



### Roteiro para cálculo de Incerteza de medição

A - Cálculo de incerteza de grandezas com várias medidas :

A.1 - Valor médio das medidas e desvio padrão da amostra:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}$$

A.2 - Valor da medida e sua incerteza :

Exemplo : Medição do diâmetro de uma barra circular :

São efetuadas várias medidas em diâmetros diferentes,  $i=1$  até  $n$  , e indica-se :

$$D = \bar{D} \pm U_D \quad U_D = 3 \cdot \sigma_D + B_D$$

onde:

3 : Parâmetro "t" de Student para 99,7% de confiabilidade.

$B_D$  : Erro sistemático do instrumento, obtido com calibração comparada a um padrão rastreável

B - Cálculo da incerteza de grandeza com uma medida :

Utilizando um instrumento que seja confiável ou que tenha sido aferido contra algum tipo de padrão com menor divisão da ordem de 10% do valor da menor divisão do instrumento, podemos adotar:

Incerteza :  $U_x = 1/2 \times$  Menor divisão

Desvio padrão :  $\sigma_x = \frac{U_x}{3}$  considerando  $B_x = 0$

C - Cálculo da incerteza de grandezas dependentes :

$r = f ( G_1, G_2, \dots, G_m ) =$  Grandeza dependente

$G_1, G_2, \dots, G_m =$  Grandezas independentes

$\sigma_r =$  Desvio-padrão da grandeza dependente

$\sigma_{G_i} =$  Desvio-padrão das grandezas independentes

$$\sigma_r = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial r}{\partial G_i} \cdot \sigma_{G_i} \right)^2} = \sqrt{\left( \frac{\partial r}{\partial G_1} \cdot \sigma_{G_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial r}{\partial G_2} \cdot \sigma_{G_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial r}{\partial G_m} \cdot \sigma_{G_{mi}} \right)^2}$$

A mesma expressão, utilizando a definição de desvio padrão relativo, fica:

$$\frac{\sigma_r}{r} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial r}{\partial G_i} \cdot \frac{\sigma_{G_i}}{r} \right)^2} = \sqrt{\left( \frac{\partial r}{\partial G_1} \cdot \frac{\sigma_{G_1}}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial r}{\partial G_2} \cdot \frac{\sigma_{G_2}}{r} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial r}{\partial G_m} \cdot \frac{\sigma_{G_m}}{r} \right)^2}$$

Exemplo : Área do círculo em função do diâmetro

$$A = f(D) = \frac{\pi D^2}{4} \quad \Rightarrow \quad U_A = ? \quad \sigma_D = \text{Conhecido [m]}$$

$$\sigma_A = \sqrt{\left( \frac{\partial A}{\partial D} \cdot \sigma_D \right)^2} = \frac{\pi D}{2} \cdot \sigma_D = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{2}{D} \cdot \sigma_D = 2 \cdot A \cdot \frac{\sigma_D}{D} \quad \frac{\sigma_A}{A} = 2 \cdot \frac{\sigma_D}{D} \quad U_A = 3 \cdot \sigma_A$$

D - Ajuste de curvas - Método dos mínimos quadrados

Devido a simplicidade dos cálculos e a extensa aplicabilidade em ajustes de curvas em pontos (regressão numérica), o método dos mínimos quadrados é largamente utilizado na calibração estática de instrumentos de medição.

Equacionamento:

$$\begin{bmatrix} n & \sum x \\ \sum x & \sum x^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y \\ \sum xy \end{bmatrix}$$

$$A = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad B = \frac{\sum y - A \sum x}{n}$$

n - número de pontos (pares x,y) dentro da faixa de uso do instrumento (ou medidor) obtidos durante o processo de calibração.

y = A . x + B - equação linear ajustada sobre n pontos (pares x,y), obtendo-se os coeficientes A,B a partir dos pontos (pares x,y) levantados experimentalmente.

Equação da calibração:

$$V_i = A \cdot V_p + B$$

V<sub>i</sub> - Valor indicado pelo medidor

V<sub>p</sub> - Valor medido ou indicado pelo padrão

Equação do medidor:

$$V_g = (1/A) \cdot V_i - (B/A) \quad V_g - \text{Valor da grandeza medida}$$

V<sub>i</sub> - Valor indicado pelo medidor em uso

---

## Experimentos :

- No 01 - Calibração de medidor de vazão
- No 02 - Determinação de coeficiente de descarga
- No 03 - Determinação de tempo de descarga
- No 04 - Determinação de fator de atrito em tubos
- No 05 - Determinação de coeficiente de arrasto
- No 06 - Calibração de termopar
- No 07 - Determinação de coeficiente de convecção médio em aletas - Convecção natural
- No 08 - Determinação de coeficiente de convecção médio em aletas - Convecção forçada
- No 09 - Trocador de calor
- No 10 - Teste de ventilador com rotação fixa
- No 11 - Teste de bomba hidráulica com rotação variável
- No 12 - Teste de cavitação em bomba hidráulica com rotação fixa
- No 13 - Teste de turbina Pelton
- No 14 - Teste de compressor