

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Laboratório de Metrologia e Automação

Departamento de Engenharia Mecânica

**CALIBRAÇÃO DE MÁQUINAS DE MEDIR POR
COORDENADAS UTILIZANDO PLACAS DE ESFERAS
– UMA TÉCNICA ECONÔMICA, RÁPIDA E
METROLOGICAMENTE EFICIENTE**

**Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia**

EDMILSON RAMPAZZO KLEN

Florianópolis, 13 de março de 2000

À minha esposa, Alexandra Augusta,
aos meus filhos Thomas e Tobias,
e aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

- À DEUS, por ter me proporcionado saúde e força nesta caminhada;
- À UFSC/LABMETRO, pela infra-estrutura de apoio bem como ao corpo docente dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e em Metrologia Científica e Industrial;
- À CERTI, pela infra-estrutura laboratorial e pelo aprendizado na área de metrologia nos anos como funcionário desta Fundação;
- Ao PTB, pelos estágios e suporte técnico que serviram de base para a realização deste trabalho;
- Ao GRUCON/G-SIGMA, pela infra-estrutura de apoio para o término do trabalho;
- À CAPES, pelo financiamento durante o período de dedicação exclusiva no final deste trabalho;
- À Alexandra Augusta, esposa e amiga, pelo apoio para a realização deste trabalho e em todas as decisões importantes na minha vida;
- Aos meus filhos Thomas e Tobias, pela felicidade que me dão, me motivando constantemente para transpor quaisquer dificuldades que venha a encontrar;
- Aos meus pais, Irene e Alvino, aos meus irmãos Eldio e Edilson e suas famílias, à minha tia Jair, pela harmonia entre nós;
- Ao Professor Carlos Alberto Schneider pela dedicação na orientação deste trabalho;
- À família Pereira, por propiciar segurança e amor aos meus filhos, me dando tempo e tranqüilidade nos momentos de maior dedicação a este trabalho;
- Ao amigo Celso Luiz Nickel Veiga pela revisão do texto e, principalmente, pelo valioso tempo que trabalhamos juntos na área de medição por coordenadas;
- Aos colegas da CERTI, do LABMETRO e do G-SIGMA;
- A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Calibração de Máquinas de Medir por Coordenadas com Placas de Esferas - Uma Técnica Econômica, Rápida e Metrologicamente Eficiente

A universalidade e complexidade do princípio de medição de máquinas de medir por coordenadas (CMMs) fez surgir vários métodos para a sua avaliação metrológica. O método da CMM Virtual, que segue a Diretriz DKD ("Rastreabilidade de Medições por Coordenadas de acordo com o Método da CMM Virtual"), foi desenvolvido e é considerado como sendo atualmente uma alternativa adequada para expressar de forma coerente a incerteza de medição de uma CMM.

A CMM Virtual aplica uma estratégia especial de medição de placa padrão, de avaliação da incerteza de medição de comprimentos e de avaliação da incerteza de apalpação. O método considera cada parte construtiva da CMM como um corpo rígido, onde os erros da posição de um componente da CMM dependem apenas da sua própria posição e não da posição dos demais componentes

Este trabalho analisa a calibração de uma CMM realizada com o padrão placa de esferas tipo 5x5 e baseada no Método da CMM Virtual. Adicionalmente, uma nova técnica é sugerida a fim de tornar o processo de calibração analisado mais econômico e rápido. O método original - referido neste trabalho como "*Método Pleno*" - e o proposto neste estudo - chamado de "*Técnica Enxuta*" - são, então, comparados através de uma simulação e avaliados *in-loco* através da realização de uma nova calibração a fim de validar a pesquisa realizada.

Palavras-chave: CMM, avaliação metrológica, CMM Virtual, rastreabilidade, incerteza de medição de comprimentos, placa padrão, incerteza de apalpação, erros, calibração.

ABSTRACT

Calibration of Coordinate Measuring Machines with Ball Plates - A cost reduction, fast and metrologically efficient Technique

The universality and complexity of the measuring principle of coordinate measuring machines (CMMs) have drawn up several methods for its metrological evaluation. The method of the Virtual CMM, which follows the DKD Guideline ("Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine"), has been developed and is considered as being nowadays a suitable alternative for a coherent expression of the CMM uncertainty.

The Virtual CMM makes use of an special strategy for standard plate measurement, for length measurement uncertainty evaluation and for probing measurement uncertainty evaluation. The method considers each constructive part of the CMM as a rigid body, where the position errors of a CMM component are just dependent of its own position and not of the position of the others components.

This work analyses a CMM calibration carried out with a 5x5-ball plate based on the Virtual CMM Method. Furthermore, a new technique is suggested in order to speed up the analysed calibration process as well as to enable cost reduction. The original method - in this work referred as "*Complete Method*" - and the one which is subject of this study - called "*Lean Technique*" - are then compared by means of a simulation process and evaluated *in-loco* through the carry out of a new calibration in order to validate the research.

Palavras-chave: *CMM, metrological evaluation Virtual, CMM, Traceability, length measurement uncertainty, standard plate, probing measurement uncertainty, errors, calibration.*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	viii
1 PANORAMA DA MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	1
1.1 O FOCO E O MÉTODO DA PESQUISA.....	2
1.1.1 Objetivo.....	2
1.1.2 Metodologia Adotada no Desenvolvimento do Trabalho.....	3
2 TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	5
2.1 A MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	5
2.2 UTILIZAÇÃO DE CMMS EM PROCESSOS DE PRODUÇÃO: ASPECTOS TÉCNICOS, ORGANIZACIONAIS E HUMANOS.....	13
2.3 CALIBRAÇÃO DE CMMs.....	16
2.4 TIPOS DE ENSAIOS DE CMMs.....	17
2.4.1 Aceitação.....	17
2.4.2 Verificação.....	18
2.4.3 Calibração.....	18
2.5 MÉTODOS DE ENSAIOS DE CMMs.....	19
2.5.1 Ensaios geométricos convencionais.....	19
2.5.2 Ensaios com blocos padrão e padrões escalonados.....	19
2.5.3 Ensaios com placa de esferas.....	20
2.5.4 Ensaios da incerteza de apalpação.....	21
2.5.5 Ensaios com barra de esferas.....	21
2.5.6 Ensaios com objetos padrão de três dimensões.....	22
2.5.7 Recomendações e conclusões.....	22
3 PADRÃO DE CALIBRAÇÃO DE CMMS: PLACA DE ESFERAS.....	25
3.1 CARACTERÍSTICAS DA PLACA PADRÃO.....	25
3.2 CUIDADOS COM A PLACA PADRÃO.....	29
3.2.1 Armazenamento.....	29
3.2.2 Manuseio.....	29
3.2.3 Transporte.....	30
3.3 CALIBRAÇÃO DE UMA PLACA PADRÃO.....	32
3.4 APLICAÇÃO DE PLACA DE ESFERAS PARA AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE CMMs.....	36
3.5 SISTEMA DA QUALIDADE PARA CALIBRAÇÃO DE CMMs COM PLACAS PADRÃO.....	42
3.5.1 Considerações Iniciais e Aspectos Gerais.....	42
3.5.2 Estruturação Básica de um Sistema da Qualidade.....	44
3.5.3 Hierarquia do Sistema da Qualidade.....	46
3.5.4 Credenciamento de Laboratório para Execução de Serviços com Placa Padrão.....	48
3.5.5 Tempos e Custos envolvidos na Estruturação de um Sistema da Qualidade.....	49

4	MÉTODO DA CMM VIRTUAL.....	50
4.1	DESCRIÇÃO DETALHADA DO MÉTODO	50
4.2	COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS DE ENSAIO	54
4.3	PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO ORIENTATIVO PARA O USO DO MÉTODO.....	55
4.4	ERROS E INFLUÊNCIAS NA INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	57
4.5	AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO ESPECÍFICA PARA UMA DADA TAREFA .	59
4.5.1	Simulação de Comprimentos: disposições mais usuais.....	63
4.6	DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO TOTAL DA CMM	66
4.6.1	Procedimento de Calibração da CMM	69
4.6.2	Avaliação da Incerteza de Medição Total da CMM.....	73
5	UMA TÉCNICA ECONÔMICA, RÁPIDA E METROLOGICAMENTE EFICIENTE PARA CALIBRAÇÃO DE CMMs.....	77
5.1	DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA TÉCNICA ENXUTA.....	77
5.2	DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO TOTAL DA CMM ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO PELA TÉCNICA ENXUTA	78
5.2.1	Avaliação da Incerteza de Medição Total da CMM	81
5.3	DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO TOTAL DA CMM ATRAVÉS DE CALIBRAÇÃO PELA TÉCNICA ENXUTA.....	86
5.3.1	Avaliação da Incerteza de Medição Total da CMM	86
5.4	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO PLENO E A TÉCNICA ENXUTA.....	91
6	CONCLUSÃO.....	94
6.1	CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO.....	94
6.2	RECOMENDAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	95
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIGLAS

	DESCRIÇÃO	SIGNIFICADO
CAA	Computer Aided Accuracy	Matriz de correção de erros de uma Máquina de Medir por Coordenadas
CAD	Computer Aided Design	Projeto auxiliado por computador
CMM	Coordinate Measuring Machine	Máquina de Medir por Coordenadas
CMCQ	Centro de Metrologia e Controle da Qualidade da Fundação CERTI	
CNC	Computerized Numerical Control	Comando Numérico Computadorizado
DKD	Deutscher Kalibrierdienst	Rede Alemã de Calibração
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia	Laboratório Primário Brasileiro
ISO	International Organization for Standardization	Organização Internacional de Normalização
NIST	National Institute of Standards and Technology	Instituto Nacional de Padronização e Tecnologia (USA)
NPL	National Physical Laboratory	Laboratório Primário do Reino Unido
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt	Laboratório Primário Alemão
QS	Quality System	Sistema da Qualidade
RBC	Rede Brasileira de Calibração	
s	Desvio Padrão Experimental $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$	Para uma série de "n" medições de um mesmo mensurando, a grandeza "s" caracteriza a dispersão dos resultados, onde x_i representa o resultado da "iésima" medição e \bar{x} representa a média aritmética dos "n" resultados considerados.
U	Incerteza de medição $U = A + \frac{L}{K} \leq B$	Onde: A = Parcela independente do comprimento L/K = Parcela dependente do comprimento L = Comprimento medido B = Limite máximo da incerteza de medição
UKAS	United Kingdom Accreditation Service	Serviço de Credenciamento do Reino Unido
VDA	Verband der Automobilindustrie	Liga da Indústria Automobilística - Diretrizes da Indústria Automobilística -
VDI/VDE	Verein Deutscher Ingenieure / Verband Deutscher Elektrotechniker	Associação dos Engenheiros Alemães / Liga dos Eletrotécnicos Alemães - Diretrizes Técnicas -

CAPÍTULO 1

PANORAMA DA MEDIÇÃO POR COORDENADAS

A dinâmica da globalização, acelerada pelas recentes tecnologias da informação, fez com que o mercado mundial de bens de consumo e de produção ficasse mais exigente. Isso impôs um ritmo mais acelerado à produção industrial, exigindo uma reação rápida às novas necessidades mundiais. Novos produtos surgiram e, com eles, novos processos de produção precisaram ser desenvolvidos para que pudessem ser mais precisos, mais rápidos e com preços competitivos. Além disso, no intuito de atender ao mercado, as indústrias passaram a oferecer produtos "customizados", ou seja, desenvolvidos sob medida para o cliente. Com isso a produção de lotes pequenos, ou mesmo de produtos unitários ("*one-of-a-kind*"), cresceu, aliando a essa tendência um significativo aumento da complexidade dessas peças e fazendo com que os processos de medição passassem a ter ainda uma maior importância /1/.

Para a avaliação geométrica de peças mais complexas, as máquinas de medição desenvolvidas dentro da Técnica de Medição por Coordenadas, dada a sua universalidade e alto grau de automatização, firmaram-se, então, como facilitadores da garantia de qualidade na indústria.

No âmbito das normas para sistemas da qualidade, desenvolvidas, em especial, para a metrologia dimensional, a indústria se defronta com requisitos que visam assegurar a rastreabilidade dos sistemas de medição e ensaios. Adicionalmente, critérios de aceitação passam a considerar a incerteza dos meios de medição restringindo, respectivamente, as tolerâncias geométricas de um produto. Por estas razões, a correta avaliação da incerteza de medição passa a ter importância cada vez maior na especificação dos processos de fabricação e de controle da qualidade. Com isso, assiste-se no Brasil e no mundo a uma corrida pela certificação de sistemas da qualidade, com crescente investimentos na área, normalmente conseqüência de exigências de mercado e aspectos de marketing. Afinal, o contexto industrial atual tem exigido produtos de alta qualidade cada vez mais adequados às necessidades do cliente, com preços mais acessíveis e prazos de entrega menor.

Os sistemas da qualidade, tipo ISO9000, QS9000, VDA6.1, recomendam a adoção de procedimentos que visam assegurar uma adequada medição das características do produto. Surge, então, a necessidade de calibração de sistemas de medição como forma de garantir o resultado das medições realizadas.

Dentre os vários sistemas de medição existentes, as CMMs, que vêm se multiplicando notavelmente na indústria nacional, são o objeto principal deste estudo e serão o foco deste trabalho.

1.1 O FOCO E O MÉTODO DA PESQUISA

As máquinas de medir por coordenadas apresentam uma dificuldade maior do que os demais equipamentos de medição quando se trata de aplicar coerentemente o conceito de calibração. Isto decorre da universalidade de suas funções e da complexidade do seu comportamento geométrico.

