

# Como medir torque corretamente

Parte 2

1. Instalação
2. Torque dinâmico
3. Incerteza de medição

## Ontem...

1. Conceitos básicos
2. Transdutores de torque
3. Calibração

# Felipe Zucconi

Analista T&M

- Técnico mecânico – Senai
- Física – IF/USP
- HBK – 22 anos
- Técnicas de medição – 29 anos



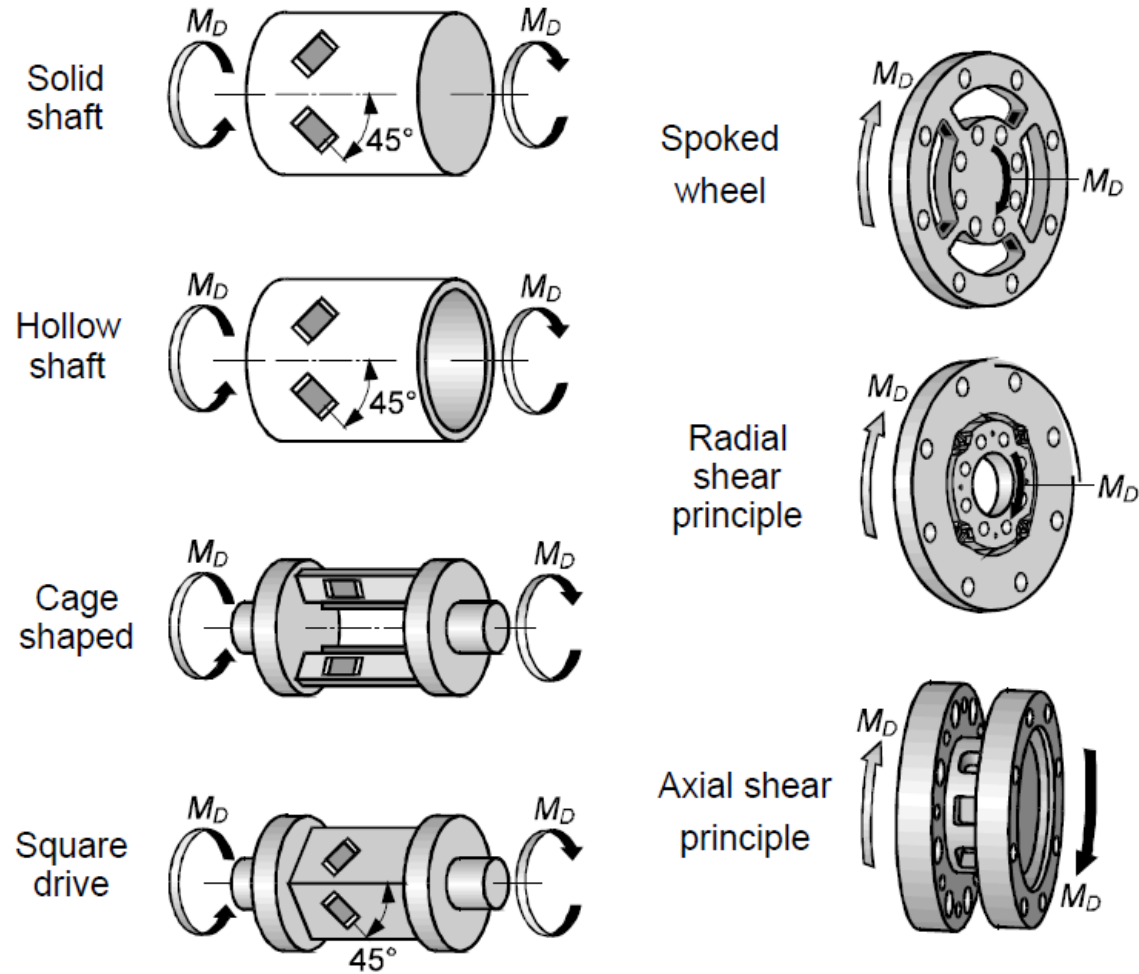
# Instalação de transdutores



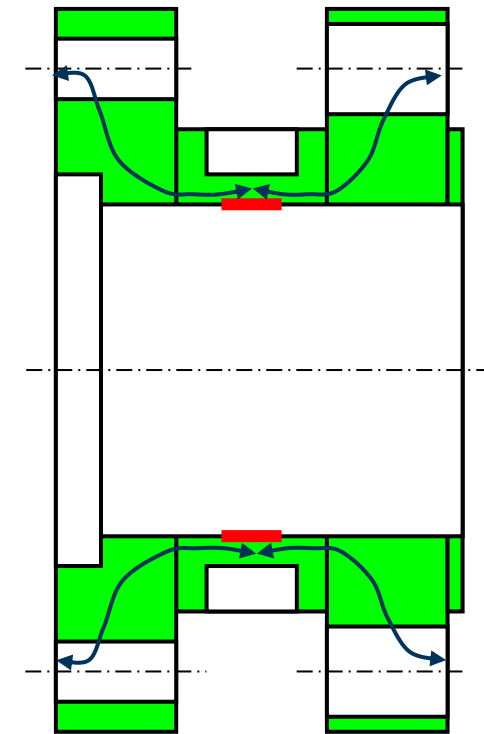
1. Por atrito

2. Flange

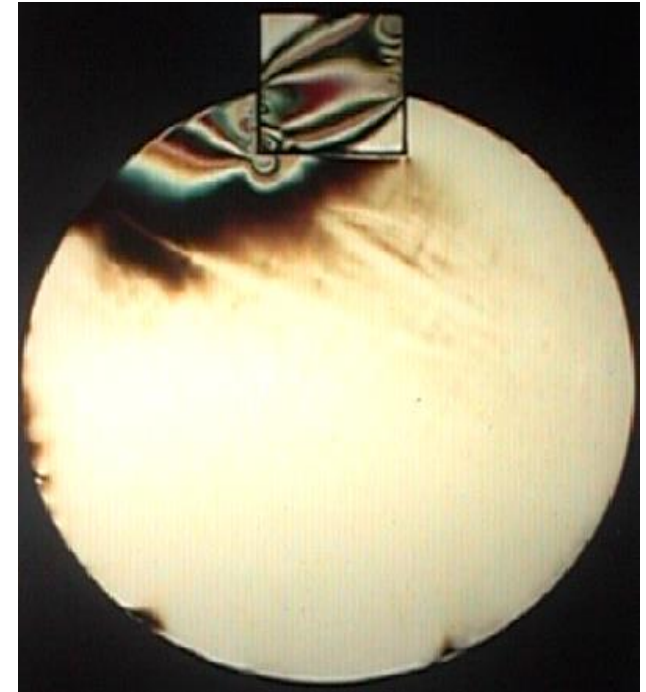
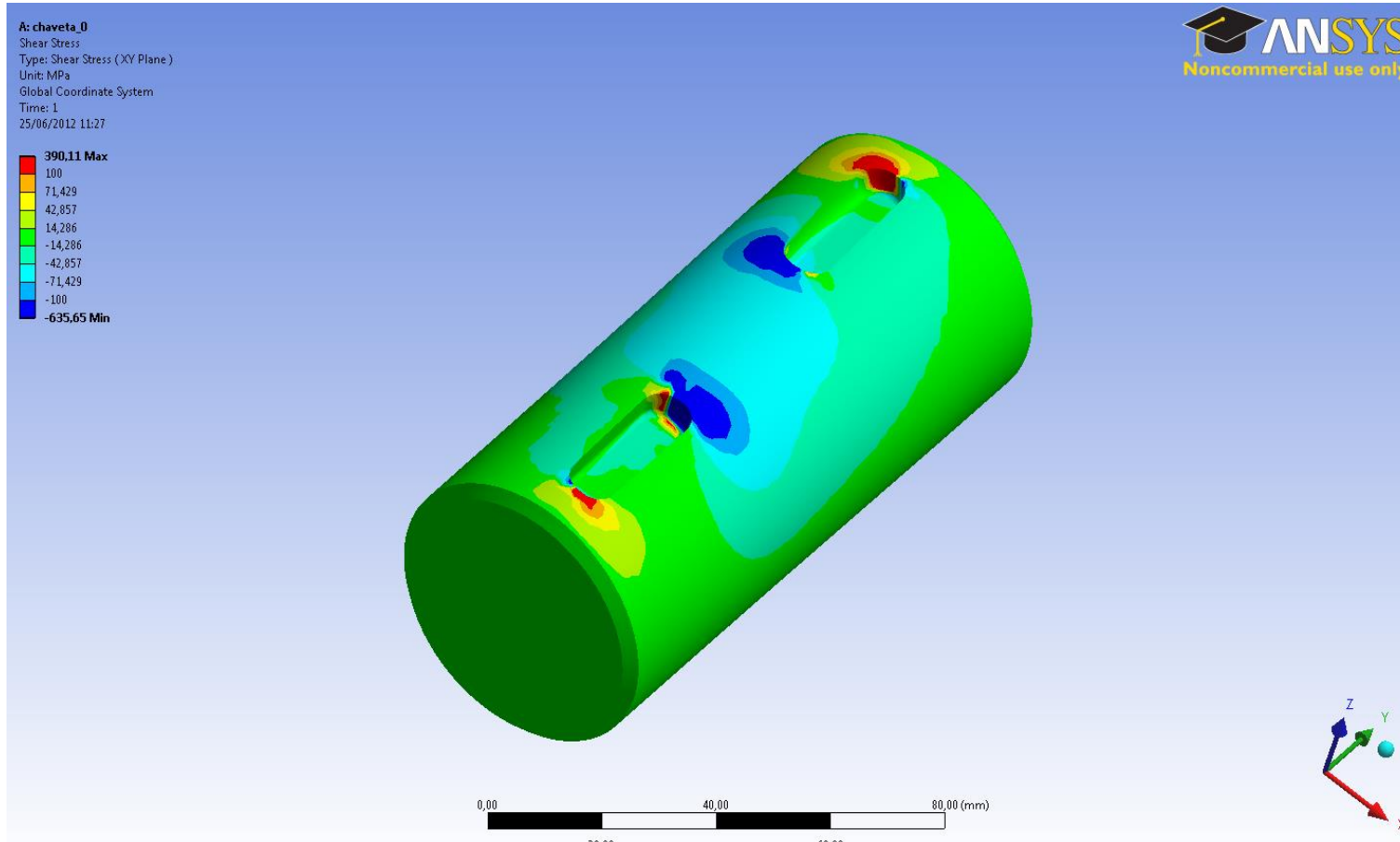
3. Encaixe quadrado

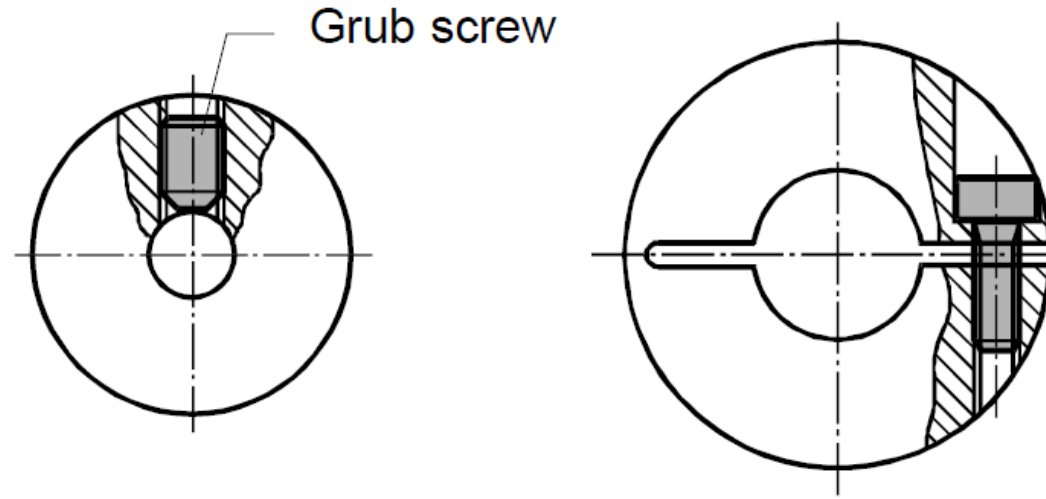


peça única de medição

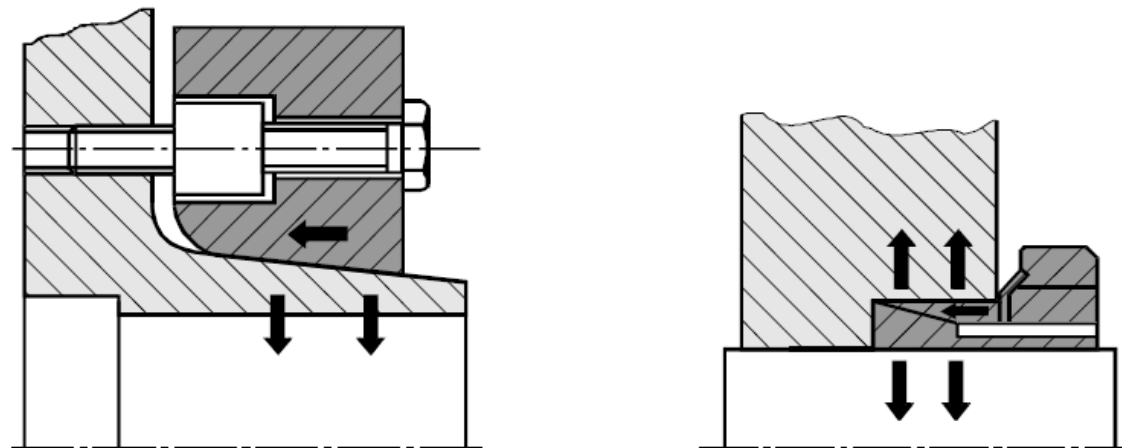


princípio de cisalhamento axial



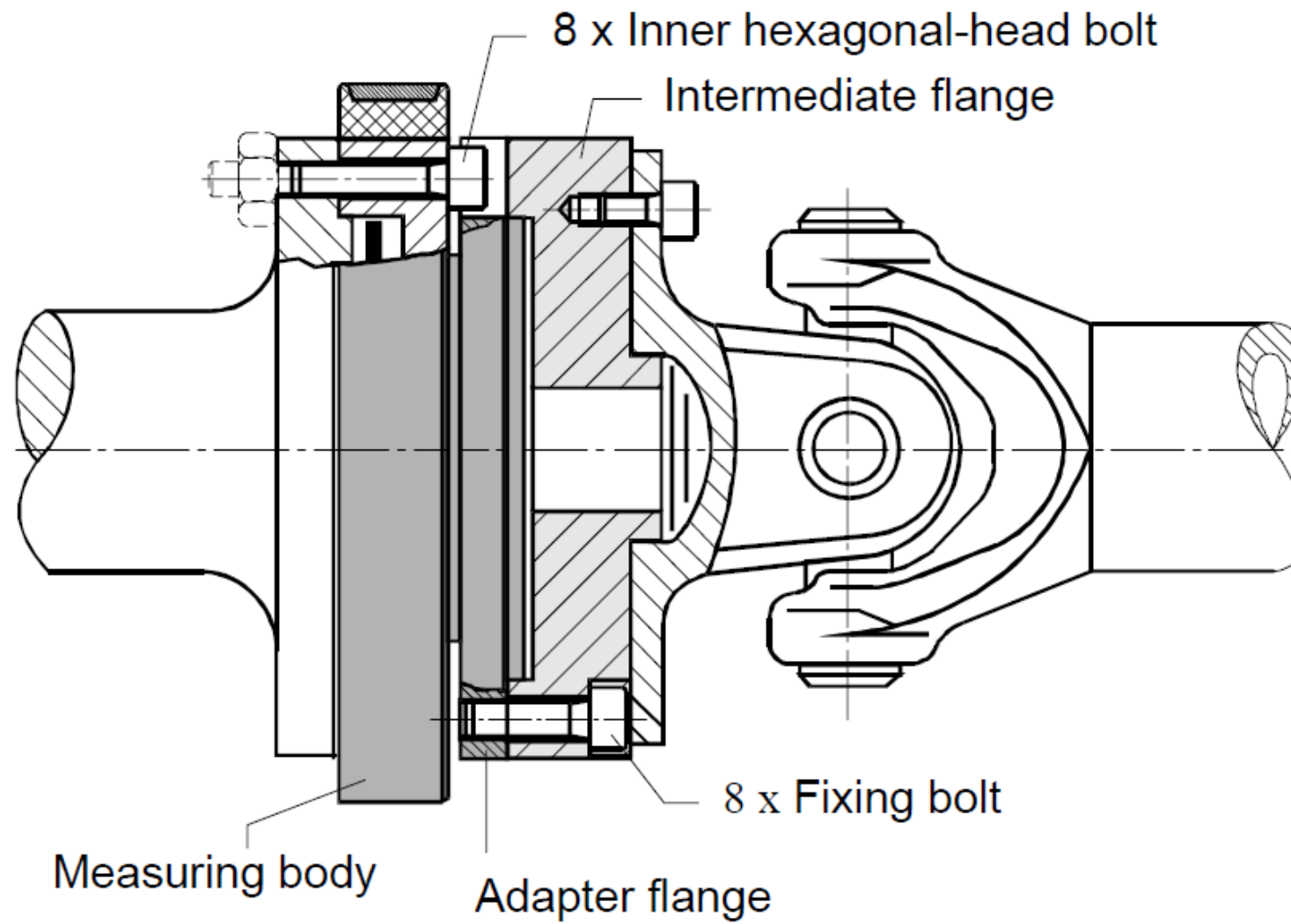


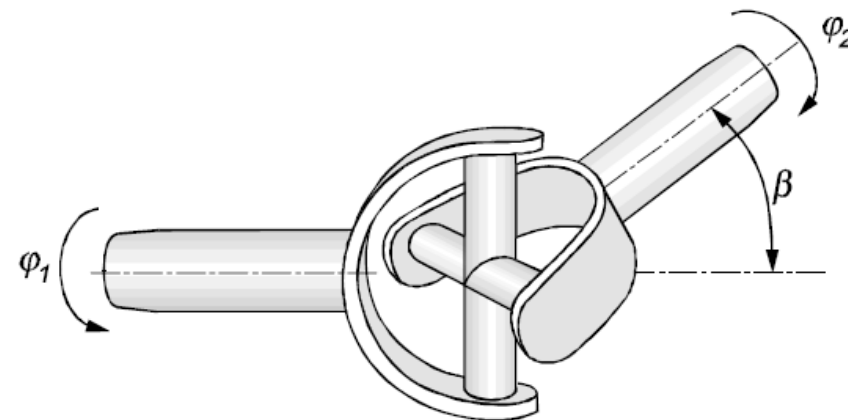
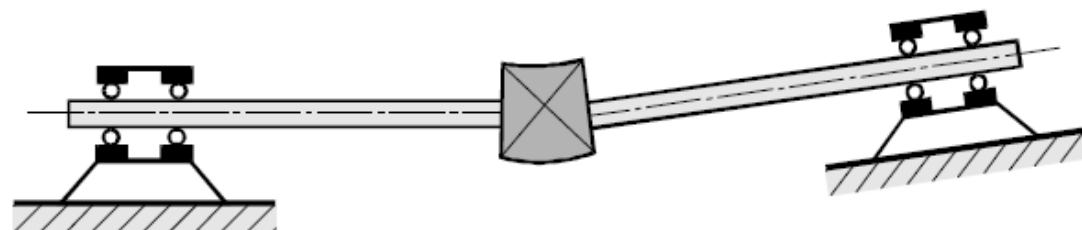
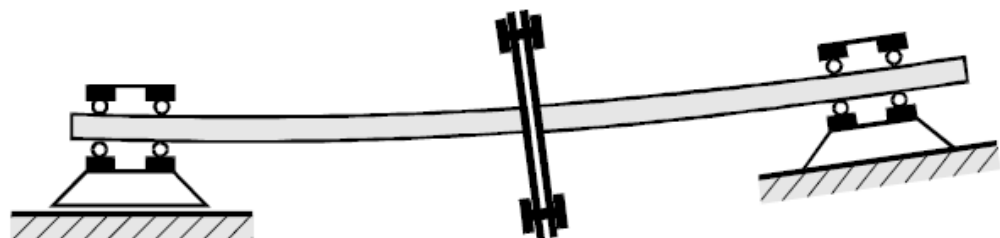
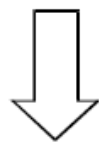
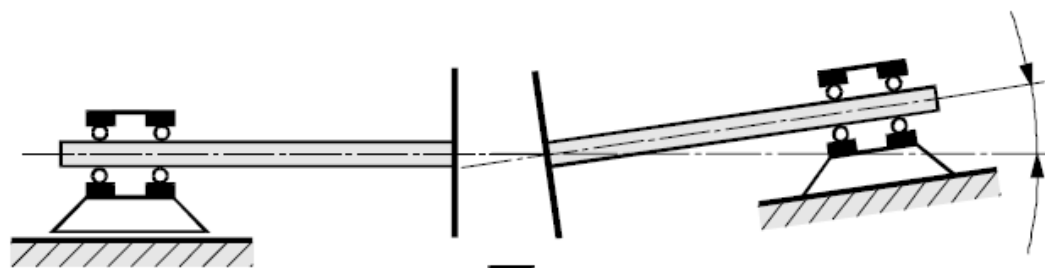
Cone principle



