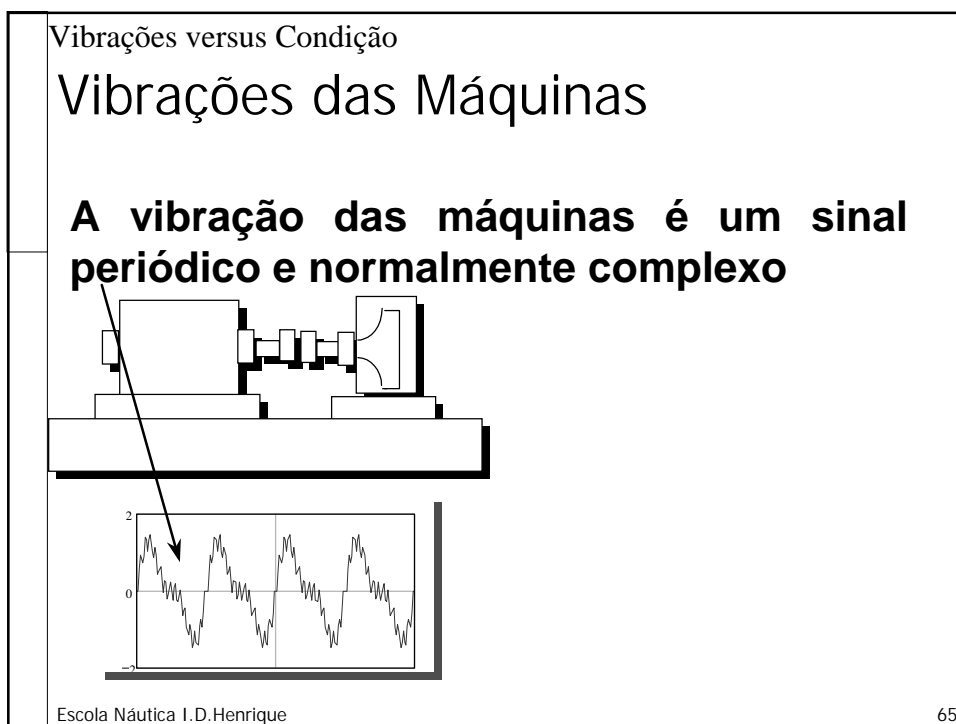
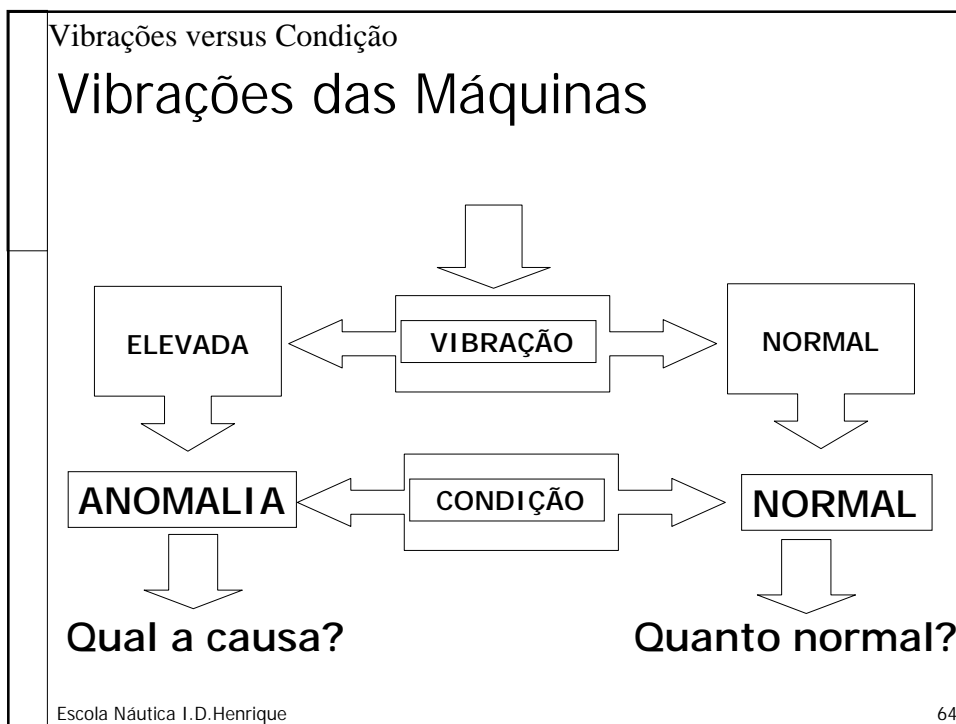
Vibrações versus Condição

## Vibrações das Máquinas

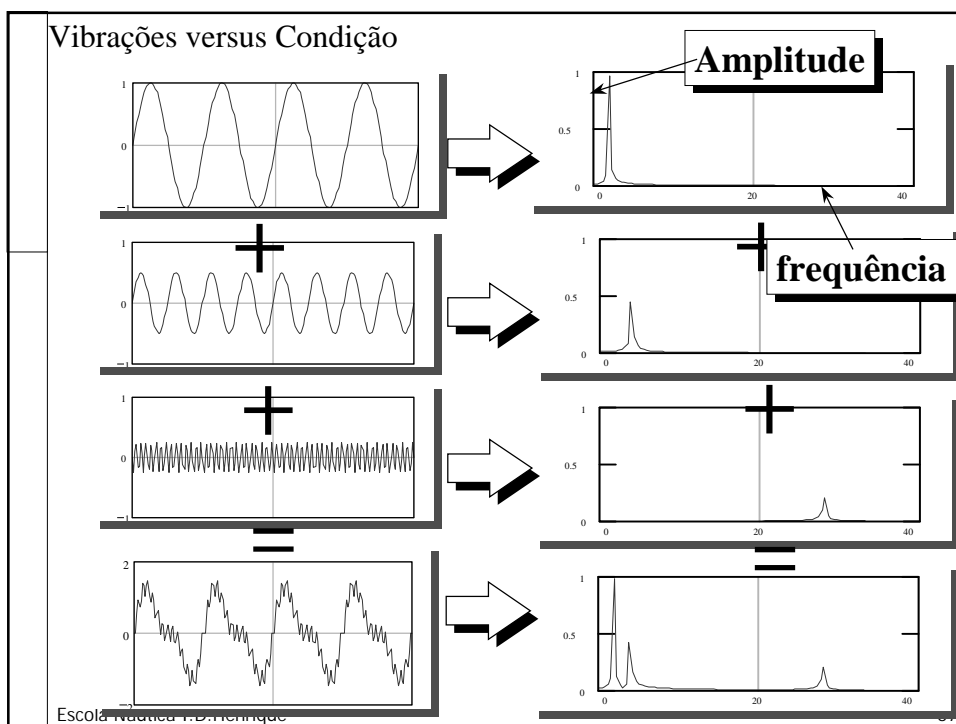
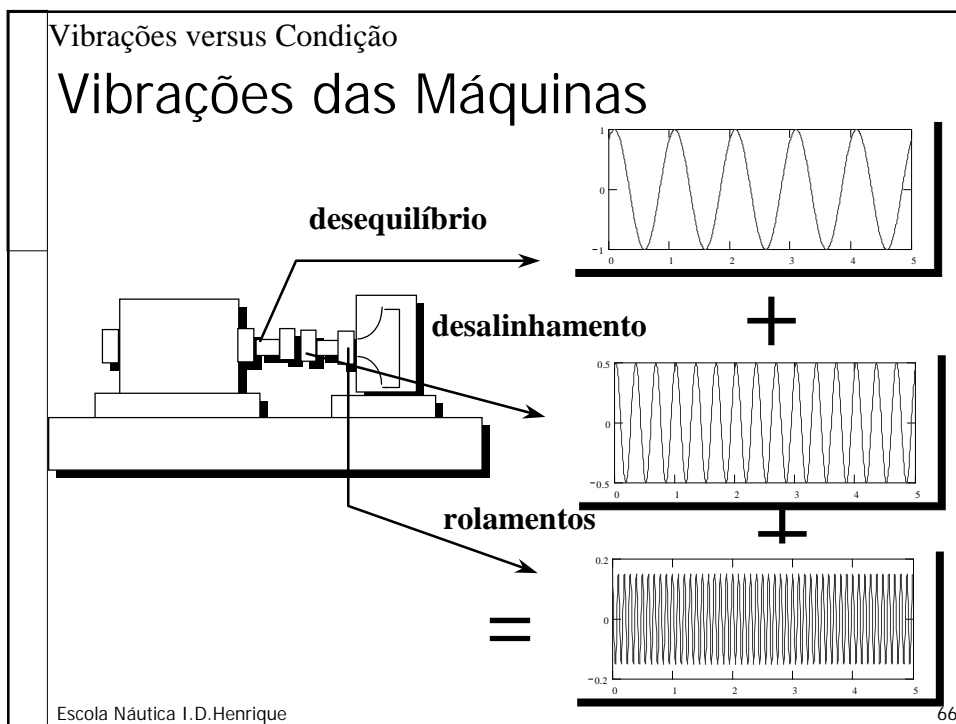


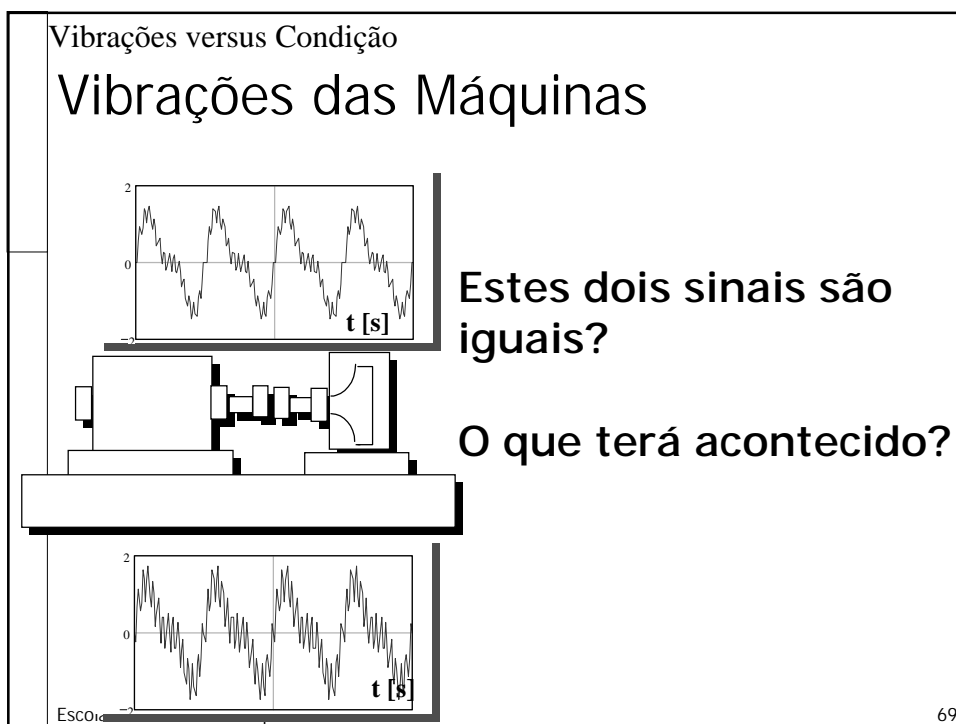
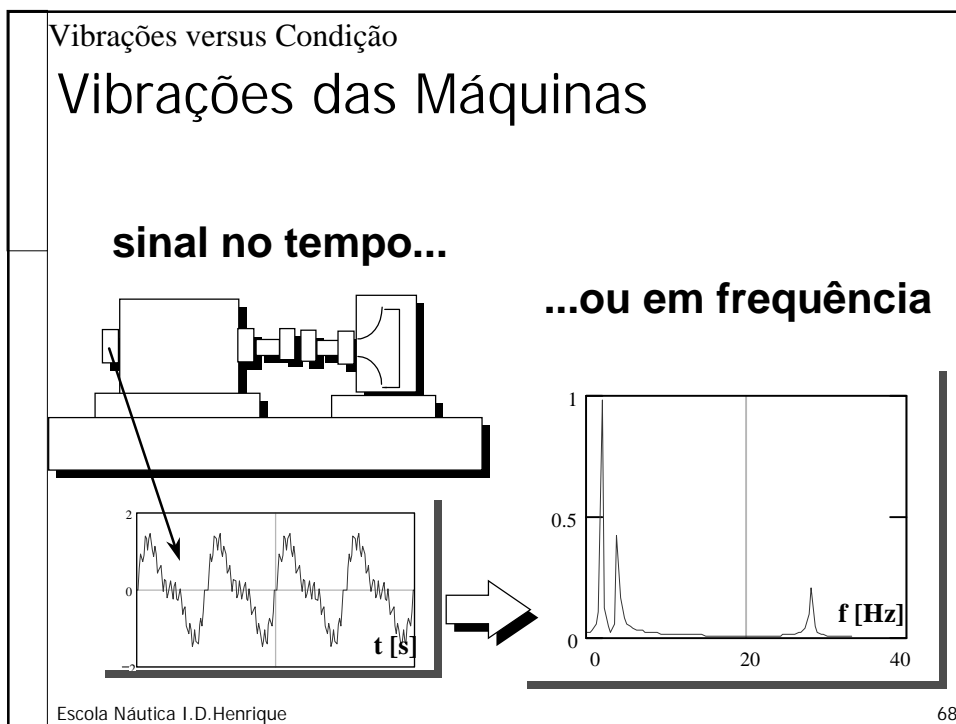
Escola Náutica I.D.Henrique