A padronização já existente e mais difundida para a calibração de CMMs /2 a 7/ baseia-se na medição de padrões unidimensionais, como blocos padrão e padrões escalonados, dispostos em diversas orientações dentro do volume de medição da CMM. Esta sistemática permite apenas uma pequena amostragem dos erros que a CMM pode cometer. Uma amostragem mais abrangente pode e deve ser feita para uma avaliação metrológica mais eficiente da CMM, o que pode ser conseguido através da utilização de padrões bidimensionais, como a placa de esferas /8/. Isso servirá como motivação principal deste trabalho, que tem como propósito maior o estudo e a busca por técnicas de calibração eficientes de CMMs, os quais também possam ser mais rápidos e, conseqüentemente, mais econômicos do que os atualmente disponíveis.

1.1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é adequar um método conhecido, mas ainda não difundido na indústria, que proporciona uma amostragem mais abrangente dos erros da CMM tornando-o mais rápido e econômico na calibração de CMMs do tipo Portal utilizando um padrão bidimensional placa de esferas (Figura 1.1). Por ter sido um método originalmente desenvolvido pelo PTB, esta nova tecnologia é também, algumas vezes, chamada de "Método PTB" ou "Diretriz DKD", por ser um método reconhecido pela Rede Alemã de Calibração (DKD – Deutscher Kalibrierdienst); neste trabalho é denominado por *Método da CMM Virtual*. O método consiste de ensaios metrológicos abrangentes sobre o comportamento geométrico da CMM, assim como de posterior estimativa da sua incerteza, através de simulação computacional de uma tarefa específica de medição /8/. Nesta modalidade de ensaio de calibração, os centros das esferas da placa padrão constituem as posições nominais que são submetidas à medição com a CMM. Pela combinação dos diversos pares de esferas, um conjunto de várias distâncias em diferentes orientações no plano da placa é definido de modo análogo a um conjunto de padrões unidimensionais.

As diretrizes básicas necessárias para alcançar o objetivo pretendido incluem:

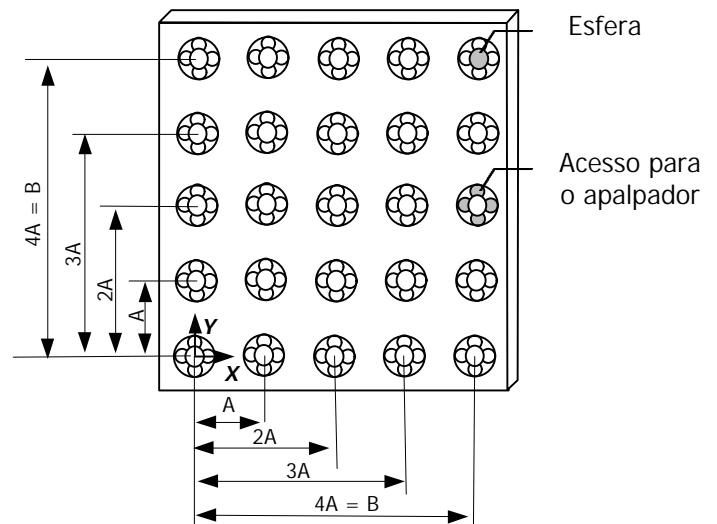
- Estudar detalhadamente o Método da CMM Virtual para a constatação do já reconhecido potencial do método, avaliando inclusive, os softwares que envolvem o processamento dos resultados de medição, tanto para a calibração de placas como, principalmente, para a calibração de CMMs;

- Aplicar o Método da CMM Virtual em máquinas de institutos e empresas que trabalham com a Tecnologia de Medição por Coordenadas, e colher experiência sobre a sua aplicabilidade;
- Estudar a possibilidade de calibrar CMMs de forma mais rápida e, conseqüentemente, mais econômica, mantendo a eficiência metrológica da nova técnica semelhante ao do Método da CMM Virtual.

a) Placa Padrão de Esferas (PPE)



b) PPE e seus comprimentos constituídos



A = distâncias entre esferas nos eixos coordenados da placa
- comprimentos constituídos -

B = maior distância entre esferas nos eixos coordenados da placa
- que caracteriza a placa -

Figura 1.1 – Padrão bidimensional Placa de Esferas tipo 5x5, (332 x 332) mm, e seus dispositivos de manuseio e fixação

1.1.2 Metodologia Adotada no Desenvolvimento do Trabalho

O trabalho apresenta a utilização de placas de esferas comerciais na mais recente e avançada tecnologia de calibração - "o Método da CMM Virtual".

A metodologia utilizada visa uma abordagem sistêmica, do geral para o particular no que se refere às CMMs e métodos de ensaios mais usuais. Para tanto, realizou-se:

- Análise do estado da arte, voltado para a avaliação de CMMs;
- Estudo do padrão bidimensional placa através de seu uso e calibrações;
- Estudo do Método da CMM Virtual através de calibrações realizadas no Brasil e Alemanha, das quais alguns casos são referenciados neste trabalho;
- Análise, proposição e validação de uma técnica, baseada na CMM Virtual, mais rápida, econômica e metrologicamente eficiente, de forma a facilitar a sua aplicabilidade.

Além do aspecto técnico que diz respeito à calibração de CMMs dentro da metodologia planejada, este trabalho também procura levar em conta os aspectos organizacional e humano, além das suas interações, de modo que a nova técnica sugerida possa ser vista e interpretada de maneira completa e integrada. Assim sendo, a infra-estrutura de apoio e as condições às quais está sujeita a CMM a ser calibrada, ou seja, os elementos *organizacionais* que englobam o ambiente de calibração; o executor da calibração, ou seja, a consideração do elemento *humano* envolvido; além dos elementos *técnicos* e as tecnologias envolvidas na calibração de uma CMM são foco das atenções e fazem parte do domínio deste estudo. Assim, pode-se subdividir como principais elementos de influência em uma calibração de CMM (Figura 1.2) como sendo:

- Elemento organizacional: o ambiente de trabalho da CMM;
- Elemento técnico: a CMM, propriamente dita, os padrões e o método de calibração escolhidos;
- Elemento humano: o executor da calibração.

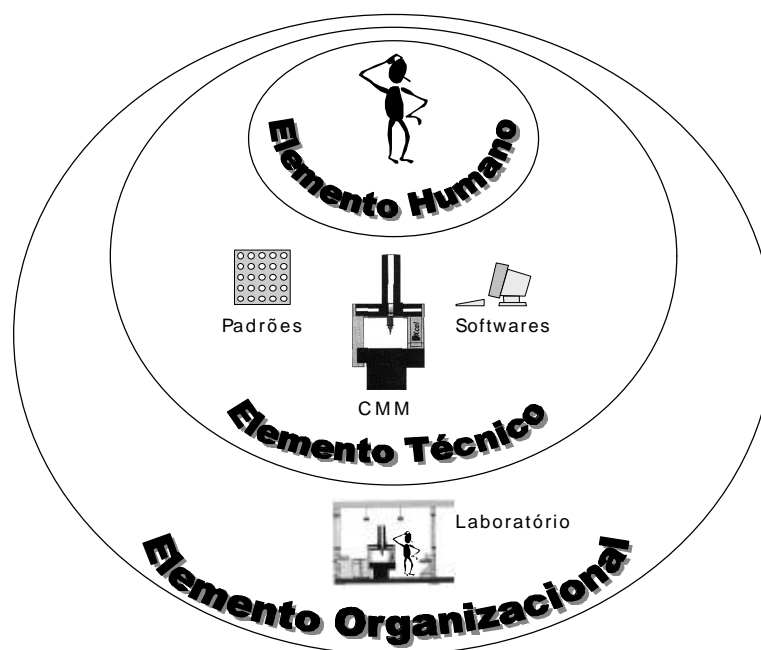


Figura 1.2 – Elementos que interagem e influenciam a realização de uma calibração

A apresentação do trabalho se dará em torno dos elementos técnicos predominantes: a CMM e a placa de esferas. As componentes organizacional e humana aparecerão como parte intrínseca da componente técnica, ou seja, não haverá uma apresentação dissociada dos elementos no intuito de propor abordagem holística, sintetizando unidades em totalidades organizadas. Aspectos sócio-culturais inerentes a um estudo desta natureza, como a filosofia de gestão laboratorial, por exemplo, serão tratados de maneira implícita no decorrer do texto, mas com a devida atenção para que princípios básicos e orientativos sejam transmitidos ao leitor.

CAPÍTULO 2

TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Embora não se saiba exatamente quando foi feita a primeira máquina de medir, sua origem remonta ao início do século (provavelmente entre os anos de 1920 e 1930) e deriva de uma máquina de medição universal e de microscópios para confecção de ferramentas modificados com um adição para medição no eixo Z. Posteriormente, algumas empresas começaram a fabricar CMMs usando micrômetros com parafusos de alimentação de precisão – “precision feed screws” - ou microscópios micrométricos – “micrometer microscope” - com escalas padrão.

Acredita-se que a fabricação da primeira CMM computadorizada foi executada pela Ferranti, uma empresa inglesa, entre os anos de 1950 e 1960. Na época isto foi considerado uma inovação, pois adotava um sistema de leitura digital desde o início do processo e, com isso, aliviava os operadores dos erros de leitura de dados e necessidade para treinamento especial.

No Japão, a Mitutoyo foi a primeira empresa a desenvolver uma CMM usando escalas com nônio, em 1968. A Tokyo Seimitsu e a Mitutoyo introduziram a CMM digital utilizando um sistema de escalas magnética em 1969 e 1970, respectivamente. Em seguida, em 1972, a Mitutoyo colocou um novo tipo de CMM no mercado, adotando o encoder linear. O rápido processo que se seguiu na evolução das CMMs colocou-as como líder no área de sistemas de medição avançados. Isto se deu através da incorporação de sistemas de processamento de dados usando avançadas tecnologias computacionais, o que possibilitou que hardwares mais poderoso, com maior capacidade de memória e com menores preços viessem acompanhados de softwares mais eficientes. O desenvolvimento de um apalpador do tipo “trigger” (gatilho) 3D capaz de medição multi-direcional (Figura 2.4) também contribuiu para o progresso das CMMs /9/.

2.1 A MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

As Máquinas de Medir por Coordenadas são equipamentos de medição com seu sistema baseado no princípio da metrologia por coordenadas que é a medição ponto-a-ponto de uma peça através de apalpação de superfícies relevantes e a avaliação numérica das coordenadas medidas pelo equipamento de processamento de dados para formar uma geometria espacial completa da peça /10/.

Os principais componentes de uma CMM são (Figura 2.1):

- A estrutura mecânica: guias, mancais, eixos coordenados (cada um com sistema de medição de deslocamentos - escalas), etc.;

- O Subsistema de apalpação: cabeçote apalpador, apalpadores (com o apalpador para medir nos eixos coordenados X, Y e Z - para apalpar as peças em todas direções espaciais), etc.;
- Painel de operação: teclado de funções, manches (*joy-stick*) - para atuação direta do operador da CMM;
- A unidade de controle: que comanda os movimentos da CMM em seus comandos de posicionamento dentro de seu volume de trabalho;
- Equipamentos periféricos: impressora, plotadora - para representar os resultados de medição;
- Computador e Software: para calcular as dimensões da peça pelas coordenadas dos pontos apalpados.

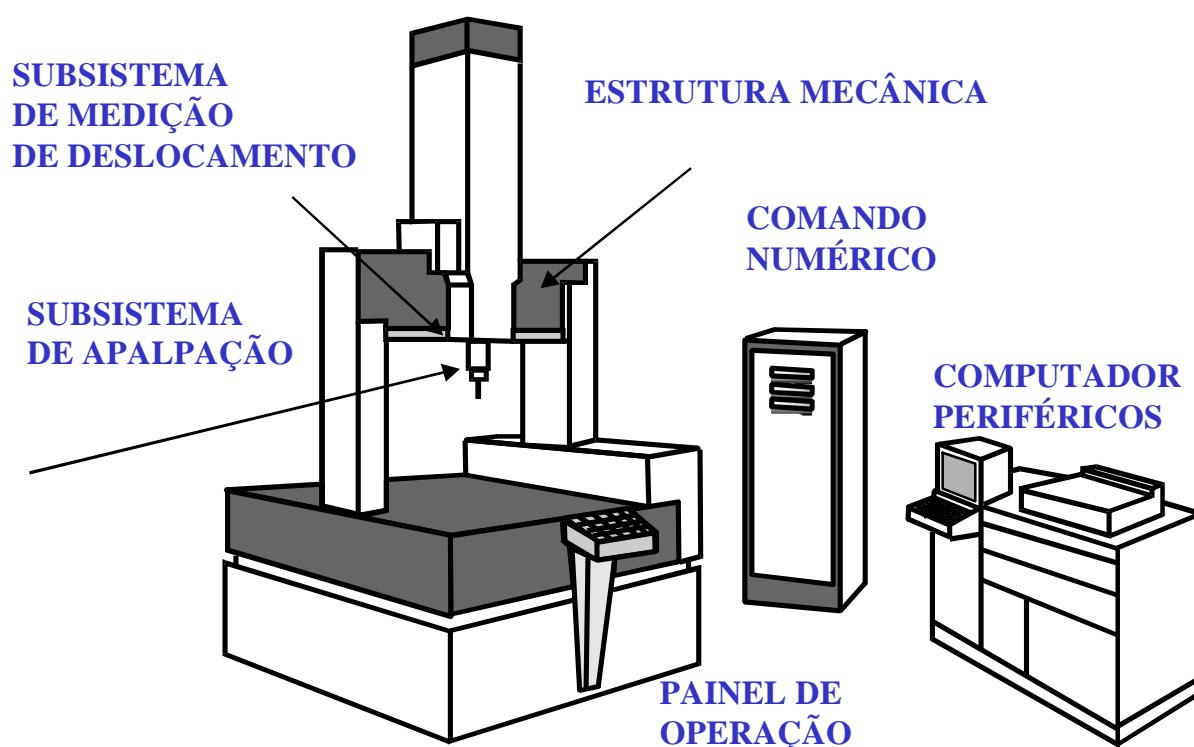
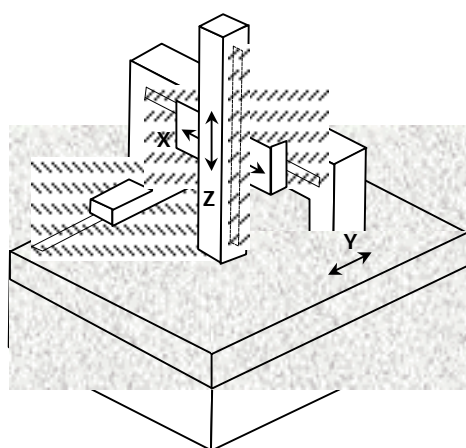
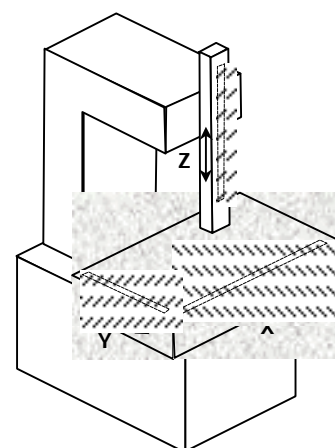


