

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

QUALIFICAÇÃO DE
MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS
COM PADRÕES CORPORIFICADOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ LEONARDO NORONHA

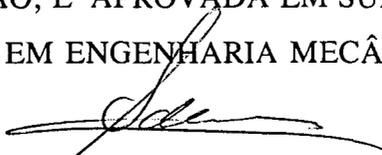
FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 1994.

QUALIFICAÇÃO DE MÁQUINAS DE MEDIR
POR COORDENADAS COM PADRÕES CORPORIFICADOS

JOSÉ LEONARDO NORONHA

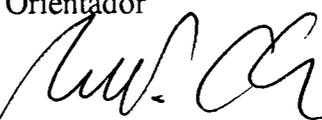
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
METROLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.



Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing.

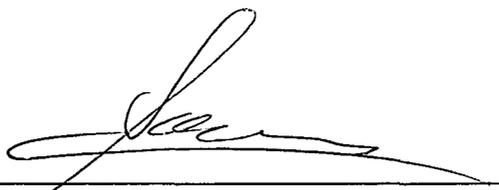
Orientador



Prof. Antônio Fábio Carvalho da Silva, Dr.Eng.Mec.

Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA



Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing.

Presidente



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.Eng.Mec.



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. Ing.

À Silvia, minha esposa,
aos meus filhos, Vinícius e Mariana,
e aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

- À Fundação CERTI e LABMETRO pela disposição de sua infraestrutura;
- À EFEI pelo apoio durante o trabalho;
- Ao professor Carlos Alberto Schneider pela orientação deste trabalho;
- Ao engenheiro Celso Luiz Nickel Veiga pela co-orientação deste trabalho;
- À André Holztratner, Alexandre Lucas e José Lúcio Carriço pelo auxílio na parte experimental do trabalho;
- À todos os colegas do CERTI, LABMETRO e EFEI que contribuíram, direta ou indiretamente, na execução deste trabalho e pelo companheirismo demonstrado ao longo destes anos.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MÉTODOS DE QUALIFICAÇÃO DE CMM.....	2
1.2 PROPOSTA DO TRABALHO.....	4
2. ERROS NAS MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS.....	5
2.1 ERROS GEOMÉTRICOS.....	5
2.2 CAUSAS DE ERROS.....	9
2.2.1 Peça.....	9
2.2.2 Subsistema de Apalpação.....	9
a) Causas Gerais	
b) Causas na medição dinâmica	
c) Causas de erros específicas no cabeçote apalpador medidor	
c) Causas de erros específicas no cabeçote apalpador comutador	
2.2.3 Estrutura mecânica.....	14
2.2.4 Subsistemas de medição de deslocamento.....	14
2.2.5 Condições ambientais.....	17

2.2.6	Operação da CMM.....	22
2.2.7	Software.....	23
3.	QUALIFICAÇÃO DE MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS ...	26
3.1	INCERTEZA DE MEDIÇÃO DA CMM.....	26
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA QUALIFICAÇÃO DA CMM	29
3.2.1	Inspeção/verificação	30
3.2.2	Ensaio de aceitação	31
3.2.3	Calibração	32
3.2.4	Requisitos necessários para qualificação de CMM	36
3.3	ENSAIOS GEOMÉTRICOS PARA DETERMINAÇÃO SELETIVA DAS COMPONENTES DE ERROS DA CMM	37
3.4	QUALIFICAÇÃO DE CMM COM PADRÕES CORPORIFICADOS ...	38
3.4.1	Ensaio de incerteza de apalpação	39
3.4.2	Qualificação de CMM com blocos padrão	40
3.4.3	Qualificação de CMM com padrão escalonado	42
3.4.4	Qualificação de CMM com barras com esferas ("ball bar")	44
3.4.5	Qualificação de CMM com padrão de comprimento - "Machine Cheking Gauge - MCG"	47
3.4.6	Qualificação de CMM com padrões circulares	48
3.4.7	Qualificação de CMM com placas com esferas ou furos (peças padrão - 2D)	50
3.4.8	Qualificação de CMM com padrões tridimensionais - 3D	53
3.4.9	Ensaio dos "quatro eixos e 3D - alfa"	53
3.4.10	Qualificação da mesa giratória utilizando placa com esferas	56

3.5	COMPARAÇÃO ENTRE OS PADRÕES CORPORIFICADOS PARA QUALIFICAÇÃO DA CMM	57
4.	METODOLOGIAS PARA QUALIFICAÇÃO DE CMM COM PADRÕES CORPORIFICADOS	60
4.1	METODOLOGIA PARA ENSAIO DE INCERTEZA DE APALPAÇÃO	61
4.1.1	Caracterização do ensaio	61
	a) Quanto à finalidade	
	b) Quanto ao âmbito	
4.1.2	Infra-estrutura do ensaio	62
	a) Seleção dos padrões corporificados	
	b) Sistema de medição de temperaturas	
4.1.3	Procedimento de Execução	64
	a) Posicionamento dos padrões	
	b) Número e localizações dos pontos de apalpação	
	c) Apalpadores	
4.1.4	Procedimento de análise dos resultados	66
	a) Incerteza de apalpação - 1D	
	b) Incerteza de apalpação - 2D	
	c) Incerteza de apalpação - 3D	
4.2	METODOLOGIA PARA QUALIFICAÇÃO DE CMM COM BLOCOS PADRÃO E PADRÃO ESCALONADO.....	68
4.2.1	Caracterização da Qualificação	68
	a) Quanto à finalidade	
	b) Quanto ao âmbito	

4.2.2 Infra-estrutura para Qualificação	69
a) Seleção dos padrões	
b) Sistema de medição de temperaturas	
4.2.3 Procedimento de Execução	70
a) Qualificação de CMM com blocos padrão	
b) Qualificação de CMM com padrão escalonado	
4.2.4 Procedimento de Análise de Resultados	73
4.3 METODOLOGIA PARA QUALIFICAÇÃO DE CMM COM PLACAS PADRÃO	74
4.3.1 Caracterização da Qualificação	76
a) Quanto à finalidade	
b) Quanto ao âmbito	
4.3.2 Infra-estrutura para Qualificação	77
a) Seleção da placa padrão	
b) Sistema de medição de temperaturas	
4.3.3 Procedimento de Execução da Calibração de Placas Padrão utilizando a CMM	78
4.3.4 Procedimento de Execução da Qualificação da CMM com Placas Padrão	82
a) Posicionamentos da placa	
b) Execução	
4.3.5 Procedimento de Análise dos Resultados	87
5. ESTUDO DE CASOS	91
5.1 CMM COM ACIONAMENTO MANUAL	91
5.1.1 Características Operacionais e Metrológicas principais da CMM ...	91
5.1.2 Ensaio de Incerteza de Apalpação	92
5.1.3 Qualificação da CMM com Blocos Padrão	92

5.1.4	Qualificação da CMM com Placa Padrão	98
5.2	CMM COM COMANDO NUMÉRICO	104
5.2.1	Características Operacionais e Metrológicas principais da CMM ...	104
5.2.2	Ensaio de Incerteza de Apalpação	105
5.2.3	Qualificação da CMM com Blocos Padrão	107
5.2.4	Qualificação da CMM com Placa Padrão	108
5.3	CORRELACIONAMENTO ENTRE OS RESULTADOS DA QUALIFICAÇÃO DAS CMM COM BLOCOS PADRÃO E PLACA PADRÃO	117
6.	CONCLUSÕES	118
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre causas de erros na medição com Máquinas de Medir por Coordenadas (CMM) e seu procedimento de qualificação (inspeção, ensaio de aceitação e calibração).

Na qualificação de CMM, para que o tempo seja minimizado e os resultados sejam maximizados em confiabilidade, ficou evidenciada a necessidade de se propor metodologias para qualificação de CMM com padrões corporificados. Optou-se pelo desenvolvimento de metodologias para ensaio de incerteza de apalpação, qualificação com blocos padrão, padrão escalonado e placas padrão.

Como verificação da aplicabilidade das metodologias foram realizados diversos experimentos em duas máquinas de características distintas (industrial e laboratorial), ficando comprovada a validade das mesmas.

Os resultados do trabalho mostram que a qualificação de CMM com placas padrão possui vantagens em relação aos outros métodos, por ser um método com incerteza de medição baixa, de fácil execução e de custo baixo, capaz de atender os diferentes níveis de qualificação: inspeção, ensaio de aceitação e calibração.

ABSTRACT

In this work a study about the error causes in the measurement with Coordinate Measuring Machines (CMM) and its procedure of qualification (inspection, acceptance test and calibration) are presented.

In the qualification of CMM in order to minimise the time test and uncertainty measurement, it was evidenced the necessity to propose methodologies to CMM qualification with mechanical standards. As a consequence decided for the development of methodologies to the uncertainty probing, qualification with gauge blocks, step gauge blocks and hole plates tests.

In order to verify the applicability of these methodologies, several experimental tests were made in two different machines (industrial and laboratorial) and the outcome comprove the validation of the methodologies proposed.

The results of the work showed that the qualification of CMM with gauge plates have advantages in relation to other methods specially concerning to the low uncertainty measurement, easily execution with low cost, and capacity to attend different qualification levels (inspection, acceptance test and calibration, for instance).

1. INTRODUÇÃO

A razão de ser de uma empresa são os clientes. Portanto, toda sua administração deve estar voltada para a qualidade, que é a busca contínua da satisfação das necessidades dos clientes.

A "Garantia da Qualidade" é uma função da empresa que tem como finalidade confirmar que todas atividades da qualidade estão sendo conduzidas da forma requerida. Portanto a garantia da qualidade é a "embaixatriz" do cliente na empresa, é a função que visa confirmar que todas as ações necessárias para o atendimento das necessidades dos clientes estão sendo conduzidas de forma completa e melhor que o concorrente.

No mercado internacional atual dos países industrializados, a garantia da qualidade do produto já não pode ser obtida por simples inspeção final e é necessário aplicar a técnica de controle da qualidade em todo ciclo de produção e consumo (sistema da qualidade) [1].

Na busca de competitividade, uma diretriz será a de produzir bens com defeito zero, o que depende da capacidade de controle do processo de fabricação, envolvendo a medição. Na linha de produção de uma indústria deve-se diminuir as operações de inspeção, transferindo as verificações metrológicas para os laboratórios, ou diretamente para as unidades de fabricação melhorando seu desempenho. Estas tendências implicam no uso de sistema de medição mais sofisticados e com pequena incerteza de medição e de laboratórios com padrões rastreados ao

sistema metrológico nacional e mundial.

A técnica de medição por coordenadas já está com seu lugar conquistado na garantia de qualidade da indústria. Hoje em dia peças mecânicas de formas e dimensões variadas são medidas com máquinas de medir por coordenadas (CMM). Esta universalidade, junto ao alto grau de automatização, são os motivos mais importantes pela disseminação da técnica de medição por coordenadas nos últimos 22 anos [2].

Com o desenvolvimento das CMM tem-se uma melhor possibilidade de verificação da conformidade de peças com os requisitos de tolerâncias especificadas, ampliam as possibilidades de inspeção, reduzem os seus custos e ampliam a capacidade do equipamento de produção e do pessoal existente [3].

O controle geométrico (dimensão, forma e posição) de peças depende da incerteza de medição dos sistemas de medição, a mesma constitui um importante critério de avaliação dos sistemas de medição. Isto vale naturalmente também para as CMM.

A qualificação da CMM significa em geral a determinação das componentes de erros e da incerteza de medição da CMM, que pode ser através de ensaios geométricos e/ou com padrões corporificados.

1.1 MÉTODOS DE QUALIFICAÇÃO DE CMM

Vários métodos foram sugeridos nos últimos anos para qualificação de CMM, estes métodos

podem ser divididos conforme [4] em:

- métodos para ensaios globais utilizando padrões corporificados: blocos padrão, padrões escalonados, barra com esferas, padrões circulares, placas com esferas, placas com furos, objetos 3D (tridimensionais);
- métodos para determinação seletiva das componentes de erros da CMM, utilizando sistemas de medição padrões: laser interferométrico, padrões escalonados, níveis eletrônicos, autocolimadores, réguas, esquadros, laser de alinhamento, etc.

Estes métodos tem sido parcialmente incorporados em recomendações e normas nacionais e internacionais [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

Na avaliação da CMM pelo fabricante e usuário algumas características dos métodos devem ser asseguradas, entre elas:

- a relação entre a incerteza de medição (IM) do padrão ou sistema de medição padrão (SMP) e a incerteza de medição da CMM à qualificar deve ser:

$$IM_{SMP} \leq \frac{IM_{CMM}}{10} \quad (1.1)$$

Admitindo-se:

$$IM_{SMP} \leq \frac{IM_{CMM}}{5} \quad (1.2)$$

Onde:

IM_{SMP} = Incerteza de Medição do Padrão

IM_{CMM} = Incerteza de Medição da CMM

- rapidez e simplicidade de execução;
- baixo custo.

1.2 PROPOSTA DO TRABALHO

A proposta para o presente trabalho foi estudar as técnicas modernas de qualificação de CMM com padrões corporificados e por em prática metodologias de qualificação.

Para atingir tais objetivos, o plano de trabalho constou das seguintes etapas:

a) Causas de erros na medição com CMM

Após um estudo detalhado da CMM, suas principais causas de erros foram estabelecidas.

b) Qualificação de CMM

Constou de estudo geral de ensaios geométricos e estudo detalhado da qualificação com padrões corporificados.

c) Metodologias de Qualificação de CMM

Estabeleceu-se as metodologias para ensaio de incerteza de apalpação, qualificação com blocos padrão e padrões escalonados e qualificação com placas padrão.

d) Estudo de casos

Resultados e análise de ensaios de incerteza de apalpação, qualificação com blocos padrão e placas padrão em CMM com acionamento manual e com comando numérico.

2. ERROS NAS MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS

A CMM possui diversos módulos (fig. 2.1) e um elevado número de elementos móveis (3 ou 4 eixos coordenados), que operando de uma forma integrada, provocam (apesar das avançadas técnicas construtivas) erros na medição.

Neste capítulo serão apresentados os erros geométricos da CMM e as principais causas de erros na medição com CMM (fig. 2.2).

2.1 ERROS GEOMÉTRICOS

Os erros geométricos de CMM são determinados pela diferença entre o sistema coordenado efetivamente indicado pela máquina em relação ao sistema coordenado ideal. Estes erros nos movimentos da CMM provocam erros de trajetória de um ponto no espaço (fig. 2.3). A trajetória real é resultante da atuação de todos os módulos da CMM e portanto de todas as causas de erros.

Na CMM tem-se erros de posicionamento na direção dos movimentos, erros da retilinearidade das guias, erros de ortogonalidade entre as guias, erros rotacionais (inclinação, guinamento e rolamento) na movimentação de cada eixo.

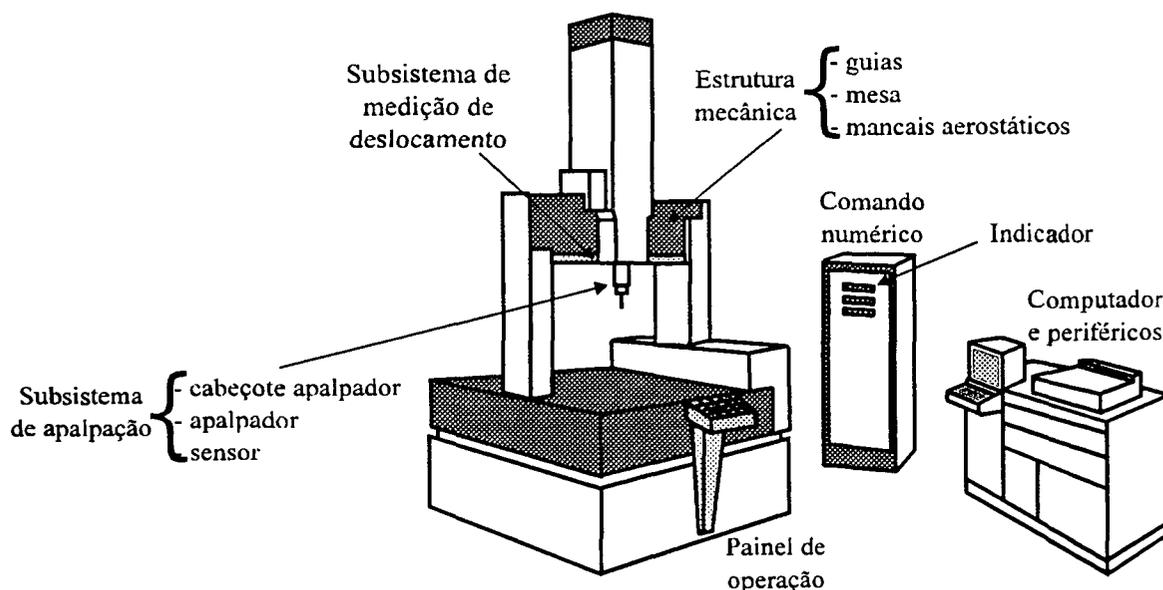


Figura 2.1 - Máquina de medir por coordenadas e seus principais subsistemas e módulos.

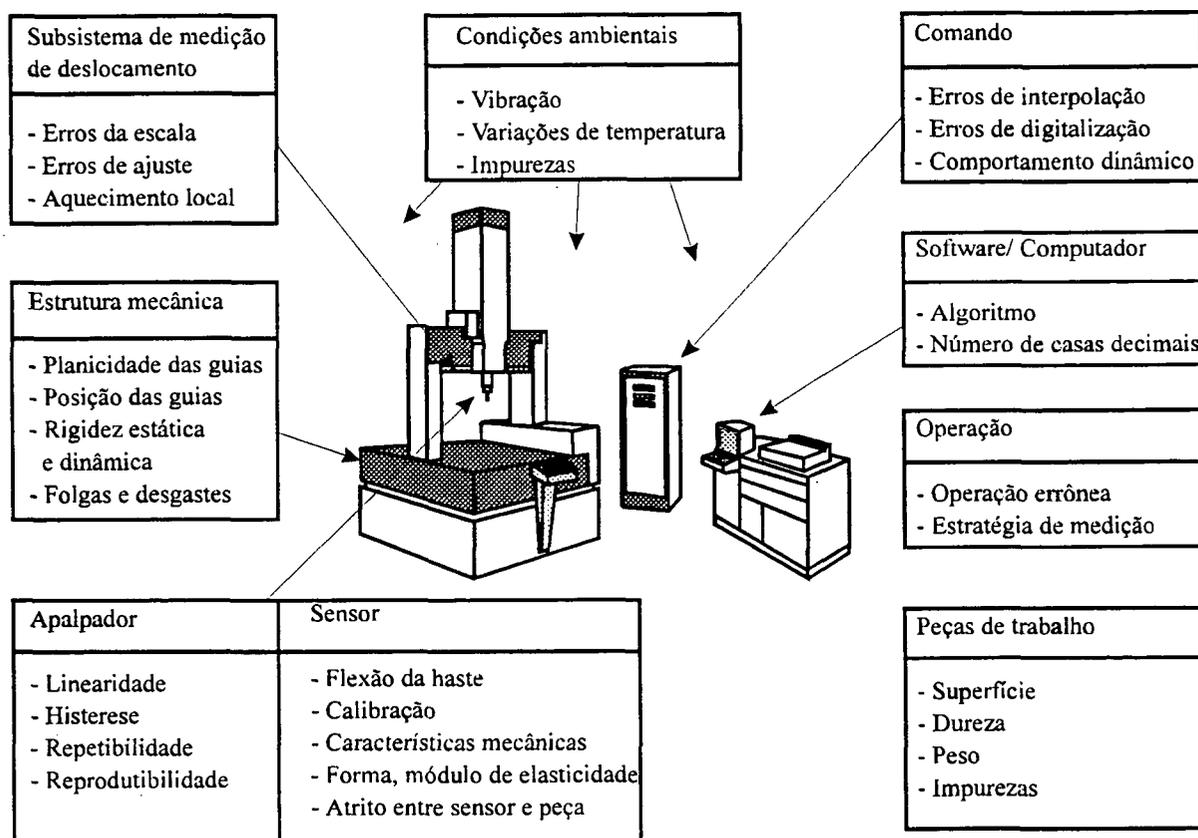


Figura 2.2 - Causas de erros em uma CMM [2].

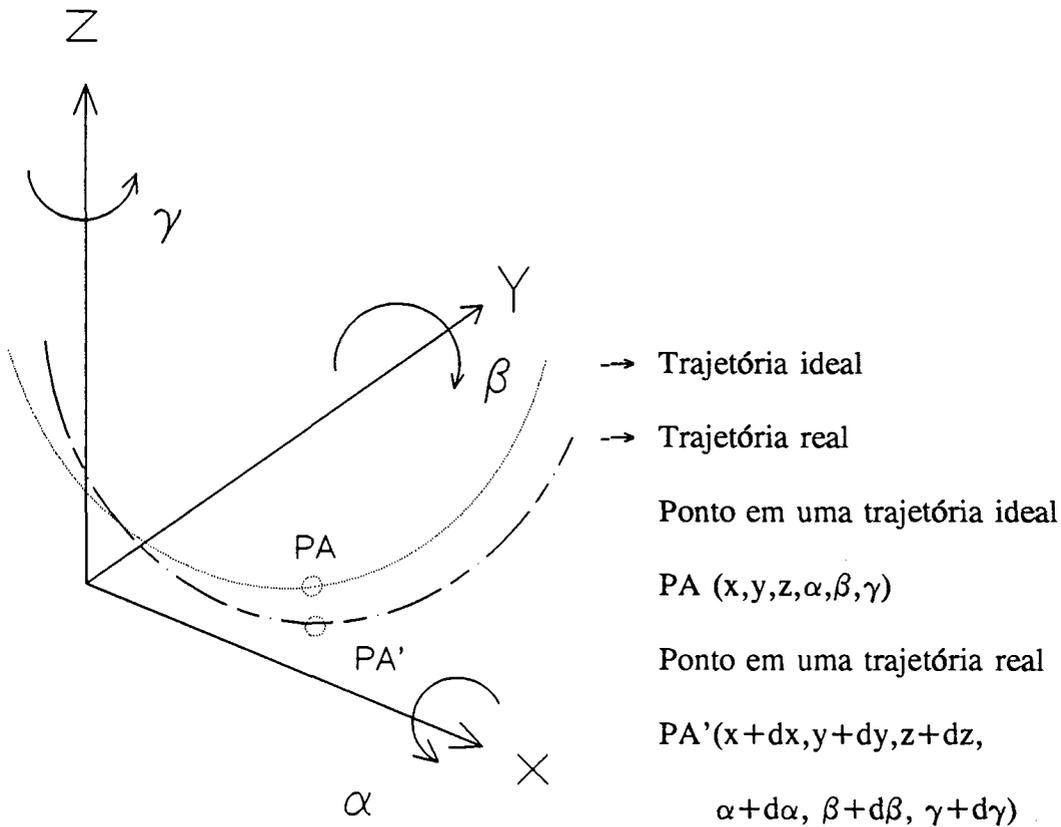
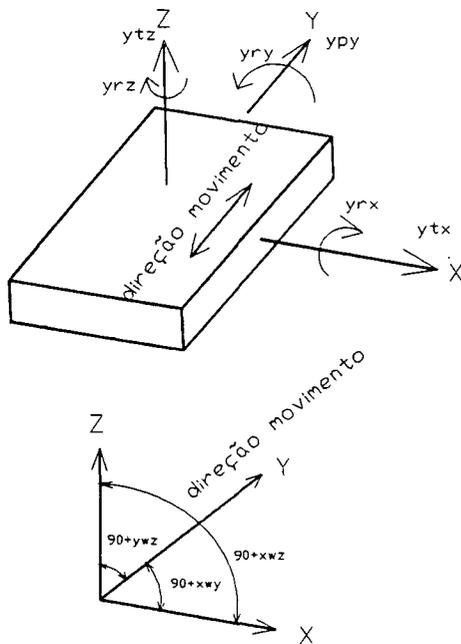


Figura 2.3 - Componentes do erro de um ponto em uma trajetória no espaço [17].

Cada parte construtiva da CMM pode ser considerada como um corpo rígido, isto significa que os erros de posição em um dos eixos dependem somente da própria posição e não são influenciados pela localização dos demais eixos de movimentação [2].

Com esta consideração, os erros de posição em um eixo podem ser representados como três deslocamentos paralelos aos eixos e três ângulos de rotação. Os deslocamentos são usualmente designados como erro de posicionamento - p (correspondendo a y_{py} na figura 2.4) e erros de reticidade - t (em duas direções perpendiculares ao eixo correspondente ao grau de liberdade, y_{tx} , y_{tz} na figura 2.4) e erros de rotação - r como inclinação, guinamento e rolamento (y_{rx} , y_{rz} , y_{ry} na figura 2.4).



ERRO DE POSICIONAMENTO - ypy

ERROS DE RETILINEIDADE - t

a) Horizontal - ytx

b) Vertical - ytz

ERROS ROTACIONAIS (ANGULARES) - r

Rotação em torno do:

a) eixo móvel (rolamento) - yry

b) eixo horizontal (inclinação) - yrx

c) eixo vertical (guinamento) - yrz

ERROS DE PERPENDICULARIDADE - w

a) Plano XY - xwy

b) Plano XZ - xwz

c) Plano YZ - ywz

Figura 2.4 - Componentes de erros da CMM para deslocamento na direção Y.

Estas componentes dependem de cada ponto e neste modelo não dependem das posições dos outros eixos. Por esse motivo elas podem ser medidas separadamente para cada eixo. No total se deve determinar 18 componentes de erros dependentes da posição e adicionalmente 3 erros de perpendicularidade entre os eixos (xwy , xwz e ywz na figura 2.4):

- erros de posicionamento: xpx , ypy , zpz ;
- erros de retilineidade: xty , xtz , ytx , ytz , ztx , zty ;
- erros rotacionais: xrx , xry , xrz , yrx , yry , yrz , zrx , zry , zrz ;
- erros de perpendicularidade: xwy , xwz , ywz .

2.2 CAUSAS DE ERROS

As principais causas de erros na medição com CMM são citadas em [2, 5, 8, 18] e estão agrupadas na figura 2.2.

2.2.1 Peça

Como exemplo de causas de erros nas peças tem-se as deformações causadas pelo peso próprio, forma geométrica e dureza do material da peça [19].

2.2.2 Subsistemas de apalpação

Antes de mencionar as principais causas de erros, é importante descrever os cabeçotes apalpadores mais usuais nas CMM, que são o tipo medidor e o tipo comutador.

O cabeçote apalpador medidor permite que se tenha uma informação da deflexão que sofre o sensor ao tocar a peça. A figura 2.5 mostra o cabeçote e apresenta o método diferencial da medição.

Na medição estática o apalpador é deslocado até que a deflexão seja zero, quando então permanece em repouso. A posição é lida diretamente das escalas uma vez que a deflexão é nula.

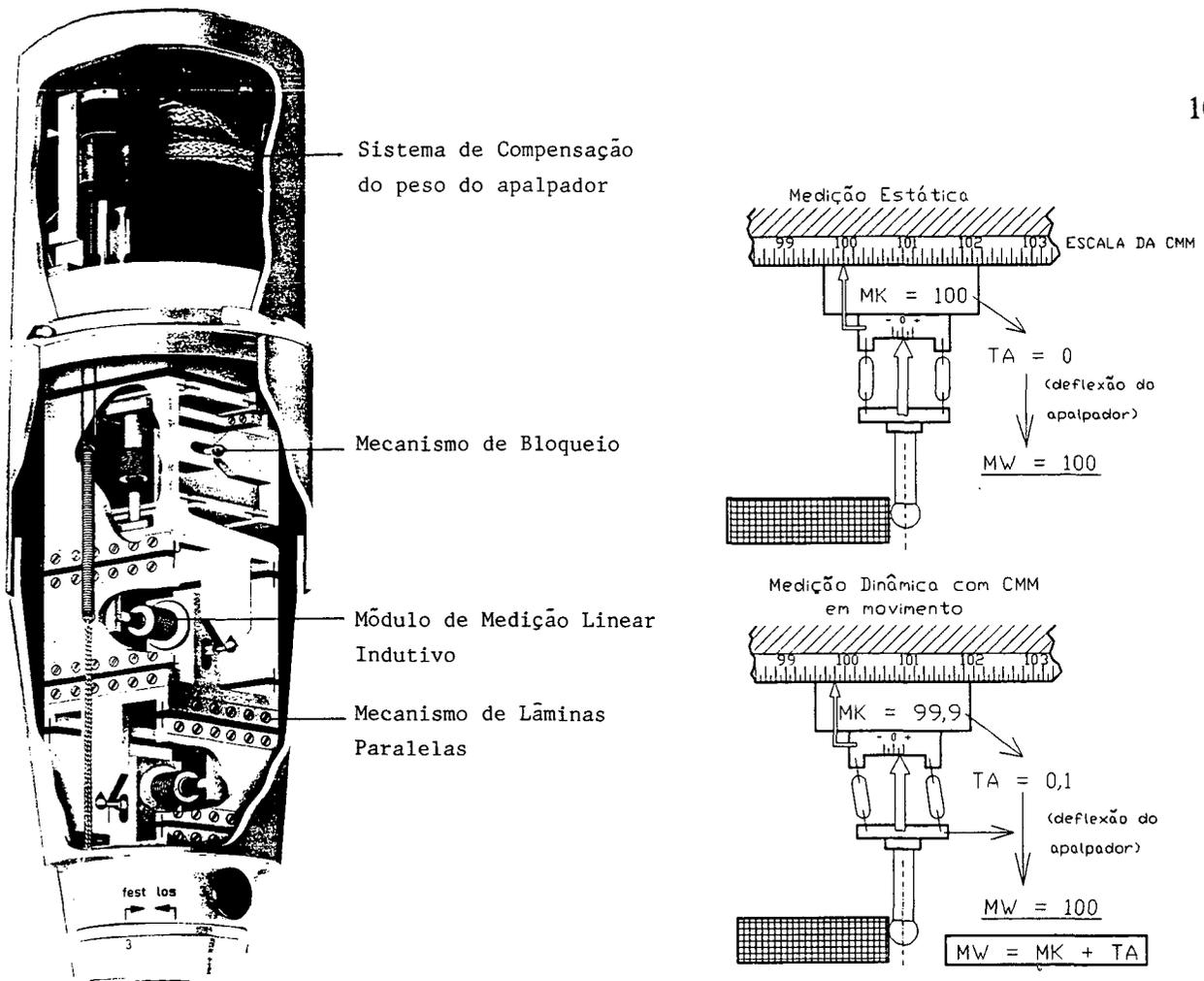


Figura 2.5 - Cabeçote apalpador tipo medidor e método diferencial de medição [20].

Na medição dinâmica, após o contato com a peça, são lidos simultaneamente a posição da máquina e a deflexão do sensor, para cálculo posterior da soma [20].

O cabeçote apalpador comutador mais usual consiste de contatos elétricos que são abertos ou fechados após uma determinada deflexão do sensor (fig. 2.6).

Os erros dos subsistemas de apalpação dependem [4]:

- da ligação entre o cabeçote de apalpação e o módulo de medição de deslocamento;
- da estratégia de medição escolhida.

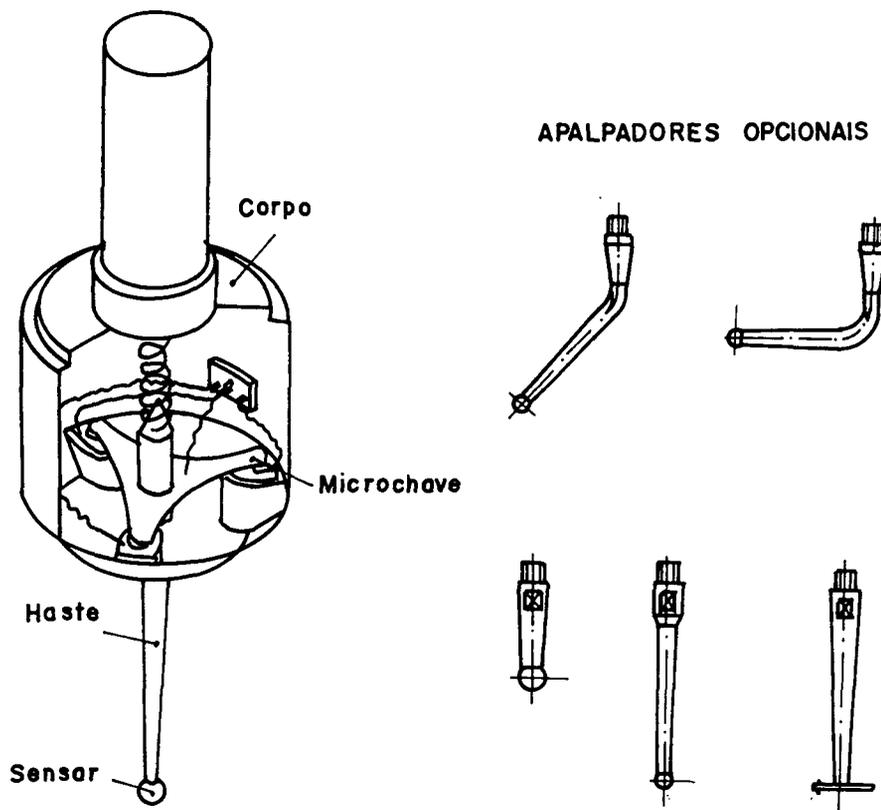


Figura 2.6 - Cabeçote apalpador tipo comutador e apalpadores opcionais [20].

As principais causas de erros para o cabeçote apalpador medidor e o cabeçote apalpador comutador são [20, 21]:

a) Causas gerais:

- flexão da haste do sensor em função da força de medição e da direção;
- achatamento do sensor em função da força de medição;
- erros de forma do sensor, usualmente considerado esférico pelo software.

A figura 2.7 mostra as influências da flexão da haste do cabeçote apalpador medidor para diferentes forças na medição de cilindros. Nesse cabeçote tem-se o bloqueio da deflexão (travamento dos movimentos), segundo os eixos. Deste modo, a 45° ocorre uma mudança na

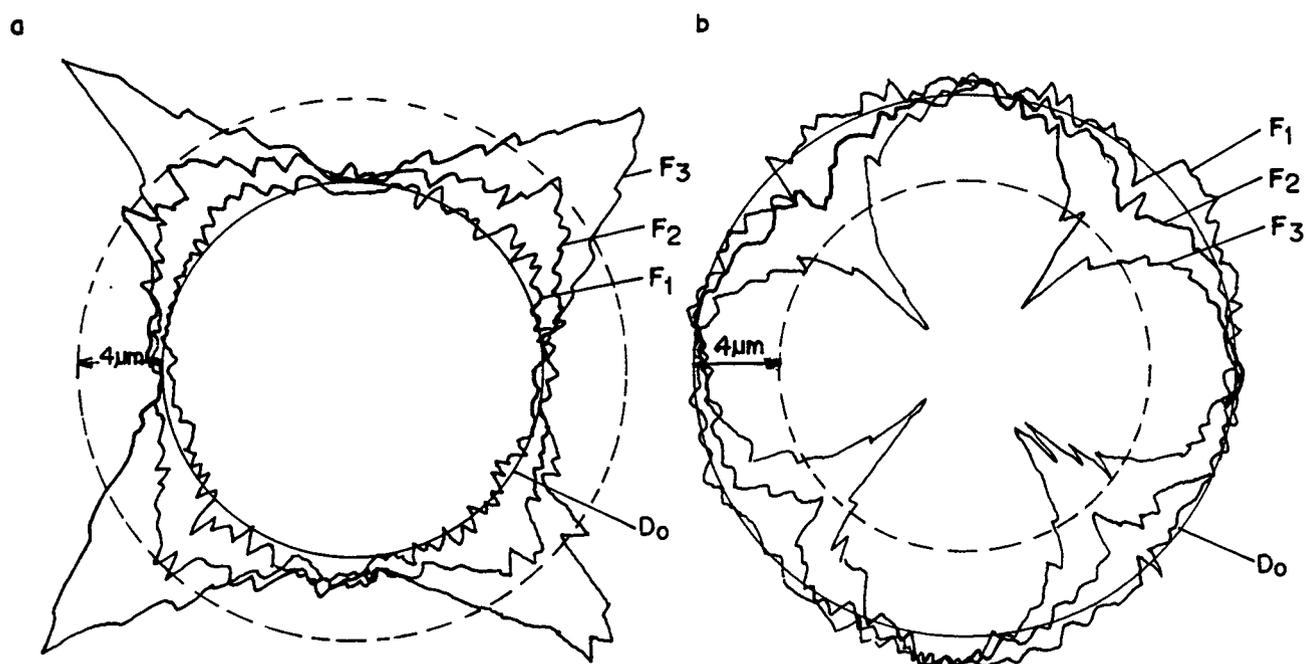


Figura 2.7 - Influências das flexões da haste de apalpação (cabeçote apalpador tipo medidor) para a medição de um cilindro interno a) e um cilindro externo b) com três forças de medição diferentes: $F_1 = 25 \text{ mN}$, $F_2 = 125 \text{ mN}$, $F_3 = 375 \text{ mN}$ [2].

direção livre do cabeçote apalpador, liberando-se o eixo na direção em que a componente da velocidade for maior.

b) Causas na medição dinâmica:

- recuo do sensor no contato com a peça, em função do impacto e das propriedades elásticas dos materiais;
- retardo na aquisição das coordenadas, após ter sido atingido o ponto de referência do apalpador para a leitura, além de características intrínsecas do sistema (hardware e software); o erro resultante depende também da velocidade de apalpação.

c) Causas de erros específicas no cabeçote apalpador medidor:

As causas de erros neste tipo de cabeçote têm origem:

- no módulo de medição de deslocamento indutivo;
- no mecanismo de transmissão de deflexão do sensor até o módulo de medição (por exemplo, o mecanismo de lâminas paralelas). Com isso tem-se os seguintes erros:
 - . erro de linearidade, originada pelo comportamento do módulo de medição e pelo comportamento cinemático do mecanismo;
 - . erro de calibração, originado pelo incorreto levantamento e ajuste da sensibilidade do módulo de medição;
 - . histerese e instabilidade do ponto de referência, originadas no próprio módulo de medição (flutuação do zero em função de temperatura, tensão elétrica, interferência), nas folgas e deformações dos mecanismos;
 - . erro de ajustagem do mecanismo, sendo mais representativo a perpendicularidade entre os módulos de medição indutivos.

d) Causas de erros específicas no cabeçote apalpador comutador:

Em relação ao cabeçote apalpador comutador deve-se destacar que a deflexão necessária para a emissão do sinal é compensada ao se definir o diâmetro corrigido do sensor.

