

Capítulo 6 Medição de Precisão de Forma

- retilidade (retitude, straightness)
- planicidade (planeza, flatness)
- circularidade (redondeza, roundness, circularity)

Fundamental importância para o bom funcionamento dos próprios instrumentos de medição e das máquinas ferramentas.

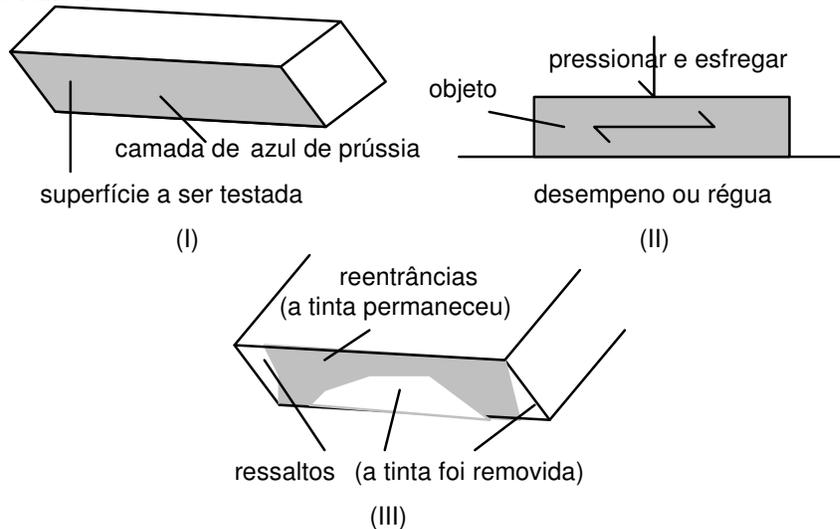
6.1 Retilidade e Planicidade

- Pode provocar erro na linearidade do movimento de guias.
- A acuracidade de muitos dispositivos de medição depende do movimento de um apalpador ou uma agulha sobre uma linha reta. Se a superfície datum (referência) não for suficientemente precisa, em termos de retilidade e planicidade, podem ocorrer sérios erros na medição.
- Já com relação às máquinas ferramentas, o movimento da ferramenta cortante em relação à peça, é controlada ao longo de um guia de configuração adequada. Por isso, toda a imprecisão do guia será transferida à peça.

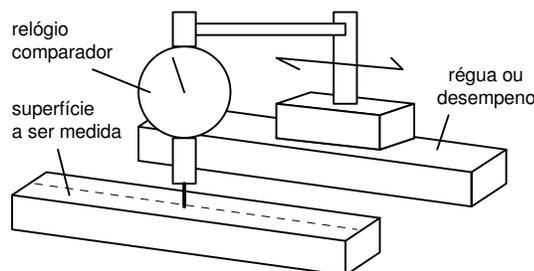
A seguir serão explicados os diversos tipos de medição destes itens de precisão geométrica.

(1) Medição Comparativa

O método consiste em se utilizar régua e desempenos como datum, com o qual se faz uma comparação, daí o termo medição comparativa, da peça em questão. A figura abaixo ilustra um exemplo de medição feita na fabricação de desempenos. Primeiramente se pinta a superfície a ser medida com azul de Prússia. Em seguida esfrega-se a superfície pintada contra um desempeno aplicando uma leve pressão. Em seguida observa-se a superfície pintada e verifica-se onde a tinta foi removida e onde a tinta permaneceu. Os primeiros indicam locais mais salientes enquanto os segundos, os locais mais baixos. No caso da fabricação de desempeno, raspa-se os locais onde a tinta foi removida e em seguida repete-se a medição. O processo é repetido até que a tinta seja uniformemente removida.

