

Conteúdo

1	Sequência Cinemática e tipos de <i>CMM</i>	3
2	Principais constituintes de uma Máquina de mesa fixa e pórtico móvel	4
3	Calibração do Palpador	6
4	Modo de efectuar a medição de coordenadas	7
5	Fontes de erro numa <i>CMM</i>	10
6	Descrição dos Vinte e Um Parâmetros de Erro	11
6.1	Desvios de Posicionamento	12
6.2	Desvios de Alinhamento	12
6.3	Erros de Rotação	13
6.4	Desvios de Ortogonalidade	13
7	Bibliografia	14

Lista de Figuras

1	Sequência cinemática de uma <i>CMM</i>	3
2	Máquina de mesa fixa e pórtico móvel	4
3	Resultado da calibração de uma combinação de palpadores.	7
4	Constituintes principais de uma máquina de medição de coordenadas de mesa fixa e pórtico móvel.	9
5	Efeitos dos desvios correspondentes ao movimento do carro da <i>CMM</i>	14

Constituição e Funcionamento de uma Máquina de Medição de Coordenadas. Erros Paramétricos e Modelo Cinemático

Manuel António Facas Vicente

Setembro de 2000

Uma máquina de medição de coordenadas (*Coordinate Measuring Machine - CMM*) é um sistema mecânico e electrónico cujo objectivo último é a obtenção de coordenadas cartesianas de pontos sobre superfícies sólidas. No entanto, devido à existência de diversas fontes de erro associadas ao sistema, os resultados por ela fornecidos não são exactos.

O objectivo principal deste capítulo é explicar, de uma forma breve, em que é que consiste uma máquina de medição de coordenadas, qual a sua utilidade e modo de funcionamento e construir um modelo cinemático para o seu comportamento mecânico, que nos permita corrigir as coordenadas lidas pela máquina, a partir da consideração dos chamados *erros geométricos*.

Existem diferentes tipos de máquinas de medição de coordenadas que se caracterizam habitualmente com base no que se designa por *sequência cinemática* da *CMM*, ligada aos movimentos das suas peças.

Embora o estudo que aqui apresentamos seja válido para outros tipos de *CMM*, faremos uma descrição um pouco mais detalhada dos principais constituintes e do modo de funcionamento de uma máquina de medição de coordenadas dita de *pórtico* móvel e de *mesa* fixa, nomeadamente, no que respeita ao procedimento de *calibração* do *palpador*, ao modo como a máquina adquire as suas coordenadas e à consideração das suas fontes de erro e consequentes erros, sendo dada especial relevância aos *erros geométricos* (*desvios de posicionamento*, de *translação*, de *rotação* e de *ortogonalidade*, descritos por um total de 21 parâmetros).

Pela consideração do movimento geral de três sólidos, materializados pelas peças móveis da *CMM*, será estabelecido um modelo matemático que, descrevendo com fidelidade o seu comportamento, permite obter as coordenadas corrigidas a partir das coordenadas lidas pela máquina e dos diversos *erros geométricos* ou *paramétricos*.

1 Sequência Cinemática e tipos de CMM

Como referimos antes, o objectivo último de uma CMM consiste na obtenção de coordenadas cartesianas de pontos sobre superfícies sólidas. Existem variados tipos de máquinas, que diferem entre si essencialmente pelo tipo de construção e pela precisão de medida, apresentando todas elas, no entanto, características comuns.

Uma máquina de medição de coordenadas é constituída essencialmente por quatro corpos rígidos - três peças móveis e uma base fixa - que se encontram ligados uns aos outros numa sequência que vai desde a peça a medir até ao palpador.

Os eixos da CMM são designados por OX , OY e OZ , e encontram-se na máquina por uma ordem que é escolhida arbitrariamente pelo construtor. No entanto, existe uma ordem intrínseca à própria máquina, à qual chamamos *sequência cinemática da CMM*. Para efeitos de modelação da máquina de medição de coordenadas, apenas é relevante a ordem pela qual surgem os eixos (e não a ordem pela qual surgem os corpos). Por convenção, assume-se que os eixos são considerados pela ordem $OX - OY - OZ$ e que OX , OY e OZ correspondem aos eixos dos movimentos dos corpos 2, 3 e 4, respectivamente (ver figura).

