

Capítulo 8 Medição da Precisão de Movimento

8.1 Movimento retilíneo

8.1.1 Avaliação da precisão do movimento retilíneo

Ao se fazer a avaliação da precisão de um movimento retilíneo, deve ser seguido o seguinte passo.

- definir o ponto objeto da medição, ou seja, um ponto que pertença ao objeto cujo movimento retilíneo deseja medir e que será alvo de todo processo de medição
- definir a direção de avanço do objeto
- definir os eixos de coordenadas

Aqui, entenda-se como erro de movimento retilíneo, todo desvio do ponto objeto com relação a uma reta ideal (reta datum). Inclua-se ainda neste erro, os desvios com relação à reta ideal, do vetor de direção de movimento, fixo ao ponto objeto. Nisso, ao se analisar a precisão de movimento retilíneo, os seguintes erros deverão ser considerados.

- e_x e e_y : representam os erros de posição vertical e horizontal (translação respectivamente na direção x e na direção y)
- e_α , e_β e e_γ : representam os erros de posição angular (rotação em torno dos eixos x , y e z ; são chamados respectivamente de ângulos de *roll*, *pitch* e *yaw*)
- e_z : em alguns casos, os erros de posicionamento na própria direção de avanço também deverão ser considerados. É o caso por exemplo de uma máquina ferramenta, onde a posição da ferramenta na direção de avanço é um importante parâmetro na determinação da precisão de usinagem.

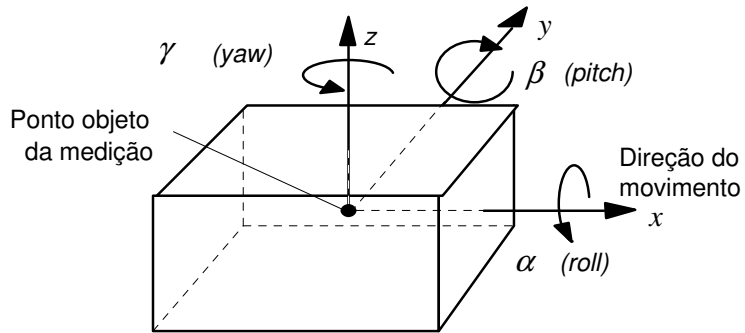


Fig. 1 O problema da medição de retilicidade

8.1.2 Medição

As técnicas empregadas na medição do erro, dependerão do tipo de erro em questão.

(a) direção x: medido com o uso de régua, encoder linear, interferômetro, encoder rotativo* etc.

(*) O uso de encoder rotativo é freqüente em máquinas ferramentas. Aqui o encoder é geralmente acoplado ao fuso de avanço da mesa. Esta montagem, no entanto, gera imprecisões devido à existência de atrito nas diversas partes móveis, de folga inclusive no próprio conjunto de fuso de avanço, de deformações térmicas e deformação por esforços mecânicos.

(b) direções y e z: é feita com a utilização de réguas, interferômetros, método do ponto focal (vide esquema abaixo) etc.

A medição de retilicidade de movimento na direção transversal ao movimento principal (y ou z) poderá ser medido com o uso de uma régua (uma de suas superfícies serve de padrão de reta) e um medidor de deslocamento, por exemplo um relógio comparador. A Fig. 2, ilustra o caso da medição de precisão de movimento da mesa de uma fresadora. Se a parte da régua que é apalpada possuir retilicidade suficientemente elevada (como regra básica precisão da régua melhor que 1/10 da precisão requerida na medição), a leitura no

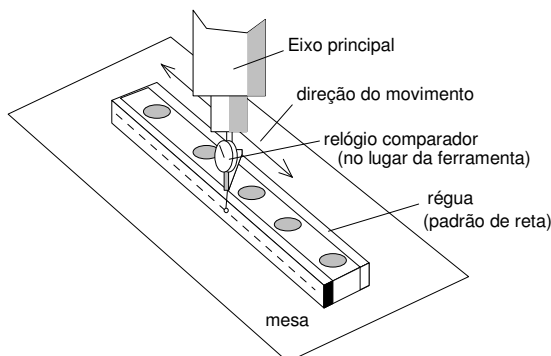


Figura 2. Medição de retilicidade do movimento horizontal da mesa com o uso de um relógio e uma régua