A instabilidade do ponto de referência é traduzida pela não repetibilidade da mesma deflexão necessária para emissão do sinal, em diversas apalpações. Tal instabilidade é própria do princípio de funcionamento de cada apalpador.

A histerese é um erro que decorre de fatores geométricos do mecanismo do cabeçote. Ela pode ser entendida como a não simetria das deflexões necessárias para a emissão do sinal em uma dada direção nos sentidos opostos. Na figura 2.8 observa-se este comportamento no plano XY. Este erro assume caráter aleatório quando considera-se a apalpação ocorrendo segundo diversas direções.

2.2.3 Estrutura mecânica

A causa de erro específica da CMM mais importante, junto com o subsistema de apalpação, está na estrutura mecânica da CMM [4].

As seguintes causas fazem com que as coordenadas indicadas não coincidam com as coordenadas verdadeiras do ponto apalpado:

- erro de planicidade das guias;
- deficiência de ajuste na montagem de módulos da CMM (erros de perpendicularidade na ajustagem das guias, por exemplo);
- deformações elásticas de partes e mancais da CMM nos deslocamentos dos eixos da CMM;
- variações de origem térmica de partes da CMM;
- folgas e desgastes.

2.2.4 Subsistemas de medição de deslocamento

Os subsistemas de medição de deslocamento indicarão uma posição dentro do sistema coordenado.

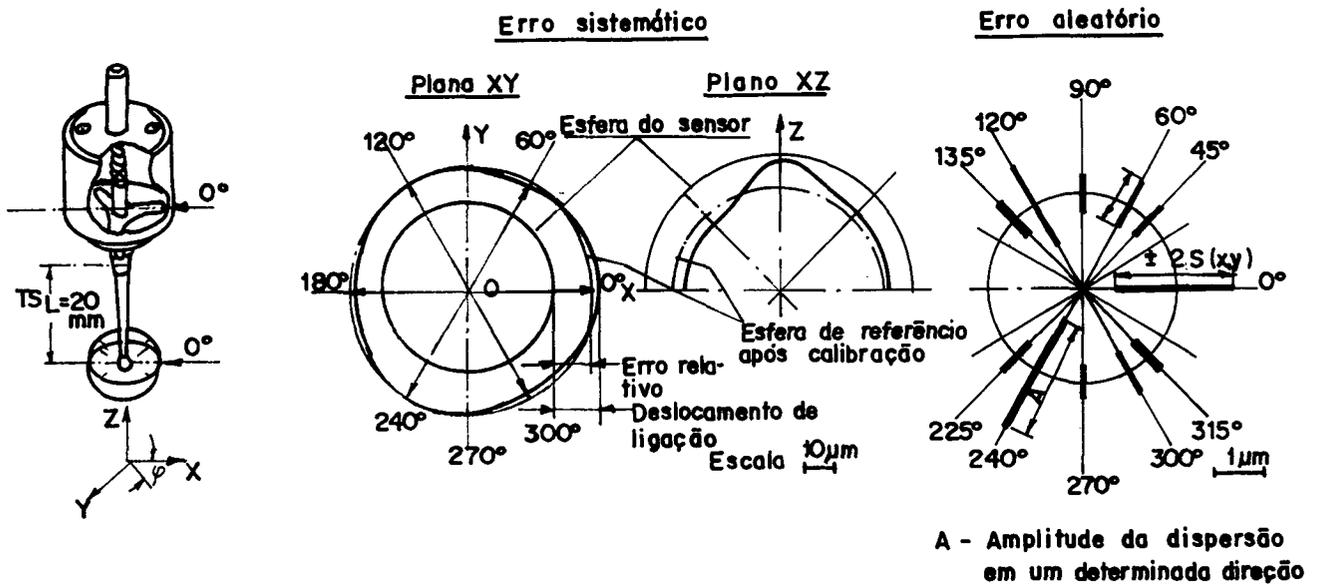


Figura 2.8 - Erro sistemático e erro aleatório devido a instabilidade do ponto de referência [22].

Os subsistemas de medição mais usuais para CMM são as escalas eletro-ópticas incrementais que podem ser de dois tipos [20]:

- reflexiva: um feixe luminoso incide sobre uma escala polida com gravações de traços opacos, refletindo sobre ela em direção a um fotodetector; com o movimento da escala, este fotodetector libera um sinal elétrico;
- transparente: enquanto se desloca, uma escala de vidro gravada com traços escuros interrompe do modo alternado um feixe luminoso entre a fonte e um fotodetector (fig. 2.9).

Em ambos os casos, quando a escala é deslocada o fotodetector fornece um sinal senoidal cujo período corresponde ao espaçamento entre os traços da escala, e que, após um trata-

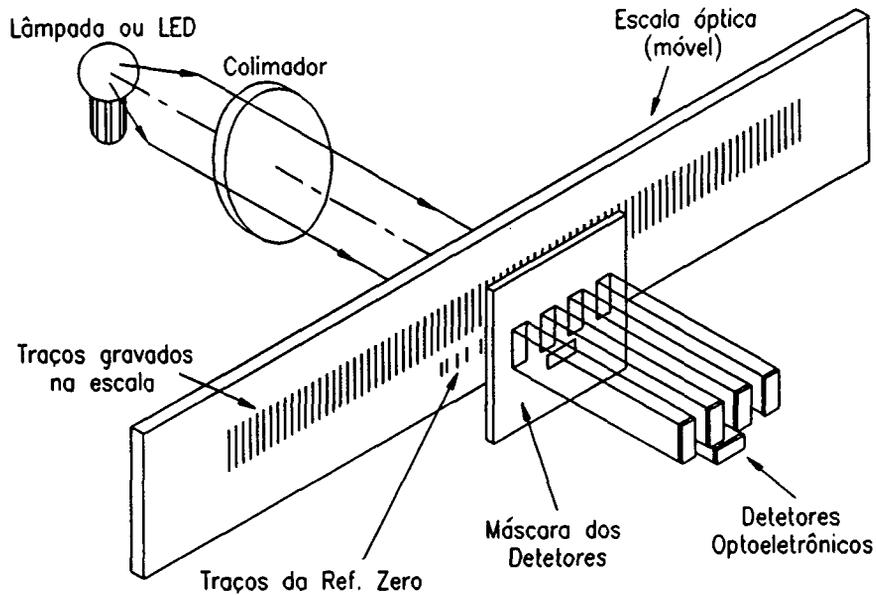


Figura 2.9 - Sistema de deslocamento eletro-óptico de deslocamento [20].

mento, é transferido para um contador. Com o número de pulsos contados e o espaçamento entre franjas, é possível calcular o deslocamento da escala.

A principal causa de erro destas escalas está no espaçamento entre traços, que pode ter uma subdivisão defeituosa ou uma calibração incorreta.

Pode-se citar também como causas de erros, de menor relevância:

- erros de interpolação entre franjas;
- ajuste defeituoso das escalas;
- aquecimento local da escala por meio do conjunto optoeletrônico.

Estas causas provocam erros de posicionamento dos eixos da CMM.

2.2.5 Condições ambientais

As CMM, devido à sua complexidade, são diretamente influenciadas pelas condições ambientais.

As principais causas de erros são:

a) Variações de temperatura [23, 24, 25, 26, 27]

Os efeitos termomecânicos, que influem durante a qualificação, são a causa mais freqüente de medições errôneas [4]. As variações uniformes de temperatura se manifestam como variações lineares de comprimento no módulo de medição de deslocamento. Ao contrário, as variações de temperatura não uniformes trazem como conseqüências a aparição de gradientes de temperatura na estrutura mecânica da CMM. De forma similar ao efeito de par bimetalico, estes gradientes ocasionam deformações das guias e também variações de alinhamento entre componentes construtivos da CMM.

A figura 2.10 mostra os erros de inclinação, guinamento e perpendicularidade originados pelos efeitos dos gradientes de temperatura [28].

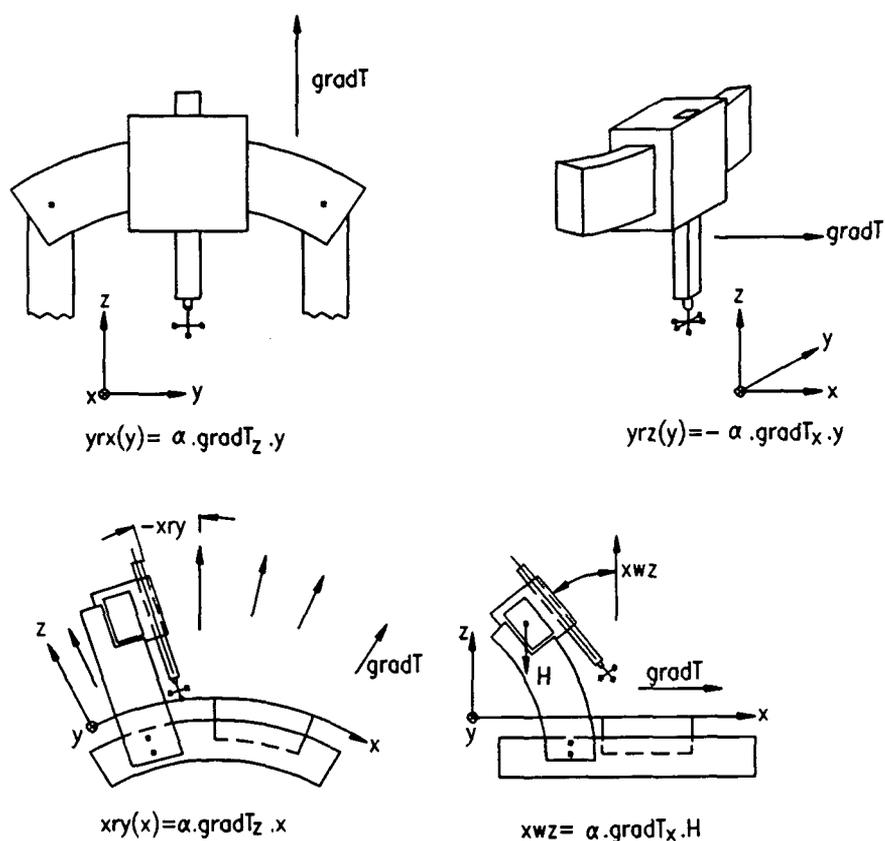


Figura 2.10 - Erros de inclinação, guinamento e perpendicularidade originadas pelos efeitos das gradientes de temperatura [28].

Para as variações lineares de comprimento, pode-se utilizar a seguinte fórmula para determinação do erro devido a deformação térmica das escalas e peça:

$$\Delta L_1 = L_0 (\alpha_e \Delta T_e - \alpha_p \Delta T_p) \quad (2.1)$$

Onde:

ΔL_1 = Erro devido à deformação térmica

L_0 = Comprimento original

α_e = Coeficiente de dilatação térmica da escala

α_p = Coeficiente de dilatação térmica da peça

ΔT = Diferença de temperaturas

$$\Delta T = (T - 20) \text{ em K}$$

T_e = temperatura da escala, em °C

T_p = temperatura da peça, em °C

O erro devido à deformação térmica (ΔL_1) será zero se as temperaturas das escalas e da peça forem 20 °C. Se as temperaturas forem diferentes de 20 °C, o erro será zero se as escalas da CMM e a peça tiverem exatamente a mesma temperatura e exatamente o mesmo coeficiente de dilatação térmica, isso não é possível, pois existem diferenças de temperatura entre as escalas e nos coeficientes de dilatação térmica da escala e da peça, mesmo de materiais iguais. Portanto, para uma análise mais criteriosa deve-se considerar as incertezas dos resultados nas medições das temperaturas e coeficientes de dilatação térmica. Assim tem-se [29]:

$$\begin{aligned} \Delta L_2 = & |L_0 \cdot \text{IR}(T_e) \cdot \alpha_e| + |L_0 \cdot \text{IR}(T_p) \cdot \alpha_p| + |L_0 \cdot (T_e - 20) \cdot \text{IR}(\alpha_e)| + \\ & \text{(A)} \qquad \qquad \text{(B)} \qquad \qquad \qquad \text{(C)} \\ & + |L_0 \cdot (T_p - 20) \cdot \text{IR}(\alpha_p)| \qquad \qquad \qquad \text{(2.2)} \\ & \text{(D)} \end{aligned}$$

Onde:

ΔL_2 = Erro devido dilatação térmica considerando a incerteza dos resultados das temperaturas e dos coeficientes de expansão térmica

$\text{IR}(T_e)$ = Incerteza do resultado da temperatura da escala

$\text{IR}(T_p)$ = Incerteza do resultado da temperatura da peça

$IR(\alpha_e)$ = Incerteza do resultado do coeficiente de dilatação térmica da escala

$IR(\alpha_p)$ = Incerteza do resultado do coeficiente de dilatação térmica da peça

(A) = Parcela do erro devida à $IR(T_e)$

(B) = Parcela do erro devida à $IR(T_p)$

(C) = Parcela do erro devida à $IR(\alpha_e)$

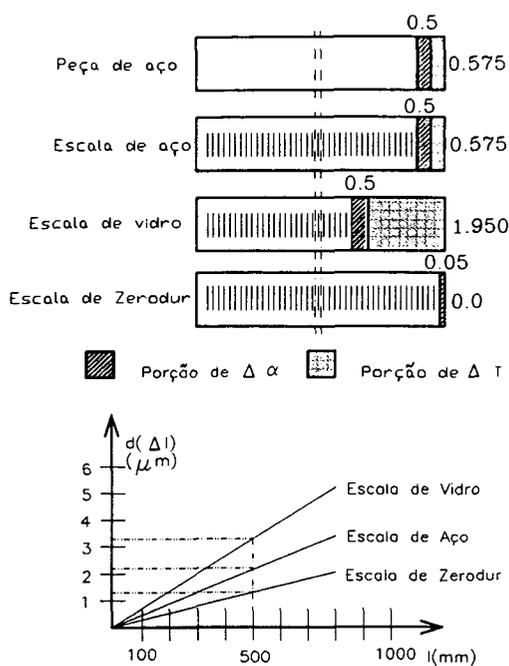
(B) = Parcela do erro devida à $IR(\alpha_p)$

A figura 2.11 mostra o erro devido à dilatação térmica para peça de aço usando escalas de aço, vidro e zerodur com suas respectivas incertezas na medição. Observa-se a superioridade da escala de zerodur em relação as outras escalas e a importância de se medir as temperaturas e coeficientes de dilatação térmica com pequenas incertezas.

As fontes de transmissão de calor responsáveis pela distribuição de temperatura na CMM são as seguintes:

- transmissão de calor por meio de circulação de ar (instalações de condicionamento de ar, ventiladores de comandos e motores);
- transmissão de calor através do objeto a medir, fontes de calor internas (acionamento, componentes eletrônicos);
- troca de calor por irradiação com o meio ambiente (paredes exteriores, teto, piso, iluminação, equipamentos próximos).

INCERTEZA DOS RESULTADOS:



a) Medição das temperaturas:

$$\text{peça de aço} = \pm 0,1 \text{ K}$$

$$\text{escala de aço} = \pm 0,1 \text{ K}$$

$$\text{escala de vidro} = \pm 0,5 \text{ K}$$

$$\text{escala de zerodur} \Rightarrow \text{sem}$$

influência

b) Medição dos coeficientes de

dilatação térmica

$$\text{peça de aço} = \pm 0,5 \mu\text{m/mK}$$

$$\text{escala de aço} = \pm 0,5 \mu\text{m/mK}$$

$$\text{escala de vidro} = \pm 0,5 \mu\text{m/mK}$$

$$\text{escala de zerodur} = \pm 0,05 \mu\text{m/mK}$$

MATERIAL ESCALA	L_0 (mm)	$T_e = T_p$ ($^{\circ}\text{C}$)	A (μm)	B (μm)	C (μm)	D (μm)	(ΔL_2) (μm)
Aço	500	21	0.575	0.575	0.250	0.500	1.65
		22	0.575	0.575	0.500	1.000	2.15
		23	0.575	0.575	0.750	1.500	2.65
Vidro	500	21	1.950	0.575	0.250	0.500	3.03
		22	1.950	0.575	0.500	1.000	4.53
		23	1.950	0.575	0.750	1.500	4.03
Zerodur	500	21	0.000	0.575	0.250	0.500	0.85
		22	0.000	0.575	0.500	1.000	1.13
		23	0.000	0.575	0.750	1.500	1.40

Figura 2.11 - Erro devido dilatação térmica, usando escalas de diferentes materiais medindo peça de aço a 22°C com influências das incertezas dos resultados das temperaturas e coeficiente de dilatação térmica [29].

As recomendações gerais para diminuir e/ou compensar os erros devido à dilatação térmica são:

- deixar a peça no mesmo ambiente da CMM, à 20 °C, entre 4 a 24 horas dependendo do tamanho e material da peça e da diferença inicial de temperaturas entre peça e CMM;
- evitar proximidade com fontes geradoras de calor;
- usar CMM com sistema computadorizado para correção automática das temperaturas das escalas e peças.

2.2.6 Operação da CMM

Na operação da CMM tem-se como causas de erros a estratégia de medição inadequada e operação errônea.

Com a figura 2.12 se pretende mostrar que a quantidade e distribuição de pontos de medição (em pontos equidistantes e não equidistantes) influem sobre os resultados da medição. Os dados são de uma seção de um cilindro interno. A figura mostra que os resultados são praticamente constantes para $n > 3$, quando os pontos são medidos em posições equidistantes. Para uma distribuição não equidistantes os pontos de medição resultam em erros significativos dos valores de referência [4, 30].

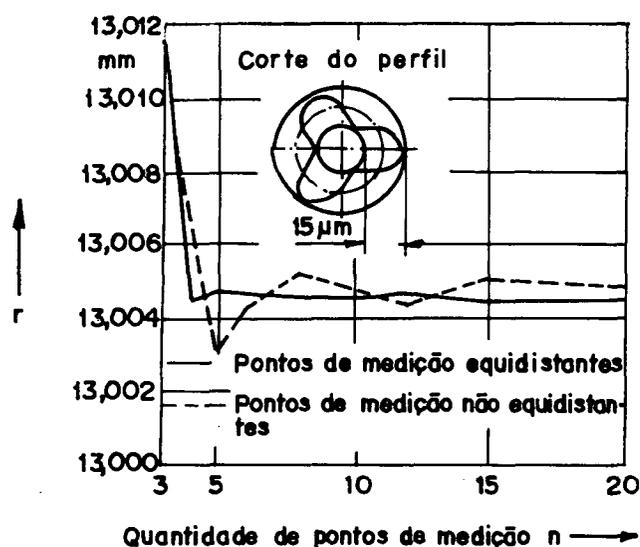


Figura 2.12 - Influência da quantidade e distribuição de pontos no resultado da medição na seção de um cilindro interno [4].

2.2.7 Software

O software de uma CMM tem por finalidade fazer os cálculos das medidas da peça, a partir das coordenadas dos pontos medidos com a máquina. Durante muito tempo se teve a opinião que o software não contribuía com erros significativos. Isto foi rebatido por estudos que se iniciaram no PTB em 1983 [2, 31, 32, 33] e que mostraram a presença de erros.

Em um projeto promovido pela comunidade Européia, foram submetidos a ensaio softwares provenientes de distintos fabricantes da CMM e algumas instituições. Os ensaios dos softwares se realizaram com a ajuda de dados desenvolvidos no PTB para simular elementos básicos, tais como reta, plano, círculo, cilindro e cone. Os parâmetros correspondentes às

formas básicas foram processados nos diferentes softwares e comparados com o software desenvolvido no PTB (fig. 2.13.a). Os resultados desta comparação estão resumidos na figura 2.13.b. Os graus de concordância correspondem às seguintes diferenças com relação aos valores de referência:

Grau 1: até $0,1 \mu\text{m}$ ou $0,1''$

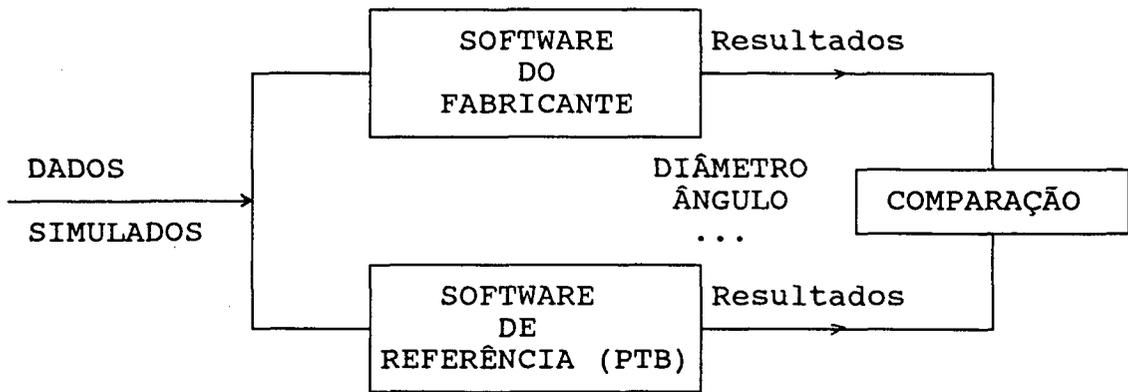
Grau 2: até $0,5 \mu\text{m}$ ou $0,5''$

Grau 3: até $2 \mu\text{m}$ ou $2''$

Grau 4: mais de $2 \mu\text{m}$ ou $2''$

Conclui-se que os erros de software passam a ser significativos na medida em que outras causas são minimizadas.

a)



b)

FORMA	GRAUS DE CONCORDÂNCIA				(SEM INFORMAÇÃO)
	1	2	3	4	
RETA	60%	13%	5%	5%	17%
PLANO	73%	12%	6%	9%	0%
CÍRCULO	76%	7%	9%	0%	8%
CÍRCULO NO ESPAÇO	56%	19%	0%	0%	25%
CILINDRO	52%	1%	5%	9%	33%
CONE	27%	5%	10%	25%	33%

Figura 2.13 - Ensaio de software com dados simulados e resultados do ensaio [31].

3. QUALIFICAÇÃO DE MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS

Uma grande variedade de métodos de qualificação de CMM tem sido sugerida e aplicada nos últimos 18 anos. Nesses métodos de qualificação os usuários têm encontrado as seguintes dificuldades:

- insuficiente incerteza de medição;
- falta de padronização;
- consumo de tempo e custo elevado com pessoal, sistemas de medição e padrões;
- elevado grau de dificuldade na execução;
- falta de rastreabilidade a padrões nacionais e internacionais.

Neste capítulo será feita uma análise dos principais métodos de qualificação de CMM, dando-se especial atenção à qualificação com padrões corporificados.

3.1 INCERTEZA DE MEDIÇÃO DA CMM

A incerteza de medição de uma CMM depende do efeito conjunto dos erros da CMM. Estes fazem com que, em uma determinada configuração espacial, o ponto medido (PM) esteja rodeado por um volume de incerteza tridimensional, dentro da qual está o valor verdadeiro

(fig. 3.1). O volume de incerteza é composta de erros sistemáticos e erros aleatórios.

A incerteza de medição de uma tarefa caracteriza uma faixa, dentro da qual se espera estar o valor verdadeiro da medida. A CMM possui múltiplas tarefas de medição e o objetivo fundamental da qualificação é a determinação da incerteza de medição para algumas tarefas de medição.

A incerteza de medição de comprimento descreve a incerteza da CMM para medição de comprimentos no espaço. Esta incerteza de medição é representada pela fórmula:

$$IM = A + KL \leq B \quad (3.1)$$

Onde:

IM = Incerteza de medição de comprimento

A,K = Constantes

L = Comprimento medido

B = É o valor da incerteza, o qual não deve ser superado em todo volume de medição.

Na figura 3.2 tem-se a representação gráfica da incerteza de medição de comprimento. Para a medição de comprimentos segundo os eixos coordenados (X, Y, Z), tem-se a incerteza de medição unidimensional:

$$IM_{1D} = A_1 + K_1L \leq B_1 \quad (3.2)$$

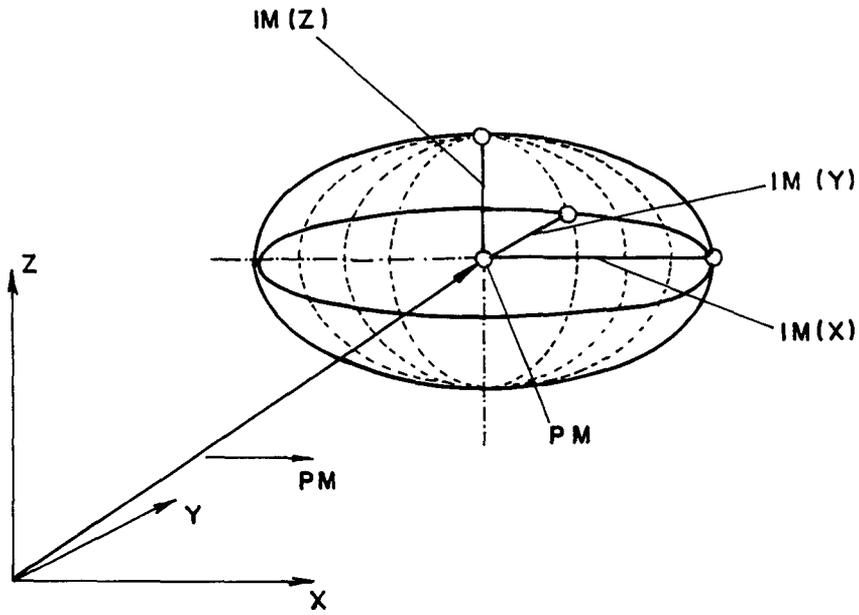


Figura 3.1 - Volume de incerteza das coordenadas de um ponto de medição [2].

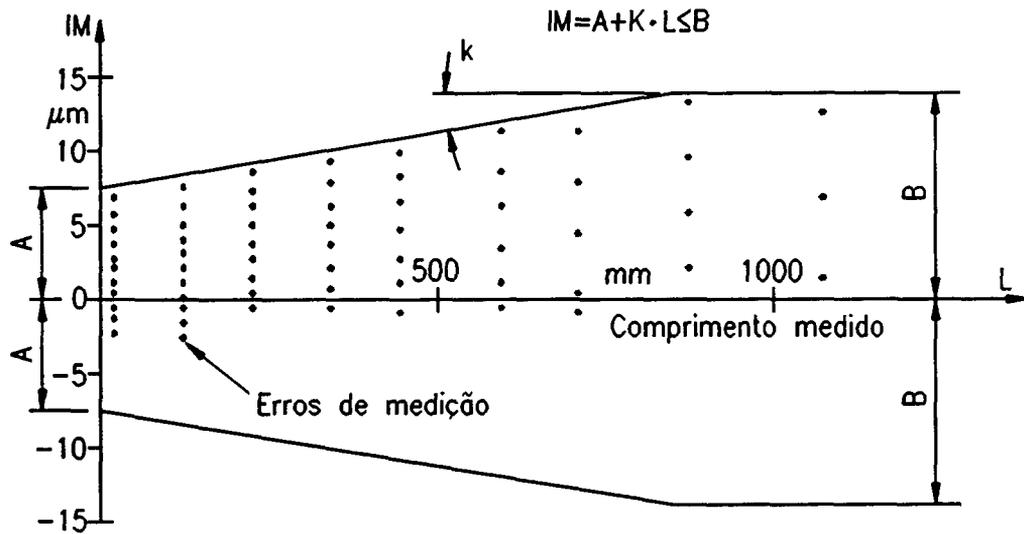


Figura 3.2 - Gráfico da incerteza de medição de comprimento de CMM [4].

Para a medição de comprimentos segundo os planos coordenados (XY, XZ, YZ), tem-se a incerteza de medição bidimensional:

$$IM_{2D} = A_2 + K_2L \leq B_2 \quad (3.3)$$

Para a medição segundo a diagonal espacial, tem-se a incerteza de medição tridimensional:

$$IM_{3D} = A_3 + K_3L \leq B_3 \quad (3.4)$$

A incerteza de medição de comprimento é a mais adotada, devido aos seguintes motivos:

- é utilizada em distintas normas e recomendações [5, 6, 7, 9, 14, 33] para avaliar a CMM;
- a medição de comprimento é de fácil realização e a incerteza de medição pode ser determinada por vários padrões corporificados;
- as fórmulas utilizadas para indicar os erros em relação ao valor verdadeiro convencional são fáceis de interpretar;
- as incertezas correspondentes a outras tarefas de medição podem ser deduzidas em forma aproximada a partir da incerteza de medição de comprimento.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA QUALIFICAÇÃO DA CMM

Em função do nível de exigência e de informações, a qualificação da CMM pode ser dividida, conforme a figura 3.3, em:

- inspeção/verificação;
- ensaio de aceitação;
- calibração.

NÍVEIS DE QUALIFICAÇÃO DA CMM

CALIBRAÇÃO	CMM COM NÍVEL DE EXIGÊNCIA MAIOR QUANTO À IM
EXECUTADA POR LABORATÓRIOS CREDENCIADOS	<ul style="list-style-type: none"> - Resultados quantitativos da incerteza de medição (IM) - Válida para todo volume de medição, todas disposições dos apalpadores e condições operacionais - De acordo com normas e recomendações técnicas - Incerteza de calibração conhecida
	Resultado: ERROS RELACIONADOS COM AS TAREFAS DE MEDIÇÃO
ENSAIO DE ACEITAÇÃO	APÓS OPERACIONALIZAÇÃO/MANUTENÇÃO
ESTABELECIDO POR CONTRATO FABRICANTE/USUÁRIO	<ul style="list-style-type: none"> - Comportamento geral quanto à incerteza de medição - Características da CMM conforme contrato - Componentes de erros segundo eixos
	Resultado: ACEITA/NÃO ACEITA
INSPEÇÃO/VERIFICAÇÃO	EM INTERVALOS CURTOS DE TEMPO
EXECUTADA PELO USUÁRIO	<ul style="list-style-type: none"> - Atendimento das especificações de incerteza de medição em lugares críticos no volume medição - Ensaio simples e rápido - Sem análise de causas de erros
	Resultado: ATENDE/NÃO ATENDE ESPECIFICAÇÕES DE IM

Figura 3.3 - Níveis de qualificação da CMM [4].

3.2.1 Inspeção/Verificação

A inspeção é realizada regularmente em intervalos de tempo relativamente curtos, para garantir aos usuários da CMM que esta satisfaz as especificações quanto à incerteza de medição em lugares críticos no volume de medição. A inspeção da CMM deve ser realizada em intervalos menores do que um mês [34].

O usuário é o responsável pela inspeção da CMM. Como ensaio simples e rápido, a inspeção tem como objetivo chegar a um resultado geral sobre comportamento metrológico da

máquina. O resultado implica em uma decisão do tipo "atende" ou "não atende" às especificações, sem que se exija uma análise das possíveis causas de erros.

3.2.2 Ensaio de aceitação

Normalmente se realiza o ensaio de aceitação após a operacionalização ou depois de uma manutenção, baseado em um contrato entre o fabricante e o usuário, onde são definidas as características a ensaiar ou as recomendações ou normas a serem usadas.

Em função do contrato, no ensaio de aceitação pode-se determinar:

- a incerteza de apalpação, em distintos modos de operação (apalpação ponto a ponto, scanning, correção da flexão do apalpador);
- o comportamento geral quanto à incerteza de medição, realizando algumas medições representativas;
- as 21 componentes de erros segundo os eixos de movimento;
- as componentes de erros da mesa rotativa;
- a sensibilidade em relação as condições ambientais (vibrações, temperaturas);
- as condições operacionais, por exemplo, o funcionamento do software, o funcionamento de dispositivos auxiliares, a velocidade máxima de movimento, a aceleração máxima, o tempo de medição por cada ponto.

Os três primeiros são importantes para julgar a qualidade metrológica da máquina. Com os resultados pode-se decidir sobre a aceitação ou não da CMM.

3.2.3 Calibração

Contrariamente ao que sucede com a maioria dos sistemas de medição, para os quais existe uma relação simples, unidimensional, entre o valor medido e o valor verdadeiro, as CMM têm um complexo comportamento em relação aos erros. Não se conta com nenhum método para determinação simultânea dos erros correspondentes a todos os graus de liberdade para todas as posições no volume de trabalho da CMM. Para a calibração de uma máquina com 3 eixos cartesianos de movimento, deveriam ser determinados essencialmente 6 graus de liberdade para cada posição (3 erros de deslocamentos e 3 erros rotacionais).

Atualmente, devido à falta de sistemas de medição para uma análise, os eixos de movimentos da CMM devem ser tratados em separado em relação aos erros de cada eixo de movimento. Uma avaliação quantitativa direta da qualidade da CMM não é possível baseada nos erros referentes a cada eixo, pois os mesmos se aplicam a máquina e não à medição. Geralmente o usuário não pode interpretar isto adequadamente. Os erros específicos da medição em questão são aqueles interpretados em relação ao objeto a medir em si (devido aos erros da CMM), como por exemplo, erros de comprimento, de distância, de planicidade, de circularidade, de cilíndricidade, etc.

Dado que os últimos parâmetros representam o resultado da medição propriamente dito, a calibração de CMM deveria incluir a determinação dos erros específicos da operação.

A calibração de uma CMM é a determinação dos erros nos resultados finais de tarefas de medição executadas [2].

Devido à sua complexidade e universalidade as CMM não podem ser calibradas com rastreamento a padrões nacionais ou internacionais para maioria das tarefas. Em princípio existem três aproximações para tentar superar isto [2]:

- a determinação direta dos erros pela medição de um objeto calibrado similar ao objeto a ser medido. Nesta aproximação a CMM é reduzida a um comparador para uma medição por substituição.

Contudo, existe o desconhecimento de regras para tais procedimentos, particularmente as não similaridades entre os objetos calibrados e aqueles a serem medidos. Então, até agora o princípio tem sido restrito para idênticas dimensões e formas. Esta aproximação pode ser fácil e econômica, mas para a maioria das aplicações este chamado "princípio comparador" não é praticável, quando o objeto não existe ou não é avaliado pelo usuário da CMM;

- na maioria dos casos uma aproximação indireta é usada, onde a qualificação é realizada por medição de tarefas padronizadas. Estas são na maioria dos casos uma série de comprimentos de medição (medição de diferentes padrões de comprimentos em diferentes disposições dentro do volume de medição da CMM) e a medição de uma esfera de referência ("ensaio de apalpação"). O resultado da qualificação informa para o usuário se a CMM cumpre as especificações do fabricante para as tarefas padronizadas. Métodos de qualificação são especificados em várias normas nacionais e internacionais. Se a CMM satisfaz especificações para tarefas padronizadas, isto é muitas vezes assumido como válido também para qualquer outro tipo de tarefa.
- a terceira aproximação é através da determinação das 21 componentes de erros, que é freqüentemente chamada de "calibração". Embora esta, na verdade forneça os principais erros da CMM, para a avaliação do usuário isto nada diz em relação aos

erros esperados no resultado da medição. As CMM são sistemas de medição de multi-propósitos e as componentes de erros se sobrepõem diferentemente para as diversas tarefas e estratégias de medição. Então, geralmente esta aproximação não cumpre as exigências da calibração.

Devido às limitações das aproximações anteriores, durante os anos de 1991/92 o PTB elaborou o método "CMM virtual" [2, 15, 35, 36] que é um modelo de software contendo o comportamento de erros da CMM, que executa simulações de tarefas de medições específicas. Isto permite avaliar as incertezas de todos os resultados de medição e então garante a rastreabilidade para essas medições.

Na figura 3.4 tem-se o princípio de simulação de tarefas na CMM virtual. Primeiro a geometria do objeto ideal de medição tem que ser definida. Os pontos de apalpação sobre a superfície do objeto são escolhidos de modo semelhante a aqueles da medição real. As coordenadas dos pontos livres de erros (ideais) são sobrepostos com os respectivos vetores de erros da CMM (aplicando a efetiva configuração do apalpador).

A avaliação dos pontos de medição afetados de erros é realizada da mesma maneira dos pontos medidos na realidade. Os resultados são os parâmetros da geometria dos objetos, tal como por exemplo diâmetros, erros de planicidade e distâncias. A medição virtual é repetida várias vezes.

Dentro de todos percursos da simulação os erros aleatórios são simulados e tem-se as variações das componentes de erros.