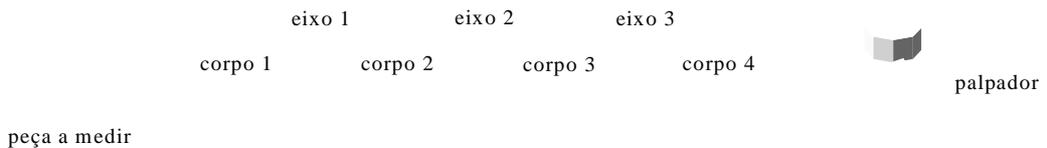


Figura 1: Sequência cinemática de uma CMM

A classificação dos variados tipos de CMM em relação à sua estrutura é baseada na posição da base fixa da máquina na *sequência cinemática*. Por convenção, considera-se na *sequência cinemática* que:

- o corpo 1 suporta a peça a medir, sendo OX definido pela direcção da guia que liga o corpo 1 ao corpo adjacente (corpo 2);
- OZ é definido pela direcção da guia que liga o corpo que suporta a *cabeça de palpação* e respectivo *palpador* ao outro corpo adjacente àquele;
- OY é definido pela direcção da terceira guia.

A introdução do conceito de *sequência cinemática* faz com que seja possível considerar uma única formulação matemática para o problema de modelar o comportamento da CMM.

Existem variados tipos de CMM entre as quais destacamos, devido a ocorrer com maior frequência, a máquina de *mesa* fixa e *pórtico* móvel. Para além desta, e especialmente devido à necessidade de outras estruturas mais bem adaptadas a

certas tarefas específicas, encontramos outros tipos de máquinas, entre as quais podemos resumidamente referir as seguintes: máquina de *pórtico* fixo e mesa *móvel*¹; máquina de *coluna* e *pórtico* fixo e *mesa* duplamente móvel (segundo as direcções *OX* e *OY*); máquinas de *coluna* móvel e *mesa* fixa; máquina de *braço* horizontal fixo e *mesa* móvel; máquina de *braço* horizontal fixo e *mesa* fixa (onde a *coluna* executa movimentos horizontais segundo duas direcções e o *carro* move-se verticalmente); máquina de tipo *cantiliver* de *mesa* fixa; máquina de *cantiliver* móvel e *mesa* móvel; máquina do tipo *gantry* (são máquinas de grandes dimensões onde o *pórtico* se pode resumir a uma viga, que se move sobre outras duas vigas horizontais); máquina de *semi-pórtico*², etc.

2 Principais constituintes de uma Máquina de mesa fixa e pórtico móvel

Iremos, sem perda de generalidade, descrever a máquina de medição de coordenadas de mesa fixa e pórtico móvel, que constitui o tipo mais comum de *CMM*. Esta categoria de máquina encontra-se com maior frequência devido à sua racionalidade do ponto de vista mecânico e económico.

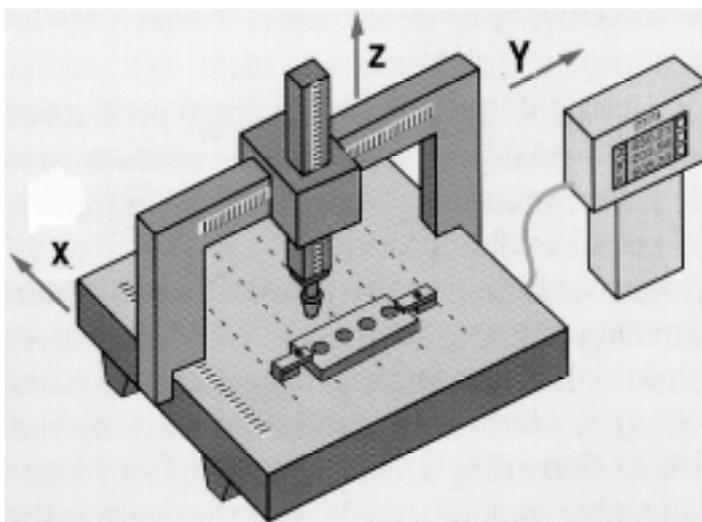


Figura 2: Máquina de mesa fixa e pórtico móvel

¹ Este tipo de máquina é semelhante ao tipo mais comum de *CMM* (máquina de *mesa* fixa e *pórtico* móvel). A principal diferença reside no facto de agora o *pórtico* se encontrar fixo e ser a *mesa* que se desloca segundo o eixo *OX*. Com tal tipo de construção pretende minorar-se os erros que são consequência da instabilidade associada ao movimento do *pórtico*.

² A necessidade de medir peças de grandes dimensões levou, em certos modelos, a substituir o *pórtico* por uma coluna em forma de "L" invertido.