Figura 2.1 - Componentes principais de uma CMM /10/

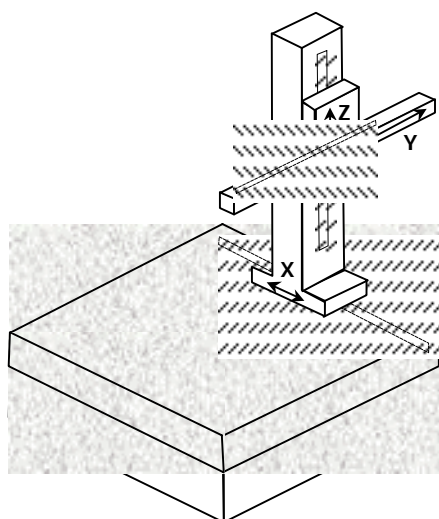
As formas construtivas de uma CMM (Figura 2.2) estão relacionadas com o volume de medição, com a área de acesso para a peça, com a incerteza de medição, com o princípio de Abbe em função da distância da escala até o ponto apalpado e, em algumas vezes, com a própria tecnologia utilizada por um certo fabricante. Alguns fatores construtivos (mancais pneumáticos em vez de guias de esferas recirculantes, escalas de material Zerodur no lugar de aço, etc.) permitem ao fabricante diminuir o nível de incerteza da CMM.



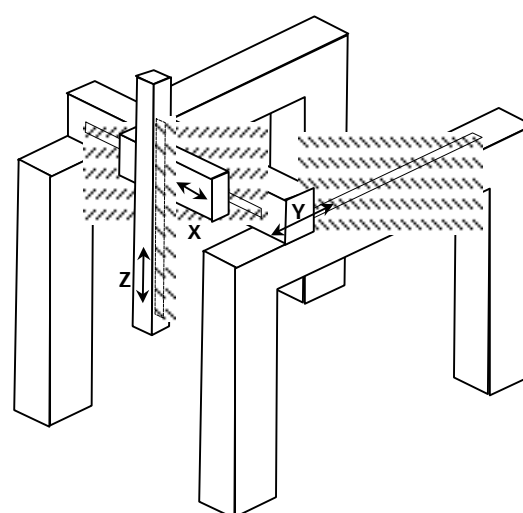
TIPO PORTAL



TIPO COLUNA



TIPO LANÇA



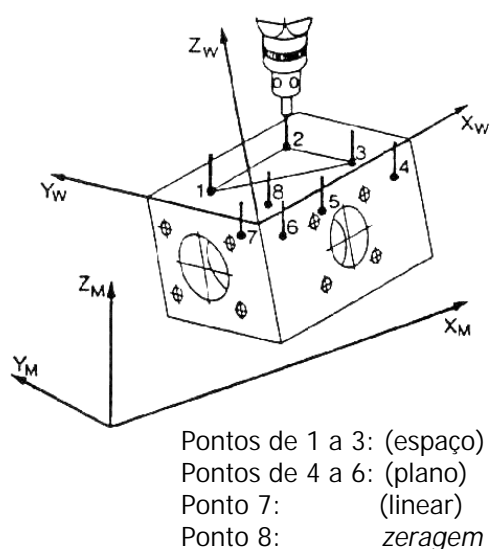
TIPO PONTE

Figura 2.2 - Formas construtivas de CMMs com as direções de seus movimentos e posições de suas escalas/11/

Ao contrário dos instrumentos de medição simples e individuais, as CMMs estão aptas a executar um ilimitado número de medições multidimensionais sob várias condições. Os objetos a serem medidos podem ser medidos em várias partes do volume de medição e segundo várias estratégias. Os resultados apresentados não são, geralmente, pontos de apalpação individuais sobre a superfície do objeto, mas o resultado final de uma medição como: diâmetro, circularidade, planeza, distâncias entre superfícies e furos, erros de perfil de dente de engrenagem, entre outros /12/.

Com base nos sistema de medição de deslocamento das CMMs, é possível conhecer a posição que uma peça ocupa dentro do volume de trabalho da máquina , conhecido como alinhamento (Figura 2.3a e b). Resumidamente, o apalpador (Figura 2.4) relaciona o ponto de contato de seu sensor (geralmente de seu centro) com a peça tendo um ponto de referência conhecido dentro do sistema coordenado /13/.

a) Sequência de alinhamento



b) Alinhamento

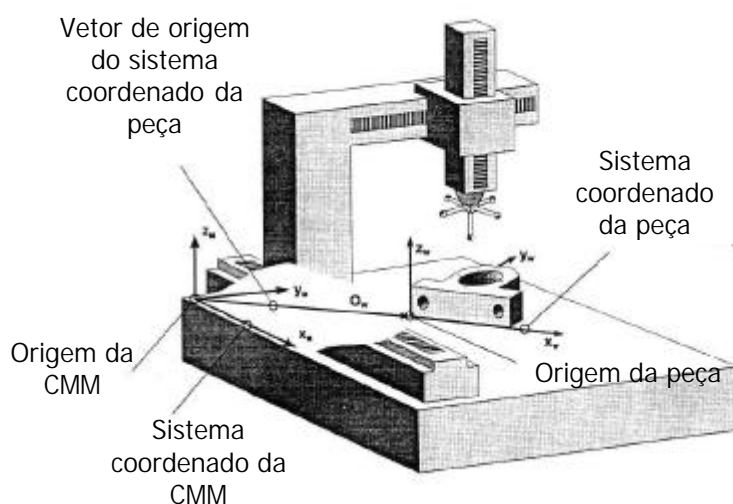
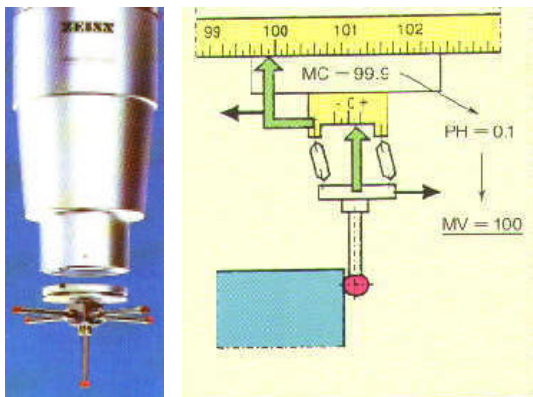
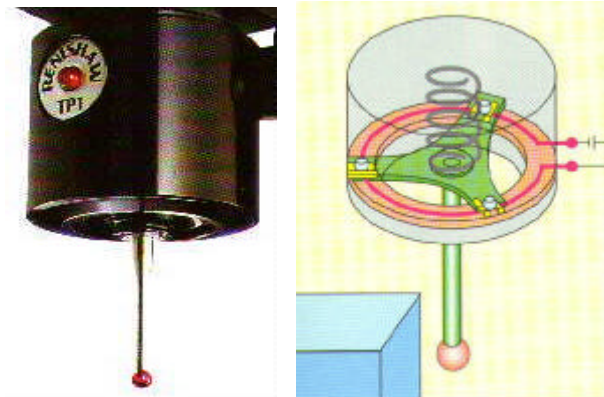


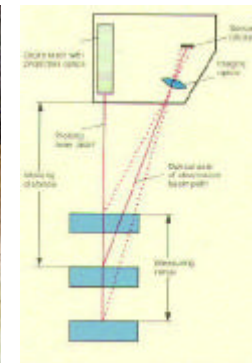
Figura 2.3 - Sistema de coordenadas da peça (X_w, Y_w, Z_w) e sistema de coordenadas da CMM (X_m, Y_m, Z_m) /1 , 12/



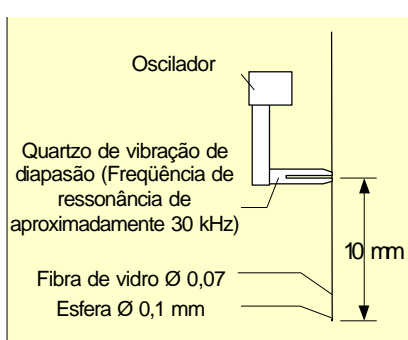
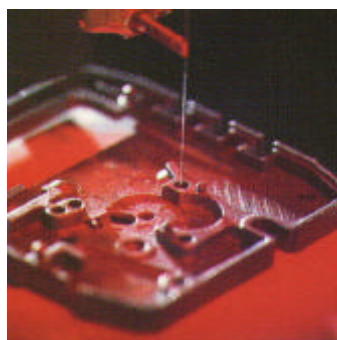
a) Analógicos (fornece sinal de tensão elétrica como proporcional ao deslocamento) /14/



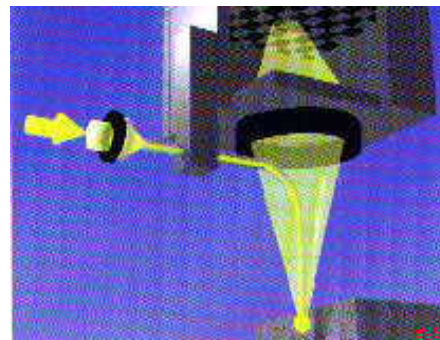
b) Comutador ("Touch-trigger": sinal binário resultado de deflexão da sua haste) /15/



d) Sem contato (que utilizam princípios ópticos – câmera ou laser) /14, 15/



e) Micro apalpador de Quartzo /16/.



f) Apalpadores para NanoCMM fibra Ø 30 µm e ponta Ø 50 µm /17/

Figura 2.4 - Alguns de tipos de Apalpadores Mecaoptoeletrônicos

Apesar das CMMs serem sistemas de medição precisos, elas são influenciadas por diversas fontes de erros responsáveis pela sua incerteza de medição. A interrelação entre estes erros pode ser observada sistematicamente através da construção de um diagrama de causa e efeito (gráfico espinha de peixe ou Ishikawa - Figura 2.5).

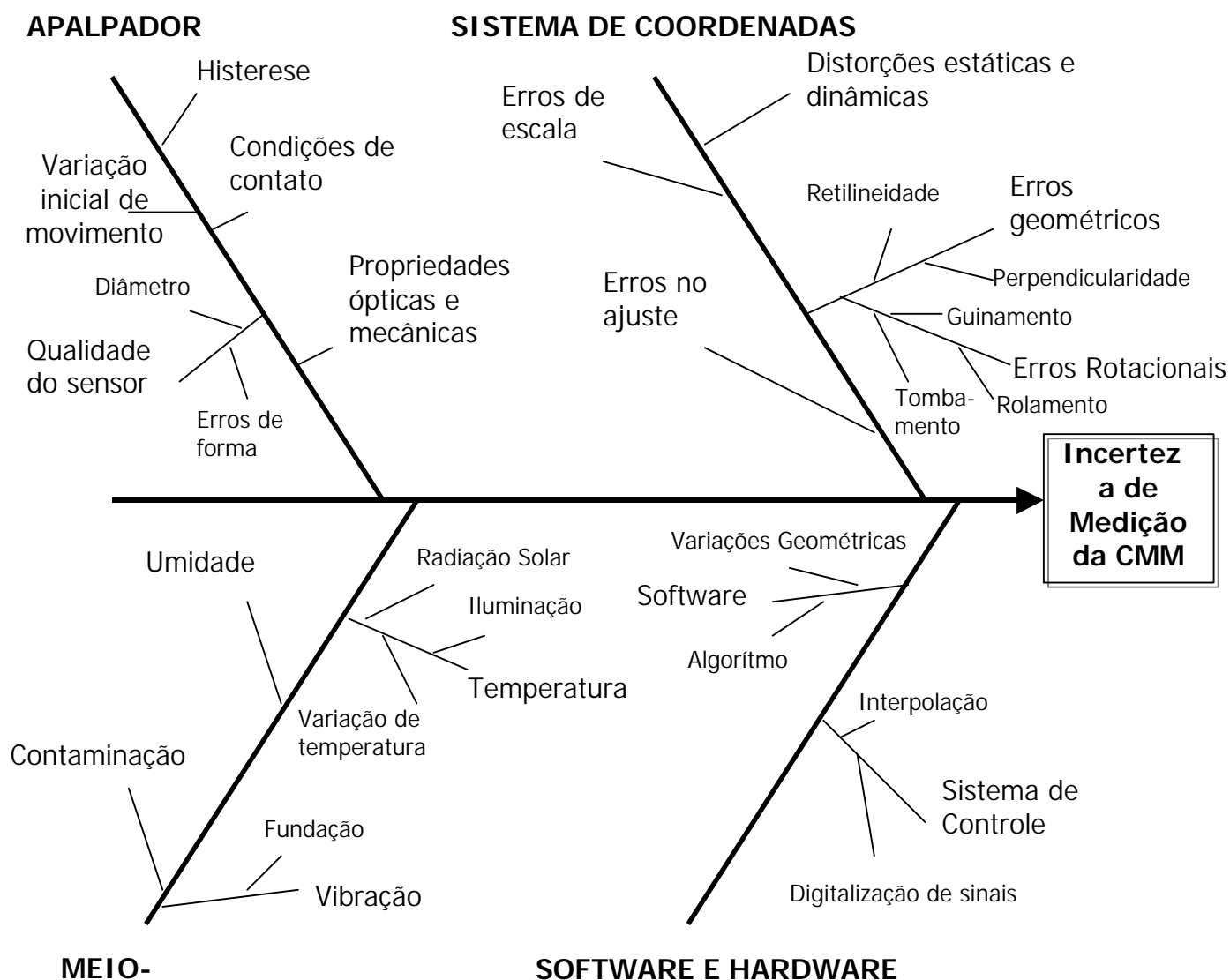


Figura 2.5 - Diagrama de causa e efeito de Ishikawa para analisar as diversas fontes de erros responsáveis pela determinação da incerteza de medição da CMM (adaptado de /18/)

Entre as diversas fontes de erros existentes em uma CMM (Figura 2.6) pode-se dizer que as principais, relacionadas diretamente às CMMs e não às condições externas, são associadas a componentes da máquina como o sistema de coordenadas, o sistemas de medição e também o software utilizado. Já os erros do apalpador de medição dependem do seu princípio de operação, da relação deste com o sistema de medição de deslocamentos e da estratégia de medição adotada /18/.

