

# Transdutores de força

- Instalação de transdutores de força
- Melhor estimativa da incerteza de medição



# Felipe Zucconi

## Analista T&M

- Técnico mecânico – Senai
- Física – IF/USP
- HBK – 22 anos
- Técnicas de medição – >30 anos



# Agenda

Calibração de sensores de força

Cuidados na instalação dos sensores

Características metrológicas

Estimativa da incerteza de medição

Propostas e soluções



# Calibração – montagem permanente ou variável

## Montagem permanente:

Ex.: Balanças e prensas industriais

- Calibração após montagem
- Repetibilidade sem mudança de posição deve ser considerada
- “Uso comercial” (IPEM)



## Montagem variável:

Ex.: Sensor de uso geral

- Calibração feita em laboratório
- Calibração da cadeia ou apenas do sensor
- Repetibilidade com mudança de posição deve ser considerada (reprodutibilidade)



# Calibração - Instalação

A acurária na medição de força depende:

- Da incerteza da cadeia de medição
- Do ambiente (temperatura, campos eletromagnéticos, etc)
- Da incerteza da calibração
- Da instalação e procedimentos de uso



**O sensor deve ser instalado da mesma forma como é instalado para calibração para atingir o melhor resultado**

Se o sensor não é instalado corretamente, não terá um bom desempenho durante a operação



# Calibração - Instalação

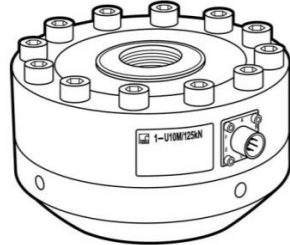
## Manuais de instalação

Os procedimentos descritos nos manuais são os mesmos usados durante a calibração


→ Se os procedimentos na calibração e durante o uso forem similares, a incerteza será a menor possível.

Mounting Instructions | Montageanleitung | Notice de montage | Istruzioni per il montaggio | 安装说明书
Mechanical installation

English
Deutsch
Français
Italiano
中文



**U10M/U10S**



225 - 250 kN	150	16	M12 x 1.25 x 80	12.9	1/2"
450 - 500 kN	380	16	M16 x 1.5 x 100	12.9	5/8"
1.25 MN	890	24	M22 x 1.5 x 150	12.9	7/8"

<sup>1)</sup> Lightly oiled bolts

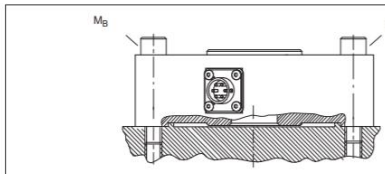


Fig. 7.2 Installation without an adapter

Fit the bolts diagonally: after tightening one bolt, continue with the opposite bolt. Do not apply the specified torque immediately, increase the tightening torque in several steps. Initially, the bolts should only be hand-tight. Then tighten them diagonally in several steps up to the specified torque.

**7.6 Mounting with a fitted force application part**

The U10M can also be ordered as an option with a fitted force application part. The transducer can then measure axial forces in both the tensile and pressure directions. If the sensor is loaded alternately with tensile and compressive forces, the upper and lower threaded connectors with locknuts must be pre-

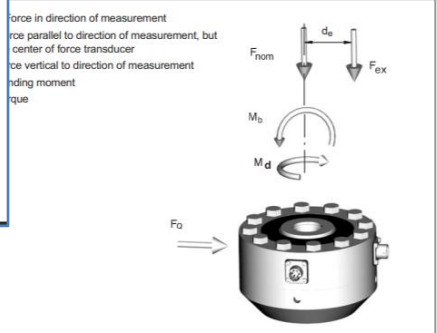


Fig. 7.1 Parasitic forces and moments

**7.3 Assembly with adapter**

The U10 can be directly mounted onto the structural elements in this mounting variant. The internal threads on the force transducer and adapter can be used for this purpose. The transducer can then measure axial forces in both the tensile and pressure directions. Alternating loads are

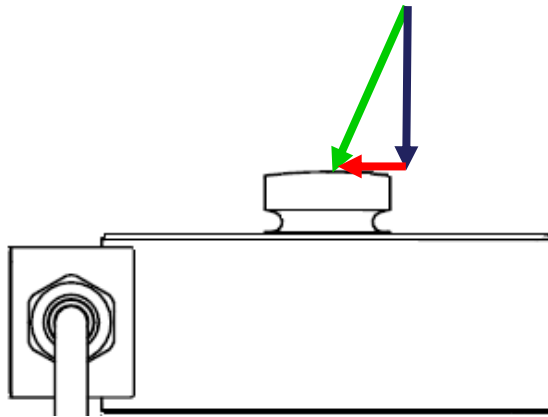
**Notice**

When installing and operating the transducers, please note the maximum parasitic forces - lateral forces, bending and torsional moments, see Chapter 11, page 35 - and the maximum permissible load-carrying capacity of the force application parts used.

U10M/U10S
A01385\_06\_YIC\_06 HBM: public
25

# Calibração - Instalação

Durante a calibração, a força é introduzida precisamente no eixo de aplicação de carga



$F_{in}$

$F_z$

$F_x$

$$F_z = F_{in} \cdot \cos(\alpha)$$

1° = 0,015%

2° = 0,06%

3° = 0,14%

4° = 0,24%

5° = 0,38%

Quão preciso é um sensor de força?

Example



- **Tolerance of the rated output (related to actual value)**  
 $\Delta_{dC} = 0.01 \% \text{ von } 1 \text{ kN} = \underline{0,1 \text{ N}}$
- **Linearity deviation (Related to full scale)**  
 $\Delta_{d \text{ lin}} = 0.03 \% \text{ von } 5 \text{ kN} = \underline{1,5 \text{ N}}$
- **Hysteresis (Related to full scale)**  
 $\Delta_{\text{hys}} = 0.03 \% \text{ von } 5 \text{ kN} = \underline{1,5 \text{ N}}$
- **TCSpan (Related to actual value)**  
 $\Delta_{\text{TKC}} = 0,015 \% \text{ von } 1 \text{ kN} \cdot (45^\circ\text{C}-23^\circ\text{C})/10\text{K} = \underline{0,33 \text{ N}}$
- **TCZero (related to full scale)**  
 $\Delta_{\text{TK0}} = 0,015 \% \text{ von } 5 \text{ kN} \cdot (45^\circ\text{C}-23^\circ\text{C})/10\text{K} = \underline{0,825 \text{ N}}$
- **Creep (related to actual value)**  
 $\Delta_{\text{cr}} = 0,04 \% \text{ von } 3 \text{ kN} = \underline{0,4 \text{ N}}$

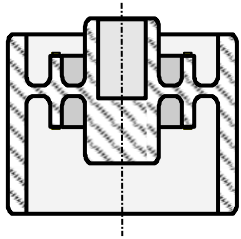
**Error: 2,33 N (=0,233 %)**



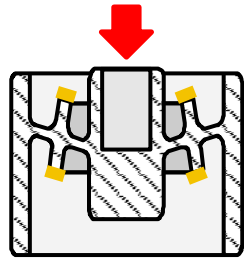
28

# Montagem – cuidados gerais

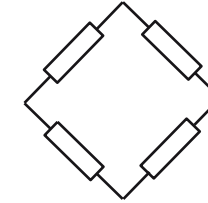
## Sensor de força “in line” baseado em strain gages



Corpo elástico



Se uma força é introduzida uma deformação ocorrerá na superfície do material, então o strain gage mudará sua resistência elétrica.



A ponte de Wheatstone converte esta mudança de resistência em uma mudança de voltagem.

Sinal de saída

$$\frac{U}{U_0} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

$$\frac{U}{U_0} = \frac{2}{4} \cdot (1000 \cdot 10^{-6} - (1000 \cdot 10^{-6}) + 1000 \cdot 10^{-6} - (-1000 \cdot 10^{-6}))$$

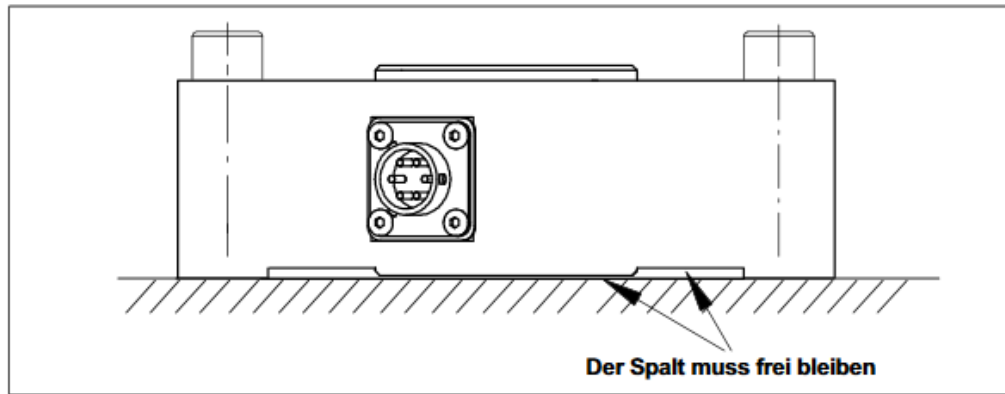
$$\frac{U}{U_0} = 2mV / V$$



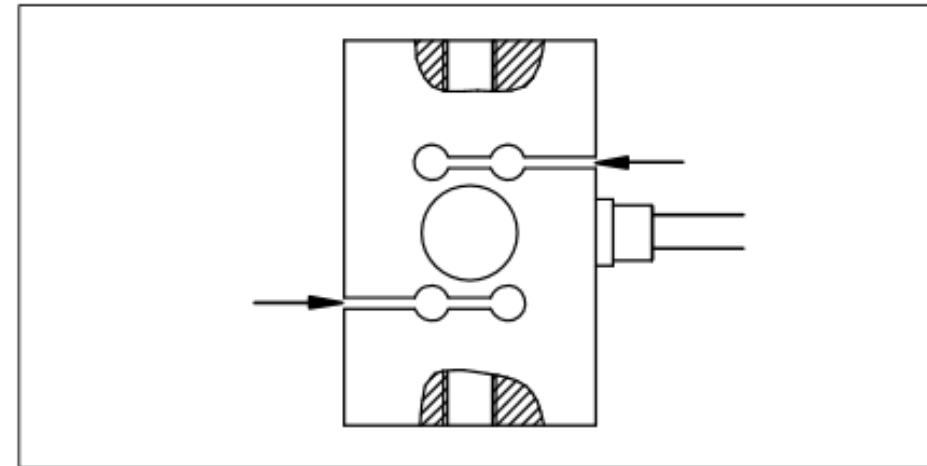
# Montagem – cuidados gerais

Sujeira ou poeira acumuladas nos espaços vazios podem impedir livre “movimento” do sensor