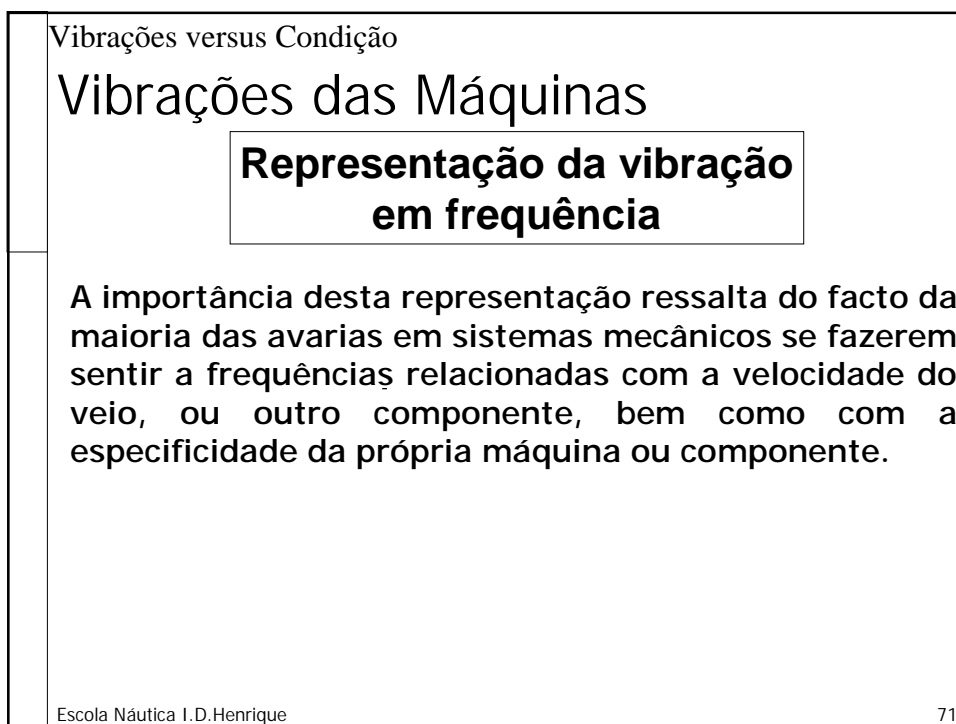
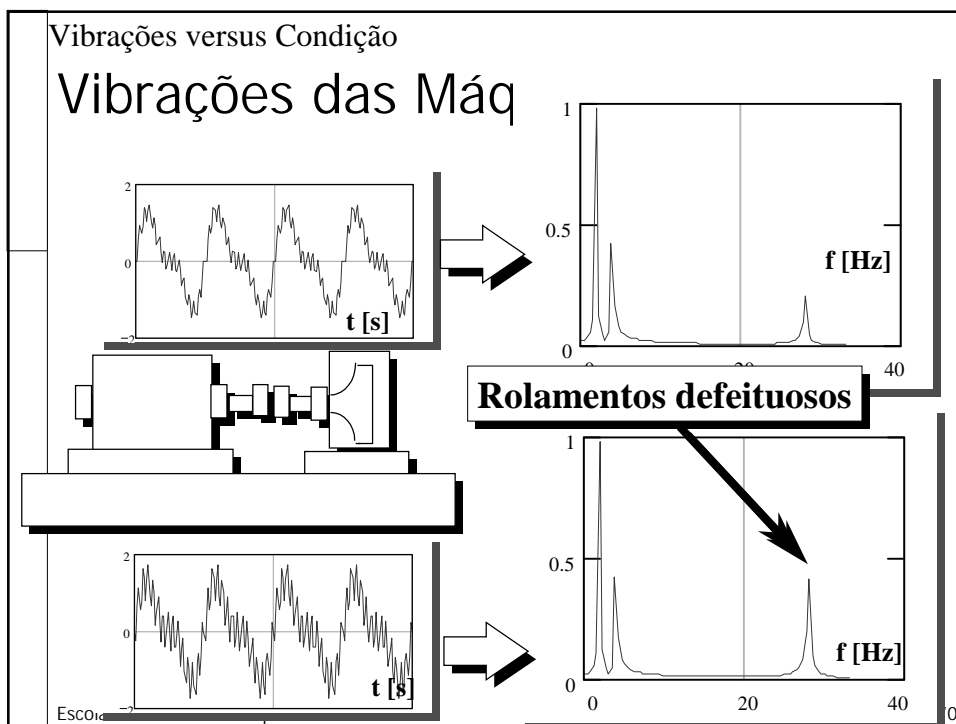
63











Vibrações versus Condição

## Vibrações das Máquinas

A frequência relaciona-nos a vibração com o defeito ou componente

A amplitude relaciona-nos a vibração com a gravidade do defeito

A fase permite-nos distinguir avarias que se fazem sentir à mesma frequência

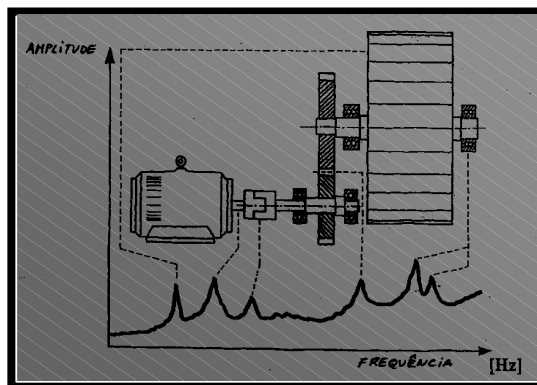
Escola Náutica I.D.Henrique

72

Vibrações versus Condição

## Vibrações das Máquinas

As frequências permitem-nos identificar a origem da avaria ou o componente com defeito.

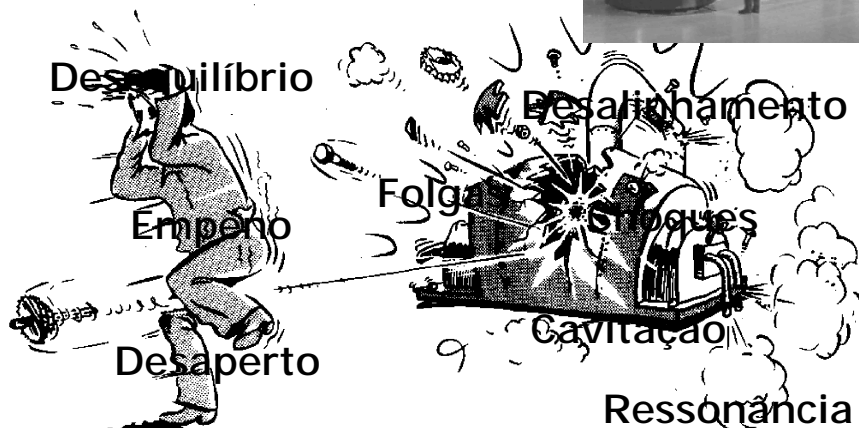
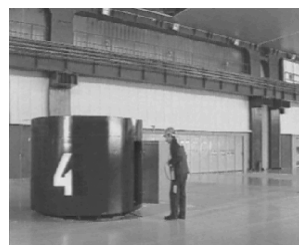


Escola Náutica I.D.Henrique

73

Vibrações versus Condição

## Avarias típicas



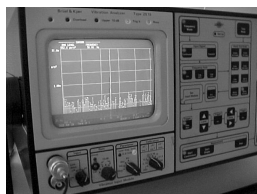
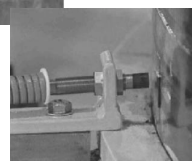
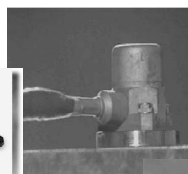
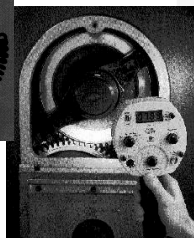
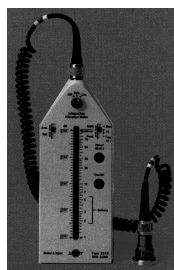
Escola Náutica I.D.Henrique

74

Vibrações versus Condição

## Instrumentação

### Instrumentação



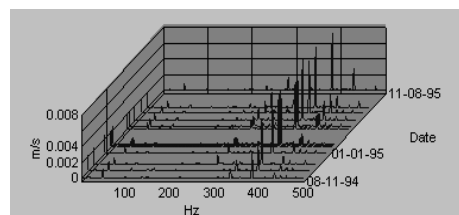
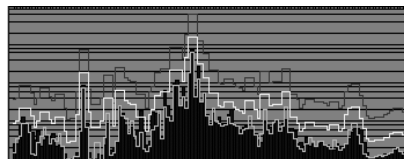
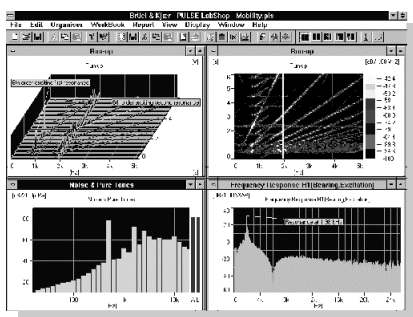
Escola Náutica I.D.Henrique

75

Vibrações versus Condição

## Técnicas de análise

### Técnicas de análise



Escola Náutica I.D.Henrique

76

Diagnóstico de avarias

## Diagnóstico de avarias



Escola Náutica I.D.Henrique

77

Diagnóstico de avarias

## Objectivo do Diagnóstico de Avarias

**Identificar a origem da avaria**

para:

- evitar a falha catastrófica
- permitir decidir da necessidade da paragem
- permitir o planeamento da intervenção
- decidir o momento adequado da reparação
- otimizar o tempo de operacionalidade

Escola Náutica I.D.Henrique

78

Diagnóstico de avarias

## Procedimento

- Listar as avarias possíveis
- Com os meios disponíveis tentar eliminar hipóteses (começar na mais fácil e caminhar para a mais difícil)
- No fim, ficar só com uma possibilidade

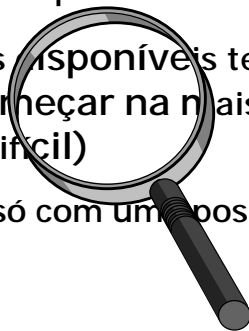
Escola Náutica I.D.Henrique

79

## Diagnóstico de avarias

## Procedimento

- Listar as avarias possíveis
- Com os meios disponíveis tentar eliminar hipóteses (começar na mais fácil e caminhar para a mais difícil)
- No fim, ficar só com uma possibilidade



Trabalho de diagnóstico = Trabalho de detective

## Diagnóstico de avarias

## Procedimento. Análise de vibrações

- Inspeccionar cuidadosamente a máquina
- Procurar desapertos, desagregações de material, fugas de lubrificante,...
- Apalpar chumaceiras para sentir temperatura e vibração
- Ouvir (ouvido, sonómetro ou chave de fendas)
- Verificar cuidadosamente os parâmetros processuais



Diagnóstico de avarias

## Procedimento. Análise de vibrações

- Determinar onde a vibração é mais forte
- Medir
- Verificar concordância com observação
- Verificar repetibilidade da medição

Escola Náutica I.D.Henrique

82

Diagnóstico de avarias

## Meios de Diagnóstico

- Os nossos sentidos (olfacto, tacto, audição,...)
- As técnicas de medição e análise de vibrações
- Outras técnicas (Parâmetros processuais, Endoscopia, Termografia, ...)
- Registo histórico
- Normas
- Análise de tendência
- **BOM SENSO & EXPERIÊNCIA**

Escola Náutica I.D.Henrique

83

Diagnóstico de avarias

## Sintomatologia

Avarias mais frequentes

- Desequilíbrio
- Desalinhamento
- Desaperto
- Empeno
- Ressonância
- Engrenagens
- Rolamentos
- Motores eléctricos

Escola Náutica I.D.Henrique 84

Diagnóstico de avarias

## Avarias mais comuns

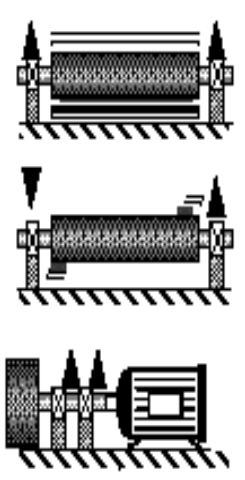
| Avaria         | Porcentagem |
|----------------|-------------|
| Desequilíbrio  | 40%         |
| Desalinhamento | 30%         |
| Ressonância    | 20%         |

Constituem 90% de todos os problemas de vibrações

Escola Náutica I.D.Henrique 85

Desequilíbrio

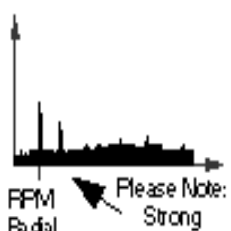
## Desequilíbrio



Static Unbalance

Dynamic Unbalance

Overhung Rotor Unbalance



RPM Radial

Please Note: Strong unbalance cause harmonics

Escola Náutica I.D.Henrique

86

Desequilíbrio

## Desequilíbrio

O desequilíbrio é uma das causas de avaria mais comuns em máquinas rotativas.

É o fenómeno que resulta de uma distribuição assimétrica de massa e que se traduz em vibração excessiva do rotor.

É tanto mais importante quanto mais rotativa for a máquina ou mais exigente o nível de fiabilidade exigido.

Escola Náutica I.D.Henrique

87

## Desequilíbrio

## Desequilíbrio

A vibração é produzida pela força centrífuga que resulta da interacção da componente de massa desequilibrada com a aceleração radial devido à rotação.

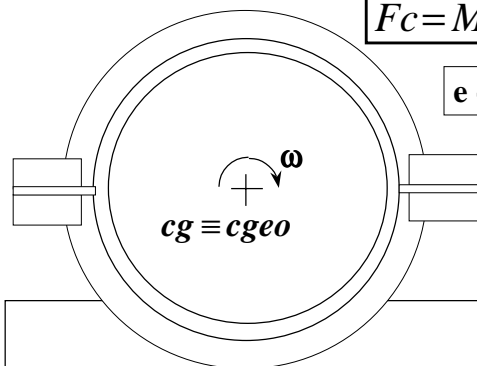
## Desequilíbrio

## Desequilíbrio

No caso de um rotor, de massa  $M$ , com uma distribuição de massas perfeita, o *centro de gravidade*,  $cg$ , coincide com o *centro geométrico*,  $cgeo$ , e portanto a *força centrífuga*,  $F_c$ , será nula.

$$F_c = M\omega^2 e = M0\omega^2 = 0$$

$e$  - excentricidade



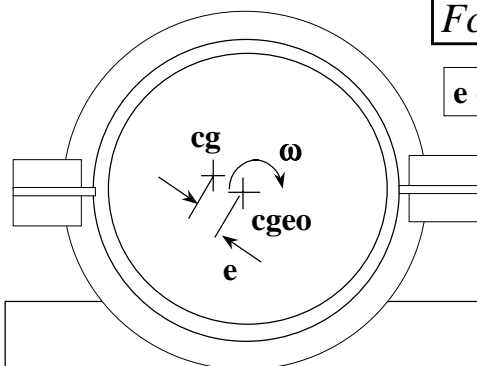
## Desequilíbrio

## Desequilíbrio

Mas se o centro de gravidade não coincidir com o centro de geométrico teremos uma força centrífuga proporcional à excentricidade e ao quadrado da rotação.

$$Fc = M\omega^2 e \neq 0$$

e - excentricidade



Escola Náutica I.D.Henrique

90

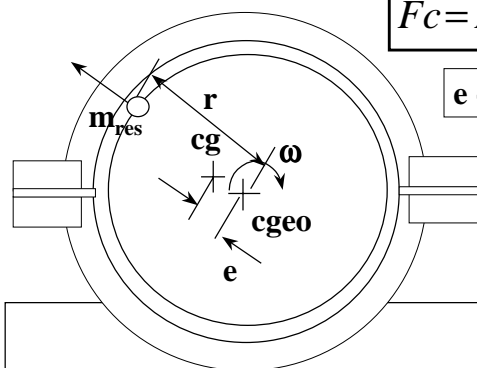
## Desequilíbrio

## Desequilíbrio

Como a excentricidade do centro de gravidade é devida à distribuição assimétrica de massas, a força centrífuga também pode ser expressa em função da *massa de desequilíbrio residual*,  $m_{res}$ , e da sua *distância ao centro de geométrico*.

$$Fc = M\omega^2 e = m_{res} r \omega^2$$

e - excentricidade



Escola Náutica I.D.Henrique

91

## Desequilíbrio

## Causas de desequilíbrio residual

- Processo de fabrico (fundição)
- Heterogeneidades de material
- Chavetas
- Montagem incorrecta
- Equilibragem incorrecta (não consideração das chavetas, do modo de vibração, das tolerâncias de montagem e da temperatura normal de serviço)

## Desequilíbrio

## Causas de desequilíbrio residual

- Processo de fabrico (fundição)
- Heterogeneidades de material
- Chavetas
- Montagem incorrecta
- Equilibragem incorrecta (não consideração das chavetas, do modo de vibração, das tolerâncias de montagem e da temperatura normal de serviço)

**ISO 1940****ISO 8821**

## Desequilíbrio

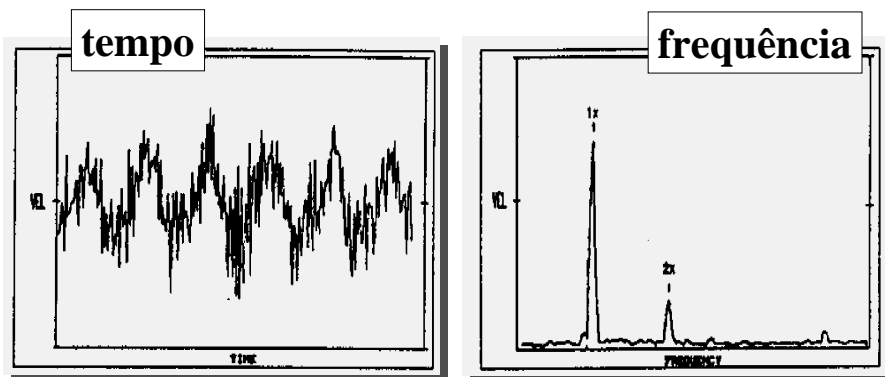
## Causas de desequilíbrio

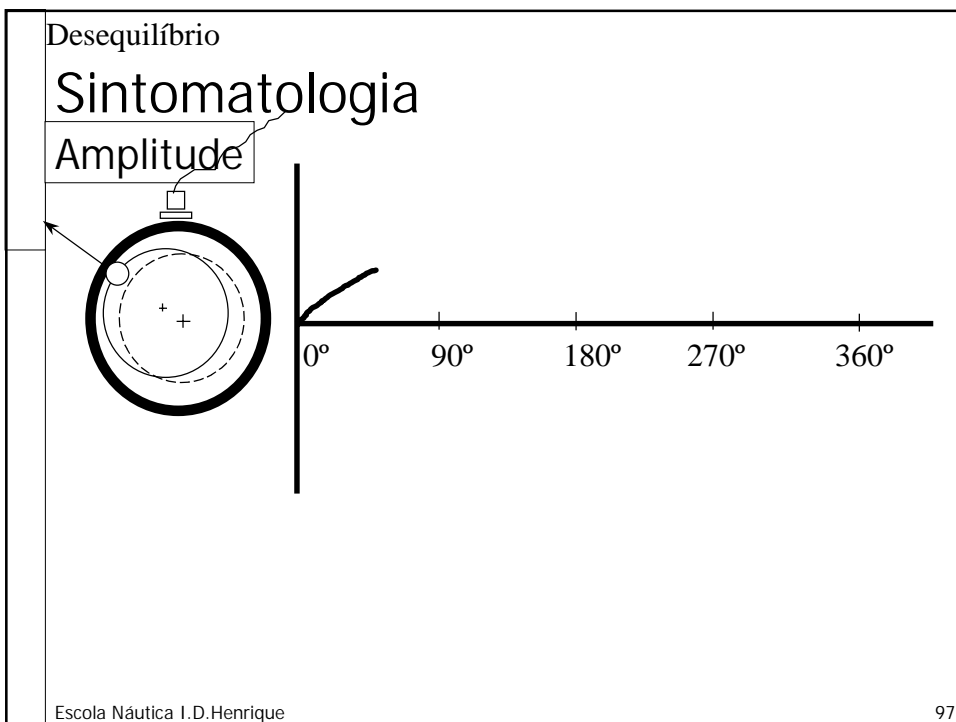
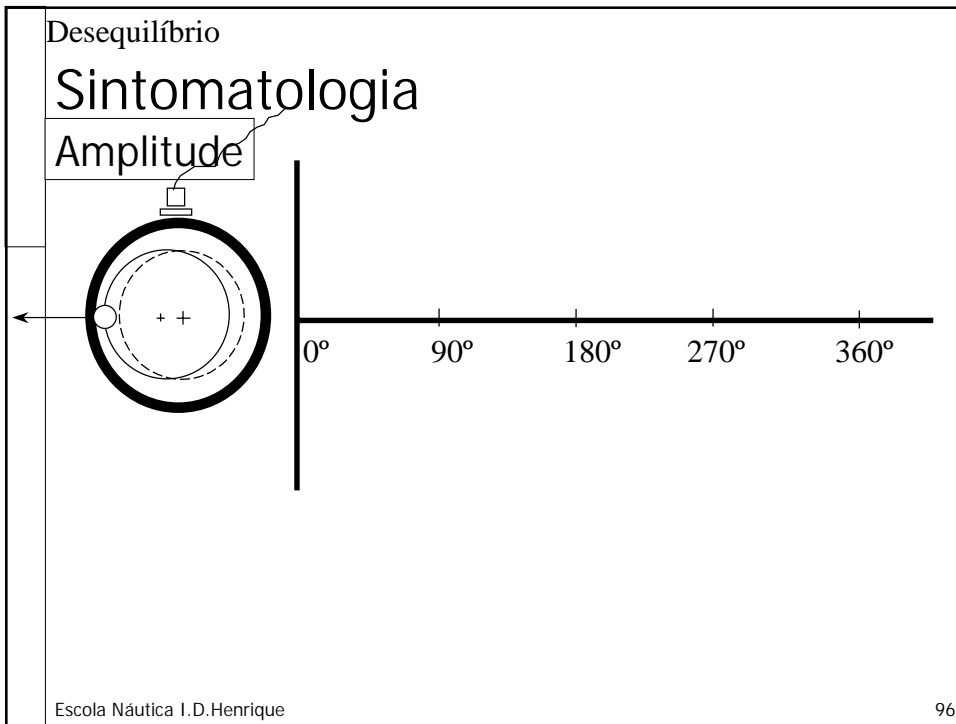
- Agregação ou desagregação de material
- Corrosão
- Erosão
- Desgaste
- Fractura
- Desaperto mecânico
- Tensões térmicas
- ...