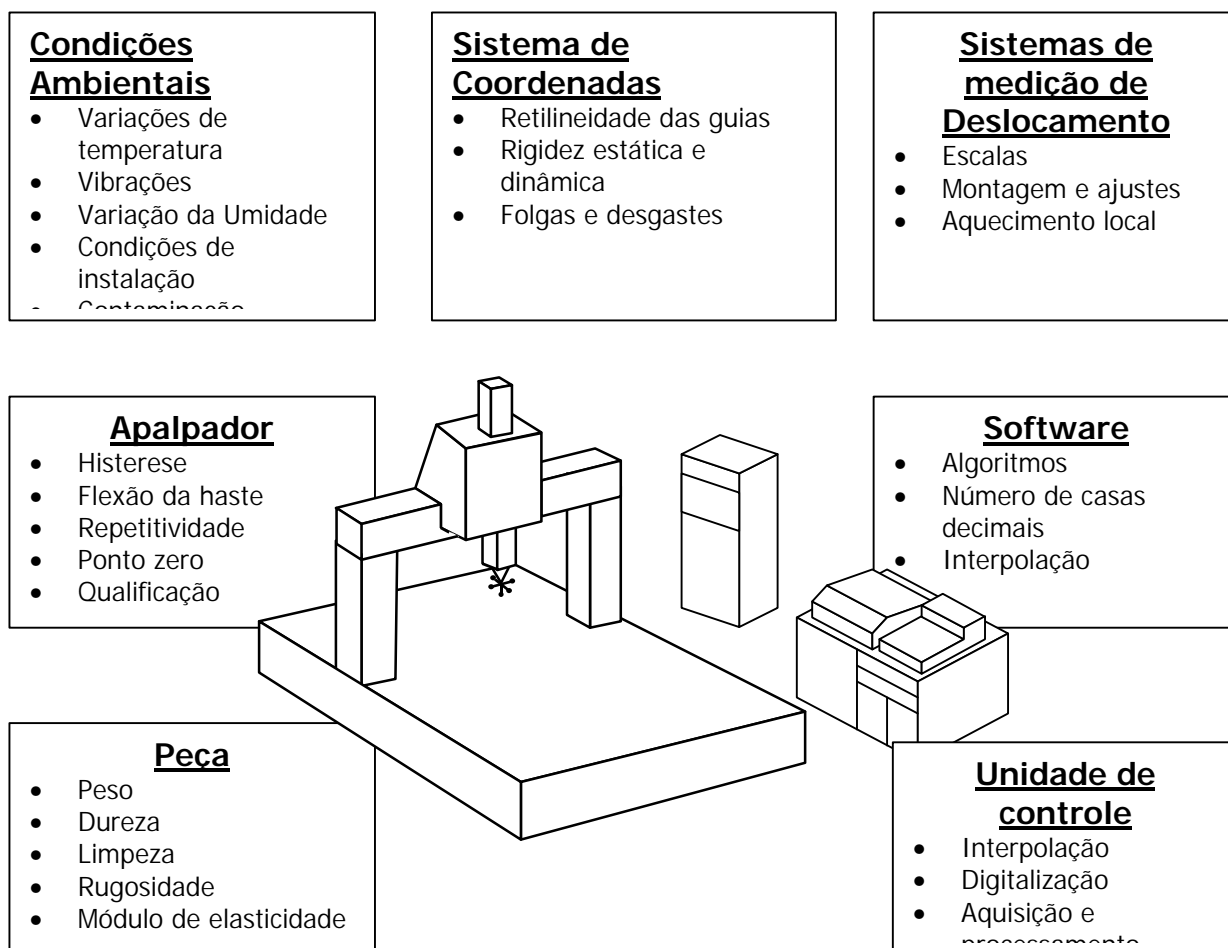


Figura 2.6 - Fontes de erros de uma CMM (adaptado de /12, 18/)

Quanto às maiores fontes de erros nas CMMs, estas são creditadas aos erros no sistemas de coordenadas, atribuídos a problemas na estrutura mecânica /12/. Essas causas conduzem aos chamados erros paramétricos. A Figura 2.7 mostra que cada eixo, no caso 3, de uma CMM está sujeito à 6 graus de liberdade, sendo 3 lineares (erros de posicionamento em X, Y e Z) e 3 rotacionais (rolamento, guinamento e tombamento), totalizando 18 fontes de erros (3 eixos * 6 graus de liberdade). Soma-se, ainda, ao sistema coordenado a perpendicularidade entre os eixos (mais 3) o que representa, no final, um total de 21 fontes de erros, como apresentado na Figura 2.8, a serem analisadas em uma CMM.

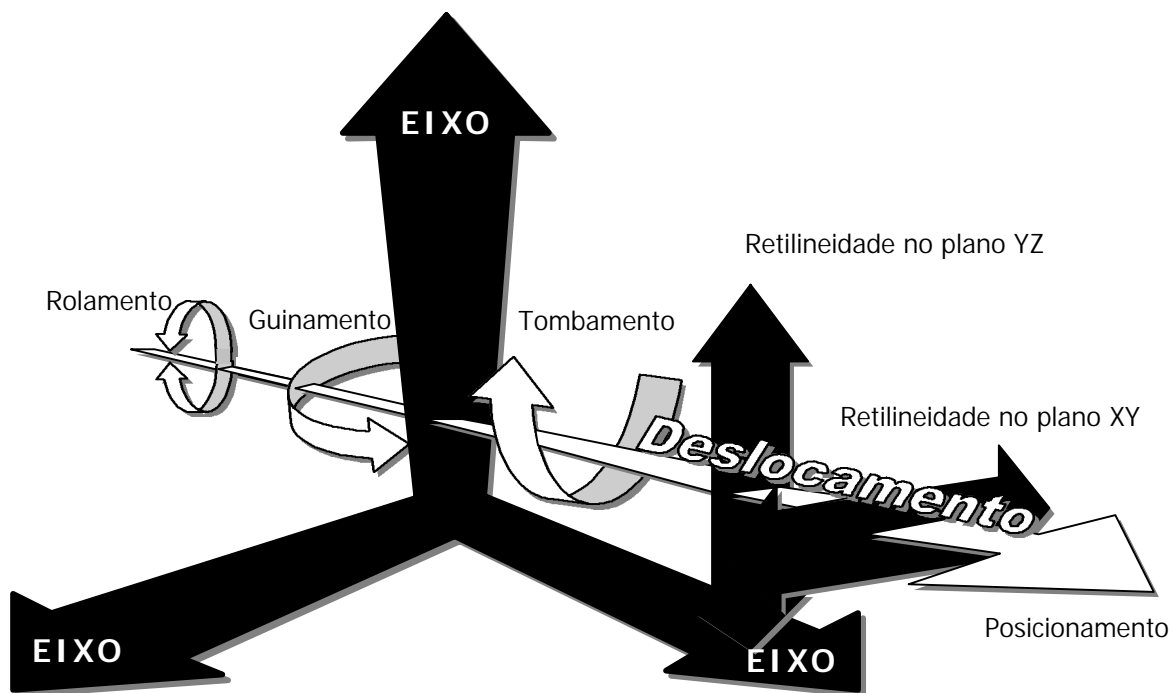


Figura 2.7 - Erros no deslocamento na direção Y de uma CMM (adaptado de /19/)

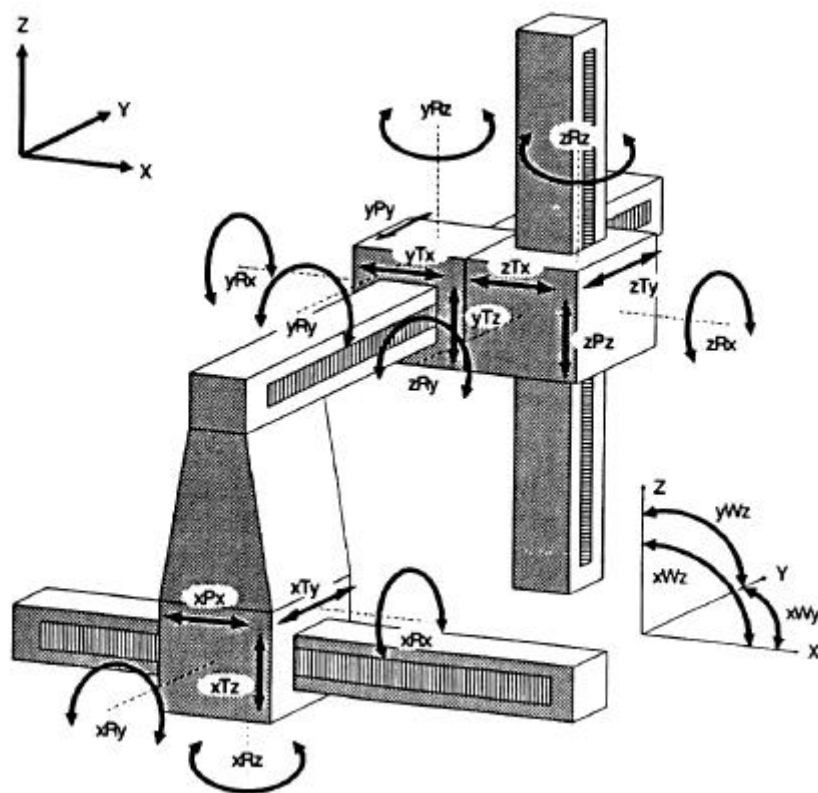


Figura 2.8 - As 21 componentes de erros de uma CMM, segundo modelo do corpo rígido /20/

Cientes das fontes de erros das CMMs e, conseqüentemente, da importância deles na qualidade da máquina, serão apresentadas a seguir algumas reflexões acerca da escolha de uma CMM.

2.2 UTILIZAÇÃO DE CMMS EM PROCESSOS DE PRODUÇÃO: ASPECTOS TÉCNICOS, ORGANIZACIONAIS E HUMANOS

Uma produção de alta qualidade não depende somente da qualidade das máquinas-ferramenta utilizadas na fabricação, depende também da precisão e da repetitividade dos instrumentos utilizados no controle da qualidade. Este, por sua vez, depende cada vez mais das CMMs já que, devido a sua flexibilidade, mede/inspeciona padrões e dispositivos que serão utilizados no controle da qualidade, reduzindo custos com padrões dedicados, além de tempo e de hora/homem requeridos no controle da qualidade tradicional. Como exemplo de trabalho realizado nesta área temos o de uma metodologia de especificação de uma estação de medição por coordenadas na produção de peças complexas /21/.

A escolha de uma CMM adequada é, então, uma decisão crítica para as firmas que valorizam o controle da qualidade. Esta escolha não se resume, entretanto, apenas à compra de uma máquina adequada. Adicionalmente, deve-se considerar todas as implicações organizacionais e humanas associadas à aplicação de uma CMM. O ambiente de trabalho e o operador da máquina são também peças-chave para o sucesso de um serviço de medição utilizando CMM /22/. A Figura 2.9 mostra uma representação qualitativa dos motivos de erros de medição com uma CMM.