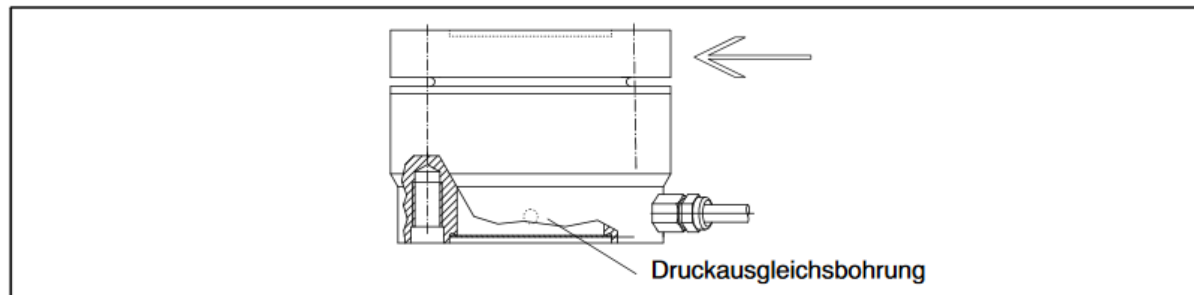
Example U10M



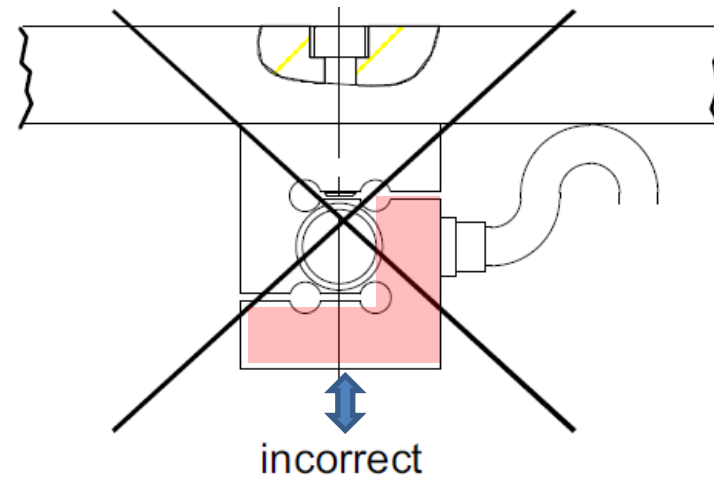
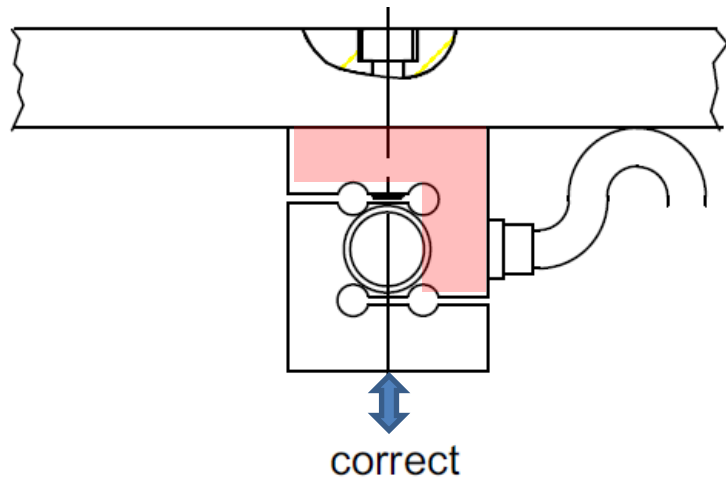
Example S9M



Example U3



# Montagem – cuidados gerais



“fuga” de força pelo cabo:

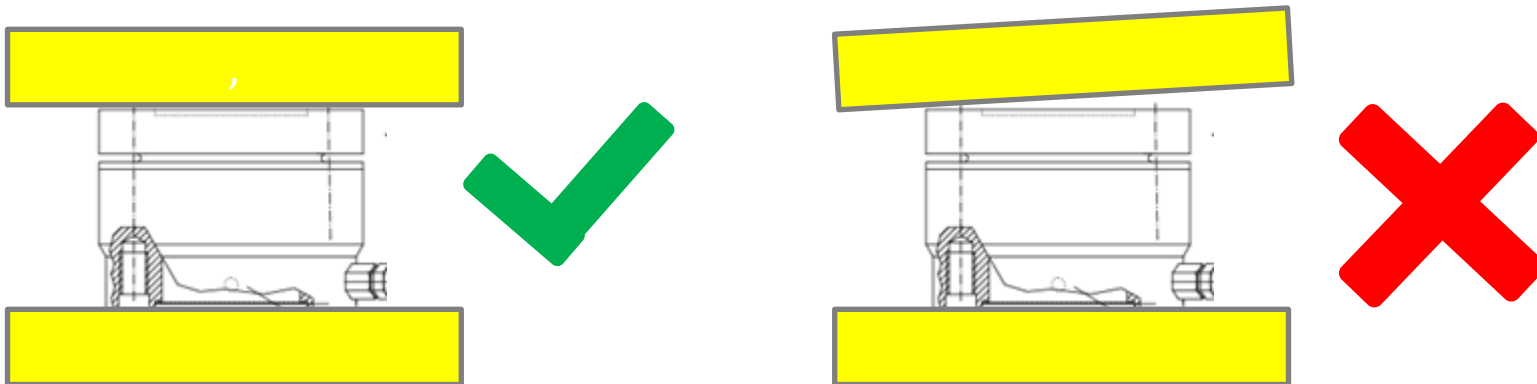
- Mais relevante em sensores de baixa capacidade ( $< 1$  kN)
- Fixar o cabo pelo lado em que não há movimento sob carga
- Efeito 1: variação da carga com a movimentação do cabo (elevação, vibração,...)
- Efeito 2: Problemas com variações de temperatura devido a variação da rigidez do cabo



# Montagem – cuidados gerais

## Elementos de conexão para sensores de força

- Deve ser duro - mínimo 40 HRC
- Deve ser plano e uniforme (liso)
- Deve ser limpo, livre de tinta ou óleo
- Se duas placas são usadas elas devem ser paralelas entre si



# Montagem – cuidados gerais

Antes de instalar o sensor:

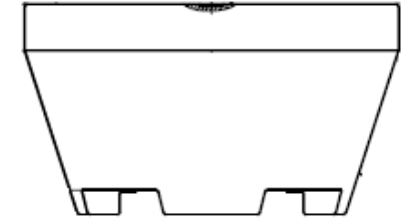
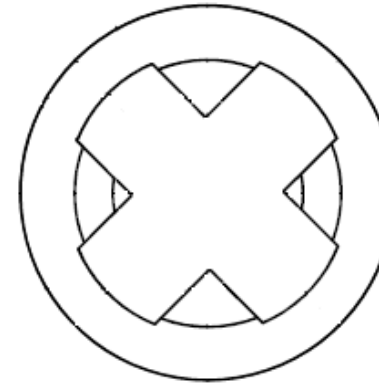
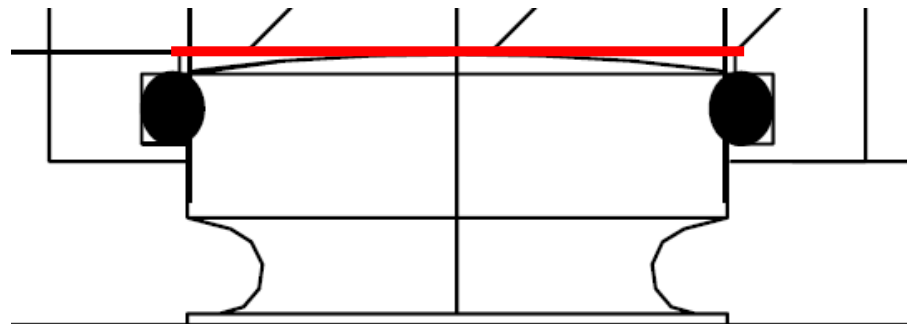
- Tudo está limpo?
- Tenha certeza que os limites mecânicos não serão excedidos
  - Máxima força de operação
  - Força lateral
  - Momento fletor
  - Torque
- Sensores de força são componentes muito rígidos: Choques mecânicos podem destruí-los
- Correntes elétricas (solda) não devem “correr” pelo corpo do sensor



temperature range	°C	°F						
			-22 ... +185					
<b>Characteristic mechanical quantities</b>								
<b>Maximum operating force</b>	$F_G$	% of $F_{nom}$	240					
<b>Force limit</b>	$F_L$		240					
<b>Breaking force</b>	$F_B$		>400					
<b>Torque limit</b>	$M_{G max}$	N*m	30	60	125	315	635	127
<b>Bending moment limit</b>	$M_{b max}$		30	60	125	315	635	127
<b>Static lateral force limit</b>	$F_Q$	% of $F_{nom}$	100					

# Montagem Compressão- acessórios

## Sensor com botão esférico



Suporte de aplicação: Peça de “confiança”

- Superfície dura, com baixa rugosidade
- Usado para também para calibração.