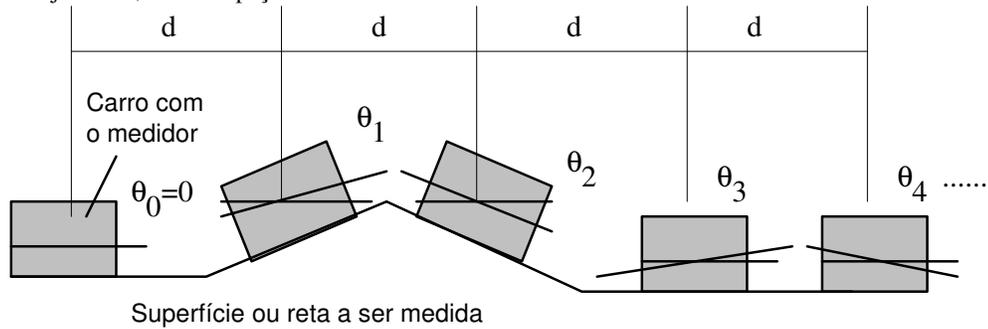


Outro exemplo é dado pela figura seguinte, onde a medição já não é feita com o uso tinta, mas um relógio comparador. O relógio é conectado a uma base que desliza sobre um desempeno ou uma régua. A superfície a ser medida é colocada de forma que o apalpador do relógio toque na mesma. Em seguida, movimentada-se a base do relógio e faz-se a leitura no relógio. Se a linha média ou o plano médio da superfície objeto estiver paralelo à referência, toda deflexão do relógio indicará o erro de retilidade ou de planicidade.



(2) Medição direta

Utilização de: nível de precisão, nível eletrônico, autocolimador, interferômetro a laser. O método para a medição de retilidade ou de planicidade é o mesmo para qualquer instrumento. Consiste em medir a inclinação de um carro dotado de dois apoios enquanto o mesmo é deslocado ao longo da reta ou da superfície que se deseja medir, de um espaço constante.



Dessa forma são obtidos dados relativos à posição do carro e da inclinação. Com base nestes dados reconstrói-se a reta ou o plano medido.

A avaliação numérica da retilidade ou da planicidade é feita então, calculando-se uma reta média ou um plano médio, conforme explicado abaixo e, identificando o maior desvio acima e abaixo da reta ou plano médio. A retilidade ou a planicidade será a soma do módulo dos dois desvios.

O grande problema deste método é referente ao erro de medição, que se acumula e aumenta de tamanho do início ao final da medição. Além disso, mesmo supondo que haja erro somente na medição de θ_0 , o seu efeito em termos de desvio relativo à reta média crescerá proporcionalmente à distância do ponto 0. Ou seja, o erro na posição 2 será o dobro daquela calculada para a posição 1 e assim por diante.

A reta média ou a linha de mínimos quadrados (linha datum) é a linha que passa pela centróide (\bar{x}, \bar{y}) , com inclinação: $a = \frac{\sum x_m y_m}{\sum x_m^2}$, onde x_m, y_m são os desvios respectivamente com relação a \bar{x}, \bar{y} .

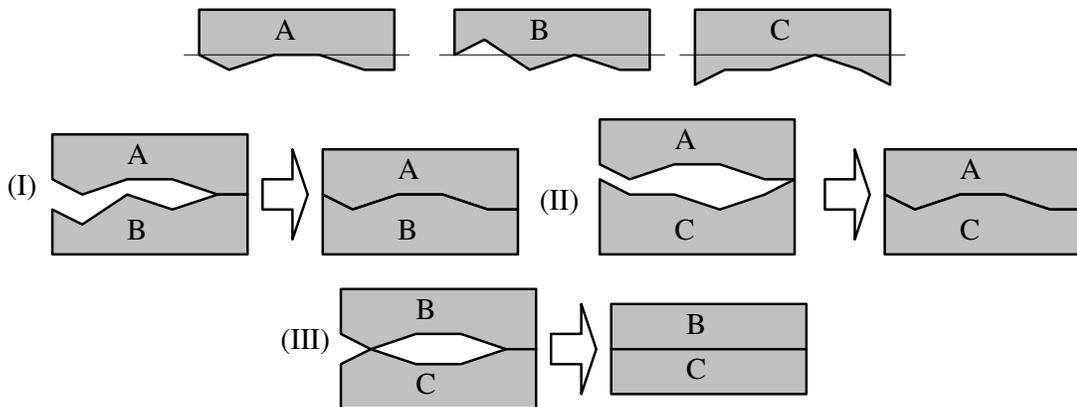
Já o plano de mínimos quadrados (plano datum) é o plano dado na forma $z = z_0 + ax + by$, que passa pela centróide $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, com inclinação

$$a = \frac{\sum y_m^2 \sum x_m z_m - \sum x_m y_m \sum y_m z_m}{\sum x_m^2 \sum y_m^2 - (\sum y_m z_m)^2} \text{ e } b = \frac{\sum x_m^2 \sum y_m z_m - \sum x_m y_m \sum x_m z_m}{\sum x_m^2 \sum y_m^2 - (\sum x_m y_m)^2}$$

(3) Medição Indireta

São métodos em que os resultados relativos à retilidade ou à planicidade não são obtidos diretamente na medição, mas por meio de processamento matemático dos mesmos.