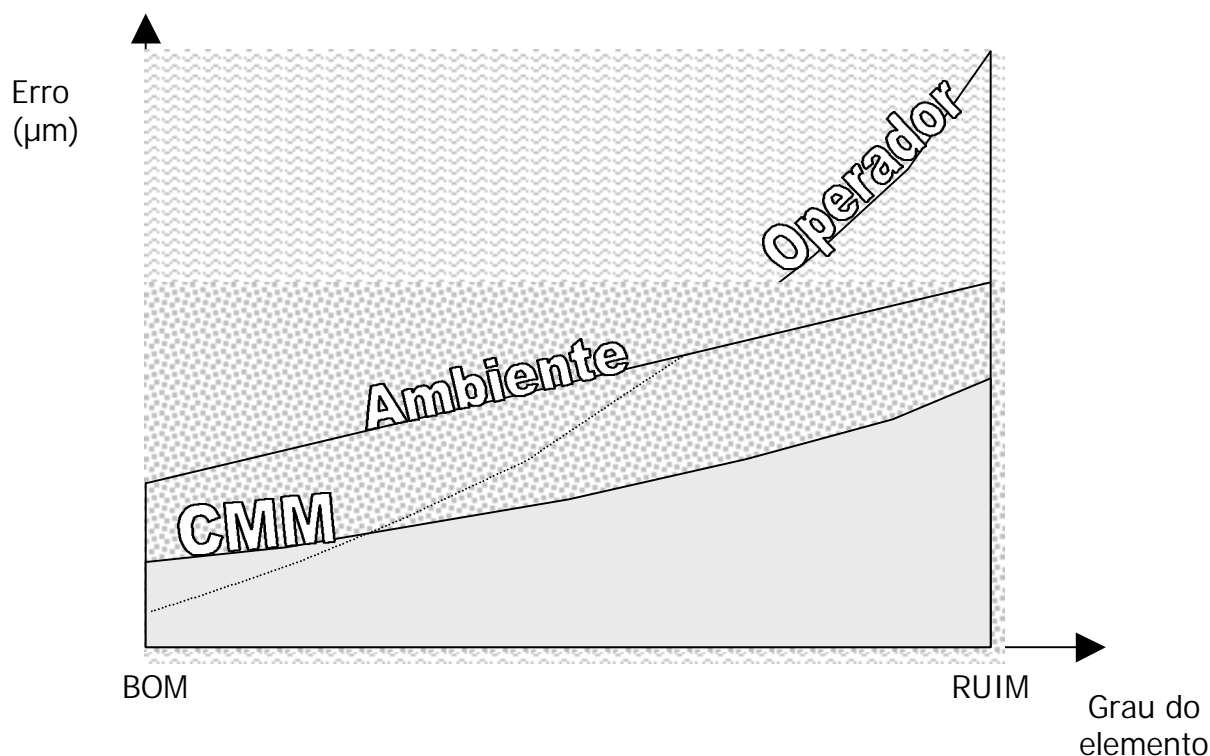


Figura 2.9 - Representação qualitativa dos motivos de erros de medição em relação à CMM, seu Ambiente de trabalho e seu Operador

Além de pessoal treinado e qualificado para o trabalho com a máquina, o estabelecimento de critérios de seleção de uma CMM e um adequado planejamento organizacional para a área que a receberá é, com certeza, de extrema valia para que sejam evitadas inadequações e gastos extras. Um primeiro exercício nesta direção é apresentado abaixo, baseado na experiência do autor acumulada nesta área nos últimos quatro anos:

Possíveis critérios de seleção de uma CMM:

- Tipo e tamanho das peças a serem medidas (volume de trabalho);
- Peças de pequena tolerância serão medidas na CMM?;
- Incerteza máxima admissível;
- Tipo de produção (seriada e grandes lotes, variável e pequenos lotes, etc.);
- Periféricos necessários (mesa rotativa, contra-pontas, etc.);
- Sistema de apalpação (prolongadores, diâmetros de esferas de medição, outros tipos de palpadores, etc.);
- Softwares adequados aos serviços (para tubos, para superfícies livres, para engrenagens, etc.);
- Condições especiais das peças a medir (peças pesadas, de material flexível, etc.);
- Possibilidade de atualização futura (software e hardware);
- Preço da CMM;
- Recomendação da qualidade do fabricante por outros usuários;
- Qual o tipo de CMM tem o meu cliente / fornecedor? (troca de programas CNC);
- Treinamento disponível e adequado;
- Tempo de treinamento necessário;
- Facilidade de trabalho (acesso, recursos de utilização, etc.);
- Adequação do sistema da qualidade para o trabalho com a CMM;
- Capacidade (*Capability*);
- Sistemas de fixação de peças;
- Condições ambientais especificadas pelo fabricante;
- Local de instalação adequado (evitando a radiação solar e vibração (base), acesso das peças a medir, estoque das peças, etc.);
- Nível necessário para a classificação do laboratório (baseado na VDI/VDE 2627, /23/);
- Custos adicionais de instalação;
- Custos fixos de manutenção laboratorial;
- Adequada Assistência Técnica;
- Possibilidade de correção - além do fabricante - (da escala, temperatura, componentes de erro);
- Possibilidade de integração com Sistemas CAx.

Com base nos critérios acima citados, foi possível elaborar uma figura com dados que visam auxiliar o futuro usuário de CMM quanto a sua aquisição (Figura 2.10). Esta figura tem o intuito de facilitar a interpretação dos critérios considerados mais críticos e deve ser vista como um guia básico de orientação ao usuário/comprador, devendo ser adequada a cada caso específico da indústria. Convém lembrar que a operação da máquina deve, sempre, ser feita por pessoas devidamente treinadas.

CARACTERÍSTICAS A SEREM CONSIDERADAS NA AQUISIÇÃO DE UMA CMM		
Necessidade do usuário	Características Técnicas da CMM a serem consideradas	Características Organizacionais & Humanos a serem consideradas
Medir todas as peças previstas no uso da CMM	<ul style="list-style-type: none"> • Volume de trabalho (porte variado) • Tipo de CMM (tipo lança para peças grandes) • Software disponível • Periféricos necessários 	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidade de acesso ao laboratório/CMM • Local de armazenamento dos itens a serem medidos • Sistema de transporte para peças (guindaste) • Sistema de fixação de peças • Procedimento de Medição
Atender às tolerâncias a serem medidas	<ul style="list-style-type: none"> • Incerteza de medição, avaliada segundo recomendação técnica • Resolução • Tipo de CMM 	<ul style="list-style-type: none"> • Aquisição e adoção de Normas Técnicas • Laboratório adequado quanto à climatização, vibração, umidade, nível de partículas no ar, radiação, etc. • Estabelecimento do nível do laboratório
Fácil utilização da CMM	<ul style="list-style-type: none"> • Software simples e auto-explicativo • Possibilidade de programação (CNC) • Disponibilidade de ações repetitivas como funções automáticas (troca e calibração de apalpadores, etc.) • Flexibilidade de comunicação 	<ul style="list-style-type: none"> • Dispositivos e equipamentos de segurança para o operador da CMM • Possibilidade de treinamento por outros que não o fabricante
Confiabilidade nos resultados da CMM	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidade no tempo • Rigidez • Resistência a ambientes industriais • Sistema de medição (por exemplo, apalpador) de boa qualidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantidade de recalibrações por determinado período de tempo • Utilização de métodos de ensaios adequados • Pessoal treinado adequadamente (no software da CMM, em procedimento de medição)
Durabilidade da CMM	<ul style="list-style-type: none"> • Garantia do fabricante 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantidade de manutenções por determinado período de tempo
Possibilidade de atualização tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de "retrofitting" (software, hardware) 	<ul style="list-style-type: none"> • Cursos de atualização oferecidos pelo fabricante
Capacidade	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade • Aceleração • Pontos apalpados/min 	<ul style="list-style-type: none"> • Planejamento das medições
Relação Qualidade e Custo	<ul style="list-style-type: none"> • Recomendação de outros usuários • Qualidade e tempo de manutenção 	<ul style="list-style-type: none"> • Custos de recalibrações, manutenções, atualizações (software e hardware) e cursos/treinamentos associados

Figura 2.10 – Características a serem consideradas na aquisição de uma CMM

Uma pesquisa realizada por “Máquinas e Metais” apurou 15 empresas que comercializam CMMs no Brasil, apresentando algumas das suas principais especificações técnicas /24/. Este é um dos poucos levantamentos atualizados que confrontam CMMs disponíveis no mercado nacional e que auxilia na análise de compra de uma CMM.

Como foi visto, existem vários pontos a serem considerados para se efetuar uma compra adequada de uma CMM de maneira a satisfazer às necessidades do seu usuário. Tão importante quanto a análise desses aspectos que precedem a introdução de uma CMM em um ambiente de trabalho, é o cuidado que se deve ter com a mesma durante a sua vida útil a fim de garantir a qualidade obtida com as medições realizadas. Para tanto, fazem-se necessárias avaliações permanentes das CMMs. A estas avaliações chamamos de *calibração* ou *verificação*. Essas avaliações serão detalhadas no item a seguir.

2.3 CALIBRAÇÃO DE CMMS

As CMMs apresentam dificuldades maiores de calibração do que instrumentos convencionais devido a sua universalidade de medição. As tolerâncias geométricas do mensurando (dimensão, forma e posição) definem a faixa de aprovação para as respectivas características, de tal modo que os requisitos funcionais e tecnológicos do produto sejam atendidos. A verificação do atendimento das tolerâncias é responsabilidade do Controle da Qualidade, e a etapa da medição é essencial nesta malha de controle /25/.

À toda operação de medição está associada uma incerteza que, por definição, caracteriza a faixa de valores dentro da qual o valor verdadeiro da grandeza medida (do mensurando) se situa. A prática tradicional /26/ dita que o sistema de medição deve ter uma incerteza de 1/10 do intervalo de tolerância da característica medida, de modo que esta possa ser considerada como insignificante quando se faz a avaliação da conformidade. Atualmente, devido à dificuldade de se dispor de sistemas de medição dentro da faixa citada, adota-se com frequência uma incerteza maior do que 1/10, que prescreve critérios de conformidade frente às especificações do mensurando /27/. A Figura 2.11 ilustra que uma característica é aprovada se o resultado da medição apresentar-se dentro do intervalo de tolerância, mas descontando-se a parcela da incerteza de medição. Isto significa que quanto maior a incerteza do sistema de medição tanto menor fica a faixa de aprovação. Resultados de medição encontrados na faixa de incerteza $\pm U$ são duvidosos: podem representar a aprovação de produto não-conforme e reprovação de produto conforme, prejudicando o comprador, o fornecedor ou a relação entre eles.

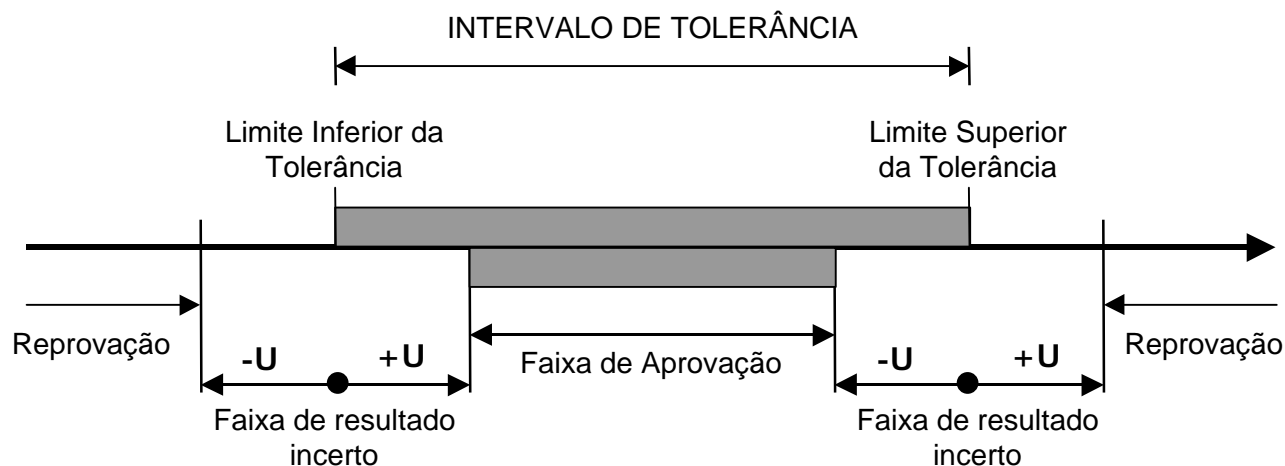


Figura 2.11 - Efeito da incerteza de medição no critério de aprovação /27/

Alheios à consideração desse critério, a maioria dos usuários assume, para as suas medições, a incerteza especificada pelo fabricante da CMM. Cabe lembrar que tais especificações, e os respectivos procedimentos de ensaio, foram desenvolvidas com o objetivo primeiro de comparar diferentes equipamentos e de estabelecer critérios para sua aceitação, no que se refere à precisão. Apesar de algumas desigualdades em normas e diretrizes, já houve um considerável progresso frente à situação caótica a que os compradores estavam sujeitos há alguns anos atrás /2, 3, 4, 5, 6, 7, 20/.

2.4 TIPOS DE ENSAIOS DE CMMS

Os tipos de ensaios de CMMs mais comumente utilizados são conhecidos por: *Aceitação*, *Verificação* e *Calibração*. A conceituação e os objetivos de cada um destes tipos de ensaios serão apresentados a seguir.

2.4.1 Aceitação

Esta é uma relação contratual entre fornecedor e comprador, que se dá na entrega da CMM ou após manutenção que requeira nova avaliação metrológica. As normas e diretrizes se concentram neste tipo de ensaio /2 a 7/, que deve abranger todas as componentes de erros da CMM. Algumas normas prevêem ensaios específicos (posicionamento, reticidade, perpendicularidade e inclinações), que normalmente requerem tempo, equipamentos e pessoal especializado. O ensaio de aceitação baseia-se, também, na medição de blocos padrão ou padrões escalonados e é entendido também como uma avaliação periódica para assegurar se a especificação do fabricante continua sendo atendida, mesmo após um período contratual /25/.

2.4.2 Verificação

Este é um tipo de ensaio simples e constitui-se de um teste rápido para se ter uma noção geral da situação metrológica da CMM a fim de demonstrar a capacidade de medição, tendo como resultado uma decisão de aprovação ou reprovação frente a limites de erro especificados. É o mínimo que se recomenda para avaliar a estabilidade da CMM durante o período entre ensaios mais detalhados (calibrações). A verificação pode basear-se em padrões formais como blocos padrão, ou informais, como peças de referência.

2.4.3 Calibração

Considera-se aqui o conceito no rigor metrológico, ou seja, a determinação da relação entre o valor indicado pelo sistema de medição e o valor verdadeiro convencional. A coerência a este conceito impõe requisitos mais rígidos ao método de ensaio, tendo em vista a característica de universalidade das CMMs: conhecer a incerteza para diversas grandezas do mensurando em todas as posições dentro da CMM e para as várias tarefas que ela desempenha. Isto representa expressar a incerteza específica para, por exemplo, um diâmetro, um ângulo, ou um erro de planeza, separadamente em função da grandeza do elemento medido e da sua posição na CMM. Uma analogia com a calibração de paquímetros pode ser feita: adota-se blocos padrão para avaliar o erro na medição externa e anéis padrão para interna.