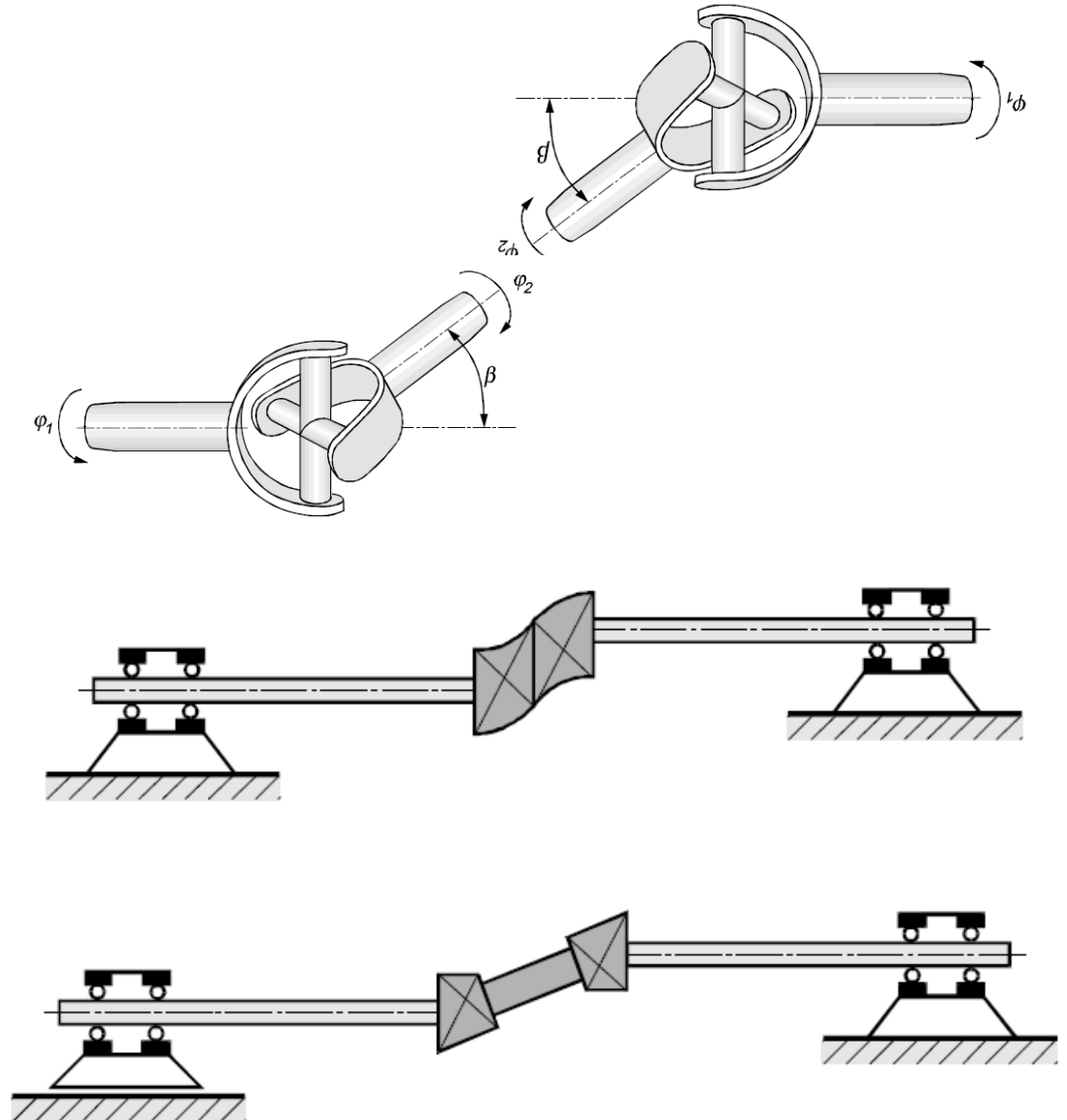
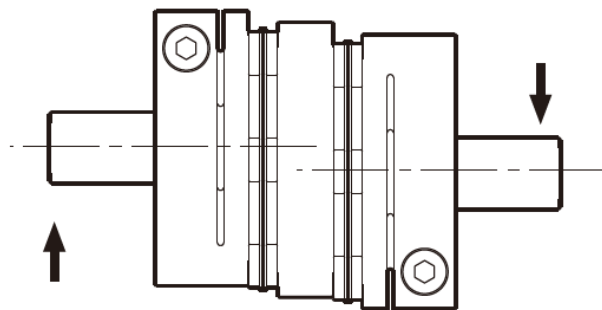
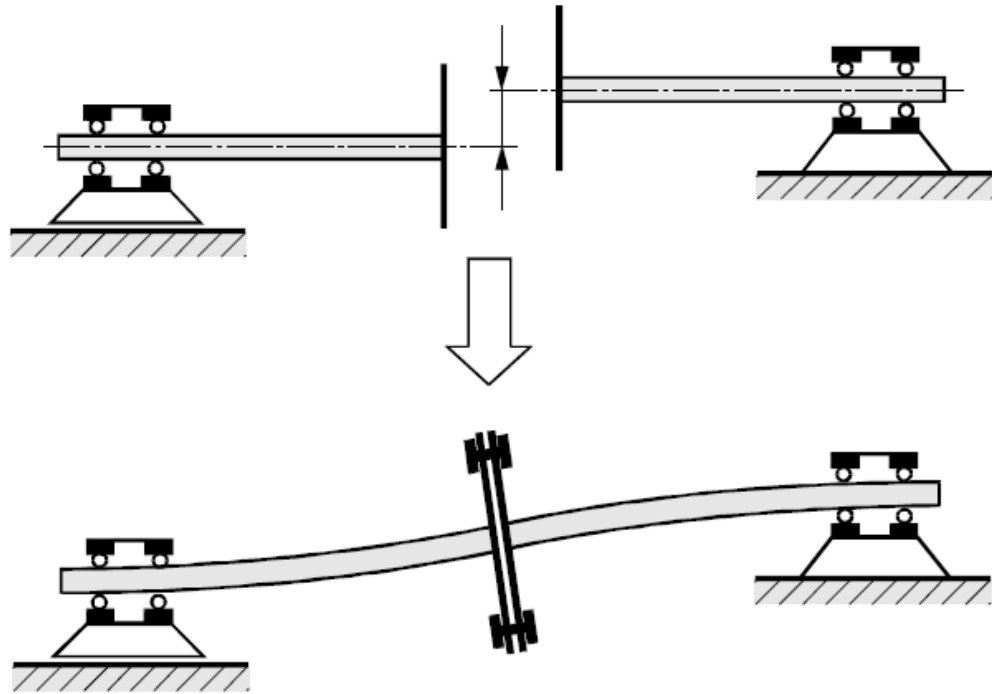


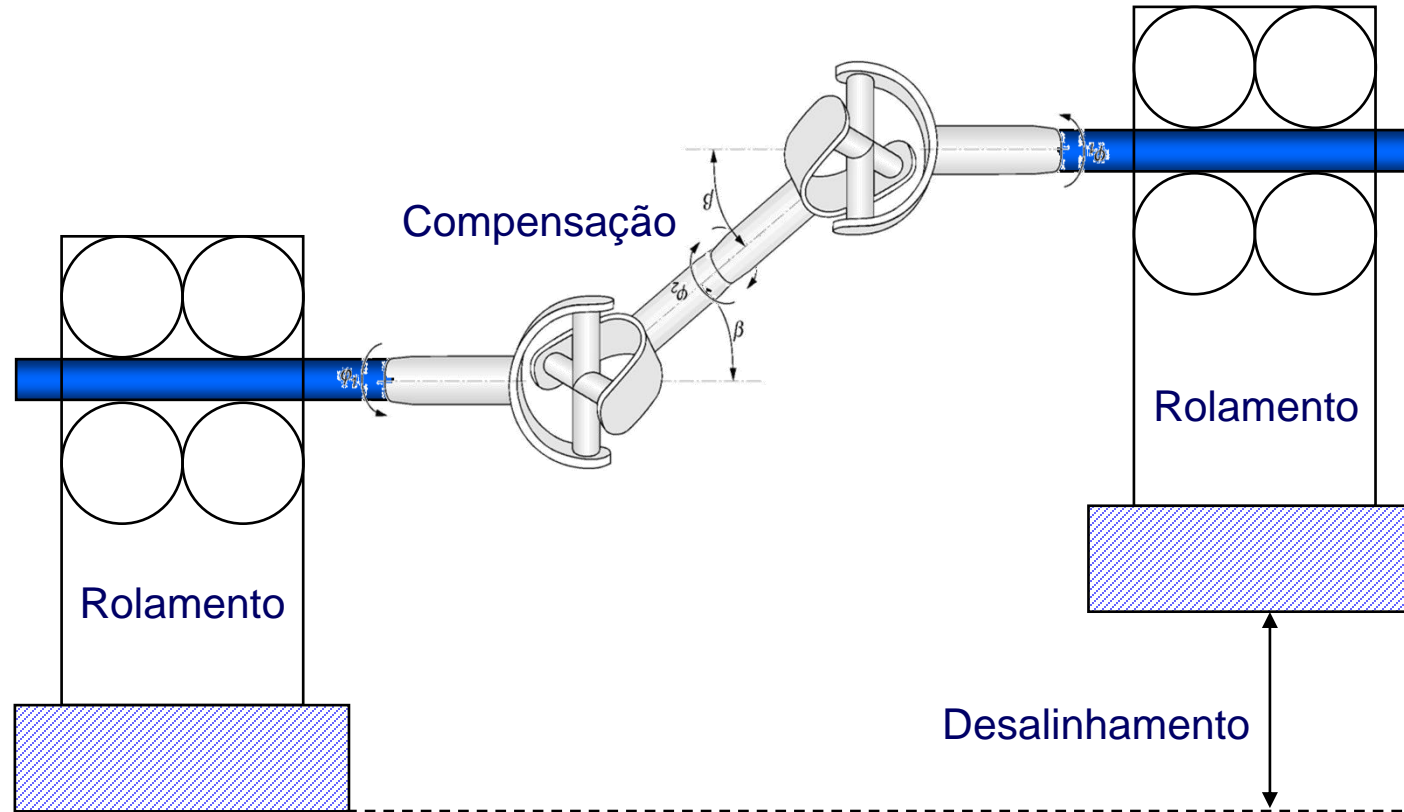
Cortesia Kaishin

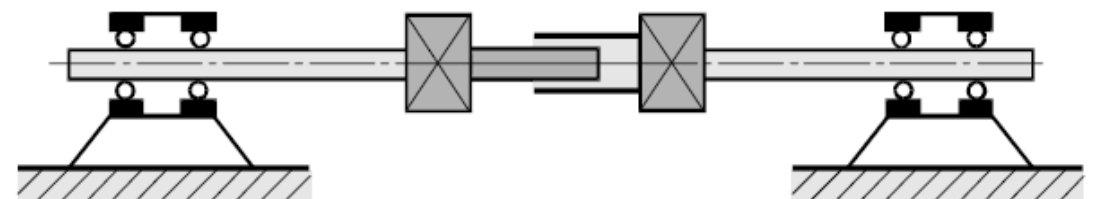
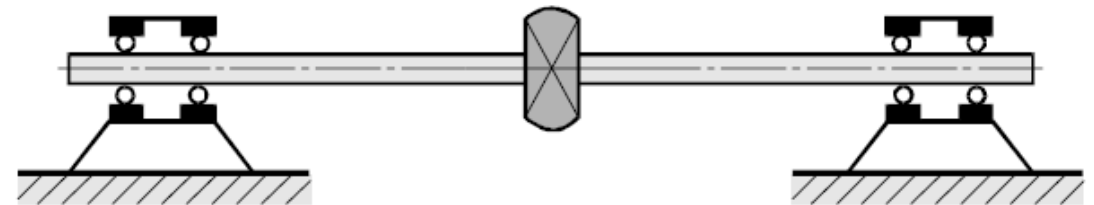
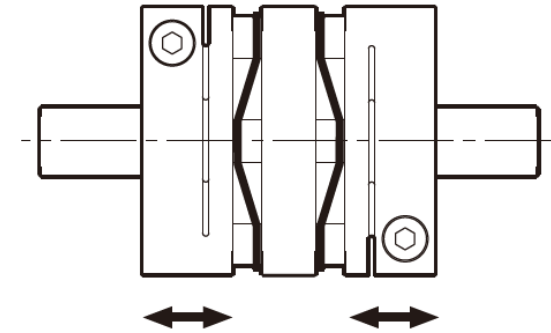
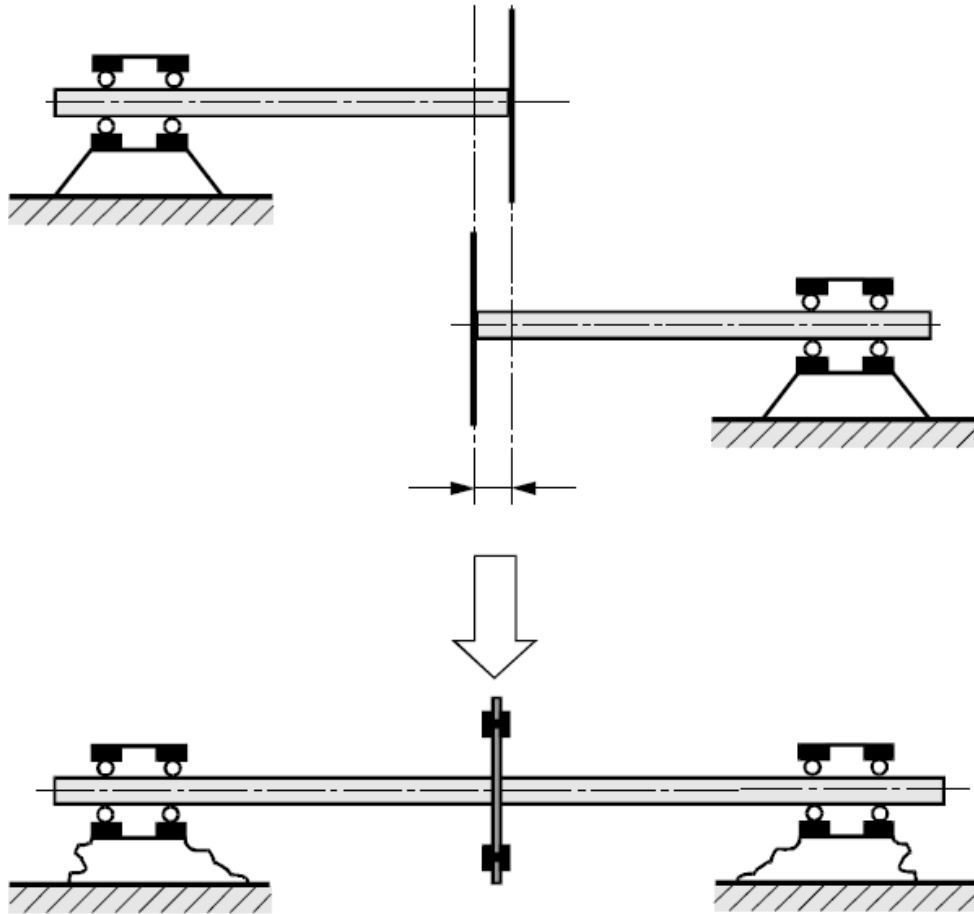


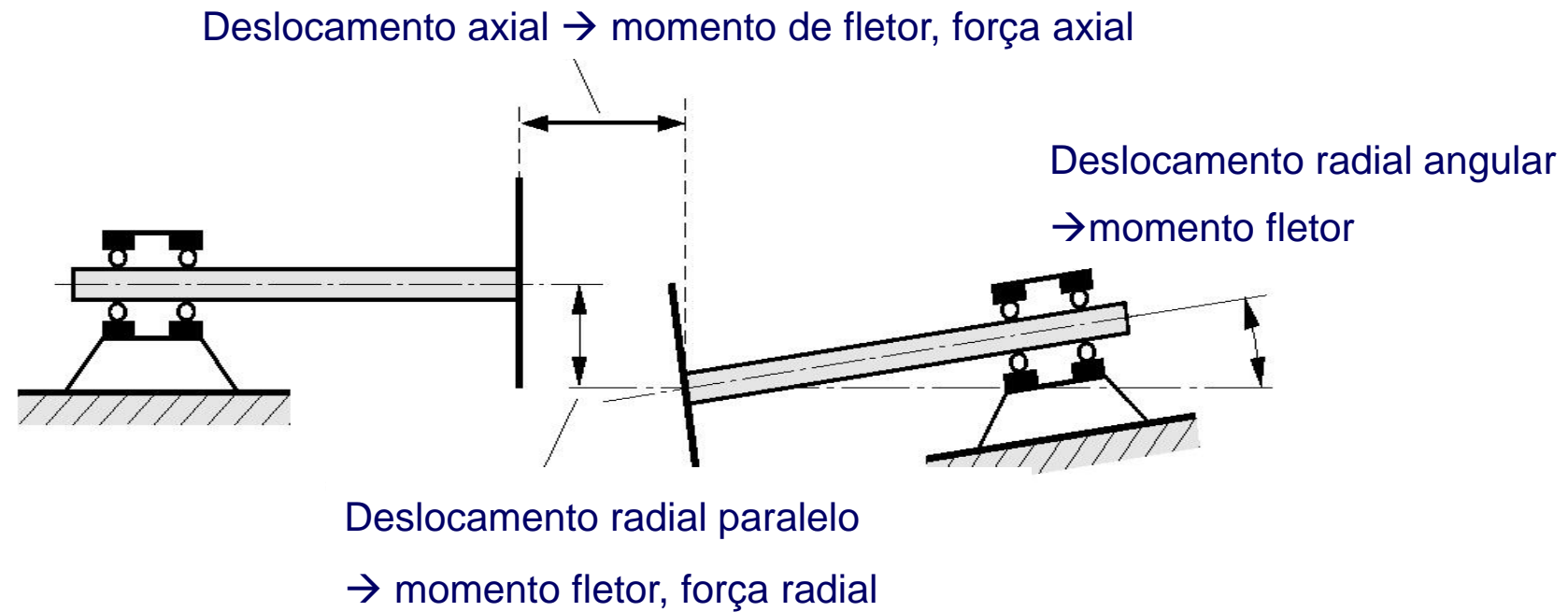


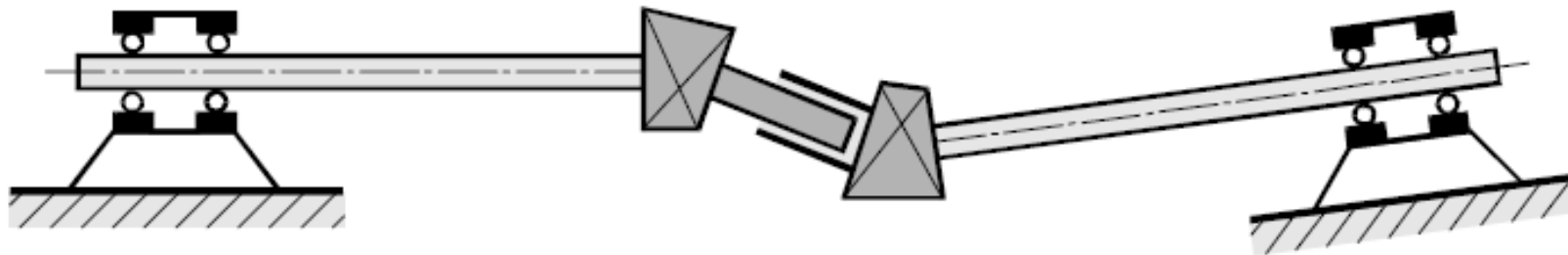
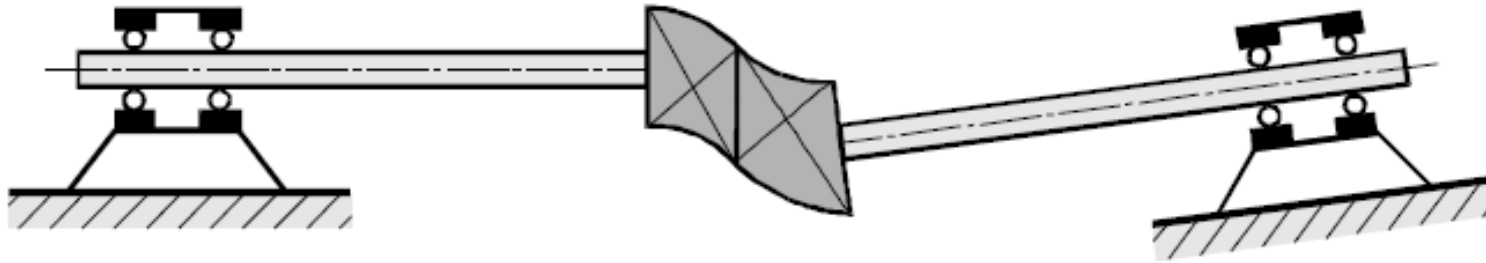
# Desalinhamento paralelo

