

❑ Rotores Rígidos Apoiados em Mancais Rígidos

➤ Exercício

Seja dado um virabrequim de um motor de quatro cilindros e dois tempos, como mostrado na figura, e que deve ter seus contrapesos dimensionados, de modo a minimizar os esforços dinâmicos nos mancais. Para facilitar a solução consideremos o modelo físico formado de massas discretas apresentado na figura. Note-se que as massas equivalentes supostas concentradas nos mancais de biela englobam também a massa do pé das bielas, e que não é necessário nos preocuparmos com as massas centralizadas no eixo de rotação.

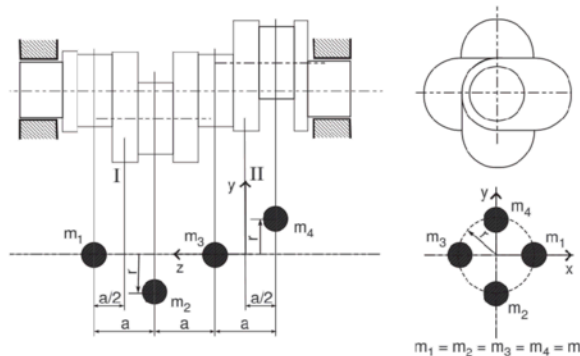


Figura 4: Virabrequim com binário de desbalanceamento



Conteúdo

1. Introdução e Objetivos
2. Tipos de Desbalanceamento
- 3. Rotores Rígidos Apoiados em Mancais Rígidos**
 - 3.1 Esforços nos Mancais
 - 3.2 Balanceamento “Teórico”
 - 3.3 Classes de Balanceamento**
4. Máquinas de Balanceamento
 - 4.1 Máquinas de Balanceamento de Mancais Rígidos
 - 4.2 Máquinas de Balanceamento de Mancais Flexíveis
5. Referências



❑ Rotores Rígidos Apoiados em Mancais Rígidos

➤ Classes de Balanceamento

- Por melhor que seja o procedimento de balanceamento de um rotor, sempre haverá algum **desbalanceamento residual** devido às diferenças entre os valores e posicionamentos das massas de balanceamento calculadas e as efetivamente adicionadas ou retiradas.
- Dessa forma, o balanceamento é realizado até certo nível, o qual depende da aplicação e da velocidade de rotação de operação do rotor.
- Com isso, pode-se manter as vibrações e solicitações dinâmicas nos mancais dentro de limites adequados ao funcionamento equipamento.
- Existem níveis admissíveis de desbalanceamento residual compatíveis com as boas práticas de engenharia (“tolerância de desbalanceamento”).
- A norma **ISO 1940** (ABNT NBR-ISO 1940) trata da qualidade de balanceamento de **rotores rígidos**. Para tanto, são estabelecidas classes de balanceamento (G) que definem uma faixa de **desbalanceamento residual permissível**:

$$\text{Classe ISO Gn: } e_{ad}\omega_{op} \leq n \quad [\text{mm/s}] \quad (16)$$

e_{ad} : excentricidade residual admissível do centro de massa do rotor [mm].

ω_{op} : velocidade de rotação de **operação** do rotor [rad/s].



❑ Rotores Rígidos Apoiados em Mancais Rígidos

➤ Classes de Balanceamento

- Quanto menor a classe de balanceamento (n), mais refinado, preciso e economicamente custoso é o balanceamento.
- Quanto maior a rotação de operação do rotor, menor e mais refinada é a classe de balanceamento.
- Quanto mais importantes forem as **forças de inércia** ($\propto \Omega^2$) para a excitação do sistema, **menor** e mais refinada é a classe de balanceamento.
- Quanto mais relevantes forem as **forças externas** atuantes no sistema, **maior** a classe de balanceamento.
- Lembrar que o balanceamento é importante para **reduzir a magnitude dos esforços de inércia** que autoexcitam o sistema.
- Observar que a **norma ISO 1940 privilegia o desbalanceamento estático** como sendo o mais crítico para o rotor.