Sem o acessório – aplicação direta da força

- Dureza mínima: 40 HRC
- Superfície plana

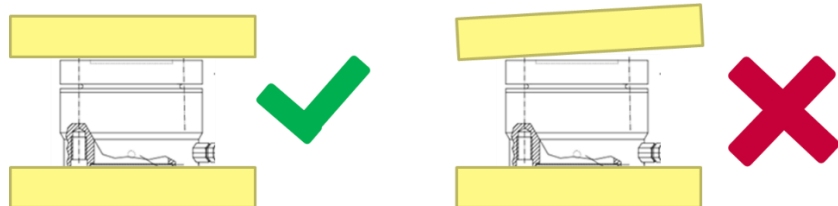
# Montagem compressão- acessórios

## Sensor com furo passante

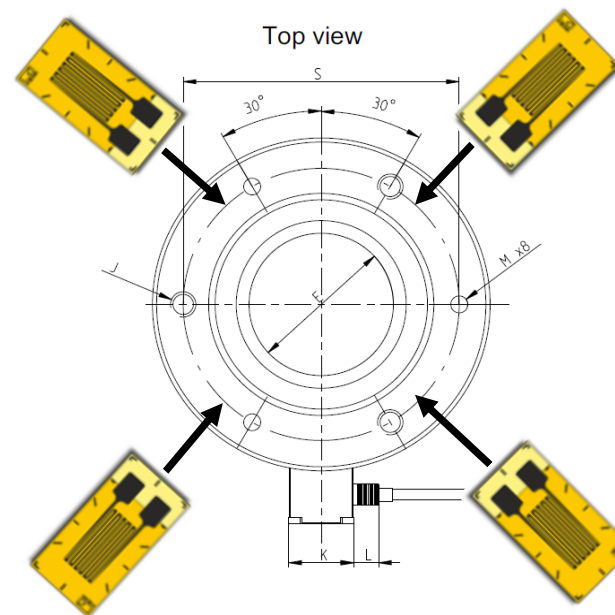


Sensível a aplicação de forças não uniformes.

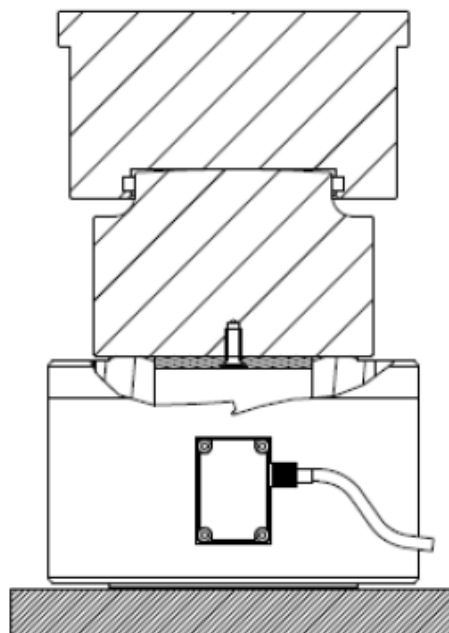
A carga deve ser distribuída em toda a borda do furo



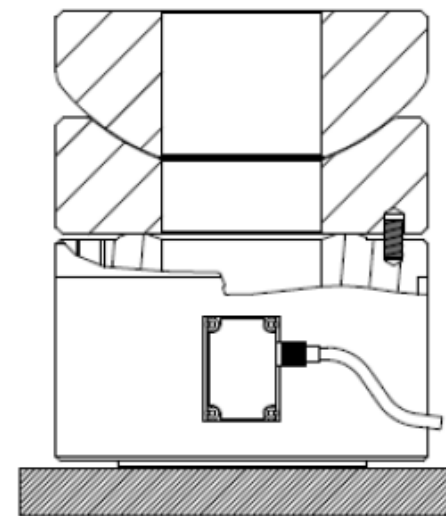
14 Public



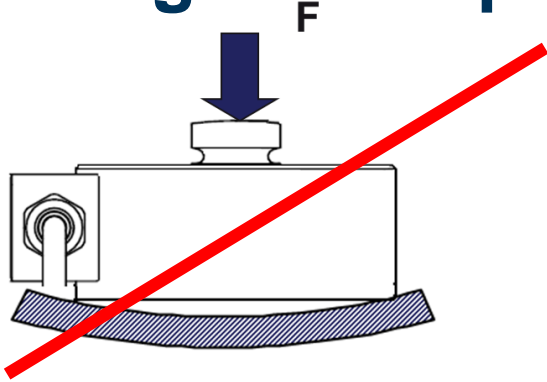
With the ZL load button and EPO thrust piece



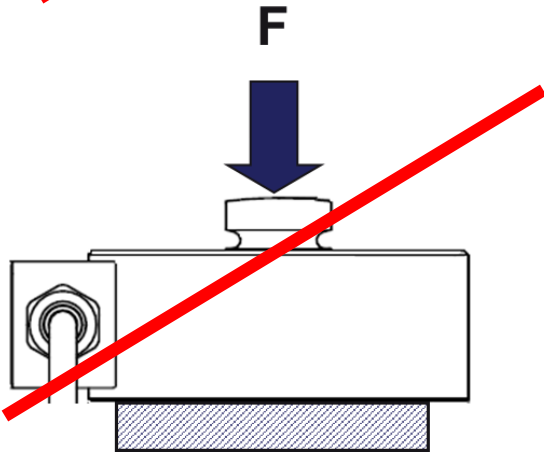
With spherical cap ZK



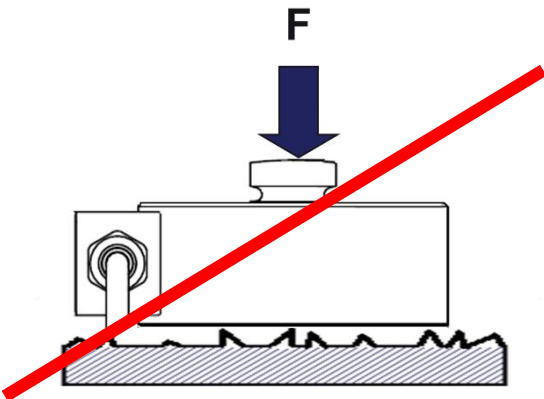
## Montagem compressão - base



O elemento sob o sensor não deve deformar quando carregado (→ mais rígido que o sensor)



A base abaixo do sensor devem ser maior que o próprio sensor

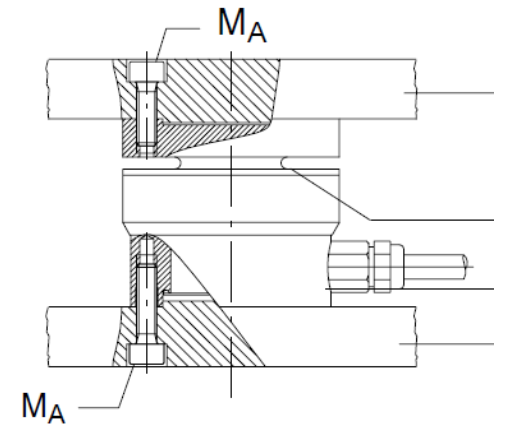
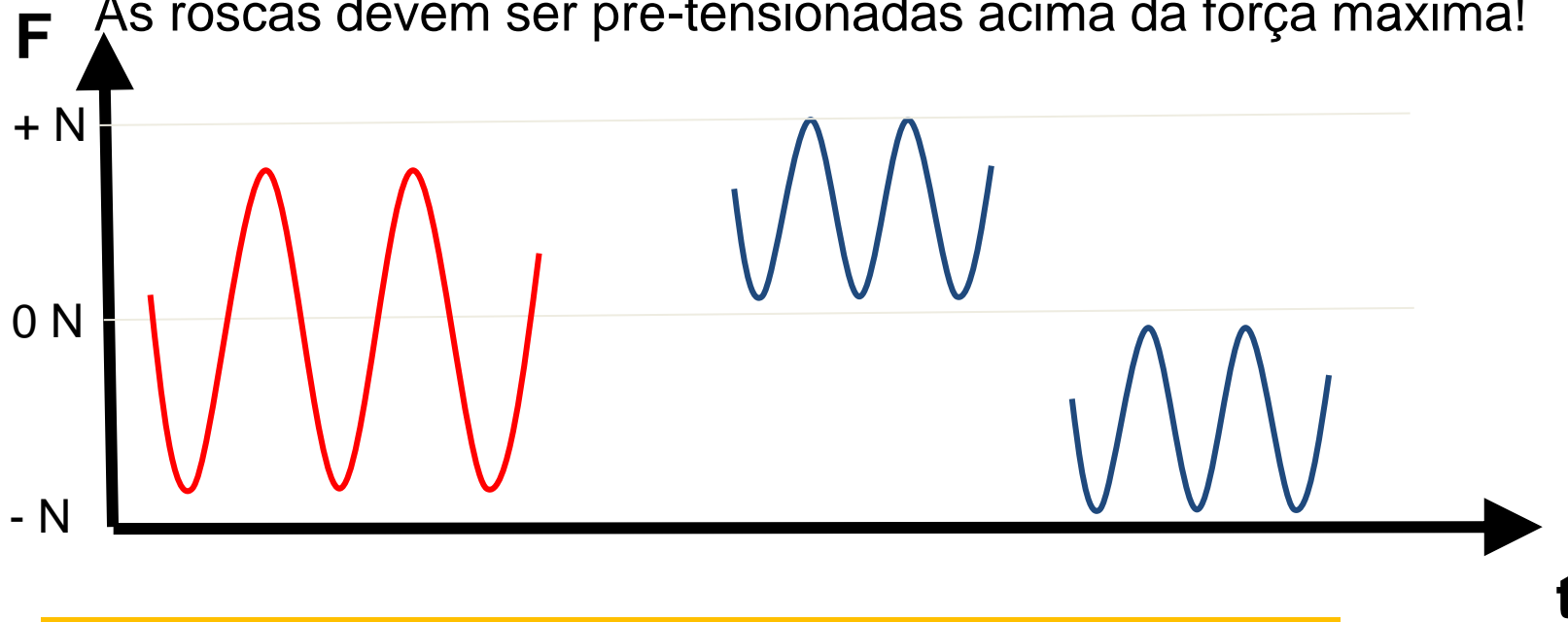


A base deve se uniforme e dura (>40 HRC)

# Montagem – cargas alternadas

No caso de cargas alternadas:

As roscas devem ser pré-tensionadas acima da força máxima!