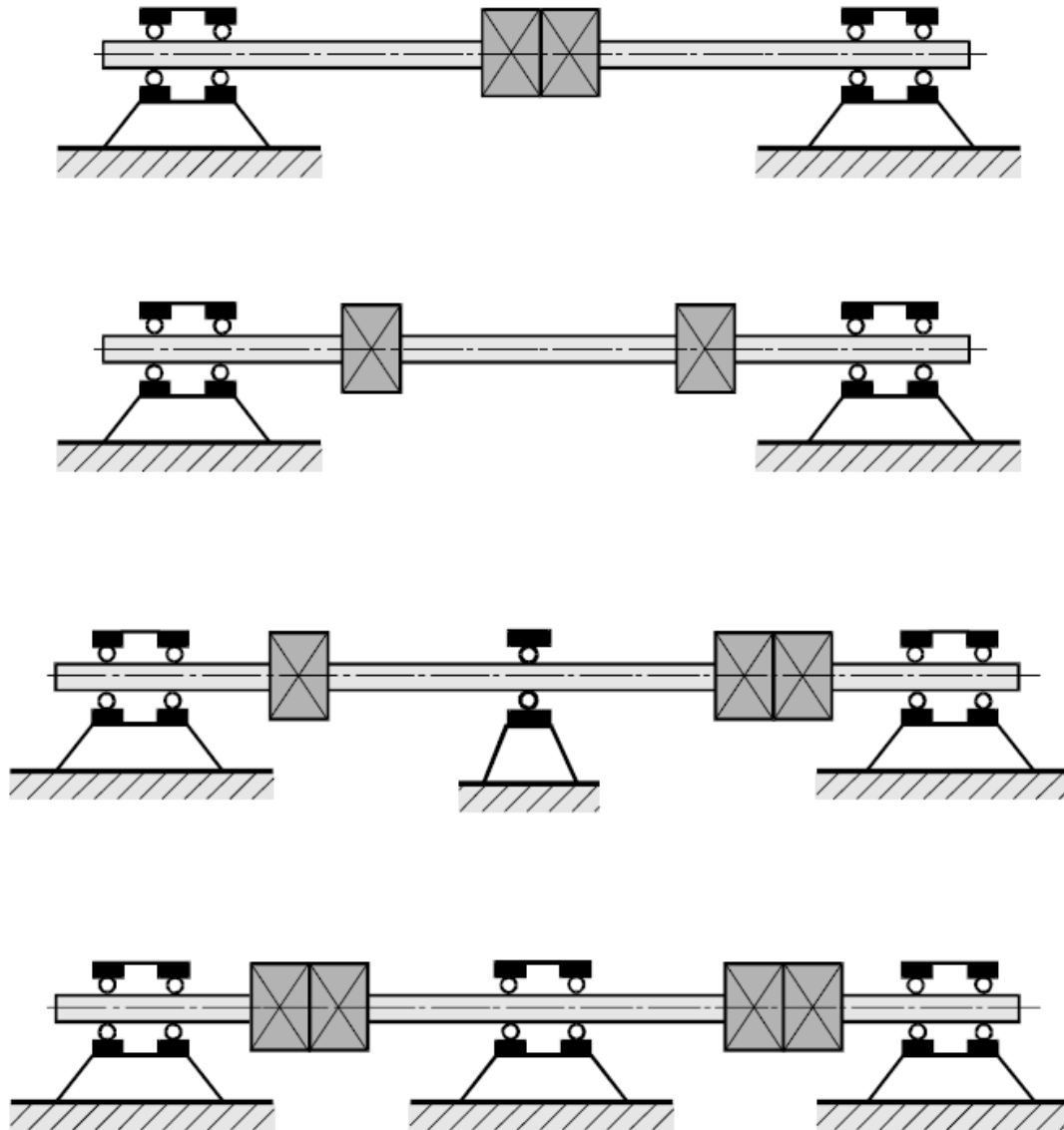


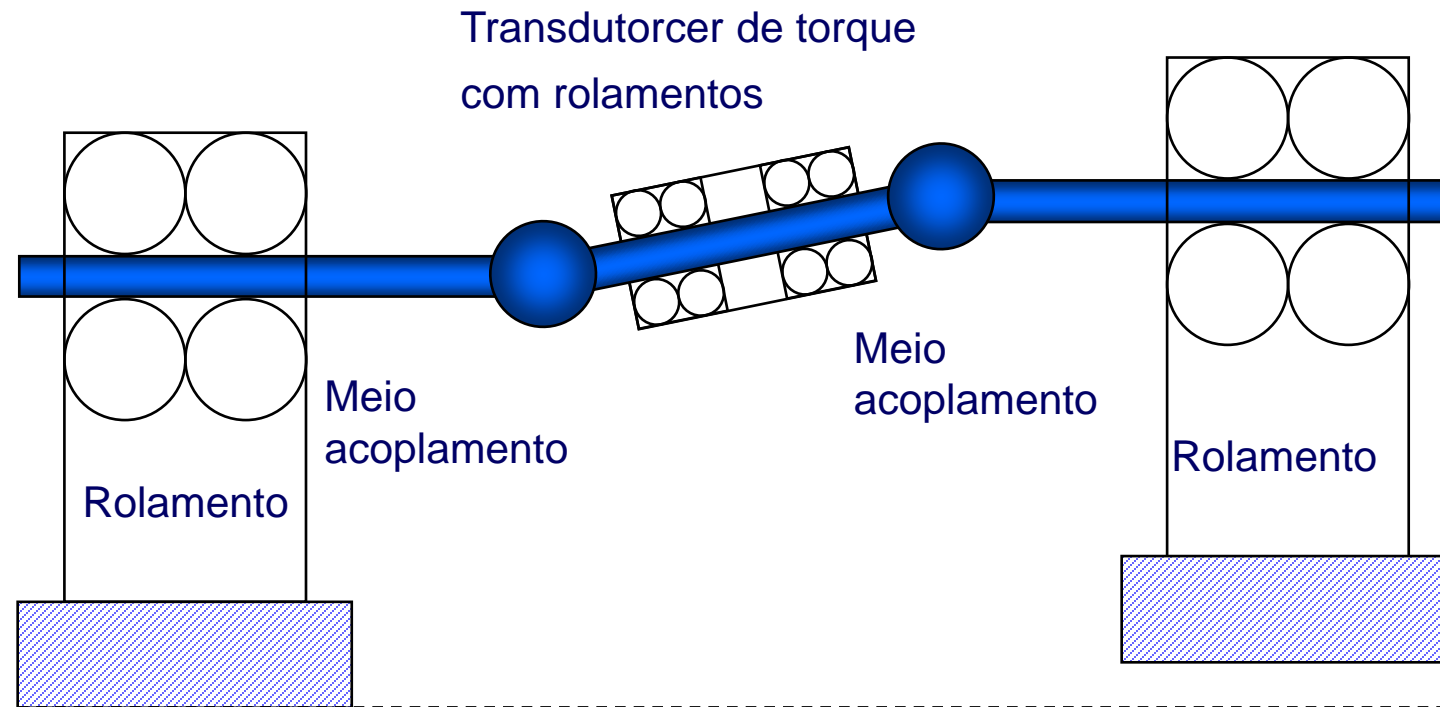
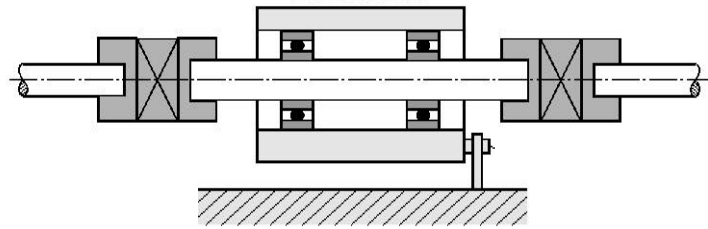


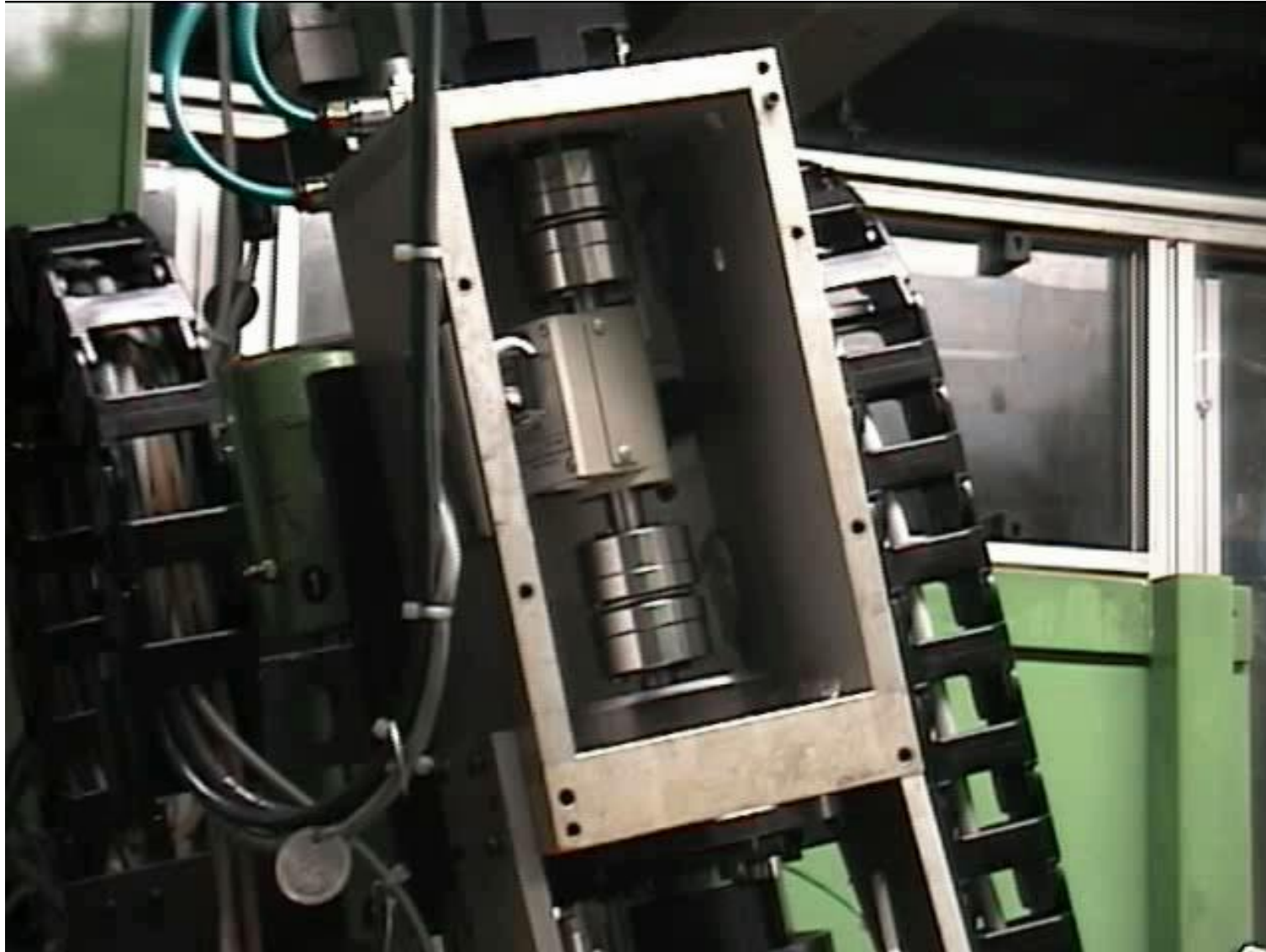




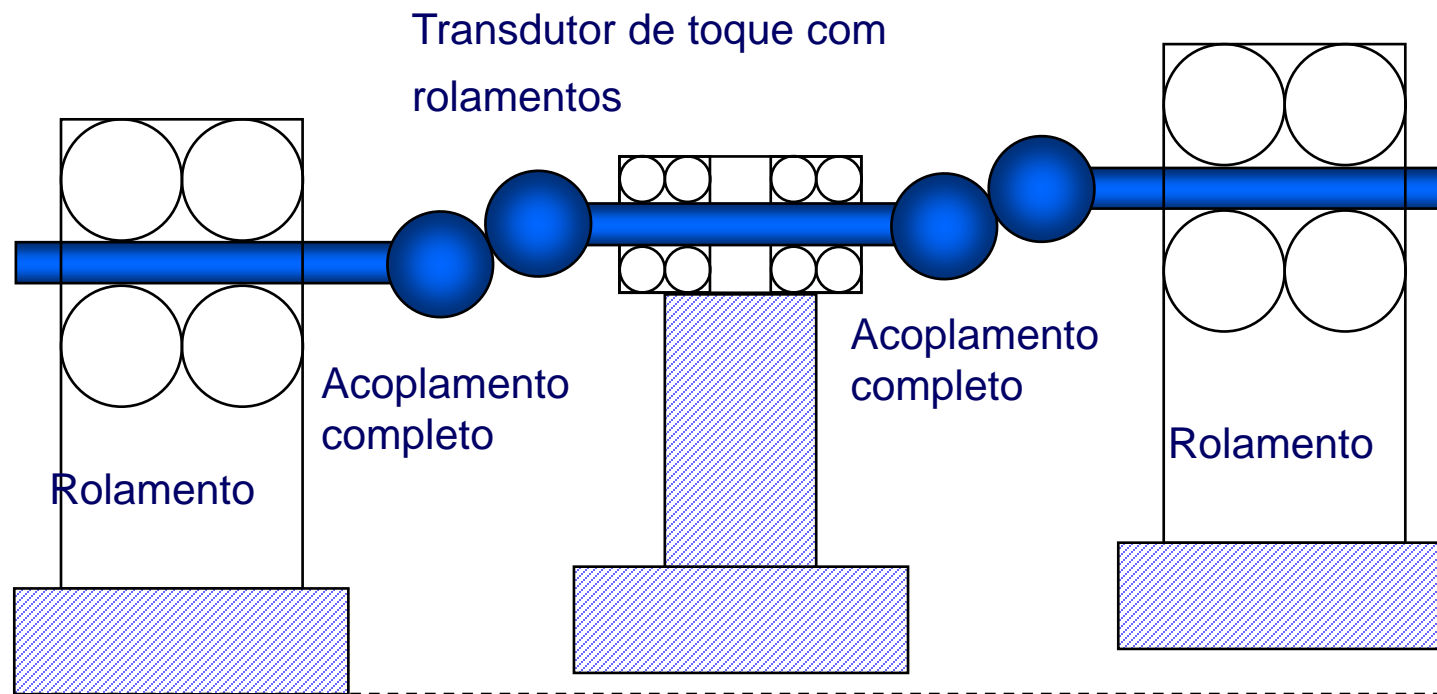
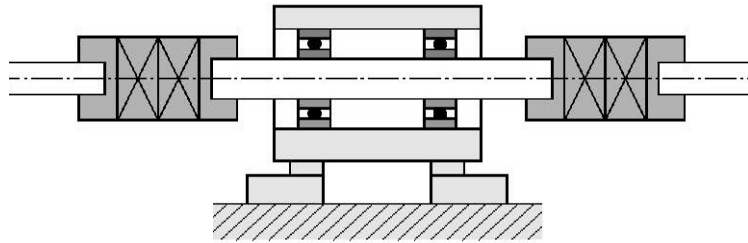


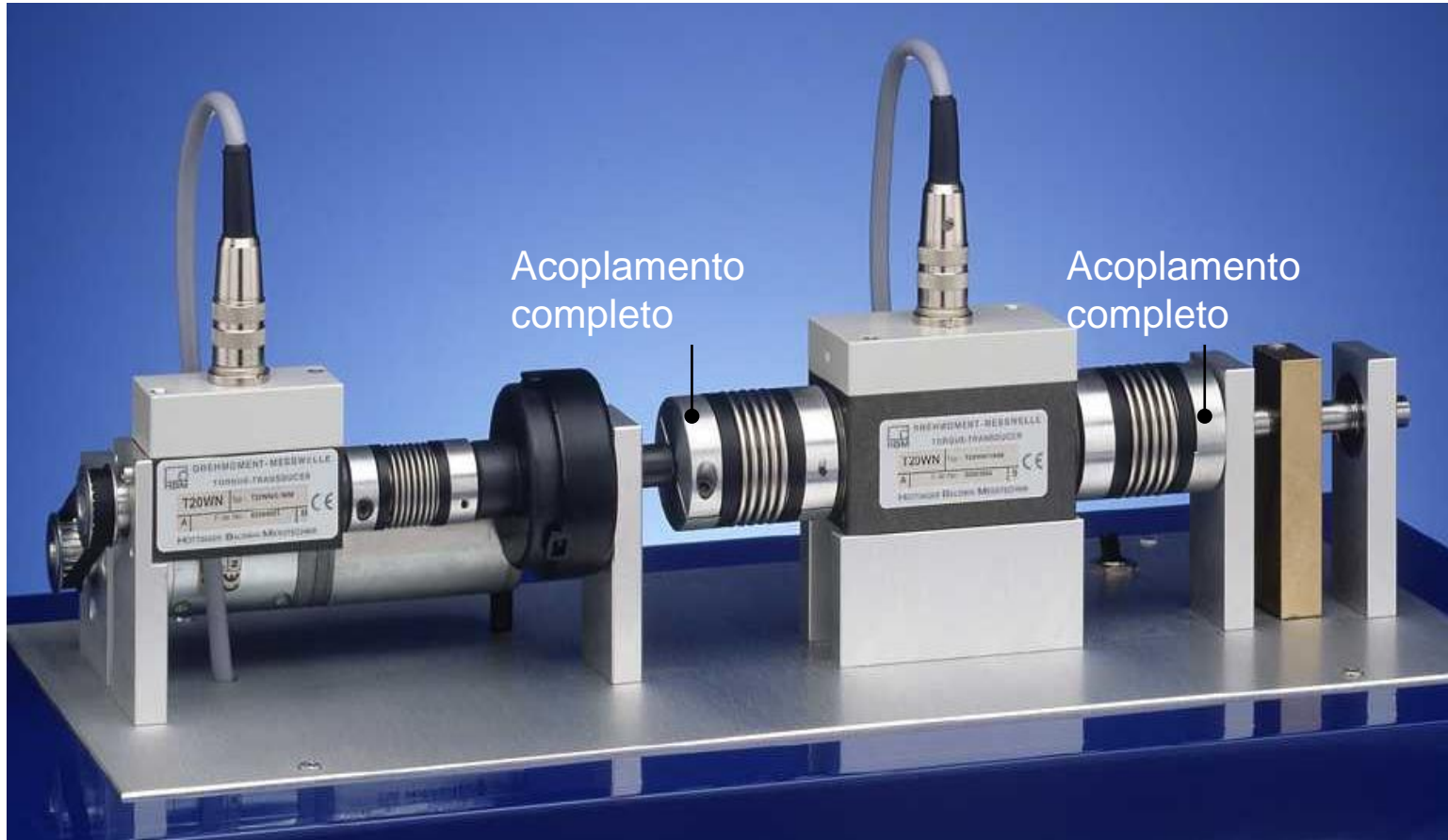




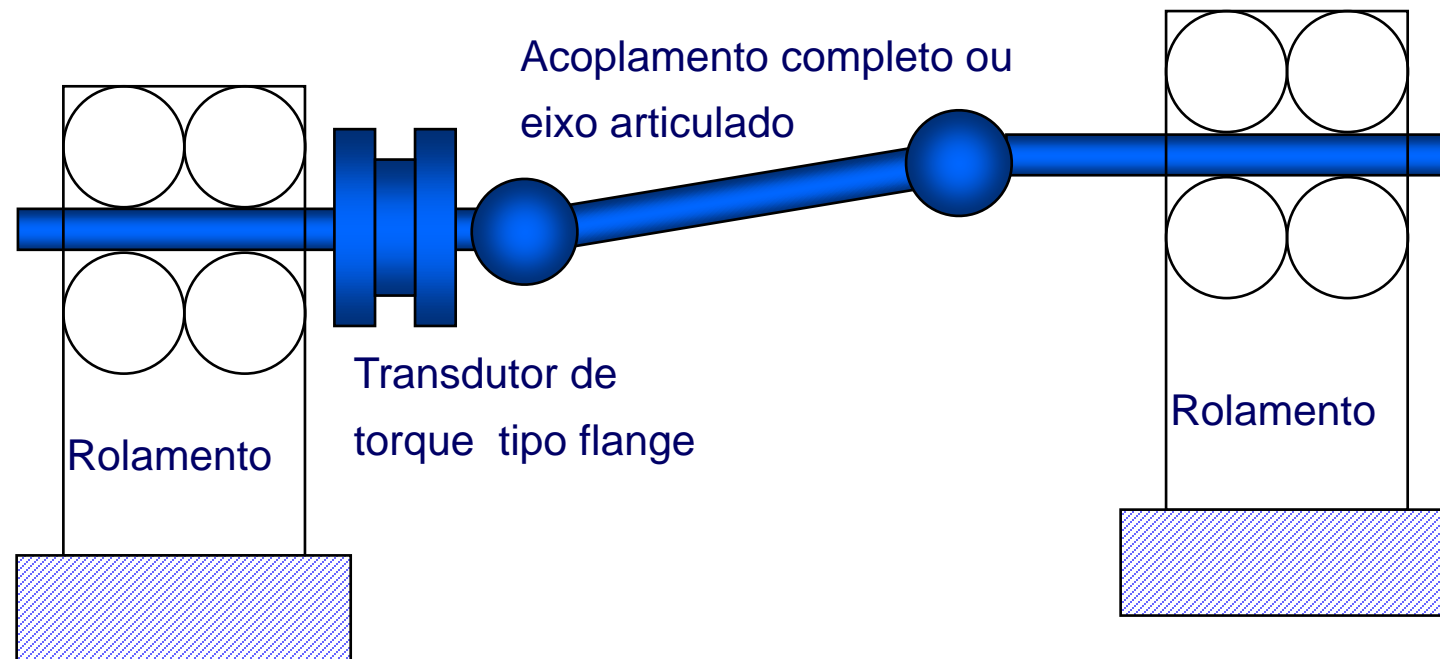
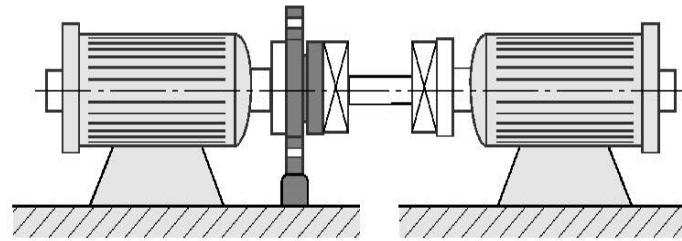