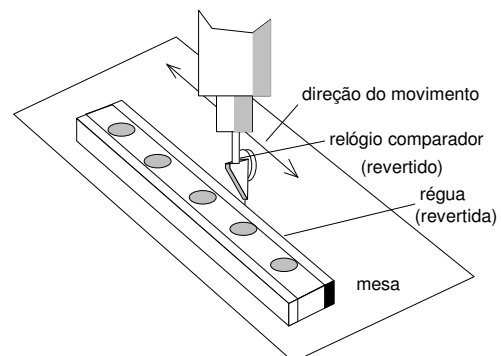


Figura 3. Nova medição, após reversão

relógio dará os erros de reticidade do movimento indicado. Há contudo, situações em que, a precisão requerida na medição é tal que os erros de reticidade da régua já não mais poderão ser ignorados. Neste casos, a leitura do apalpador dará o erro de reticidade da régua sobreposto ao de movimento da mesa. Caso se constate que o erro de movimento da mesa tem suficiente repetitividade, o erro de forma da régua poderá ser removido da leitura, pelo método da reversão (vide Cap.6).

Sendo $ER_m(x)$ o erro de movimento da mesa, $ER_r(x)$, o erro de reticidade da régua, $S1(x)$, a leitura do apalpador obtida na primeira medição, $S2(x)$ a mesma leitura, só que obtida após a reversão, e x a posição na direção do movimento principal, temos:

$$S1(x) = ER_m + ER_r \quad (8.1)$$

$$S2(x) = -ER_m + ER_r \quad (8.2)$$

o que resulta em:

$$ER_m(x) = (S1(x) - S2(x)) / 2 \quad (8.3)$$

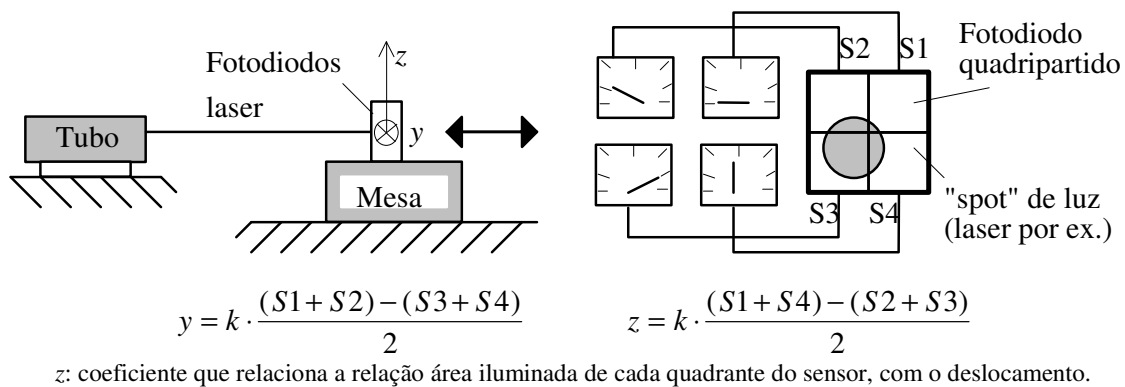


Figura 3. Medição de reticidade por meio de um fotodíodo quadripartido

Além desses métodos, erros de movimento nas direções y e z podem ser medidos através de interferômetro (Vide capítulo referente a interferometria), com a utilização entre outros acessórios do prisma de Wollaston.

(c) direções β e γ : régua, interferômetro, autocolimador etc.

A figura abaixo, mostra uma montagem para a medição, em particular, do erro e_γ (yaw). A técnica consiste basicamente em instalar uma régua paralelamente à direção de movimento da mesa e com a mesa em movimento, medir as alterações nas distâncias entre a régua e dois pontos fixos na mesa, sendo estas medições feitas por qualquer tipo de sensor de proximidade.

A mesma montagem pode ser utilizada para a medição de e_β , mas há que se tomar cuidado com a deformação da régua devido ao peso próprio, pois nesse caso, a régua deverá ser instalada com a face de medição na horizontal. Nesse caso, é preciso estimar o erro devido a esta deformação e verificar se é compatível com a precisão com que se deseja medir a reticidade.