Método 1: Aplicar o torque especificado → Ver manual

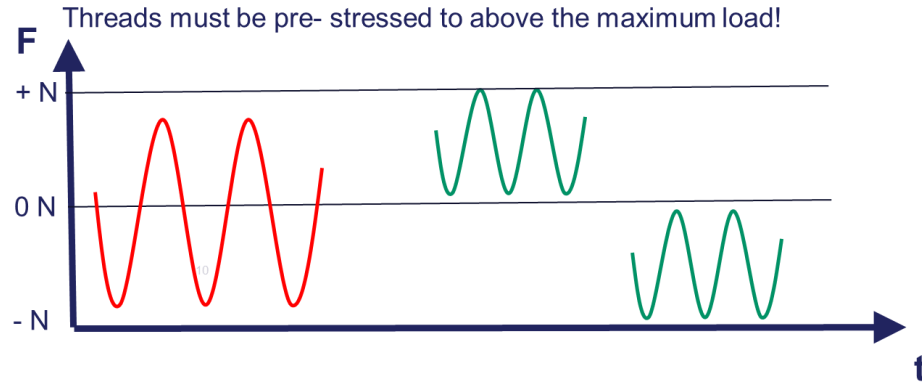


Nennkraft in kN	Gewinde am Aufnehmer	Anzugsmoment in N·m
0.5 ... 1	M8	15
2 ... 10	M12	50
20	M24X2	200
50	M24X2	500



# Montagem – cargas alternadas

In case of alternating loads:



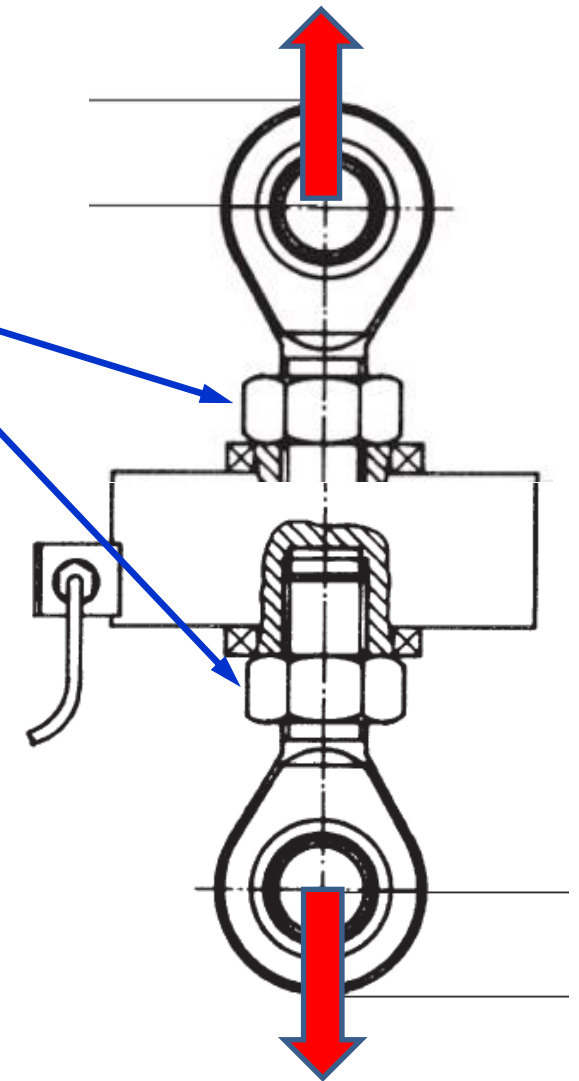
## Método 2: Pré-tensionar – com força de tração

- Rosqueie o adaptador no transdutor
- Aplique uma força de 110 % a 120 % da máxima força a ser medida
- Aperte as contra-porcas



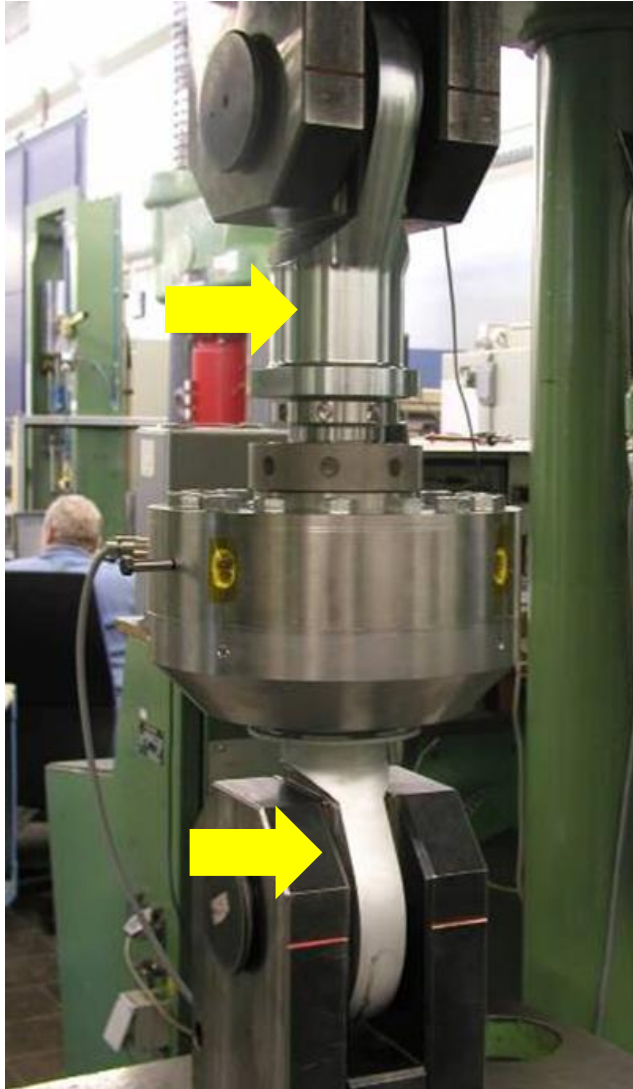
Nominal (rated) force	Tensile force to be applied
50 kN	60 kN
125 kN	150 kN
225 kN	270 kN
250 kN	300 kN
450 kN	540 kN
500 kN	600 kN
1.25 MN	1.5 MN