# Montagem – estator engastado

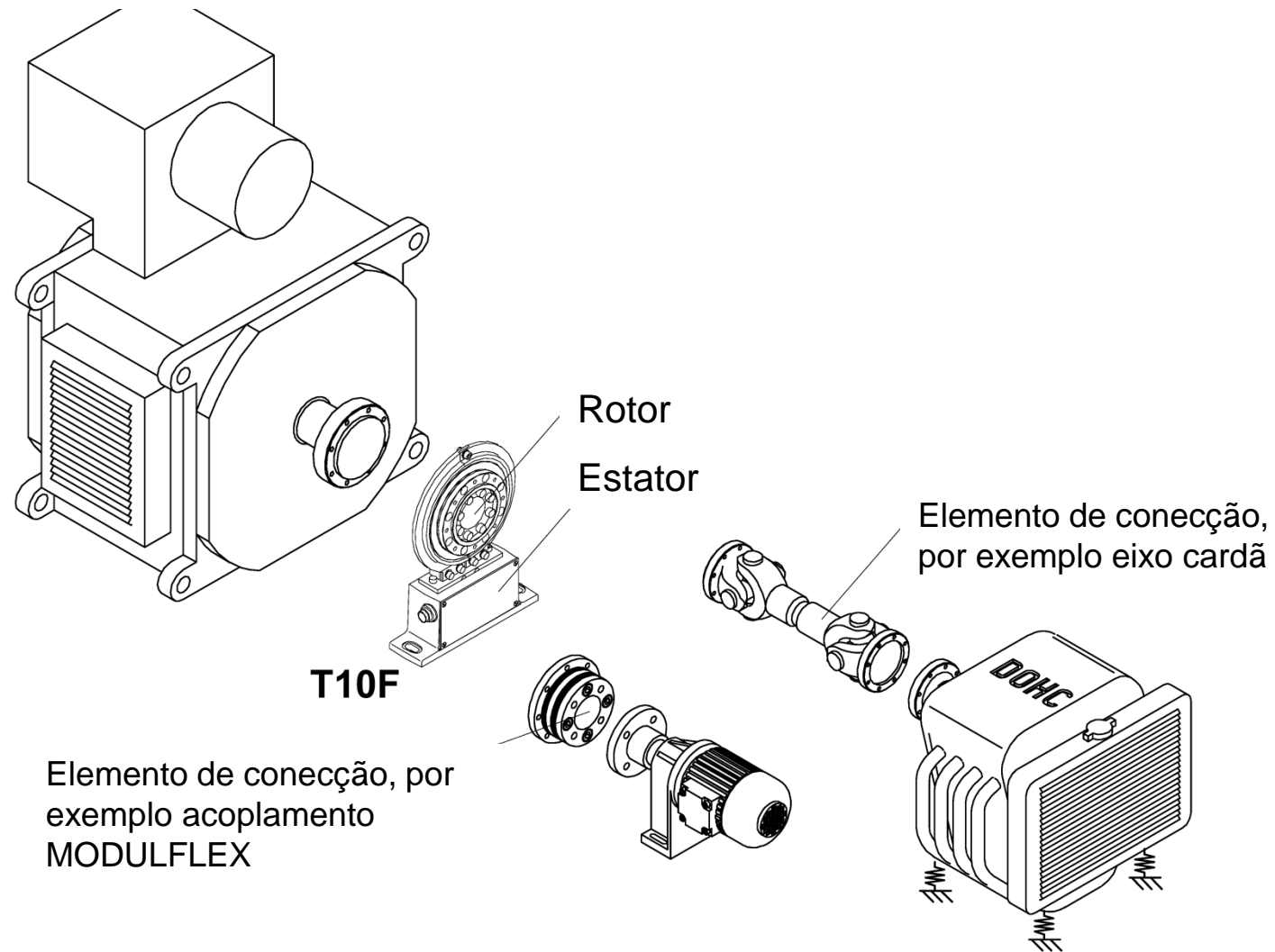




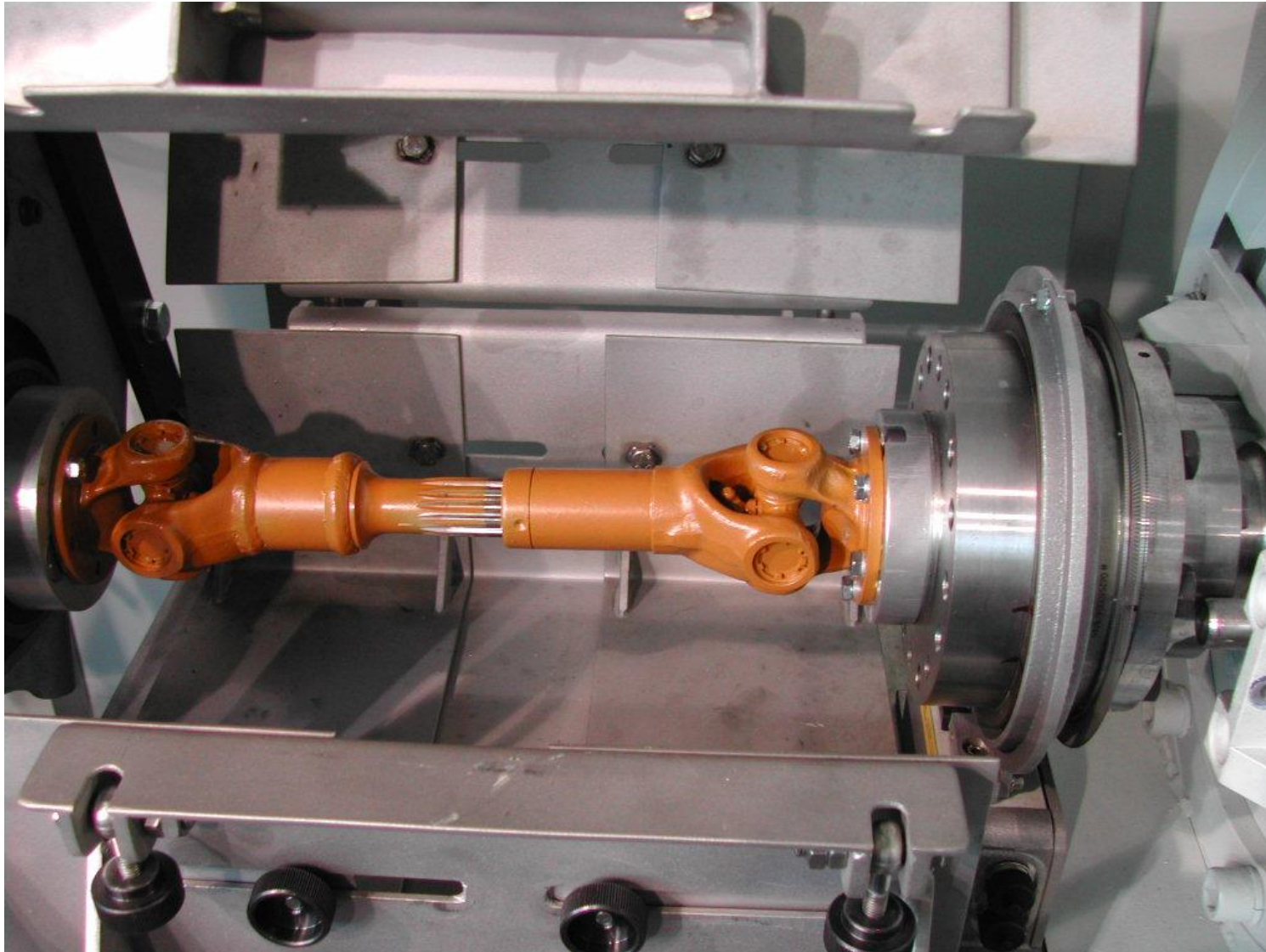
# Montagem – transdutor tipo flange e eixo cardan



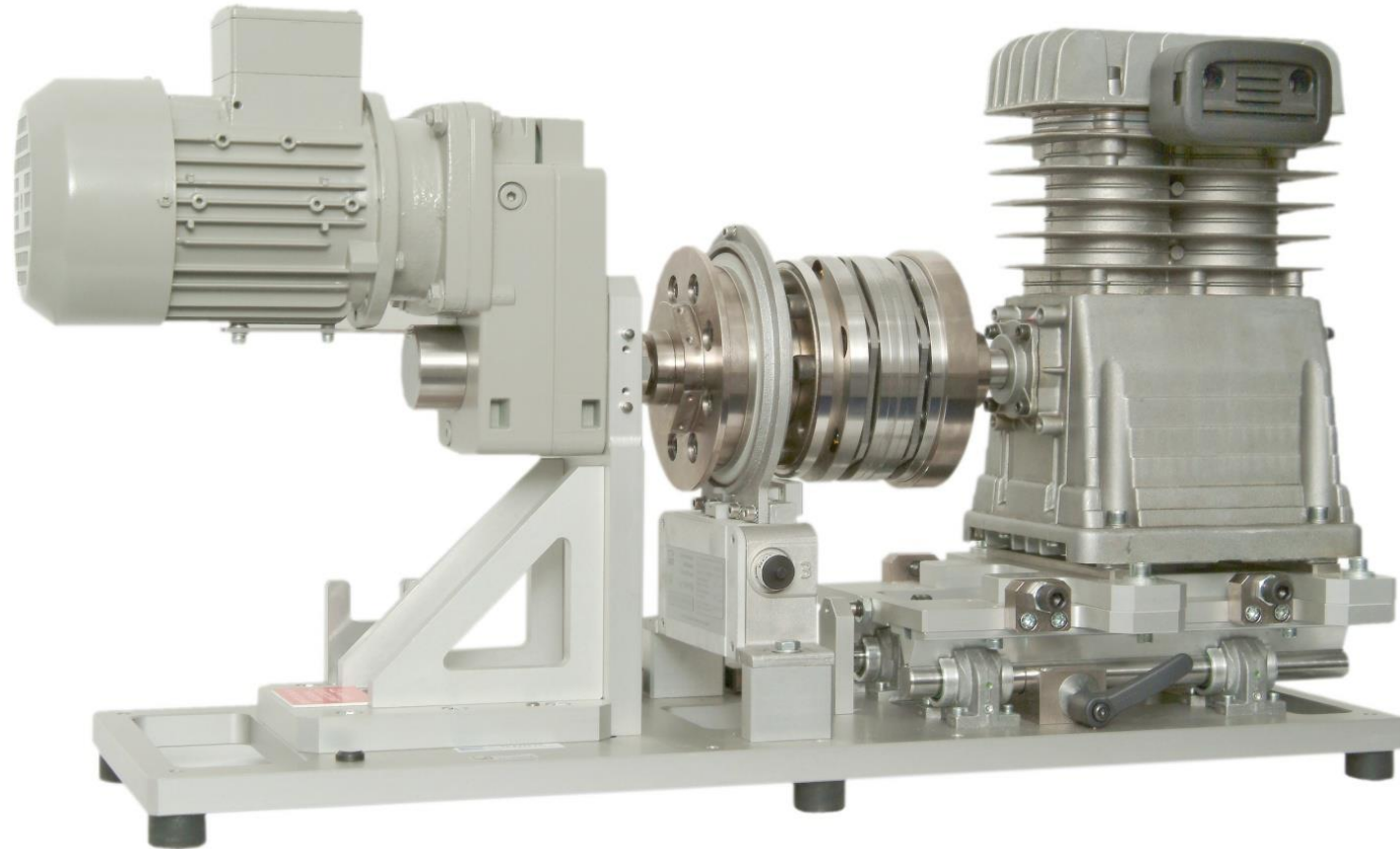
# Montagem – transdutor tipo flange

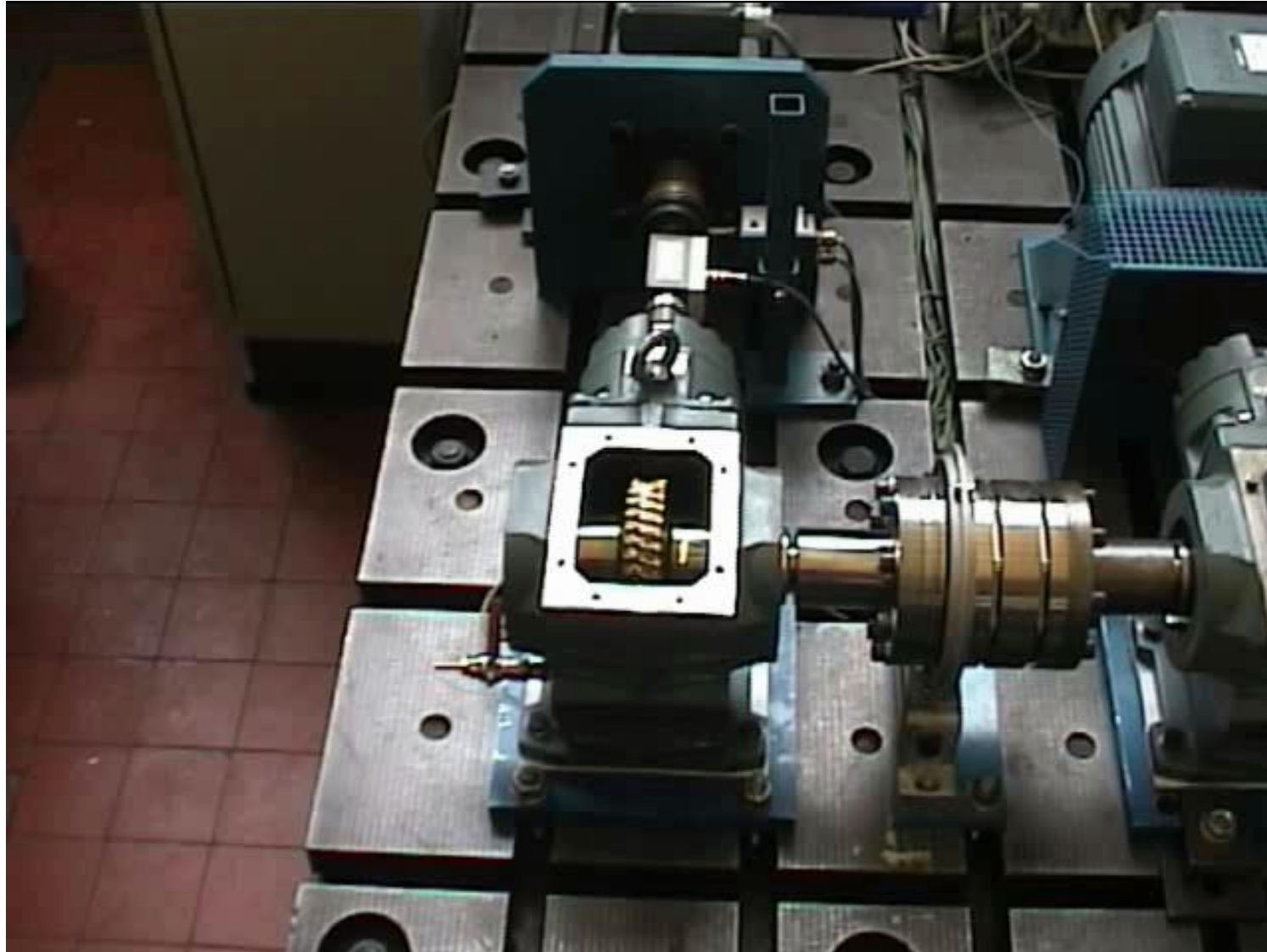


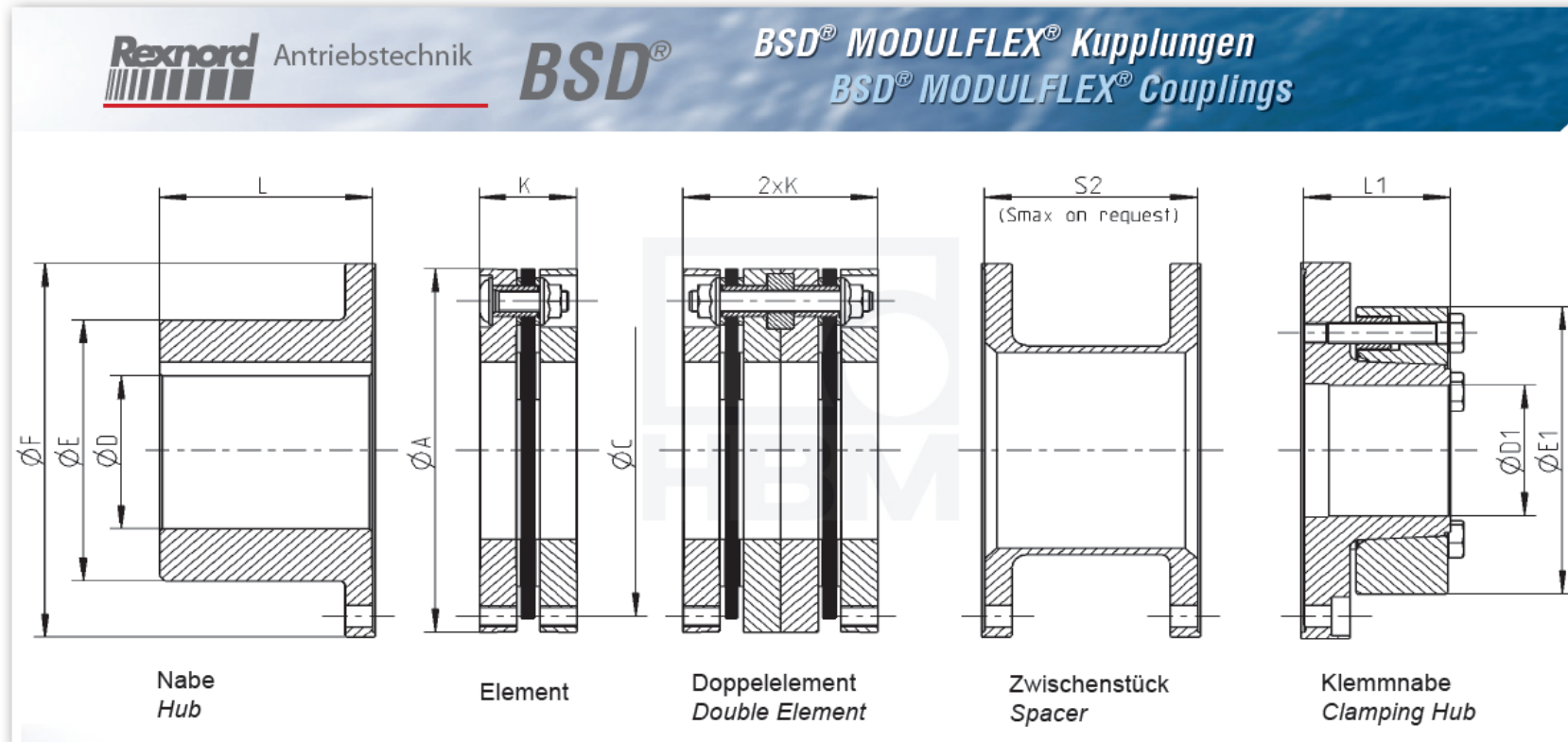
# Montagem – transdutor tipo flange com cardan