Nesta máquina a peça a medir encontra-se sobre a *mesa* (que corresponderá então ao corpo 1 da *sequência cinemática*). Ligada à *mesa* encontra-se o *pórtico*, que será o corpo 2 e conseqüentemente deslocar-se-á ao longo do eixo OX . Ligado ao *pórtico* encontra-se o *carro* (corpo 3) que se deslocará ao longo do eixo OY . Por fim, temos o corpo 4, designado por *braço*, que se movimenta ao longo de OZ .

Genericamente as *CMM* de *pórtico* móvel e *mesa* fixa têm uma base de suporte (em aço) sobre a qual assenta uma *mesa*, geralmente em granito. A elevada estabilidade química e homogeneidade desta matéria natural, permite criar uma superfície que apresenta um elevado grau de planicidade e cuja dureza faz com que seja resistente aos choques motivados pelo uso (que, mesmo sendo violentos, apenas causam danos a nível local sem deformar toda a *mesa*). Na *mesa* existem alguns orifícios, com roscas de aço, que servem para fixar as peças a medir pela máquina.

Em ambos os lados da base de suporte, fixadas à estrutura, encontram-se as guias do eixo OX (carris horizontais), através das quais o *pórtico* da máquina se encontra ligado à base e que o obrigam a ter movimentos de translação segundo aquela direcção (embora as diversas fontes de erro perturbem esse movimento). A eliminação do atrito no movimento do *pórtico* (e das outras partes móveis) obtém-se normalmente pelo uso de almofadas de ar comprimido, o que implica a existência de um compressor independente que forneça ar comprimido à máquina. As diversas posições que o *pórtico* assume são referenciadas pela sua distância a um ponto fixo e traduzem-se pela coordenada x . O movimento de translação do *pórtico* de uma *CMM* está sujeito a desvios significativos, que são conseqüência do seu grande volume, peso elevado e reduzida base de apoio. Assim, é natural que seja necessário um cuidado especial na concepção desta parte móvel.

Sobre o *pórtico* da *CMM* encontram-se as guias do eixo OY , que irão suportar e orientar o movimento do *carro* da máquina. Este, por sua vez, irá deslocar-se sobre o *pórtico*, segundo aquela direcção. A translação do *carro*, que por princípio se pretende que seja efectuada perpendicularmente à translação do *pórtico*, materializa o movimento de um plano coordenado vertical, paralelo a OXZ .

Ligada ao *carro* encontra-se fixada a guia do eixo OZ , dentro da qual se desloca, na vertical, segundo o referido eixo, o *braço* da máquina. A guia do eixo OZ é um tubo, cuja forma é, na maior parte das vezes, quadrangular, hexagonal ou cilíndrica, que deverá ser simultaneamente perpendicular às linhas de movimento do *pórtico* e do *carro* (o que na realidade não acontece exactamente).

Na extremidade inferior do *braço* localiza-se o *sistema de palpação* ou de *contacto*, composto pela *cabeça*, *haste* e *esfera de palpação*. Designamos por *palpador* o conjunto formado pela *haste* e pela *esfera*. As *esferas de palpação* são normalmente feitas de rubi, que é uma substância com grande homogeneidade e com elevada resistência ao desgaste e como tal adequada para a elaboração de esferas de alta precisão. O desvio de forma esférica de uma *esfera de palpação* é geralmente inferior a $0.25 \mu\text{m}$. Será no processo de *calibração* (mais à frente descrito) que o operador introduz o valor do raio da *esfera de palpação*.

É na *cabeça* que se concentra a parte electrónica do *sistema de palpação*. A conexão entre o *palpador* e a *cabeça* é, na grande maioria das vezes, feita por um sistema de rosca ou baioneta, possibilitando assim a utilização de diferentes *palpadores*. Podem ainda existir sistemas automáticos que modificam a orientação das *hastes*.

Na base da *cabeça*, no seu centro, encontra-se o *ponto de referência*, em relação ao qual é referenciada a posição do *palpador*. Este ponto, extremamente importante, especialmente quando utilizamos diferentes *palpadores*, não está necessariamente materializado na *CMM*. No caso em que a ligação entre a *haste* e a *cabeça* é feita por meio de um sistema de rosca, o *ponto de referência* situa-se no centro da rosca. A determinação da posição do centro da *esfera de palpação* em relação ao *ponto de referência* é feita através de um procedimento denominado por *calibração*.

3 Calibração do Palpador

Antes de ser usado, o *palpador* é sujeito à operação de *calibração*, que pretende cumprir dois objectivos:

- determinar a flexão da *haste* sob a acção das forças de contacto com a peça a medir;
- determinar a posição do centro da *esfera de contacto* em relação ao *ponto de referência do braço*³.