Contra-porcas

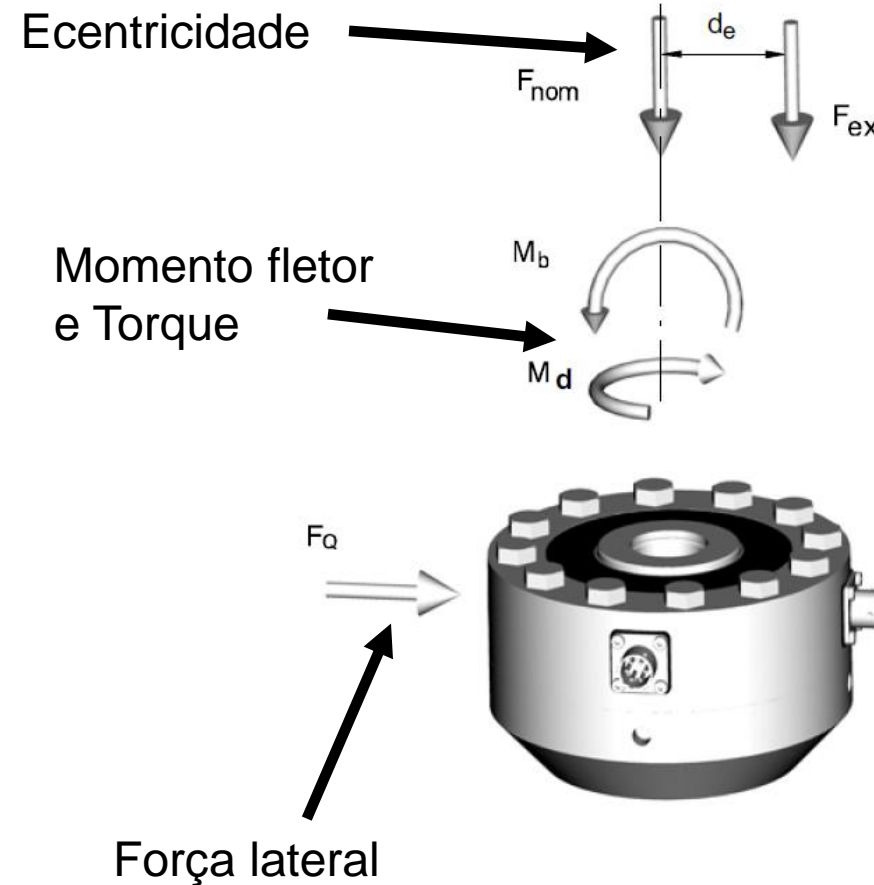


# Montagem – cargas alternadas

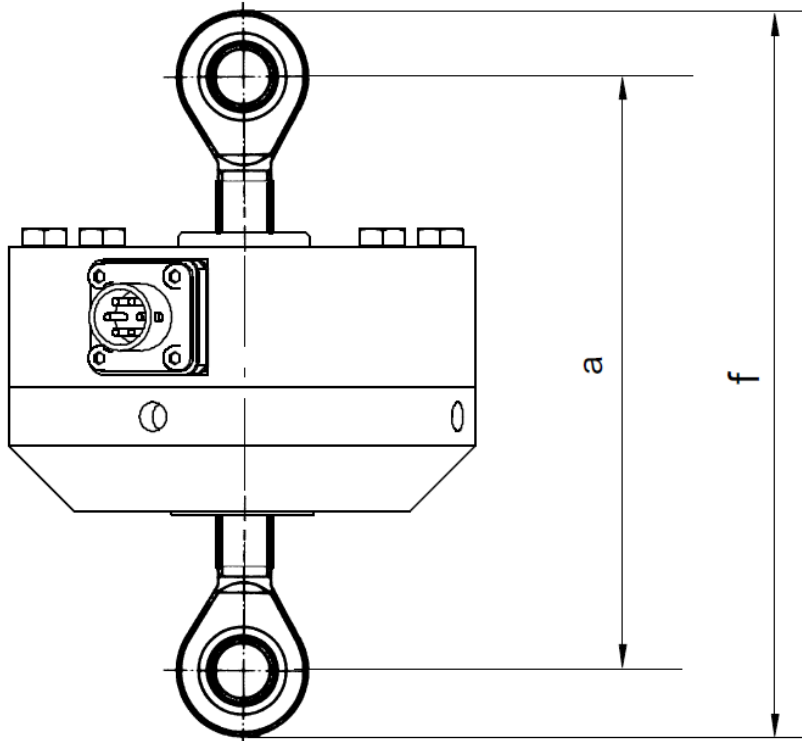
## Olhal articulado



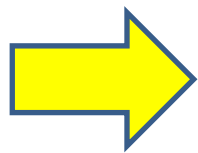
Força lateral, flexão ou torque tem impacto negativo na “precisão” do sensor.



# Montagem – cargas alternadas



A utilização de olhais limitam a aplicação de cargas alternadas e altas frequências



Montagem sem articulação

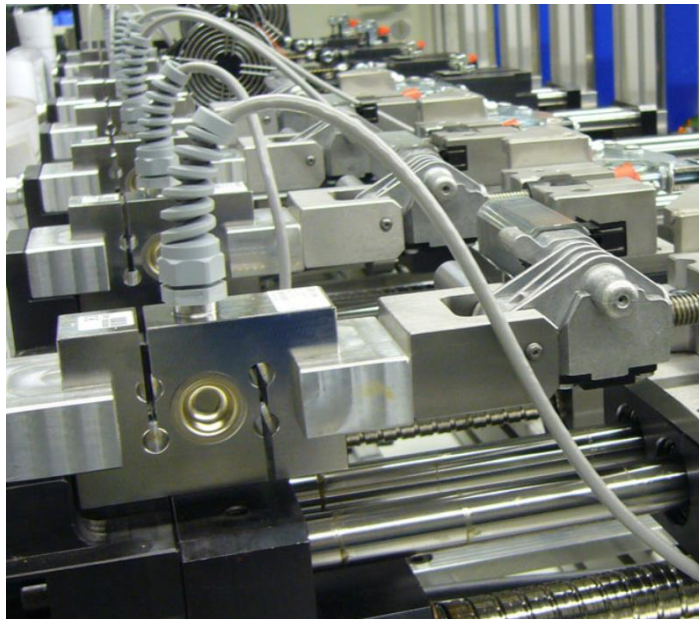


# Incerteza de medição

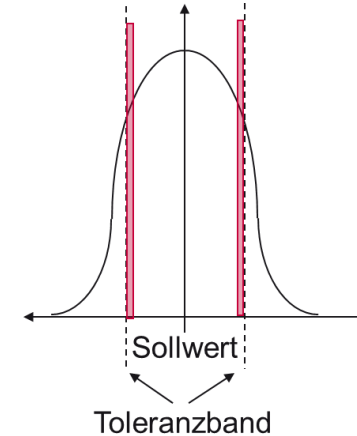
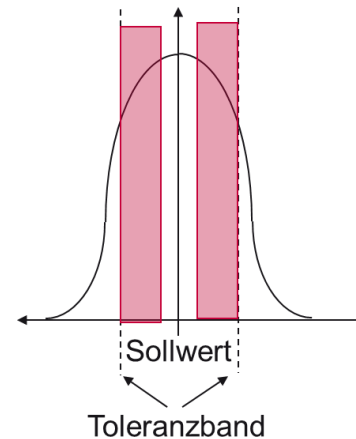
- Considerações gerais/ definições
- Classe de precisão
- Erros sistemáticos
- Como estimar a incerteza de medição
- Exemplo
- Soluções e possibilidades

# Incerteza de medição - considerações

- Novas exigências mais rígidas e requisitos padrão de mais baixas incertezas de medição.
- Testes de final de linha: tolerâncias menores otimizam o rendimento da produção



→ incerteza de medição menor ajuda atingir metas e que o equipamento de medição possa ser usado por anos



# Incerteza de medição - considerações

## **Prof. Werner Richter:**

“Um resultado de medição sem um cálculo de incerteza é tão discutível que não deveria ser considerado”

## **HBK:**

É importante saber:

- Qual é o valor da minha incerteza de medição?
- Como posso melhorar minha “precisão”?

# Incerteza de medição - considerações

Resolução

“Precisão”



Classe de precisão

# Incerteza de medição - considerações

Resolução



Este instrumento de medida tem resolução de 1mm em 2 m (1:2000)



O DMP41 pode mostrar 2,000,000 dígitos.  
Resolução:  $2.5\text{mV/V}/1\text{M} = 0.0025 \mu\text{V/V}$



# Uncertainty of measurement - considerations

## Classe de precisão?

Strain gauge full bridge, 5 or 10 mV/V measuring range, bridge excitation AC / carrier frequency		
Accuracy class		0.05
Carrier frequency (sine)	Hz	4800 ± 1.5
Bridge excitation voltage (effective)	V	1 and 2.5 (± 5 %)
Transducers that can be connected		strain gauge full bridges
Permissible cable length between MX840B and transducer	m	< 100



Type			S2M						
Nominal (rated) force	$F_{nom}$	N	10	20	50	100	200	500	1000
Accuracy									
Accuracy class			0.02						
Relative reproducibility and repeatability errors without rotation	$b_{rg}$	%	0.02						
Relative reversibility error	$v$		0.02						
Non-linearity	$d_{lin}$		0.02						
Relative creep over 30 min	$d_{creep}$		0.02						

# Incerteza de medição - considerações

## Classe de precisão?



### Amplificador:

- Linearidade
- Repetibilidade
- TCZero
- TCSpan

### Transdutor:

- Linearidade
- Histerese
- Creep
- Retorno ao ponto “zero”
- Repetibilidade
- TCZero
- TCSpan



# Incerteza de medição - considerações

## Classe de precisão?

### Cada um faz como quer!

- Não existem normas ou regras definidas
- % do valor final de escala / Linearidade / Desvio Padrão
- Não confundir com

Incerteza de medição

Classificação conforme ISO376

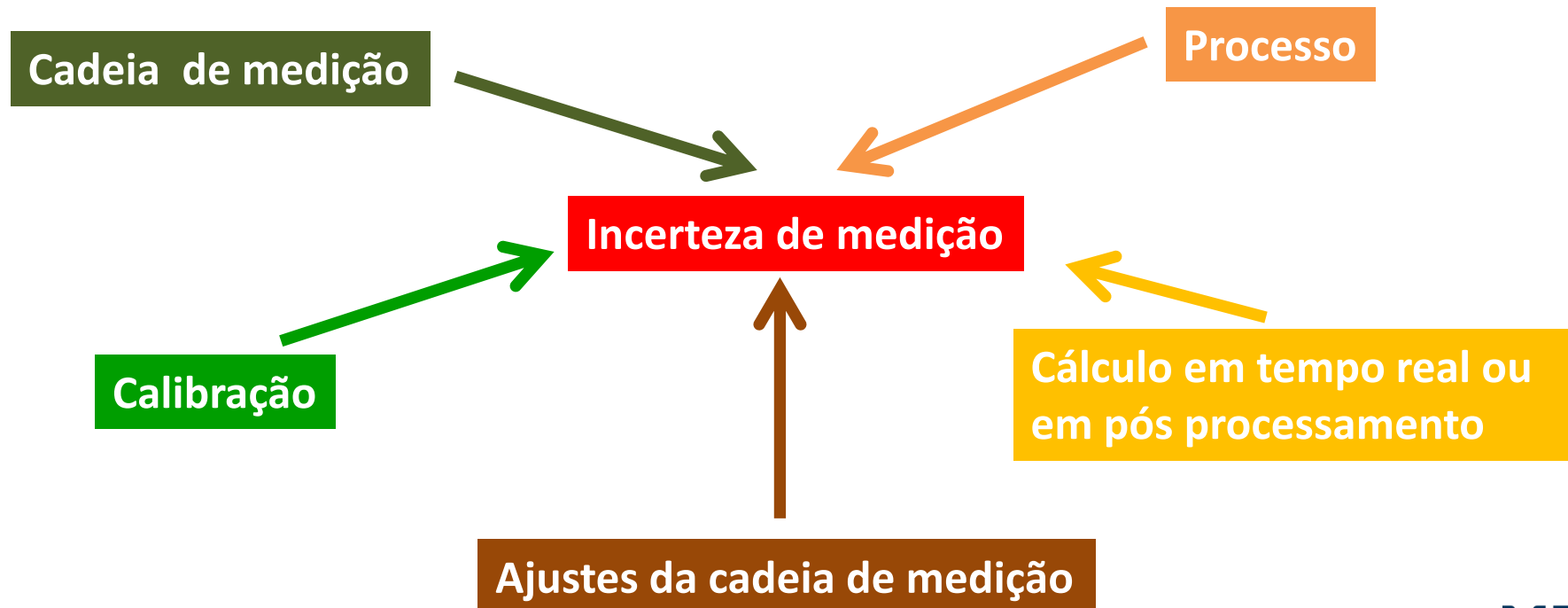
Accuracy class	0.02	0.03
Accuracy class per ISO376 in force measurement range 10% - 100%	0.5	

- Não é possível comparar modelos de fabricantes diferentes
- Você não pode calcular nenhum erro baseado apenas na classe
- Mas serve para comparar sensores do mesmo fabricante e ajuda na escolha do amplificador ou indicador adequado!