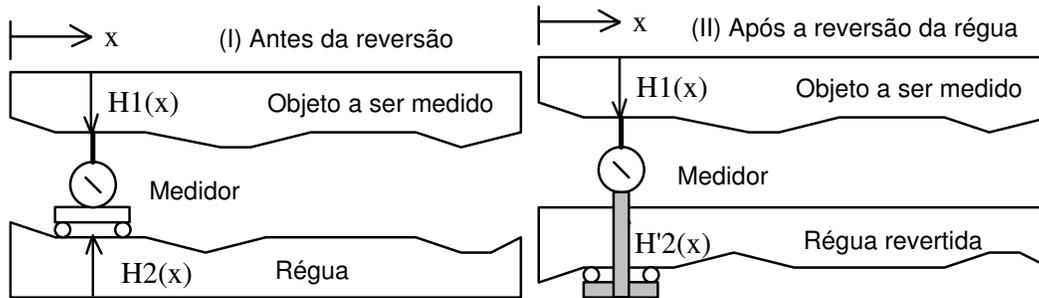
(a) MÉTODO DAS TRÊS PLACAS Trata-se de um método para a fabricação de desempenos sem a necessidade de nenhum tipo de referência (datum). Nela é empregado um método de medição que é a forma originária do método da reversão, que é discutido mais adiante.



Aqui, três placas A, B e C, são fabricadas com alguma máquina de usinagem e neste momento conterão erros de planicidade conforme a figura mostra. Estes erros podem ser quaisquer. Primeiramente as placas A e B são sobrepostas e com o uso de azul de prússia e as diferenças de forma entre A e B são constatadas. Feito isso,

somente as partes salientes da placa B são removidas por meio de rasqueteamento. O processo de medição e rasqueteamento é repetido até que a forma de B coincida perfeitamente com a de A. Em seguida é feito o mesmo com A e C. Por final, as placas B e C são sobrepostas e as diferenças constatadas com o uso do azul de prússia, só que desta vez, o rasqueteamento é feito tanto em B como em C. Se a remoção de material se der de maneira igual em B e em C, o processo termina aí com a obtenção de duas placas planas. Mas como isso geralmente não acontece, o processo é repetido desde o início, por algumas vezes.

(b) MÉTODO DA REVERSÃO É um método que permite a medição, principalmente de retilidade, sem a necessidade de uma referência. O método consiste em executar duas medições comparativas do objeto com a referência (régua). Sendo $S(x)$ a saída do sensor em função da posição x de medição, obtêm-se na primeira medição uma saída $S(x) = H1(x) + H2(x)$, onde, $H1(x)$ e $H2(x)$ representam os erros de retilidade, respectivamente do objeto e da régua. Na segunda medição, após a reversão da régua, obtêm-se um $S'(x) = H1(x) - H2(x)$. É óbvio então que, fazendo a média da diferença $[S(x) - S'(x)]/2$ obtemos o erro de retilidade da régua e conforme necessidade, pode-se obter mesmo o erro de retilidade da própria régua, pela média das duas saídas do sensor.



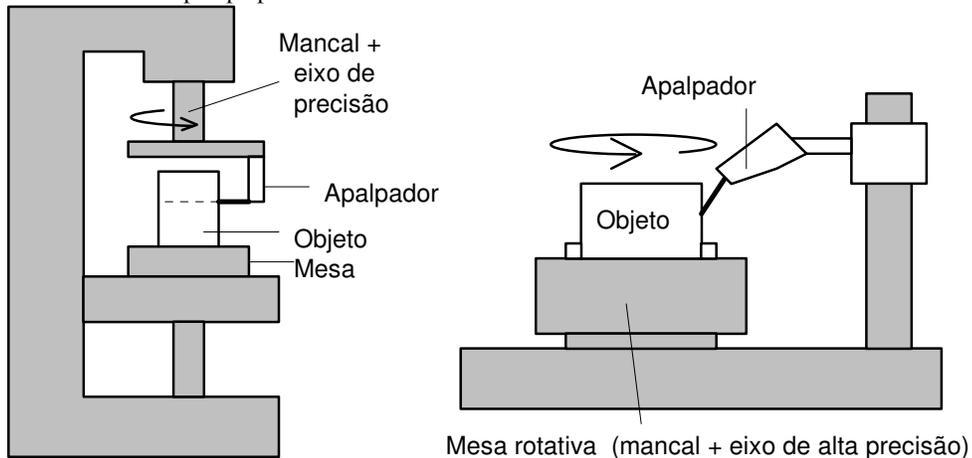
Observe-se que na explicação acima, não foi considerada nenhuma inclinação da régua em relação ao objeto. Isto foi feito porque, a inclinação do objeto não constitui erro de retilidade. Se para algum efeito de avaliação numérica da retilidade a componente de inclinação deve ser eliminada dos resultados da medição, basta obter a reta média conforme explicado anteriormente, e indicar o erro a partir desta reta média.