A calibração é pouco praticada neste contexto e de modo ainda restrito na indústria, pois pressupõe que diferentes tipos de padrões e de diversos tamanhos sejam medidos em distintas posições da CMM, com vistas a avaliar seus erros para cada condição /25/.

A atenção deste trabalho estará mais voltada para este tipo de ensaio e um tipo adicional, posterior à calibração, a CMM Virtual (capítulo 4). O primeiro envolve os ensaios para levantamento dos erros da CMM (posicionamento, retilineidade, etc.), da incerteza de apalpação, e das condições ambientais que possam afetar a incerteza. O segundo (CMM Virtual), consiste de uma simulação computacional de todas estas condições na medição de tarefas específicas, associadas com a configuração de palpadores e a estratégia de medição, definidas em função da tarefa. A vantagem principal deste método reside na avaliação da incerteza para tarefas específicas sem a necessidade dos padrões correspondentes (medidas materializadas).

Antes, contudo, será apresentado de maneira mais aprofundada, no capítulo que segue, o padrão que será utilizado para a calibração da CMM: a placa de esferas.

2.5 MÉTODOS DE ENSAIOS DE CMMS

A avaliação dos sistemas de medição deve ser, preferencialmente, simples, rápida e de baixo custo. Entretanto, o princípio de medição complexo e o volume de medição relativamente grande das CMMs induziu ao desenvolvimento de diferentes "métodos de ensaio de avaliação" (que serão referenciados neste trabalho, a partir de agora, como "métodos de ensaio"), que podem expressar distintos resultados para a incerteza de medição.

O princípio do método de ensaio consiste em avaliar o erro que a CMM comete na medição de, por exemplo, blocos padrão (como na calibração de um paquímetro). Alguns métodos de ensaio utilizando diferentes padrões serão um pouco mais detalhados nas próximas sub-seções no intuito de mostrar resumidamente o que está hoje mais difundido sem, entretanto, apresentar uma comparação profunda entre estes métodos por não constituir o foco principal deste trabalho. Os métodos de ensaio mais usuais para CMMs serão apresentados a seguir.

2.5.1 Ensaios geométricos convencionais

São ensaios de interesse do fabricante / assistência técnica para o levantamento das componentes de erros da CMM, mas expressam apenas parte do erro que a CMM comete efetivamente na medição. Normalmente requerem equipamentos específicos e pessoal especializado para realização e interpretação dos ensaios. Padrões como Laser interferométrico, Esquadro, Padrão escalonado, Régua, Nível eletrônico, Auto colimador, etc. já são bem difundidos na indústria para a realização de ensaios em CMMs do tipo posicionamento, perpendicularidade, retilineidade e inclinação. Como exemplo de sistema de medição dedicado para retilineidade temos o "Laser Controlador da Retilineidade" /28/, que possui propriedades especiais para o seu uso e mais favorável para análise deste tipo de ensaio /25/.

2.5.2 Ensaios com blocos padrão e padrões escalonados

Blocos padrão de vários comprimentos ou insertos do padrão escalonado são medidos em diversas orientações dentro do volume da CMM. De certa forma pode-se dizer que a CMM está calibrada para a medição de distâncias entre dois pontos, nas disposições ensaiadas, para comprimentos limitados ao do padrão de ensaio. Uma avaliação pode, eventualmente, contar com medições apenas nas diagonais espaciais. A Figura 2.12 mostra um padrão escalonado sendo medido por uma CMM e as possibilidades de posicionamento do padrão escalonado ou dos blocos padrão dentro do volume de trabalho de uma CMM, nos eixos e nas suas diagonais planas, para a execução do ensaio.

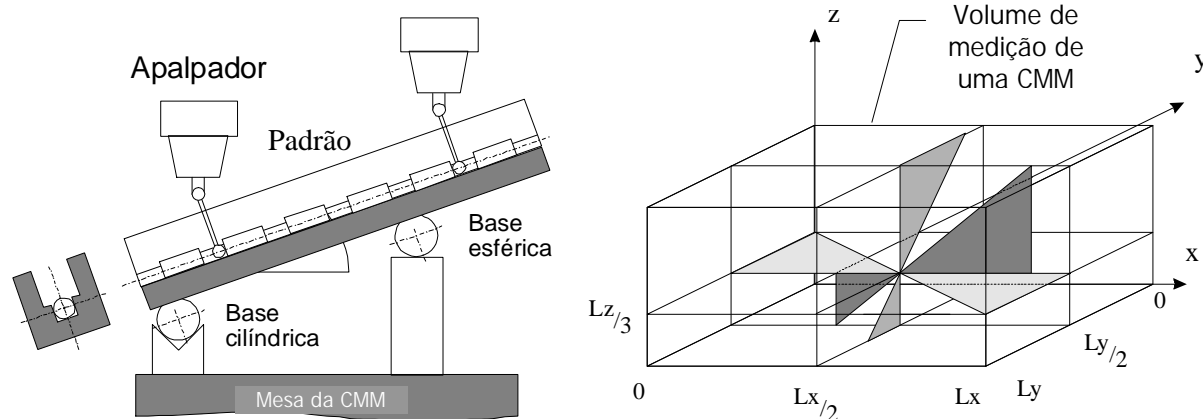


Figura 2.12 – Medição de um padrão escalonado e sua possibilidade de posicionamento nos eixos e diagonais planas de uma CMM dentro do volume de medição /2, 29/

2.5.3 Ensaios com placa de esferas

Placa de esferas são padrões bidimensionais constituídos, normalmente, por um conjunto de $5 \times 5 = 25$ esferas, cujas posições no sistema coordenado XY próprio são conhecidas com exatidão através de um processo de calibração (Figura 2.13). Além dos erros na determinação da posição das esferas, este ensaio permite calcular o erro na medição de distâncias entre os centros das esferas. Neste aspecto, a placa substitui, com vantagem, os blocos padrão e padrões escalonados por permitir uma avaliação bem mais abrangente do volume da CMM. A placa de esferas pode ser empregada em todos os tipos de ensaio (ver sub-seção 2.4) de CMMs. Para maiores detalhes sobre este método de ensaio ver também a sub-seção 3.4.

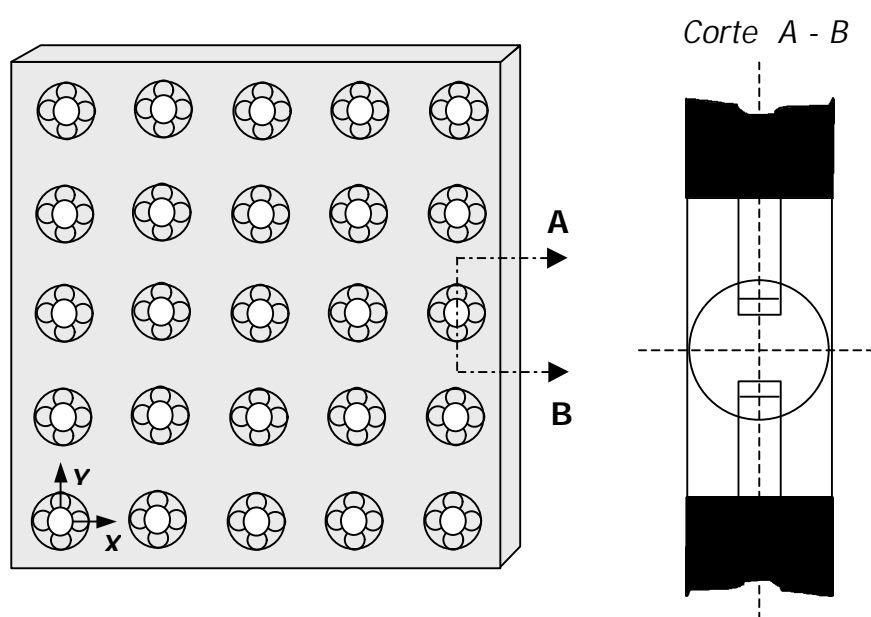


Figura 2.13 - Placa de esferas tipo 5x5 e o alojamento da esfera na placa /2/

2.5.4 Ensaios da incerteza de apalpação

Este ensaio é realizado com esfera e anel padrão, que visa avaliar principalmente os efeitos do apalpador eletromecânico e das condições dinâmicas da medição (Figura 2.14). Considerando que a esfera padrão tenha um erro desprezível, a incerteza é avaliada pelo erro de forma resultante na medição da esfera com um conjunto de pontos. O ensaio é previsto de modo diferenciado para todos os tipos de ensaios (sub-seção 2.4 de CMMs).

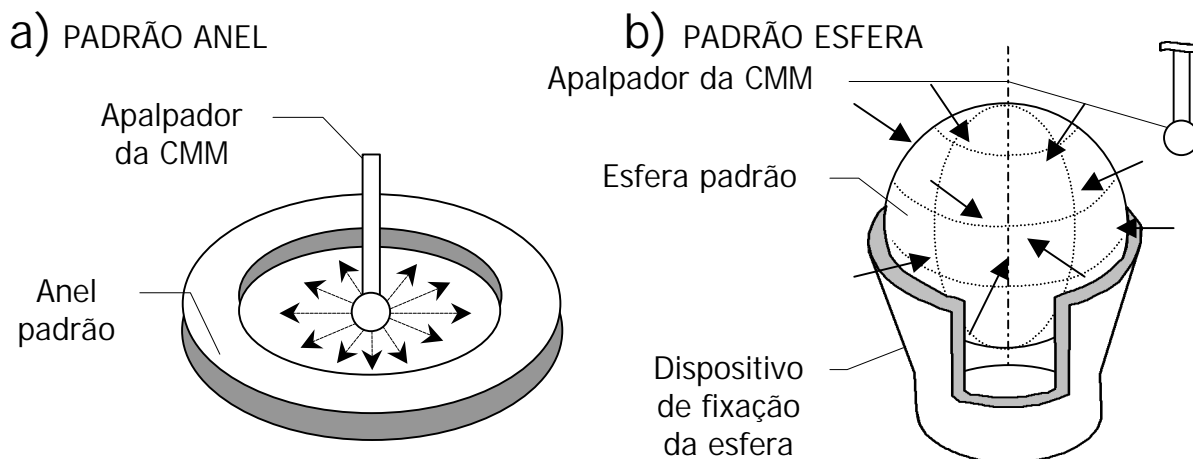


Figura 2.14 – Sentidos de apalpação em um anel e em uma esfera para ensaio da incerteza de apalpação /2/

2.5.5 Ensaios com barra de esferas

Uma configuração de barra rotulada permite medir pontos do espaço, distribuídos de forma esférica (Figura 2.15a). O erro de esfericidade encontrado no ensaio fornece um parâmetro para acompanhamento periódico da CMM (verificação). Em uma configuração alternativa (Figura 2.15b), uma barra com duas esferas é medida em diferentes disposições na CMM, determinando-se a distância entre os dois centros /25/.

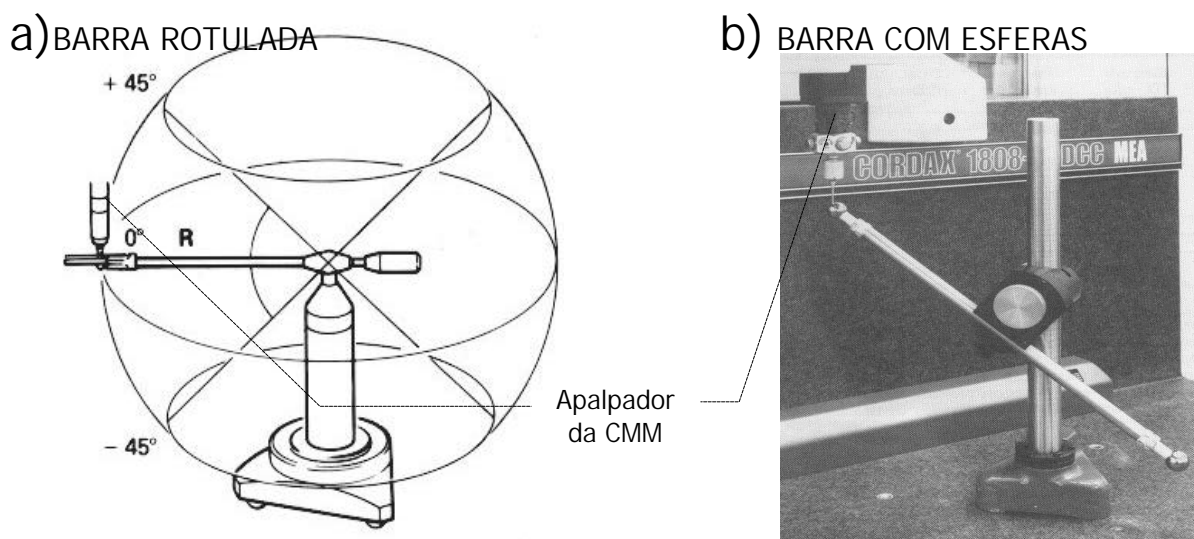


Figura 2.15 – Tipos de Barras utilizados para verificação de CMMs /15, 30/

2.5.6 Ensaios com objetos padrão de três dimensões

Um produto ou peça semelhante, com bom acabamento e características geométricas conhecidas com exatidão (ou seja, calibrada) podem ser utilizados como peça de referência. O ensaio é adotado na verificação e avaliação de capacidade do processo de medição.

Cubos com esferas (nas suas extremidades) (Figura 2.16) são de utilização mais favorável do que os objetos de uma ou duas dimensões devido, principalmente, ao fato de que em uma única posição do padrão é possível se fazer uma (rápida) análise em três dimensões no volume de trabalho da CMM. Entretanto, devido a problemas de transporte, calibração, estabilidade e outros ainda não inteiramente resolvidos nos dias de hoje, este tipo de objeto ainda não tem uma grande aceitação nos ensaio junto aos usuários de CMM.