# Montagem – transdutor tipo flange com flexível

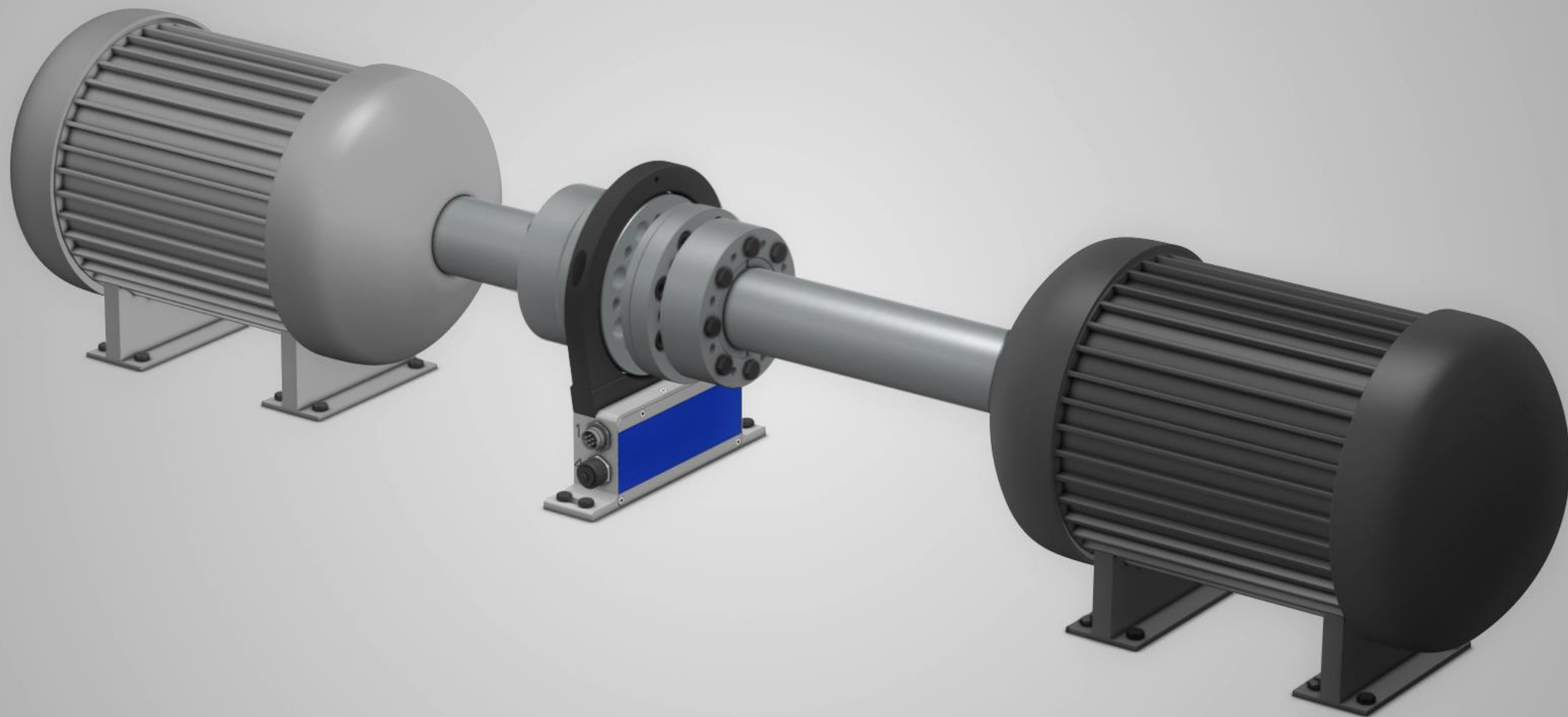




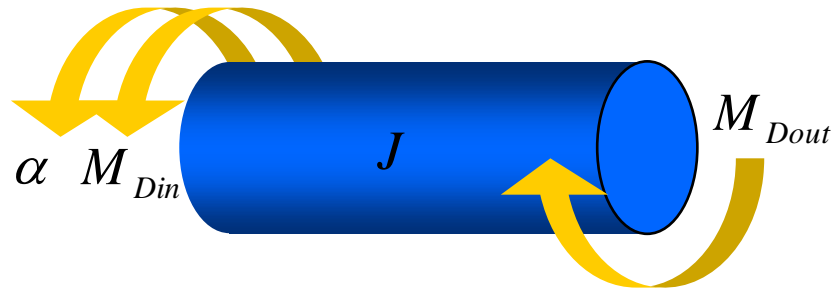




Cortesia Kaishin



# Torque dinâmico



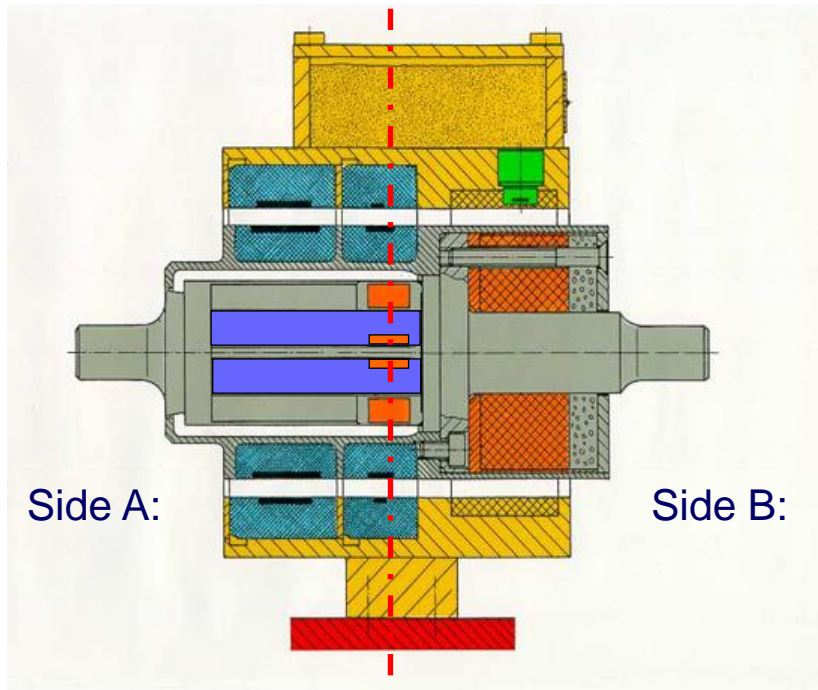
$\alpha = \text{aceleração angular}$

$$M_{Dyn} = M_{Din} - M_{Dout} = J \cdot \alpha \quad \text{momento teorico}$$

$$\alpha = \dot{\Omega} \approx \frac{\Delta\Omega}{\Delta t} = \frac{\Delta n}{\Delta t} \cdot \frac{2\pi}{60} \quad \Omega = \text{velocidade angular}$$

$$M_{Dyn} \approx J \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t} \cdot \frac{2\pi}{60}$$

$$M_D \approx J \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t} \cdot \frac{2\pi}{60}$$



Exemplo: T34/2Nm

Side A:  $J = 3.1 \text{ kgmm}^2$

Side B:  $J = 74.9 \text{ kgmm}^2$

$n = 4000 \text{ min}^{-1}$

$\Delta t = 14 \text{ ms}$

**A ← B**

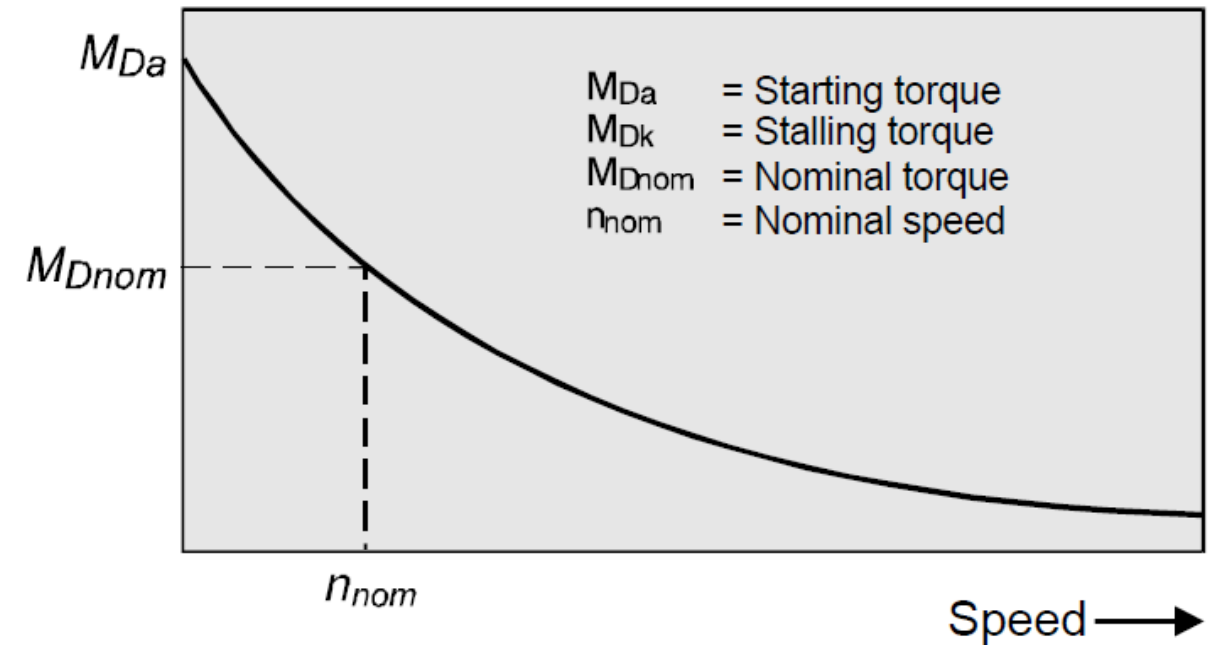
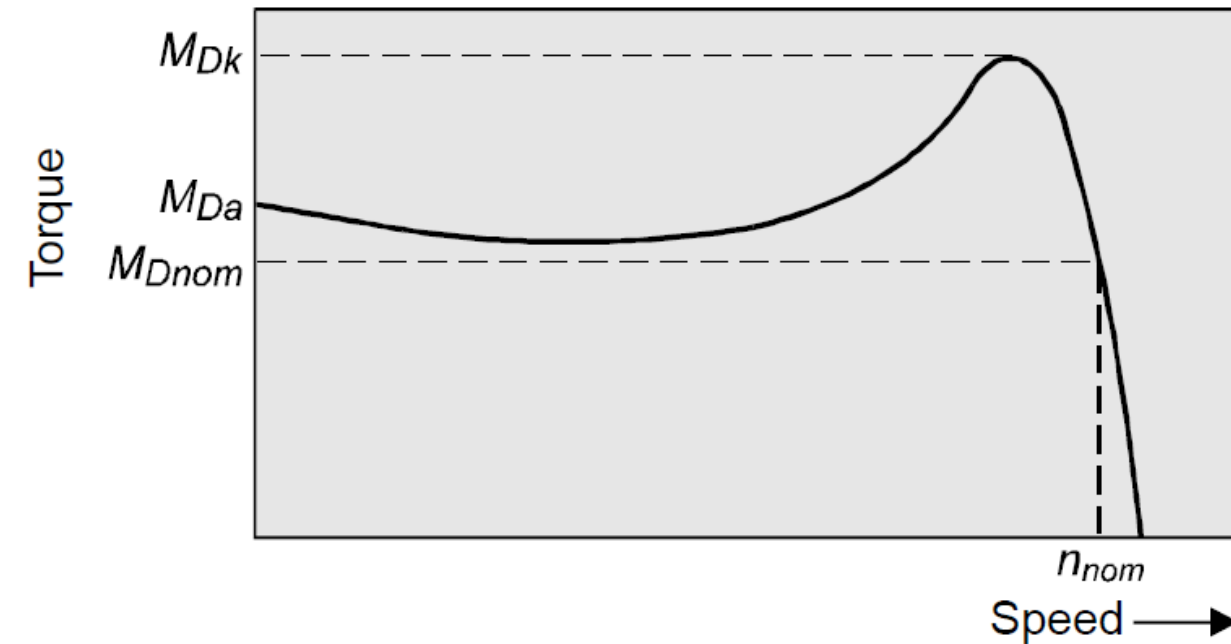
$$M_{\text{dyn}} = 3.1 \text{ kgmm}^2 \cdot 2\pi \cdot \frac{4000}{14 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \text{ s}^2}$$

$$M_{\text{dyn}} = 0.09 \text{ Nm}$$

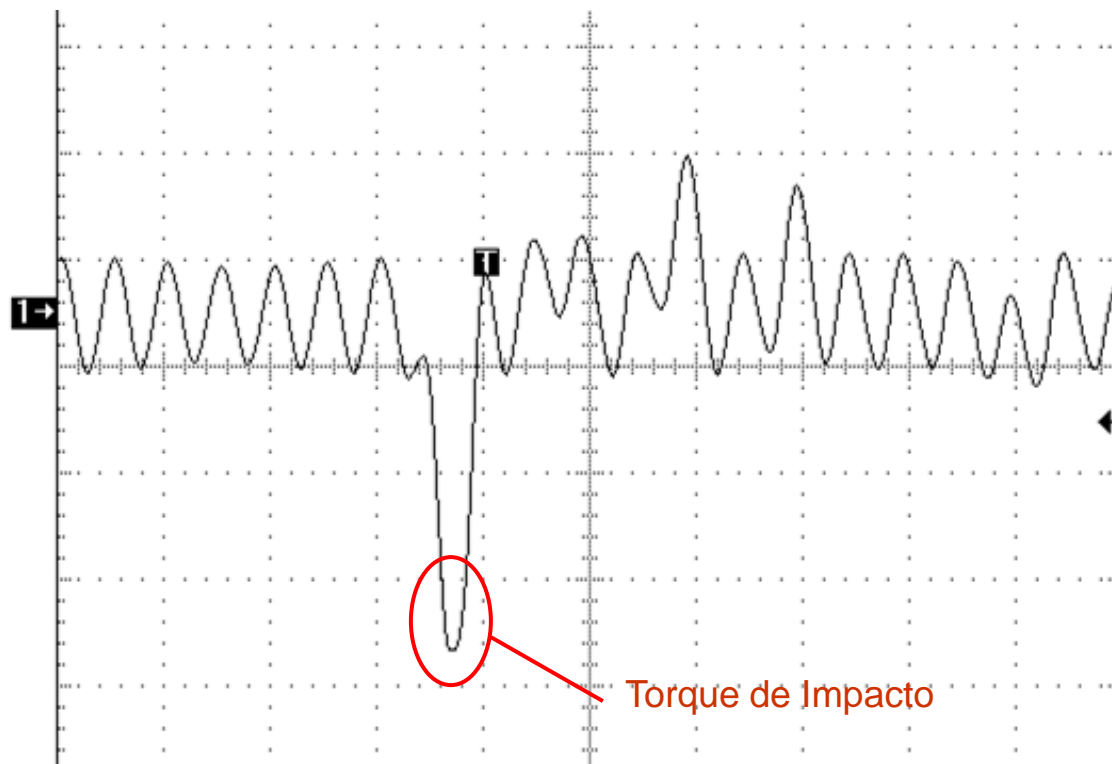
**A → B**

$$M_{\text{dyn}} = 74.9 \text{ kgmm}^2 \cdot 2\pi \cdot \frac{4000}{14 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \text{ s}^2}$$

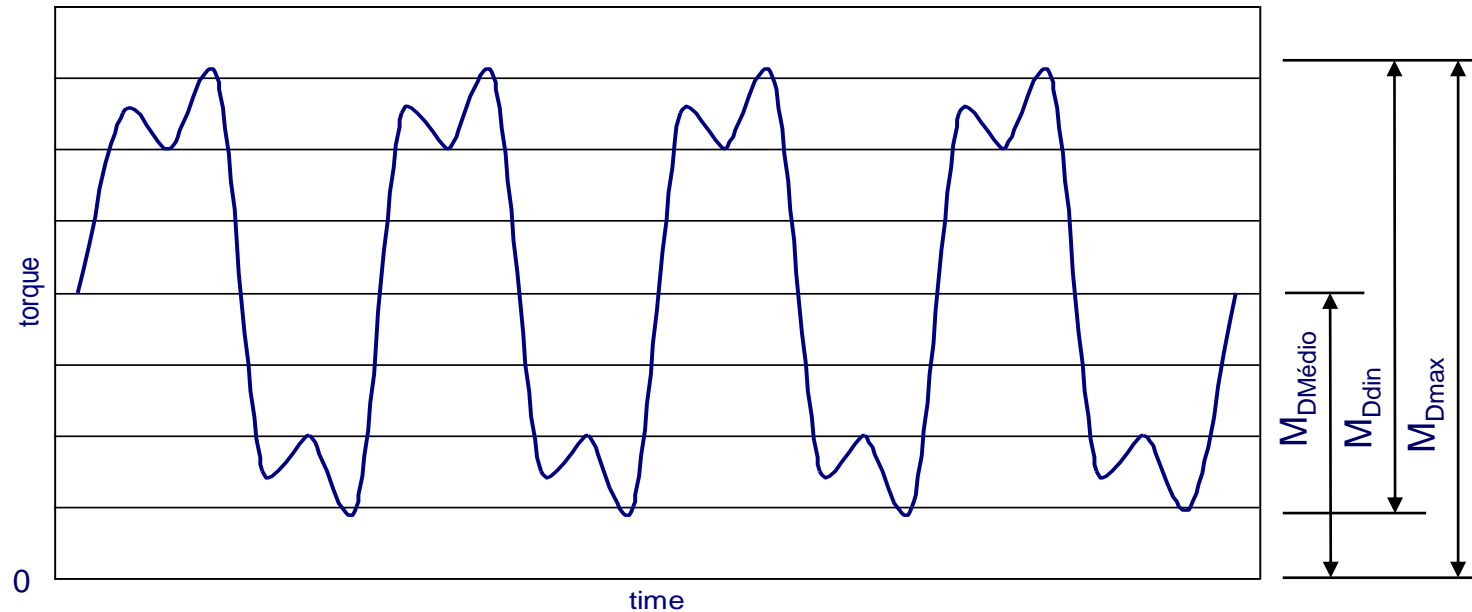
$$M_{\text{dyn}} = 2.24 \text{ Nm}$$



**Observação: o torque de partida de motores elétricos é maior do que o torque nominal !!**

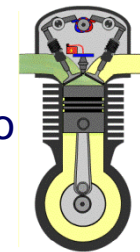


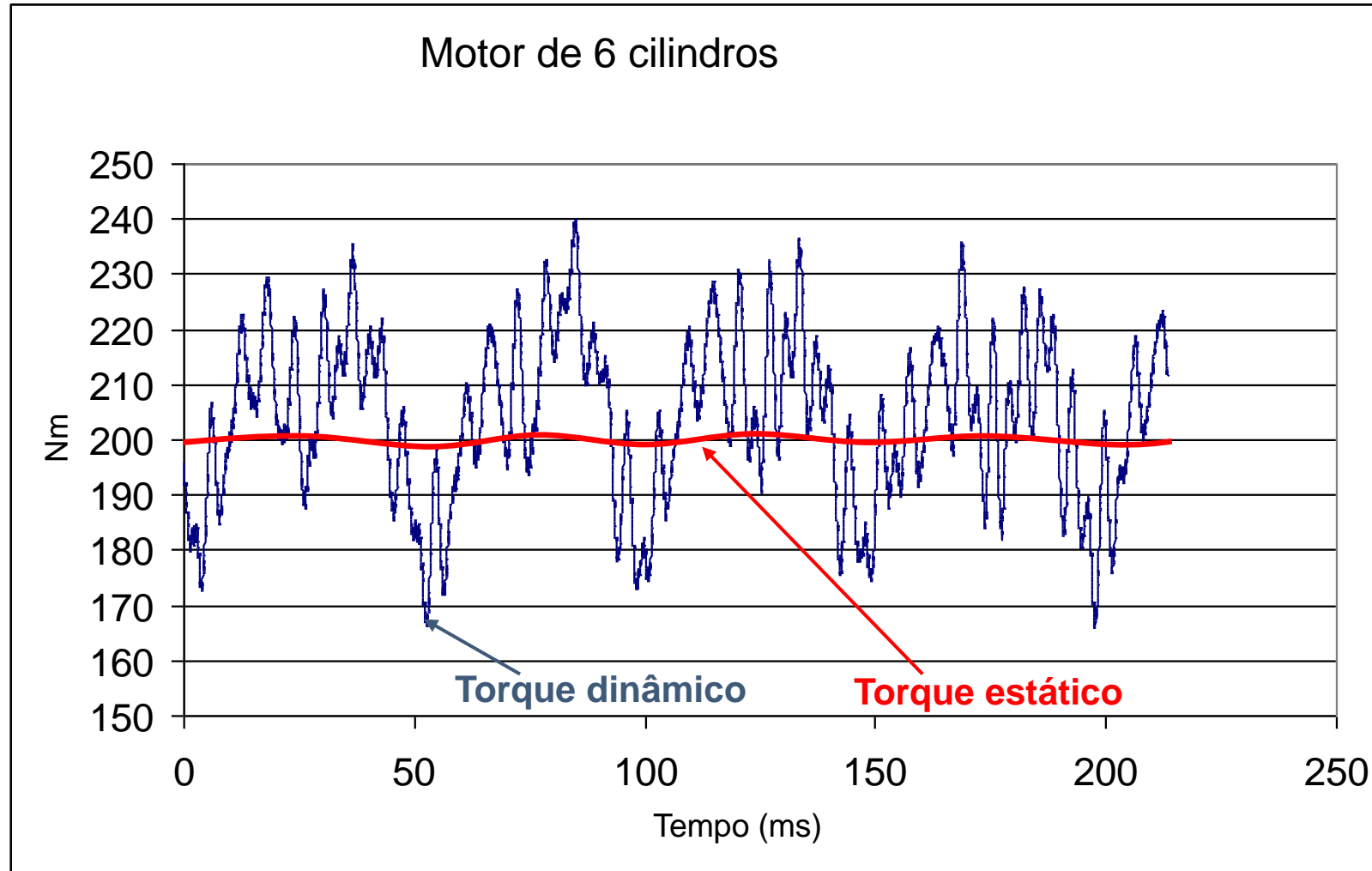
Motor elétrico à velocidade nominal, chaveado para gerador