Outra observação que deve ser feita nesta explicação é que, assumiu-se na explicação que a régua ocuparia a mesma posição na direção x , antes e depois da reversão. Isto pode não ocorrer na realidade mas se ocorrer algum desvio no posicionamento da régua, o seu efeito sobre a precisão da medição, será tanto maior, quanto maior a presença de componentes de ordem elevada no perfil do objeto ou da régua. Ou seja, quanto mais rugosidades de pequeno espaçamento tiver a régua, mais sensível será o método ao referido desvio de posicionamento.

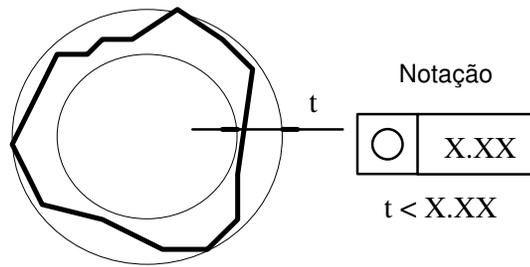
6.2 Circularidade

(1) Medição direta

(a) MEDIDOR DE CIRCULARIDADE Equipamentos dedicados à medição de circularidade, na qual, é feita uma comparação entre o movimento rotativo de um eixo de alta precisão com o perfil do objeto. Podem ser do tipo mesa rotativa ou do tipo apalpador rotativo.



Maneiras de se definir circularidade: Segundo Normas Brasileiras, a circularidade é o anel dentro do qual o perfil real da peça deve estar contido e o erro de circularidade é a diferença dos raios interno e externo do anel.



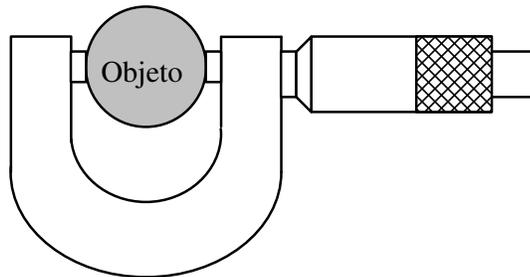
Internacionalmente são conhecidos os seguintes métodos para se definir circularidade.

- LSC (*least square center*): desvio máximo e mínimo com relação a uma circunferência cujo raio minimiza a somatória dos erros de circularidade.
- MIC (*maximum internal circumference*): dado pela diferença de raio entre a maior circunferência interna tangente ao perfil real e à menor circunferência externa concêntrica à primeira.
- MCC (*minimum contouring circumference*): dado pela diferença de raio entre a menor circunferência externa e a maior circunferência interna concêntrica à primeira.
- MZC (*minimum zone center*): dado pela menor diferença entre os raios de duas circunferências concêntricas que tocam a figura por dentro e por fora.

Qual dela utilizar, dependerá da aplicação. Particularmente, o LSC é calculado da seguinte maneira (detalhes do equacionamento no livro *Metrology & Precision Engineering*, A.J.T.Scarr). Estabelece-se um sistema de coordenadas x-y, com origem nas proximidades da centróide da figura (resultado da medição de circularidade). Sendo x_i e y_i as coordenadas de cada um dos n pontos medidos, a coordenada do centro LSC é dado pelo ponto (a,b) calculado da seguinte forma.

$$a = 2 \frac{\sum x_i}{n} \quad b = 2 \frac{\sum y_i}{n}$$

(b) MÉTODO DIAMETRAL Aqui, a medição é feita com o uso de um micrômetro ou um paquímetro. O objeto é aprisionado e o seu diâmetro medido em diversas orientações. Se o objeto apresentar um perfil circular perfeito, o medidor sempre indicará uma mesma leitura. Trata-se de um método extremamente simples, mas possui suas limitações conforme é explicado abaixo.