Se γ é um ângulo pequeno:

$$\gamma \cong \frac{\Delta x_r - \Delta x_l}{L} \quad (8.4)$$

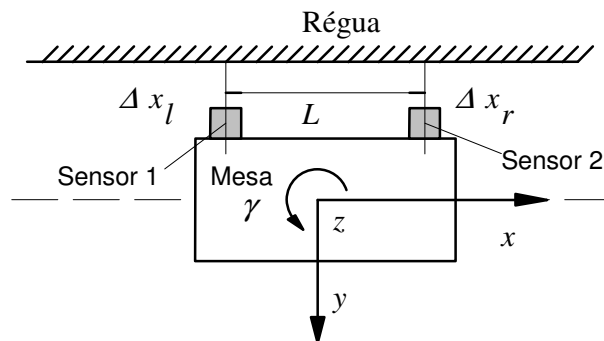


Figura 4 Medição do ângulo yaw (ou pitch)

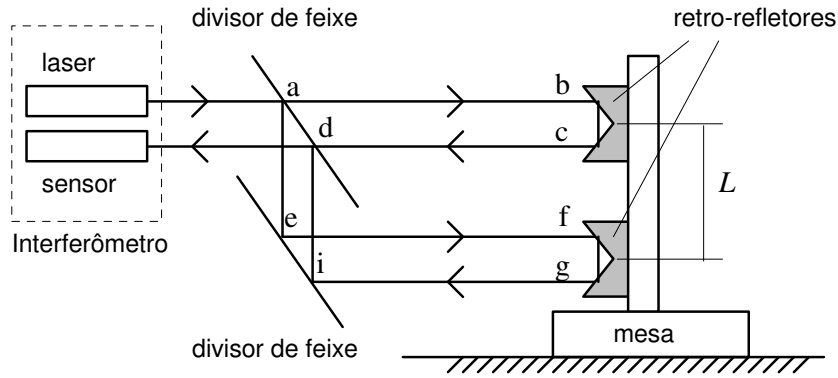


Figura 5 Medição de yaw ou pitch com o uso de um interferômetro

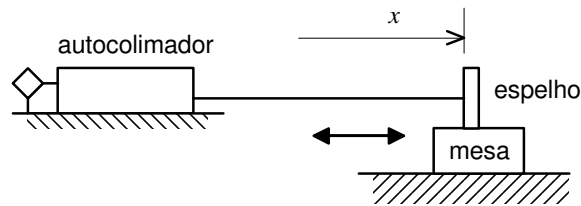


Figura 6 Medição de yaw ou pitch com o uso de um autocolimador

(d) direção α : nível eletrônico, servo-acelerômetro, superfície de líquido

O erro de movimento na direção α , ou seja o *roll*, é o item cuja medição ainda é muito difícil, sendo que não se conhece um método satisfatório que permita uma medição de alta precisão. Poder-se-ia cogitar em utilizar duas régua ou dois feixes de laser como referência e medir a distância de dois pontos fixos à mesa com relação a estas duas referências. Certamente esta solução serve para alguns caso onde não se exige alta precisão. O grande problema aqui, é a dificuldade em se assegurar o paralelismo das duas referências.

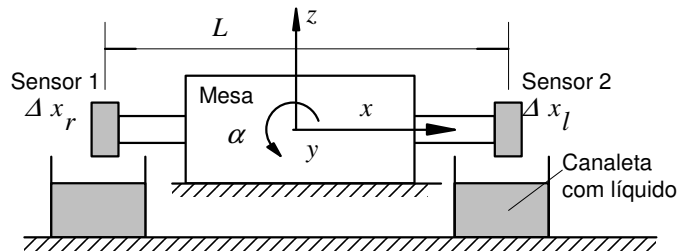


Figura 7 Montagem para a medição do ângulo roll, com o uso de duas superfícies de líquido

(e) Cuidados

Convencionalmente, o método dos autocolimadores vinha sendo utilizado na medição de movimento linear, mas havia uma dificuldade muito grande em desacoplar todas os erros $e_x, e_y, e_z, e_\alpha, e_\beta$ e e_γ , ou seja, eliminar de cada grau de liberdade (erro) a influência dos outros graus de liberdade.

Na figura seguinte, apesar do ponto P_1 fixo ao objeto, descrever a mesma trajetória nos dois caso ilustrados, o autocolimador indicará saídas diferentes nos dois casos. Problema análogo surge quando se utiliza um interferômetro para medir e_z de P_1 , pois, uma vez que P_1 é um ponto no interior do objeto é portanto é obrigatório fazermos a medição num outro ponto, por exemplo P_2 . Nisso surge um erro, pois o movimento de P_1 pode ser deferente da de P_2 .