O *palpador* exerce sobre a peça a medir uma força de contacto localizada no ponto da *esfera* que toca a peça, o que produz da parte da peça, sobre o *palpador*, uma reacção oposta e de igual grandeza. Esta reacção tem por efeito provocar uma deflexão da *haste*.

O efeito de deflexão da *haste* traduz-se num deslocamento espúrio adicional do *ponto de referência*, falseando-se, deste modo, a leitura de algumas das coordenadas. Na prática, é como se o *palpador* entrasse dentro da peça. Será pois necessário introduzir uma correcção às coordenadas lidas, que passa pelo cálculo de uma matriz de deflexão.

Devido à sua complexidade, não será feita a descrição exaustiva do processo de *calibração do palpador*.

De forma breve, para realizar a *calibração* é utilizada uma *esfera de calibração* de alta precisão⁴. Após efectuada a *calibração do palpador*, estará determinada a sua matriz de deflexão e ele ficará localizado em relação ao *ponto de referência*, uma vez que serão as coordenadas deste ponto que a máquina regista. A passagem do *ponto de referência* ao *palpador* é equivalente a uma translação do referencial.

³Veremos, mais à frente, que esta operação só tem significado quando usamos mais do que um *palpador*.

⁴Geralmente é uma esfera em aço ou porcelana, com um diâmetro nominal de 50 mm e com um desvio de forma esférica inferior a 0.2 μ m.

Suponhamos que temos um conjunto de *palpadores* (a que chamamos *combinação de palpadores*) e que pretendemos calibrá-los. Pelo processo de *calibração*, vamos determinar, para além das várias matrizes de deflexão, a posição dos diversos centros das *esferas de palpação* em relação ao *ponto de referência*. Em termos práticos, isso significa que iremos localizar as posições dos *palpadores* posteriores ao primeiro *palpador*, em relação a este, o que é equivalente a assegurar que todas as coordenadas medidas, por meio de qualquer um dos *palpadores*, dizem respeito ao mesmo referencial - o referencial do primeiro *palpador*, para todos os fins práticos. Refira-se que o operador deve indicar o raio de cada uma das *esferas de palpação*.

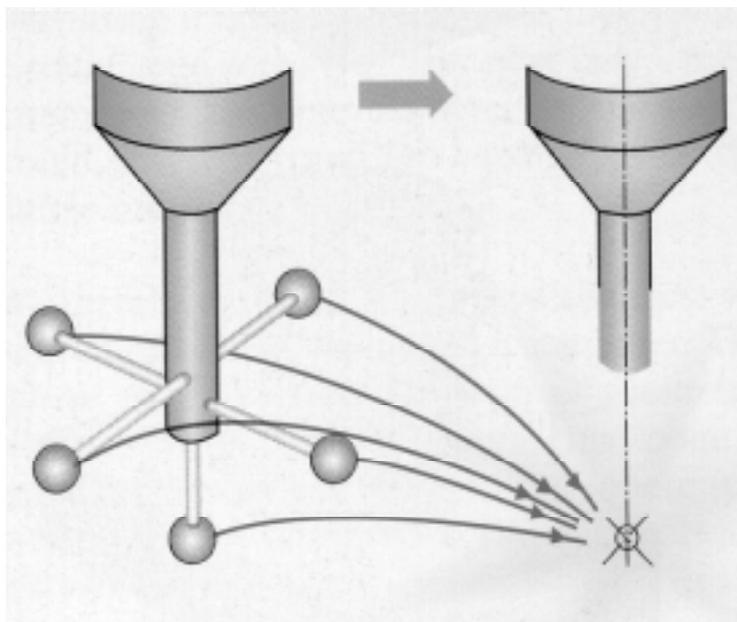


Figura 3: Resultado da calibração de uma combinação de palpadores.

Após efectuada a *calibração*, utilizar um conjunto de diferentes *palpadores*⁵ é equivalente a utilizar um único *palpador* fictício, com *esfera de palpação* de raio nulo, e supor que ele pode aceder a todas as posições da peça a medir.

4 Modo de efectuar a medição de coordenadas

Para que a *CMM* meça as coordenadas de um dado ponto P , situado no volume útil de medição da máquina, o operador (ou o computador que comanda

⁵Quando se pretendem medir determinadas peças com estruturas mais complexas, para ser possível atingir todos os pontos destas, é muitas vezes necessário recorrer a variados *palpadores*, orientados segundo diferentes direcções.

a *CMM*) terá que deslocar sucessivamente as três partes móveis (para fixar ideias, sempre segundo a ordem: *pórtico*, *carro* e *braço*) até que o *palpador* entre em contacto com a peça onde se marcou P . Supomos que os movimentos das três peças móveis são independentes.