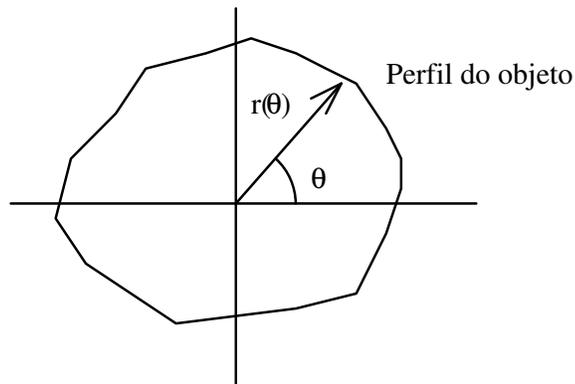


Conforme ilustra a figura abaixo, o que se mede no método diametral é

$s(\theta) = r(\theta) + r(\theta + \pi)$, onde, $s(\theta)$ representa a leitura do medidor conforme a orientação θ do objeto e $r(\theta)$, o erro de circularidade do objeto. Vamos então representar $r(\theta)$ na forma de série de Fourier:

$$r(\theta) = a_0 + \sum_{i=1}^n c_n \cos(\theta + \psi_n)$$

onde, a_0 , c_n e ψ_n são termos constantes.



Dessa forma $r(\theta+\pi)$ será: $r(\theta) = a_0 + \sum_{i=1}^n c_n \cos(\theta + \pi + \psi_n)$, ou seja,

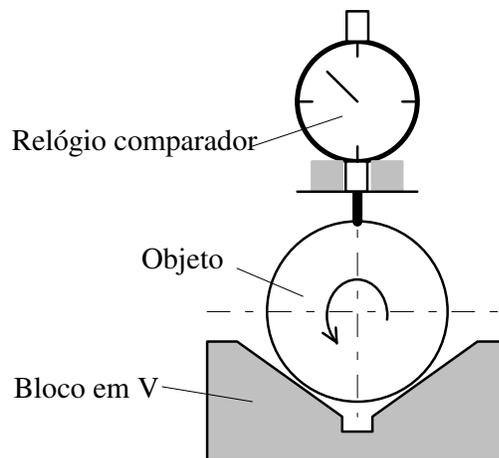
$$\begin{aligned} r(\theta) &= a_0 + \sum_{i=1}^n c_n [\cos(n\theta + \psi_n) \cos(n\pi) - \text{sen}(n\theta + \psi_n) \text{sen}(n\pi)] = \\ &= a_0 + \sum_{i=1}^n c_n [\cos(n\theta + \psi_n) \cos(n\pi)] \end{aligned}$$

Assim a leitura do medidor será:

$$s(\theta) = 2a_0 + \sum_{i=1}^n c_n \cos(n\theta + \psi_n) [1 + \cos(n\pi)]$$

Nesta última equação, se $n=2,3,6,8,\dots$ (par), o termo $[1+\cos(n\pi)]$ será igual a 2, ou seja, as componentes de ordem par serão amplificadas de duas vezes. Entretanto, se $n=1,3,5,7,\dots$ (ímpar), o termo $[1+\cos(n\pi)]$ será igual a zero e as componentes de ordem ímpar do perfil do objeto não serão medidas. Pois é esta a maior deficiência deste método. O objeto pode ter um perfil próximo a um triângulo (figura lobular, experimente traçar a curva $r=r_0+k\text{sen}3\theta$) mas o erro não será detectado neste método.

(c) MÉTODO DO BLOCO EM V O objeto é colocado sobre um bloco em V e um medidor (um relógio comparador, por exemplo), instalado de modo a tocar na parte superior do objeto. Gira-se o objeto e faz-se a leitura do medidor. Na ausência de erros de circularidade, o medidor acusará um valor constante. É um método simples e que pode perfeitamente ser utilizado na simples verificação (não da medição) da circularidade de objetos. O grande problema do método está na dificuldade de se conhecer o perfil real do objeto a partir dos resultados da medição. Conforme foi visto anteriormente, o perfil do objeto pode ser expresso na forma de série de Fourier, pela composição de diversas componentes. Neste método de medição, as diversas componentes são amplificadas de maneira desigual e por isso a leitura do medidor não representa diretamente o valor do erro de circularidade. O modelamento deste método será deixado para cursos mais avançados.