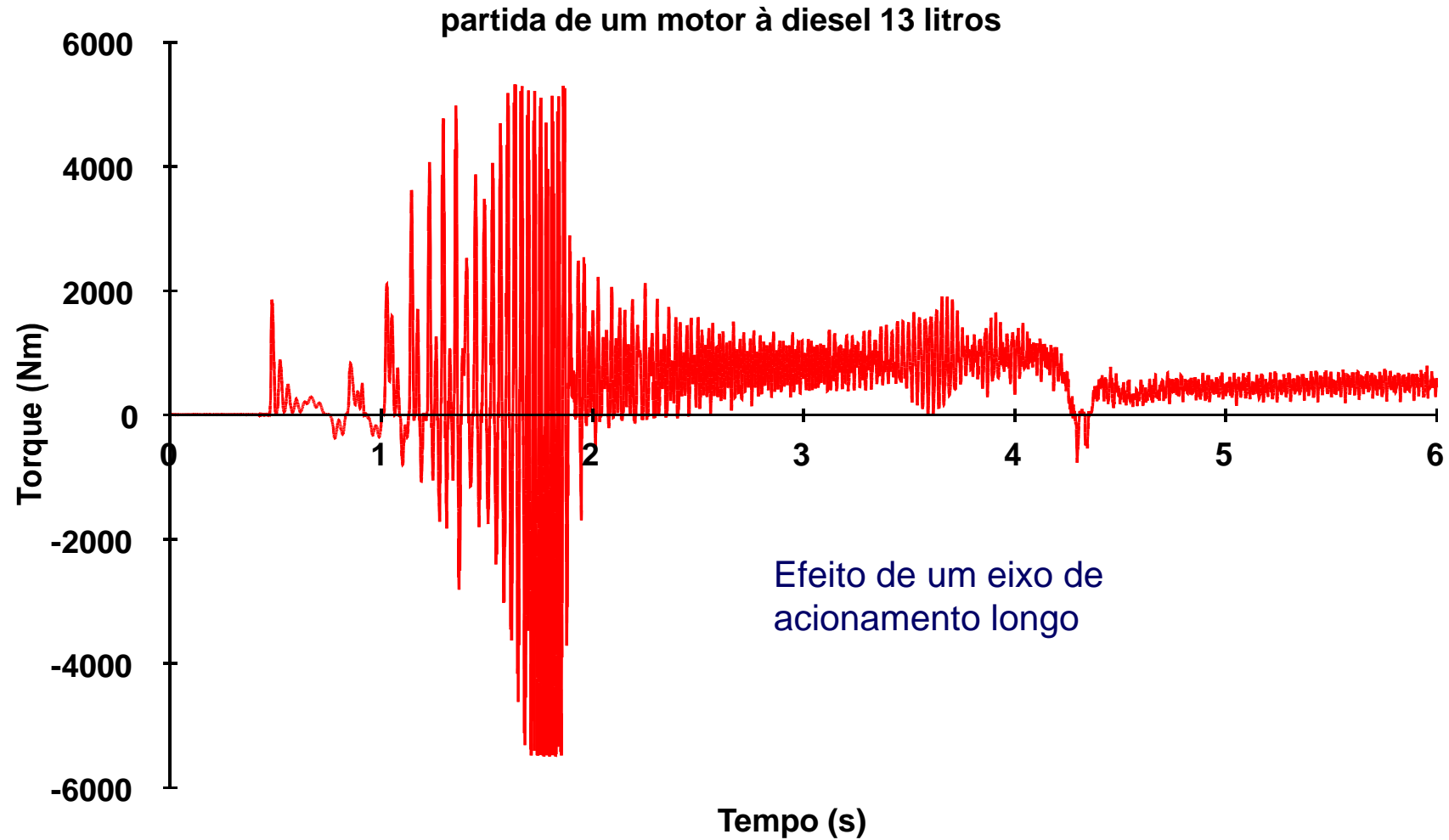


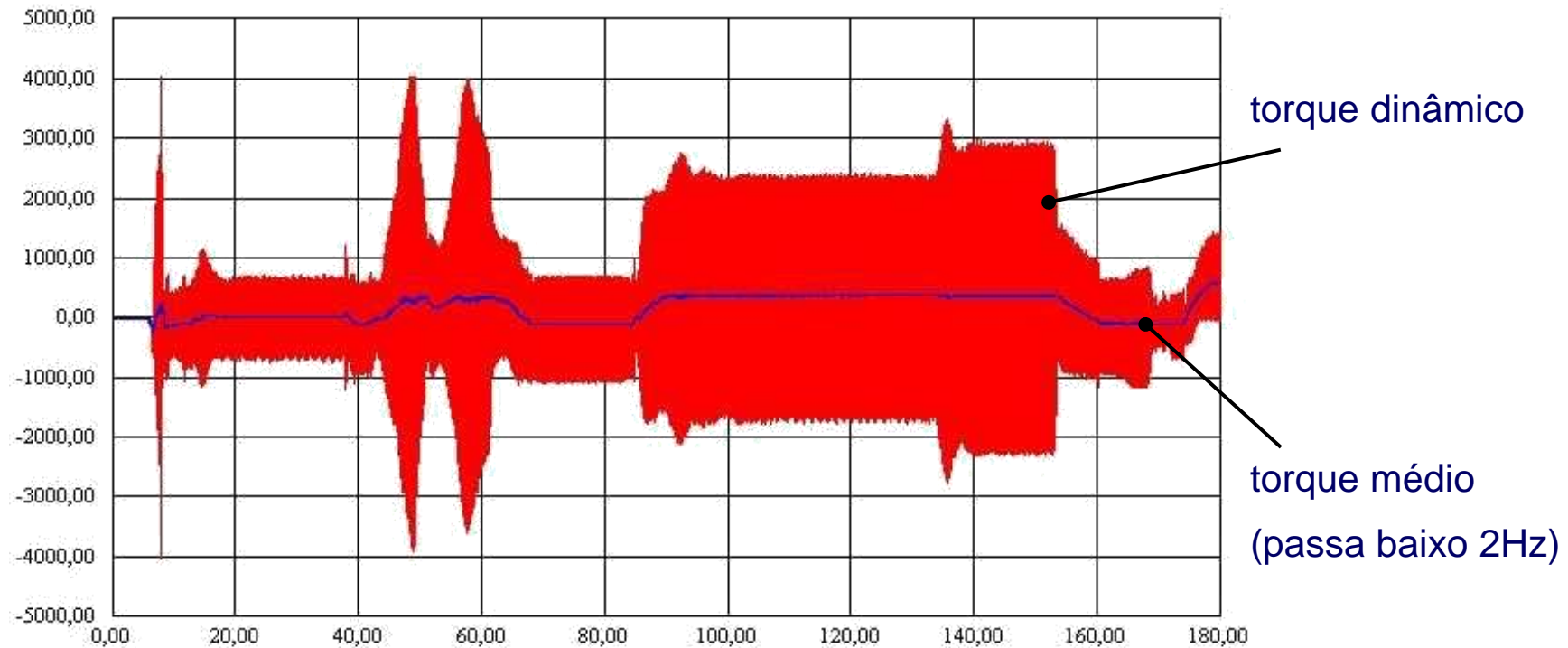
$M_{Dmax}$  = superposição do torque médio e a componente do torque dinâmico, causado por exemplo:

- Forças das pressões dos gases e oscilação de massa em motores de combustão
- Forças dos dentes das transmissões





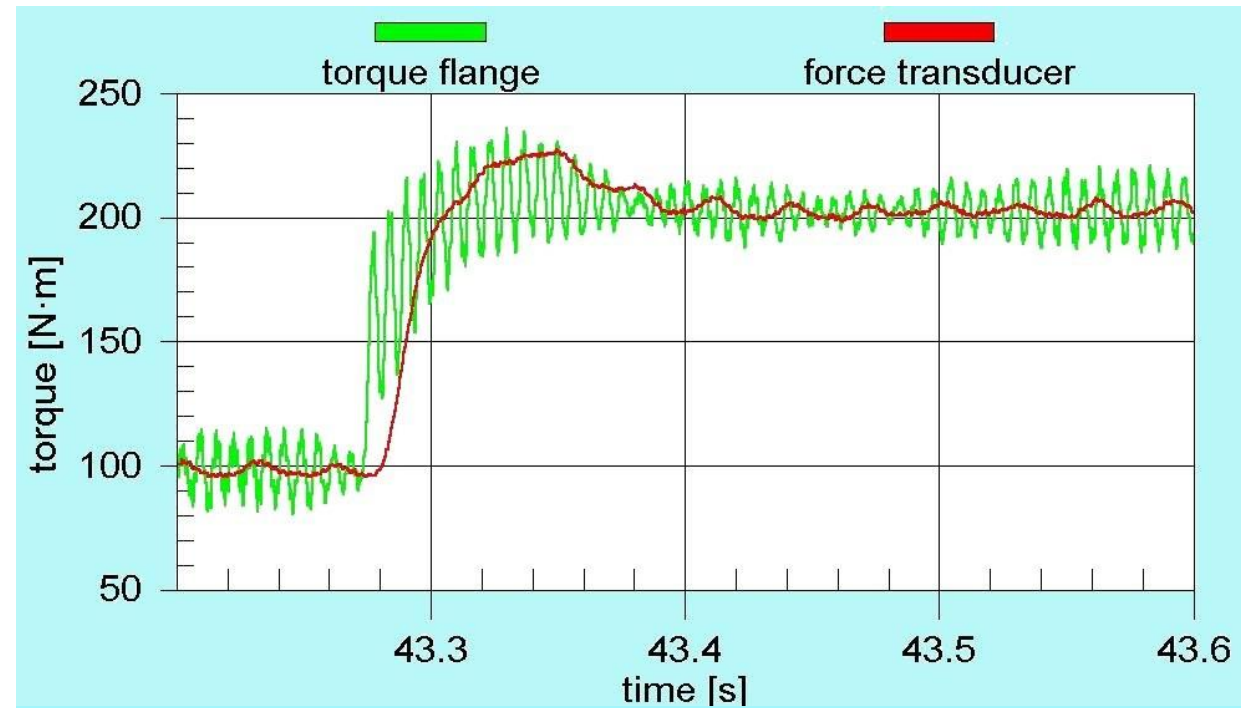
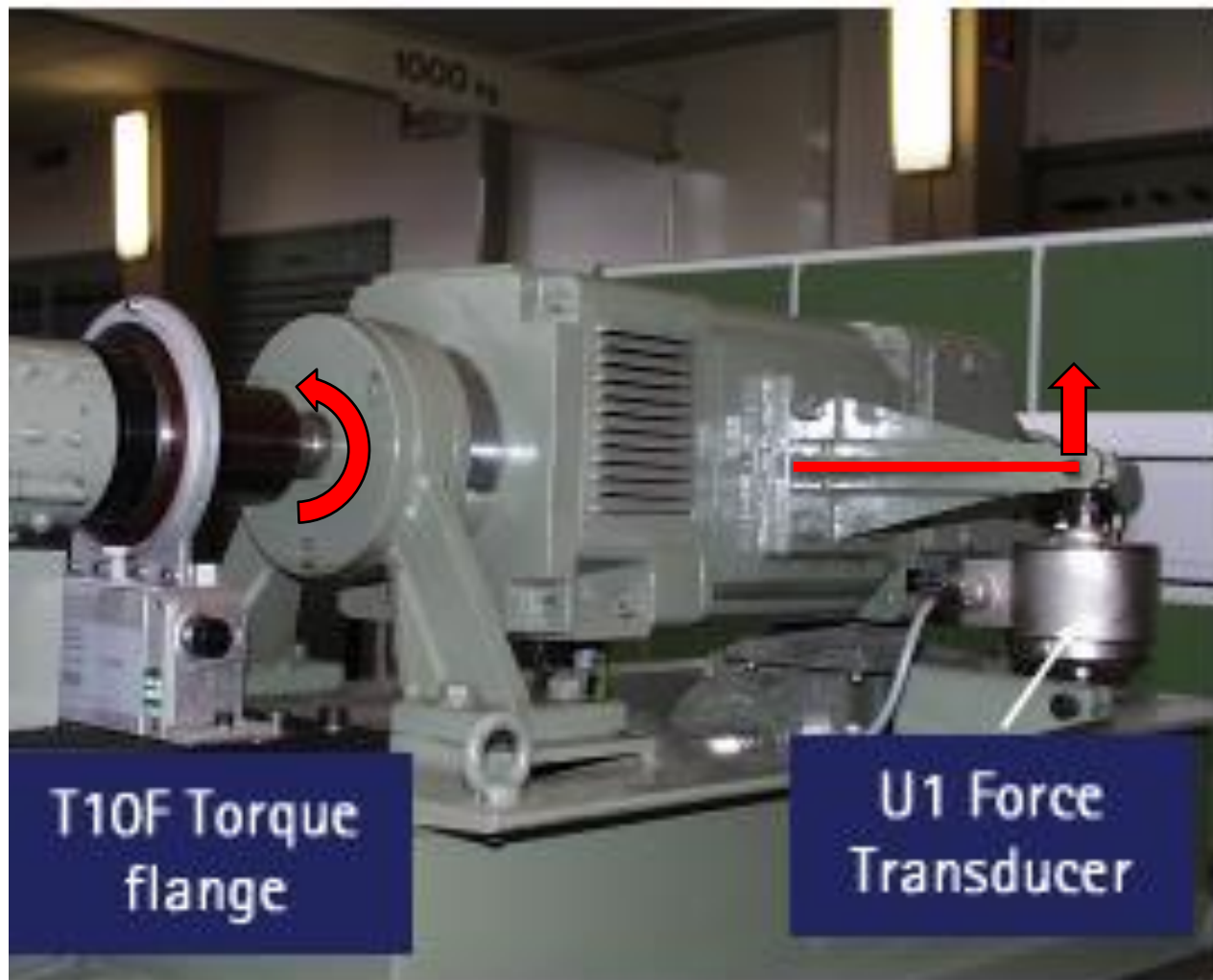




motor à diesel 5.3 l , max. rotação 1200 min<sup>-1</sup>

$$k = \frac{M_{Dmax}}{M_{Dav}} \quad \text{Fator de choque (motores de combustão: 2 ... 10)}$$

# Medição direta x Medição indireta



- Reação da força no braço da alavanca
- Medição de torque no eixo

- ▶ A frequência de oscilação do torque no cilindro  $k$  de um motor de 4 tempos é:

$$f_{eng} = 60 \cdot \frac{s}{min} \cdot \frac{k}{2} \cdot n$$

- ▶ A frequência de oscilação do torque no cilindro  $k$  de um motor de 2 tempos é:

$$f_{eng} = 60 \cdot \frac{s}{min} \cdot k \cdot n$$

- ▶ **Crítico, se a frequência de oscilação do torque for perto da frequência torsional natural da instalação.**

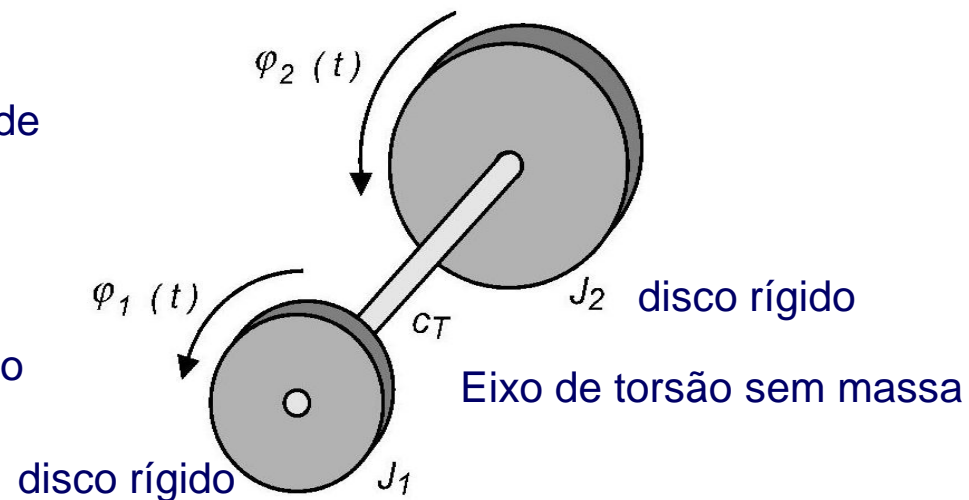
► *Vibrações torsionais surgem da torsão elástica de uma seção do eixo.*

*São geralmente sobrepostos pela rotação do eixo e são visíveis no sinal do torque.*