Junto aos eixos guia das três partes móveis da máquina, paralelamente a estes, encontram-se réguas de cristal (escalas) onde serão lidas pela máquina, de forma automática, as coordenadas do *ponto de referência*, já que ao dar-se o contacto da *esfera de palpação* com a peça a medir, é accionado um interruptor que fará com que sejam registadas as coordenadas daquele ponto. As coordenadas do *ponto de referência*, que se supõe inicialmente coincidente com a origem do referencial, são obtidas pela medição dos deslocamentos das partes móveis: a amplitude de translação do *pórtico* origina a coordenada x_d do *ponto de referência*; o deslocamento do *carro* origina a coordenada y_d desse mesmo ponto e, finalmente, a sua coordenada z_d é obtida pela translação do *braço*.

Como é sabido, as coordenadas de um ponto dependem do referencial escolhido, o mesmo não acontecendo com, por exemplo, os ângulos e distâncias, que não dependem do valor intrínseco das coordenadas e são independentes do referencial considerado. Habitualmente a máquina fornece, em vez das coordenadas do *ponto de referência*, as coordenadas do centro da *esfera de palpação*, efectuando uma translação associada a um vector com origem no *ponto de referência* do *braço* e extremidade no centro da *esfera do palpador*, vector que é conhecido a partir do processo de *calibração*, sendo esta mudança de origem de referencial indispensável sempre que se utilizam diferentes *palpadores* na mesma tarefa de medição (a cada um deles corresponderá um vector de translação diferente).

As coordenadas x_m , y_m , z_m fornecidas pela máquina para o ponto P são então assim obtidas:

- $x_m = x_d + x_0$,
- $y_m = y_d + y_0$,
- $z_m = z_d + z_0$.

com x_0 , y_0 , z_0 as componentes do vector que liga o *ponto de referência* ao centro da *esfera do palpador*.

Os deslocamentos das três partes móveis da máquina, (*pórtico*, *carro* e *braço*) podem ser efectuados directamente pelo operador (manualmente), ou através de motores que fazem com que essas peças se movimentem. Neste segundo caso, o comando pode ser efectuado pelo operador (por meio de um *joystick*), ou pode ser feito directamente por um computador ligado à máquina.

Em resumo, podemos afirmar que as componentes mais importantes de um sistema de medição de coordenadas são as seguintes:

- a estrutura mecânica com os três eixos de movimento e com os sistemas de medição de deslocamentos;
- o *sistema de palpação* capaz de efectuar o contacto do *palpador* com as peças, segundo diversas direcções espaciais;

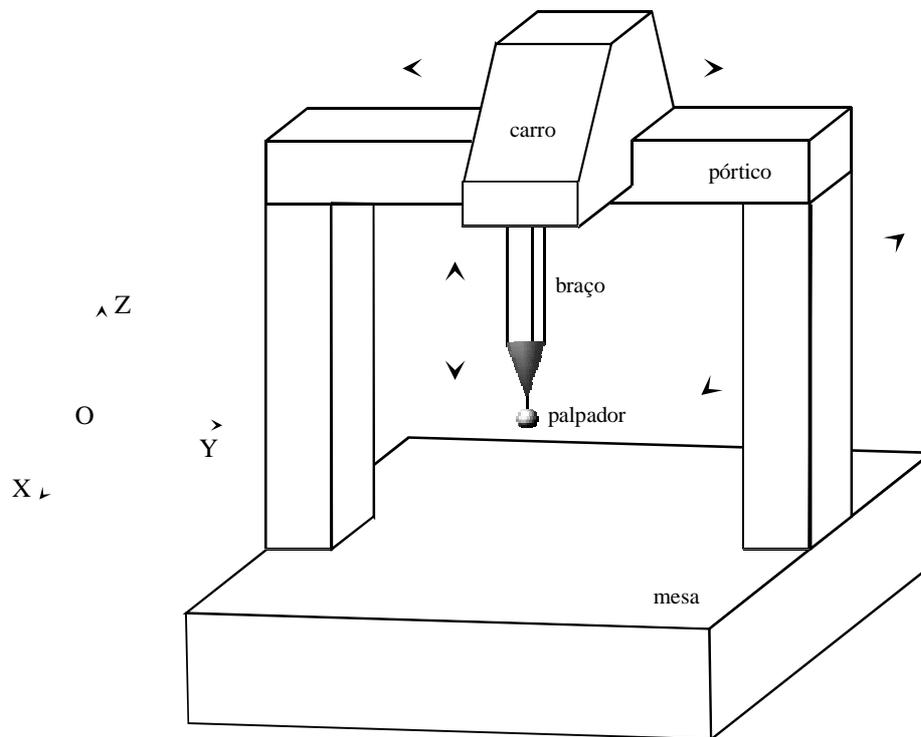


Figura 4: Constituintes principais de uma máquina de medição de coordenadas de mesa fixa e pórtico móvel.