2) Medição indireta Assim como na medição de retilidade e planicidade, os métodos indiretos consistem em métodos nos quais, a circularidade de um objeto não é obtido diretamente, mas pelo tratamento matemático de outras medições.

(a) MÉTODO DA REVERSÃO O princípio deste método é ilustrado na figura seguinte. Aqui, é admitida a hipótese de que os erros acidentais no movimento do eixo do medidor de circularidade e na medição em si são desprezíveis, portanto têm-se uma alta repetibilidade. O objeto com perfil circular é medido duas vezes no medidor de circularidade. Feita uma primeira medição, o objeto é girado de 180° com relação a um referencial fixo no sistema rotativo do medidor, com relação ao eixo, no caso da figura (reversão do objeto). Ainda, o apalpador do medidor também é instalado no lado oposto ao que se encontrava originalmente e a sua direção de sensibilidade revertida (reversão do sensor).

Sendo, S_1 a saída do sensor em função do ângulo de rotação θ do apalpador antes da reversão, S_2 , idem após a reversão, H o erro de circularidade do objeto e T o erro de movimento rotativo do eixo do medidor, temos que:

$$\text{antes da reversão: } S_1(\theta) = H(\theta) - T(\theta)$$

$$\text{após a reversão: } S_2(\theta) = H(\theta) + T(\theta)$$

Dessa forma, é imediato observarmos que o erro de circularidade do objeto pode ser obtido por:

$$H(\theta) = \frac{S_1(\theta) + S_2(\theta)}{2}$$

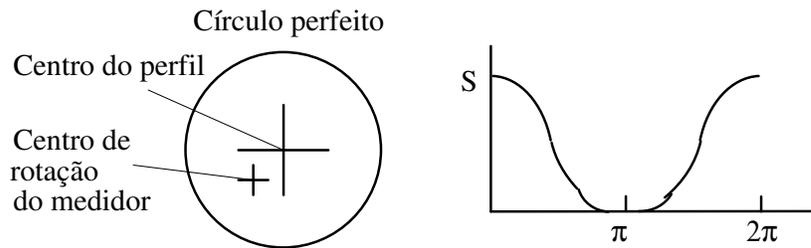
Importante observar que, o erro de movimento do eixo do medidor antes e depois da equação foram assumidos idênticos, sendo por isso escritos na mesma forma, $T(\theta)$ e graças a esta hipótese, este termo pode ser eliminado no cálculo de H .

Caso necessário, o método permite ainda calcular o erro de movimento do eixo do medidor, da seguinte forma:

$$T(\theta) = \frac{S_2(\theta) - S_1(\theta)}{2}$$

Apesar do método da reversão para medição de circularidade apresentar um procedimento pouco semelhante ao método da reversão para retilidade, podemos observar que no aspecto de equacionamento os dois métodos são idênticos.

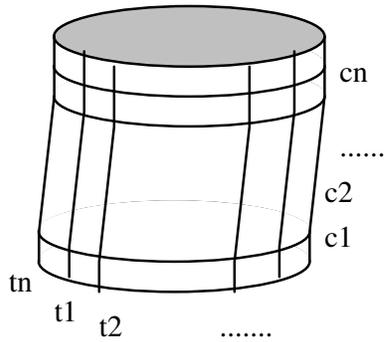
Até aqui, não se comentou nada a respeito da "centragem" do objeto no medidor, ou seja, o procedimento no qual a centróide da perfil do objeto é justaposta com o centro de rotação do eixo do medidor. A não centragem pode implicar no surgimento na leitura do medidor, de uma componente periódica de período 1 ciclo por volta do eixo do medidor e de amplitude igual à excentricidade entre o centro de rotação e a centróide do perfil do objeto. Esta componente muitas vezes é indesejável na avaliação da circularidade.