A solução nesse caso é a medição simultânea, no caso da figura, de e_z (posição vertical) e de e_β (pitch).

O mesmo comentário é válido também no caso da medição de precisão de movimento rotativo, que vem a seguir.

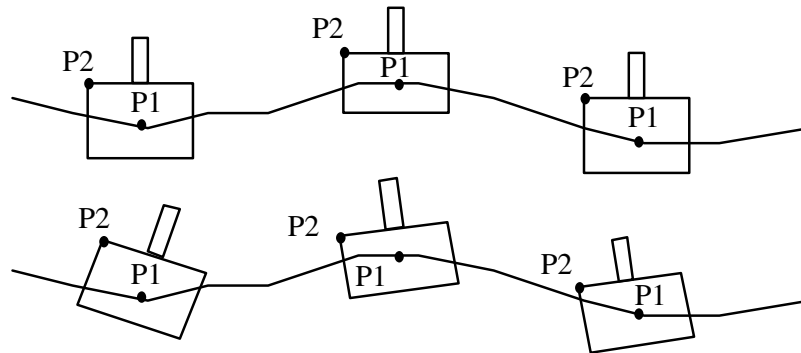


Figura 8 Em ambos os casos, P₁ descreve a mesma trajetória mas a leitura de um autocolimador será diferente.

8.2 Movimento rotativo

8.2.1 Avaliação da precisão do movimento rotativo

Assim como na medição da retilidade, os seguintes passos devem ser seguidos ao se fazer uma medição de circularidade.

- determinar o ponto objeto da medição
- determinar o sentido de rotação
- determinar os eixos de coordenadas

Entenda-se como erro de circularidade do movimento, os desvios da trajetória de um ponto do objeto em rotação, com relação a um círculo ideal. Nesse sentido, se o ponto escolhido coincidir com o centro de rotação e não houver erro de circularidade de movimento, a trajetória se resumirá a um ponto.

Os seguintes erros podem ser identificados como erro de circularidade de movimento:

- e_x, e_y : erros de posição radial (*radial error*)
- e_z : erro de posição axial (*axial error*)
- e_α, e_β : erro de inclinação (*tilting error*)
- e_γ : erro de posição angular no sentido da rotação (*angular position error*)

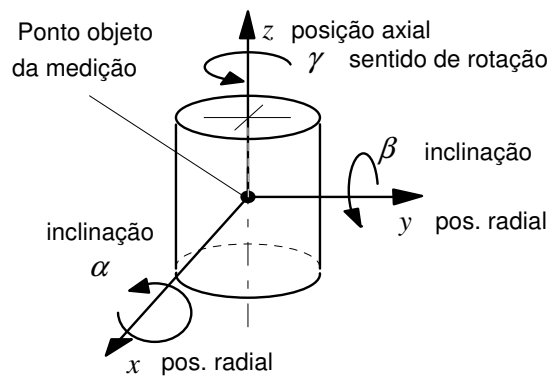


Figura 9 Erros de movimento rotativo

8.2.2 Medição

(a) direção γ : o método mais freqüentemente utilizado é por meio de um encoder rotativo.

(b) direção z : sensor de deslocamento como sensor de proximidade, relógio comparador, apalpador eletrônico etc.

O problema que pode ocorrer neste caso, é o erro de medição que pode ocorrer em decorrência de uma imperfeição na geometria, em particular, na perpendicularidade da face de medição do eixo, por exemplo (Fig.10). Dessa forma, se o eixo cujo movimento é medido, possuir um erro de perpendicularidade de face de um ângulo θ , conforme figura, a leitura do medidor será: $S_1(\gamma) = \Delta z(\gamma) + r\theta \sin \gamma$. Onde, r representa a distância do medidor ao centro de rotação, e : saída do sensor, Δz : deslocamento axial e γ : ângulo de rotação.

Observando somente a saída do medidor, não há como distinguir o erro acima descrito e qualquer outra componente do erro de movimento circular e_z de freqüência 1 ciclo por volta do eixo. Esse problema pode ser sanado primeiramente fazendo com que a distância r , da figura, seja igual a zero. Contudo esta é uma solução de difícil implementação, pois o eixo pode se deslocar lateralmente. A segunda solução consiste em se utilizar dois medidores, conforme mostra a Fig.11.