## Desequilíbrio

## Sintomatologia

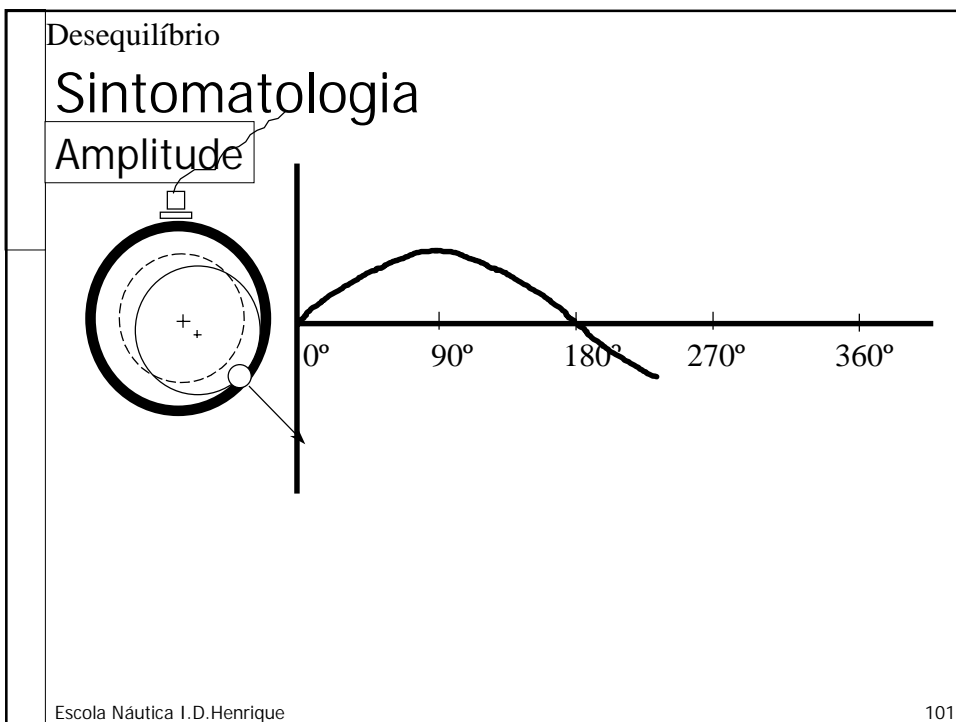
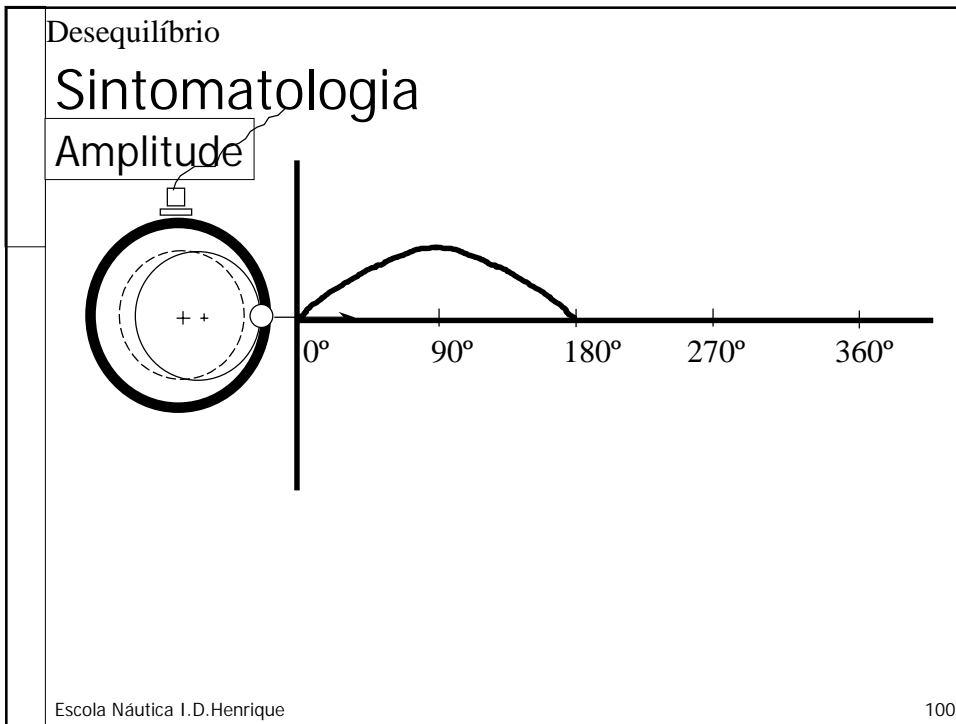
## Amplitude

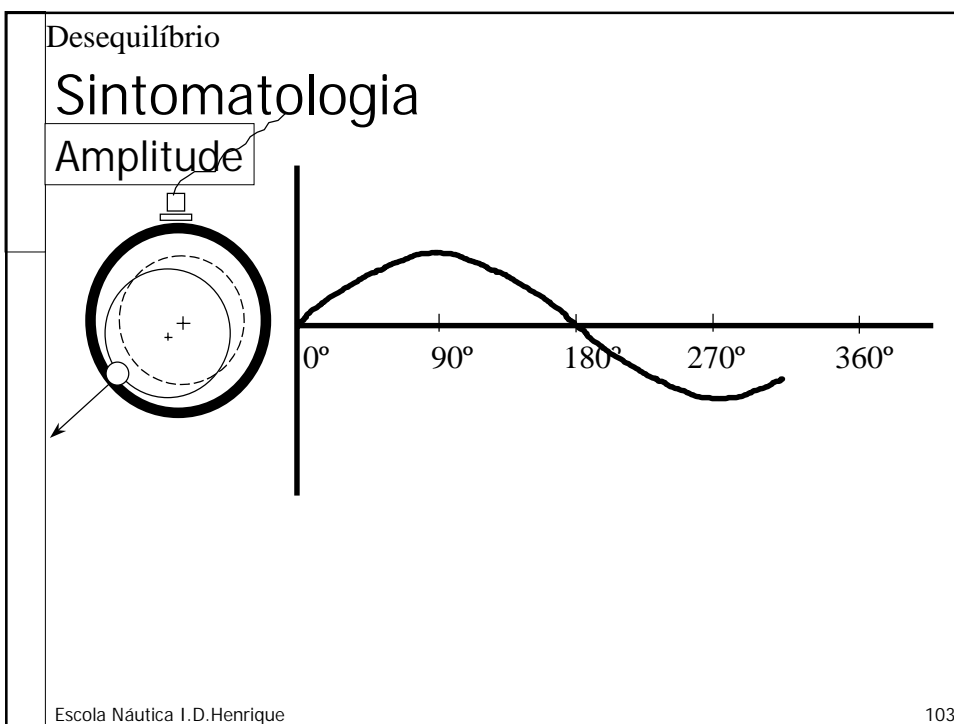
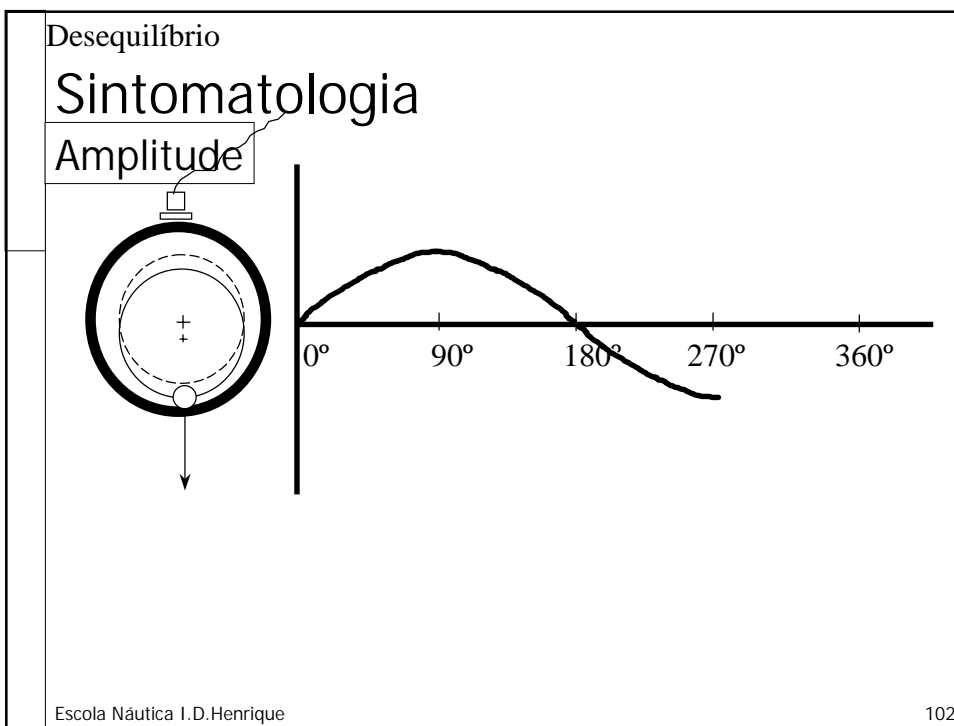