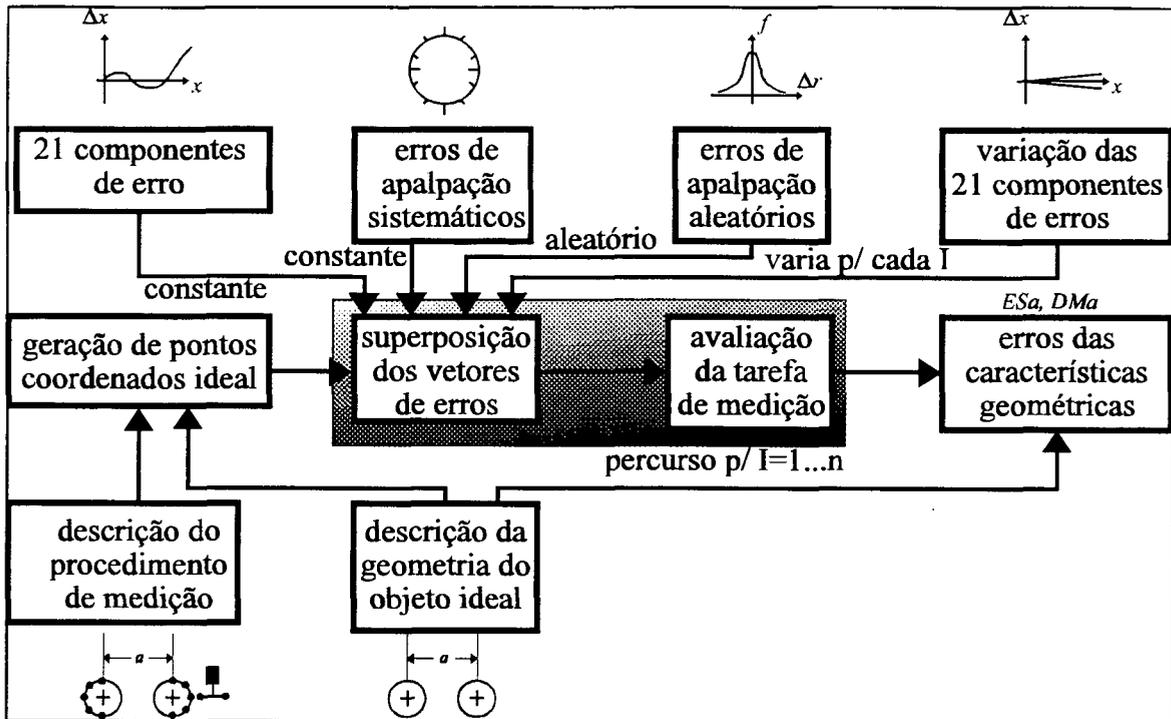


Figura 3.4 - Esquema da CMM virtual [34].

Os resultados finais da simulação são os erros esperados na medição de dimensão, forma e posição junto com suas dispersões.

Em resumo, a CMM virtual abrange:

- a avaliação de erros da CMM;
- a superposição destes erros, baseada sobre um modelo de erro para cada ponto medido;
- avaliação simulada de tarefas de medição.

3.2.4 Requisitos necessários para qualificação da CMM

Os requisitos necessários para um esquema ideal de calibração, ensaio de aceitação e inspeção são [4]:

- a rastreabilidade à padrões nacionais e internacionais de comprimento requerem a materialização de medidas estáveis que possam ser calibradas, para o qual se faz necessário um serviço de calibração;
- a incerteza de medição de um procedimento de inspeção e calibração deve ser apropriada para todas CMM de menor incerteza de medição no mundo (atualmente aproximadamente $1,5 \times 10^{-6} \cdot L \geq 1 \mu\text{m}$). Isto significa padrões com incertezas de medição menor que $0,75 \times 10^{-6} \cdot L \geq 0,5 \mu\text{m}$ (ainda melhor $0,15 \times 10^{-6} \cdot L \geq 0,1 \mu\text{m}$ [19]);
- o método deve ser harmonizado para calibração, ensaio de aceitação e inspeção. Pelo menos, dever-se-ia utilizar os mesmos padrões para todas as diferentes qualificações.

Os seguintes requisitos são determinantes:

- . o ensaio de apalpação exige padrões calibrados;
- . na calibração (como é o tipo mais exigente) deve ser considerada a totalidade dos erros no volume de medição calibrado e seus efeitos para todas tarefas de medição para qual a CMM deve ser calibrada.
- os resultados da calibração, ensaio de aceitação e inspeção devem ser comparados diretamente uns com outros, e ter um subconjunto comum de parâmetros de qualidade;
- os parâmetros de qualidade devem ser facilmente interpretados pelo usuário e compatíveis com normas e recomendações técnicas;

- o custo com pessoal, treinamento, hardware e software deve ser razoável para usuários médios de CMM, incluindo as empresas menores;
- o esquema deve ser orientado para o futuro, com capacidade de ampliação para diversos tipos construtivos de CMM e para ser aplicado para qualquer tarefa de medição.

3.3 ENSAIOS GEOMÉTRICOS PARA DETERMINAÇÃO SELETIVA DAS COMPONENTES DE ERROS DA CMM

Os ensaios geométricos são utilizados para determinação seletiva das componentes de erros em cada eixo de movimento da CMM. Da superposição das componentes de erros resulta o erro total em todas as regiões dentro do volume de medição.

As 21 componentes de erros descrevem o comportamento da máquina (no caso da CMM com 3 eixos cartesianos e mesa rotativa as componentes a considerar são 29). Esta descrição é conseguida com boa aproximação, se bem que não em forma exata devido à interação entre os eixos de movimento e que o comportamento do sistema varia com o tempo. Este método de ensaio ainda é muito utilizado.

Os principais ensaios geométricos para determinação seletiva das componentes de erros são [10, 4]:

- ensaio de posicionamento;
- ensaio de retilidade;

- ensaio de perpendicularidade;
- ensaios rotacionais (rolamento, inclinação, guinamento);
- qualificação da mesa rotativa de posicionamento angular.

Na figura 3.5 tem-se os principais sistemas de medição para determinação das componentes de erros da CMM, conforme [4, 20, 31].

3.4 QUALIFICAÇÃO DE CMM COM PADRÕES CORPORIFICADOS

Na qualificação de CMM com padrões corporificados determinam-se diretamente os erros, assim como aparecem durante o funcionamento, sob as mesmas condições de medição. Estes são, na maioria das vezes, chamados de erros específicos da operação.

As informações do comportamento de erros da CMM dependem do padrão corporificado utilizado, que pode ser: anel padrão, esfera padrão, blocos padrão, padrão escalonado, padrões circulares, barra com esferas, placa com esferas ou furos, peça padrão tridimensional.

Os padrões corporificados podem ser utilizados a nível de inspeção e ensaio de aceitação, sendo também possível a calibração para uma quantidade limitada de tarefas de medição.

COMPONENTES DE ERROS DA CMM	SISTEMAS DE MEDIÇÃO
Erro de posicionamento	Laser interferométrico, padrão escalonado
Erro de retilineidade	Régua padrão, laser com interferômetro de retilineidade, laser de alinhamento
Erro de perpendicularidade	Esquadro padrão, laser interferométrico com dispositivo para perpendicularidade, laser de alinhamento
Erro de guinamento, inclinação e rolamento	Interferômetro trabalhando de forma diferencial, autocolimadores, níveis eletrônicos, réguas, padrões de planicidade
Erros da mesa rotativa	Padrões: cilíndricos, planos e esféricos, transdutor rotativo padrão, polígonos de reflexão

Figura 3.5 - Sistemas de medição para diferentes componentes de erros da CMM.

3.4.1 Ensaios de incerteza de apalpação

Os subsistemas de apalpação em uso diferem quanto a sua configuração e quanto ao seu modo de operação (cabeçote apalpador medidor ou comutador). A incerteza de apalpação depende das características elétricas, cinemáticas e mecânicas do subsistema de apalpação.

O erro de apalpação é a diferença que ocorre entre os valores das coordenadas medidas e o valor verdadeiro da posição quando se apalpa um ponto da peça de trabalho. A incerteza de apalpação é o valor limite de erro que não será excedido com uma probabilidade de 95%.

A fim de minimizar a influência de outras componentes de erros (erros de posicionamento, retilineidade, perpendicularidade e rotação) na incerteza de apalpação, o padrão corporificado a ser usado deve ser pequeno (menor que 30 mm, normalmente) comparado com a faixa de operação da CMM.

A incerteza de apalpação pode ser determinada na direção dos eixos coordenados (X, Y e Z), nos planos (XY, XZ, YZ) e em direções espaciais da CMM com os seguintes padrões (fig.

3.6):

- incerteza de apalpação - 1D com bloco padrão;
- incerteza de apalpação - 2D com anel padrão;
- incerteza de apalpação - 3D com esfera padrão.

A determinação da incerteza de apalpação com esfera padrão é a mais recomendada, por ser mais abrangente [2].

No capítulo 4 será apresentada uma metodologia para ensaio de incerteza de apalpação.

3.4.2 Qualificação de CMM com blocos padrão

O método mais simples para qualificação de CMM é através da medição de padrões de comprimento. Os blocos padrão com distintos comprimentos são medidos em posições e orientações variadas no volume de medição da CMM, obtendo-se como resultado a incerteza de medição da CMM na medição de comprimentos (fig. 3.7).

A incerteza de medição de comprimento no volume de medição da CMM é a incerteza com que a CMM pode determinar a distância entre dois pontos localizados sobre as superfícies paralelas dos blocos padrão [9].

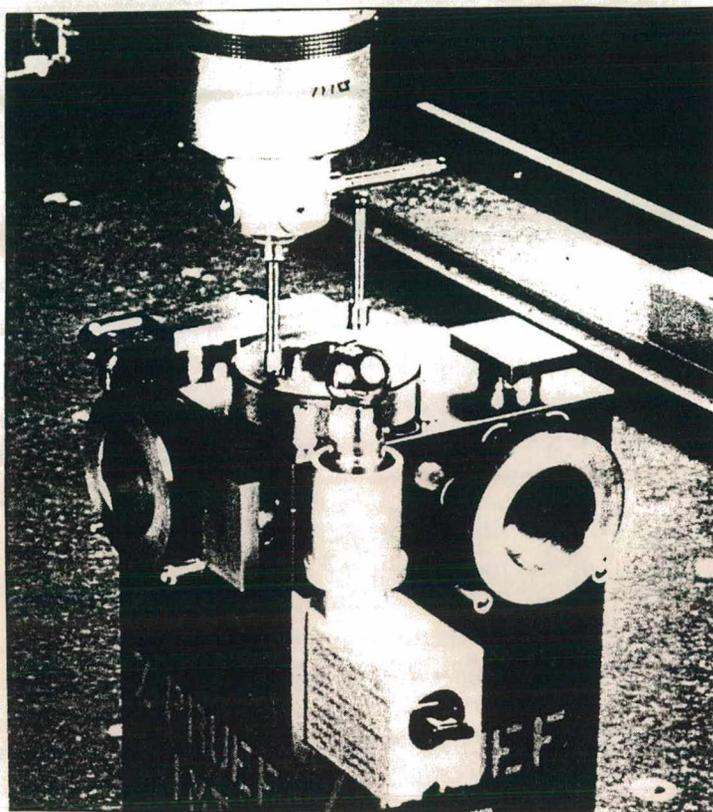


Figura 3.6 - Ensaio de incerteza de apalpação utilizando esfera, anéis, blocos padrão [4].

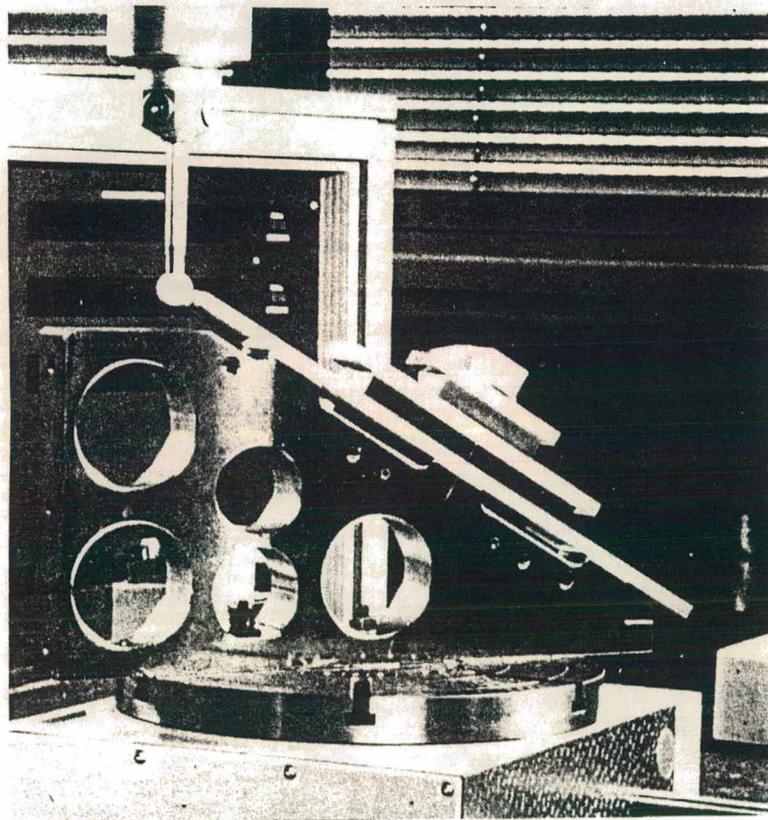


Figura 3.7 - Blocos padrão para qualificação de uma CMM [4]

A limitação da qualificação com blocos padrão é o comprimento do bloco padrão, que está limitado em 1 m [12].

A qualificação de CMM com blocos padrão está difundida em vários países através de publicações, normas e recomendações técnicas [4, 6, 7, 9, 13, 14, 18, 37, 38].

Uma metodologia para qualificação de CMM com blocos padrão será apresentada no capítulo 4.

3.4.3 Qualificação de CMM com padrão escalonado

Na qualificação com padrão escalonado tem-se como objetivo, também, a determinação da incerteza de medição de comprimento.

O padrão escalonado pode ser construído com blocos inseridos individualmente no corpo básico, normalmente está limitado em 2,5 m [12]. A apalpação da CMM pode ocorrer de ambos os lados para medição interna ou externa (fig. 3.8). Para a determinação da incerteza de medição de comprimento o padrão escalonado deve ser orientado em várias posições na CMM.

Para máquinas maiores (faixa de operação acima de 2,5 m) utiliza-se [4]:

- padrão com esferas escalonadas e com suporte de CFK (fibra de carbono) na linha neutra (fig. 3.9), podendo ser desmontáveis, este padrão pode atingir até 6 m.
- padrão com blocos escalonados em uma estrutura em forma de barra CFK.

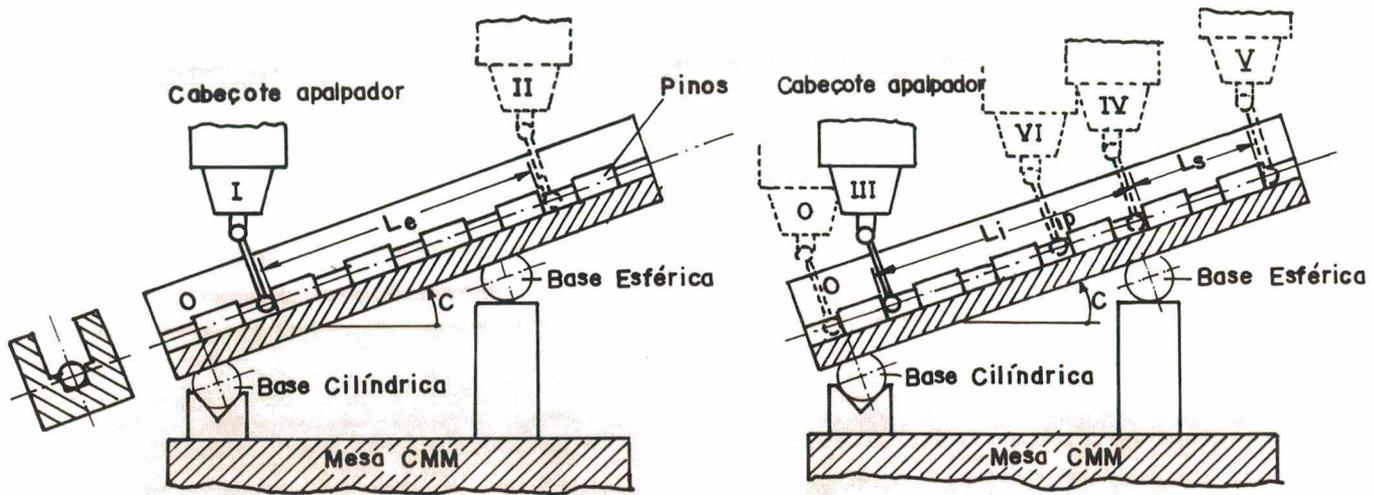


Figura 3.8 - Padrão escalonado na CMM para medição IM de comprimentos interno e externo [20].

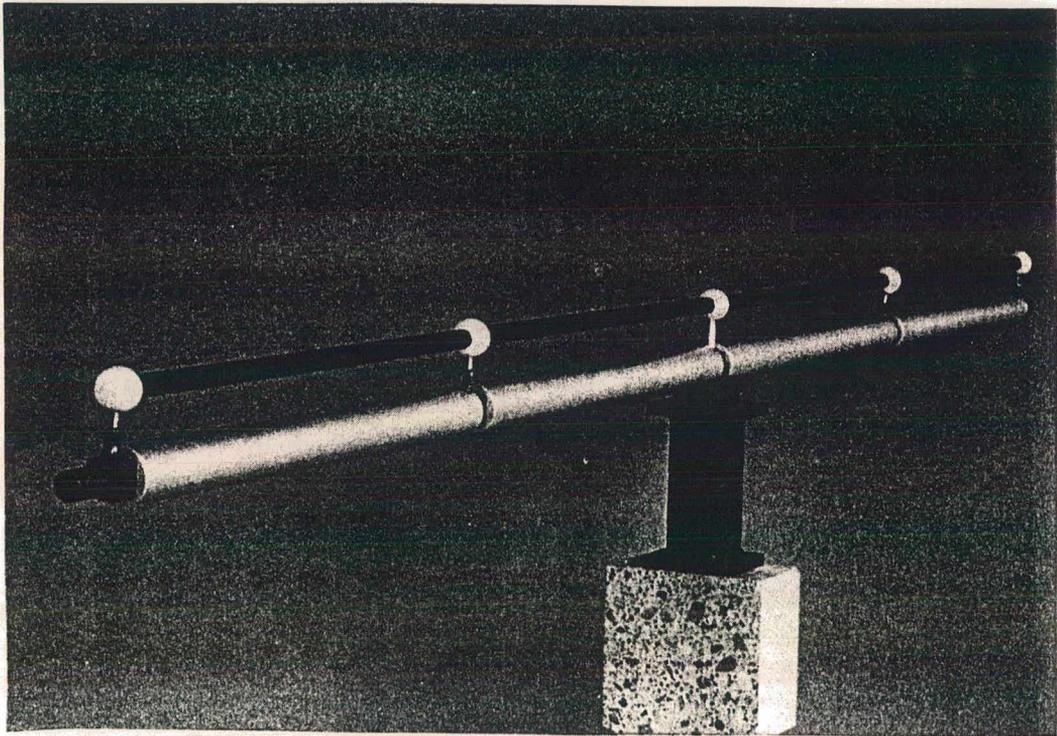


Figura 3.9 - Padrão com esferas escalonadas [4]

Os padrões modernos não corporizam múltiplos exatos de um comprimento, mas subdivisões irregulares na faixa de operação. Na figura 3.10 mostra-se os problemas associados quando os pontos de medição são tomados periodicamente, sendo solucionado este problema através da medição em pontos aleatórios na faixa de operação.

No capítulo 4 será apresentado uma metodologia para qualificação de CMM com padrão escalonado.

3.4.4 Qualificação de CMM com Barras com Esferas ("ball bar")

A qualificação de CMM com barras com esferas é utilizada principalmente nos EUA, sendo recomendado pela norma ANSI/ASME B.89.1.12M [5].

Com a barra com esferas pode-se verificar a incerteza de medição espacial (IM3D) ou volumétrica em substituição aos blocos padrão [40].

A barra pode ser de aço, invar, fibra de carbono (CFK) ou outro material com esferas nos extremos como elementos a serem apalpados (fig. 3.11).

Um dispositivo de montagem possibilita medir as esferas em diversas orientações segundo os eixos e diagonais no volume de trabalho da CMM (fig. 3.12). O número de posições varia em função do volume de trabalho, chegando à 35 posições para CMM de grandes volumes de medição.

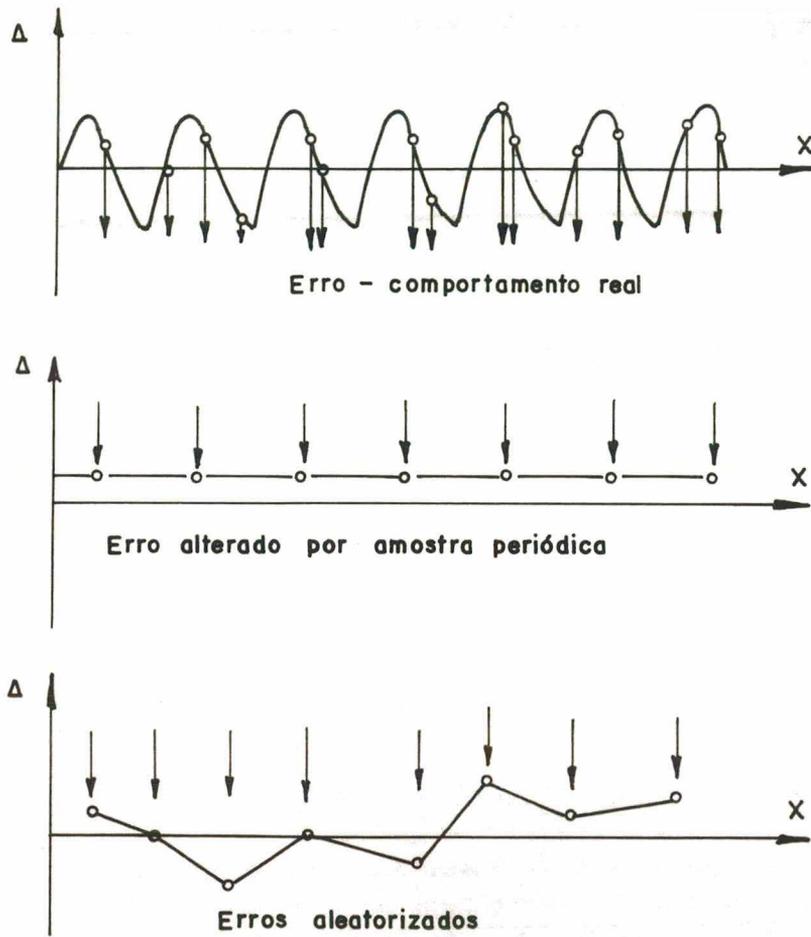


Figura 3.10 - Problemas na medição, quando os pontos são tomados periodicamente [39].

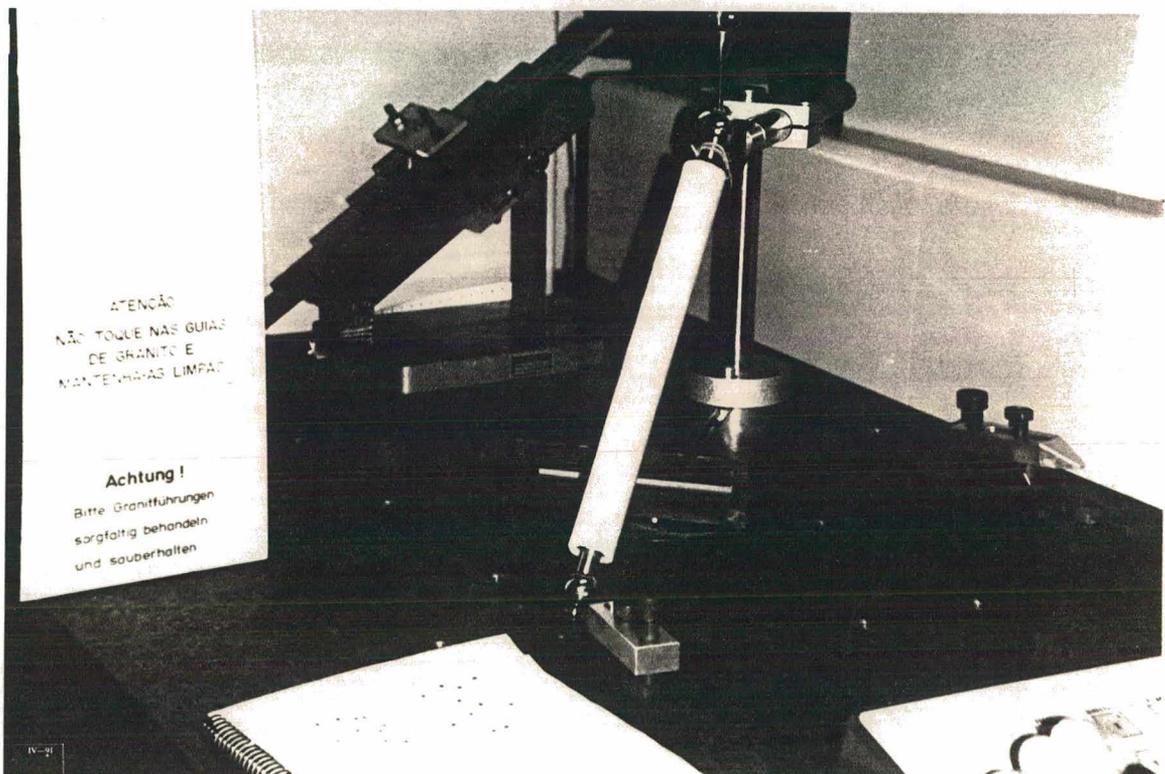


Figura 3.11 - Barra com esferas em uma CMM.

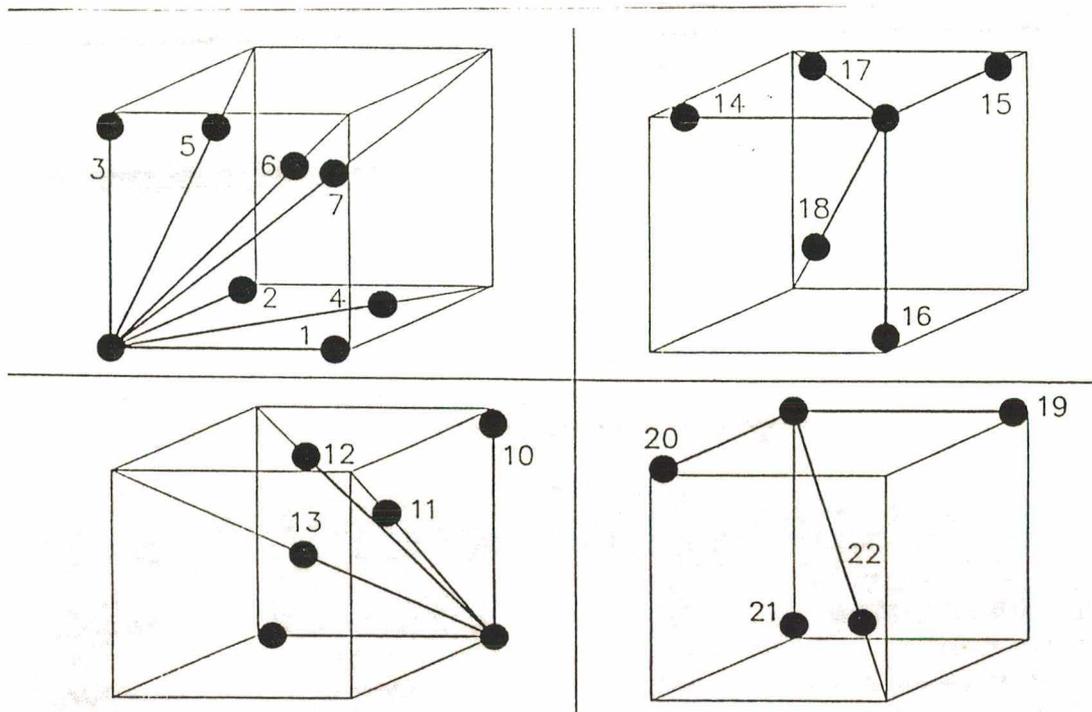


Figura 3.12 - Disposição da barra de esferas no volume de trabalho da CMM [4].

Alternativamente, utiliza-se um dispositivo de fixação em uma das extremidades (por exemplo, sob ação de força magnética) em uma cavidade, constituindo uma rótula fixa. A outra esfera ocupa qualquer posição no espaço, determinada pela CMM com auxílio de um sensor auto-centrável (fig. 3.13) [5, 20, 41]. Para análise da incerteza de medição determina-se a diferença da posição entre o ponto medido e a esfera média definida pelo conjunto de pontos.

As vantagens do método são a grande quantidade de orientações das linhas de medição, que podem ser medidas facilmente, e o baixo preço do padrão, que pode ser fabricado pelo próprio usuário.

A desvantagem é a pouca quantidade de comprimentos de medição para cada orientação.

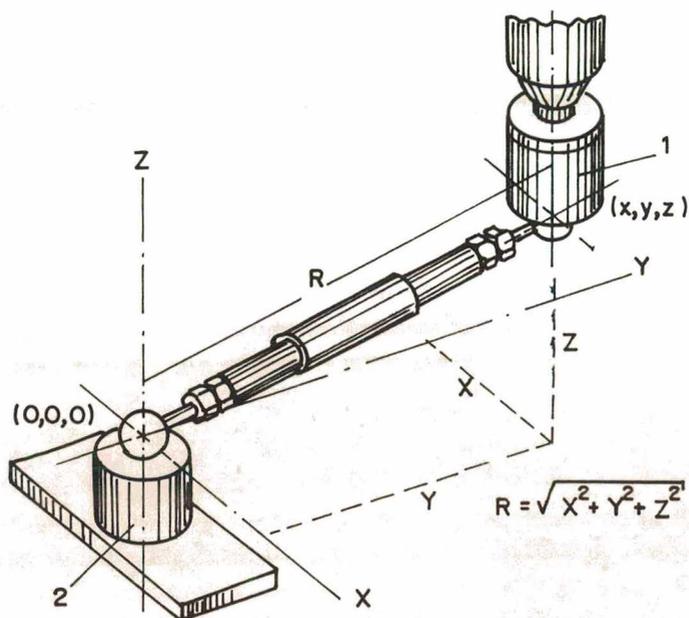


Figura 3.13 - Barras com esferas rotulada [20].

3.4.5 Qualificação de CMM com Padrão de Comprimento - "Machine Cheking Gauge - MCG"

Com o padrão de comprimento MCG pode-se verificar a incerteza de medição espacial de forma rápida na inspeção periódica de CMM [42].

A figura 3.14 mostra o padrão de comprimento e as posições de medição para a determinação dos erros no volume de trabalho da CMM. São recomendadas 24 posições em 3 planos (-45°, 0°, +45°) em intervalos de 45°.

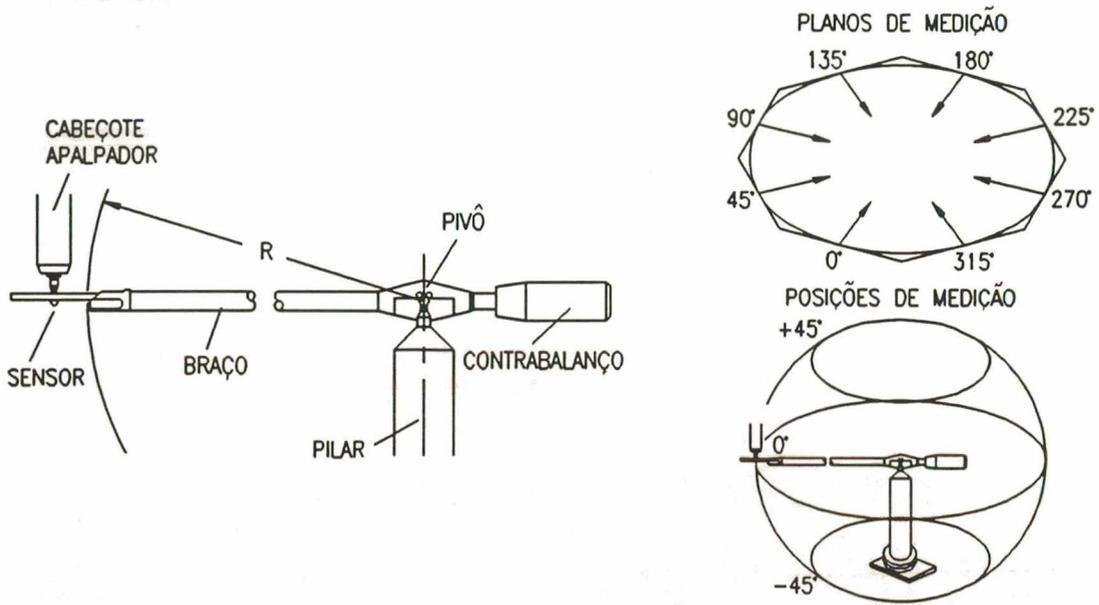


Figura 3.14 - Posições do padrão de comprimento MCG no volume de trabalho da CMM [43].

A incerteza de medição da CMM é determinada pela diferença entre o ponto medido e esfera média definida pelo conjunto de pontos para um determinado comprimento.

Este padrão de comprimento normalmente é rastreado pelo NPL (National Physical Laboratorie) e NBS (National Bureal Standards) da Inglaterra [42].

3.4.6 Qualificação de CMM com Padrões Circulares

A qualificação com padrões circulares é um método pouco difundido. Uma placa circular, na maioria das vezes calibrada, ou um anel padrão é medido em várias posições e com diversas combinações dos apalpadores (fig. 3.15).

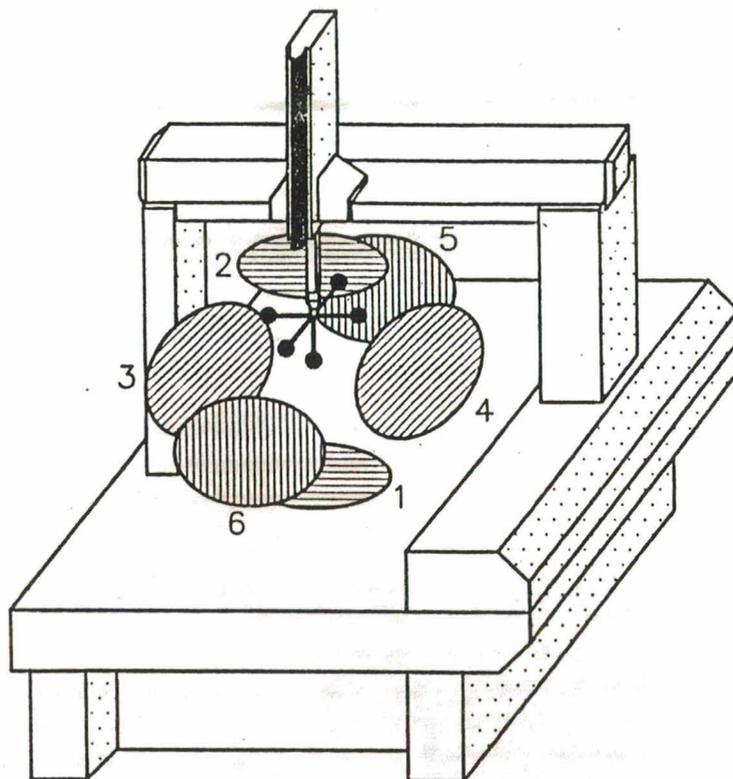


Figura 3.15 - Disposição dos padrões circulares da CMM [4].

Como mostrado na figura 3.16, podem ser determinadas importantes causas de erros da CMM [4, 20]:

- a partir dos diâmetros paralelos aos eixos se determinam os fatores de escala ou de comprimento (fig. 3.16.a);
- a partir das diferenças dos diâmetros inclinados em 45° com relação aos eixos se calculam os erros de perpendicularidade (fig. 3.16.a);
- erro de perpendicularidade observado com anel padrão em duas posições, para confirmar que o erro é da CMM (fig. 3.16.b).

Com anéis padrão maiores (40 a 500 mm) em diferentes posições no volume de trabalho da CMM pode-se observar as influências das 21 componentes de erros [44]. Com os anéis padrão menores (< 30 mm) determina-se a incerteza de apalpação bidimensional, conforme foi mencionado em 3.4.1.