Enquanto a leitura no medidor 1 é dada por:

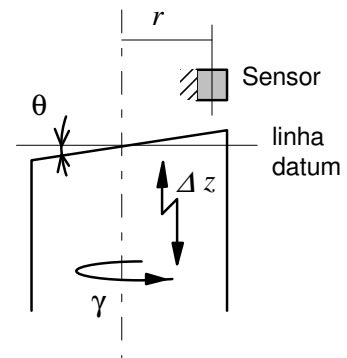


Figura 10 Medição de erro na direção z

$$S_1(\gamma) = \Delta z(\gamma) + r\theta \text{sen } \gamma \quad (8.4)$$

a leitura no medidor 2 será:

$$S_2(\gamma) = \Delta z(\gamma) - r\theta \text{sen}(\gamma + \pi) = \Delta z(\gamma) - r\theta \text{sen } \gamma \quad (8.5)$$

Assim, tirando a média das leituras nos medidores, elimina-se o efeito do erro de forma do eixo.

Observe que análise semelhante pode ser feita com relação aos erros de forma de ordem superior e ímpar (erros que podem ser representados na forma $k \text{sen } 3\gamma$, $k \text{sen } 5\gamma$, $k \text{sen } 7\gamma$ Em todos estes casos, o uso de 2 sensores é eficaz para remover o efeito do erro de forma na medição.

Já no caso de erros de ordem superior e par, $k \text{sen } 2\gamma$, $k \text{sen } 4\gamma$, $k \text{sen } 6\gamma$ o uso de dois medidores já não é mais eficaz, pois, sendo a leitura do medidor 1:

$$S_1(\gamma) = \Delta z(\gamma) + k \sin(i\gamma) \text{ onde } i=2, 4, 6, \dots \quad (8.6)$$

A leitura no medidor 2 será:

$$S_2(\gamma) = \Delta z(\gamma) + k \sin[i(\gamma + \pi)] = \Delta z(\gamma) + k \sin i(\gamma) \quad (8.7)$$

E portanto a média das leituras continuará contendo o erro de medição decorrente do erro de forma.

As análises e as conclusões a respeito dos efeitos do erro de forma na medição são inteiramente análogas aquelas apresentadas no caso da medição de circularidade.

Assim como na medição de circularidade, a solução para um caso em que há a presença de erros de forma de diversas ordens, é a de utilizar mais de 2 medidores. O tratamento por exemplo para o caso de 3 medidores, é análogo ao feito com relação ao método de medição de circularidade com o uso de um bloco em V.

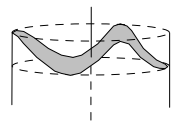


Figura 12 Exemplo de erro de forma de ordem superior e ímpar (ordem 3)

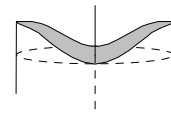


Figura 13 Exemplo de erro de forma de ordem superior e par (ordem 2)

(c) direções x e y: A medição é feita conforme mostra a figura seguinte, com o uso de uma esfera padrão, um disco padrão, uma barra padrão ou qualquer outro padrão que proporcione um círculo de referência com precisão compatível com a precisão da medição do erro de movimento. A leitura do medidor S1 indicará os deslocamentos em x e a leitura de S2, em y.

Entretanto há que se tomar certos cuidados com erros de medição (oscilações da saída do medidor que surgem mesmo com um movimento perfeito) decorrentes de uma excentricidade entre o centro da esfera e o centro de rotação. A solução mais prática para este caso é a centragem (eliminação da excentricidade) mecânica do padrão com a rotação. Mas caso isto não seja possível, a solução é realizar um pós-processamento dos resultados das medições, filtrando e eliminando da seguinte forma, o harmônico de frequência igual à da rotação.