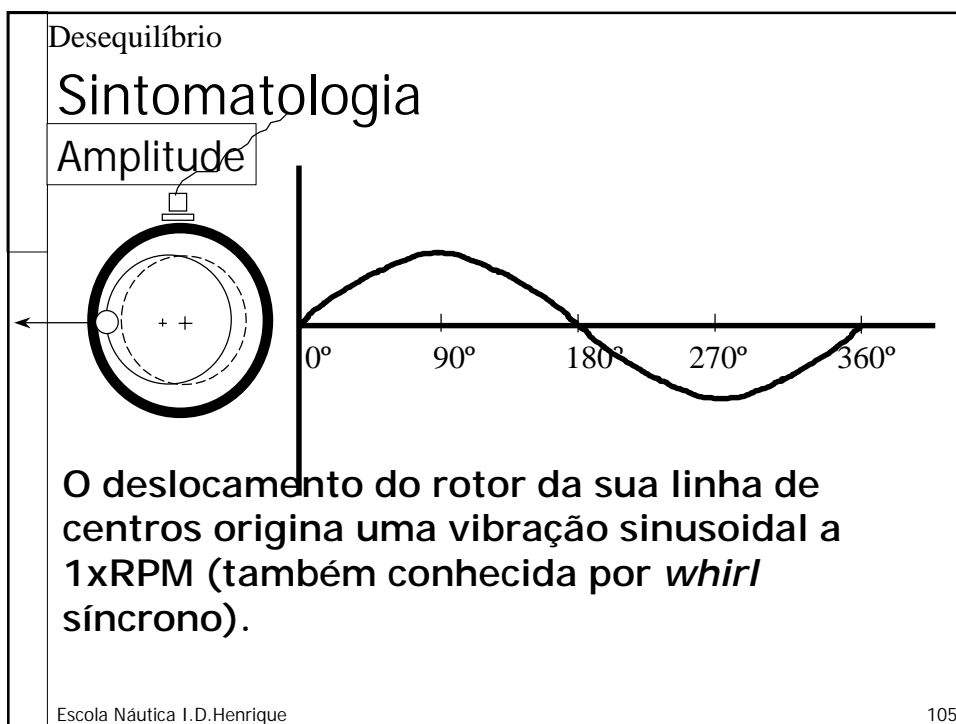
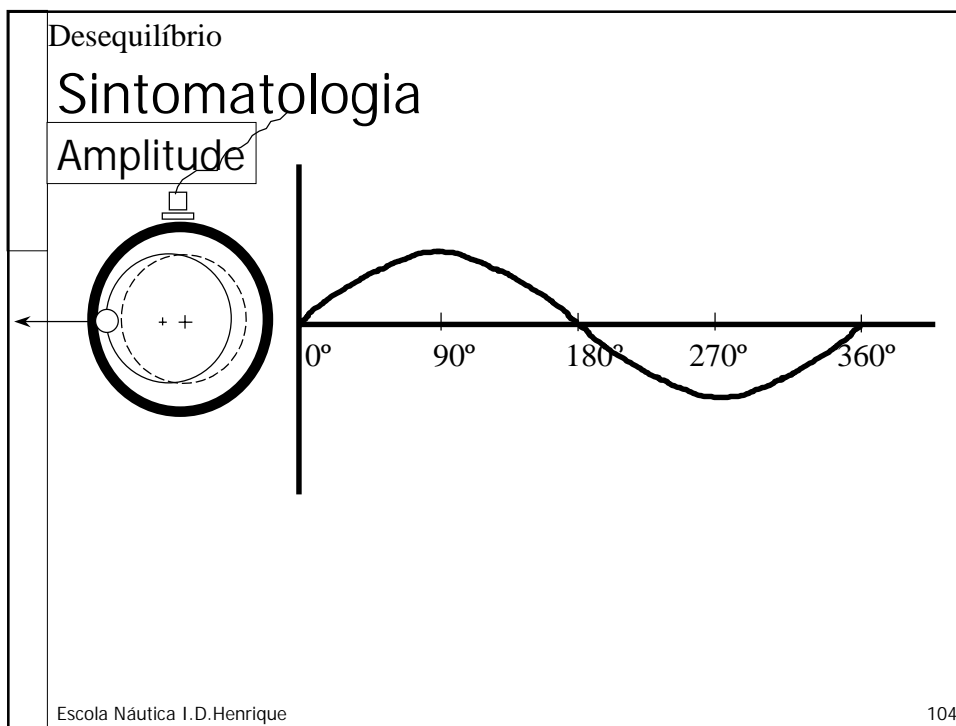












Desequilíbrio

## Sintomatologia

### Amplitude

Assim, quando no espectro de frequência a componente 1xRPM apresentar consistentemente tendência crescente é provável o desenvolvimento de uma situação de desequilíbrio.

Escola Náutica I.D.Henrique

106

Desequilíbrio

## Sintomatologia

### Amplitude

- Sinal sinusoidal a 1xRPM
- A amplitude aumenta com o quadrado da velocidade:

Exemplo

$V = 1.3 \text{ mm/s}$  e  $\omega = 3000 \text{ RPM}$

se  $\omega = 3100 \text{ RPM}$  deveremos medir

$$V = 1.3 \times (3100/3000)^2 = 1.4 \text{ mm/s}$$

Escola Náutica I.D.Henrique

107

## Desequilíbrio

## Sintomatologia

## Amplitude

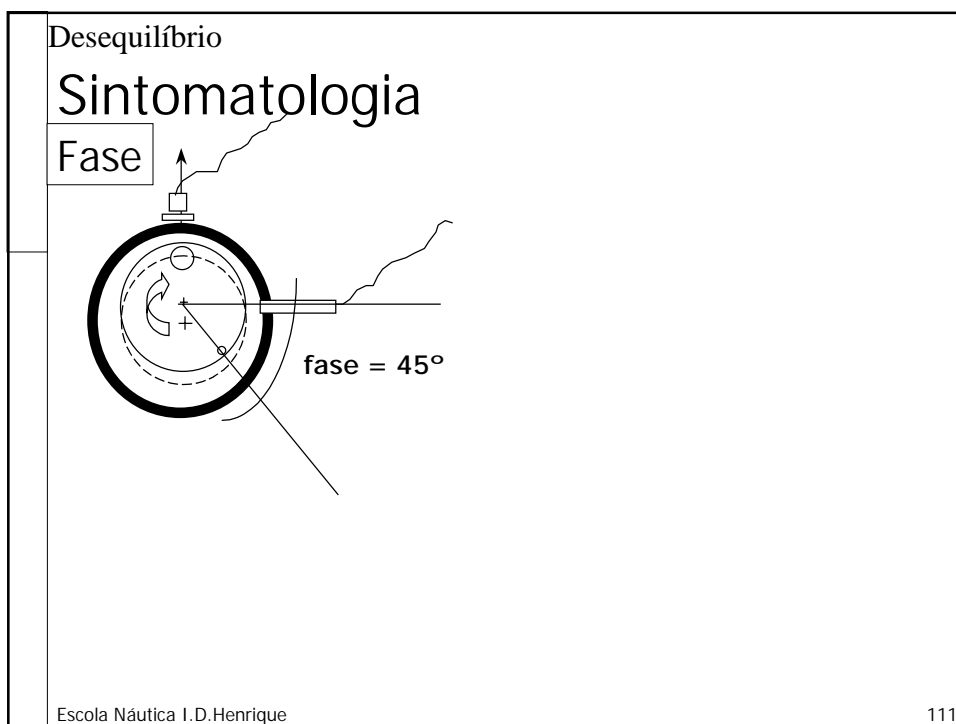
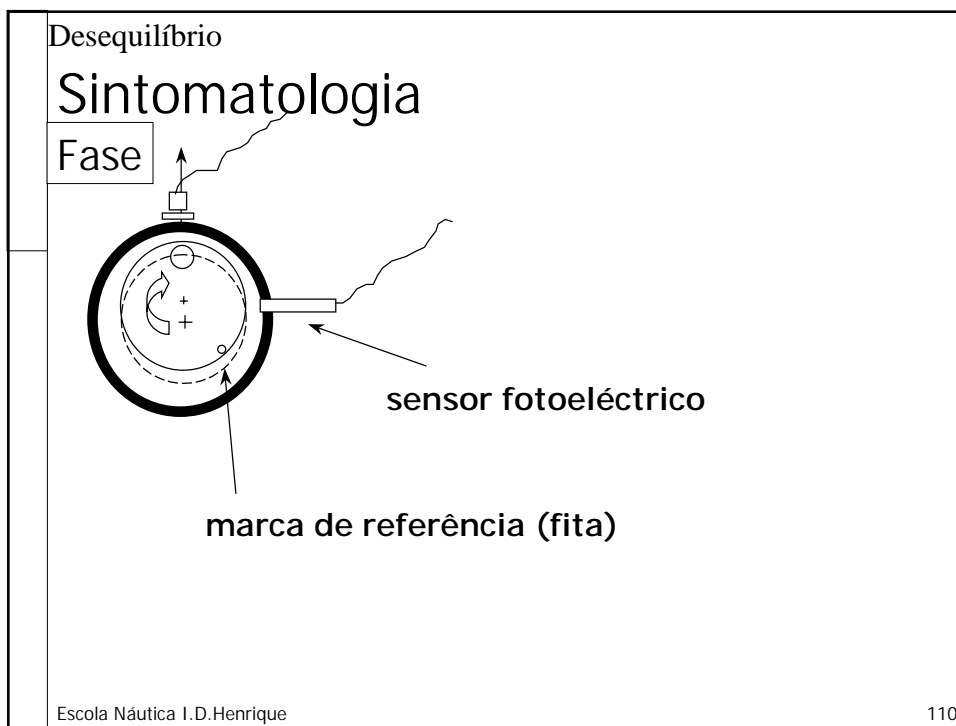
- A amplitude é maior na direcção de menor rigidez das chumaceiras
- A amplitude é maior nas chumaceiras mais carregadas pelo desequilíbrio
- Componente axial muito inferior à radial (excepção feita quando o rotor se situa exteriormente aos apoios - suspenso)
- Não depende da temperatura
- A relva do espectro mantém o valor médio
- A amplitude é estável

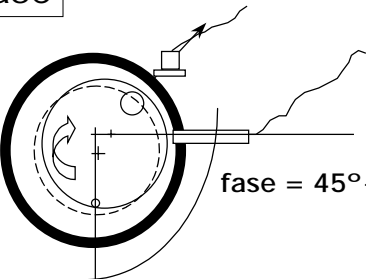
## Desequilíbrio

## Sintomatologia

## Fase

**A fase desempenha um papel importante na detecção e análise do desequilíbrio.**



|  |  |
|--|--|
|  | Desequilíbrio  |
|  | Sintomatologia   |
|  | Fase   |
|  |  <p><math>\text{fase} = 45^\circ + \text{deslocamento do acelerómetro}</math></p> <p>A fase acompanha a localização do transdutor, enquanto que a amplitude não se altera substancialmente (excepção feita ao caso de chumaceiras com grande diferença de rigidez entre direcções radiais).</p> |
|  | Escola Náutica I.D.Henrique 112  |

|  |  |
|--|--|
|  | Desequilíbrio  |
|  | Sintomatologia   |
|  | Fase   |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ A fase é estável (excepção para velocidades perto das críticas)</li> <li>■ Para chumaceiras com mobilidade semelhante em ambas as direcções radiais é vulgar que a diferença de fase entre medições verticais seja igual à entre horizontais</li> </ul> |
|  | Escola Náutica I.D.Henrique 113  |



## Desequilíbrio

## Sintomatologia

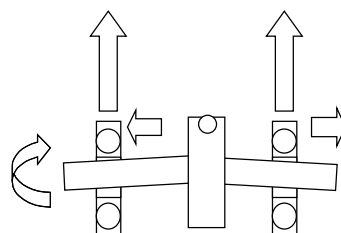
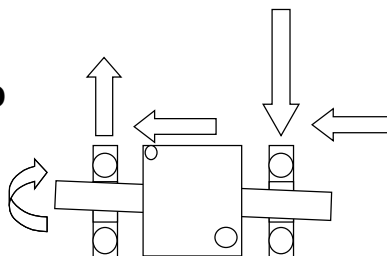
## Harmónicas