# Incerteza de medição - considerações

## Qual a precisão da minha cadeia de medição?

Desculpa, mas depende de vários fatores...



# Incerteza de medição – Erros sistemáticos

## Desvios sistemáticos

Se conhecemos a amplitude do desvio, bem como se é positivo ou negativo.

→ Podemos calcular e corrigir



## Exemplo

O peso dos acessórios de montagem:

→ “zere” sua cadeia de medição (TARA)



# Incerteza de medição - estimativa

**GUM** = “*Guide to the Expression of **U**ncertainty in **M**easurement*”

- Para altas demandas científicas
- Alta complexidade
- Demanda grande esforço

“A determinação da incerteza de medição não é um trabalho de rotina ou um problema de matemática – um conhecimento detalhado sobre a tarefa de medição é necessário”

# Incerteza de medição - estimativa

## Cadeia de medição

Histerese  
Linearidade  
TCZero  
TCSpan  
Influencias de forças  
parazitas...

## Processo

Temperatura  
Forças parazitas?  
Umidade?  
...

## Pós processamento ou cálculo instantâneo

Filtro usado  
Erro de arredondamento  
...

## Incerteza de medição

## Ajustes da cadeia de medição

Conforme catálogo?  
Conforme relatório de teste?  
Conforme certificado individual?  
...

## Calibração

Calibração em laboratório (RBC)?  
Calibração no processo?

# Incerteza de medição - estimativa

## Métodos conforme GUM-standard

### Método A

- Consiga um número apropriado de medidas
- Calcule o valor médio
- A incerteza de medição pode ser determinada pelo cãoculo do desvio padrão dos resultados

### Método B

- Use as informações existentes sobre influencias que tem impacto na incerteza de medição
- Calcule o resultado a incerteza de medição resultante osando os valores individuais gerados por cada influencia

**Método B é a melhor escolha para medições de força na maior parte dos casos.**

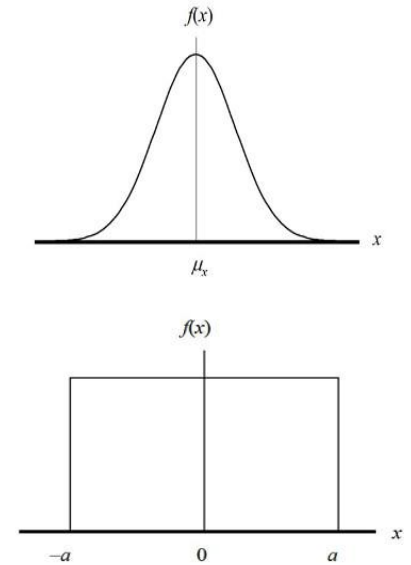


# Incerteza de medição - estimativa

Estratégia com incerteza de medição:

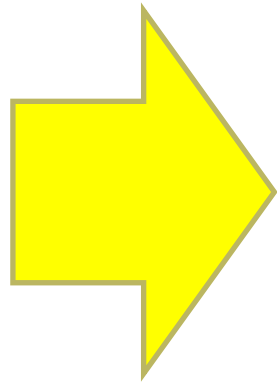
- Calcular os erros individuais
- ~~Verificar as características estatísticas de cada um~~
- Soma geométrica
- ~~Verificar a abrangência da incerteza~~

Condição: Os erros individuais não dependem um do outro!



**Esta é uma estimativa não um valor absoluto**

Sugestão: “Incerteza da cadeia de medição”



# Incerteza de medição - exemplo

## Medição de tração em um teste de componente

- Sensor U2B/5KN
  - Faixa utilizada
  - Faixa de temperatura
  - Frequencia
  - Duração do teste
  - “Zeramento” da cadeia
  - Ajuste conforme catálogo
- Capacidade 5 kN
- Entre 0 e 1 kN
- 23°C até 45°C
- 15 Hz (Senoidal)
- 30 min
- Antes de cada teste
- 5 kN = 2 mV/V



# Incerteza de medição - exemplo

## Catálogo do sensor U2B:

- Tolerância da sensibilidade:  $\pm 0.2\%$  (relativo ao VM)
- Linearity deviation.:  $\pm 0.1\%$  (relativo ao VFE)
- Hysteresis  $\pm 0.15\%$  (relativo ao VFE)
- TCspan:  $\pm 0.1\%$  (relativo ao VM)
- TCZero:  $\pm 0.05\%$  (relativo ao VFE)
- Creep (30 min):  $\pm 0.06\%$  (relativo ao VM)

VM = Valor medido

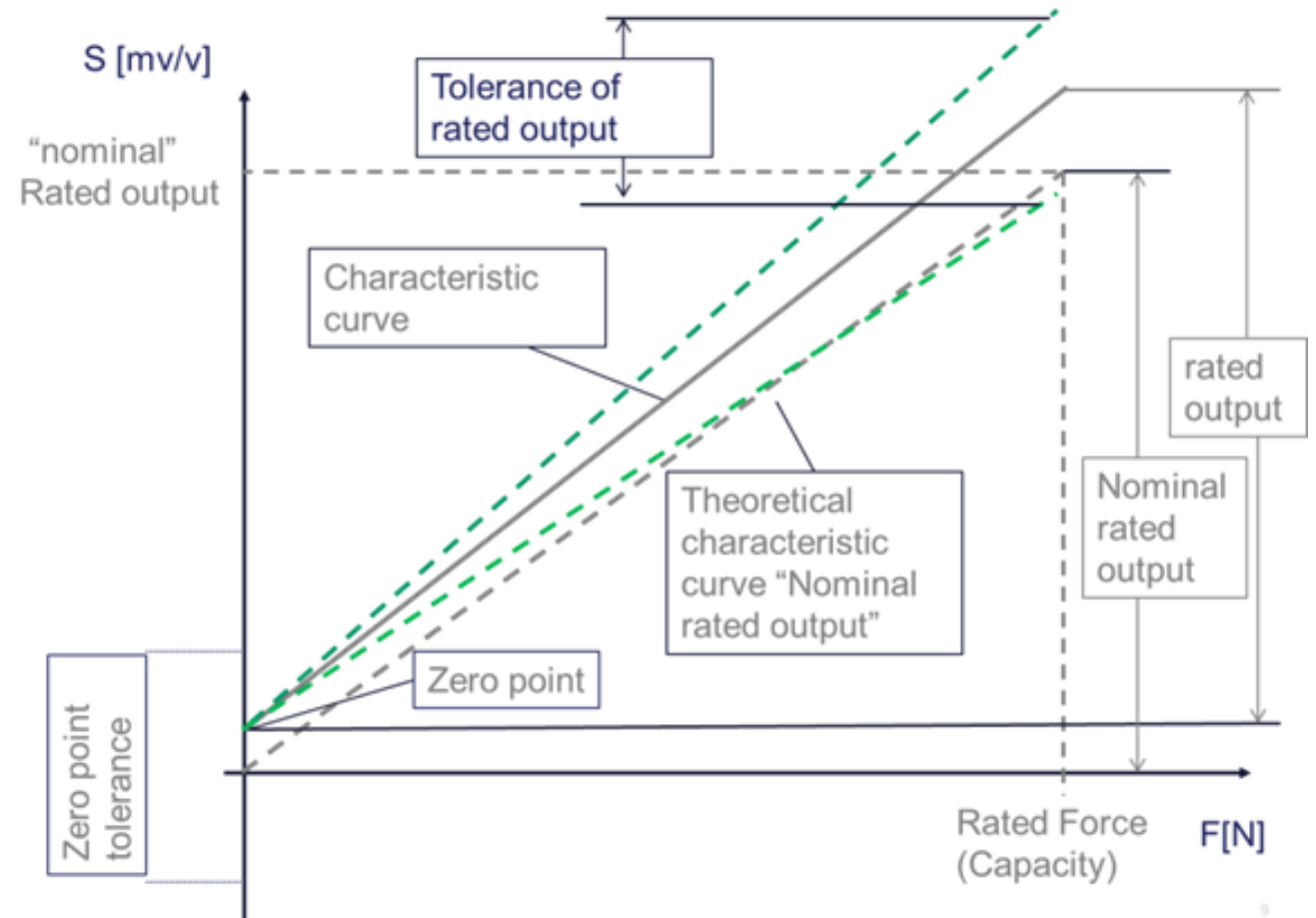
FE = Valor final de escala



# Uncertainty of measurement - example

- Tolerance of sensitivity  
(Relative to the measured value)