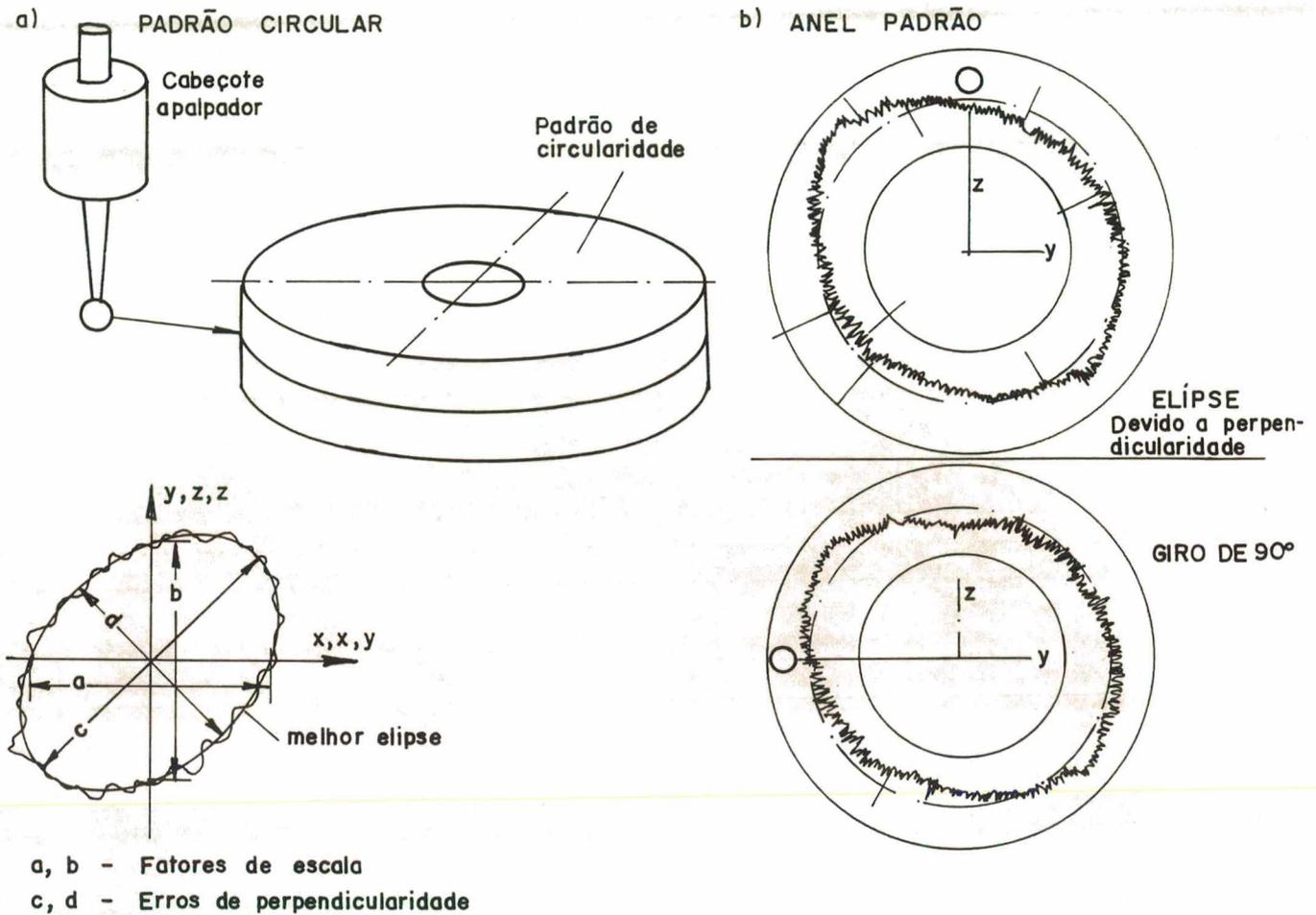


Figura 3.16 - Erros de perpendicularidade identificados com padrão circular e anel padrão.

3.4.7 Qualificação de CMM com placas com esferas ou furos (peças padrão - 2D)

Na Alemanha, um grupo de trabalho formado por usuários e fabricantes de CMM, assim como o PTB (Physikalisch - Technische Bundesanstalt), estão substituindo na qualificação de CMM, padrões unidimensionais (blocos padrão, por exemplo) por padrões bidimensionais, especificamente placas com esferas ou furos esféricos [2, 12, 28, 34, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 1, 52, 53]. Estas têm, entre outras, a vantagem de necessitarem poucas posições de medição

e com isso menos tempo de preparação em relação aos padrões unidimensionais, para obter conclusões seguras sobre a incerteza de medição da CMM.

As placas padrão se mostraram adequadas com duas variantes construtivas: placas com esferas de cerâmica colocadas em um plano neutro (fig. 3.17.a) e placas com anéis esféricos (fig. 3.17.b). O primeiro tipo de placa é um padrão utilizado na Alemanha para a inspeção de CMM. Esta placa pode ser encontrada no comércio, possuindo 25 esferas distribuídas uniformemente sobre a placa.

O segundo tipo de placa possui entre 40 e 70 elementos na borda da placa, dependendo do tamanho da mesma. Esta placa é essencialmente adequada para calibração e determinação dos parâmetros de correção da CMM, onde se requer pequenas distâncias entre as posições de apalpação.

As experiências obtidas até hoje com placas padrão com os tipos construtivos mencionados, indicam que a estabilidade dimensional das mesmas é boa. As primeiras recalibrações depois de transcorrido mais de 1 ano e meio não indicaram variações significativas, dentro de uma incerteza de $0,7 \mu\text{m}$ própria da calibração. Em placas com esferas de cerâmica, a máxima variação medida foi de $0,4 \mu\text{m}$. Como material básico da placa foi utilizado o aço (especialmente o aço que se utiliza para construção de blocos padrão). Para aplicações particularmente exigentes se comprovam a vantagem das placas de zerodur. Atualmente estão sendo experimentados outros materiais no PTB, tais como cerâmica, CFK e alumínio, a fim de minimizar o preço, peso e tamanho, e tornar a aplicabilidade fácil e rápida, e ampliar o campo de aplicação [4].

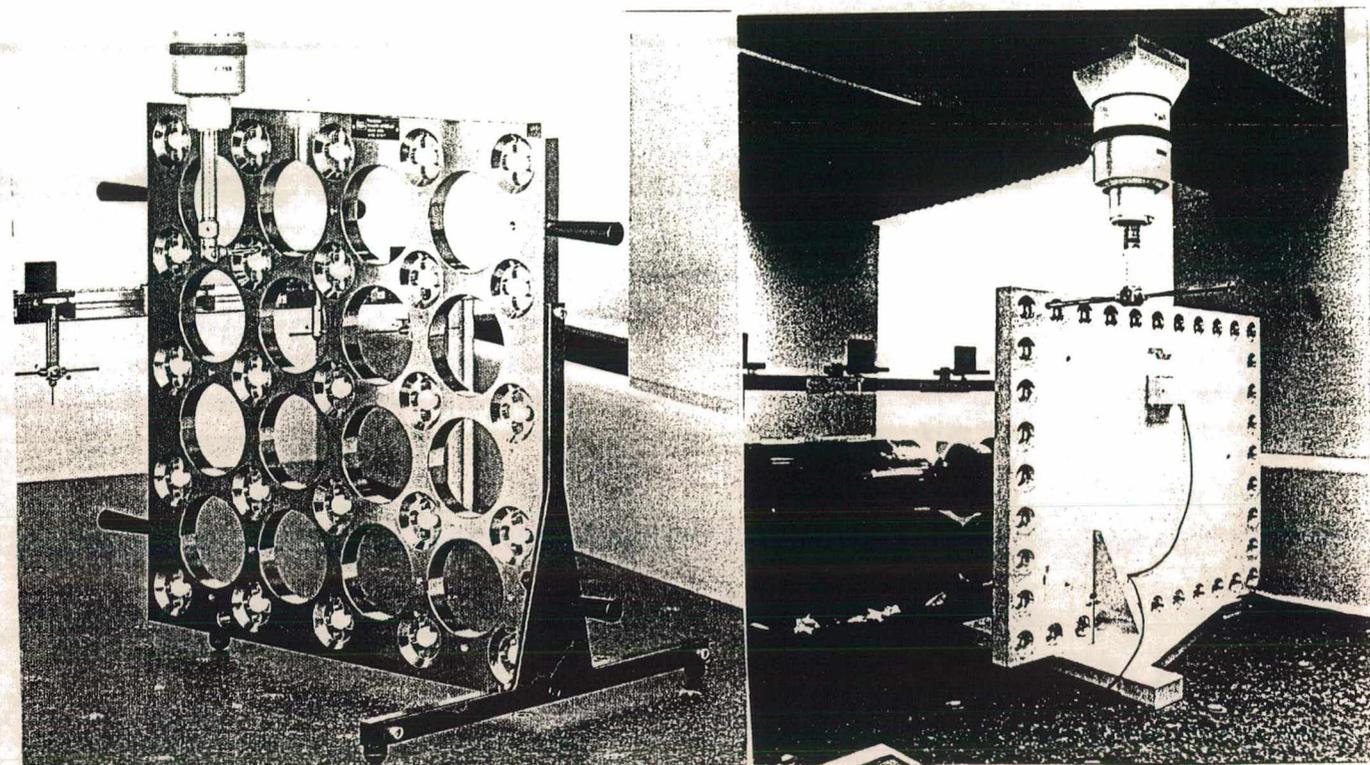


Figura 3.17 - Placas padrão a) com esferas de cerâmica [39] b) com anéis esféricos.

As placas maiores fabricadas atualmente tem dimensões de 1m x 1m. Placas ainda maiores (até 2m x 2m) podem ser construídas utilizando barras de CFK e esferas de cerâmica [2].

Para a determinação das componentes de erros, para ensaio de aceitação, para calibração, ou para atualização dos parâmetros de correção da CMM, o PTB desenvolveu um procedimento, incluindo um programa de cálculo que está sendo colocado em prática em fábricas de automóveis e de CMM, entre outras [2, 4, 45, 46].

Uma metodologia para qualificação de CMM com placas padrão será apresentada posteriormente, no capítulo 4.

3.4.8 Qualificação de CMM com padrões tridimensionais - 3D

A qualificação CMM com padrões tridimensionais (como por exemplo um cubo com esferas nos vértices) são mais convenientes que os padrões unidimensionais ou bidimensionais. Entretanto estes padrões apresentam problemas atuais de construção, de estabilidade, de calibração, do transporte e de preço. Por isso a qualificação com padrões 3D ainda é pouco utilizada.

Na figura 3.18 tem-se exemplos de padrões 3D, o primeiro é um padrão construído de barras de CFK com esferas de cerâmica nos vértices, o segundo é um paralelepípedo com furos nas faces.

Outros padrões 3D foram propostos nos últimos anos, como pode ser visto em [38, 55, 56, 57, 58, 59].

3.4.9 Ensaio dos "Quatro eixos e 3D - alfa"

O ensaio dos "quatro eixos e 3D - alfa" é aplicado para CMM com 3 eixos lineares e mesa rotativa.

É recomendado pela norma ANSI/ASME B.89.1.12M [5] e pelas recomendações da CCMA [7] e VDI/VDE 2617 [11], para a determinação dos erros da CMM com mesa rotativa.

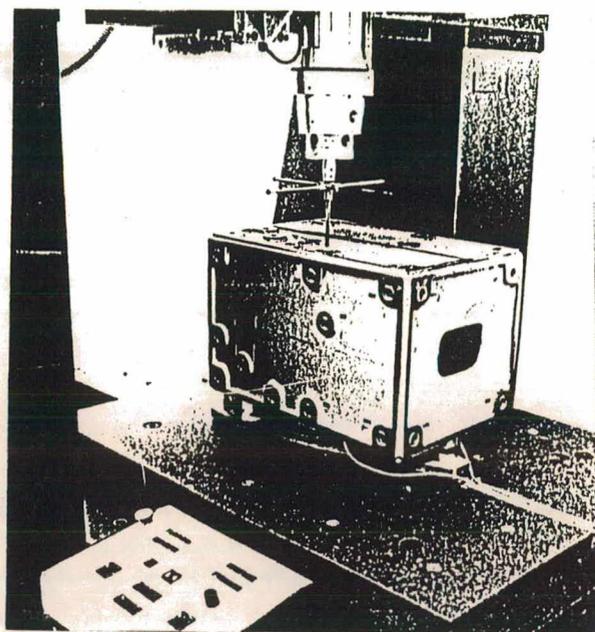
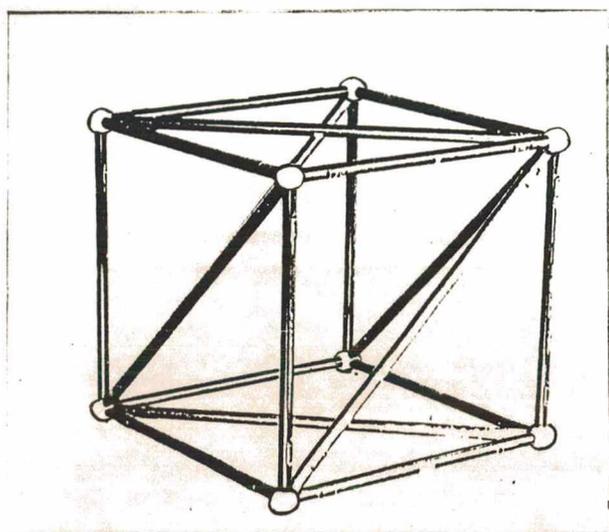


Figura 3.18 - Padrões tridimensionais: a) cubo construído de barras de CFK com esferas de cerâmica nos vértices [54], b) paralelepípedo com furos sobre as faces [12].

A determinação da incerteza de medição (IM) para quatro eixos, é a incerteza de medição na medição de distâncias centro a centro de duas esferas localizadas sobre a mesa rotativa (fig. 3.19.a), as localizações das esferas são pré-determinadas para comparação com posições angulares da mesa rotativa.

A determinação da incerteza de medição "3D - Alfa" (fig.3.19.b) utiliza os mesmos resultados do ensaio anterior considerando os erros de posicionamento das coordenadas do centro de cada esfera (incerteza de medição radial, tangencial e axial).

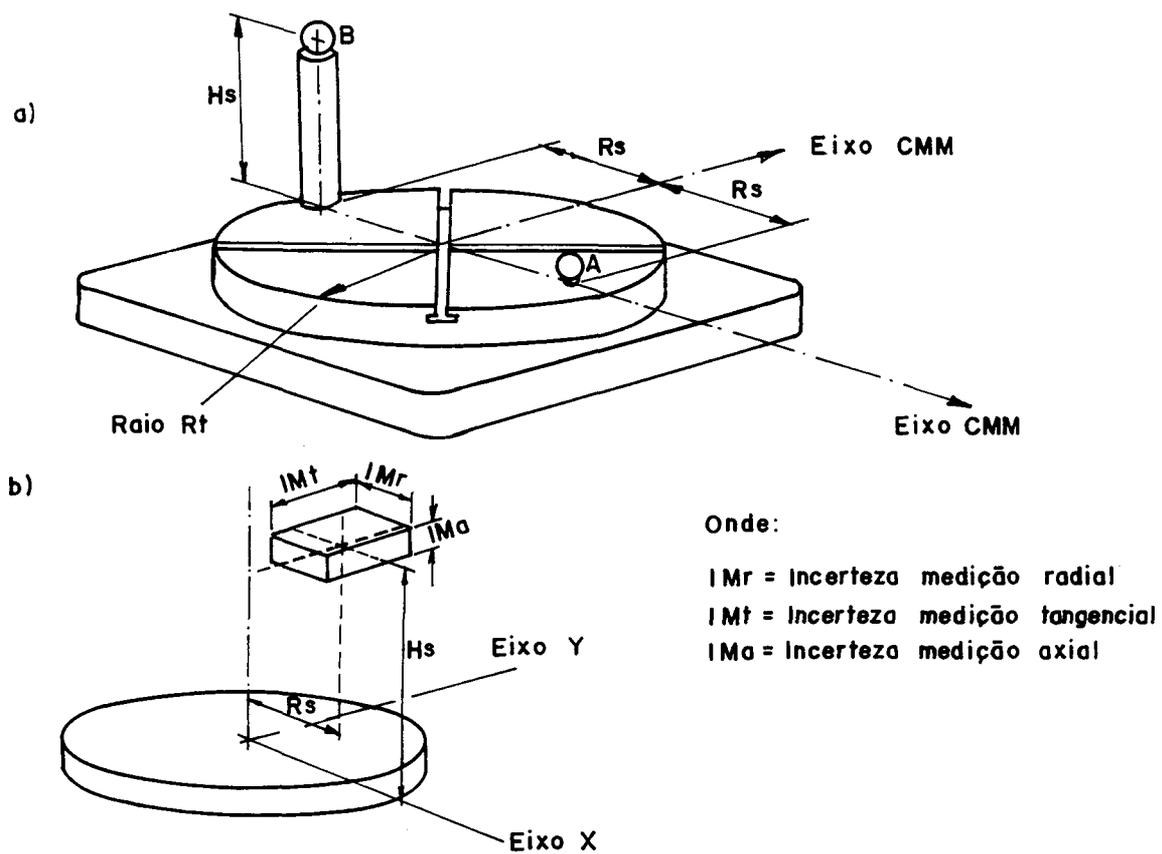


Figura 3.19 - Esferas montadas sobre mesa rotativa da CMM para ensaios [5]: a) Quatro eixos, b) 3D alfa

3.4.10 Qualificação da mesa giratória utilizando placa com esferas

Para determinação das componentes de erros de mesas giratórias, existe no PTB um procedimento baseado em padrões corporificados, no qual se emprega placas especiais com esferas [31, 20, 2].

O procedimento de qualificação consiste em [20]:

- instalar sobre a placa da mesa giratória, a placa de referência com esferas padrão (fig.3.20);
- determinar as coordenadas da esferas de referência para diversas posições angulares da mesa, através da apalpação com sensor adequado da CMM;
- com os dados obtidos, através de cálculos matriciais executados por um programa especial, podem ser obtidos deslocamentos axiais, deslocamentos radiais, deslocamentos angulares (bamboleamento), erro de posicionamento angular.

O procedimento tem como objetivos:

- diminuir o tempo de qualificação;
- simplificar a execução;
- automatizar a medição;
- minimizar os sistemas de medição envolvidos.

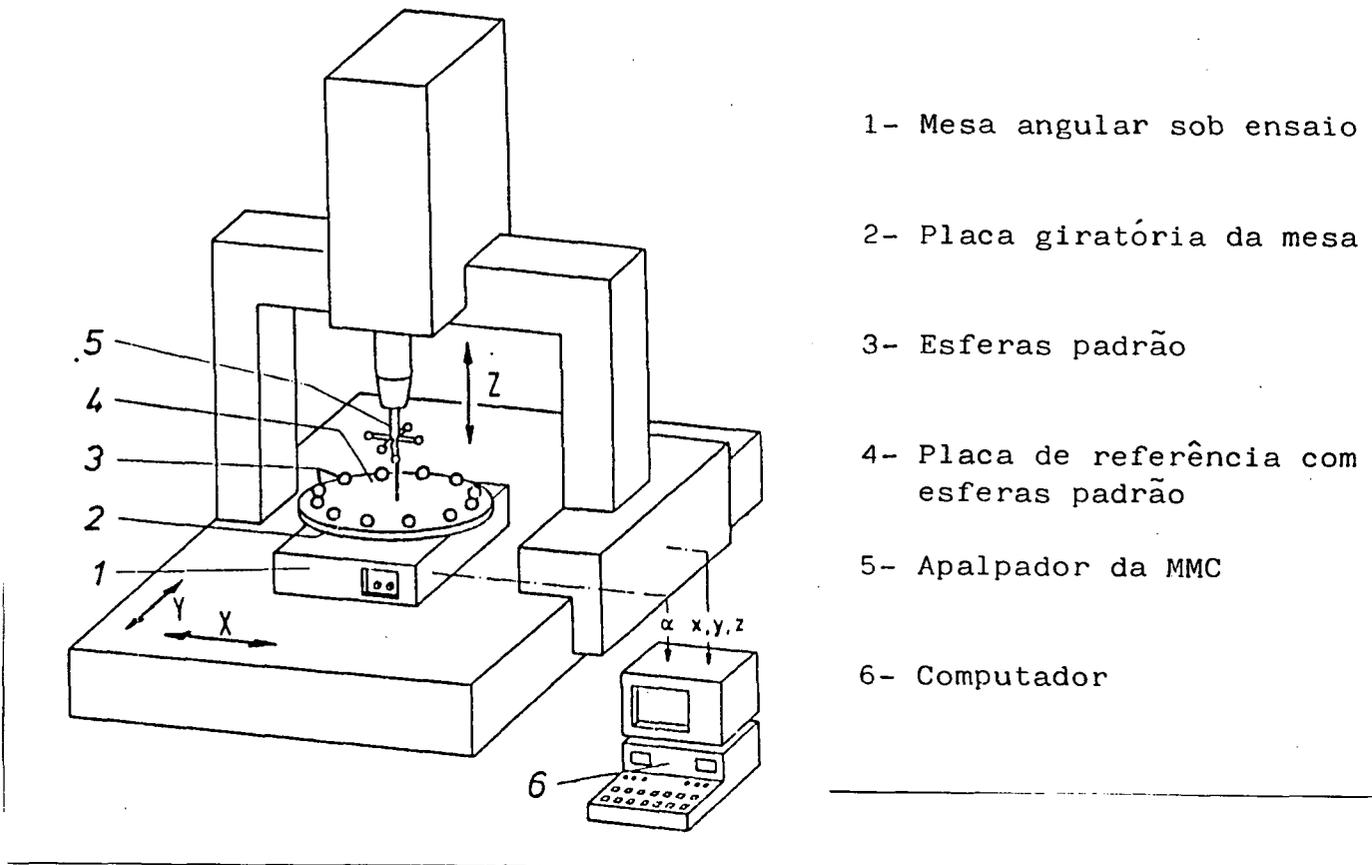


Figura 3.20 - Qualificação com CMM da mesa de posicionamento angular com placa com esferas padrão [20].

3.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS PADRÕES CORPORIFICADOS PARA QUALIFICAÇÃO DA CMM

Existem vários padrões corporificados para qualificação da CMM, mas nem todos são suficientes para um ensaio de aceitação mais criterioso e para uma calibração da CMM. Na figura 3.21 tem-se um resumo dos padrões corporificados em ordem de prioridade que podem ser utilizados na qualificação (inspeção, ensaio de aceitação e calibração) da CMM.

PRIORIDADE	INSPEÇÃO	ENSAIO DE ACEITAÇÃO	CALIBRAÇÃO
1.	PLACAS COM ESFERAS, PLACAS COM FUROS - 2 posições - Aproximadamente 15 a 25 pontos por posição - Incerteza de medição de comprimento - Ensaio da esfera (incerteza de apalpação)	PLACAS COM ESFERAS, PLACAS COM FUROS - 4 posições - Aproximadamente 25 a 70 pontos por posição e eixo de movimento - Componentes de erros, incerteza de medição de comprimento - Ensaio da esfera	PLACAS COM ESFERAS, PLACAS COM FUROS - 4 posições - Aproximadamente 25 a 70 pontos por posição e eixo movimento - Componentes de erros, incerteza de medição de comprimento em 3 dimensões, outras operações relacionadas as incertezas (simulação) - Ensaio da esfera
2.	PADRÃO ESCALONADO - 4 posições - 5 comprimentos por posição - Incerteza de medição de comprimento	PLACAS COM ESFERAS, PLACAS COM FUROS - 2 posições - 15 a 25 pontos por posição - Incerteza de medição de comprimento (mais a eventual medição das componentes de erros)	Ensaio idêntico com a tarefa de medição
3.	PARALELEPÍPEDO DE ENSAIO (padrão tridimensional) - 1 posição - 8 esferas ou similar, medidas com vários apalpadores - Incerteza de medição de comprimento em cada trecho	PADRÃO ESCALONADO - 7 ou mais posições - 5 comprimentos por posição - Incerteza de medição de comprimento (mais a eventual medição das componentes de erros)	
4.	BARRA COM ESFERAS (BARRA CALIBRADA) - Aproximadamente 22 posições - Incerteza de medição de comprimento		

Figura 3.21 - Resumo dos padrões corporificados para qualificação de CMM [4].

Na figura 3.22 tem-se uma comparação entre os métodos de qualificação com sistemas de medição e padrões, onde pode-se observar que qualquer um desses métodos tem incerteza de medição baixa, mas alguns requerem muito tempo, esforço e habilidade e sistemas de medição caros. É intenção que os métodos sejam: de fácil execução, rápidos, de baixos preços, amplamente aceitos por fabricantes e usuários e atendam a inspeção, ensaio de aceitação e calibração. Na comparação, o padrão que melhor atende atualmente as exigências é a placa padrão com esfera ou furos e o padrão 3D (com estrutura de barras).

O padrão - 3D com estrutura de barras ainda é pouco utilizado devido aos problemas mencionados anteriormente. Então, conclui-se que a placa padrão com esferas ou furos esféricos é atualmente a melhor opção para a qualificação da CMM.

MÉTODOS DE QUALIFICAÇÃO COM:	SISTEMAS DE MEDIÇÃO DEDICADOS PARA MEDIR COMPONENTES DE ERROS SEPARADAMENTE	BARRA COM ESFERAS	PADRÃO ESCALONADO, LASER COM BLOCO	PLACA COM ESFERA/ PLACA COM FUROS	PADRÃO 3-D (SÓLIDO OU COMPOSTO DE ESFERAS)	PADRÃO 3-D (COM ESTRUTURA DE BARRAS)
VANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> - incerteza de medição baixa - comprovado - conveniente para todos os tamanhos CMM - todas componentes de erros - acesso a todo o volume de trabalho - densidade elevada de pontos de medição 	<ul style="list-style-type: none"> - fácil de executar - rápido - barato - boa rastreabilidade - conveniente para máquinas grandes 	<ul style="list-style-type: none"> - fácil de executar - comprovado - boa rastreabilidade - incerteza de medição baixa - barato - conveniente para máquinas grandes 	<ul style="list-style-type: none"> - fácil de executar - rápido - barato - boa rastreabilidade - todas componentes de erros - incerteza de medição baixa 	<ul style="list-style-type: none"> - fácil de executar - rápido - todas componentes de erros - boa rastreabilidade - incerteza de medição baixa 	<ul style="list-style-type: none"> - muito fácil de se executar - muito barato - todas componentes de erros - boa rastreabilidade - conveniente para máquinas grandes
DESvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - consumo de tempo - sistemas de medição caros - verificação não é global - necessita de especialistas - rastreabilidade difícil 	<ul style="list-style-type: none"> - informações limitadas - poucos pontos de medição 	<ul style="list-style-type: none"> - consumo de tempo elevado 	<ul style="list-style-type: none"> - número limitado de pontos de medição 	<ul style="list-style-type: none"> - volumoso (transporte) - número limitado de pontos de medição - caro 	<ul style="list-style-type: none"> - poucos pontos de medição - calibração difícil

Figura 3.22 - Comparação entre os métodos de qualificação com sistemas de medição e padrões [46].

4. METODOLOGIAS PARA QUALIFICAÇÃO DE CMM COM PADRÕES CORPORIFICADOS

Como resultados de trabalhos experimentais e de estudos sobre erros na medição com CMM e qualificação de CMM, constatou-se a necessidade de propor metodologias para qualificação de CMM com padrões corporificados.

Ao desenvolver as metodologias procurou-se obter:

- objetividade no planejamento com intuito de obter resultados representativos;
- rapidez na execução dos ensaios possibilitando menor tempo de parada da CMM;
- confiabilidade nos resultados, através da minimização das incertezas dos resultados na execução da qualificação;
- redução dos custos com padrões corporificados e pessoal;
- compatibilização não só com normas e recomendações técnicas, como também em conhecimentos adquiridos durante o trabalho.

A figura 4.1 mostra as etapas das metodologias de qualificação de CMM, baseado em [60].

As metodologias foram desenvolvidas para o ensaio de incerteza de apalpação, para a qualificação com blocos padrão e padrão escalonado, e para qualificação com placas padrão.

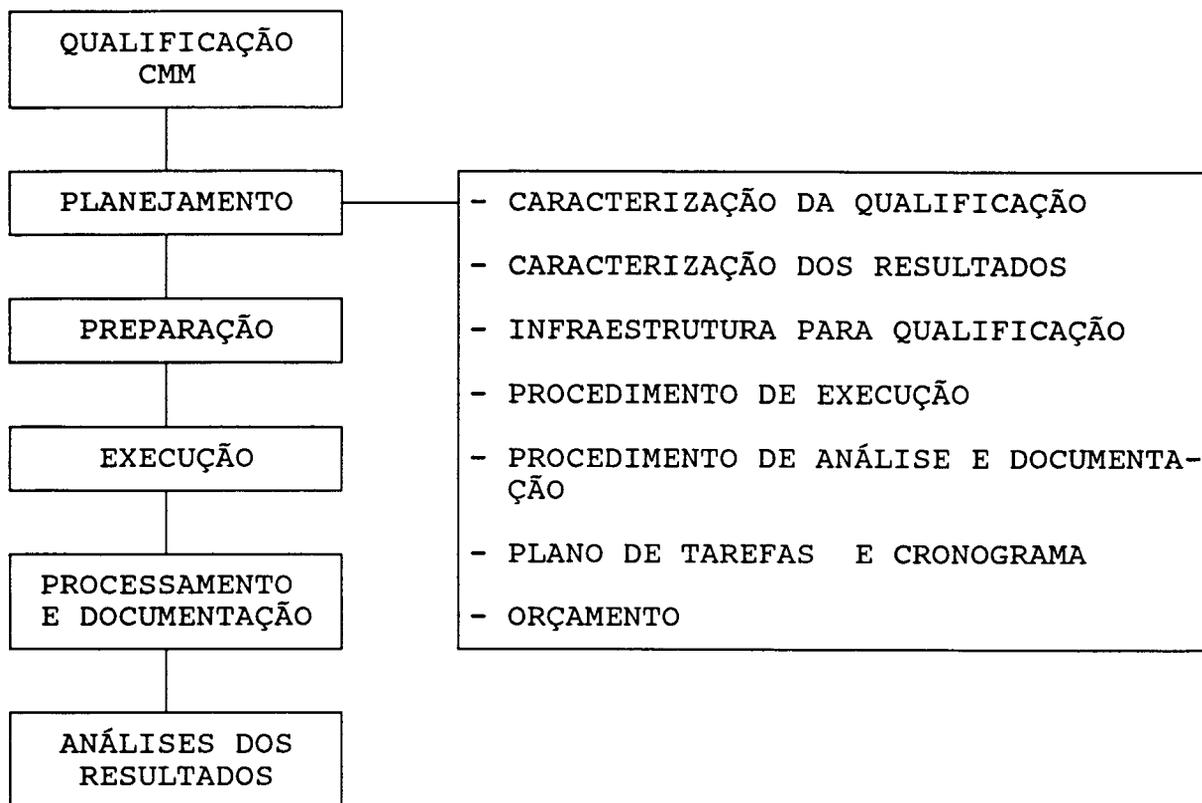


Figura 4.1 - Etapas das metodologias de qualificação de CMM.

4.1 METODOLOGIA PARA ENSAIO DE INCERTEZA DE APALPAÇÃO

No ensaio de incerteza de apalpação da CMM se determina o erro de apalpação, que depende do tipo do cabeçote apalpador, do comprimento e diâmetro da haste do apalpador, da força de medição e da velocidade de apalpação.

4.1.1 Caracterização do ensaio

Nesta etapa deve-se caracterizar os ensaios quanto ao âmbito e à finalidade.

a) Quanto à finalidade

Os ensaios de incerteza de apalpação destinam-se à inspeção, ao ensaio de aceitação ou à calibração da CMM.

b) Quanto ao âmbito

Os ensaios de incerteza de apalpação podem ser:

- nas direções dos eixos X, Y, Z, incerteza de apalpação unidimensional (1D);
- nos planos XY, XZ, YZ, incerteza de apalpação bidimensional (2D);
- no espaço, incerteza de apalpação tridimensional (3D).

Em função da necessidade realiza-se o ensaio com:

- diferentes disposições dos apalpadores;
- variação dos comprimentos, diâmetros e materiais das hastes e diâmetros dos sensores;
- variação da força de medição;
- variação da velocidade de apalpação.

4.1.2 Infra-estrutura do ensaio

a) Seleção dos padrões corporificados

Para minimizar as influências de outras componentes de erros (posicionamento, reticidade, perpendicularidade, rotacionais) deve-se escolher padrões de pequenas dimensões comparadas com a faixa de operação da CMM.

Para a determinação da incerteza de apalpação 1D, 2D e 3D utiliza-se blocos padrão, anel padrão e esfera padrão, respectivamente, de 20 a 30 mm.

Os erros máximos dos padrões devem ser menores que $1/5$ da incerteza de apalpação especificada pelo fabricante [10].

Os padrões devem ser rastreados a padrões superiores, e estes por sua vez, a outros estabelecendo a hierarquia até chegar nos padrões primários [61].

b) Sistema de medição de temperaturas

Devem ser verificadas as condições ambientais necessárias para o ensaio da CMM (temperatura, umidade).

No ensaio de incerteza de apalpação pode-se monitorar as temperaturas dos padrões e se possível das escalas da CMM para correção do erro devido a dilatação térmica.

O sistema de medição de temperatura deve ser calibrado e deve ter erro máximo desprezível em relação à variação da temperatura admissível.

4.1.3 Procedimento de execução

a) Posicionamento dos padrões

Os padrões devem ser posicionados de acordo com o tipo de ensaio dentro do volume de trabalho da CMM, sendo:

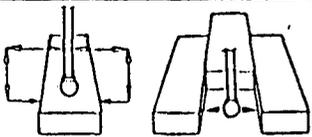
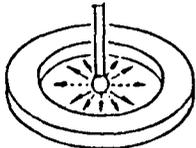
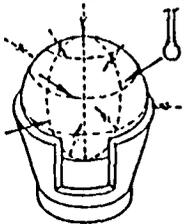
- para incerteza de apalpação 1D, medição do bloco padrão na direção dos eixos X, Y e Z;
- para incerteza de apalpação 2D, medição de anel padrão nos planos XY, XZ e YZ;
- para incerteza de apalpação 3D, medição da esfera padrão em uma posição espacial no volume de trabalho.

b) Número e localização dos pontos de apalpação

Na figura 4.2 tem-se a representação das direções de apalpação nos padrões para o ensaio da incerteza de apalpação, sendo que:

- no bloco padrão 50 pontos devem ser apalpados alternadamente [20];
- no anel padrão 50 pontos devem ser distribuídos sobre a circunferência tão uniformemente quanto possível [20];
- na esfera padrão 50 pontos devem ser distribuídos tão uniformemente, quanto possível, sobre o hemisfério da esfera. A direção de apalpação deve ter um ângulo pequeno em relação à direção normal do ponto de apalpação [20].

Para inspeção periódica pode-se usar apenas a esfera padrão com 15 pontos de apalpação [2].

Incerteza		Padrão de Ensaio
1D	Nos Eixos Coord. x, y, z	
2D	Nos Planos coord. xy, yz, zx	
3D	No Espaço xyz	

- Dimensão do Padrão: 20 a 30 mm

- Erro de Forma do Padrão $< 1/5$ da incerteza especificada

- Número de apalpações: 50

Figura 4.2 - Padrões e direção das apalpações para determinação da incerteza de apalpação [20].

c) Apalpadores

Devem ser ensaiados apalpadores com hastes de diferentes diâmetros, comprimentos e materiais, com força de medição variável para verificar o efeito da flexão da haste.

Na inspeção deve-se usar o apalpador com características mais usuais.

4.1.4 Procedimento de análise dos resultados

a) Incerteza de apalpação 1D

A incerteza de apalpação 1D é determinada pela máxima diferença entre os comprimentos individuais medidos no bloco padrão em relação a seu valor médio aritmético.

b) Incerteza de apalpação 2D

A incerteza de apalpação 2D é determinada pela máxima diferença radial entre o melhor círculo ajustado, calculado pelo método dos mínimos quadrados, e os valores coordenados dos pontos apalpados.

c) Incerteza de apalpação 3D

A incerteza de apalpação 3D é determinada pela máxima diferença entre a melhor esfera ajustada pelo método dos mínimos quadrados e os valores coordenados dos pontos apalpados.

As especificações do fabricante são consideradas cumpridas se pelo menos 95% dos valores absolutos dos erros de apalpação forem menores do que os valores limites da incerteza da apalpação 1D, 2D e 3D [10].

Na figura 4.3 tem-se um exemplo de determinação da incerteza de apalpação 2D utilizando-se anel padrão. As distâncias radiais do círculo ajustado e o erro sistemático para medição do diâmetro são usados para avaliar a incerteza de apalpação.

A incerteza de apalpação (IA) é dada por:

$$IA = \pm \frac{R}{2} \quad (4.1)$$

Onde:

R = distância máxima entre os pontos apalpados

A incerteza de apalpação obtida não deve exceder à incerteza de apalpação especificada:

$$IA \leq IA_e \quad (4.2)$$

O erro sistemático (ES), na medida do diâmetro é:

$$ES = DM - DC \quad (4.3)$$

Onde:

DM = diâmetro medido

DC = diâmetro calibrado

O erro sistemático em módulo deve ser menor ou igual a distância especificada máxima entre os pontos apalpados (R_e).

$$|ES| \leq R_e \quad (4.4)$$

Se (4.2) e (4.4) não forem atendidas, deve-se repetir o ensaio ou procurar eliminar as causas dos erros.