- Harmónicas  $nxRPM$  com amplitudes pequenas (podem ser grandes no caso de desequilíbrio grave ou quando a rigidez dos apoios difere substancialmente com a direcção)

## Desequilíbrio

## Sintomatologia

## Rotor apoiado

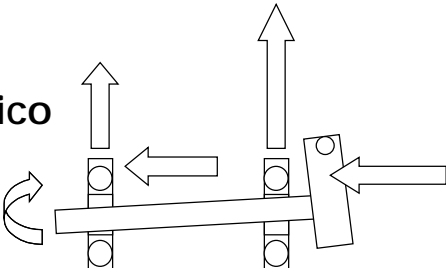
**Desequilíbrio estático****Desequilíbrio dinâmico**

Desequilíbrio

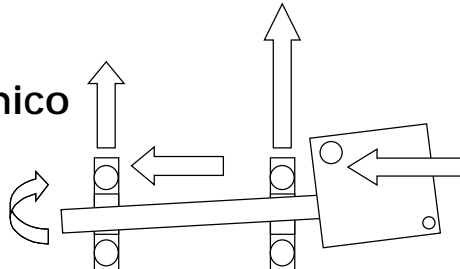
## Sintomatologia

Rotor suspenso

**Desequilíbrio estático**



**Desequilíbrio dinâmico**



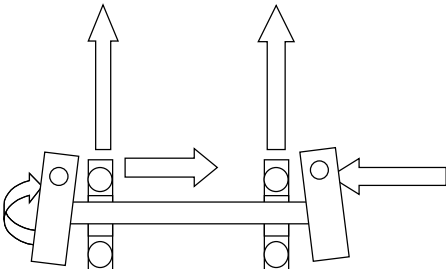
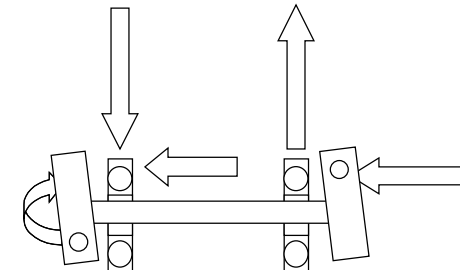
Escola Náutica I.D.Henrique

116

Desequilíbrio

## Sintomatologia

Rotor suspenso

Escola Náutica I.D.Henrique

117

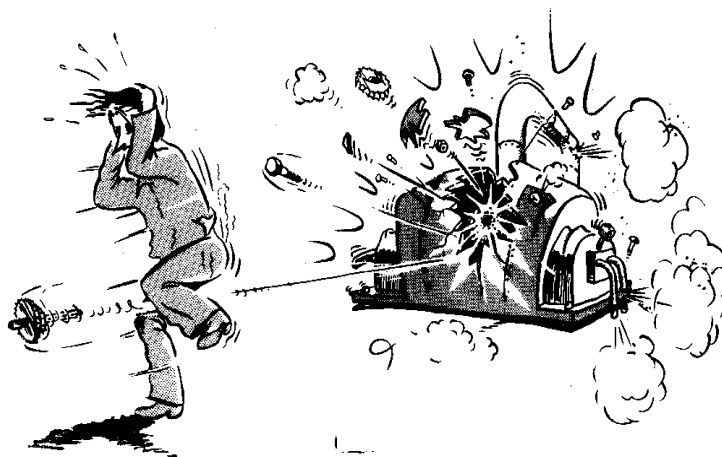
## Desequilíbrio

## Técnicas aconselhadas

- **Detecção:** NG e EF PBC com médias de espectros
- **Diagnóstico:** EF FFT com médias de espectros, medição de fase e sinal no tempo
- Medir em todas as chumaceiras nas direcções radiais
- Para equilibrar medir na direcção horizontal (elimina o efeito da força da gravidade)
- Confirmar suspeitas com inspecção visual. Procurar vestígios de erosão, agregação ou desagregação de material. Efectuar prova de funcionamento com registo das curvas de desempenho (ex: bombas centrífugas)

## Ressonância

## Ressonância



## Ressonância

## Descrição

As *frequências de ressonância* de uma máquina são as frequências às quais ela vibra com máxima amplitude em resposta a uma força de excitação.

Algumas das frequências de ressonância estão relacionadas com a velocidade de rotação do veio e por isso são identificadas como *velocidades críticas*.

As velocidades críticas são influenciadas pela massa e rigidez do rotor e chumaceiras mas também pelo líquido circulante. As condições de funcionamento alteram o valor da sua ocorrência.

## Ressonância

## Descrição

As velocidades críticas variam com o regime de funcionamento e com o desgaste do sistema rotor e respectivo suporte.

Outras ressonâncias estão relacionadas com os componentes fixos da máquina, como a sua caixa, suporte, sistema de encanamentos, chumaceiras e fundação (*ressonâncias estruturais*).

As frequências de ressonância são reguladas pelas frequências naturais, amortecimento e forças de excitação. O amortecimento regula a amplitude, evitando que a resposta do sistema amplie indefinidamente até ao colapso.

## Ressonância

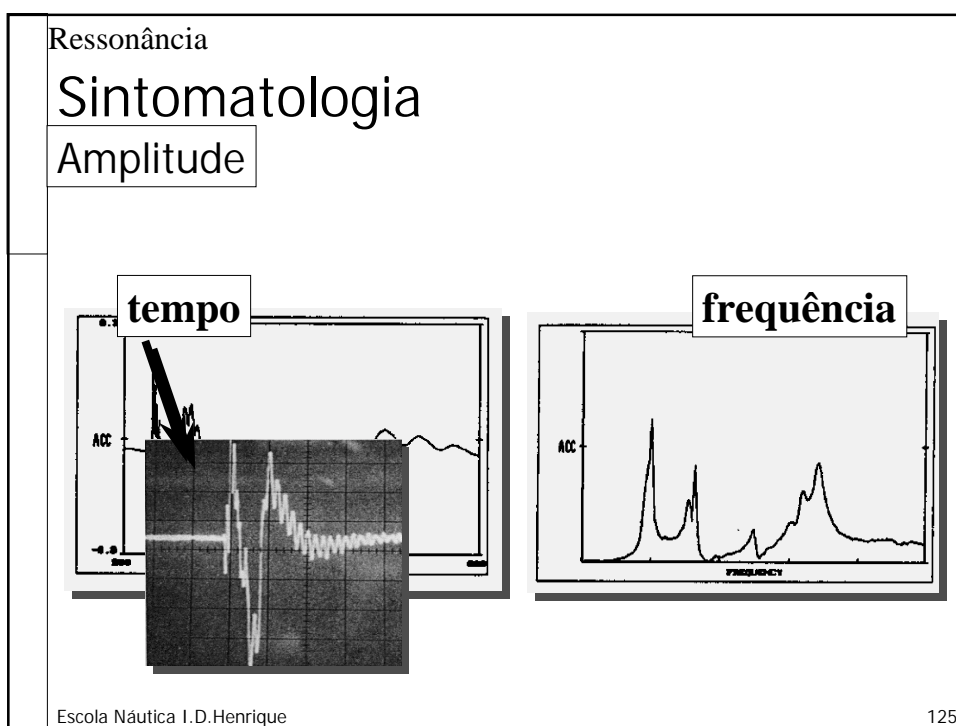
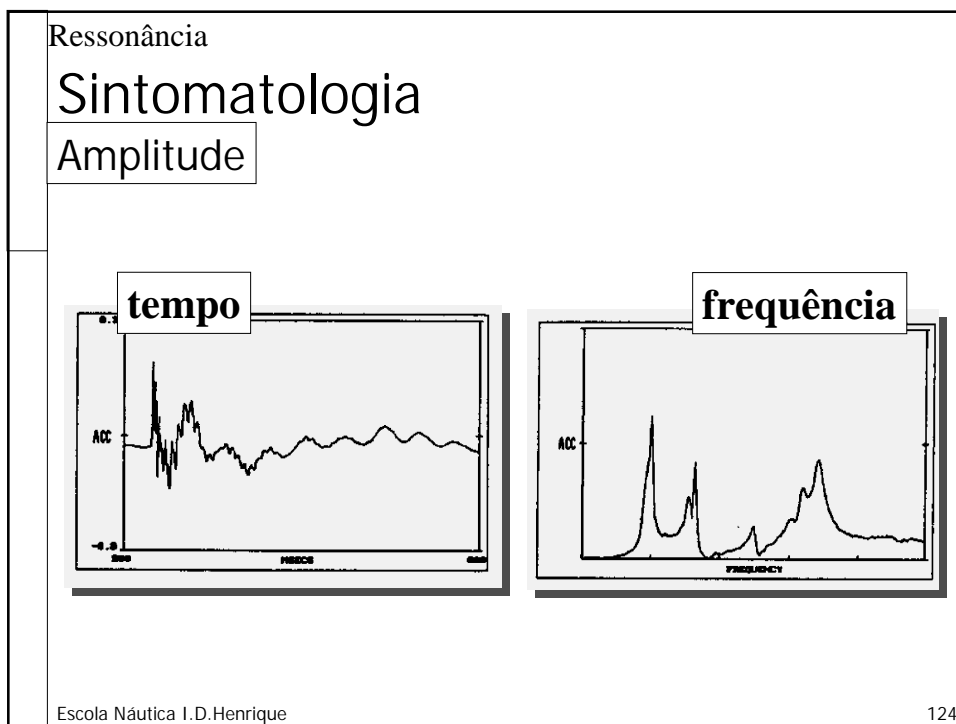
### Causas da ressonância