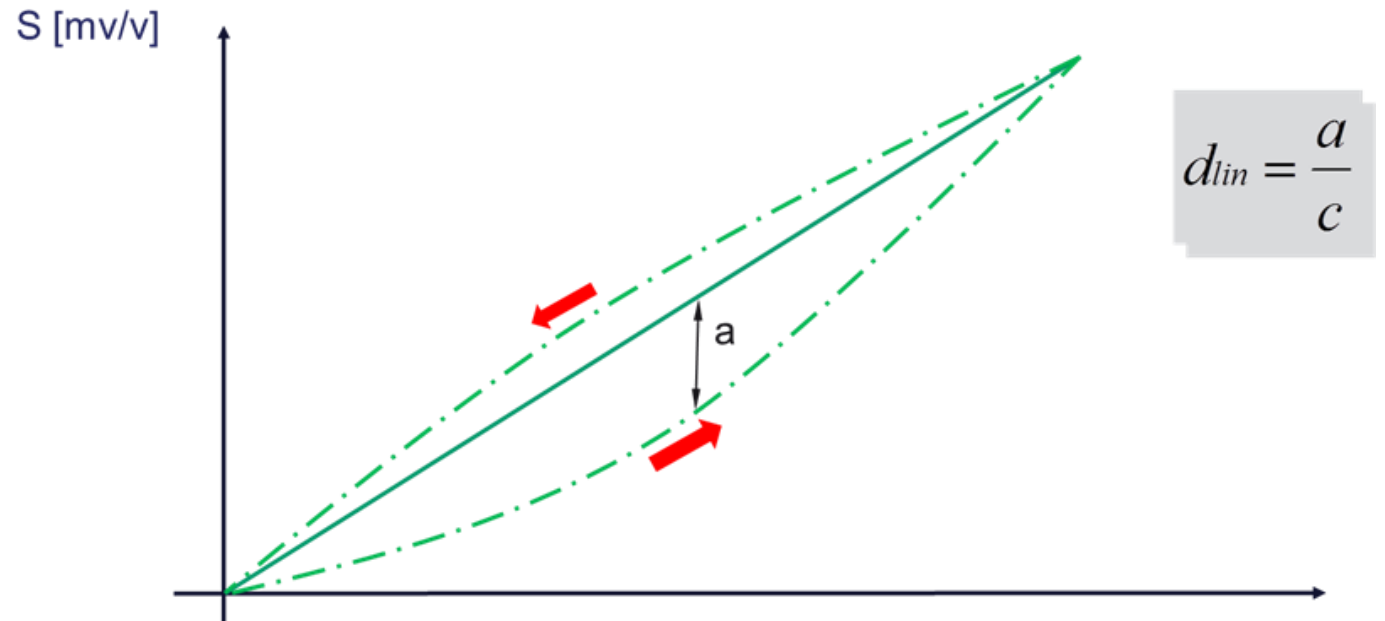
$$\Delta_{dC} = 0.2 \% \text{ de } 1 \text{ kN} = \underline{\underline{2 \text{ N}}}$$



# Incerteza de medição - exemplo

- Desvio de linearidade  
(Relativo ao fim de escala)

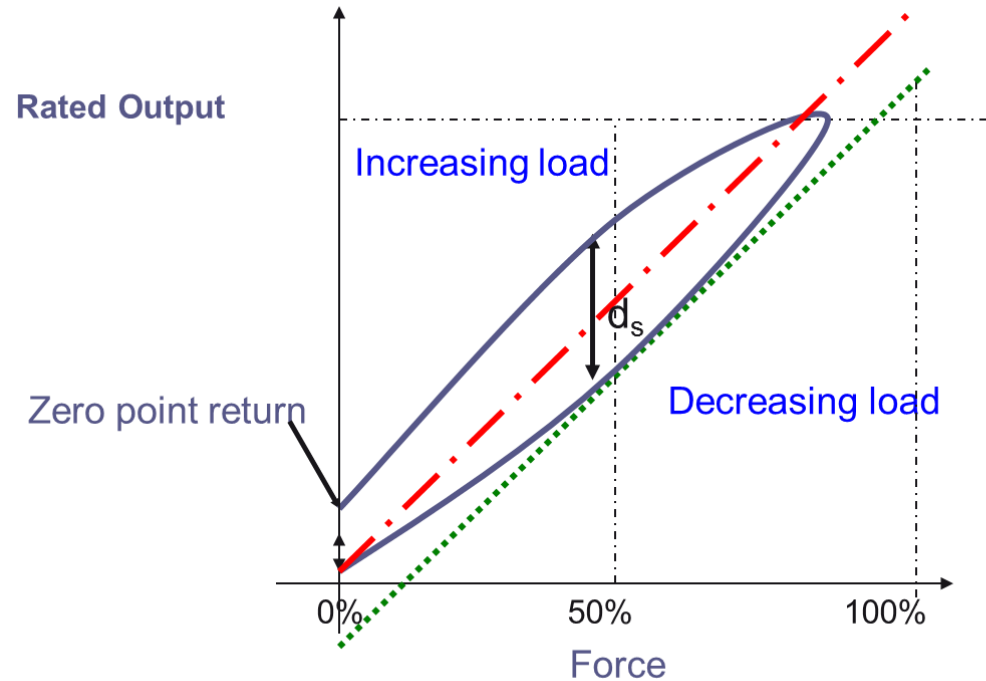
$$\Delta_{d \text{ lin}} = 0.1 \% \text{ de } 5 \text{ kN} = \underline{\underline{5 \text{ N}}}$$



# Uncertainty of measurement - example

- **Hysteresis**  
(Relative to the end of scale)

$$\Delta_{\text{hys}} = 0.15 \% \text{ de } 5 \text{ kN} = \underline{\underline{7.5 \text{ N}}}$$



$$v = \frac{d_s}{C}$$

Typical values:

S2M:	0,02%
U10M:	0,02...0.05%
C9c:	0,2%

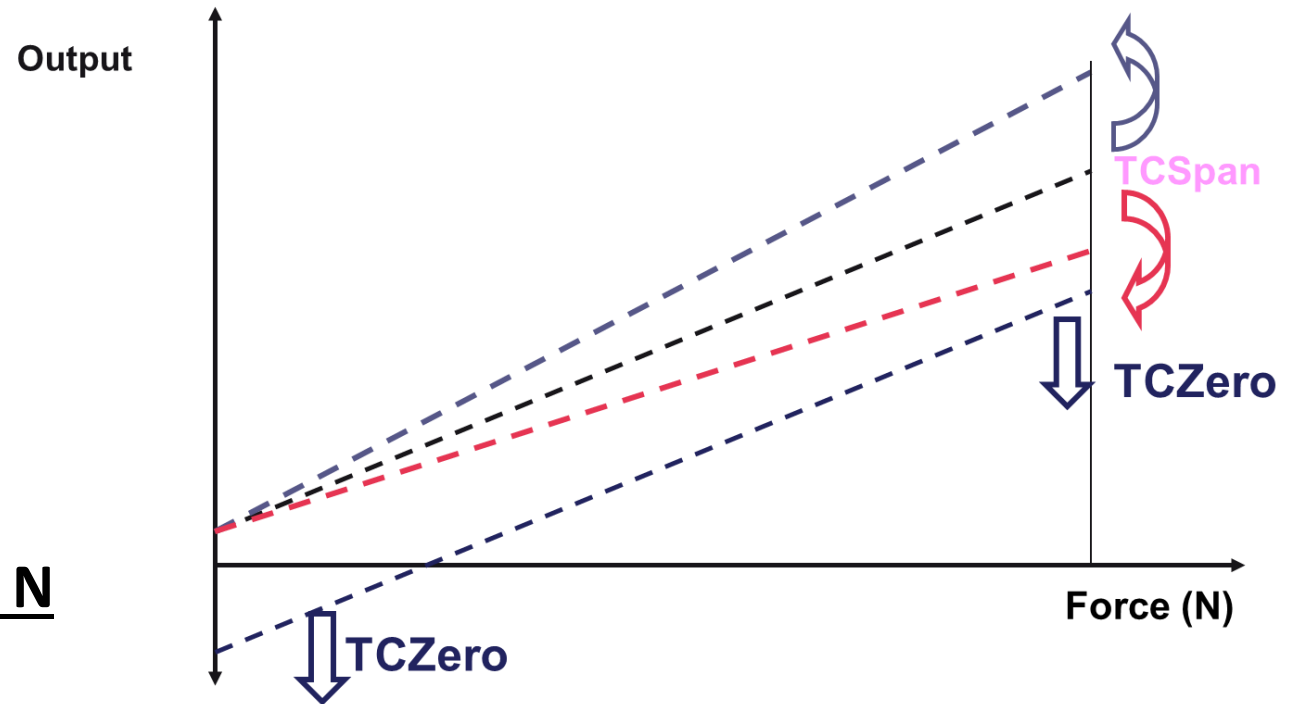
# Incerteza de medição - exemplo

- **TCZero**

(Relativo ao fim de escala)

$$\Delta_{TK0} = 0.05 \% \text{ de } 5 \text{ kN} \cdot (45^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C}) / 10\text{K} = \underline{\underline{5.5 \text{ N}}}$$

TCZero and TCSpan



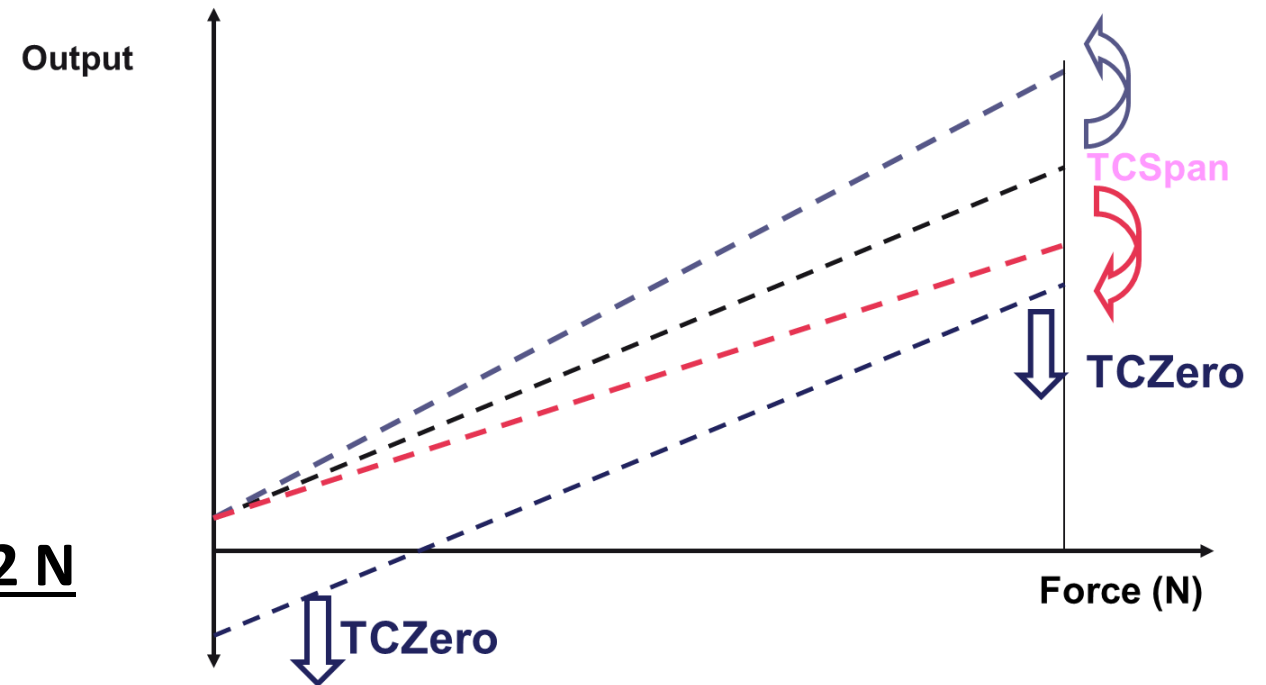
# Incerteza de medição - exemplo

- **TCSpan**

(Relativo ao valor medido)

$$\Delta_{TKC} = 0.1 \% \text{ de } 1 \text{ kN} \cdot (45^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C}) / 10\text{K} = \underline{\underline{2.2 \text{ N}}}$$