Suponha que sejam obtidos n pontos de medição em x (x_i , $i=1,2,3,\dots,n$) e n , em y (y_i , $i=1,2,3,\dots,n$) ao longo de uma rotação completa do eixo. Os pontos $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$ $P_n(x_n, y_n)$ representam nada mais do que a trajetória que o centro do padrão descreve ao longo da rotação. Nestas condições, calcula-se o valor do raio da circunferência de mínimos quadrados correspondente a esta trajetória, da seguinte forma:

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (8.8)$$

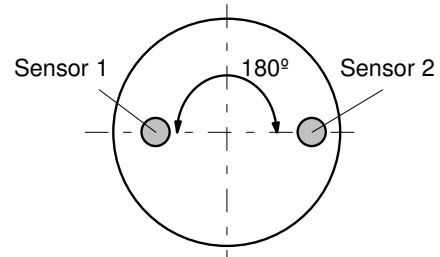


Figura 11 Compensação do erro devido à perpendicularidade do eixo

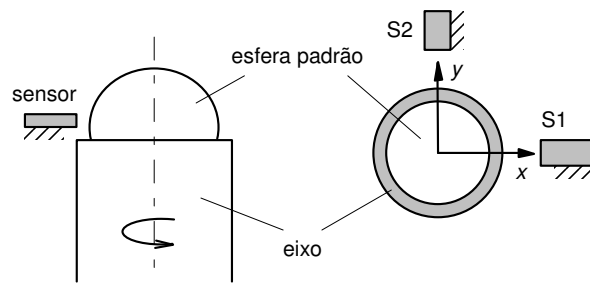


Figura 14 Medição de erros na dir. x e y com o uso de uma esfera padrão

Este raio corresponde ao valor da excentricidade entre o centro do padrão e o da rotação. A orientação inicial ($\gamma=0$) do vetor excentricidade é dada por:

$$\gamma_0 = \tan^{-1}(y_1 / x_1) \quad (8.9)$$

A leitura do medidor 1 e do medidor 2 devem então ser compensados da seguinte forma:

$$S_1(\gamma) = S_1(\gamma) - r \sin(\gamma + \gamma_0) \quad (8.10)$$

$$S_2(\gamma) = S_2(\gamma) - r \cos(\gamma + \gamma_0) \quad (8.11)$$

Se o padrão adotado como referência tiver erros de forma não desprezíveis existem as seguintes alternativas para eliminar o efeito do perfil geométrico sobre a medição do erro de movimento.

1. Medir a referência num medidor de circularidade e compensar o sinal do sensor
2. Se tiver certeza que o erro de forma predominante no padrão é de ordem par, aplicar o método diametral, com dois medidores voltados contra o padrão em posições diametralmente opostas. O erro de movimento é dado pela média da leitura dos dois medidores. Observe que diferente do caso da medição da circularidade, aqui o objetivo é eliminar o efeito do erro de forma do padrão sobre a medição do erro de movimento.
3. Utilizar três medidores e dissociar o erro de movimento e o erro geométrico da referência
4. Se o movimento tiver repetitividade, aplicar o método da reversão.

(d) direções α e β : Com o uso de um disco ou um anel com precisão de forma compatível com a precisão de medição do movimento, realizar uma das montagens indicadas a seguir e medir. Estas montagens permitem medir além dos erros de inclinação, os erros radiais e axiais.

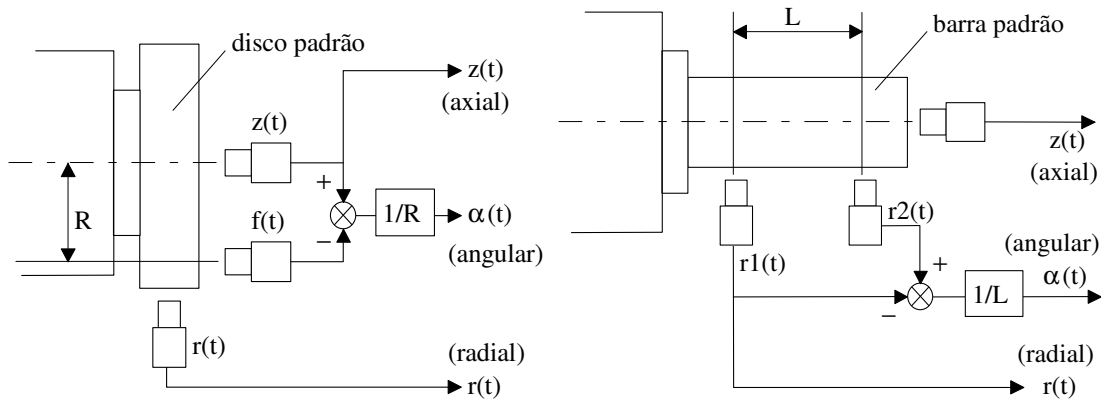


Figura 16 Montagens para a medição de erros de inclinação, além dos radiais e axiais.