Modelo simples de  
uma oscilação

torsional  $\varphi_1, \varphi_2$

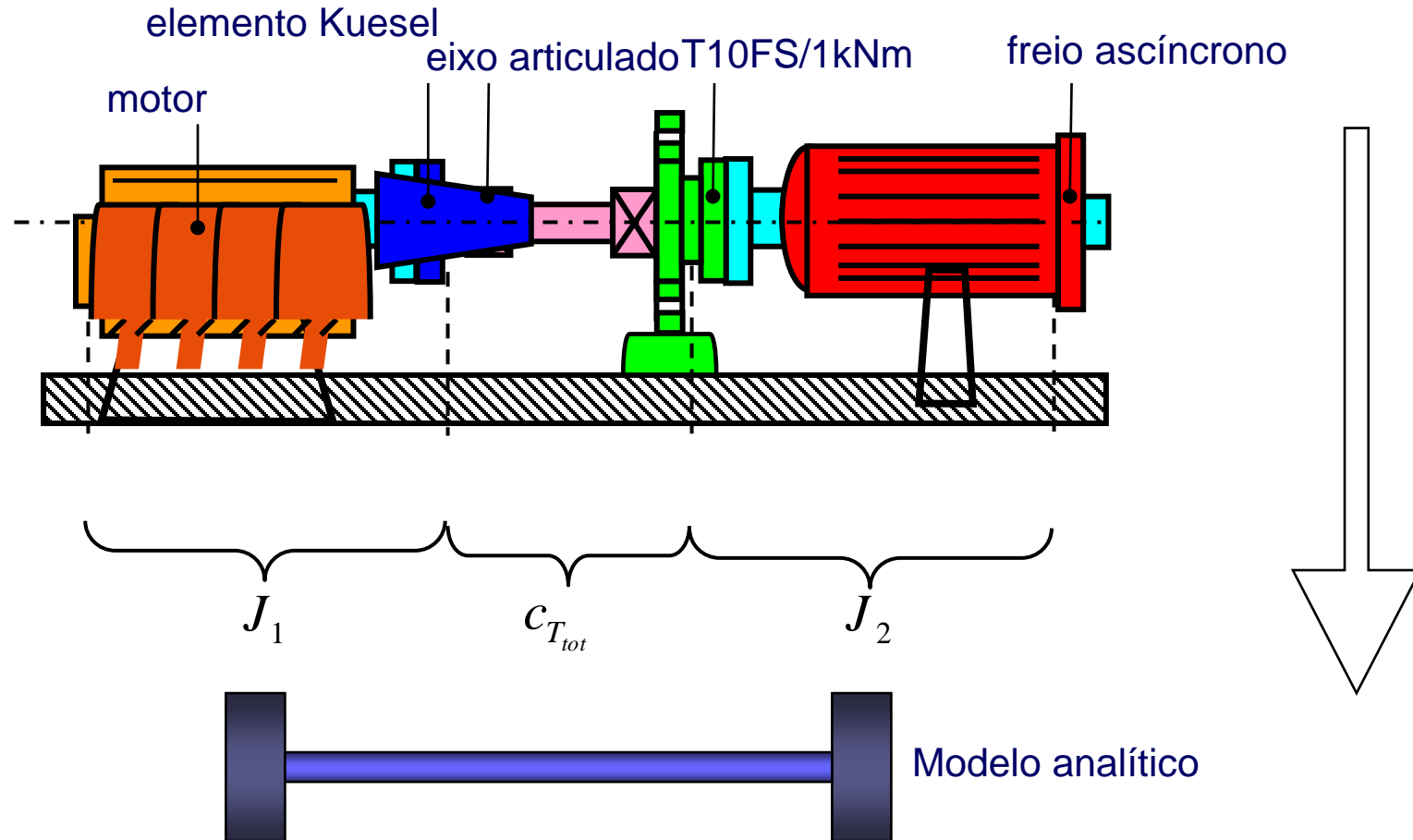
angulos de torção



$$f_{T_0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{c_T \left( \frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} \right)}$$

Frequência natural  
torsional

Exemplo de cálculo da frequência torsional natural em uma bancada de teste



Exemplo de cálculo da frequência torsional natural em uma bancada de teste

- ▶ ***A combinação dos momentos de inércia dos componentes adjacentes só é possível no caso de um elevado grau de rigidez entre eles.***

$$J_{tot} = J_1 + J_2 + \dots$$

- ▶ ***A combinação das rigidez de torsão de componentes adjacentes só é possível no caso de nenhum momento de inercia relevante entre eles.***

$$\frac{1}{C_{T_{tot}}} = \frac{1}{C_{T_1}} + \frac{1}{C_{T_2}} + \dots$$

Exemplo de cálculo da frequência torsional natural em uma bancada de teste

$$c_{T_{ke}} = 11,7 \cdot 10^3 \frac{Nm}{rad} \quad \frac{1}{c_{T_{tot}}} = \left( \frac{1}{11,7} + \frac{1}{49,2} + \frac{1}{1200} \right) \cdot 10^3 \frac{rad}{Nm}$$

$$c_{T_{js}} = 49,2 \cdot 10^3 \frac{Nm}{rad} \quad c_{T_{tot}} = 9,45 \cdot 10^3 \frac{Nm}{rad}$$

$$c_{T_{T10}} = 1200 \cdot 10^3 \frac{Nm}{rad}$$

$$J_{engine} = 0,26 kgm^2 \quad J_{ke} = (0,28 + 0,03) kgm^2$$

$$J_{T10} = (0,03 + 0,03) kgm^2 \quad J_{js} = 0,02 kgm^2$$

$$J_{AS} = 1,0 kgm^2$$

$$f_{T_0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{9,45 \cdot 10^3 \frac{Nm}{rad} \left( \frac{1}{(0,26 + 0,28) kgm^2} + \frac{1}{1,0 kgm^2} \right)} = 26,13 Hz \Rightarrow n_{crit} = 1567 \text{ min}^{-1}$$

# Vibração torcional - Resonância

Range  
subcrítico:

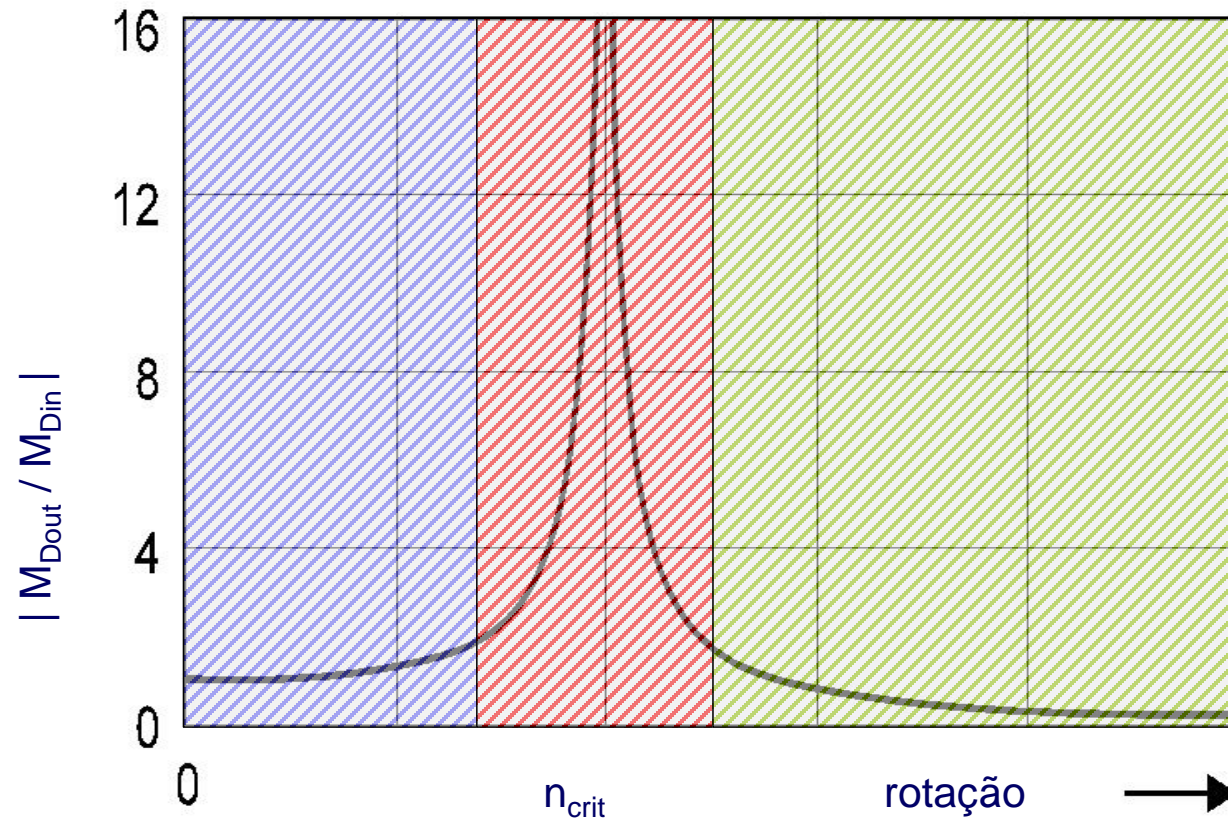
$$M_{Dout} \cong M_{Din}$$

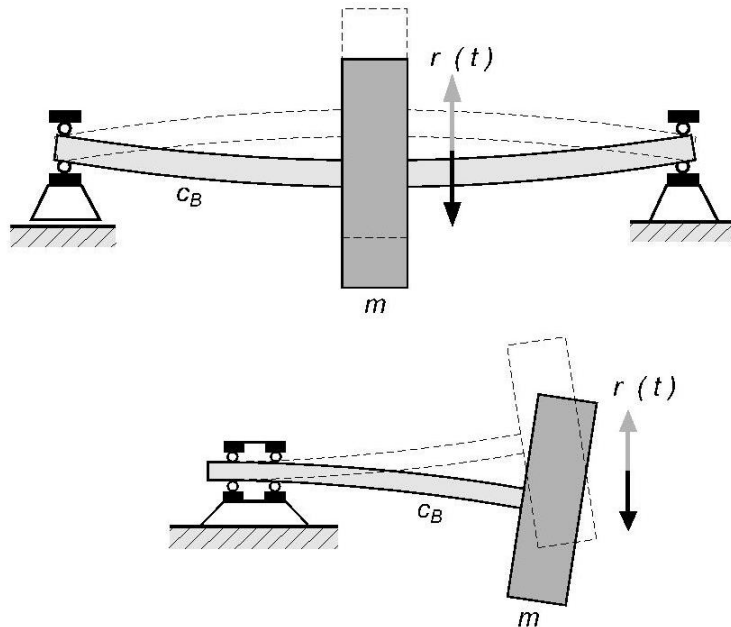
Range de  
resonância:

$$M_{Dout} \gg M_{Din}$$

Range supercrítico:

$$M_{Dout} < M_{Din} \text{ (mecânica passa-baixo)}$$





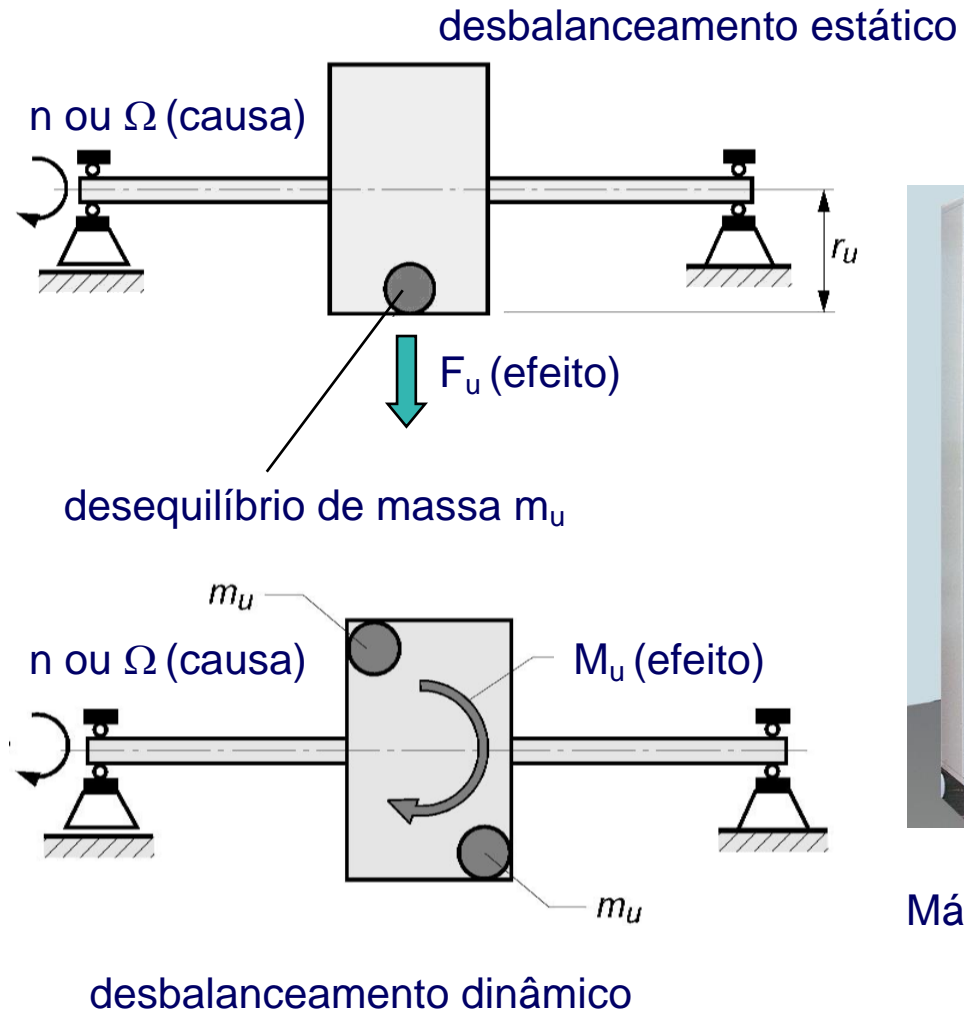
A vibração surge a partir de uma flexão elástica de uma seção do eixo.

Crítico, se a frequência de excitação ( $n/60$ ) for perto da frequência natural de flexão da instalação

$$f_{B_0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_B}{m}}$$

$c_B$  = rigidez a flexão

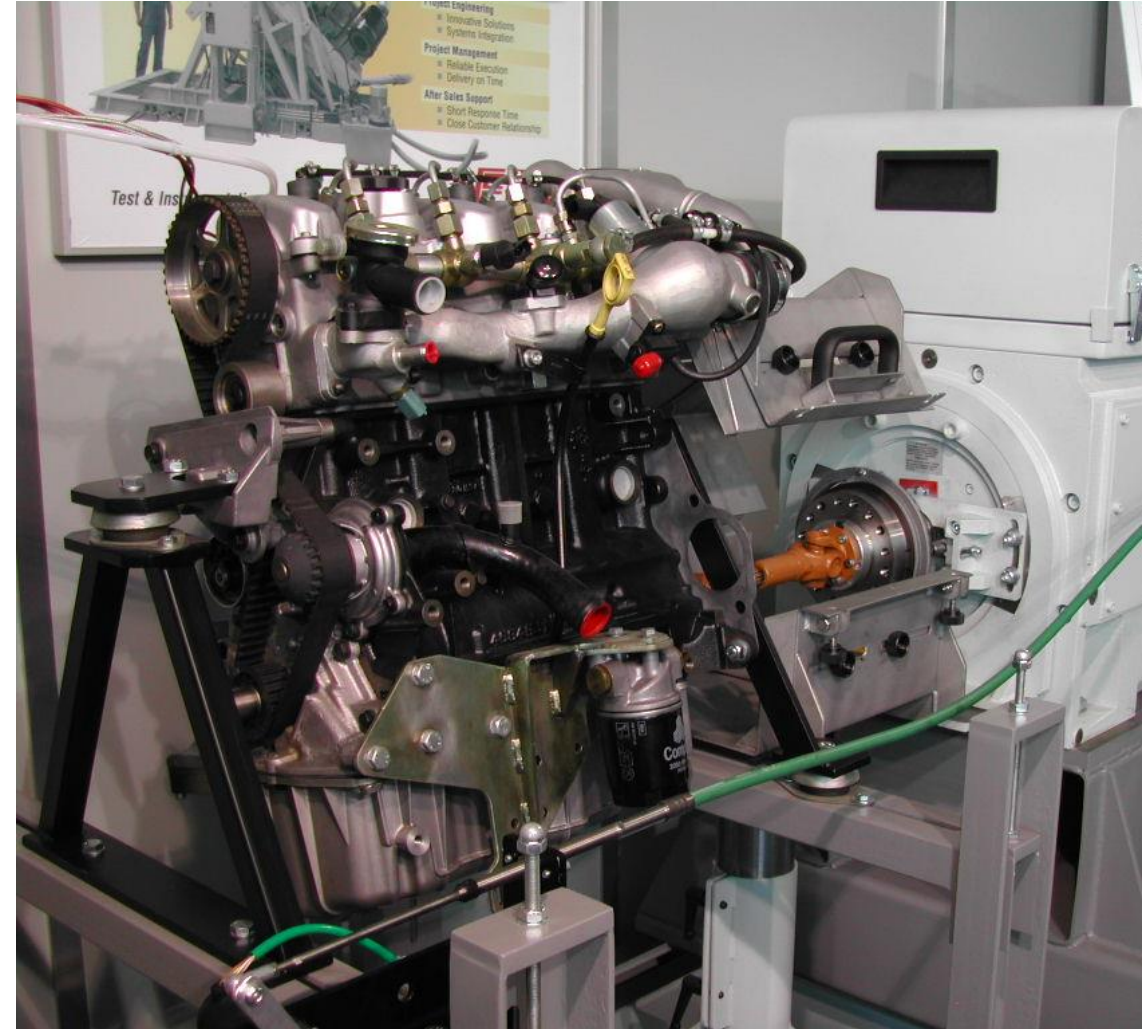
$m$  = massa

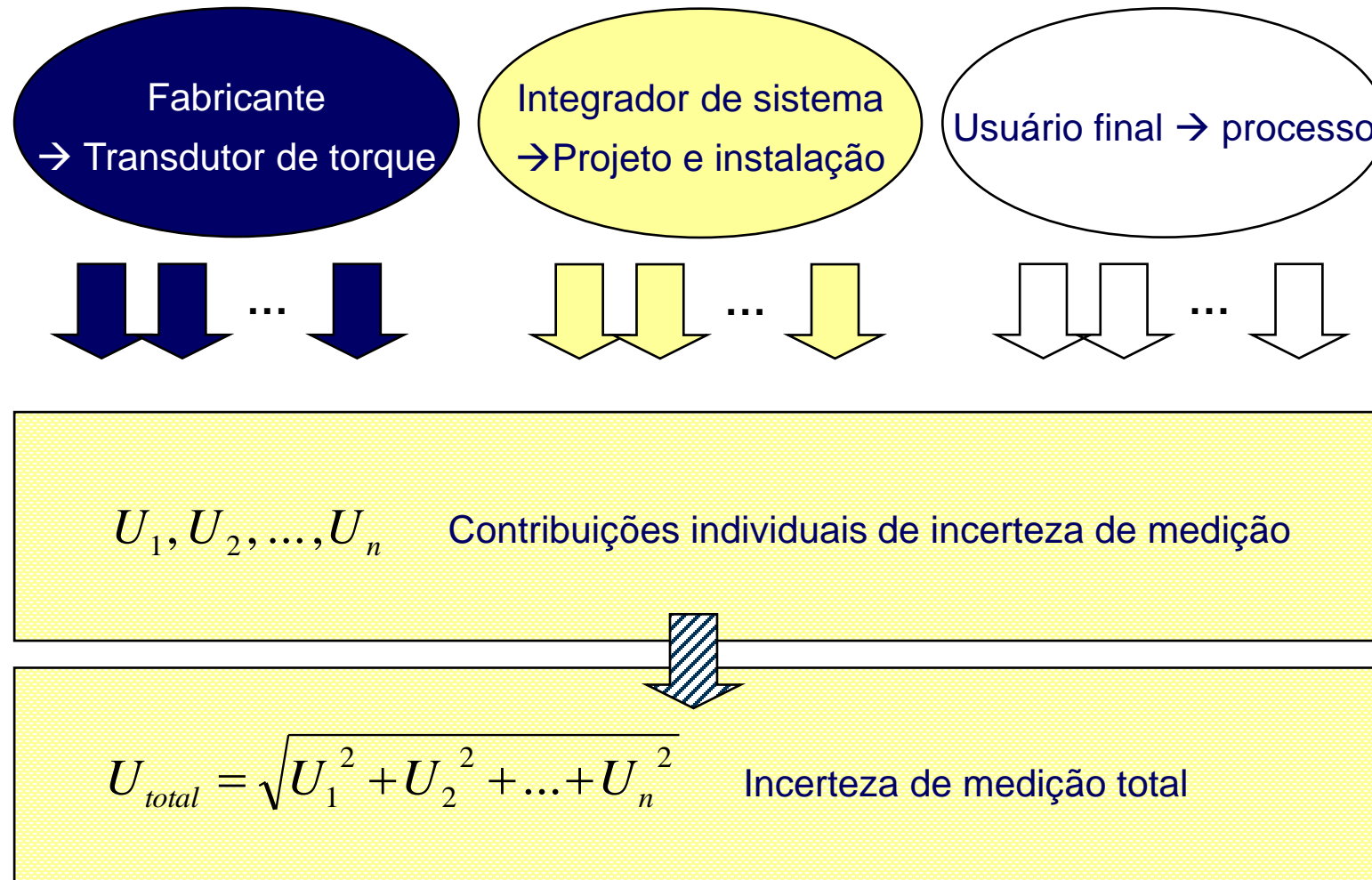


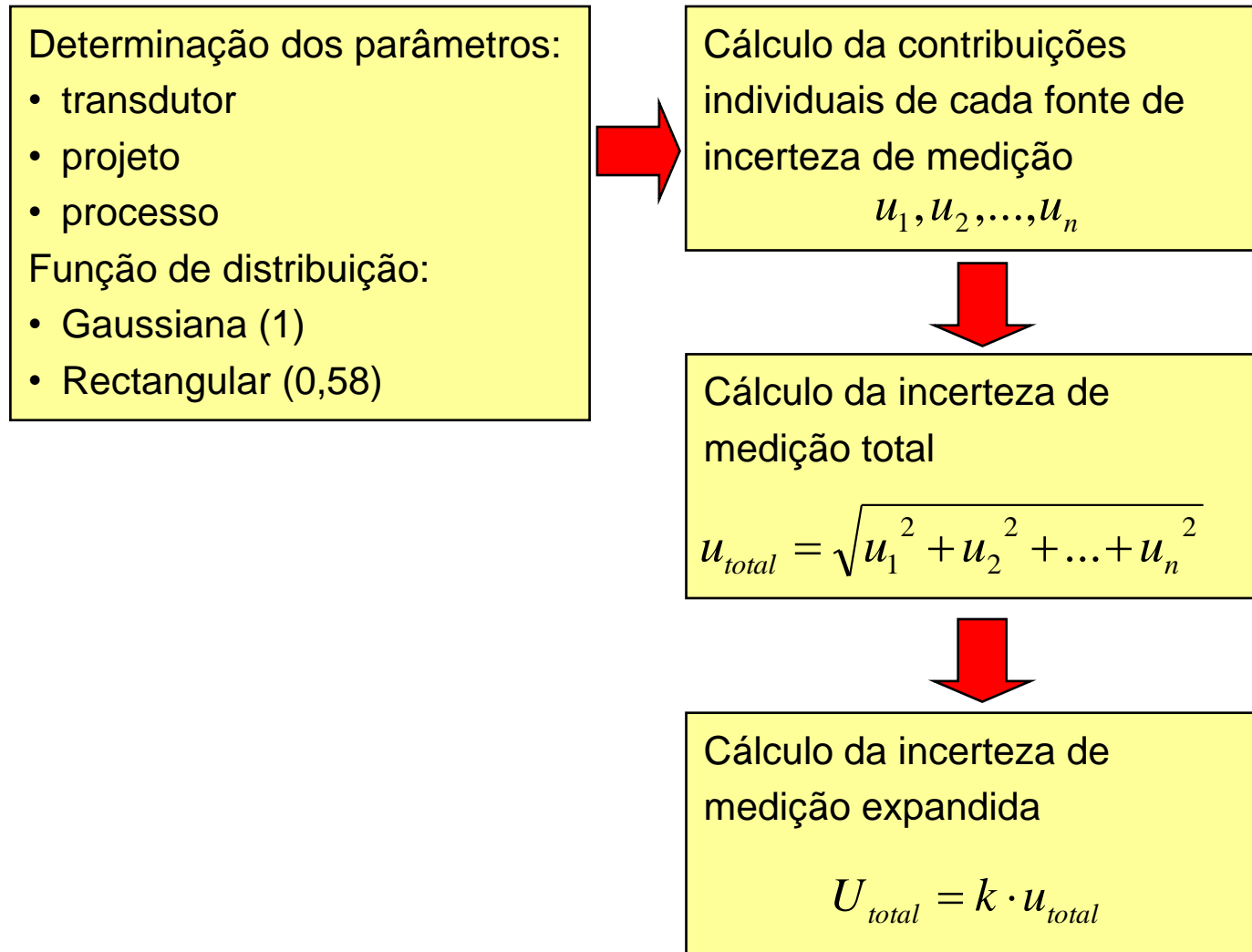
Máquina balanceadora com eixo horizontal