A eliminação desta componente 1 ciclo por volta, pode ser feita atuando-se na centragem física do objeto no medidor, mas por outro lado, pode ser feita matematicamente, o que é muito mais cômodo em muitos casos. O processo matemático consiste primeiramente em expandir a leitura S do medidor numa série de Fourier, usando para isso, um algoritmo computacional de alta eficiência conhecido como FFT (Fast Fourier Transform). Uma vez feita a transformação, a componente de ordem 1 é igualada a zero, e em seguida procede-se à transformação inversa de Fourier, usando neste caso o algoritmo IFFT (Inverse Fast Fourier Transform).

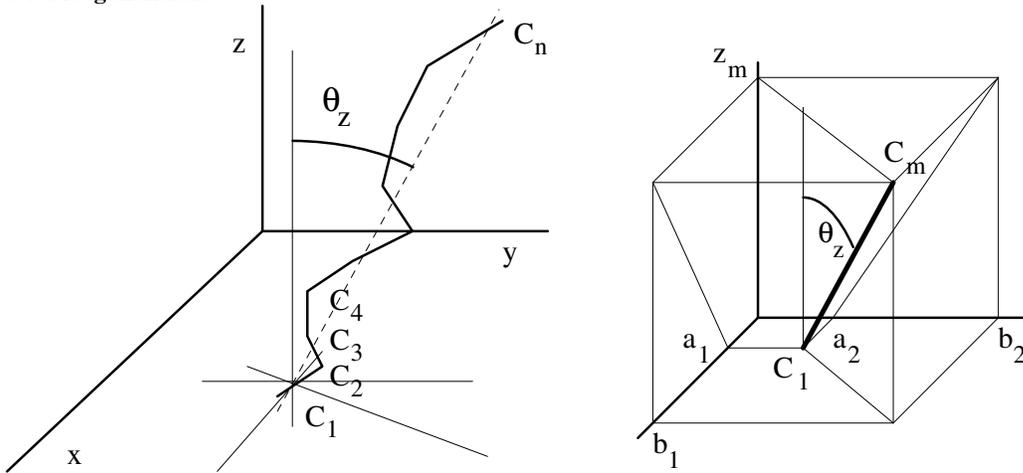
6.3 Cilindricidade

A medição de cilindricidade, consiste basicamente em repetir medições de circularidade e de linearidade ao longo de toda a superfície lateral do corpo cilíndrico.



O erro de cilindricidade será definido então como sendo $máx(c_{i,máx}, r_{i,máx})$.

6.4 Ortogonalidade



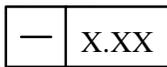
A medição de ortogonalidade consiste primeiramente na execução de medições de circularidade em diversas alturas do cilindro cuja ortogonalidade se deseja medir. Determina-se em cada medição de circularidade, o centro da circunferência ($C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$) dos mínimos quadrados (LSC). Com os centros $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$, calcula-se a reta dos mínimos quadrados e determina-se a sua inclinação θ_z com relação ao eixo z . θ_z será então a ortogonalidade.

O cálculo de θ_z pode ser feito projetando a curva C_1C_n no plano xz e no plano yz obtendo $[C_1C_n]_{xz}$ e $[C_1C_n]_{yz}$. Para $[C_1C_n]_{xz}$ e $[C_1C_n]_{yz}$, obter as respectivas retas dos mínimos quadrados. Finalmente a inclinação em relação eixo z pode ser obtido por:

$$\theta_z = \arctan \frac{[(b_1 - b_2)^2 + (a_1 - a_2)^2]^{0.5}}{z_m}$$

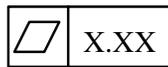
6.5 Notações de precisão geométrica

Precisão de forma:



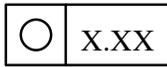
X.XX

Retilinearidade



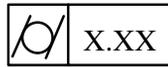
X.XX

Planicidade



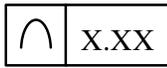
X.XX

Circularidade



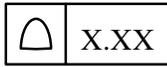
X.XX

Cilindricidade



X.XX

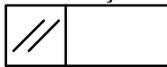
Forma de uma linha qualquer



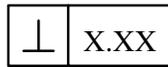
X.XX

Forma de uma superfície qualquer

Precisão de orientação:

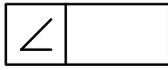


Paralelismo



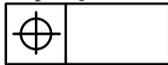
X.XX

Perpendicularidade



Inclinação

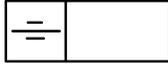
Precisão de posição:



Posição de um elemento



Concentricidade / Coaxialidade



Simetria