8.3 Sobre repetitividade (ou reproduzibilidade)

Para verificar se há ou não repetitividade no erro de movimento, basta coletar a leitura do medidor por vários percursos e compará-los. A leitura do medidor conterá o erro de movimento sobreposto ao erro de forma do objeto da medição (padrão utilizado como referência). Como o erro de forma é em princípio repetitivo (a forma do padrão não se altera ao longo das medições) a repetitividade da leitura indica diretamente a repetitividade do erro de movimento.

$$(\text{LEITURA DO MEDIDOR}) = (\text{ERRO DE MOVIMENTO}) + (\text{ERRO DE FORMA})$$

8.4 Teste simples antes de uma inspeção mais detalhada

Em muitos casos pode surgir dúvidas com relação à precisão de forma do padrão empregado na medição. No caso do movimento retilíneo, a dúvida é: a régua está realmente “reta”? E no caso do movimento rotativo: o disco está realmente “redondo”? Uma verificação relativamente simples é realizar primeiro uma medição usando o padrão, e em seguida realizar uma segunda medição, dando um leve deslocamento do padrão com relação ao movimento.

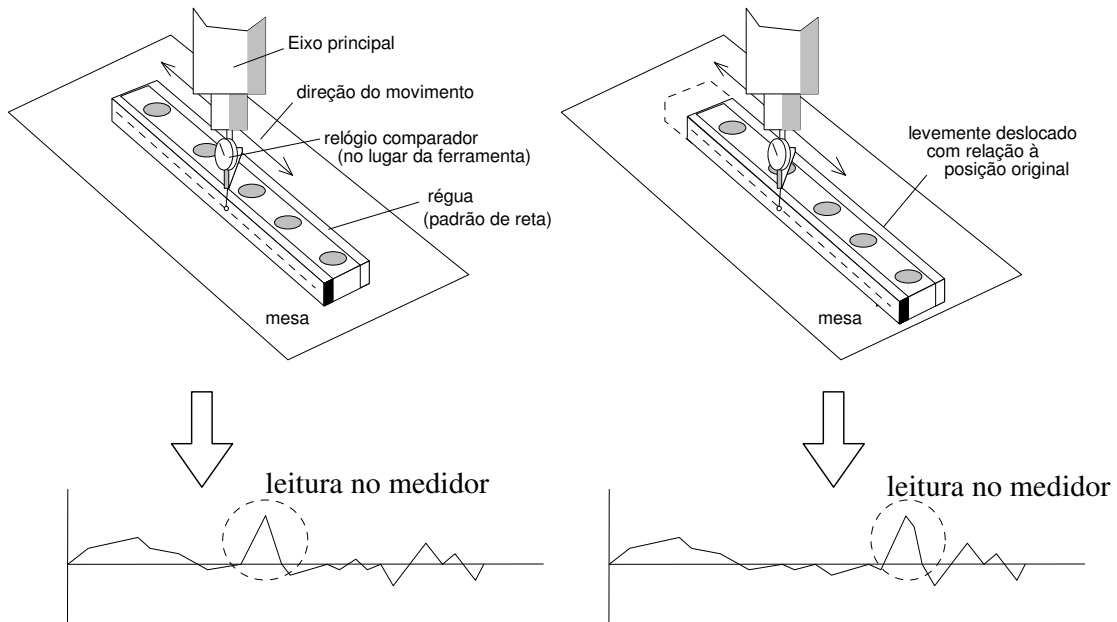


Figura 17 Teste simples para constatar existência de erro de forma no padrão

Neste exemplo percebe-se claramente que um pico que aparecia numa determinada posição no resultado da primeira leitura, aparece deslocado no resultado da segunda leitura. Isto apesar do restante da curva manter o mesmo formato. Aparentemente o pico se moveu juntamente com o padrão, sugerindo que há um erro de forma na régua, e que há a necessidade de um exame detalhado sobre a precisão da régua. Este exame é conclusivo no caso de haver repetitividade no movimento. Caso contrário persistirá a dúvida, pois se torna difícil dizer se o pico se deslocou em função do deslocamento do padrão ou em função de um erro acidental.