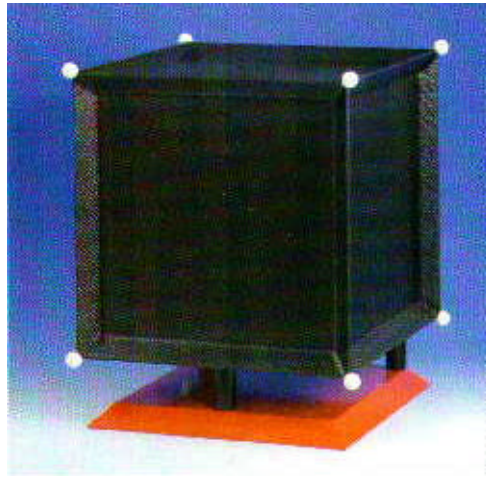


Figura 2.16 - Padrão Cubo com esferas de cerâmica, (400x400x400) mm, de 5 kg para verificação de CMMs /31/

2.5.7 Recomendações e conclusões

Os diferentes métodos de ensaio apresentados não deixam claro ao usuário de CMM qual é o melhor ensaio para cada situação, que combine rapidez, baixo custo, qualidade e coerência metrológica. Uma forma de se efetuar esta análise é avaliar se os resultados obtidos no ensaio executado apresenta as informações de uma forma clara e se justifica perante aos requisitos técnicos exigidos na utilização da CMM. Independente do método de ensaio escolhido pelo usuário, alguns pontos devem sempre ser levados em consideração:

- Não superestimar a precisão das CMMs pois, de modo geral, elas não são melhores do que os padrões geométricos convencionais. Apesar de algumas CMMs serem capazes de medir circularidade, por exemplo, não se pode esperar que ela substitua um circularímetro.

- Identificar os serviços que requerem mais baixa incerteza (peças de maior precisão, por exemplo), para julgar se a incerteza da CMM é adequada. A verificação do erro da CMM com um padrão correspondente é sempre recomendável. No caso em que dispositivos do controle de qualidade sejam medidos na CMM, deve-se avaliar a propagação da incerteza da CMM para o produto.
- Ponderar o compromisso que existe com a incerteza: responsabilidade pelo produto (como itens de segurança) e penalidades comerciais (no caso de rejeição de lotes).
- Analisar se o método de ensaio que se está utilizando está próximo da situação efetiva da utilização da CMM (volume avaliado, condição ambiental, tarefa que envolva de preferência uma medida materializada). Na execução de ensaios, lembrar que a incerteza especificada deve ser atendida em qualquer posição dentro do volume da CMM, e que posições adicionais de ensaio podem ser previstas, além daquelas sugeridas por normas ou procedimentos do executor.
- Implementar alguma metodologia de verificação periódica (semanal ou mensal, por exemplo) a fim de demonstrar que a capacidade de medição se mantém entre os intervalos de calibração.

Concluindo, pode-se afirmar que os ensaios normalizados avaliam a incerteza para a tarefa elementar da metrologia dimensional: a medição de comprimentos. Com isso, surgem as perguntas:

- Qual é a incerteza com que a CMM pode medir outros elementos geométricos (além da distância entre pontos), como ângulos, cilindros, erros de forma, elementos de interseção e simetria, entre outros ainda mais complexos?
- É satisfatória a rastreabilidade destes resultados aos padrões de comprimento considerados nas normas?
- A CMM mantém sua incerteza mesmo em outras posições diferentes daquelas ensaiadas?

São nesses pontos que residem a limitação da incerteza especificada. Apenas algumas estimativas de incerteza para outras tarefas podem ser feitas a partir dela, com base em critérios geométricos questionáveis ou fora do domínio dos usuários.

Na falta de informações mais completas, resta ao usuário assumir passivamente a especificação do fabricante ou redefinir, conscientemente, alguns novos limites para tarefas específicas. Pela medição de alguns anéis padrão confiáveis, por exemplo, o usuário pode ter uma idéia melhor da incerteza da sua CMM na medição de diâmetros internos e de circularidade. Conclui-se, então, que os métodos usuais utilizadas na avaliação de CMMs avaliam apenas parcialmente a incerteza das máquinas, o que pode provocar riscos à segurança do controle da qualidade das medições. Isso faz com que mais perguntas se juntem às anteriormente elaboradas: caso o processo, como um todo, esteja gerando excesso de produtos não-conformes,

- deve-se investir na melhoria da precisão dos processos de fabricação ou de medição ?
- o produto pode suportar um aumento da faixa de tolerância, caso o investimento na melhoria não ocorra ?
- quais os riscos de realimentar o processo de fabricação com informações inseguras que possam representar reprovações posteriores ?

Estes aspectos mostram a importância da determinação de uma incerteza de medição realista, nem para maior nem para menor, que inclua as diversas fontes de incerteza do processo.

CAPÍTULO 3

PADRÃO DE CALIBRAÇÃO DE CMMs: PLACA DE ESFERAS

A placa de esferas é um padrão bidimensional (2D), o que significa dizer que, durante uma avaliação metrológica de uma CMM, com um número menor de posicionamentos deste padrão (em relação ao padrão unidimensional) dentro do volume de medição da máquina consegue-se uma amostragem mais abrangente da CMM devido ao maior número de comprimentos medidos. Este padrão bidimensional pode ser empregado em todos os tipos de ensaios de CMMs: aceitação, verificação e calibração.

Este capítulo se dedicará a detalhar aspectos relativos ao padrão placas de esferas apresentando suas características; os cuidados que se deve ter com o armazenamento, o manuseio e o transporte da placa; como calibrá-la; como aplicá-la para avaliar geometricamente uma CMM; e, finalmente, como deve ser o sistema da qualidade para calibração de CMMs com placas.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA PLACA PADRÃO

As placas são padrões já difundidos e reconhecidos em algumas diretrizes e normas técnicas /2, 3, 8/, sendo empregadas especialmente para a verificação metrológica das CMMs (conduzidas periodicamente pelo usuário). Padrões na forma de placas de esferas são usados para inspeções periódicas ("interim checking"), testes de aceitação e calibração de CMMs e, em alguns casos, para ensaios de máquinas-ferramentas. As placas de esferas facilitam este tipo de trabalho e, na maioria dos casos, fornecem maior quantidade de informações quando comparada a outros tipos de padrão ou a outros métodos.

As placas de esferas devem ter os centros de seus elementos de forma colocados em um plano de simetria e de tal modo que todos os elementos possam ser medidos por cada lado da placa. O plano de simetria em questão é o plano de referência (plano XY, $Z=0$), cujos pontos nele contidos não sofrem uma significativa mudança de posição caso a placa deforme pelo seu peso próprio (plano neutro). Somente uma grande deformação da placa (mais do que 0,5 mm/m) provoca uma inaceitável condição de erros de coseno.

A distribuição dos elementos de forma deve ser baseada em células de um reticulado quadrado ("quadratic raster cells"). Entretanto, nem todas as posições do reticulado precisam conter elementos de forma. Por exemplo, placas que contêm somente os elementos de forma periféricos podem ser calibradas do mesmo modo. Já as placas para mais altos requisitos de precisão devem conter pelo menos uma coluna e uma linha completas de elementos de forma.

A identificação das placas deve ser feita por um número de série não permutável. Adicionalmente, deve-se marcar a origem e os eixos X e Y da placa e, preferencialmente,

deve-se numerar individualmente os elementos de forma. Para evitar confusão com os eixos X e Y da CMM usa-se, na determinação do sistema de coordenadas da placa - para uma placa de esferas, por exemplo - o centro da esfera número "1" como origem com o eixo X passando por uma esfera situada na base da placa e o eixo Y perpendicular ao eixo X.

Elementos de forma devem ser feitos de aço resistente à corrosão ou cerâmica e devem ter uma dureza mínima de 60 Rockwell HRC. Às placas se adequam, indistintamente, tanto os elementos de forma que são apalpados externamente, como os cilindros massivos, quanto os que são apalpados internamente, como os segmentos de esferas na forma de cavidades, furos cilíndricos, ou cilindros embutidos.

Os diâmetros destes elementos de forma não devem ser maiores do que 0,7 vezes a distância entre os centros de dois elementos adjacentes de forma a permitir uma aproximação segura do apalpador junto aos elementos de forma. Elementos de forma com diâmetros de 20 a 30 mm são os mais indicados atualmente, pois a prática mostra que elementos com diâmetros menores são mais difíceis de apalpar e os de diâmetros maiores, além de não serem encontrados facilmente para comercialização, não asseguram uma quantidade mínima desejada de elementos para placas com as dimensões mais utilizadas na indústria.

Os elementos devem ser inseridos na placa de modo que possam ser apalpados nas principais direções X e Y sobre os respectivos pontos mais altos (em cada eixo nas direções positiva e negativa). Isto deve ser possível, ainda, pelos dois lados da placa.

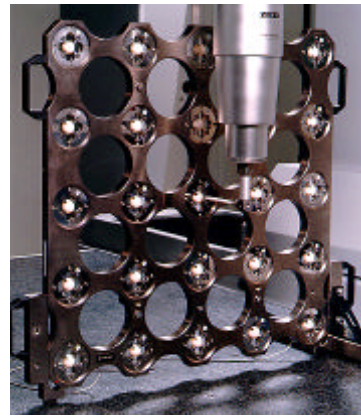
Se esferas são utilizadas, a distância de seus centros ao plano de simetria não deve ser maior do que 10% da espessura da placa. As posições dos centros, por sua vez, não devem desviar em mais do que 0,3 mm tanto do plano médio melhor ajustado através de todas as esferas, quanto das suas posições X e Y nominais. Desvios de forma dos elementos não devem ser maiores do que 0,5 μm . Os autores ainda fornecem alguns dados técnicos mais específicos:

- Os elementos devem ser adequados para apalpação em uma área mínima de 1 mm² ao redor dos pontos ideais, com um apalpador esférico;
- Os erros de forma das esferas ou cilindros não devem superar 5 μm em uma faixa de 1 mm em torno do Equador. Adicionalmente, o desvio dos pontos medidos em relação ao valor médio ponderado devem ser menores do que 0,3 μm , quando as esferas forem apalpadas com um apalpador de, por exemplo, 8 mm de diâmetro e for empregado um filtro passa-alta com comprimento de onda limite de 1 mm;
- Os pontos de apalpação ideais são aqueles pontos no plano de referência, onde a superfície dos elementos de forma está perpendicular para a direção X ou Y do sistema de coordenadas da placa /32/.

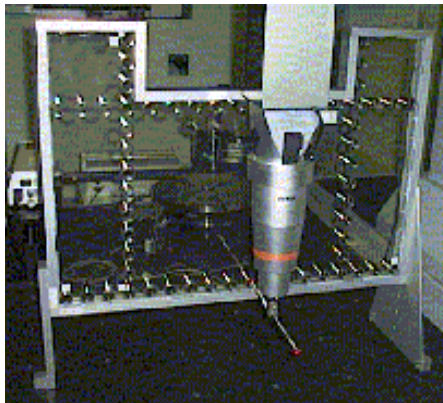
Alguns exemplos de placas padrão podem ser vistos na figura a seguir.



Placa de esferas 5x5 (tipo comercial),
Placa de aço, Esferas de cerâmica,
Distâncias entre centros de esferas
vizinhas nos eixos X e Y de 83 mm



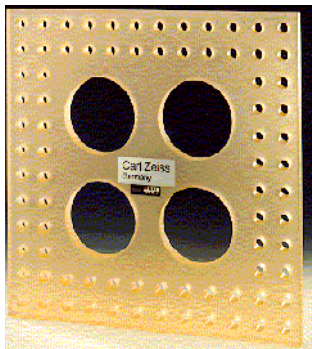
Placa de esferas 5x5 (tipo comercial),
Placa de aço, Esferas de cerâmica,
Distâncias entre centros de esferas
vizinhas nos eixos X e Y de 166 mm



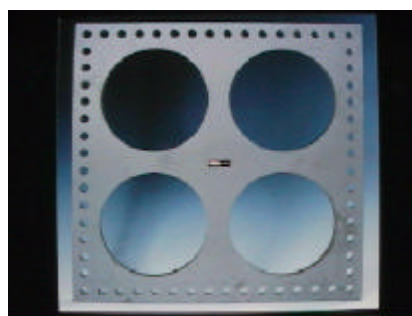
Placa de furos em formato "U",
Placa de Quartzo, Anéis de Ø 25mm,
Distância entre furos de 50 mm,
(850 x 600) mm



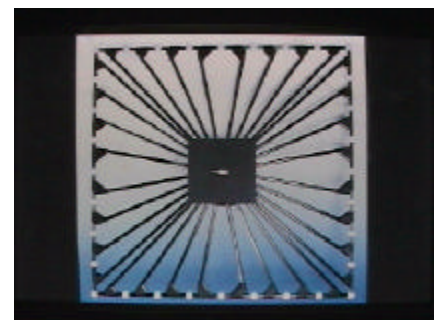
Placa óptica 5x5 para apalpadores ópticos,
Placa de aço, Superfície negra de Ø 20mm
Distâncias entre centros de círculos vizinhos
nos eixos X e Y de 166 mm



Placa de furos na periferia,
extrema
Placa de Zerodur,
Distância entre furos de 50 mm,
(550 x 550 ou 500 x 500) mm



Placa de furos na periferia,
Placa de aço,
Distância entre furos de 50 mm,
(750 x 750) mm



Placa de esferas na periferia
Placa de fibra de carbono
Distância entre centros de esferas
50 mm,

Figura 3.1 - Alguns tipos de placas padrão

Uma característica interessante das placas diz respeito à sua estabilidade. Esta variável diz respeito ao tempo que a placa necessita para estar adequada para sua utilização. Assim sendo, costuma-se classificar a estabilidade em curto e longo períodos.