TCZero and TCSpan

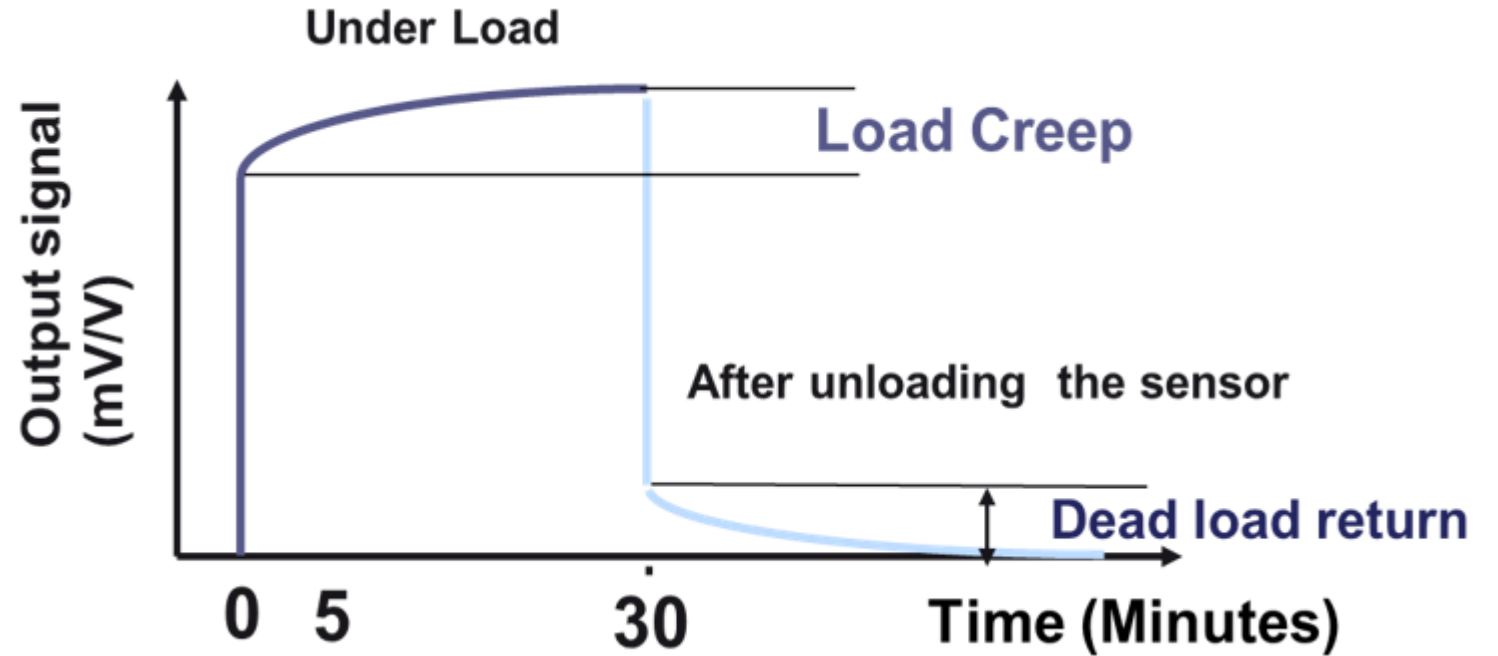




# Uncertainty of measurement - example

- Creep

(Relative to the measured value)



$$\Delta_{cr} = 0.06 \% \text{ de } 1 \text{ kN} = \underline{\underline{0.6\text{N}}}$$

# Incerteza de medição - exemplo

- Tolerancia da sensibilidade (Relativo ao valor medido)

$$\Delta_{dC} = 0.2 \% \text{ de } 1 \text{ kN} = \underline{2 \text{ N}}$$

- Desvio de linearidade (Relativo ao fim de escala)

$$\Delta_{d \text{ lin}} = 0.1 \% \text{ de } 5 \text{ kN} = \underline{5 \text{ N}}$$

- Histerese (Relativo ao fim de escala)

$$\Delta_{\text{hys}} = 0.15 \% \text{ de } 5 \text{ kN} = \underline{7.5 \text{ N}}$$

- TCspan (Relativo ao valor medido)

$$\Delta_{\text{TKC}} = 0.1 \% \text{ de } 1 \text{ kN} \cdot (45^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}) / 10\text{K} = \underline{2.2 \text{ N}}$$

- TCZero (Relativo ao fim de escala)

$$\Delta_{\text{TK0}} = 0.05 \% \text{ de } 5 \text{ kN} \cdot (45^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}) / 10\text{K} = \underline{5.5 \text{ N}}$$

- Creep (Relativo ao valor medido)

$$\Delta_{\text{cr}} = 0.06 \% \text{ de } 3 \text{ kN} = \underline{0.6 \text{ N}}$$

# Incerteza de medição - exemplo

$$\begin{aligned}U_{ges} &\approx \sqrt{\Delta_{dC}^2 + \Delta_{dlin}^2 + \Delta_{hys}^2 + \Delta_{TKC}^2 + \Delta_{TK0}^2 + \Delta_{cr}^2} \\ &= \sqrt{(2 \text{ N})^2 + (5 \text{ N})^2 + (7.5 \text{ N})^2 + (2.2 \text{ N})^2 + (5.5 \text{ N})^2 + (0.6 \text{ N})^2} \\ &\approx \underline{\underline{10,98 \text{ N}}}\end{aligned}$$

**Erro: 1.1% (K=1) ....muito alto??**

- **Sensor de menor capacidade**  
(Menor influencia de todos os parâmetros relativos ao fim de escala)
- **Condições de temperatura mais estáveis**  
(Menor influencia no TCZero/TCSpan)
- **Calibração do sensor**  
(Menor desvio de linearidade, Menor erro no ajuste da sensibilidade)

# Uncertainty of measurement – How to improve



Accuracy Class 0.02



Accuracy Class 0.02



Accuracy Class 0.03

# Incerteza de medição – Como melhorar

- **Tolerancia da sensibilidade (Relativo ao valor medido)**  
 $\Delta_{dc} = 0.01 \% \text{ von } 1 \text{ kN} = \underline{\underline{0.1 \text{ N}}}$
- **Desvio de linearidade (Relativo ao fim de escala)**  
 $\Delta_{dlin} = 0.03 \% \text{ von } 5 \text{ kN} = \underline{\underline{1.5 \text{ N}}}$
- **Histerese (Relativo ao fim de escala)**  
 $\Delta_{hys} = 0.03 \% \text{ von } 5 \text{ kN} = \underline{\underline{1.5 \text{ N}}}$
- **TCSpan (Relativo ao valor medido)**  
 $\Delta_{TKC} = 0.015 \% \text{ von } 1 \text{ kN} \cdot (45^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}) / 10\text{K} = \underline{\underline{0.33 \text{ N}}}$
- **TCZero (Relativo ao fim de escala)**  
 $\Delta_{TK0} = 0.015 \% \text{ von } 5 \text{ kN} \cdot (45^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}) / 10\text{K} = \underline{\underline{0.825 \text{ N}}}$
- **Creep (Relativo ao valor medido)**  
 $\Delta_{cr} = 0.04 \% \text{ von } 3 \text{ kN} = \underline{\underline{0.4 \text{ N}}}$

**Erro: 2.33 N (=0.233 %) para k=1**



**Obrigado!**

**Perguntas?**

[felipe@hbkworld.com](mailto:felipe@hbkworld.com)

[iso@hbkworld.com](mailto:iso@hbkworld.com)

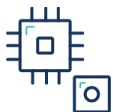
# Experiência de Conferência Virtual Global da HBK

13 a 15 de outubro de 2020



## Apresentação

Os apresentadores são o destaque da Conferência sobre Product Physics HBK. Eles não apenas irão compartilhar as melhores práticas com você, mas também seus conhecimentos especializados em uma ampla variedade de aplicações.



## Tecnologia

Veja as soluções de teste e medição mais recentes da HBK e suas submarcas, HBM, Brüel & Kjær e Prenscia, incluindo testes de energia elétrica, sensores inteligentes e muito mais.



## Networking

Aproveite a oportunidade de conectar-se e aprender com outros usuários da HBK nas áreas de networking. Compartilhe experiências e expanda sua rede pessoal antes, depois e durante a conferência.



## Interação

Participe da nossa área de exposições interativas e explore os desafios da vida real com especialistas em painéis de discussão ao vivo.



[www.productphysics.com](http://www.productphysics.com)

Quer saber mais? Registre-se hoje.