- o sistema de comando dos movimentos das partes móveis (*pórtico*, *carro* e *braço*);
- o computador e o *software* para o cálculo e representação de resultados.

Como referimos, para levar a extremidade do *palpador* ao ponto a medir P efectua-se deslocamentos das três partes móveis da máquina (*pórtico*, *carro* e *braço*), correspondendo todo este processo, para a *esfera de palpação*, à composição de três movimentos:

- o primeiro resulta do movimento do *pórtico*;
- o segundo resulta do movimento do *carro*;
- o terceiro resulta do movimento do *braço*.

O movimento do *pórtico* (respectivamente do *carro*, do *braço*) seria de translação segundo a direcção OX (respectivamente OY , OZ), se não existissem diversos

erros que afectam o funcionamento da máquina de medição de coordenadas que levam a que, na prática, aqueles movimentos sejam muito mais complexos.

Iremos a seguir fazer uma breve descrição das fontes de erro que afectam os resultados fornecidos pela *CMM*.

5 Fontes de erro numa *CMM*

Nas operações práticas executadas com a *CMM* as coordenadas fornecidas não são, como já referimos, completamente destituídas de erros. Estes erros têm origem em diversos factores, que podemos classificar em dois tipos fundamentais: os factores endógenos, com origem na própria máquina e os factores exógenos, consequência das condições ambientais onde ela opera.

Entre os factores exógenos salientamos a temperatura, capaz de provocar dilatações que originam mudança de forma do objecto a medir e de certas partes da *CMM*, com especial relevância para as guias e para as escalas. É importante referir que, para um mesmo instante, a temperatura varia de ponto para ponto da máquina e, por outro lado, para um mesmo ponto, a temperatura varia também ao longo do tempo, originando assim gradientes de temperatura espaciais e temporais. Devido a isso, dá-se o encurvamento das réguas de cristal com inevitáveis consequências nos valores dos deslocamentos medidos. De forma a minorar a influência desta fonte de erro, a temperatura ambiente e a temperatura da peça a medir deverão permanecer dentro de determinados limites especificados, sendo isso conseguido, na grande maioria das vezes, pela utilização de sistemas de condicionamento de ar.

Outros factores exógenos também importantes são: a humidade ambiental (que provoca mudança de volume da *mesa* da máquina e que ainda é capaz de, a longo prazo, provocar corrosão das componentes da *CMM*), as vibrações a que a *CMM* possa estar sujeita, as variações da corrente eléctrica, a variação da pressão de ar, etc.

Mesmo o operador pode introduzir diversos erros na medição, devido a variadas causas, tais como: negligência, escolha menos acertada de *palpadores* e de direcção de contacto com a peça, escolha menos correcta de elementos para construção do referencial da peça, etc.

A própria peça pode ser ainda um factor de erro. Como exemplo disso, pode referir-se a dificuldade de definir elementos geométricos de referência, ou ainda as características físicas da própria peça, tais como a sua rugosidade ou a possibilidade de sofrer deformação (caso das peças plásticas).

O factor endógeno mais importante é, sem dúvida, o desvio do referencial real da *CMM* em relação ao referencial ideal. Com efeito, devido a variados factores, quer endógenos, quer exógenos, o referencial da máquina sofre imperfeições. Essas imperfeições traduzem-se, entre outras coisas, em deficiências na forma e orientação das guias e em folgas nos eixos guia. Como consequência disto, as partes móveis da máquina, quando se deslocam ao longo desses eixos, têm um movimento que não é de translação rectilínea. Na realidade, em vez de se dar apenas a translação desejada segundo o eixo correspondente, ocorrem

também pequenos desvios segundo direcções transversais a essa direcção. Além disso, a parte móvel (*pórtico*, *carro* ou *braço*) sofre ainda pequenas rotações. Desta forma, a trajectória descrita pelo centro da *esfera do palpador* não é uma justaposição de segmentos de recta. Por outro lado, as escalas de cada um dos três eixos e o sistema de medição a elas associado sofrem também deficiências que irão produzir desvios segundo a direcção do deslocamento da parte móvel, provocando erro na coordenada correspondente à direcção do deslocamento, além de que na realidade esses eixos não são perfeitamente ortogonais dois a dois.