Grade	Examples
G 4000	Crankshaft drives of rigidly mounted slow marine diesel engines with an uneven number of cylinders.
G 1600	Crankshaft drives of rigidly mounted large two-cycle engines.
G 630	Crankshaft drives of rigidly mounted large four-cycle engines, crankshaft drives of elastically mounted marine diesel engines.
G 250	Crankshaft drives of rigidly mounted fast four-cylinder diesel engines.
G 100	Crankshaft drives of fast diesel engines with six or more cylinders, complete engines (gasoline or diesel) for cars, trucks, and locomotives.
G 40	Car wheels, wheel rims, wheel sets, drive shafts, crankshaft drives of elastically mounted fast four-cycle engines (gasoline or diesel) with six or more cylinders, crankshaft drives for engines of cars, trucks, and locomotives.
G 16	Drive shafts (propeller shafts, cardan shafts) with special requirements, parts of crushing machinery, parts of agricultural machinery, individual components of engines (gasoline or diesel) for cars, trucks, and locomotives, crankshaft drives of engines with six or more cylinders under special requirements.
G 6.3	Parts of process plant machinery, marine main turbine gears (merchant service), centrifuge drums, fans, assembled aircraft gas turbine rotors, flywheels, pump impellers, machine tools and general machinery parts, normal electrical armatures, individual components of engines under special requirements.
G 2.5	Gas and steam turbines, including marine main turbines (merchant service), rigid turbogenerator rotors, rotors, turbocompressors, machine-tool drives, medium and large electrical armatures with special requirements, small electrical armatures, turbine-driven pumps.
G 1	Tape recorder and phonograph (gramophone) drives, grinding machine drives, small electrical armatures with special requirements.
G 0.4	Spindles, discs and armatures of precision grinders, gyroscopes.

Classes de balanceamento sugeridas para diferentes tipos de rotores (ISO 1940). Fonte: Genta 2005.

❑ Rotores Rígidos Apoiados em Mancais Rígidos

➤ Classes de Balanceamento

- Definida a excentricidade residual admissível (e_{ad}), determina-se o **desbalanceamento total admissível** do rotor:

$$u_{ad} = M e_{ad} \quad [\text{g} \cdot \text{mm}] \quad (17)$$

M : massa total do rotor [g].

e_{ad} : excentricidade residual admissível [mm].

Como $e_{ad} \leq \frac{n}{\omega_{op}}$

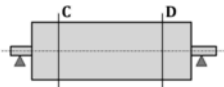


$$u_{ad} \leq \frac{Mn}{\omega_{op}} \quad [\text{g} \cdot \text{mm}] \quad (18)$$

- O **desbalanceamento admissível em cada plano de balanceamento** depende da posição relativa entre os planos dos mancais e os planos de balanceamento:

Planos de balanceamento internos aos mancais

OBS: Se só há 1 plano de balanceamento entre os mancais, $m^*r = M^*e_{ad}$ (não divide por 2)

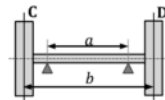


Δm_i : diferença entre as massas calculadas e as efetivamente adicionadas ou retiradas

$$\begin{aligned} u_{adC} &= \Delta m_C R_C \leq \frac{u_{ad}}{2} = \frac{M e_{ad}}{2} \\ u_{adD} &= \Delta m_D R_D \leq \frac{u_{ad}}{2} = \frac{M e_{ad}}{2} \end{aligned} \quad (19)$$

Desbalanceamento **estático** tende a ser mais restritivo

Planos de balanceamento externos aos mancais



$$\begin{aligned} u_{adC} &= \Delta m_C R_C \leq \frac{u_{ad}}{2} \frac{a}{b} = \frac{M e_{ad}}{2} \frac{a}{b} \\ u_{adD} &= \Delta m_D R_D \leq \frac{u_{ad}}{2} \frac{a}{b} = \frac{M e_{ad}}{2} \frac{a}{b} \end{aligned} \quad (20)$$

Desbalanceamento **dinâmico** tende a ser mais restritivo



Conteúdo

1. Introdução e Objetivos
2. Tipos de Desbalanceamento
3. Rotores Rígidos Apoiados em Mancais Rígidos
 - 3.1 Esforços nos Mancais
 - 3.2 Balanceamento “Teórico”
 - 3.3 Classes de Balanceamento
- 4. Máquinas de Balanceamento**
 - 4.1 Máquinas de Balanceamento de Mancais Rígidos
 - 4.2 Máquinas de Balanceamento de Mancais Flexíveis
5. Referências