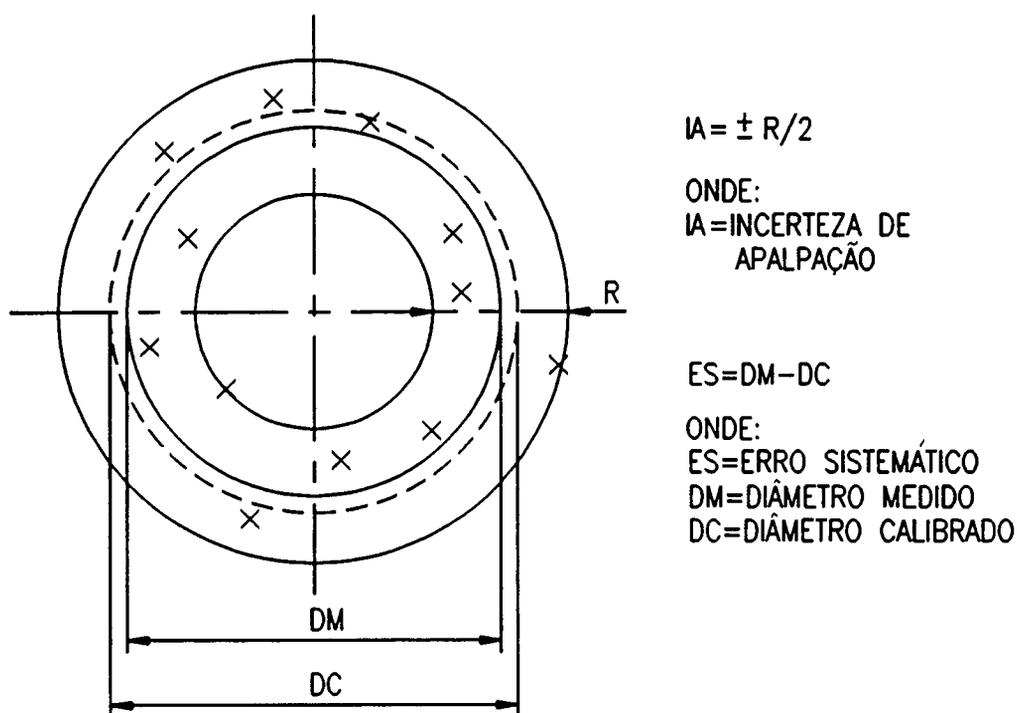


Figura 4.3 - Determinação da incerteza de apalpação - 2D utilizando anel padrão [4].

4.2 METODOLOGIA PARA QUALIFICAÇÃO DE CMM COM BLOCOS PADRÃO E PADRÃO ESCALONADO

Na qualificação de CMM com blocos padrão e padrão escalonado pode se determinar a incerteza de medição de comprimento da CMM.

4.2.1 Caracterização da qualificação

a) Quanto à finalidade:

A qualificação de CMM com blocos padrão e padrão escalonado é normalmente utilizada na

inspeção da CMM, verificando-se a incerteza de medição de comprimento atendem ou não as especificações. Pode também ser utilizada para ensaios de aceitação, dependendo do nível de exigência do contrato entre fabricante e usuário da CMM.

A qualificação com blocos padrão e padrão escalonado não é válida para calibração, devido à limitação de informações para determinar a incerteza de medição para diferentes tarefas de medição.

b) Quanto ao âmbito

A qualificação deve ser realizada em várias posições e orientações no volume de trabalho da CMM, como na direção dos eixos, nos planos coordenados e nas diagonais da CMM.

Devido à limitação dos comprimentos dos padrões (bloco padrão até 1m e padrão escalonado até 2,5m), não é possível a qualificação com estes padrões em CMM com faixa de operação maior que 2,5m.

4.2.2 Infraestrutura para qualificação

a) Seleção dos padrões

Em função da faixa de operação da CMM devem ser escolhidos os blocos padrão ou padrão escalonado para qualificação, sendo que estes devem ter erro máximo menor que 1/5 da incerteza de medição de comprimento especificada pelo fabricante [9].

Devem ser escolhidos blocos padrões e padrão escalonado calibrados e rastreados a padrões nacionais ou internacionais.

X ↕

b) Sistema de medição de temperaturas

Deve-se medir as temperaturas dos blocos padrões ou padrão escalonado e as temperaturas das escalas para correção do erro devido à deformação térmica.

Os sistemas de medição de temperaturas devem ter erro máximo desprezível em relação à variação de temperatura admissível e ser calibrados e rastreados a padrões nacionais ou internacionais.

X ↕

4.2.3 Procedimento de execução

a) Qualificação de CMM com blocos padrão

Em função da faixa de operação devem ser escolhidos pelo menos 5 blocos, conforme a relação:

$$I = \frac{FO}{5} \quad (4.5)$$

Onde: I = intervalos entre os comprimentos dos blocos padrão

FO = faixa de operação

Os blocos padrão devem ser posicionados no volume de trabalho da CMM, na direção dos eixos, nos planos e nas diagonais espaciais. Na figura 4.4 tem-se uma representação esquemática das posições recomendadas dos blocos padrão na CMM.

Os blocos padrão devem ser alinhados individualmente e medidos 10 vezes (10 ciclos), alternadamente, no centro da face de medição [9], para se obter os erros na medição dos comprimentos.

Com as temperaturas das escalas e dos blocos padrão deve-se fazer a correção do comprimento devido à dilatação térmica, utilizando-se a equação (2.1):

$$\Delta L_1 = L_0 (\alpha_e \Delta T_e - \alpha_p \Delta T_p)$$

Com erros obtidos na medição dos blocos padrão faz-se o gráfico dos erros em função dos comprimentos medidos, colocando-se também no gráfico a incerteza de medição especificada pelo fabricante e a frequência de ocorrência dos erros (fig. 4.5).

b) Qualificação de CMM com padrão escalonado

O padrão escalonado deve ser posicionado dentro do volume de medição da CMM, utilizando as mesmas posições recomendadas para os blocos padrão.

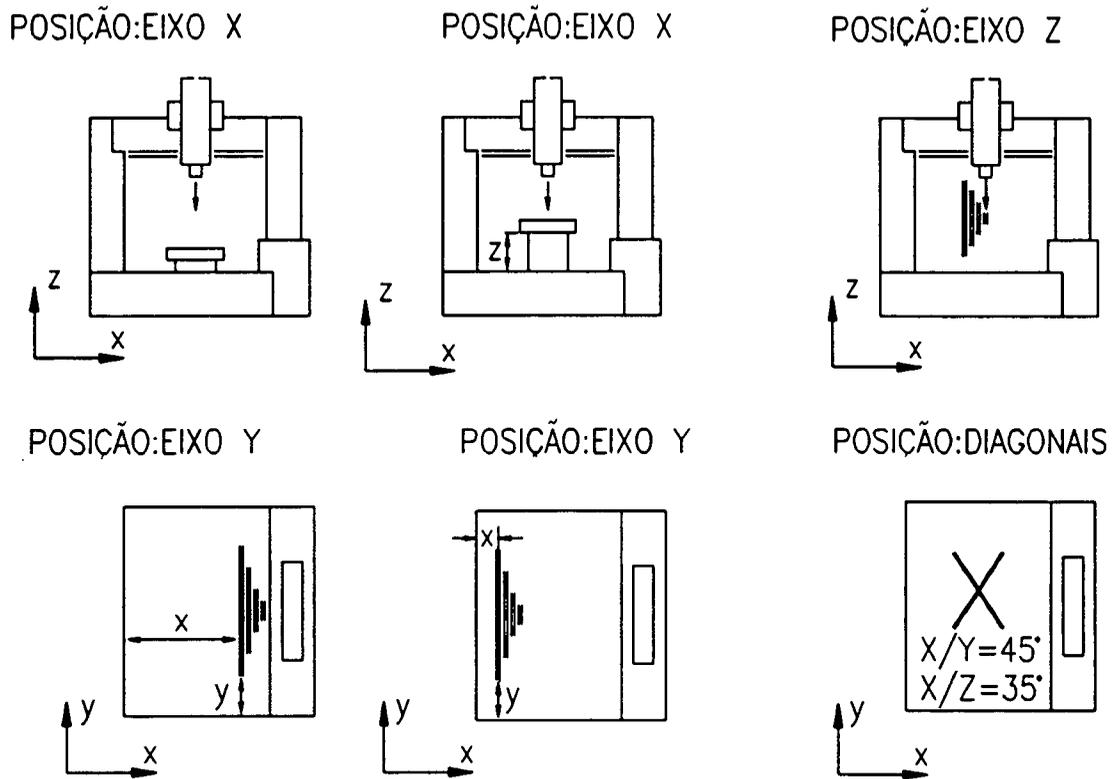


Figura 4.4 - Representação esquemática do posicionamento dos blocos padrão na CMM.

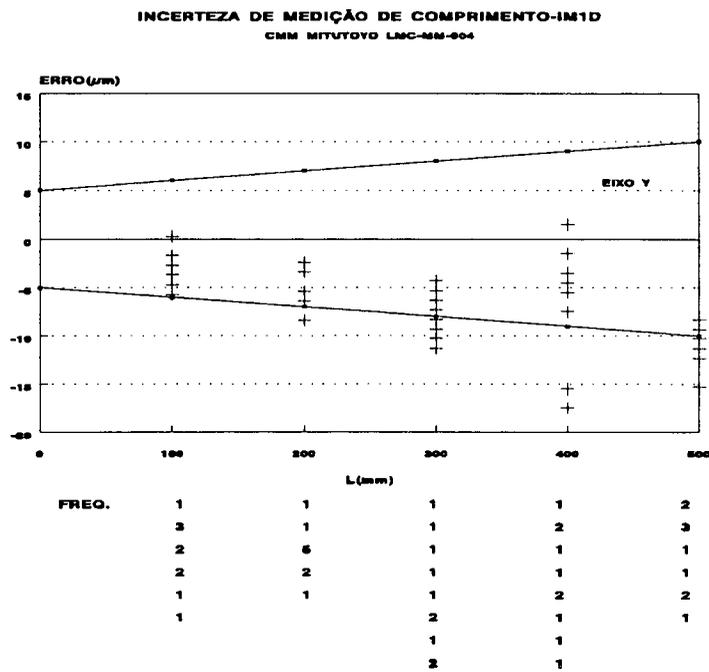


Figura 4.5 - Gráfico dos erros em relação aos comprimentos medidos.

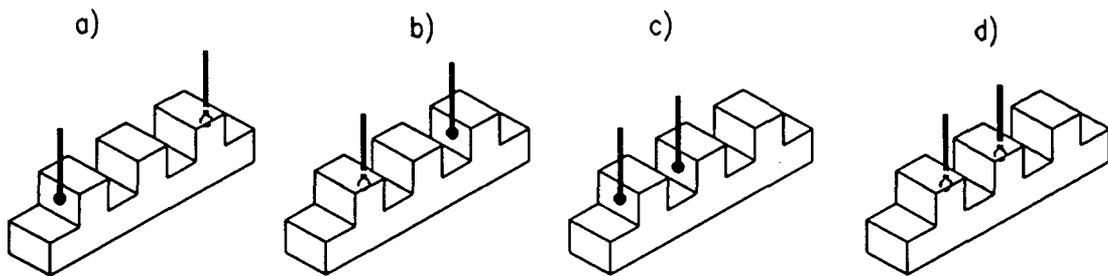
No padrão escalonado, 10 comprimentos de medição devem ser distribuídos na faixa de operação da CMM. O alinhamento deve ser feito na face de medição, medindo duas superfícies em direções opostas (fig. 4.6.a e b) ou em duas superfícies na mesma direção (fig. 4.6.c e d) no centro das superfícies. É recomendado 5 ciclos de medição. Com as temperaturas das escalas e do padrão escalonado deve-se fazer a correção da variação de comprimento devido à dilatação térmica.

Deve-se fazer um gráfico dos erros em função dos comprimentos medidos.

4.2.4 Procedimento de análise dos resultados

Com o gráfico dos erros em função dos comprimentos medidos, verifica-se se a CMM atende ou não a especificação da incerteza de medição de comprimento.

A figura 4.7 mostra o fluxograma para verificação da incerteza de medição de comprimentos com a especificação do fabricante.



- a) dimensão externa (apalpação de duas superfícies em direções opostas)
- b) dimensão interna (apalpação de duas superfícies em direções opostas)
- c) dimensão à esquerda do escalonamento (apalpação de duas superfícies na mesma direção)
- d) dimensão à direita do escalonamento (apalpação de duas superfícies na mesma direção)

Figura 4.6 - Possibilidades de apalpação com padrão escalonado.

4.3 METODOLOGIA PARA QUALIFICAÇÃO DE CMM COM PLACAS PADRÃO

Na qualificação de CMM com placas padrão, pode-se determinar a incerteza de medição de comprimento, as componentes de erros e os erros específicos na medição de comprimentos e distâncias.

A metodologia proposta é baseada em publicações técnicas do PTB [2, 4, 45, 46] e na recomendação técnica VDI/VDE 2617 Parte 5 [12].

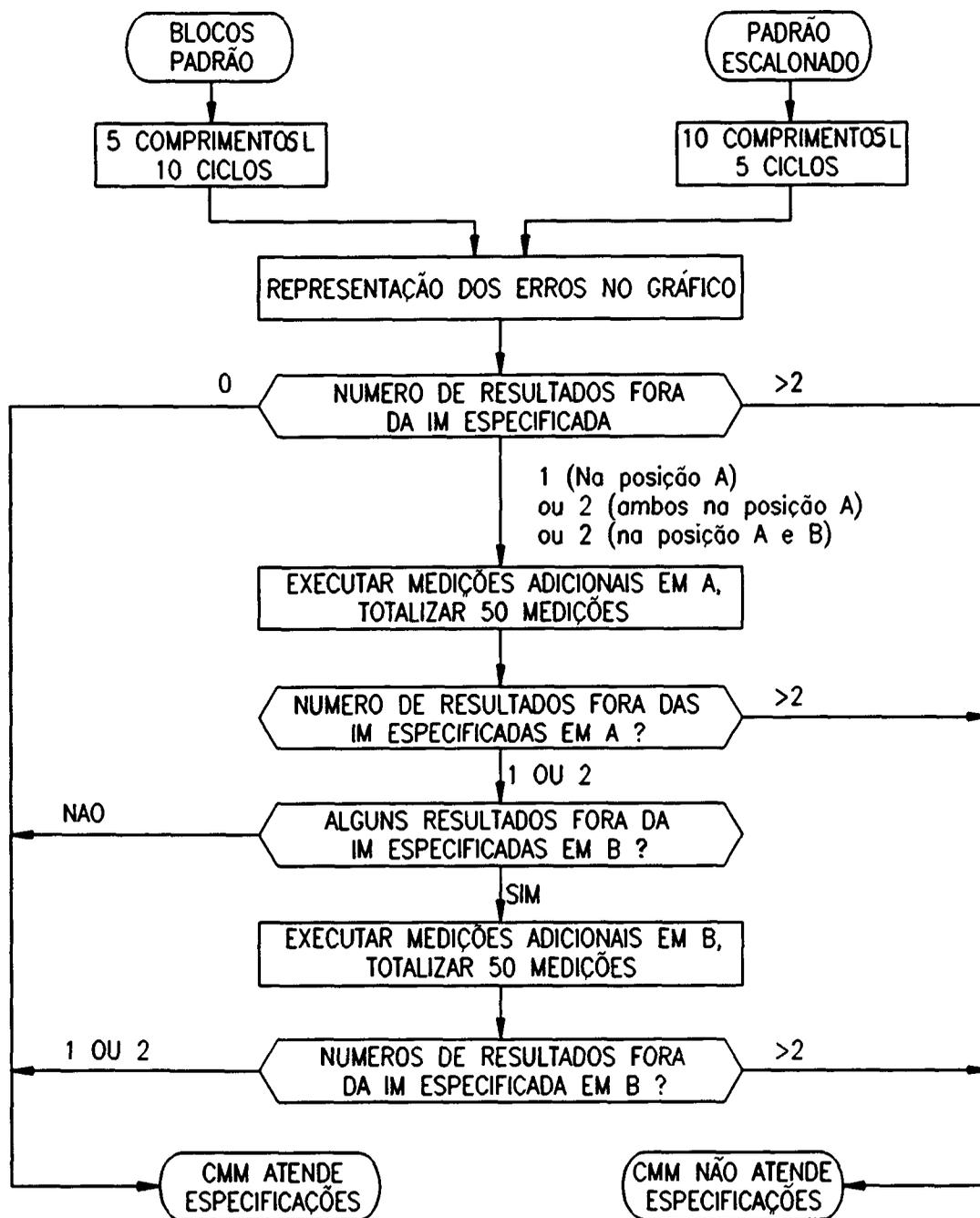


Figura 4.7 - Fluxograma para verificação da incerteza de medição (IM) de comprimento em relação à especificação do fabricantes [9]

4.3.1 Caracterização da qualificação

a) Quanto à finalidade

A qualificação de CMM com placa padrão pode ser utilizada na inspeção, no ensaio de aceitação ou na calibração.

- Inspeção:

Na determinação da incerteza de medição de comprimento de forma rápida e simples.

- Ensaio de aceitação:

Dependendo do contrato entre fabricante e usuário, pode-se determinar a incerteza de medição em todo volume de trabalho e as componentes de erros da CMM [2, 46].

- Calibração:

Pode-se determinar a incerteza de medição em todo volume de trabalho, as componentes de erros, e erros específicos na medição de distâncias [2, 46].

b) Quanto ao âmbito:

A qualificação de CMM com placas pode ser realizada em várias posições no volume de trabalho da CMM, podendo ser nos planos e nas diagonais da CMM.

Atualmente as maiores placas são de 1m x 1m, então para a qualificação da CMM com faixa de operação maiores que 1 metro, a placa deve ter suas posições sobrepostas (fig. 4.8).

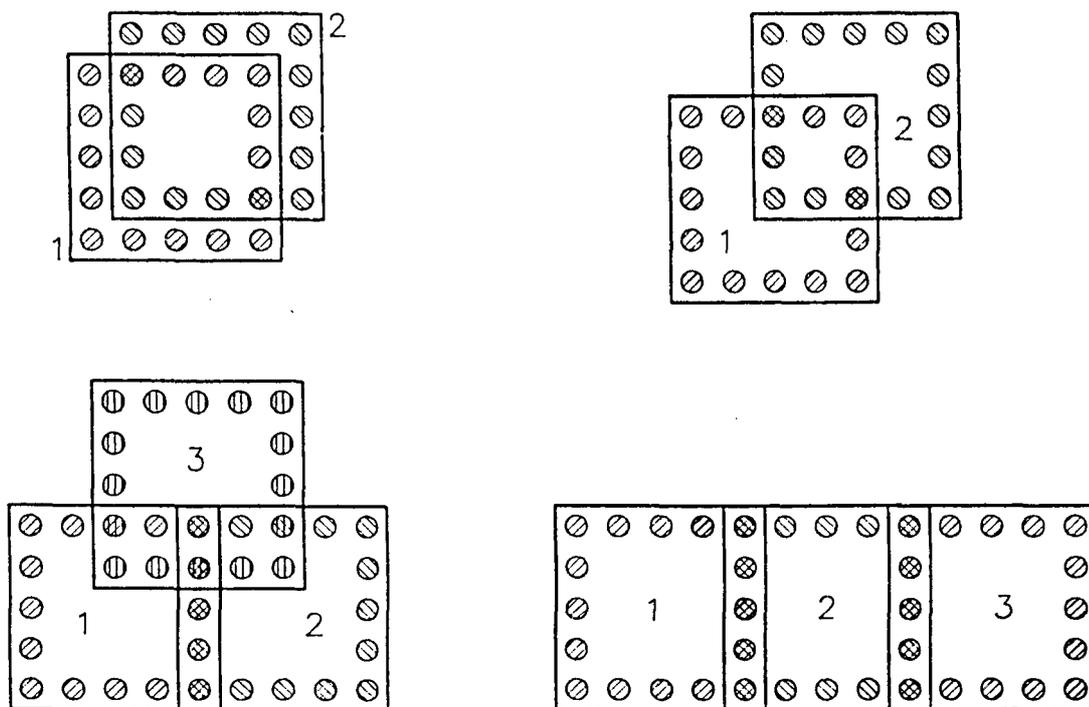


Figura 4.8 - Ampliação da faixa de operação através da medição da placa em posições sobrepostas [4].

4.3.2 Infraestrutura para qualificação

a) Seleção da placa padrão

Deve ser escolhida uma placa calibrada e rastreada a padrões nacionais ou internacionais. Seu tamanho é função da faixa de operação da CMM.

A metodologia de qualificação proposta é para placas padrão com anéis esféricos nas bordas.

b) Sistema de medição de temperaturas

Deve-se medir as temperaturas das escalas da CMM e temperaturas sobre a placa padrão.

Os sistemas de medição de temperaturas devem ter erro máximo desprezível em relação à variação de temperatura admissível e ser calibrados e rastreados à padrões nacionais e internacionais.

4.3.3 Procedimento de execução da calibração de placas padrão utilizando a CMM

O procedimento de calibração de placas padrão com anéis esféricos utilizando a CMM é baseado na recomendação do Serviço de Calibração Alemão (DKD) [62].

As principais etapas do procedimento são:

- limpeza rigorosa dos anéis esféricos;
- definição do sistema coordenado da placa (X placa ou U, Y placa ou V);
- colocação da placa no plano XY da CMM, com 3 pontos de apoio para manter a estabilidade;
- calibração do diâmetro do sensor com esfera padrão calibrada (fig. 4.9);
- definição do plano de referência da placa passando pelo centro de três anéis esféricos;
- medição dos anéis esféricos deve ser feito conforme a figura 4.10;

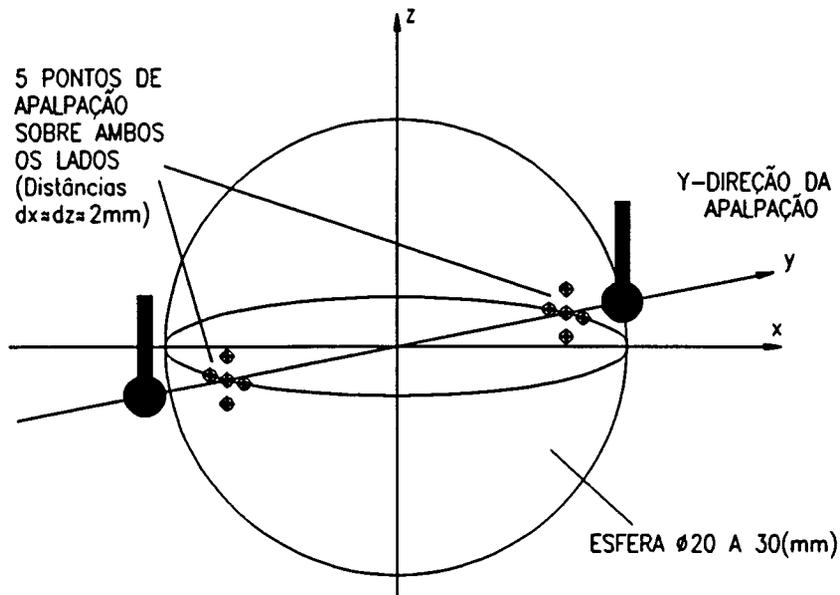


Figura 4.9 - Esfera padrão calibrada para calibração do sensor na direção X (para comprimentos de medição bidimensional) [62].

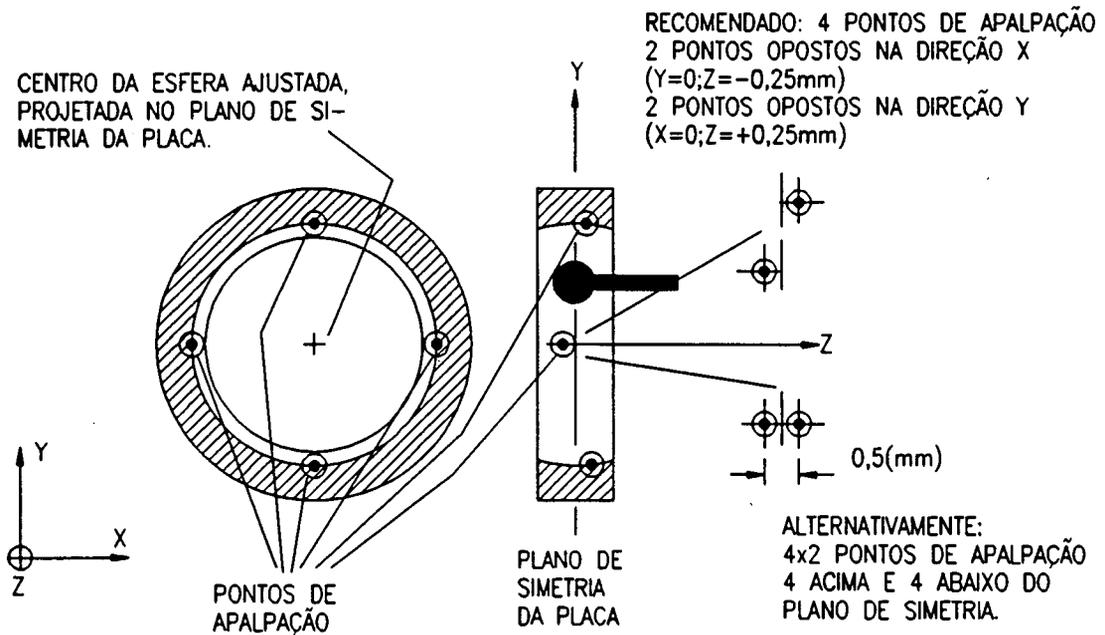


Figura 4.10 - Posições recomendadas para apalpação dos anéis esféricos [62].

- definição das posições da placa para calibração com rotação em torno dos eixos, conforme figura 4.11;
- medição dos anéis de acordo com as sequências apresentadas na figura 4.12, para eliminar erros de histerese e variações no decorrer do tempo;
- medição da temperatura da placa no início e no final da medição de cada posição, a temperatura da placa não pode variar mais do que 0,04 K para placas de alumínio e 0,05 K para placas de aço;
- comparação de comprimentos:
 - . determinação da distância entre centros de 2 anéis da placa e comparação com um padrão de comprimento (bloco padrão ou barra com esferas), paralelo ao eixo X e ao eixo Y da placa (fig. 4.13);
 - . 5 ciclos de medição:
 - . diferença máxima de temperatura entre placa e bloco padrão deve ser de 0,5 K.

Com a rotação da placa e medições do bloco padrão tem-se compensação dos erros da CMM (fig. 4.14).

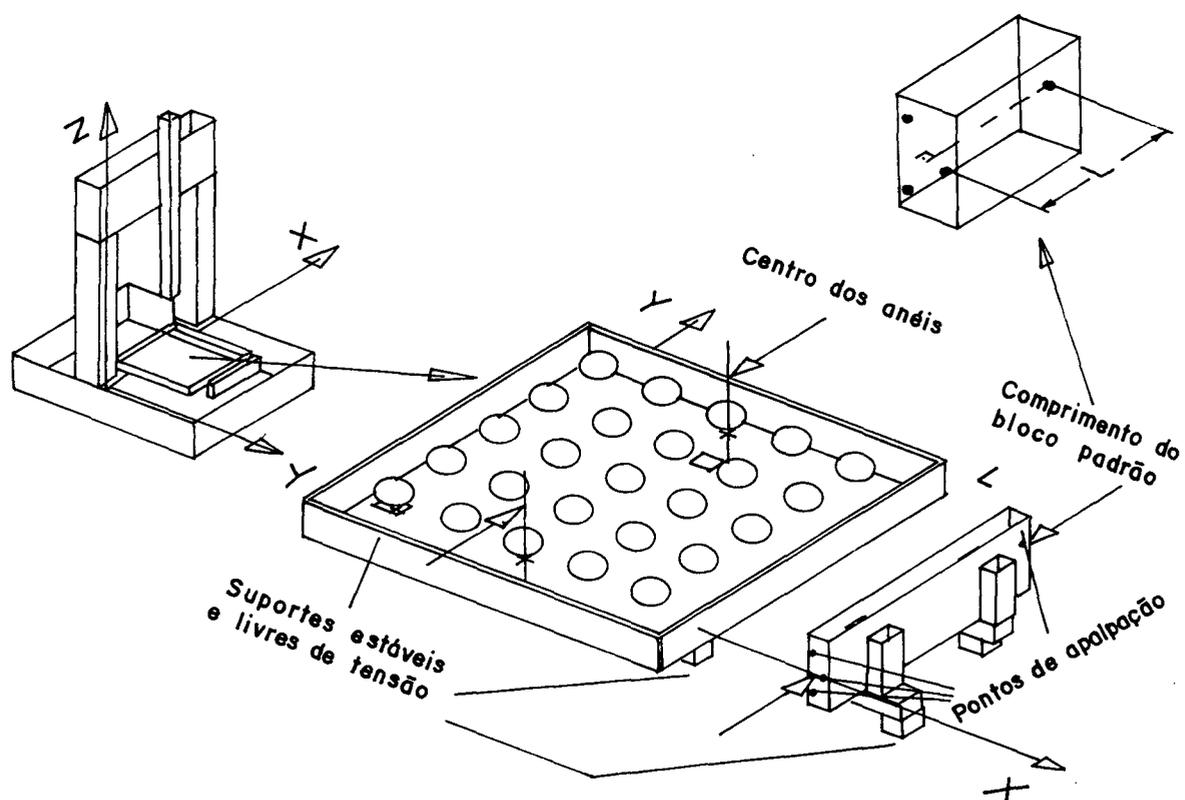


Figura 4.13 - Localização da placa e do bloco padrão na CMM para comparação dos comprimentos [62].

4.3.4 Procedimento de execução da qualificação da CMM com placas padrão

a) Posicionamento da placa

A placa deve ser posicionada nos planos da CMM em quatro posições e permitindo seis séries de medição (fig. 4.15). Na inspeção pode-se utilizar a placa em somente duas posições inclinadas de 30 a 45° em relação à mesa da CMM (fig. 4.16.a).

Para CMM com faixa de operação maiores do que a placa na diagonal, usar placa com posições sobrepostas (fig. 4.16.b).

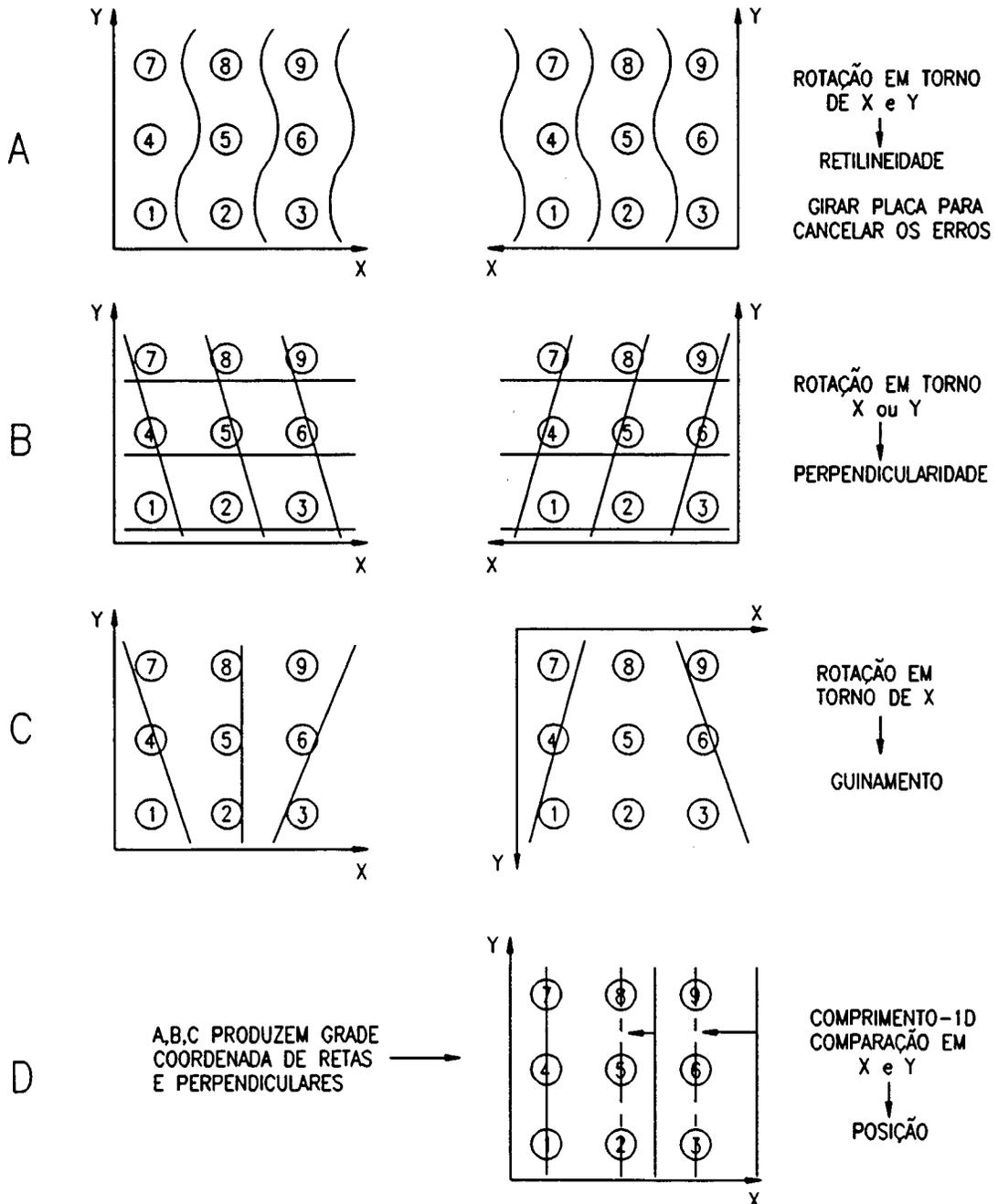


Figura 4.14 - Compensação dos erros CMM com as rotações da placa e comparação do comprimento [2].

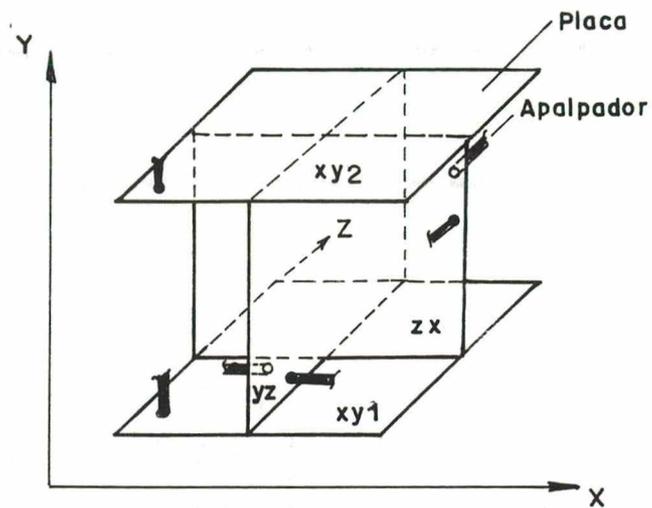


Figura 4.15 - Esquema das 4 posições e das 6 séries de medição para determinação das componentes de erros da CMM com placa padrão.