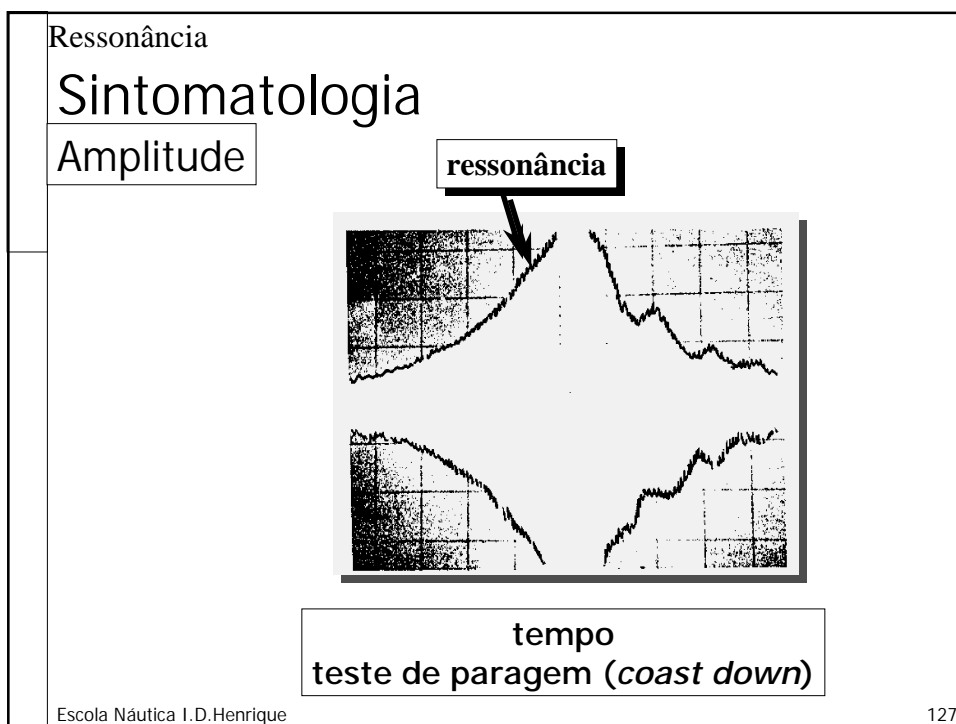
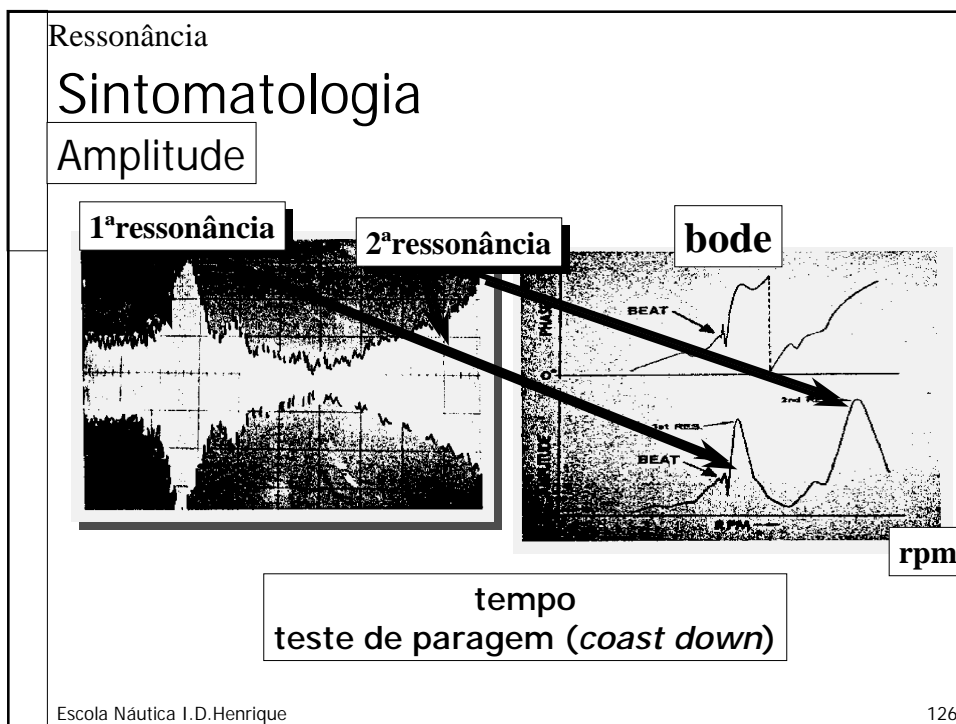
- Excitação pelo desequilíbrio residual do veio
- Excitação por choques
- Desapertos
- Deficiente montagem

## Ressonância

### Consequências da ressonância

- Amplitudes de vibração anormalmente elevadas
- Vibração extremamente direccional
- Variações de fase acentuadas
- Modo de vibração facilmente reconhecível
- Ocorrência sistemática de fendas nos mesmos sítios





|  |   |
|--|---|
|  | Ressonância   |
|  | <h2>Sintomatologia</h2>   |
|  | <h3>Amplitude</h3>  |
|  | <ul style="list-style-type: none"><li>■ Amplitude anormalmente elevada</li><li>■ Amplitude reduz substancialmente quando varia a velocidade</li><li>■ Vibração muito direccional e muito superior (<math>&gt;5x</math>) à vibração nas outras direcções</li><li>■ No espectro de frequência a ressonância estrutural não varia com a variação de velocidade</li></ul> |
|  | <div>Escola Náutica I.D.Henrique</div> <div>128</div>   |

|  |  |
|--|--|
|  | Ressonância  |
|  | <h2>Sintomatologia</h2>  |
|  | <h3>Fase</h3>  |
|  | <ul style="list-style-type: none"><li>■ Grandes variações de fase em velocidades próximas da ressonância</li><li>■ Quando a velocidade passa pela ressonância, a fase varia <math>180^\circ</math></li></ul> |
|  | <div>Escola Náutica I.D.Henrique</div> <div>129</div>  |



## Ressonância

## Sintomatologia

## Harmónicas

- **nxRPM elevadas**
- **amplitude das harmónicas altera-se substancialmente com pequenas variações de velocidade**

## Ressonância

## Técnicas aconselhadas

- **Detecção:** NG e EF PBC com médias de espectros
- **Diagnóstico:** EF FFT, medição de fase e sinal no tempo
- **Medir só na direcção radial. Medir na axial em caso de suspeita de problemas na fundação**
- **Efectuar testes de arranque e paragem (*run up* e *coast down*) com medição de cascata**
- **Testes de variação de velocidade (aconselhável em turbinas e compressores mas não em bombas centrífugas em virtude das freq.'s naturais variarem com a condição de funcionamento - efeito de Lomakin)**

## Ressonância

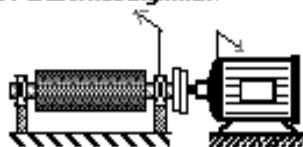
## Técnicas aconselhadas

- Medição de fase por variação de velocidade
- Utilização da lâmpada estroboscópica para visualização do modo de vibração e fase
- Teste do impacto
- Tentar sentir nos pés e mãos os pontos de maior vibração
- Verificar apertos
- Verificar correcção da montagem do sistema de encanamentos

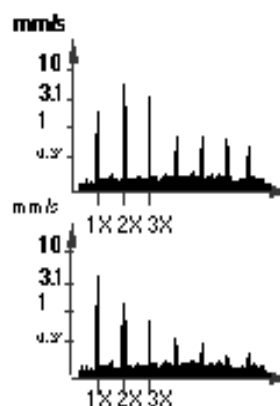
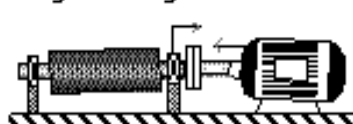
## Desalinhamento

## Desalinhamento

A. Parallel misalignment



B. Angular misalignment



## Desalinhamento

## Desalinhamento

Existe desalinhamento sempre que as linhas de centros do veio e chumaceiras não coincidam ou que as linhas de centros dos veios da máquina mandante e accionada não coincidam.

O alinhamento perfeito não existe e, portanto, há que saber lidar com este problema.

## Desalinhamento

## Desalinhamento

Os acoplamentos flexíveis são uma solução para este problema. Estes servem para suportar o desalinhamento mas não eliminam a vibração daí resultante.

A vibração, quando em excesso, tenderá a desgastar rapidamente as chumaceiras, os retentores e os acoplamentos.

A substituição ou reparação destes componentes com uma frequência inferior a 5 anos será provavelmente indicador de problemas de desalinhamento.

## Desalinhamento

## Causas do desalinhamento

- Deficiente montagem do acoplamento
- Chumaceiras desalinhadas
- Pernos da fundação, ou estrutura de suporte, aliviados
- Apoios que cederam
- Tensões térmicas não previstas

## Desalinhamento

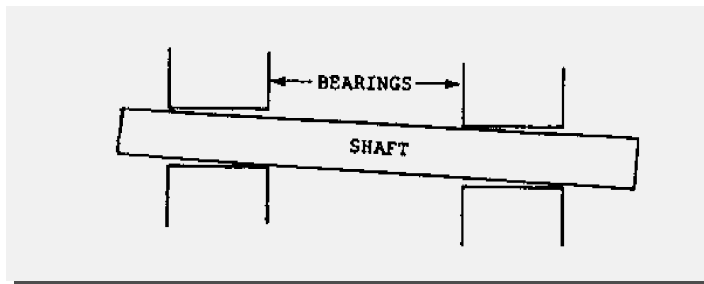
## Tipos de desalinhamento

- Desalinhamento de chumaceiras
- Desalinhamento de engrenagens
- Desalinhamento entre transmissões ou acoplamentos

## Desalinhamento

## Tipos de desalinhamento

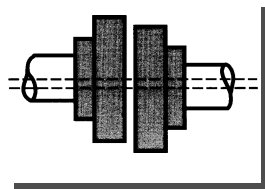
Desalinhamento de chumaceiras :



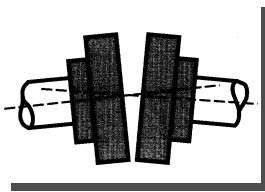
## Desalinhamento

## Tipos de desalinhamento

Desalinhamento entre transmissões ou acoplamentos :

desalinhamento paralelo  
(horizontal ou vertical)

+



desalinhamento angular

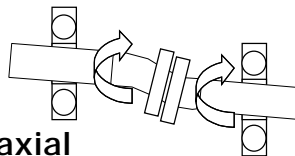
=

desalinhamento usual

## Desalinhamento

## Sintomatologia

## Amplitude

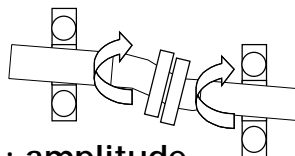


- Vibração elevada na direcção axial
- Componente a 2xRPM axial maior que a 1xRPM
- Maiores amplitudes nas chumaceiras do lado do acoplamento
- As amplitudes na direcção axial poderão ser superiores às radiais
- A razão de amplitudes entre a componente axial e radial pode ser usada como indicador de severidade (pode ir até 2x). Nesta comparação podem usar-se as componentes a 1 e 2xRPM de ambas as direcções
- Não é sensível à variação de velocidade

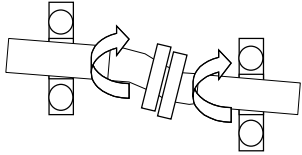
## Desalinhamento

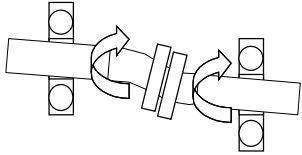
## Sintomatologia

## Amplitude



- Se só desalinhamento angular : amplitude síncrona dominante em ambas as direcções (radial e axial)
- Se só desalinhamento paralelo : amplitude síncrona elevada na direcção axial. Componente predominante na direcção radial a 2xRPM
- Vibração ocorre na direcção oposta ao plano do desalinhamento paralelo

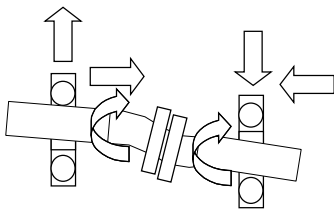
|  |  |
|--|--|
| Desalinhamento   |  |
| Sintomatologia   |  |
| Amplitude  |  |
| <p>O desalinhamento também provoca tensões nos elementos internos do acoplamento que em cada rotação são pressionados e afastados entre si. O efeito deste tocar cíclico entre elementos é o aparecimento de uma vibração real à frequência de <i>nº de elementos x RPM</i>.</p> |  |
| Escola Náutica I.D.Henrique  |  |
| 142  |  |

|  |  |
|--|--|
| Desalinhamento   |  |
| Sintomatologia   |  |
| Amplitude  |  |
| <p>O desalinhamento depende da temperatura. Todos os materiais se dilatam com o aumento de temperatura. O movimento daí resultante provoca alterações no alinhamento. Assim, a alteração na vibração, especialmente nas harmónicas, durante o aquecimento das máquinas é um forte indicador de desalinhamento.</p> |  |
| Escola Náutica I.D.Henrique  |  |
| 143  |  |

Desalinhamento

## Sintomatologia

Fase. Desalinhamento de chumaceiras.