❑ Máquinas de Balanceamento

- Geralmente, a posição do centro de massa e os produtos de inércia de um rotor são desconhecidos, tornando o balanceamento teórico inviável.
- Na prática, o balanceamento de rotores pode ser realizado de duas formas a partir de medições dos esforços ou deslocamentos nos mancais:
 - Balanceamento em máquinas de balanceamento;
 - Balanceamento em campo com rotores montados nos seus próprios mancais.
- A partir das medições dos esforços ou deslocamentos nos mancais, determinam-se a quantidade e a posição das massas que devem ser adicionadas ou retiradas do rotor para a redução do desbalanceamento.
- Neste curso, serão apresentados apenas os **fundamentos de máquinas de balanceamento de rotores rígidos** apoiados em mancais rígidos (RR-MR) e flexíveis (RR-MF).



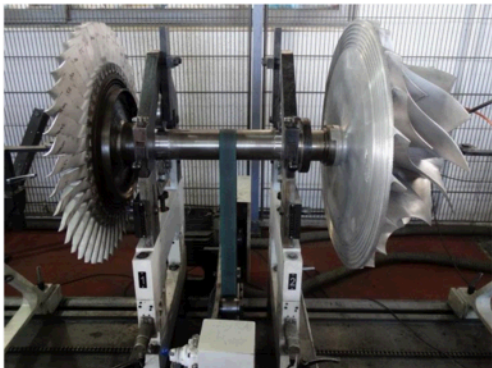
Máquina de balanceamento de mancais rígidos horizontal. Fonte: [Hofmann](#).



Máquina de balanceamento para rodas de locomotivas. Fonte: [VTM Group](#).



❑ Máquinas de Balanceamento



Balanceamento do rotor de um turbocompressor. Fonte: [TURBOMED](#).



Máquina de balancear rodas automotivas. Fonte: [Frank C. Müller](#).

❑ Máquinas de Balanceamento

- 1) Mancais rígidos
- 2) Mancais flexíveis
- 3) Haste do conjunto rotor-mancais
- 4) Sensor de vibração ou carga
- 5,6) Planos de balanceamento
- 7) Rotor

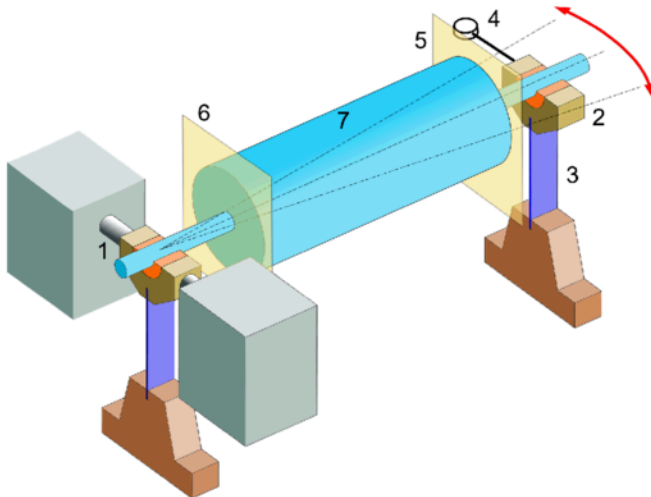


Ilustração de uma máquina de balanceamento dinâmico de rotores. Fonte: [By Kaboldy](#).



Conteúdo

1. Introdução e Objetivos
2. Tipos de Desbalanceamento
3. Rotores Rígidos Apoiados em Mancais Rígidos
 - 3.1 Esforços nos Mancais
 - 3.2 Balanceamento “Teórico”
 - 3.3 Classes de Balanceamento
- 4. Máquinas de Balanceamento**
 - 4.1 Máquinas de Balanceamento de Mancais Rígidos**
 - 4.2 Máquinas de Balanceamento de Mancais Flexíveis
5. Referências