Em resumo, para cada parte móvel da *CMM* (*pórtico*, *carro* e *braço*), temos os seguintes erros:

- desvio segundo a direcção do eixo do movimento, também designado por *erro de posição* ou de *posicionamento*;
- desvios segundo direcções transversais à direcção do movimento principal, que são decompostos segundo as direcções dos outros dois eixos de movimento, designados por *erros de translação* ou *desvios de alinhamento*;
- movimento geral de rotação que é decomposto segundo três rotações elementares, em torno dos três eixos coordenados, denominadas por *erros de rotação*;

e, em adição aos erros inerentes a cada uma das três partes móveis da máquina, há que considerar ainda que os eixos de deslocamento dessas três peças não são ortogonais entre si: são os *erros de afinidade*, *erros de esquadria*, *desvios de ortogonalidade* ou *erros de falta de ortogonalidade* entre os eixos.

No seu conjunto, estes erros são conhecidos por erros *cinemáticos* ou *geométricos*.

É de referir a conveniência em utilizar referenciais ortogonais, uma vez que a definição das transformações geométricas e as expressões que descrevem as figuras geométricas se simplificam significativamente quando se utilizam referenciais deste tipo.

6 Descrição dos Vinte e Um Parâmetros de Erro

Vamos de seguida tecer algumas considerações sobre estes desvios que ocorrem na máquina e que influenciam as coordenadas dos pontos fornecidas por esta. Faremos apenas referência aos erros sistemáticos, não entrando em conta com os outros tipos. Os desvios sistemáticos são geralmente descritos por 21 parâmetros de erro, parâmetros esses divididos em quatro grupos, segundo descrevam *desvios de posição*, *desvios de translação*, *desvios de rotação* e *desvios de ortogonalidade*.

Analisaremos, em seguida e separadamente, cada um deles.

6.1 Desvios de Posicionamento

Devido à não linearidade das escalas, as três partes móveis da *CMM* apresentam, como já referimos, *desvios de posição*. Isto significa que a coordenada lida pela máquina, referente à direcção segundo a qual aquela peça móvel se movimenta, não corresponde à coordenada exacta. Teremos assim três *erros de posição*, um para cada parte móvel da máquina e correspondente eixo de movimento, designados genericamente por "αpa", onde α representa o eixo do movimento.

Por exemplo, para o movimento do *pórtico*, se x_a for a abcissa indicada pela máquina, contada a partir de uma posição zero, e x_r for a abcissa exacta para aquela posição do *pórtico*, define-se o *erro de posição* xpx através de:

$$xpx = x_r - x_a.$$

Da mesma forma, para o *carro*, que se desloca segundo a direcção *OY*, existe o *erro de posicionamento* ypy e para o *braço*, que se desloca segundo a direcção *OZ*, o erro de posicionamento zpz , dados respectivamente por:

$$ypy = y_r - y_a$$

e

$$zpz = z_r - z_a,$$

onde, analogamente, y_a e z_a designam a ordenada e a cota indicadas pela máquina e y_r e z_r , a ordenada e a cota exactas.

6.2 Desvios de Alinhamento

Como já foi referido, no movimento de cada parte móvel da *CMM* dão-se translações segundo direcções transversais à direcção principal do movimento. Estas são decompostas segundo as direcções dos outros dois eixos que não correspondem à direcção principal. São estes os desvios designados por *erros de translação*, denotados genericamente por "αtβ", onde α representa o eixo principal do movimento e β o eixo segundo o qual se dá o desvio de alinhamento. Desta forma, dado que temos três peças móveis na *CMM* e que, para cada um dos correspondentes eixos dos movimentos, consideramos duas direcções transversais, temos no total seis *erros de translação*, representados no quadro seguinte:

		Direcções dos desvios		
		<i>OX</i>	<i>OY</i>	<i>OZ</i>
Direcções do movimento	<i>OX (pórtico)</i>		<i>xty</i>	<i>xtz</i>
	<i>OY (carro)</i>	<i>ytz</i>		
	<i>OZ (braço)</i>	<i>ztx</i>	<i>zty</i>	

6.3 Erros de Rotação

Os movimentos de rotação ou balanços indesejados do *pórtico*, *carro* e *braço* da *CMM* podem ser descritos como composições de rotações elementares em torno dos três eixos coordenados (ver apêndice). Esses balanços, três por cada parte móvel, serão os nove *erros de rotação*, representados genericamente por " $\alpha\beta$ ", onde α representa o eixo principal do movimento (X para o *pórtico*, Y para o *carro* e Z para o *braço*) e β representa o eixo em torno do qual se dá a rotação elementar. Os nove balanços, representados no quadro seguinte, correspondem a ângulos de amplitude muito reduzida e têm o nome de *rolamento*, *cabeceio* e *deriva*.