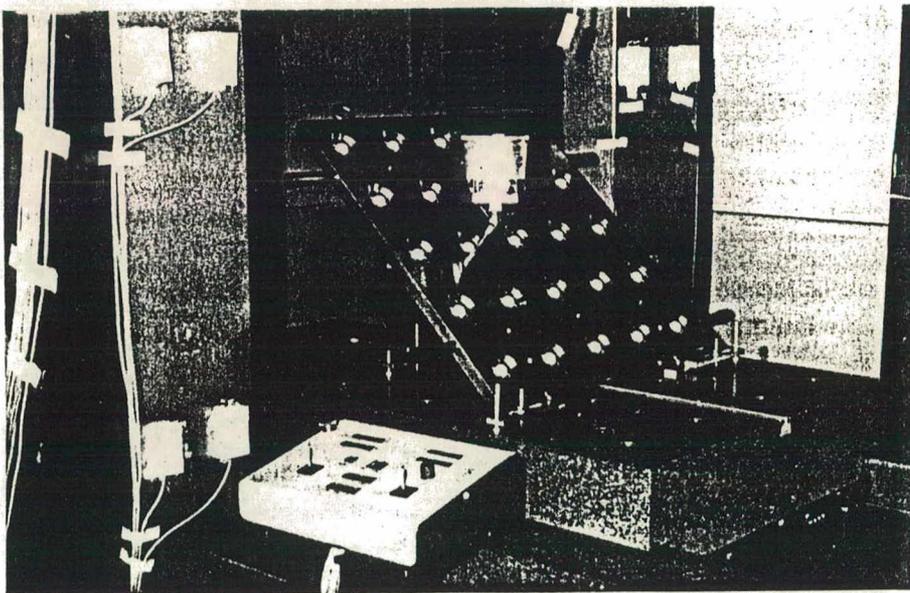
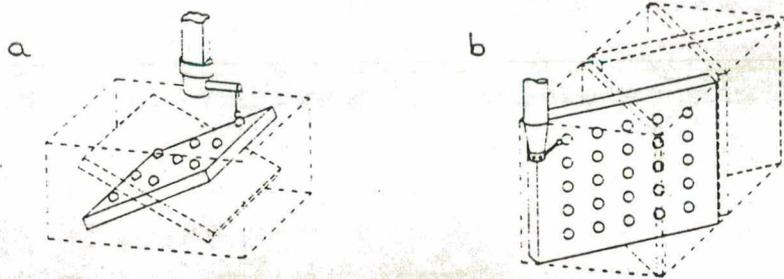


Figura 4.16 - Posições inclinadas da placa na CMM [4].

b) Execução

A execução da qualificação da CMM pode ser resumida nos seguintes itens:

- limpeza dos anéis, determinação do sistema coordenado, plano de referência, estabilidade da placa, variação máxima de temperatura, medição dos anéis, sequência de medição dos anéis é igual ao procedimento de calibração da placa padrão mencionado anteriormente no item 4.3.3;
- determinação das coordenadas dos centros dos anéis esféricos;
- correção das coordenadas em função das variações de temperatura das escalas da CMM e da placa padrão;
- determinação das distâncias entre os centros dos anéis esféricos:

$$D_{1-2} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (4.6)$$

Onde:

D_{1-2} = distância entre o centro de dois anéis quaisquer

X, Y = coordenadas dos centros dos anéis

- determinação dos erros sistemáticos na medição das distâncias:

$$ES = DM - DC \quad (4.7)$$

Onde:

ES = erros sistemáticos

DM = distância medida

DC = distância obtida na calibração

- gráfico dos erros em função das distâncias para verificação da incerteza de medição da CMM para esta tarefa (fig.4.17);

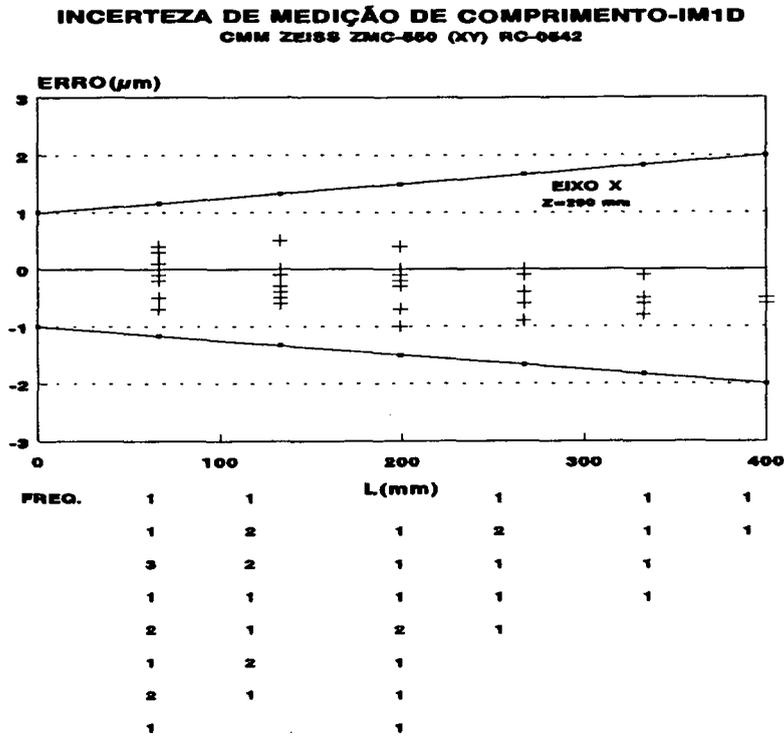


Figura 4.17 - Gráfico dos erros em função das distâncias em uma CMM.

- determinação dos erros através das coordenadas dos centros dos anéis, para as medições da placa no planos coordenados:

$$\Delta X = X_M - X_C \tag{4.8}$$

Onde:

ΔX = erro na direção do eixo X da CMM

X_M = valor medido

X_C = valor na calibração

Essa determinação é feita também para eixos Y e/ou Z (ΔY e ΔZ) respectivamente conforme o plano de medição;

- representação dos erros nos planos da CMM através de vetores de erros (fig. 4.18).

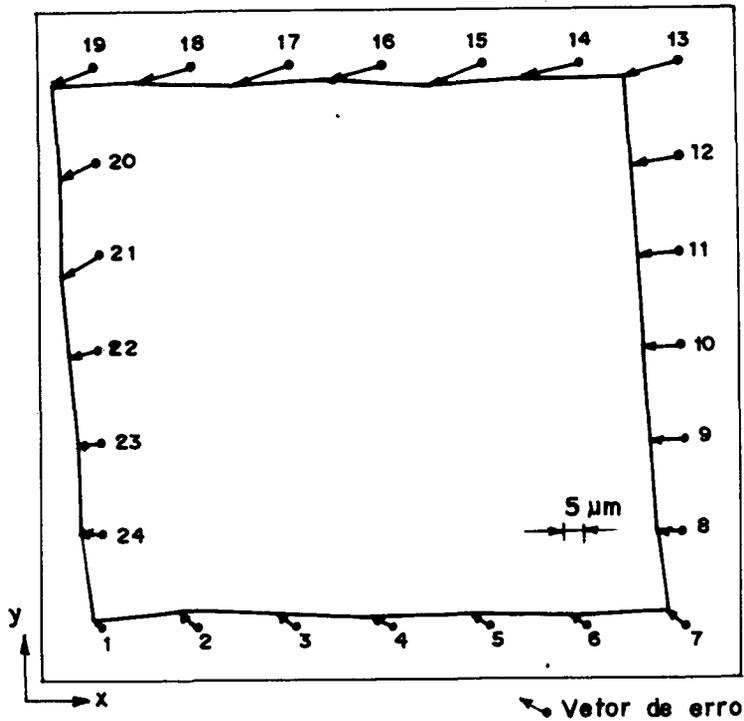


Figura 4.18 - Vetores de erros das coordenadas dos centros dos anéis.

4.3.5 Procedimento de análise dos resultados

Com o gráfico dos erros em função das distâncias pode-se determinar a incerteza de medição de comprimento da CMM e comparar com a incerteza especificada pelo fabricante.

Com os vetores de erros pode-se avaliar as componentes de erros conforme [2, 45, 46, 47].

Nas figuras 4.19 a 4.23 tem-se exemplos de componentes de erros de posicionamento, reticidade, perpendicularidade e erros rotacionais determinadas através da qualificação com placa padrão.

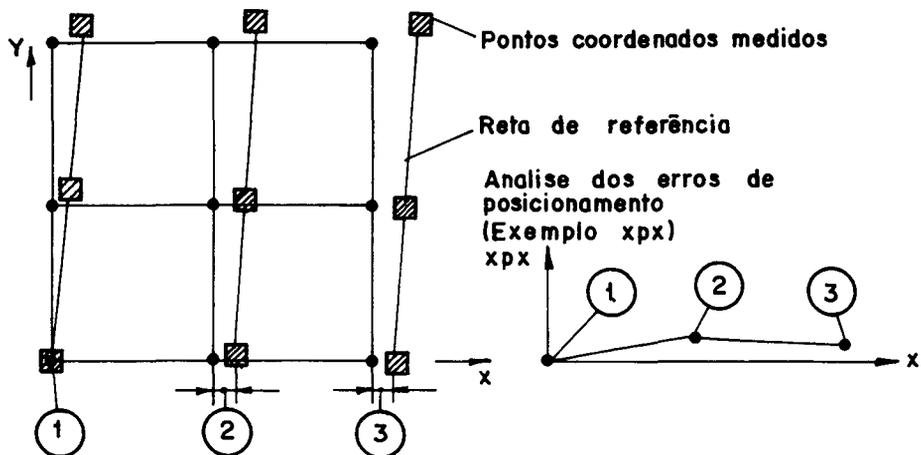


Figura 4.19 - Análise dos erros de posicionamento, x_{px} [46]

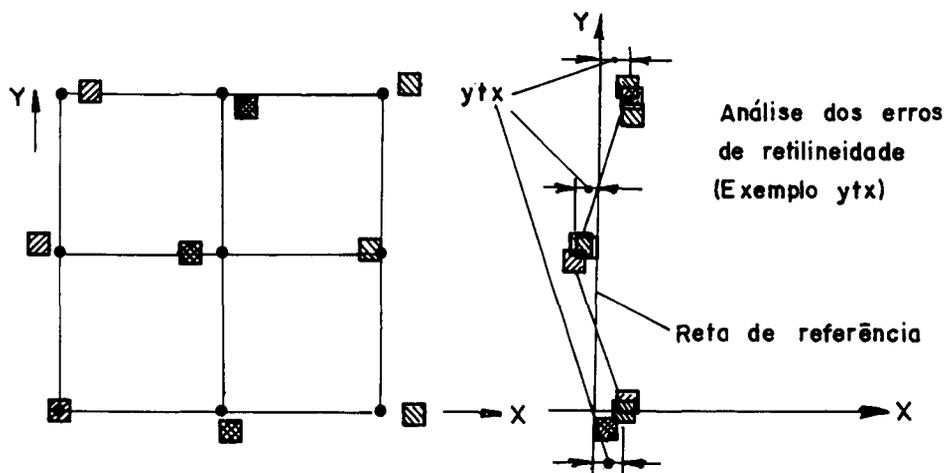


Figura 4.20 - Análise dos erros de retilidade, y_{tx} [46]

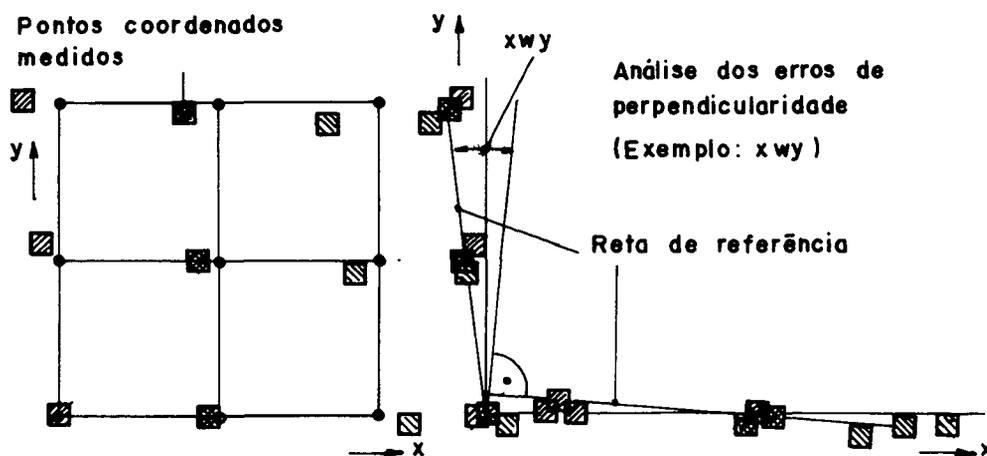


Figura 4.21 - Análise dos erros de perpendicularidade, xwy [46]

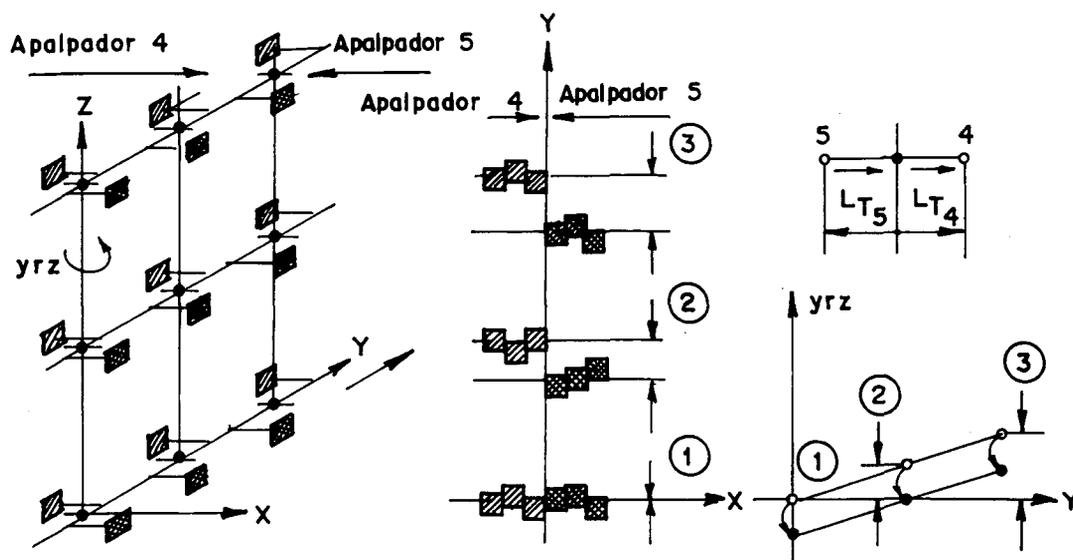


Figura 4.22 - Análise do erro rotacional, $y rz$ (guinamento) [46]

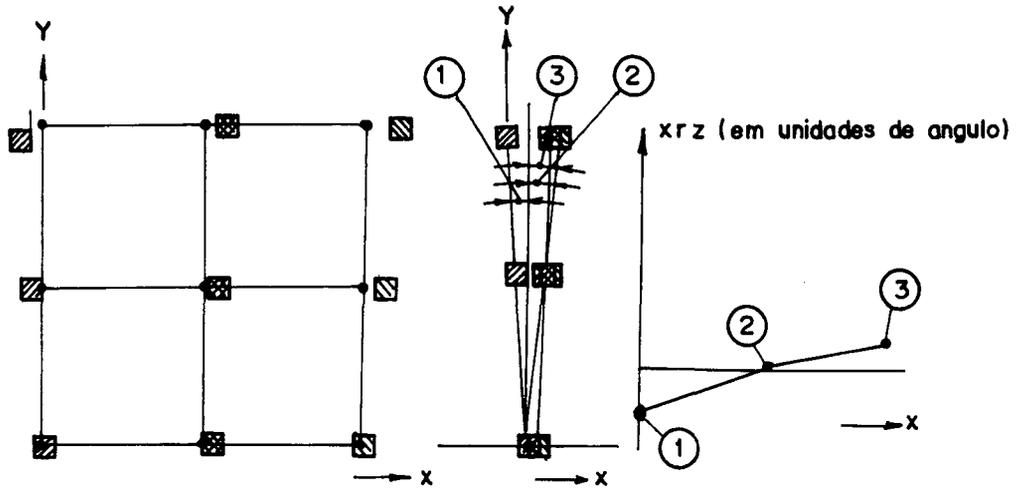


Figura 4.23 - Análise do erro rotacional, xr_z (guinamento) [46]

5. ESTUDO DE CASOS

Para a consolidação das metodologias de qualificação de CMM com padrões corporificados realizou-se ensaios de incerteza de apalpação, qualificação com blocos padrão e com placa padrão.

Foram escolhidas duas CMM de diferentes níveis de automação:

- CMM com acionamento manual;
- CMM com comando numérico.

Nesta apresentação será dado destaque somente aos aspectos mais relevantes para cada caso.

5.1 CMM COM ACIONAMENTO MANUAL

Na CMM com acionamento manual [63] teve-se como objetivo, realizar e analisar os ensaios de incerteza de apalpação, qualificação com blocos padrão e placa padrão.

5.1.1 Características Operacionais e Metrológicas principais da CMM

A CMM é do tipo portal, com cabeçote apalpador tipo comutador. Esta máquina encontra-se

instalada em laboratório climatizado ($T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$). As suas principais características são:

- Faixa de operação = 0 a 725 mm no eixo X
0 a 1530 mm no eixo Y
0 a 460 mm no eixo Z
- Resolução = $1 \mu\text{m}$
- Incerteza de medição (especificada pelo fabricante) =
$$\text{IM} = \pm (5 + L/100) \mu\text{m}$$

5.1.2 Ensaio de Incerteza de Apalpação

As principais características do apalpador, dos padrões corporificados utilizados e os resultados do ensaio de incerteza de apalpação são apresentados na figura 5.1.

Na determinação da máxima incerteza de apalpação unidimensional (1D) obteve-se $\pm 2 \mu\text{m}$ na direção dos eixos X e Y, na incerteza de apalpação bidimensional (2D) obteve-se $\pm 3 \mu\text{m}$ nos planos XY, ZX e YZ e na incerteza de apalpação tridimensional (3D) obteve-se $\pm 3 \mu\text{m}$.

5.1.3 Qualificação da CMM com blocos padrão

A qualificação da CMM com blocos padrão foi realizada em diferentes posições no volume de trabalho da CMM (fig. 5.2), com blocos padrão de 100, 200, 300, 400 e 500 mm.

INCERTEZA DE APALPAÇÃO			
CMM	: MITUTOYO B-251 LMC-MM-004		
LOCALIZADOR	: APALPADOR COMPUTADOR - RENISHAW		
MATERIAL DA HASTE	: AÇO		
COMPRIMENTO/DIÂMETRO DA HASTE	: L = 9,5 mm, ϕ = 1,5 mm		
SENSOR	: ESFERA DE RUBI		
DIÂMETRO NOMINAL	: 3 mm		
	1D	2D	3D
PADRÃO (mm)	BLOCO PADRÃO 10	ANEL PADRÃO 14,0010	ESFERA - 34,927
ERRO DO PADRÃO (μm)	$E_m = \pm 0,14 \mu\text{m}$		Esfericidade = $\pm 1 \mu\text{m}$
NÚMERO DE PONTOS	50	50	50
TEMP. AMBIENTE	$20 \pm 1^\circ\text{C}$	$20 \pm 1^\circ\text{C}$	$20 \pm 1^\circ\text{C}$
INÍCIO			
FIM			
($^\circ\text{C}$)			
RESULTADO: INCERTEZA DE APALPAÇÃO			
	1D	2D	3D
ADMISSÍVEL	Não especificado	Não especificado	Não especificado
RESULTADO	X $\rightarrow \pm 2 \mu\text{m}$ Y $\rightarrow \pm 2 \mu\text{m}$ Z $\rightarrow \pm 1 \mu\text{m}$	XY $\rightarrow \pm 3 \mu\text{m}$ ZX $\rightarrow \pm 3 \mu\text{m}$ YZ $\rightarrow \pm 3 \mu\text{m}$	$\pm 3 \mu\text{m}$

Figura 5.1 - Características do apalpador e padrões e incerteza de apalpação 1D, 2D e 3D da CMM.

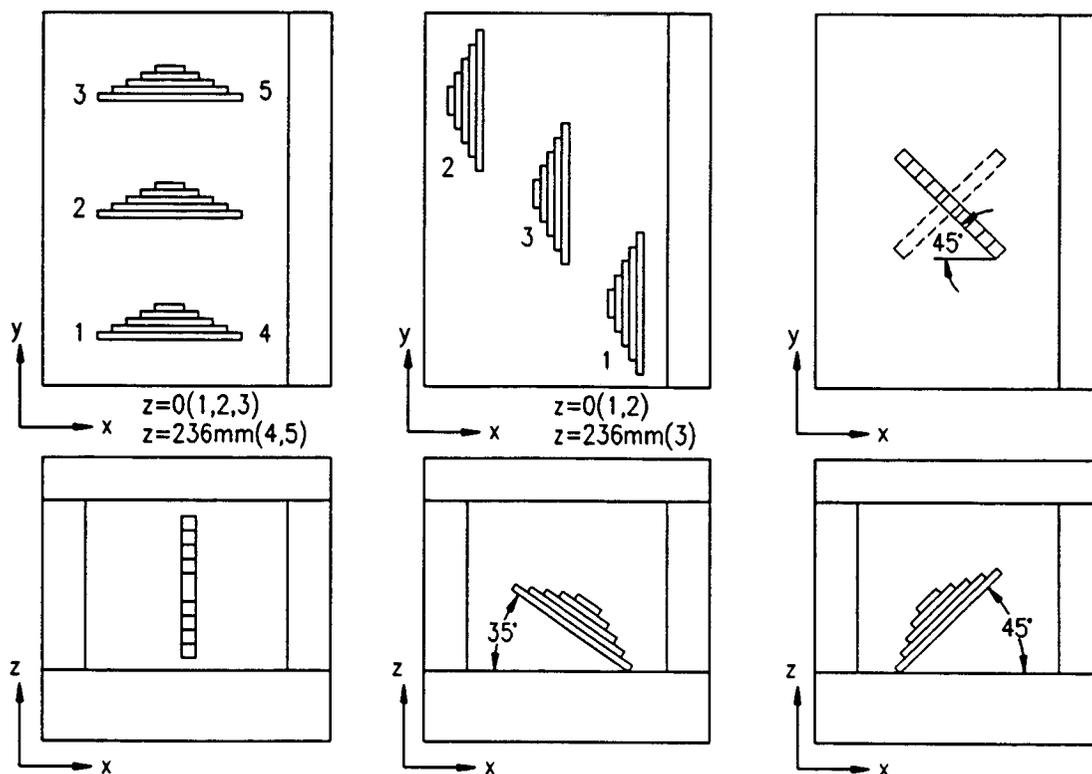


Figura 5.2 - Posição esquemática dos blocos padrão para qualificação da CMM.

Realizou-se 10 ciclos de medição por bloco padrão, medindo-se as temperaturas próximas das escalas e dos blocos padrão no início e no final de cada ciclo para correção do comprimento em função das variações das temperaturas (neste caso, os coeficientes de dilatação térmica da escala e dos blocos padrão são iguais à do aço = $11,5 \mu\text{m/mK}$).

Nas figuras 5.3 a 5.8 tem-se os resultados da incerteza de medição na qualificação com blocos padrão em diferentes posições no volume de trabalho da CMM, onde pode-se comparar estes resultados com a incerteza de medição especificada pelo fabricante.

Nas figuras 5.4 e 5.5 observa-se o aumento dos erros sistemáticos quando se afasta da escala da CMM, na direção do eixo y.

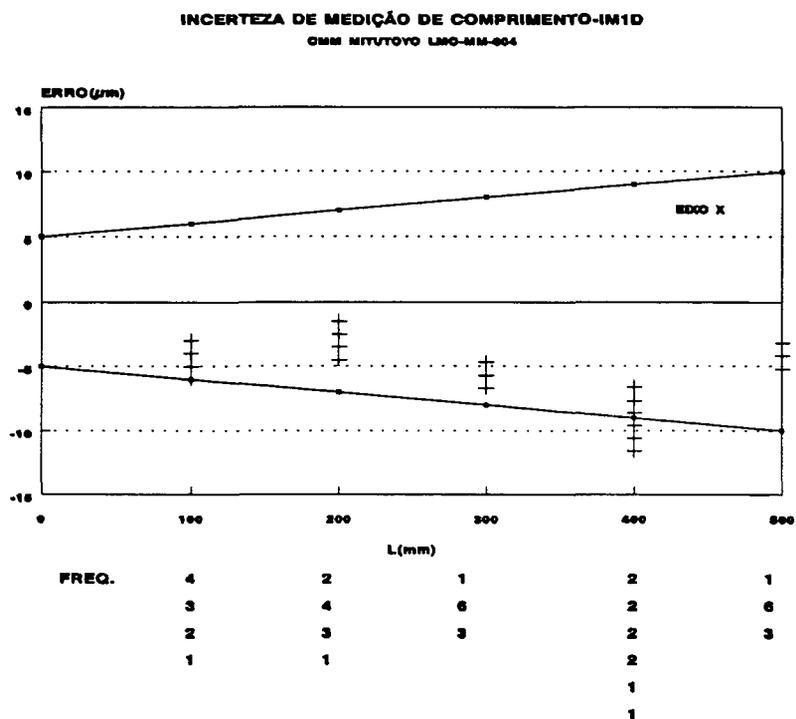


Figura 5.3 - Erros sistemáticos da CMM na qualificação com blocos padrão na direção do eixo X.

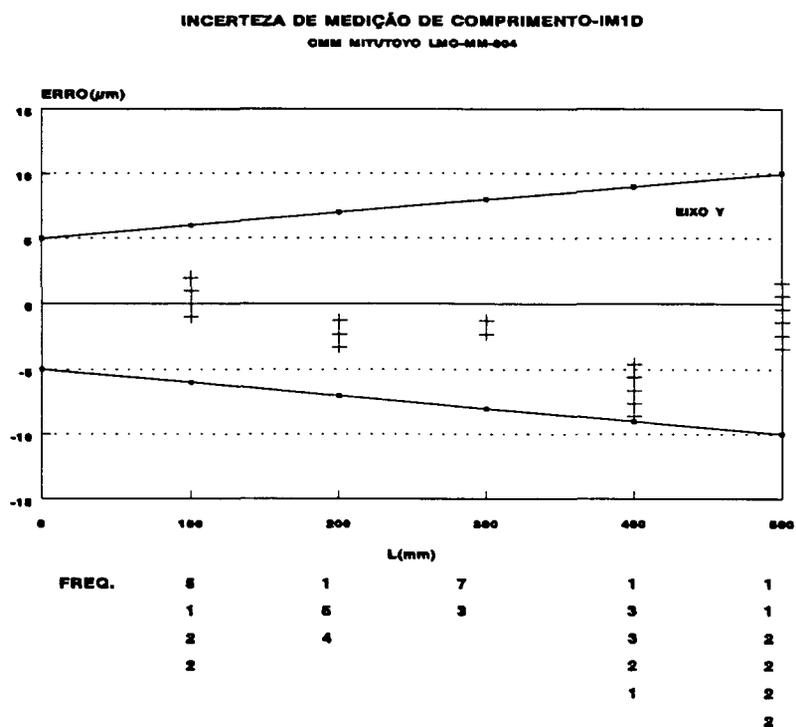


Figura 5.4 - Erros sistemáticos da CMM na qualificação com blocos padrão na direção do eixo Y, próximos da escala da CMM.

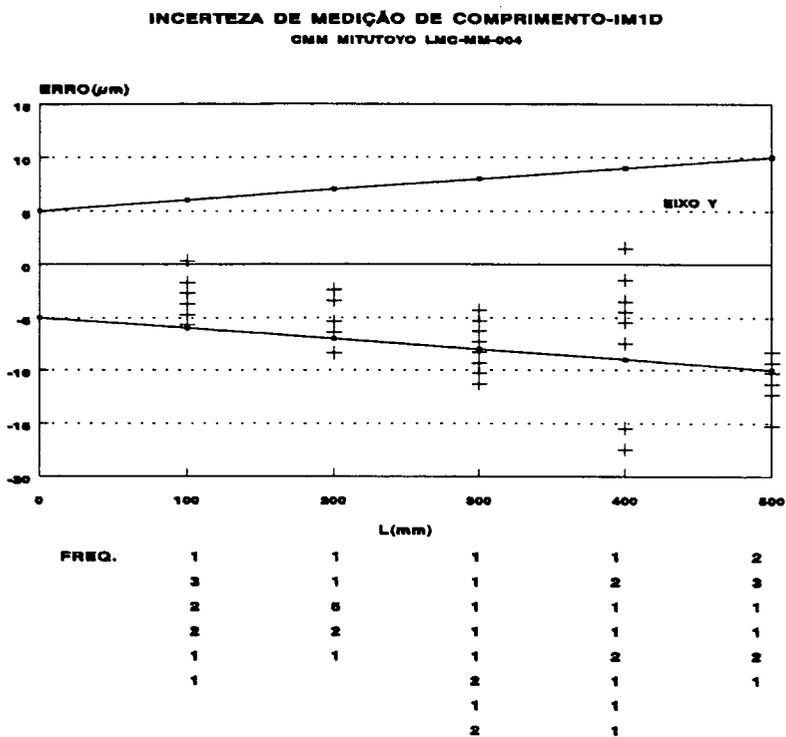


Figura 5.5 - Erros sistemáticos da CMM na qualificação com blocos padrão na direção do eixo Y, afastados da escala.

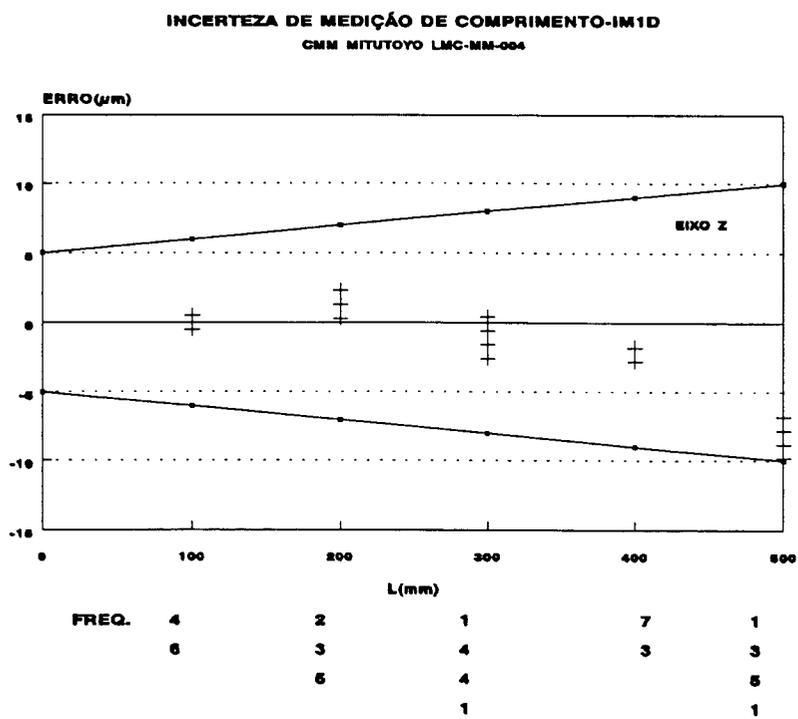


Figura 5.6 - Erros sistemáticos da CMM na qualificação com blocos padrão na direção do eixo Z.

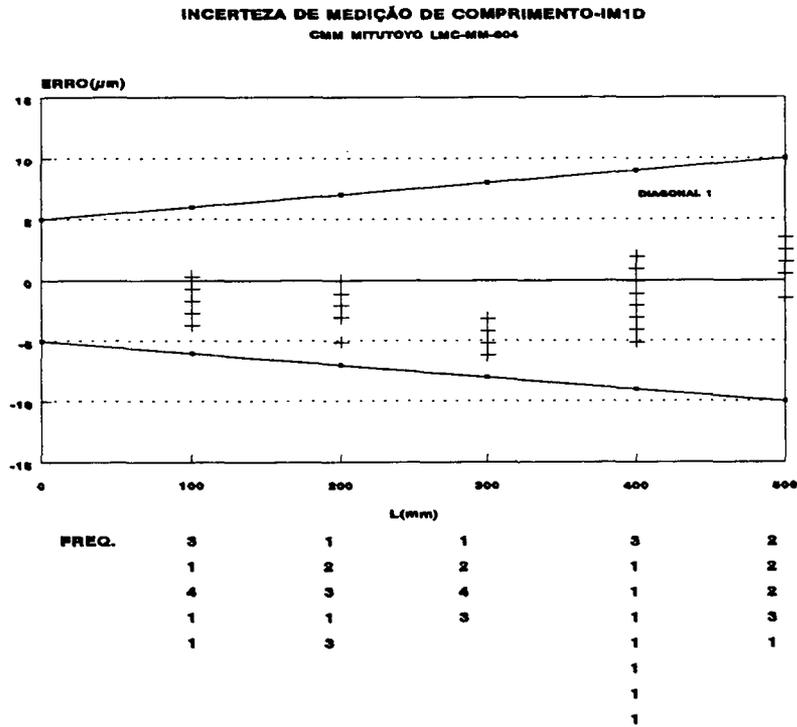


Figura 5.7 - Erros sistemáticos da CMM na qualificação com blocos padrão na diagonal espacial (X/Y = -45°, Y/Z = 35°).

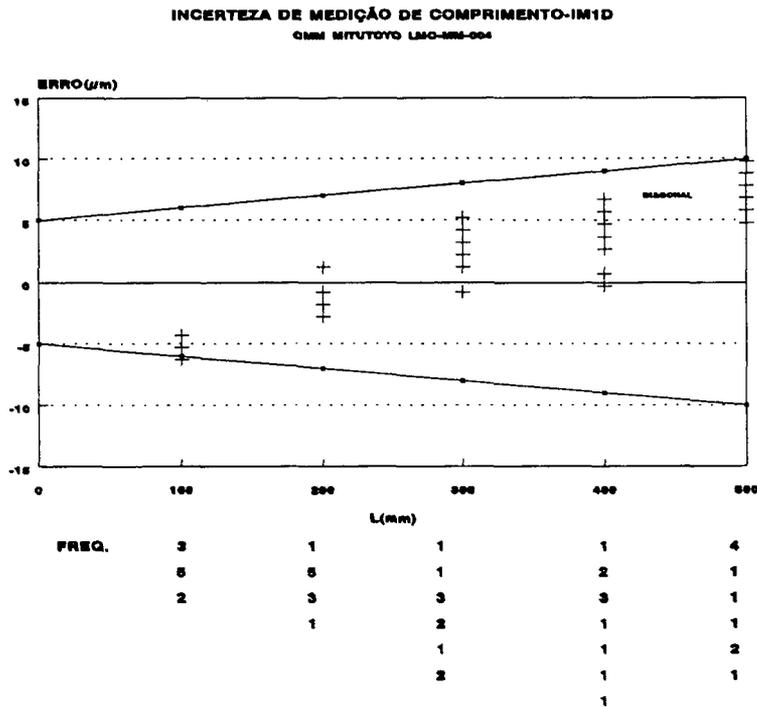


Figura 5.8 - Erros sistemáticos da CMM na qualificação com blocos padrão na diagonal espacial (X/Y = 45°, Y/Z = 35°).

5.1.4 Qualificação da CMM com Placa Padrão

Na qualificação da CMM utilizou-se uma placa padrão de Al com 24 anéis esféricos distribuídos nas bordas da placa (fig. 5.9).

Na figura 5.10 tem-se esquematicamente as posições da placa padrão nos planos XY, YZ e ZX utilizadas para a qualificação da CMM. Com as coordenadas dos centros dos 24 anéis esféricos e a correção devido à variação da temperatura da placa e escalas, determinou-se as distâncias entre os centros dos anéis esféricos e os erros sistemáticos na medição das distâncias, conforme equações 4.6 e 4.7 descritas no capítulo 4.

Na figura 5.11 tem-se a incerteza de medição no eixo X, determinada com a placa padrão no plano XY a uma altura de 251 mm da mesa da CMM. Observa-se que os erros encontrados estão dentro da incerteza de medição especificada pelo fabricante.

Na figura 5.12 tem-se os erros em função das distâncias medidas entre os anéis 1 até 7 no plano XY ($Z = 9$ mm), que pode-se comparar com ensaio de posicionamento realizado com laser interferométrico na mesma posição (fig. 5.13). Observa-se o mesmo comportamento dos resultados, por exemplo, na posição $x = 200$ mm tem-se um erro de posicionamento de $-3\mu\text{m}$, determinado com a placa padrão e no laser interferométrico obteve-se também um erro de posicionamento de $-3\mu\text{m}$.

Nas figuras 5.14 e 5.15 tem-se os vetores de erros obtidos na medição da placa nos planos XY (em $Z = 9$ mm e $Z = 251$ mm, respectivamente). Os vetores de erros são obtidos após o nivelamento da placa pelos furos 1, 7 e 19 e alinhamento pelos furos 1 e 7. Na figura 5.15 tem-se erro no alinhamento devido a incerteza de apalpação da CMM. Com os vetores de erros pode-se também determinar componentes de erros da CMM, como por exemplo: erro de posicionamento - x_{px} (fig. 5.16), erro de retilinearidade - y_{tx} (fig. 5.17), erro de perpendicularidade - x_{wy} (fig. 5.18).

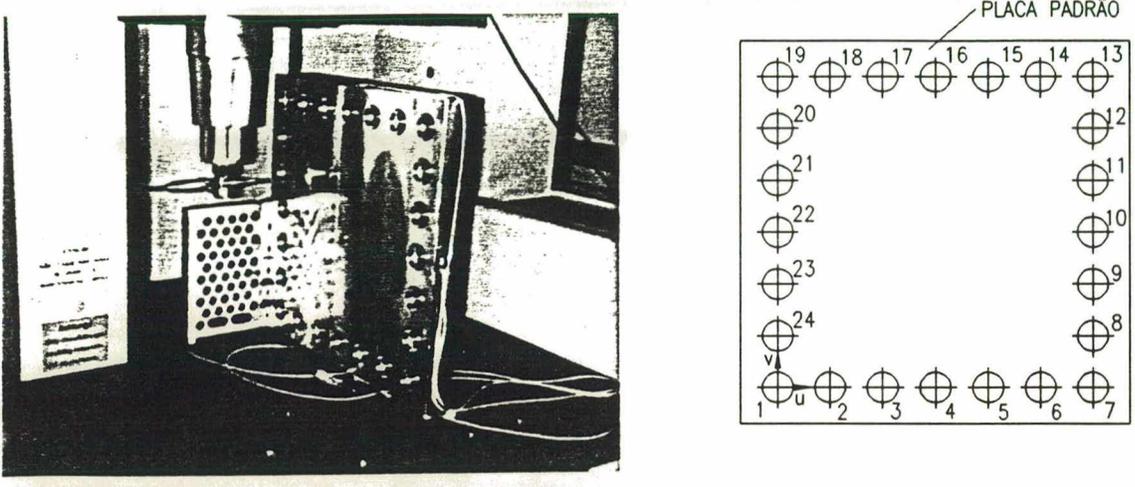


Figura 5.9 - Placa padrão de Al com 24 anéis esféricos nas bordas.