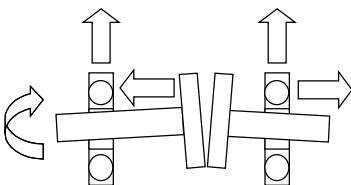
Escola Náutica I.D.Henrique

144

Desalinhamento

## Sintomatologia

Fase. Desalinhamento do acoplamento.



Escola Náutica I.D.Henrique

145



## Desalinhamento

## Sintomatologia

## Fase

## ■ Estável

- As chumaceiras de apoio dos extremos do veio apresentam desfaseamento de  $180^\circ$  na direcção axial (desal. angular) e/ou radial (desal. paralelo)
- A regra anterior só é válida para veios rígidos. No caso dos flexíveis há que conhecer a dinâmica destes (modos de vibração)
- Se a diferença de fase de aprox.  $180^\circ$  for notada nas chumaceiras de cada lado do acoplamento, deve-se suspeitar de desalinhamento deste ou avaria do acoplamento flexível. Se o desfaseamento se verificar entre chumaceiras do mesmo lado do acoplamento, é provável o empeno do veio ou desalinhamento severo de chumaceiras

## Desalinhamento

## Sintomatologia

## Harmónicas

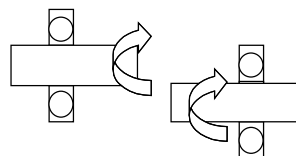
O desalinhamento manifesta-se no domínio da frequência como uma série de harmónicas de  $1xRPM$  (2,3,4,...).

As harmónicas ocorrem por causa da tensão induzida no veio pelo desalinhamento. As harmónicas não são na verdade vibrações àquelas frequências mas o efeito na FFT da truncagem da senoide  $1xRPM$ .

Desalinhamento

## Sintomatologia

Harmónicas



Dois veios desalinhados e não acoplados podem rodar livremente nos seus eixos próprios. Assim, a vibração a 1xRPM (desequilíbrio residual do veio) é uma senoide perfeita.

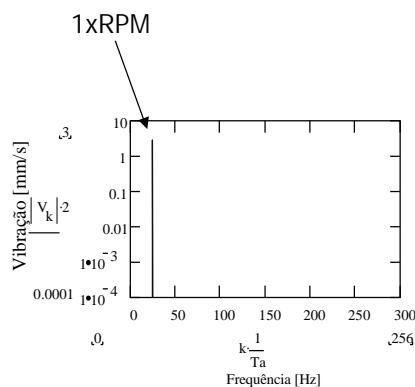
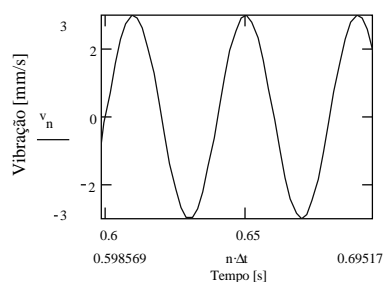
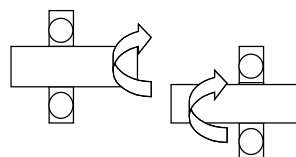
Escola Náutica I.D.Henrique

148

Desalinhamento

## Sintomatologia

Harmónicas



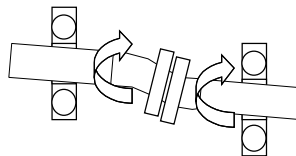
Escola Náutica I.D.Henrique

149

Desalinhamento

## Sintomatologia

Harmónicas



Quando os dois veios são acoplados ficam em tensão um contra o outro. O resultado deste esforço é a distorção da onda sinusoidal a 1xRPM que não consegue atingir a máxima amplitude. A FFT da senoide deformada apresenta muitas harmónicas de 1xRPM.

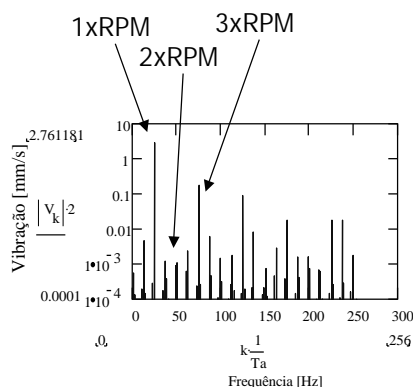
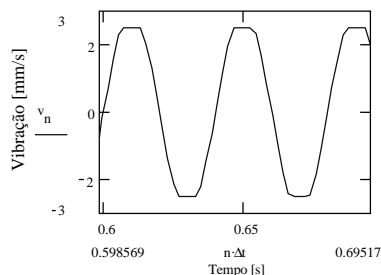
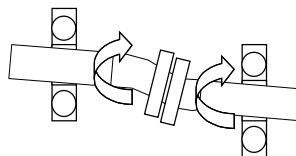
Escola Náutica I.D.Henrique

150

Desalinhamento

## Sintomatologia

Harmónicas



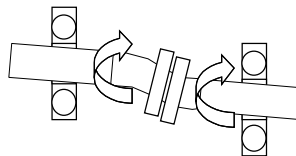
Escola Náutica I.D.Henrique

151

Desalinhamento

## Sintomatologia

### Harmónicas



A **distorção harmónica** é uma medida efectiva do desalinhamento. Esta medida poderá ser usada como parâmetro para *análise de tendência*.

Escola Náutica I.D.Henrique

152

Desalinhamento

## Sintomatologia

### Harmónicas

- Se só desalinhamento angular : componentes axiais a 2, 3 ou mais xRPM
- Se só desalinhamento paralelo : componente radial, predominante no espectro, a 2xRPM
- Normal o aparecimento das harmónicas (radiais e axiais) 2 e 3xRPM
- Possível o aparecimento das harmónicas (radiais e axiais) 4 a 10xRPM mas de amplitude reduzida

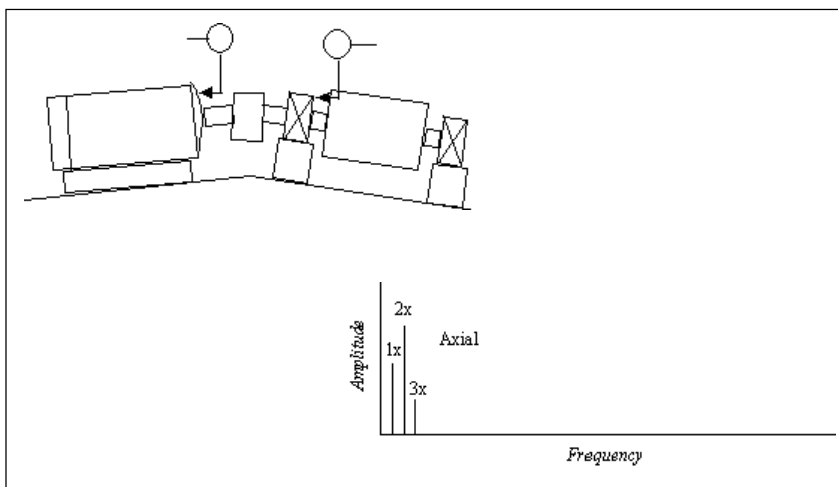
Escola Náutica I.D.Henrique

153

Desalinhamento

## Exemplos

Desalinhamento angular



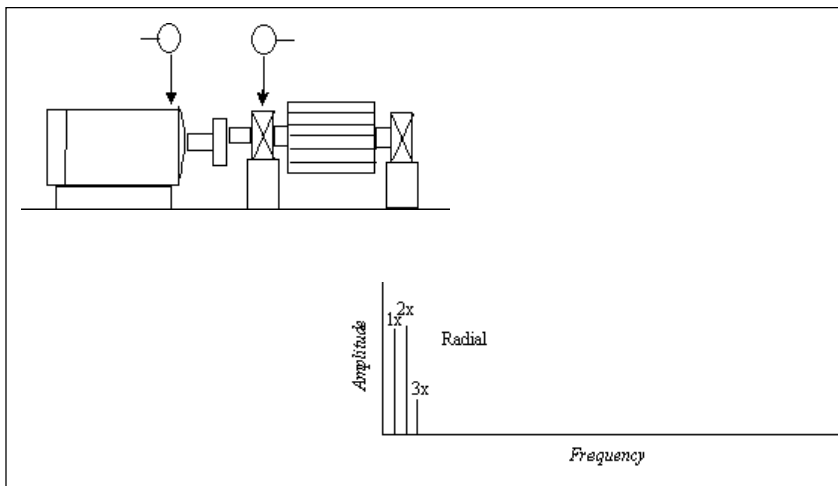
Escola Náutica I.D.Henrique

154

Desalinhamento

## Exemplos

Desalinhamento paralelo



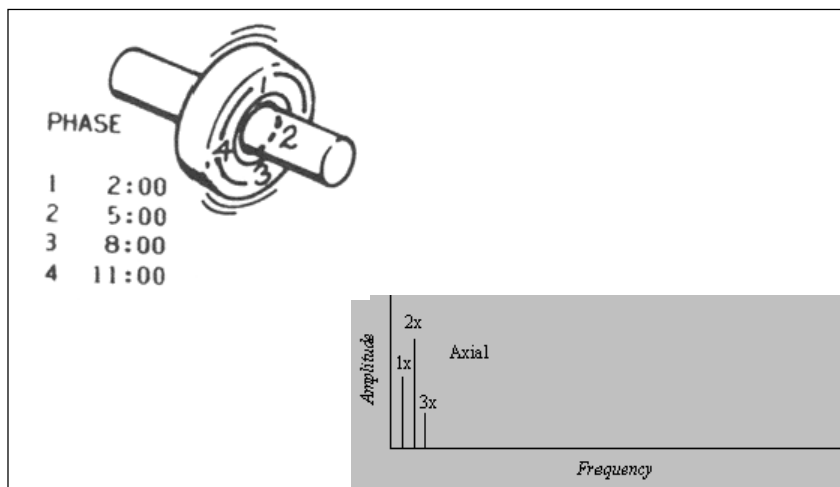
Escola Náutica I.D.Henrique

155

## Desalinhamento

## Exemplos

## Chumaceira desalinhada ou enjambrada



Escola Náutica I.D.Henrique

156

## Desalinhamento

## Técnicas aconselhadas

- **Detecção:** NG e EF PBC
- **Diagnóstico:** EF FFT com médias de espectros, sinal no tempo e medição de fase. Medir em aceleração para realçar as harmónicas.
- Medir em todas as chumaceiras e no mesmo lado destas
- Medir na direcção axial e na vertical e/ou horizontal
- Efectuar medições a frio e a quente (as vibrações a quente deverão ser inferiores às obtidas logo após o arranque)

Escola Náutica I.D.Henrique

157

## Desalinhamento

## Técnicas aconselhadas

- Isolamento temporário da fonte de calor ou arrefecimento da estrutura de suporte das chumaceiras com acompanhamento da evolução das vibrações
- Desaperto e aperto, um por um, dos pernos do fixe com observação simultânea das vibrações (colocar o sensor onde as vibrações são mais elevadas)
- Desacoplar as máquinas. Se a vibração desaparecer é um problema de acoplamento, senão é outro e da máquina que apresenta essa vibração.

## Desalinhamento

## Técnicas aconselhadas

- Utilizar estroboscópio caso o desalinhamento seja visível a olho nú ou para acoplamentos flexíveis
- Confirmar suspeitas com medição de temperatura das chumaceiras, inspecção visual das sapatas com máquina parada e em funcionamento, etc...

Referências bibliográficas

## Referências bibliográficas

- **Integração de técnicas de controlo de condição aplicadas a bomba centrífugas – Chedas Sampaio; Tese de Mestrado IST 1995**
- **Machinery Vibration, measurement and analysis – Victor Wowk; McGraw Hill 1991**

# FIM