# Incerteza de medição

## Cálculo da incerteza de medição do torque em um dinamometro. (Melhor estimativa)








## Etapas

- 1** Determinação dos parâmetros aplicáveis
- 2** Determinação dos fatores de abrangência (função distribuição)
- 3** Cálculo da contribuição individual de cada fonte de incerteza
- 4** Cálculo da incerteza de medição total
- 5** Cálculo da incerteza de medição expandida

## Selection of transducer



**T12**  
Digital Torque Transducer

**Special features**

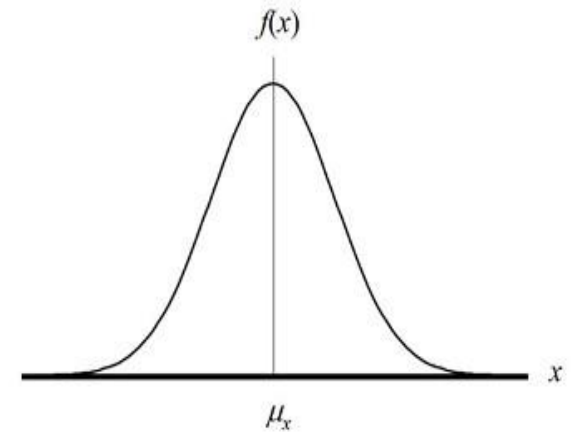
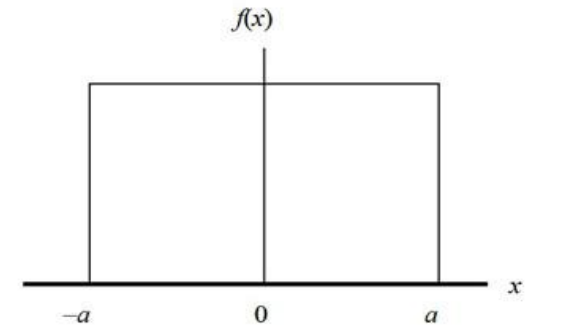
- Nominal (rated) torques of 500 N·m, 1 kN·m, 2 kN·m, 3 kN·m, 5 kN·m and 10 kN·m
- Nominal (rated) speeds from 10,000 rpm to 16,000 rpm
- Wide measurement frequency range up to 6 kHz (-3 dB)
- Fast digital transmission of measurement signals: 4,800 measured values/sec
- High resolution of 19 bit (integral method)
- Monitoring functions
- Extensive options

smart torque® by HBM

Data Sheet

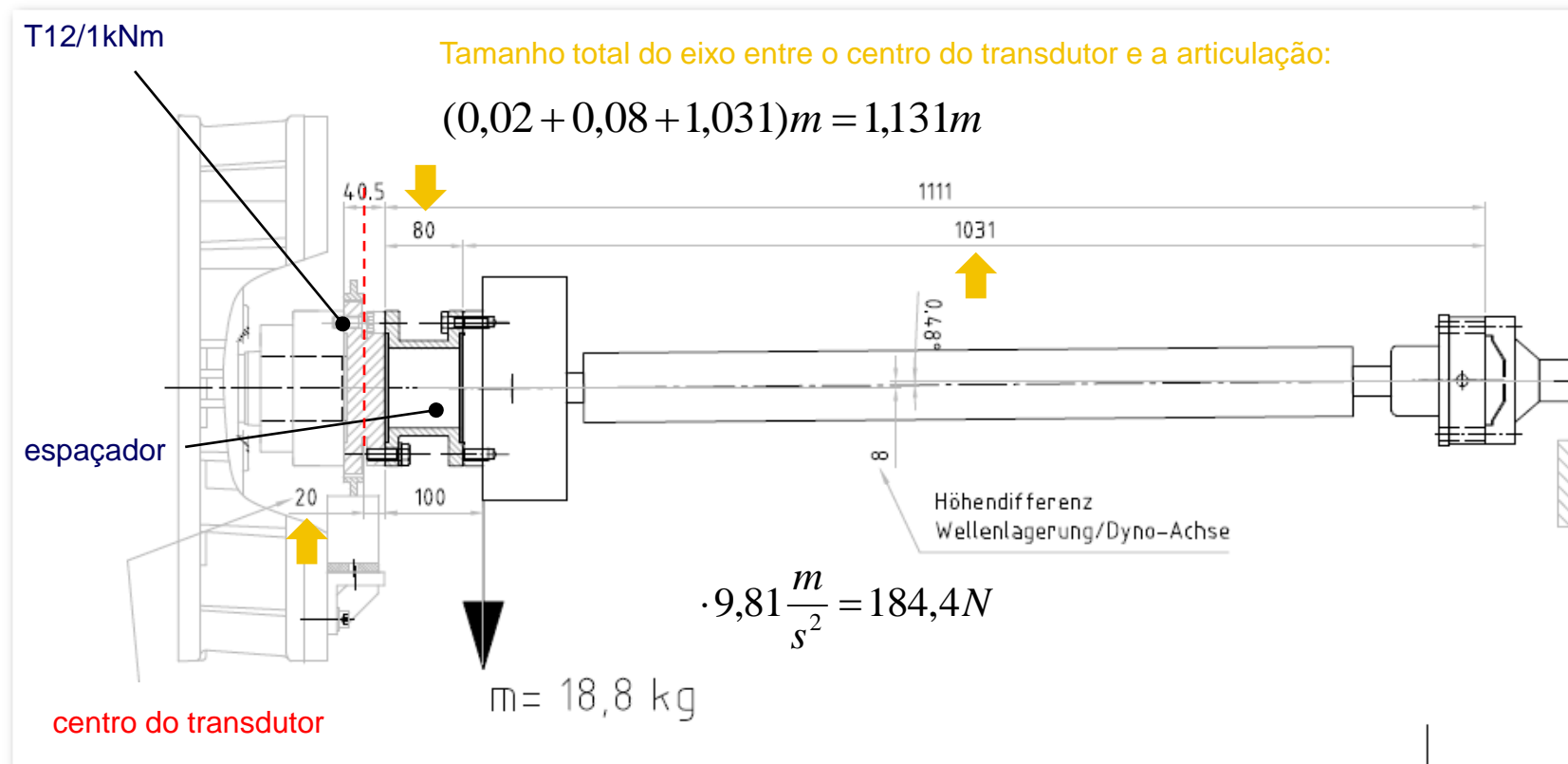
## Etapas 1 e 2

	parametro	Relativo a	fator de distribuição	
			rectangular	normal
transdutor	Tolerância da sensibilidade [%]	Torque Max.	0,58	
	linearidade + histerese [%]	F.E.	0,58	
	TK0 /10K devio a partir de 23°C [%]	F.E.	0,58	
	TKC /10K devio a partir de 23°C [%]	Torque Max.	0,58	
	Repetibilidade [%]	V.M.		1
Instalação	Forças parasitas totais [%]	Torque Max.	0,58	
processo	max. torque do ensaio [Nm]			
	max. temperatura do transdutor [°C]			



$$\sigma = 58\%$$

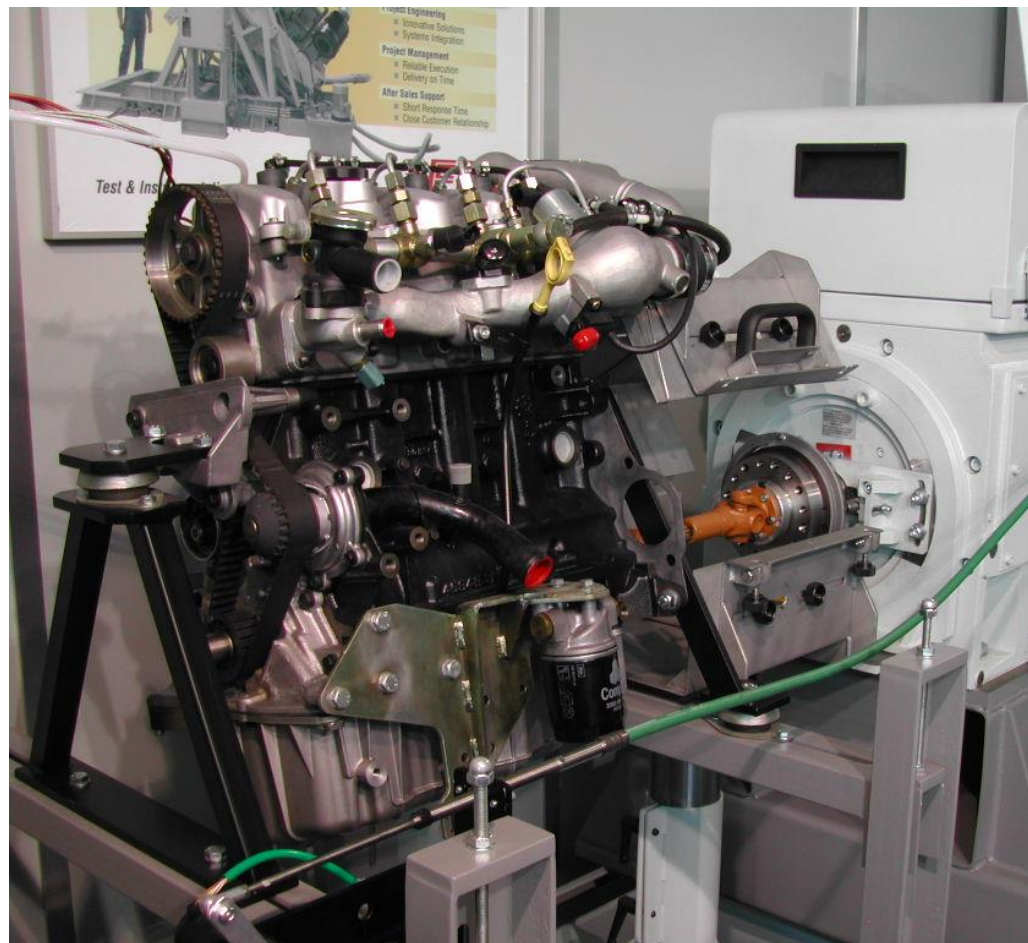
## Informações da instalação



Momento de reação do cardam: 77 Nm / 0,5° (dado de catálogo)

- Força axial  $\approx 0$  (liberdade axial)
- Força lateral = 184,4 N / 2 = 92,2 N
- Mom. de reação = 77 Nm
- Momento fletor = 0

## Condições de operação



Faixa de torque: -100Nm ... 700Nm

Faixa de temperatura: 13°C ... 43°C

Forças parasitas:  $F_a \approx 0$

$F_l = 92,2 \text{ N}$

$M_r = 77 \text{ Nm}$

$M_b = 0 \text{ Nm}$

## Etapas

- 1 Determinação dos parâmetros aplicáveis
- 2 Determinação dos fatores de abrangência (função distribuição)
- 3** Cálculo da contribuição individual de cada fonte de incerteza
- 4 Cálculo da incerteza de medição total
- 5 Cálculo da incerteza de medição expandida

## Etapa 3 – tolerância da sensibilidade

<b>Sensitivity tolerance</b> (deviation of the actual output quantity at $M_{nom}$ from the nominal (rated) sensitivity)		
Fieldbusses	%	+ 0.05
Frequency output	%	± 0.05
Voltage output	%	± 0.1

$$u_{dC} = 0,58 \cdot d_C \cdot M_{max} = 0,58 \cdot 0,05\% \cdot 700Nm = 0,20Nm$$

## Etapa 3 – desvio de linearidade e histerese

Linearity deviation including hysteresis, related to the nominal (rated) sensitivity		
Fieldbusses	%	± 0.02 (± 0.01 optional)
Frequency output 10 kHz/60 kHz	%	± 0.02 (± 0.01 optional)
Voltage output	%	± 0.05

$$u_{dlh} = 0,58 \cdot d_{lh} \cdot M_{nom} \cdot 2 = 0,58 \cdot 0,02\% \cdot 1kNm \cdot 2 = 0,23Nm$$

Torque Alternado!  
Reversibilidade

## Etapa 3 – efeito da temperatura no „zero“ (TK0)

Temperature influence per 10 K in the nominal (rated) temperature range

on the zero signal, related to the nominal (rated) sensitivity

Fieldbuses	%	± 0.02 (± 0.01 optional)
Frequency output	%	± 0.02 (± 0.01 optional)
Voltage output	%	± 0.1

$$u_{TK0} = 0,58 \cdot TK_0 \cdot M_{nom} \cdot \frac{\Delta T}{10K} = 0,58 \cdot 0,02\% \cdot 1kNm \cdot \frac{20K}{10K} = 0,23Nm$$

## Etapa 3 – efeito de temperatura na sensibilidade (TKC)

Temperature influence per 10 K in the nominal (rated) temperature range

on the output signal, related to the actual value of signal span

Fieldbusses	%	±0.03
Frequency output	%	±0.03
Voltage output	%	±0.1

$$u_{TKC} = 0,58 \cdot TK_C \cdot M_{\max} \cdot \frac{\Delta T}{10K} = 0,58 \cdot 0,03\% \cdot 700Nm \cdot \frac{20K}{10K} = 0,24Nm$$

## Etapa 3 – Repetibilidade (desvio padrão)

<b>Rel. standard deviation of the repeatability</b> , per DIN1319, related to variation of the output signal		
Fieldbusses/frequency output	%	± 0.01
Voltage output	%	± 0.03

$$u_{\text{rel}} = 1 \cdot \sigma_{\text{rel}} \cdot \Delta M = 1 \cdot 0,01\% \cdot 800 Nm = 0,08 Nm$$

## Etapa 3 – Efeito das forças parasitas

### Load limits<sup>7)</sup>

Axial limit force	kN	16	19	39
Lateral limit force	kN	4	5	9
Bending limit moment	N·m	200	220	560

7) Each type of irregular stress can only be permitted with its given static limit values (bending moment, lateral or axial load, exceeding the nominal (rated) torque) if none of the others can occur. Otherwise the limit values must be reduced. If for instance 30 % of the bending limit moment and also 30 % of the lateral limit force are present, only 40 % of the axial limit force are permitted, provided that the nominal (rated) torque is not exceeded. With the permitted bending moments, axial, and lateral limit forces, measuring errors of about 0.3 % of the nominal (rated) torque can occur.

	Limit load acc. to data sheet	Max. load acc. to application	Ratio max. load / limit load
Axial force	19 kN	≈ 0 N	0%
Lateral force	5 kN	0,0922 kN	1,84%
Reaction or bending moment	220 Nm	77 Nm	35,00%
Total			36,84%

$$u_{para} = 0,58 \cdot d_{para} \cdot \frac{L_{para}}{L_{para,ref}} \cdot M_{nom} \cdot 0,30\% = 0,58 \cdot 36,84\% \cdot 1kNm \cdot 0,30\% = 0,64Nm$$

## Etapas

- 1 Determinação dos parâmetros aplicáveis
- 2 Determinação dos fatores de abrangência (função distribuição)
- 3 Cálculo da contribuição individual de cada fonte de incerteza
- 4 Cálculo da incerteza de medição total
- 5 Cálculo da incerteza de medição expandida

## Etapa 4 – Incerteza de medição total

$$u_{total} = \sqrt{u_{dC}^2 + u_{dlh}^2 + u_{TK0}^2 + u_{TKC}^2 + u_{\sigma rel}^2 + u_{para}^2}$$

$$u_{total} = \sqrt{(0,20Nm)^2 + (0,23Nm)^2 + (0,23Nm)^2 + (0,24Nm)^2 + (0,08Nm)^2 + (0,64Nm)^2}$$

$$u_{total} = 0,79Nm$$

## Etapas

- 1 Determinação dos parâmetros aplicáveis
- 2 Determinação dos fatores de abrangência (função distribuição)
- 3 Cálculo da contribuição individual de cada fonte de incerteza
- 4 Cálculo da incerteza de medição total
- 5** Cálculo da incerteza de medição expandida

## Etapa 5 – Incerteza de medição extendida

confidence interval [%]	coverage factor k
68,27	1
90	1,645
95	1,96
95,45	2
99	2,576
99,73	3

$$U_{total} = k \cdot u_{total}$$

$$U_{total} = 2 \cdot 0,79 Nm$$

$$U_{total} = 1,58 Nm$$

## Etapa 4 – Incerteza de medição total

$$u_{total} = \sqrt{\cancel{(0,23Nm)^2} + (0,23Nm)^2 + (0,23Nm)^2 + (0,24Nm)^2 + (0,08Nm)^2 + (0,64Nm)^2}$$

Calibração!!

Ajuste Polinomial??

Controle de Temperatura

Instalação Mecânica  
- Peso do Cardam  
- Alinhamento

## Transdutor:

- Seleção de parâmetros de alta performance ( $d_{lh}$  e  $TK_0$ )
- Redução da tolerância da sensibilidade → certificado de calibração

## Projeto e instalação:

- Redução das cargas parasitas devido ao desalinhamento e das temperaturas elevadas  
→ alinhamento preciso, elementos compensadores
- Redução das cargas parasitas devido a vibrações de flexão → mudança de concepção, balanceamento
- Redução das vibrações torsionais → mudança de concepção
- Redução dos gradientes de temperaturas sobre o transdutor  
→ mudança de concepção, condicionamento da temperatura, sistema de refrigeração

## Processo:

- Eliminação do  $TK_0$  → fazer o „zeramento“ na temperatura de operação
- Eliminação do  $TK_C$  → fazer a calibração local e na temperatura de operação
- Eliminação do  $TK_0$  e  $TK_C$  → manter a temperatura de operação dentro na temperatura de referência

- Efeitos da alternância do torque (histerese mecânica)
- Influência da velocidade de rotação (efeito da força radial no sensor)
- Incerteza de medição do amplificador ou DAQ (resolução, ruído, filtros, etc)
- Influência das adaptações (se diferem das adaptações usadas na calibração)
- Design da aplicação (por exemplo, atrito do rolamento etc.)
- ...

# Obrigado!

hbkworld.com

<https://www.hbm.com/pt/0264/sensores-e-medidores-de-torque/>

felipe@hblworld.com