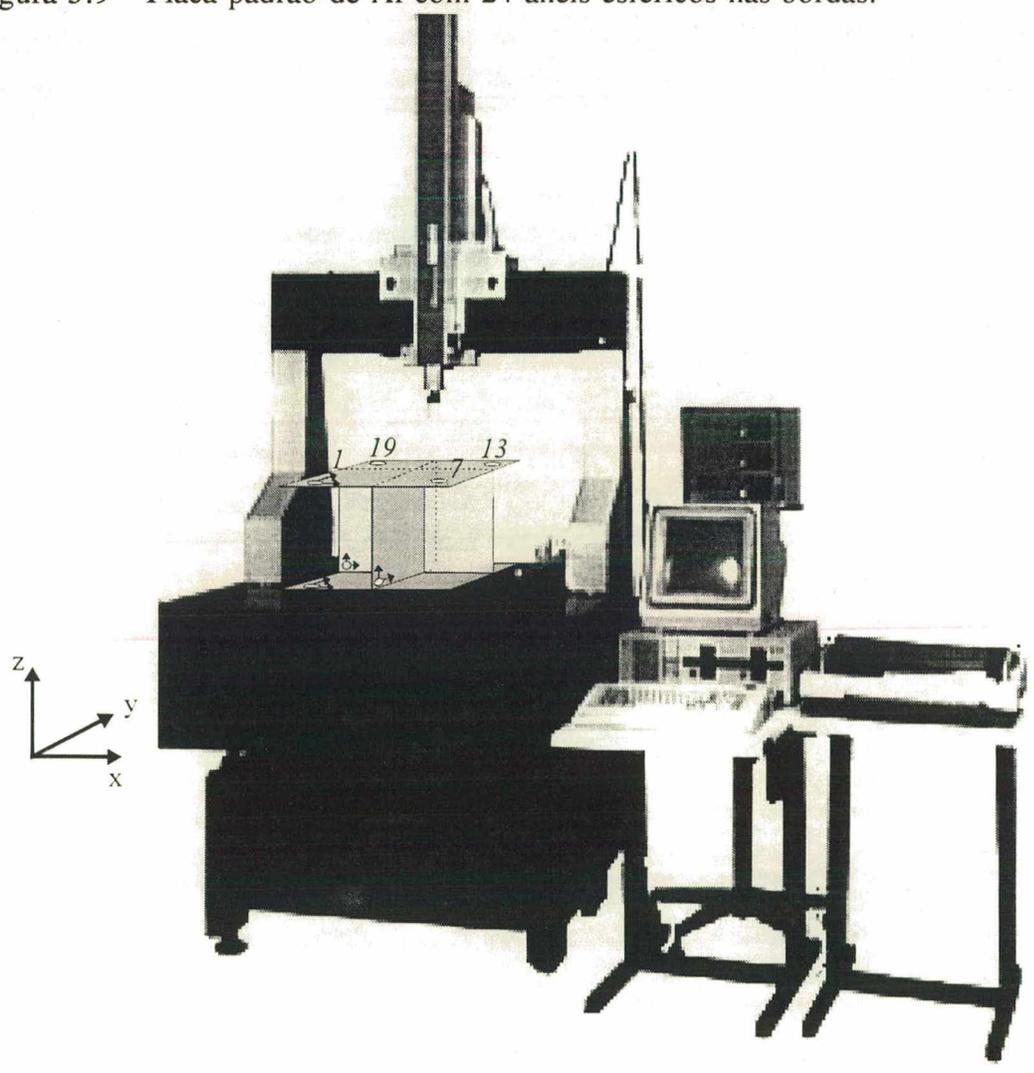


Figura 5.10 - Posições da placa padrão para qualificação da CMM.

INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE COMPRIMENTO-IM1D
CMM MITUTOYO B251 (XY) LMC-MM-004

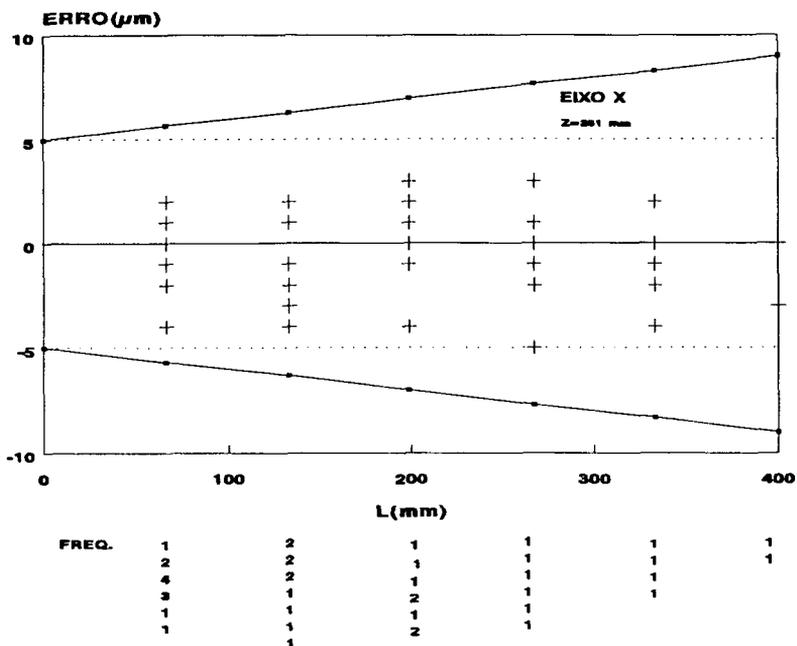


Figura 5.11 - Incerteza de medição da CMM no eixo X, plano XY (Z = 251 mm) determinada com placa padrão.

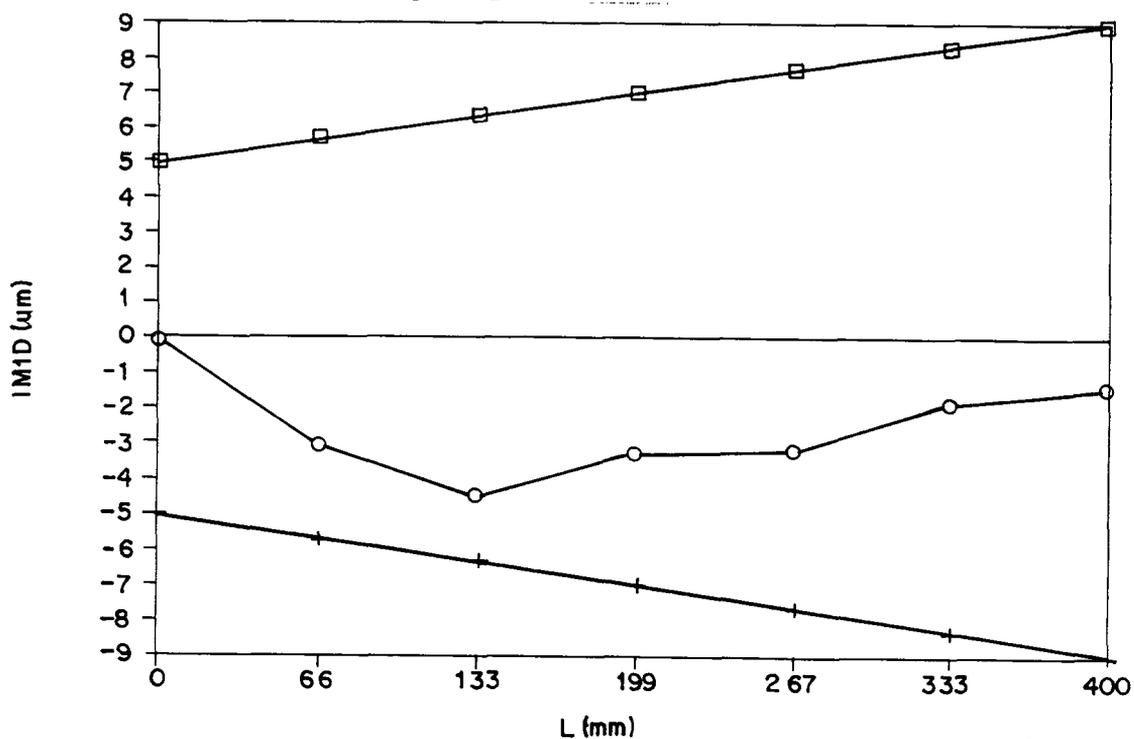


Figura 5.12 - Incerteza de medição 1D da CMM no plano XY (Z = 9 mm) na qualificação com placa padrão.

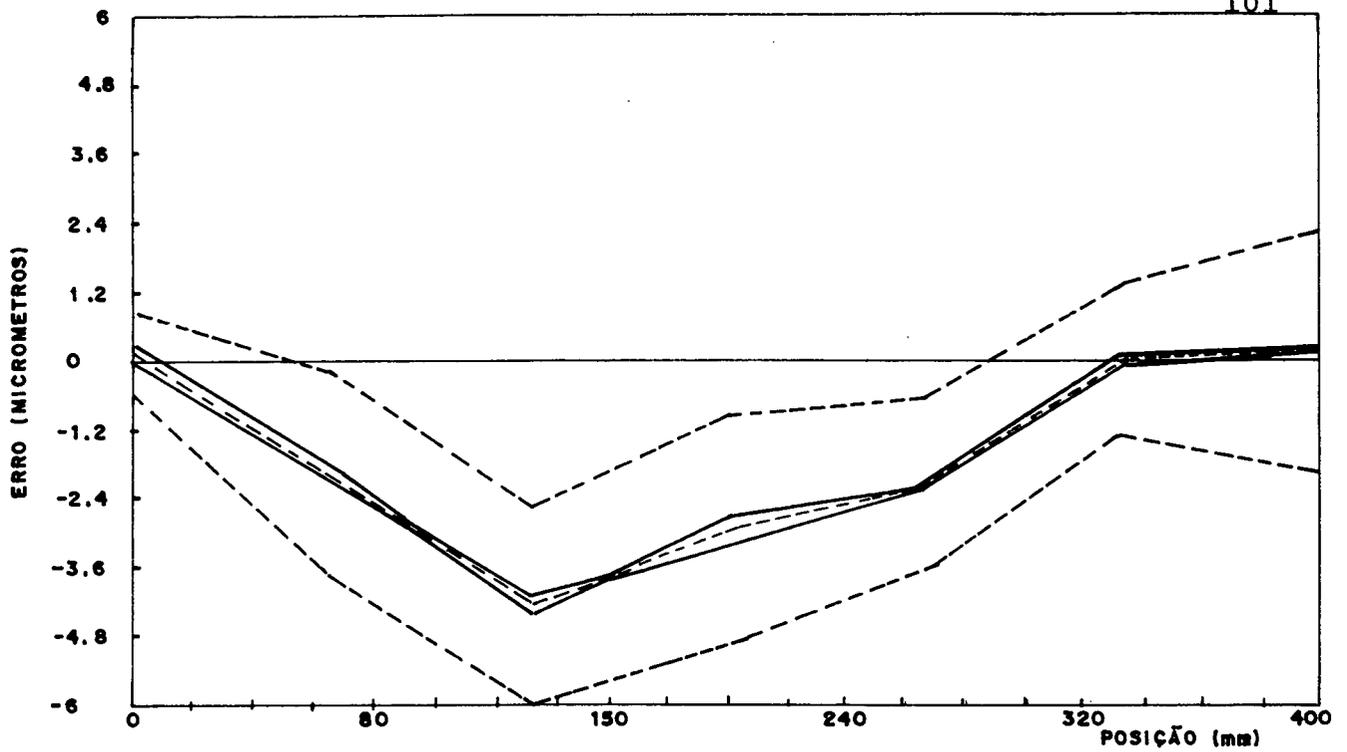


Figura 5.13 - Ensaio de posicionamento da CMM no eixo X com laser interferométrico.

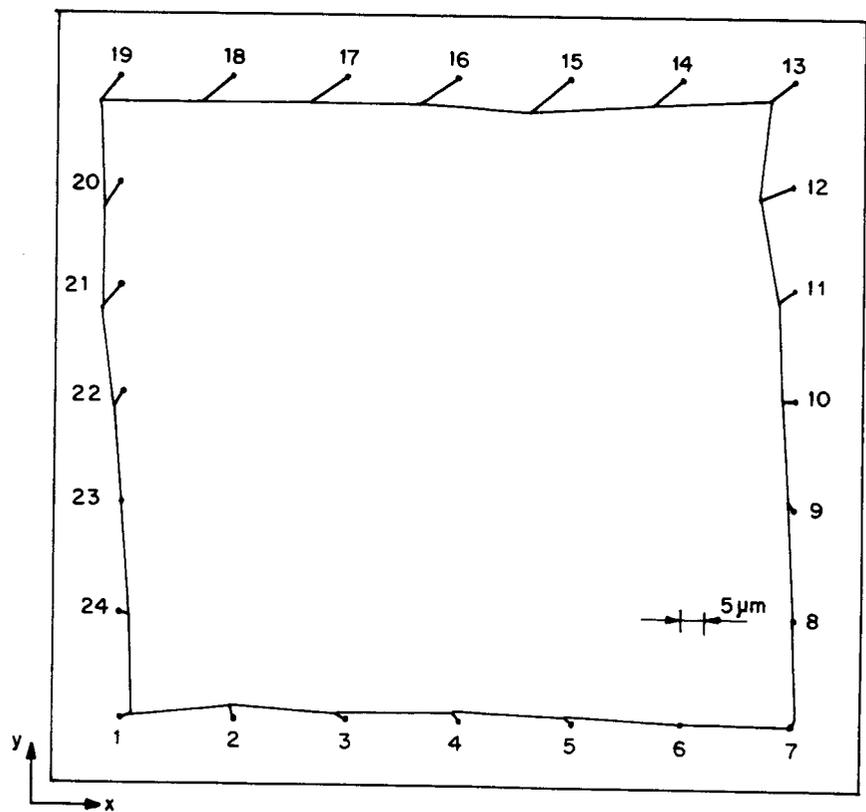


Figura 5.14 - Vetores de erros obtidos na medição da placa no plano XY (Z = 9 mm) da CMM.

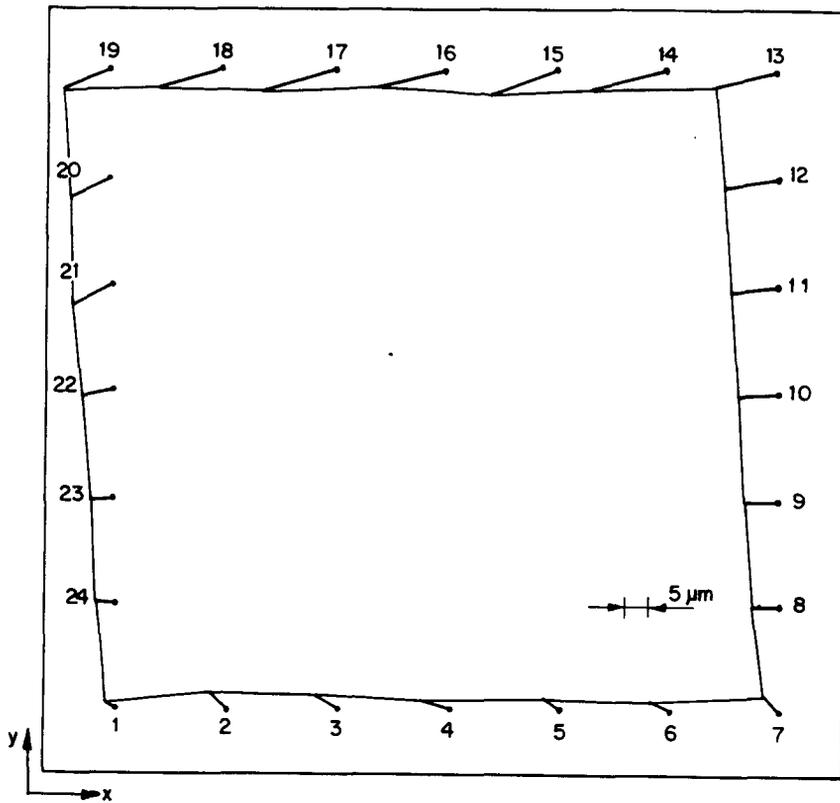


Figura 5.15 - Vetores de erros obtidos na medição da placa no plano XY ($Z = 251 \text{ mm}$) da CMM.

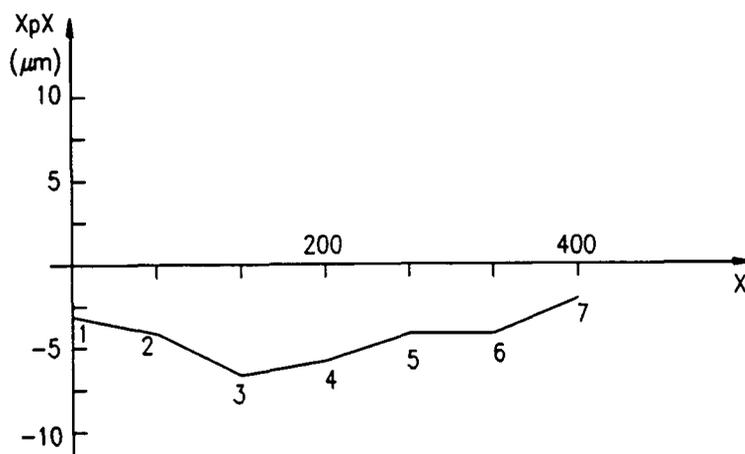


Figura 5.16 - Erro de posicionamento - x_{pX} para placa no plano XY ($Z = 251 \text{ mm}$).

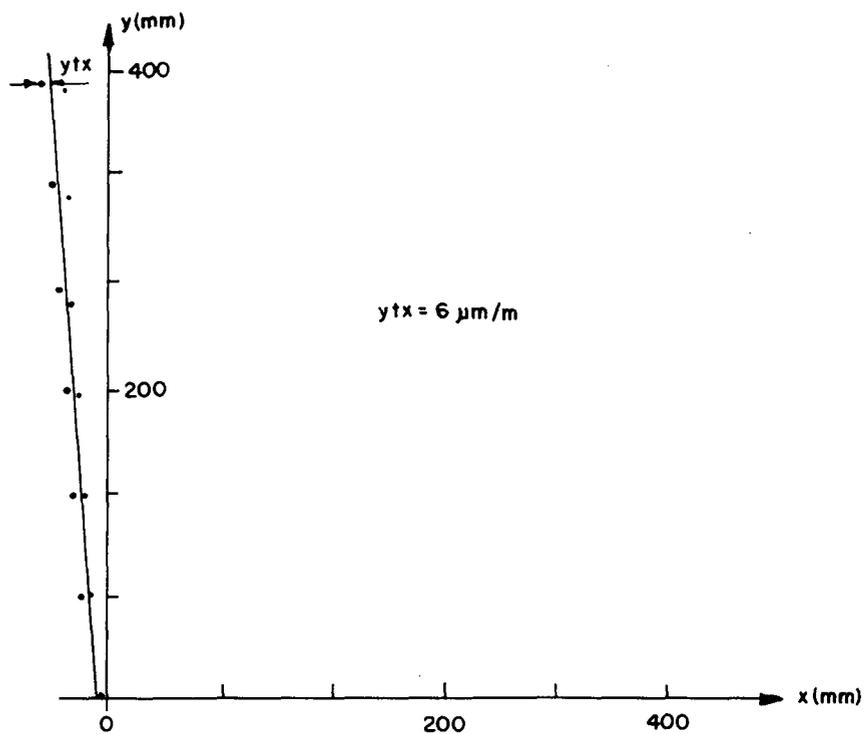


Figura 5.17 - Erro de retilidade - ytx para placa no plano XY ($Z = 251 \text{ mm}$).

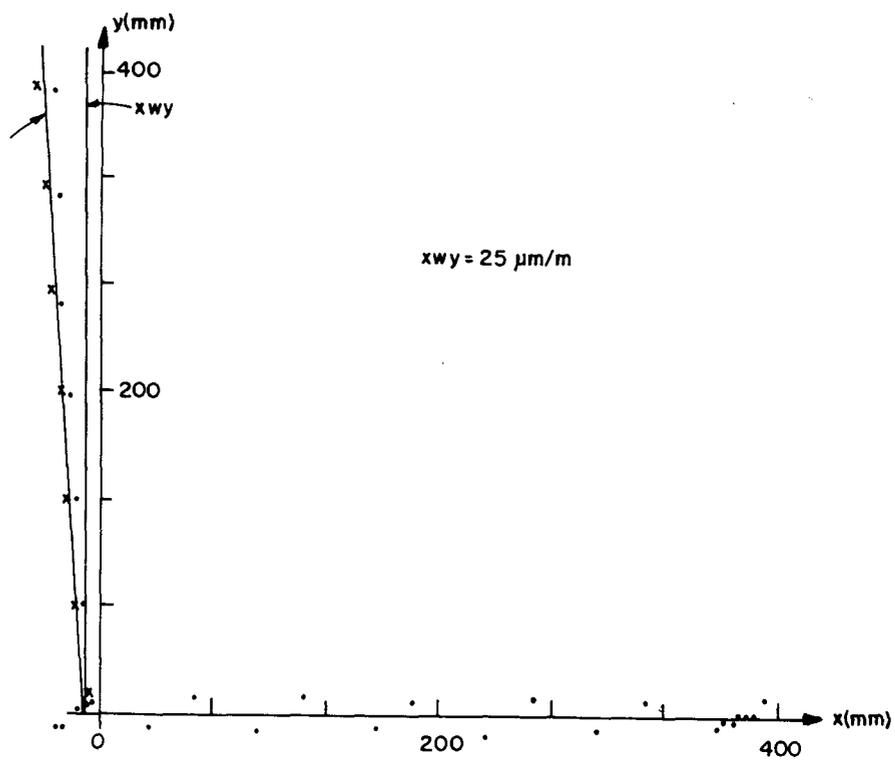


Figura 5.18 - Erro de perpendicularidade - xwy para placa no plano XY ($Z = 251 \text{ mm}$).

5.2 CMM COM COMANDO NUMÉRICO

Na CMM com comando numérico [64] teve-se os mesmos objetivos da CMM anterior, ou seja, realizar e analisar os ensaios de incerteza de apalpação, qualificação com blocos padrão e placa padrão.

5.2.1 Características operacionais e metrológicas principais da CMM

A CMM é do tipo portal, com cabeçote apalpador tipo medidor. Esta CMM tem o recurso de correção dos seus erros sistemáticos (erros de retilineidade das guias, de perpendicularidade, de rotação e de posicionamento das escalas) por computador, através do CAA (Computer Aided Accuracy - "Precisão" Assistida por Computador).

Esta CMM encontra-se instalada em laboratório climatizado ($T = 20,0 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$).

As suas principais características são:

- Faixa de operação = 0 a 550 mm no eixo X
0 a 500 mm no eixo Y
0 a 450 mm no eixo Z
- Resolução = $0,2 \mu\text{m}$
- Incerteza de medição (especificada pelo fabricante) =
 $IM_{1D} = \pm (1,0 + L/400) \mu\text{m}$
 $IM_{3D} = \pm (1,5 + L/250) \mu\text{m}$
 Para temperatura ambiente = $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$
 Para variações de temperatura temporal = $0,4^{\circ}\text{C/h}$ e $0,6^{\circ}\text{C/d}$
 Para variações de temperatura espacial = $0,3^{\circ}\text{C/m}$

5.2.2 Ensaio de incerteza de apalpação

As principais características do apalpador, dos padrões corporificados utilizados e resultados do ensaio de incerteza de apalpação são apresentados na figura 5.19.

A máxima incerteza de apalpação unidimensional (1D) encontrada foi de $\pm 0,4 \mu\text{m}$ na direção do eixo Y, a incerteza bidimensional (2D) foi de $\pm 0,7 \mu\text{m}$ no plano XY e a incerteza tridimensional (3D) foi de $\pm 0,6 \mu\text{m}$. Observa-se que maiores incertezas ocorrem para os eixos com as condições cinemáticas mais desfavoráveis.

Na figura 5.20, tem-se uma incerteza de apalpação 2D de $\pm 0,7 \mu\text{m}$, obtida com anel padrão, no plano XY, para apalpador com haste de aço ($L = 40 \text{ mm}$, $\varnothing = 6 \text{ mm}$), com força de medição de 0,2 N, com medição estática de 50 pontos, sem compensação da flexão da haste do apalpador.

Na mesma CMM, com o mesmo padrão, a incerteza de apalpação é de $\pm 0,6 \mu\text{m}$, no plano XY, para apalpador com haste de cerâmica ($L = 40 \text{ mm}$, $\varnothing = 6 \text{ mm}$), com força de medição de 0,2 N, com medição dinâmica e com compensação de flexão (fig. 5.21).

Com estes resultados comprova-se que a variação de características dos apalpadores e a maneira de apalpação influenciam nos resultados da incerteza de apalpação.

INCERTEZA DE APALPAÇÃO			
CMM	: CMM-ZEISS RC-0542		
LOCALIZADOR	: APALPADOR MEDIDOR		
MATERIAL DA HASTE	: AÇO		
COMPRIMENTO/DIÂMETRO DA HASTE	: 40/6 mm		
SENSOR	: ESFERA DE RUBI		
DIÂMETRO NOMINAL	: 8 mm		
	1D	2D	3D
PADRÃO (mm)	BLOCO PADRÃO 10	ANEL PADRÃO 24,9940	ESFERA - 30
ERRO DO PADRÃO (μm)	0,12	0 0,26 \pm 0,10	Esfericidade Tol \pm 0,25
NÚMERO DE PONTOS	50	50	51
TEMP. AMBIENTE	INÍCIO	X	Y
($^{\circ}\text{C}$)	FIM	Z	
		- 20,17	20,18
		20,53	- 20,26
OBSERVAÇÕES: FORÇA DE MEDIÇÃO = 0,2 N			
		$IM_{1D} = \pm (1,0 + L/400) \mu\text{m}$	
		$IM_{3D} = \pm (1,5 + L/250) \mu\text{m}$	
RESULTADO: INCERTEZA DE APALPAÇÃO (μm)			
	1D	2D *	3D
ADMISSÍVEL	Não especificado	Não especificado	Não especificado
RESULTADO	X \rightarrow \pm 0,3 Y \rightarrow \pm 0,4 Z \rightarrow \pm 0,2	XY \rightarrow \pm 0,7 ZX \rightarrow \pm 0,5 YZ \rightarrow \pm 0,6	\pm 0,6

* Sem compensação flexão.

Figura 5.19 - Características do apalpador e padrões e incerteza de apalpação 1D, 2D e 3D da CMM.

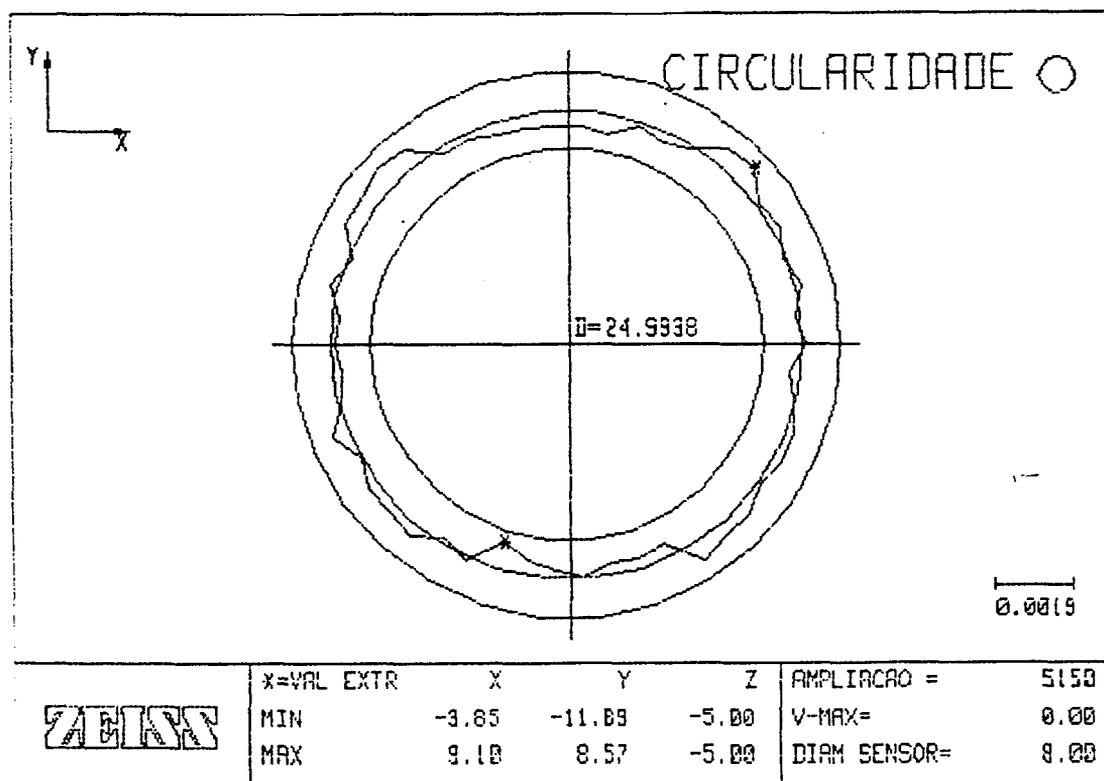


Figura 5.20 - Incerteza de apalpação 2D (IA) da CMM no plano XY para apalpador com haste de aço, com medição estática, sem compensação flexão.

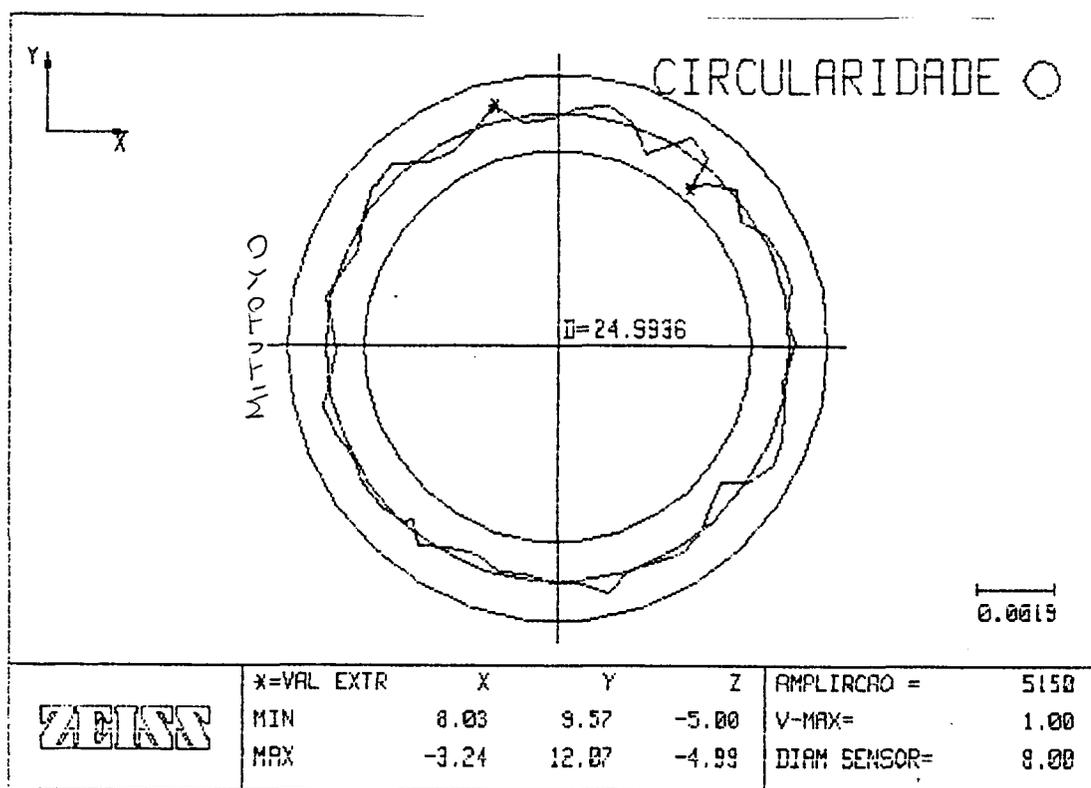


Figura 5.21 - Incerteza de apalpação 2D (IA) da CMM no plano XY para apalpador com haste de cerâmica, com medição dinâmica, com compensação de flexão.

5.2.3 Qualificação da CMM com Blocos Padrão

Na qualificação da CMM utilizou-se os blocos padrão de 10, 90, 200, 300 e 500 mm.

Posicionou-se os blocos padrão conforme a figura 4.4.

Realizou-se 10 ciclos de medição por bloco, medindo-se as temperaturas dos blocos padrão e das escalas para correção do comprimento devido às variações de temperatura (coeficiente de dilatação térmica da escala = $7,8 \mu\text{m/mK}$, coeficiente de dilatação térmica dos blocos padrão = $11,5 \mu\text{m/mK}$).

Nas figuras 5.22 a 5.25 tem-se os resultados da qualificação da CMM com blocos padrão, considerando-se os erros e suas frequências, bem como a incerteza de medição de comprimento especificada pelo fabricante. Os resultados mostram uma tendência geral para erros sistemáticos negativos.

Na figura 5.25b observa-se erros que excedem da incerteza de medição especificada pelo fabricante. Estes erros podem ser explicados pela instabilidade das temperaturas da CMM, padrões e ambiente, devido à queda de tensão algumas horas antes da qualificação.

5.2.4 Qualificação da CMM com Placa Padrão

Na qualificação da CMM utilizou-se a mesma placa padrão mencionada na qualificação da CMM com acionamento manual. Esta placa foi calibrada por duas vezes utilizando-se a própria CMM (método mencionado no capítulo 4), na primeira calibração a placa possuía 8 anéis esféricos e na segunda calibração a placa já estava com os 24 anéis esféricos atuais. Na figura 5.26 tem-se uma comparação dos resultados da primeira calibração em relação à segunda ocorrida 16 meses após. Pode-se notar que a maior diferença foi de $1,8 \mu\text{m}$ na direção X, no anel esférico representado pelo número 7.

Para qualificação da CMM com a placa, posicionou-se a placa nos planos XY, YZ, XZ e diagonais no volume de trabalho da CMM.

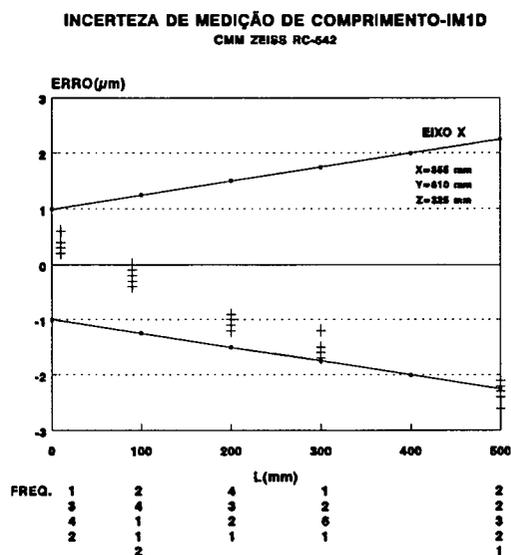
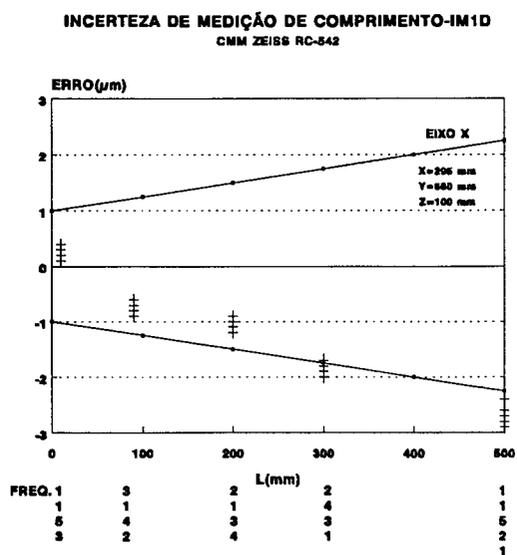


Figura 5.22 - Incerteza de medição de comprimento - 1D na direção do eixo X para Z = 100 mm e Z = 325 mm.