	<i>rolamento</i>	<i>cabeceio</i>	<i>deriva</i>
<i>pórtico</i>	$x\Gamma x$	$x\Gamma y$	$x\Gamma z$
<i>carro</i>	$y\Gamma y$	$y\Gamma x$	$y\Gamma z$
<i>braço</i>	$z\Gamma z$	$z\Gamma x$	$z\Gamma y$

6.4 Desvios de Ortogonalidade

As guias das partes móveis da *CMM* não são ortogonais, pelo que o referencial da máquina é também não ortogonal. Os *erros de afinidade* ou de *falta de ortogonalidade* entre os eixos coordenados, designados por xwy , xwz e ywz , são definidos da seguinte forma:

$$90^\circ + xwy = \langle OX, OY \rangle,$$

$$90^\circ + xwz = \langle OX, OZ \rangle$$

e

$$90^\circ + ywz = \langle OY, OZ \rangle,$$

onde, por exemplo, $\langle OX, OY \rangle$ representa a amplitude do ângulo, em graus, entre as guias dos eixos OX e OY .

Em conclusão, teremos assim, por peça móvel da *CMM*, seis erros, correspondentes a um *desvio de posicionamento*, dois *desvios de alinhamento* e três *desvios de rotação* (ver figura seguinte, correspondente aos erros do *carro*), vindo, no conjunto, 21 parâmetros de erro: três *erros de afinidade* entre eixos e seis erros por parte móvel da máquina.

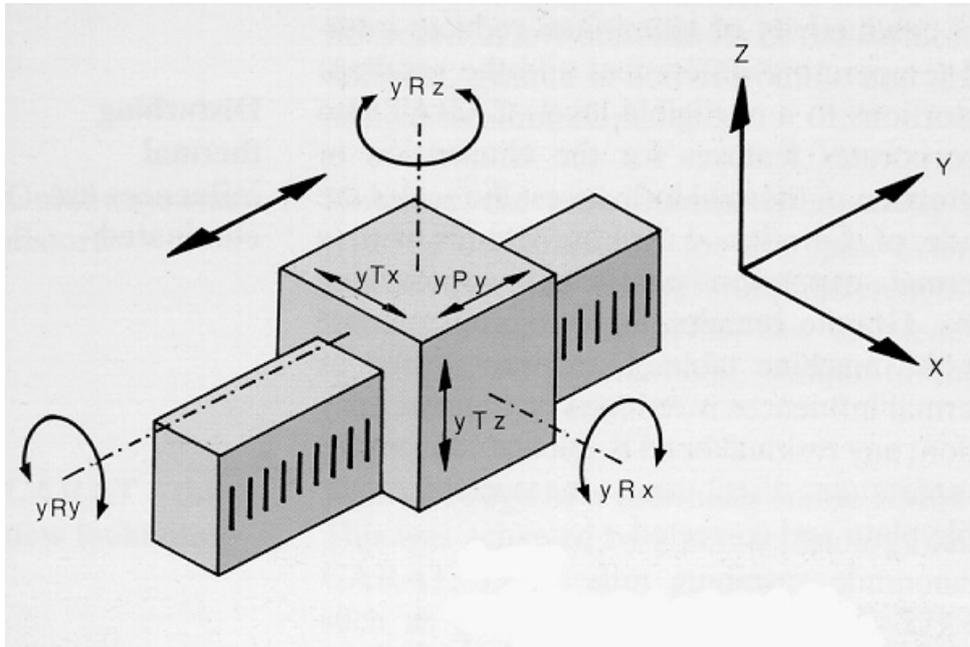


Figura 5: Efeitos dos desvios correspondentes ao movimento do carro da CMM.

7 Bibliografia

Referências

- [1] Alves, A.S. - *Metrologia Geométrica* - Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1996;
- [2] Antunes, Silvestre Dias - *Metrologia & Qualidade* - Instituto Português da Qualidade, Lisboa, 1994;
- [3] Santos, Jorge M. F. dos - *Ajustamento de Quádricas* - Coimbra, 1995;
- [4] Santos, Jorge M. F. dos - *Textos de Apoio às Aulas de Metrologia Geométrica* - Coimbra, Ano Lectivo de 1998/1999;
- [5] Vicente, Manuel A. F. - *Estimação dos Erros de uma Máquina Estacionária de Medição de Coordenadas* - Coimbra, 1997.