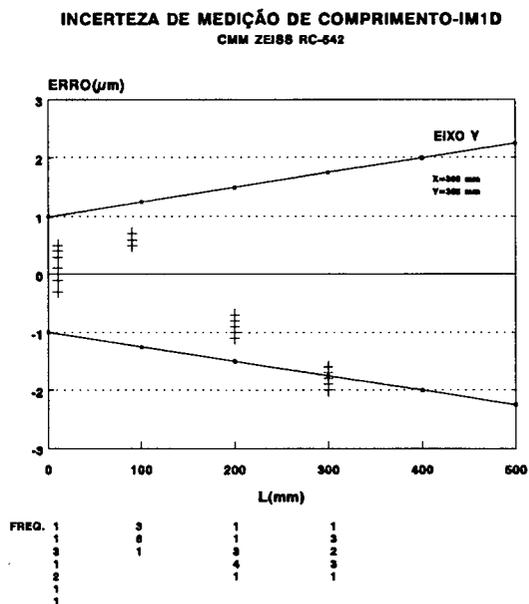
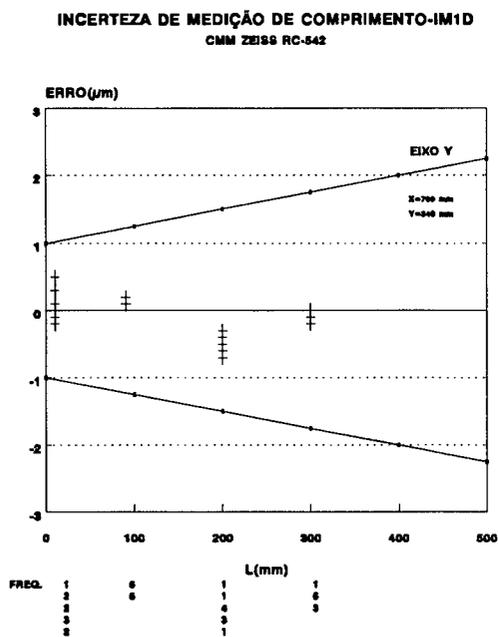


Figura 5.23 - Incerteza de medição de comprimento - 1D na direção do eixo Y (próximo e afastado da escala)

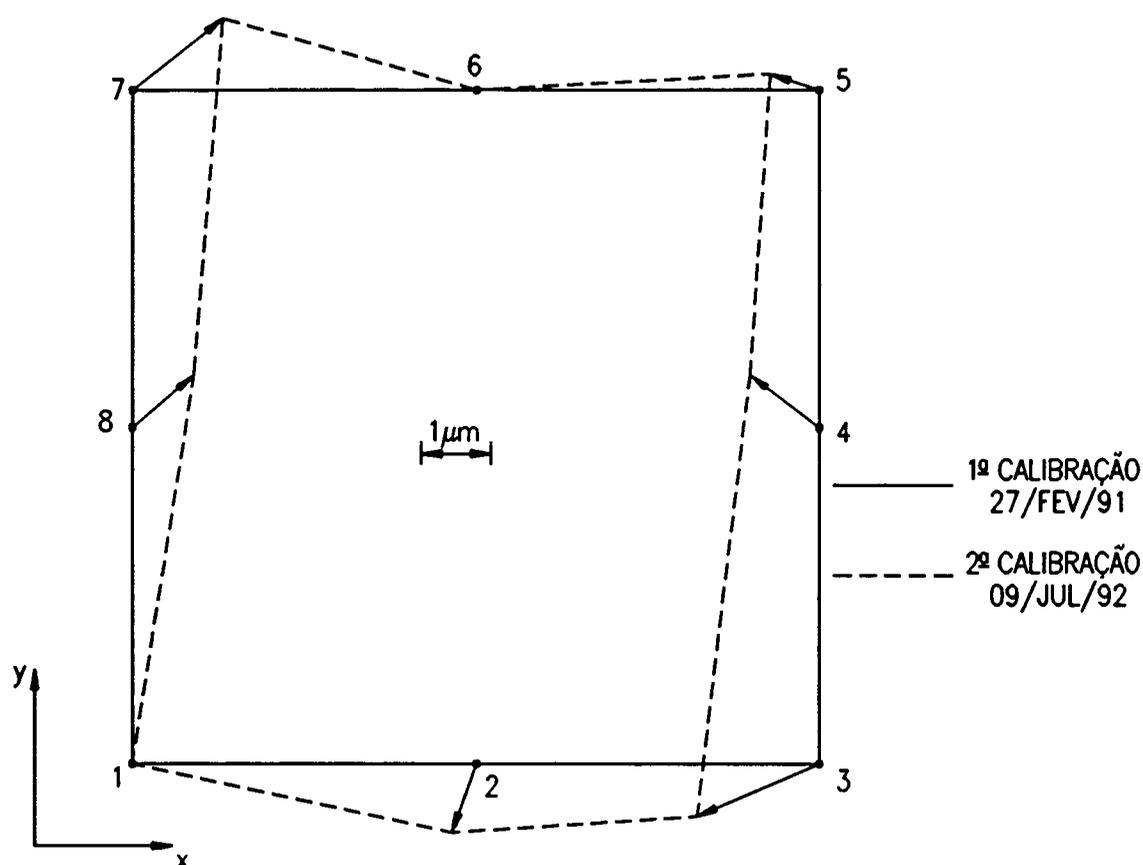


Figura 5.26 - Comparação dos resultados da 1ª e 2ª calibração da placa padrão depois de 16 meses.

Na figura 5.27 tem-se algumas posições da placa na qualificação: plano XY ($Z = 10$ mm e 290 mm), plano YZ e uma diagonal.

As posições dos sensores de temperatura na placa padrão e para escala X são mostrados na figura 5.28; foram utilizados quatro sensores na placa, um para escala X e um para escala Y. Com as temperaturas da placa e das escalas fez-se as correções das medições das distâncias entre anéis.

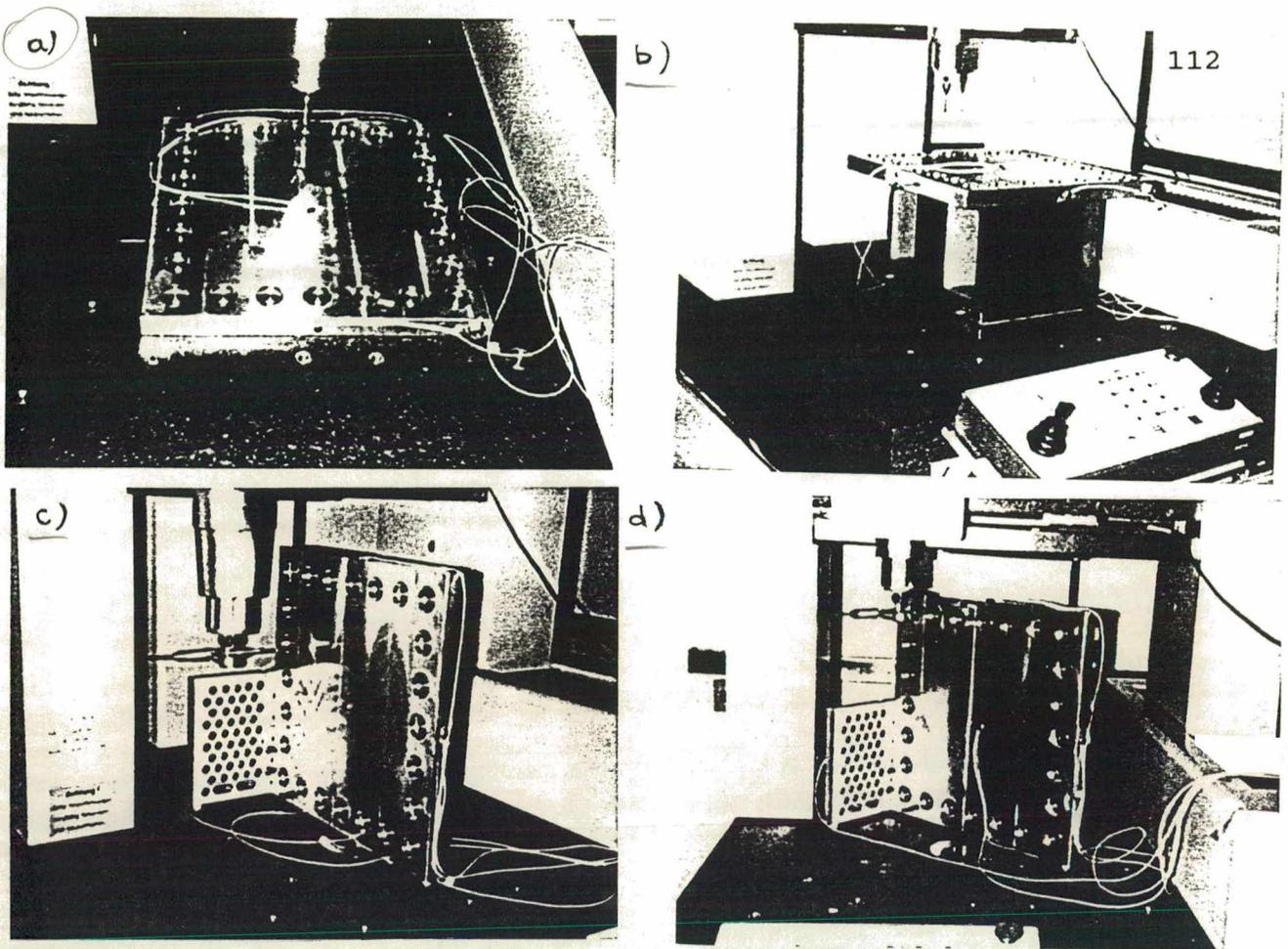


Figura 5.27 - Posições da placa para qualificação CMM: a) plano XY ($Z = 10$ mm), b) plano XY ($Z = 290$ mm), c) plano YZ, d) diagonal X/Y = -44°

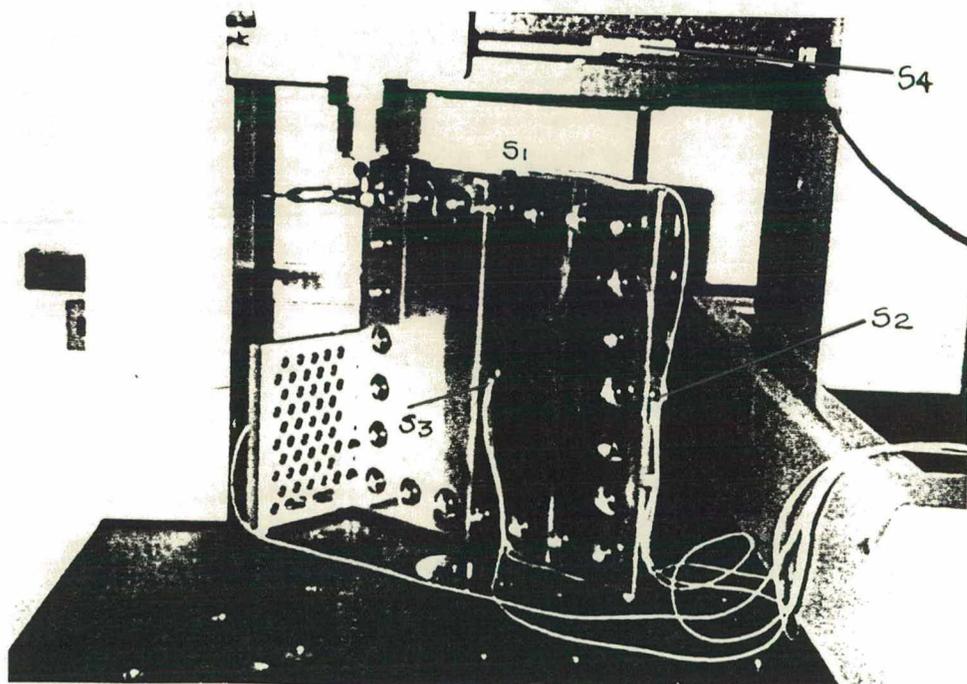


Figura 5.28 - Posicionamento de sensores para medição de temperaturas da placa e escala da CMM: S₁, S₂, S₃ - sensores para medição da temperatura da placa; S₄ - sensor para medição da temperatura da escala X.

Com a determinação das distâncias entre os centros dos anéis esféricos e comparação com as distâncias da calibração, obtêm-se os gráficos dos erros sistemáticos nas medições de distâncias.

Na figura 5.29 tem-se a incerteza de medição da CMM, no plano XY, a uma altura $Z = 290$ mm, na direção do eixo X. Observa-se que as distâncias medidas estão dentro da incerteza de medição especificada pelo fabricante.

Nas figuras 5.30 e 5.31 tem-se o gráfico dos erros na medição das distâncias entre anéis com placa no plano XZ (sensor 2 e 4).

Com a determinação dos erros dos centros dos anéis tem-se os vetores de erros para cada plano de trabalho da CMM. Na figura 5.32 tem-se os vetores de erros para placa padrão no plano XY ($Z = 290$ mm), com estes pode-se analisar os erros de posicionamento, reticidade e perpendicularidade da CMM [2, 46].

Nas figuras 5.33 e 5.34 tem-se os vetores de erros para placa no plano XZ com apalpação dos dois lados (sensor 2 e 4). Os vetores de erros são obtidos após o nivelamento da placa pelos furos 1,7 e 19 e alinhamento pelos furos 1 e 7. No próprio alinhamento tem-se erros devido a incerteza de apalpação da CMM. Com estes vetores de erros pode-se, por exemplo, obter o erro de guinamento $x_{rz} = 6 \mu\text{m/m}$ conforme mostrado na figura 5.35.

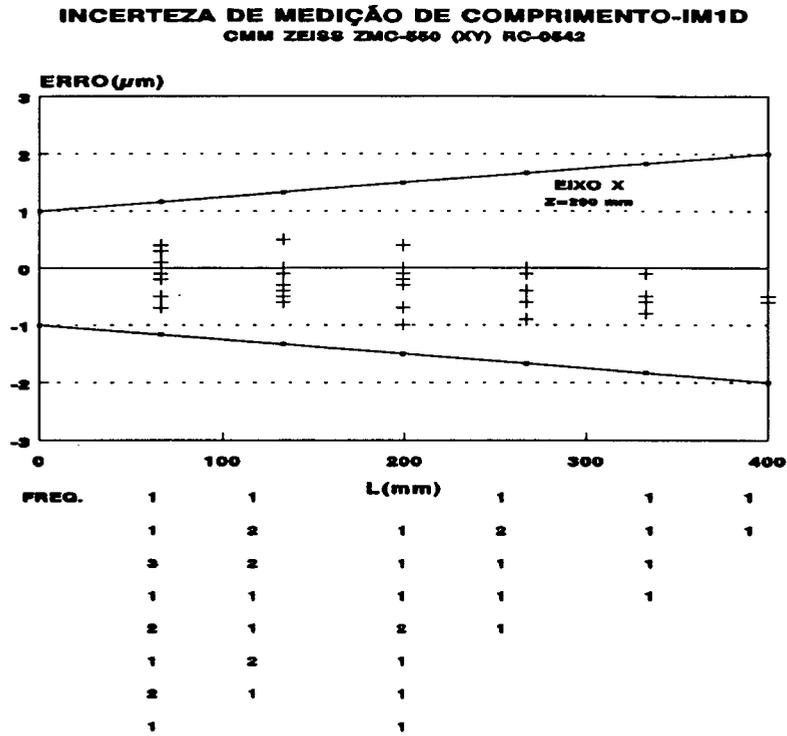


Figura 5.29 - Incerteza de medição 1D da CMM no plano XY, eixo X (Z = 290 mm) na qualificação com placa padrão.

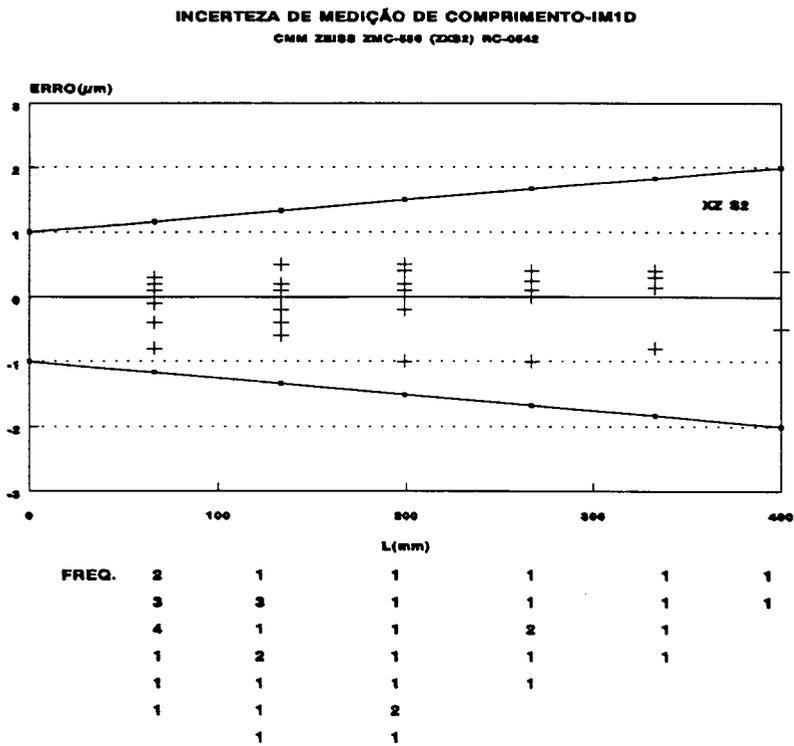


Figura 5.30 - Incerteza de medição 1D da CMM no plano XZ (sensor 2) na qualificação com placa padrão.

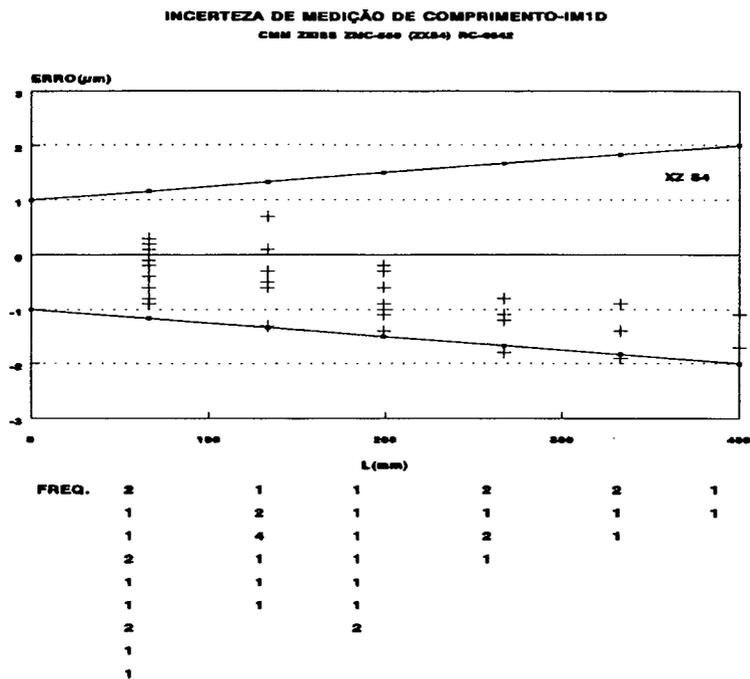


Figura 5.31 - Incerteza de medição 1D da CMM no plano XZ (sensor 4) na qualificação com placa padrão.

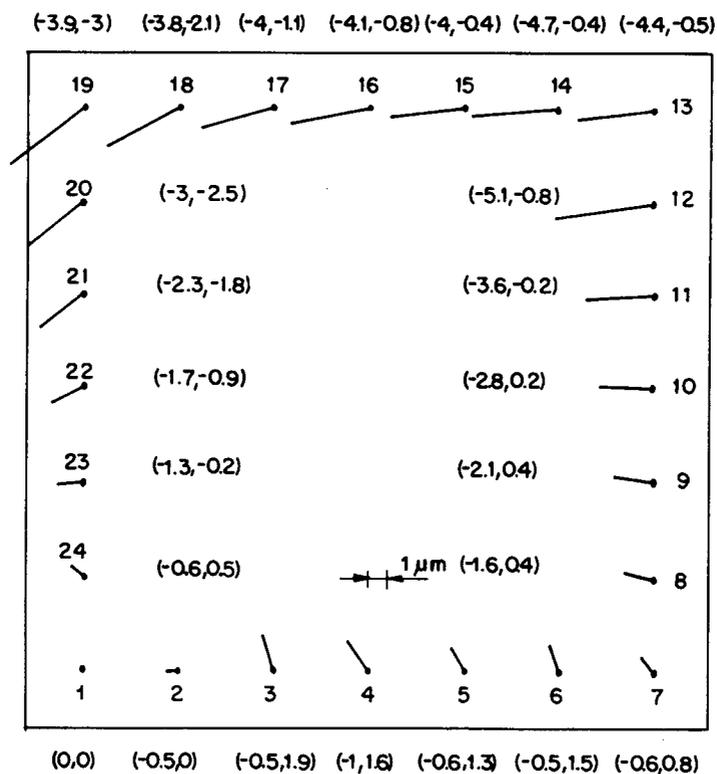


Figura 5.32 - Vetores de erros obtidos na medição da placa no plano XY (Z = 290 mm) da CMM.

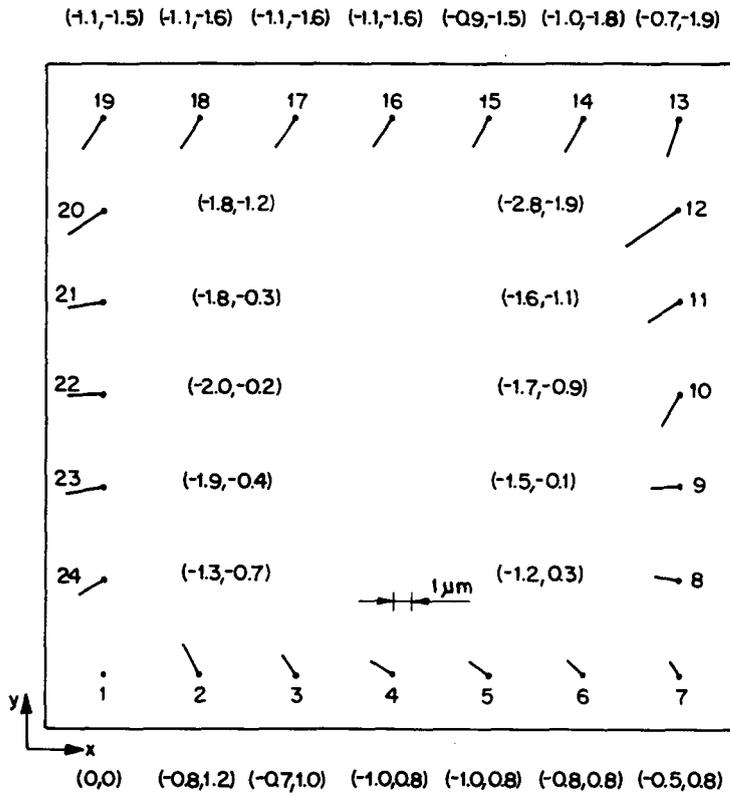


Figura 5.33 - Vetores de erros obtidos na medição da placa no plano XZ com sensor 2.

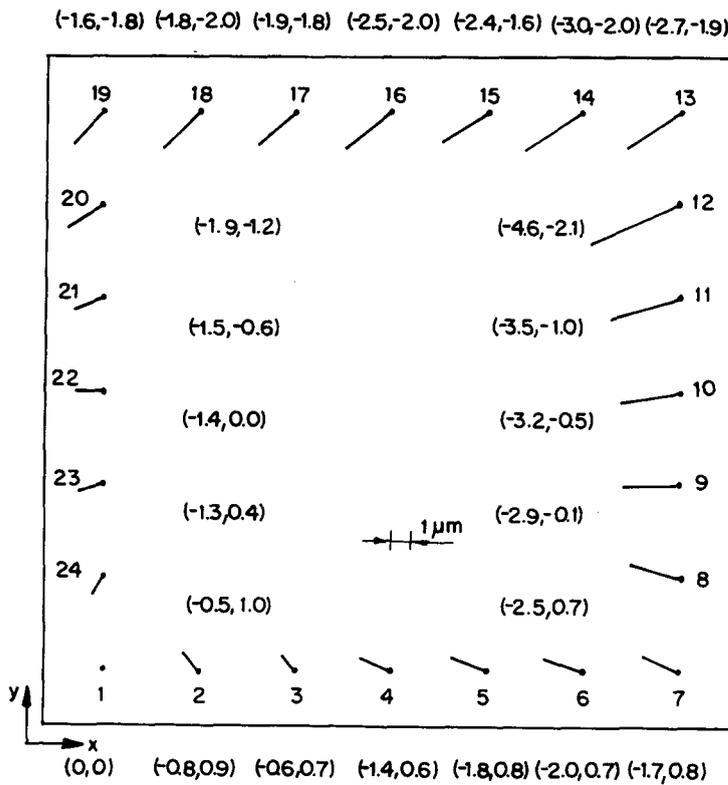


Figura 5.34 - Vetores de erros obtidos na medição da placa no plano XZ com sensor 4.

6. CONCLUSÕES

Com os estudos das causas de erros e da qualificação de máquinas de medir por coordenadas com padrões corporificados, pôs-se em prática metodologias de qualificação.

Na inspeção periódica, vários padrões corporificados são admitidos para qualificação de máquinas de medir por coordenadas, destacando-se blocos padrão, padrão escalonado, barra com esferas, barra rotulada, placas com esferas ou furos e peças tridimensionais.

Nos ensaios de aceitação a escolha dos padrões depende do nível de exigência do contrato entre fabricante e usuário, com as placas com esferas ou furos pode-se determinar a incerteza de medição de comprimento e as componentes de erros das máquinas.

A quantidade de graus de liberdade dos erros em cada ponto do espaço traz dificuldades para calibração das máquinas. O método da máquina de medir por coordenadas virtual, com a avaliação de incerteza de apalpação com esfera padrão e componentes de erros com placas com esferas ou furos é a proposta que, no momento, melhor permite calibrar uma máquina na sua concepção mais exata, permitindo a determinação da incerteza de medição para diversas tarefas de medição.

As metodologias desenvolvidas no trabalho se mostram viáveis para a qualificação das máquinas em diferentes níveis.

O ensaio de incerteza de apalpação deve ser realizado na inspeção, no ensaio de aceitação e na calibração. Pode-se realizar a determinação da incerteza de apalpação somente com uma esfera padrão.

A qualificação com blocos padrão e padrão escalonado pode ser utilizado em inspeções periódicas e ensaio de aceitação para determinação da incerteza de medição de comprimentos. Esta qualificação é pouca adequada para efetuar análises quantitativas de causas de erros de medição e não é suficiente para satisfazer ensaios de aceitação mais exigentes e calibração de máquinas.

A qualificação com placas padrão com esferas ou anéis esféricos, possuem vantagens em relação a qualificação com outros padrões corporificados e ensaios geométricos, podendo ser utilizada na inspeção periódica, no ensaio de aceitação e calibração. Pode-se determinar a incerteza de medição de distâncias e as componentes de erros da máquina de uma forma rápida e econômica.

A necessidade de padronização tem levado à elaboração de diversas normas e recomendações técnicas para qualificação, e apenas algumas mais recentemente vêm convergindo para uma condição de consenso. Como a questão da qualificação das máquinas de medir por coordenadas é complexa, como demonstrado no trabalho, e depende de outros aspectos (como mercadológicos e culturais), é de se esperar que alguns anos ainda decorram até que métodos

coerentes e aceitos à nível internacional sejam alcançados.

Atualmente, na análise de recomendações e normas para qualificação de máquinas tem-se apenas a determinação da incerteza de medição de comprimentos como características comum à todas.

Embora, um estudo da situação nacional não tenha sido contemplado neste trabalho, pode-se observar que a qualificação de máquinas de medir por coordenadas com padrões corporificados no Brasil ainda está muito incipiente, frente aos requisitos de qualidade que vêm sendo exigidos dos sistemas de medição e ensaios. É necessário e urgente a capacitação de alguns laboratórios secundários da Rede Brasileira de Calibração para a qualificação de máquinas de medir por coordenadas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Campos, V.F. TCQ: Controle da Qualidade Total (no estilo japonês).
Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da
UFMG, 1992.
- [2] Trapet, E. Quality Assurance of Coordinate Measuring
Wäldele, F. Machines, PTB, 1993.
- [3] Paolino, R.F. Faça as contas: o investimento em MMC é justificável.
Genrst, D.H. Máquinas e Metais, 29-39, Agosto, 1992.
- [4] Trapet, E. Aseguramiento de la calidad para máquinas de medir
Wäldete, F. por coordenadas. Seminário en el Centro Español de
Metrologia, Junio de 1991.
- [5] ANSI/ASME Methods for Performance Evaluation of Coordinate
B89.1.12M Measuring Machines, January, 1990.

- [6] JIS B7440 Test Code for Accuracy of Coordinate Measuring Machines, 1987.
- [7] CMMA Accuracy Specification for Coordinate Measuring Machines, 1989.
- [8] VDI/VDE 2617 Accuracy of Coordinate Measuring Machines - Characteristics and their Checking Generalities. Part 1, April, 1986.
- [9] VDI/VDE 2617 Accuracy of Coordinate Measuring Machines - Characteristics and their Checking. Measurement Task Specific Measurement Uncertainty, Length Measurement Uncertainty. Part 2.1, December, 1986.
- [10] VDI/VDE 2617 Accuracy of Coordinate Measuring Machines - Characteristics Parameters and their Checking Componentes of Measurement Deviation of the Machine. Part 3, May, 1989.

- [11] VDI/VDE/2617 Accuracy of Coordinate Measuring Machines - Characteristics and their Checking, Rotary Tables on Coordinate Measuring Machines. Part 4, September, 1989.
- [12] VDI/VDE/2617 Genauigkeit von Koordinatenmeßgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung Überwachung durch Prüfkörper. Blatt 5, Januar, 1993.
- [13] BS 6808 " Coordinate Measuring Machines - Part 2: Methods for Verifying Performance", British Standards Institute. London, UK, 1987.
- [14] ISO/TC 3 Coordinate Metrology - Part 2: Performance assessment of coordinate measuring machines (CMMs), 1992.
- [15] WECC Technical Guideline - Coordinate Measuring Machine Calibration, WECC Expert Group on CMM - Calibration. October, 1993.

- [16] NFE 11-50 (AFNOR): Instruments de Mesurage, Association Française de Normalisation, 1986.
- [17] Lago, A. Laser e Aplicações, Curso CERTI, Junho, 1991.
Schoeler, N.
Mello, S.M.
- [18] Weckenmann, A. The accuracy of coordinate measuring machines. 9th Imeko World Congress. 110 - 119, May, 1982.
- [19] Schneider, C.A. Metrologia Dimensional. Curso Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 1990.
- [20] Schneider, C.A. Máquinas de Medir por Coordenadas - Medição,
Nickel Veiga, C.L. Qualificação e Automação. Apostila, Curso CERTI,
Schoeler, N. CC-036, UFSC, Julho, 1989.
- [21] Pfeifer, V.T. Ermittlung der Meßunsicherheit von 3 - D -
Bambach, M. Tastsystemen - Determination of the measuring error
Fürst, A. of 3 - D - Sensing Systems, Technisches Messen,
47 - 52, 1979.

- [22] Pfeifer, V.T. Ermittlung der Meßunsicherheit von 3 - D -
Bambach, M. Tastsystemen - Determination of the measuring error
Fürst, A. of 3 - D - Probes, Technisches Messen, 161 - 169,
1979.
- [23] Trapet, E. Koordinatenmeßgeräte in der Fertigung -
Wäldele, F. Temperatureinflüsse und erreichbare Meßunsicherheit,
VDI Berichte NR.751,209 - 227, 1989.
- [24] Balsamo, A. A Method for Thermal - Deformation Corrections of
Marques, D. CMMs. Annals of the CIRP, Vol. 39,557 - 560,
Sartori,S. Janeiro, 1990
- [25] Schalz, K. J. Improved Thermal Error Compensation (TEC) of
CMM's. 3rd International Imeko-Symposium on
Dimensional Metrology in Production and Quality
Control - ISMQC, 177 - 184, Setembro, 1989.

- [26] Sartori, S. A method for the identification and correction of thermal deformations in a three coordinate measuring machine. 3rd International Imeko-Symposium on dimension Metrology in Production and Quality Control - ISMQC, 185 - 192, Setembro, 1989.
- [27] Cresto, P.C. A method for the identification and correction of thermal deformation in 3-D CMMs. Measurement, Di Ciommo, M. Vol.9, N^o 1, 38 - 43, Janeiro - Março, 1991.
Kancheva, T.
Marques, D.
Mudronja, V.
Sartori, S.
- [28] Gerwien, N. Kalibrierung von Kugel - und Lochplatten zur Prüfung von Koordinatenmeßgeräten, PTB, September, 1992.
Hierse, K.
Hirsch, J.
Hüser - Tenchert,D.
Trapet, E.
Wäldele, F.
Wiengand, V.

- [29] Breyer, K.H. Paving the way to Thermally Stable Coordinate
Pressel, H.G. Measuring Machines, Progress in Precision
Engineering, 56 - 76, May, 1991.
- [30] Wäldele, F. Ein Beitrag zur Berechnung der Meßunsicherheit und
Optimierung von Meßstrategien in der Koordinaten -
Meßtechnik, Dissertation RWTH-Aachen, 1982, PTB
- Me - 39.
- [31] Kunzmann, H. Performance of CMMs. Annals of the CIRP, Vol.
Wäldele, F. 37,633 - 640, Fevereiro,1988.
- [32] Wäldele, F. Forschungs-und Entwicklungsaufgaben mit
Schwerpunkt - arbeiten der Physikalish - Technischen
Bundesanstalt (PTB), CNC - Koordinatenmeßtechnik,
150 - 178, 1988.
- [33] Porta, C. Testing of three coordinate measuring machine
Wäldele, F. evaluation algorithms, EC-BCR information, Report
EUR 10909 EN, 1986.

- [34] Hüser, D. Kalibrierung von Koordinatenmeßgeräten mit Kugel-
Trapet, E. und Lochplatten, PTB, april, 1993.
Wäldele, F.
Wiegand, V.
- [35] Hüser, D. Calibration of Coordinate Measuring Machines Based
Trapet, E. on Ball Plates, PTB, 1994.
Schwenke, H.
Wäldele, F.
Wiegand, U.
- [36] Kunzmann, H. Concept for the Traceability of Measurements with
Trapet, E. Coordinate Measuring Machines, 7th International
Wäldele, F. Precision Engineering Seminar (Kobe), May 17-21,
1993.
- [37] Sakai, H. High-precision CNC Coordinate Measuring Machine
H503, Technical Bulletin N° 10,12 - 18, Mitutoyo
Corporation, 1990.

- [38] Janssen, L. Assurance of the Dimensional Accuracy in a FMS Cell. 2nd IMEKO TC 14 - International Symposium on Metrology for Quality Control in Production. 37-47, Maio, 1989.
- [39] Kolb & Baumann Kugelplatte Koba-check. Prospecto Comercial.
- [40] Swyt, D.A. Issues, Concepts and Standard Techniques in Assessing Accuracy of CMM, NIST Technical Note 1400, National Institute of Standards and Technology, USA, Febreary, 1993.
- [41] Bryan, J.B. A simple method for testing measuring machines and machines tools - Part 1: Principles and applications; Precision Engineering. Vol 4, N° 2, 61 - 69, April, 1982.
- [42] Jarman, T. Gauging performance of CMMs. Quality Today, S4 - S6, 1988.
- [43] Renishaw Machine Cheking Gauge - Brochure Prospecto Comercial, Renishaw, 1985.

- [44] Knapp, W. Circular Test for Three-coordinate measuring machines and machine tools. Precision Engineering, vol.5, N° 3, 115-124, Julho, 1983.
- [45] Kunzmann, H. A uniform Concept for Calibration, Acceptance Test, Trapet, E. and Periodic Inspection of Coordinate Measuring Using Wäldele, F. Reference Objects. Annals of the CIRP, Vol.39,561 - 564, Janeiro, 1990.
- [46] Trapet, E. A Reference Object Based Method to Determine the Wäldele, F. Parametric Error Components of Coordinate Measuring Machines and Machines Tools. Measurement. Vol.9, N° 1, 17-22, Janeiro - Março,1991.
- [47] Trapet, E. Determination of the Parametric Errors of Coordinate Wäldele, F. Measuring Machines and Machine Tools Using Reference Objects. 3rd International IMEKO-Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control - ISMQC, 163 - 175, Setembro,1989.

- [48] PTB Zur Kalibrierung Von Koordinatenmeßgeräten, Mai, 1990.
- [49] Neumann, H.J. Monitoring of Coordinate Measuring Machines with a Test Standard, QZ, vol.4, 1989.
- [50] PTB Zum Antrag der Firma XYZ zur "Akkreditierung einer Kalibrierstelle für Prüfplatten für Koordinatenmeßgeräte, 1990.
- [51] PTB Zum Antrag der Firma XYZ zur Akkreditierung einer Kalibrierstelle für Koordinatenmeßgeräte, 1990.
- [52] Gerwien, N. Kalibrierung von Koordinatenmeßgeräten, PTB,
Hierse, K. September, 1992.
Hirsch, J.
Hüser-Tenchert, D.
Trapet, E.
Wäldele, F.
Wiegand, U.

- [53] Busch, K. Überwachung von Koordinatenmeßgeräten, VDI Berichte Nr. 751,51 - 62, Jun., 1989.
- [54] Trapet, E. Qualitätssicherung für Koordinatenmeßgeräte,
Wäldele, F. Workshop: Qualificação de Máquinas de Medir por Coordenadas utilizando Padrões Corporificações, CERTI, Fevereiro, 1991.
- [55] Tikka, H. The calibration of a bored plate for checking coordinate measuring machines. 9th Imeko World Congress, 79 -88, May, 1982.
- [56] Tikka, H.O.Y. Tetra-Test-Geometric Calibration Method. 3rd International Imeko-Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control - ISMQC, 81-86, Setembro, 1989.
- [57] Beyer, W. Geometrical Standards for Checking Multiaxial Measuring Machines. 2nd Imeko TC-14 - International Symposium on Metrology for Quality Control in Production, 207 - 215, Maio, 1989.

- [58] Schüßler, H.H. Periodical Supervision of Coordinate Measuring Machines by means of Calibrated Mechanical Standards. 3rd International Imeko-Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control - ISMQC, 133 - 161, Setembro, 1989.
- [59] Schüßler, H.H. Prüfkörper für koordinatenmeßgeräte, Werkzeugmaschinen und Meßroboter Master pieces for coordinate measuring machines, machine tools and measuring robots. Technisches Messen 51, Jahrgang, 1984.
- [60] Schneider, C.A. Técnicas de Pesquisa Experimental. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 1990.
Lücke, H.
- [61] Gonçalves Jr., A.A. Curso: Técnicas de Medição, Instrumentação e padrões aplicados à metrologia, LABMETRO, UFSC, 1993.
- [62] PTB Guideline for DKD - Calibration of test plates in the form of ball plates and bore plates. Draft version, January, 1992.

- [63] LMC-EFEI Máquina de Medir por Coordenadas, Mitutoyo, LMC-MM-004.
- [64] CERTI Máquina de Medir por Coordenadas, Zeiss, RC-0542.