Para a estabilidade de curto período, a forma de trabalho influencia diretamente. Assim, neste caso, deve-se observar:

- *A fixação da placa:* deve-se utilizar dispositivos de fixação estáveis que mantenham a placa livre de tensão (como por exemplo: prismas em "V", calotas, conjunto de esferas, plano-calota-prisma, e outros), mesmo considerando eventuais posicionamentos inclinados;
- *O isolamento da placa e o contato do operador com a mesma:* para minimizar a influência dos efeitos térmicos externos, cuidados adicionais (uso de luvas ou utilização dos acessórios – cabos – para manipulação da placa), devem ser tomados para evitar alteração de temperatura em regiões localizadas da placa;
- *Alterações de temperatura:* o ambiente onde a placa se encontra deve ter, preferencialmente, a sua temperatura controlada para que gradientes de temperatura sobre a placa sejam os menores possível.

Já a estabilidade de longo período está mais ligada à estrutura da placa. Conseqüentemente, atenção deve ser dada ao (s):

- *Material da placa:* que deve, preferencialmente, ter um baixo coeficiente de dilatação térmica;
- *Elementos de contato:* os quais devem ter alta resistência de uso;
- *Dispositivos de montagem, armazenagem e de transporte:* para que danos ou alterações na placa sejam evitados.

Uma placa atinge sua estabilidade de longo período - para um espaço de tempo de um ano - quando os valores coordenados (x,y) de seus elementos de forma (centro das esferas, por exemplo) não mudam mais do que a incerteza de calibração da placa.

Finalmente, recomenda-se que determinadas características das placas sejam levadas em consideração quando da sua aquisição. Atenção especial deve ser dada à sua estabilidade, ao seu peso (preferencialmente baixo), ao seu material e dos elementos a serem apalpados, às suas dimensões e forma construtiva (que devem ser adequadas às máquinas do mercado pretendido / serviço oferecido), aos seus tipos (de furos, de esferas ou óptica), à distância entre centros e à disposição dos elementos a serem apalpados / varridos opticamente, e aos acessórios da placa.

3.2 CUIDADOS COM A PLACA PADRÃO

As placas padrão (usualmente feitas de aço ou alumínio) servem como padrão para calibrar CMMs e, como todo padrão de referência em uma calibração, deve-se ter um certo cuidado com a sua utilização.

Para se garantir confiabilidade na utilização do padrão, é muito importante que se instrua a forma adequada para armazenar, manusear e transportar as placas. Dada a importância do tema, procedimentos específicos referentes à utilização da placa devem, idealmente, estar previstos pelos sistemas da qualidade dos usuários de placas, sejam eles empresas, fornecedores ou laboratórios (acadêmicos ou empresariais) (ver seção 3.5). Alguns cuidados básicos a serem observados quando do armazenamento, manuseio e transporte de placas serão apresentados nas sub-seções a seguir /33/, fruto de um levantamento conduzido visando estabelecer diretrizes para o Manual da Qualidade do Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI /34/.

3.2.1 Armazenamento

Os principais cuidados a serem tomados com a placa padrão quando esta não estiver sendo utilizada são:

- Guardá-la em uma caixa apropriada (que evite as agressividades do meio ambiente como o contato com poeira e eventuais choques ou tensões) e, preferencialmente, em uma sala com temperatura controlada, livre de poeira e radiação; ou
- Colocá-la em uma superfície plana (bancada) em sala apropriada sobre três apoios (podendo ser os próprios pés da placa) e de preferência protegida contra poeira. Caso a placa seja colocada na posição vertical (em pé), esta deverá estar apoiada com os seus devidos acessórios.

Deve-se proteger (com vaselina, por exemplo) os acessórios das placas sujeitos à corrosão e que, eventualmente, tenham que ficar expostos às condições ambientais – mesmo que sejam condições de laboratório.

3.2.2 Manuseio

As placas padrão devem, preferencialmente, ser manuseadas somente por pessoas treinadas e qualificadas, sob pena de se ter sua confiabilidade colocada em dúvida. Atenção especial deve ser dada aos seguintes pontos:

- Evitar o manuseio que não seja pelos cabos de transporte próprios da placa;
- O aperto de parafusos na placa deve ser sempre moderado;
- Evitar a presença de vaselina na placa e, especialmente, nas esferas a serem medidas;

- As placas maiores (acima de por exemplo 500 mm x 500 mm) devem ser manuseadas, preferencialmente, por duas pessoas;
- Evitar mudanças de temperaturas bruscas, especialmente ao desembalar a placa em ambiente não-climatizado (a condensação de umidade pode provocar a oxidação da placa);
- Evitar temperaturas elevadas (por exemplo, maiores do que 30°C), o que pode ocorrer quando serviços externos forem realizados;
- Manuseio da placa por terceiros (quando esta tiver que ser manipulada, por exemplo, por uma firma terceirizada de transporte. Neste caso, deve-se indicar claramente que o material sendo manipulado é sensível e teme umidade. Adicionalmente, deve-se indicar a posição ideal de transporte além de envolver a placa com filme plástico (plástico bolha); também é recomendável que serviços de transporte sensível / frágil sejam utilizados).

3.2.3 Transporte

Os cuidados quanto ao transporte podem ser entendidos como um “check-list” a ser observado sempre que a placa precisar ser movimentada (fatores como distância e tempo de movimentação ajudam a compor este “check-list”) . Esta verificação deve incluir:

- A relação de acessórios que acompanham a placa;
- A inspeção visual da placa antes da embalagem;
- O cuidado com a embalagem;
- A preocupação com a seleção de uma transportadora (terceirizada);
- A preparação da documentação necessária para o transporte da placa (nota fiscal, seguro, etc.), seja ele um transporte terceirizado ou próprio.

Ainda, placas com massa acima de 50 kg devem ser transportadas preferencialmente na vertical e devidamente embaladas, para evitar o risco de empenamento. Já, no caso de placas que devem ser transportadas na horizontal, proteções como folhas de isopor nas laterais da placa devem ser utilizadas.

Caso haja suspeita de choque ou anormalidade com a placa após o seu transporte, recomenda-se que as seguintes medidas sejam tomadas:

- a) Fora do ambiente laboratorial da Instituição proprietária da placa padrão (em clientes)
- Medir a placa em uma CMM em duas disposições distintas (0° e rotacionada 90°, por exemplo);
 - Em cada uma destas disposições, proceder a correção do erro linear pelas esferas de referência (utilizadas na comparação de comprimentos na calibração de placas, como das esferas número 11 e 15 de uma placa 5x5) e o cálculo do desvio segundo o eixo X da CMM, para cada esfera;
 - Fazer uma avaliação qualitativa dos resultados:

- Se os erros de medição das posições das esferas ocorrerem de modo semelhante (para posições correspondentes de esferas nas duas disposições medidas), então entende-se que os erros encontrados sejam devidos somente à CMM e conclui-se, portanto, que a placa está em ordem (os desvios apresentados no eixo X da CMM devem ser menores que a incerteza de medição especificada da CMM). Caso, entretanto, se constate que houve alteração na placa, deve-se:
 - Executar 4 medições por rebatimento, como especificado para sua calibração (na prática, duas destas medições já foram realizadas na passo 1).
 - Avaliar as 4 medições, preferencialmente, via software /35/ e utilizar como dados do padrão a distância calibrada da própria placa entre as esferas de números 11 e 15, por exemplo, a 20°C. A utilização desses dados do padrão em substituição aos padrões geralmente utilizados na calibração de placas de esferas - barra de esferas ou de furos – só é considerada devido à possível indisponibilidade momentânea dos padrões ideais.
 - Guardar os resultados obtidos e depois conferi-los e compará-los através de uma nova calibração da placa.
- Calibrar a CMM normalmente, utilizando como dados nominais aqueles julgados como verdadeiros no passo anterior.

b) No retorno à Instituição proprietária da placa padrão (ambiente laboratorial)

Se a verificação no cliente não indicou alteração na placa, o processamento dos dados e a documentação deve seguir como previsto no respectivo procedimento de calibração. Entretanto, caso a verificação no cliente tenha indicado alguma alteração, deve-se, recalibrar a placa, conforme o procedimento adotado pela executora da calibração.

- Se os dados da nova calibração da placa forem diferentes dos obtidos na calibração no cliente em mais do que a soma das incertezas de medição especificada da CMM e de calibração da placa, significa que a referência do padrão foi perdida (convém chamar atenção para o fato de que essa perda de referência pode também ocorrer quando do transporte de retorno da placa do cliente para a sua instituição proprietária. Neste caso, o ideal seria sempre proceder os passos descritos neste item b. Entretanto, isto implicaria em investimentos adicionais de tempo e financeiros o que, por simplificação, geralmente é descartado). Essa constatação invalida a calibração da CMM no cliente, a qual deverá ser repetida após efetuada a recalibração da placa. Esta circunstância deve ser tratada como uma não-conformidade /34/.
- Se os dados da nova calibração da placa forem semelhantes ao da calibração no cliente, a calibração da CMM no cliente é considerada válida e os dados da calibração obtidos no cliente devem ser os considerados.

3.3 CALIBRAÇÃO DE UMA PLACA PADRÃO

O Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia /36, 37/ define calibração como sendo o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões. Adicionalmente, são feitas algumas observações que afirmam que:

- O resultado de uma calibração permite tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações, como a determinação das correções a serem aplicadas.
- Um calibração pode, também, determinar outras propriedades metrológicas como o efeito das grandezas de influência.
- O resultado de uma calibração pode ser registrado em um documento, algumas vezes denominado certificado de calibração ou relatório de calibração.

Vale a pena registrar que esta definição, internacionalmente adotada, serve tanto para calibração de placas quanto para calibração de máquinas – que será abordada na seção 4.3.

A calibração de placas é realizada através da determinação das coordenadas dos centros das esferas ou cilindros no plano médio da placa (plano neutro), ou seja, o valor nominal corresponde aos centros das coordenadas dos furos ou das esferas. O detalhamento de todo o processo de calibração de placas juntamente com as suas especificações, os princípios de medição adotados e a avaliação de incerteza são descritos detalhadamente em /32, 38/.

A estrutura do procedimento de calibração deve ser composta de dois passos principais. Primeiramente, a seqüência de medição por rebatimento da placa na CMM deve ser executada. Por este caminho, todos os erros sistemáticos de medição da máquina na medição plana são eliminados, com exceção dos erros de posicionamento nos eixos da CMM. Os efeitos de *drift* e histerese são compensados através da repetição da medição em cada eixo da placa, com a inversão da seqüência de apalpação. Em um segundo momento, os erros de posicionamento remanescentes após a medição por rebatimento devem ser determinados. O levantamento desses erros é através da medição de uma barra de furos ou de esferas com a CMM. As posições determinadas no primeiro passo são corrigidas pelos erros correspondentes da CMM (princípio da comparação).

A incerteza total de calibração depende de várias causas de erros associadas às suas magnitudes as quais produzirão, para cada causa de erro, um determinado efeito. Todos esses efeitos serão considerados para, ao final, determinarem uma equação de incerteza que deverá ser utilizada. Esta equação terá como única variável as distâncias entre os

centros de duas esferas /32, 34/. Um exemplo de balanço de incertezas pode ser encontrado na Figura 3.2.

Baseando-se na macro-estrutura descrita até agora, uma estrutura contendo passos mais detalhados para o procedimento de calibração foi elaborada para ser utilizada no laboratório DKD da Fundação CERTI /34/. A Figura 3.3 sintetiza alguns desses passos juntamente com os processos a eles associados.

Como forma de garantia da rastreabilidade da calibração da placa, são aplicados padrões de incerteza menores dos que os das placas. Segundo o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia /36, 37/, rastreabilidade é a propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas. Os padrões servem para transferência de comprimentos e podem ser do tipo barras de furos ou de esferas, blocos padrão, padrões escalonados ou outros. Em função do método de calibração da placa, a CMM utilizada na calibração servirá apenas como um comparador. O comprimento do padrão utilizado não deve desviar mais do que 50 mm das distâncias correspondentes entre os elementos de forma da placa /32, 38/.

Analogamente, também é importante estabelecer e determinar como conseguir a rastreabilidade (do serviço) de calibração de CMMs. A Figura 3.4 apresenta um diagrama de como poderia ser estabelecida esta rastreabilidade com a indicação de algumas incertezas oferecidas pelos laboratórios PTB - Alemanha e Fundação CERTI - Florianópolis - SC. Deste diagrama também pode-se inferir como deveria ser determinada a rastreabilidade da placa.

A calibração de placas de furos e de esferas pode ser realizada no Brasil desde 1995 pela Fundação CERTI – Florianópolis, SC - sendo este o único laboratório DKD para calibração de placas e de CMMs na América Latina. Outra possibilidade para determinar a rastreabilidade dos padrões de trabalho e de referência é oferecida pelo PTB-Alemanha. Neste caso, deve-se levar em conta o tempo e custos associados. O INMETRO está se capacitando para também poder oferecer este tipo de serviço de calibração (inclusive a calibração do padrão de referência “barra de esferas ou de furos”).

BALANÇO DE INCERTEZA PARA CALIBRAÇÃO DE PLACAS PADRÃO		
Incerteza de calibrações empregando barras de furo ou de esferas para a comparação de comprimentos em placas de aço e alumínio		
Razão para o desvio	Origem do desvio (2s)	Desvio resultante (2s)
Reprodutibilidade de curto prazo.	0,5 µm	0,2 µm
Deformação de placa durante a medição por rebatimento; assume-se uma estabilidade de temperatura de 0,07 K para placas de aço e de 0,04K para placas de alumínio.	$10^{-6} \cdot L$	$0.5 \cdot 10^{-6} \cdot L$
“Drift” devido a histerese dos movimentos da CMM durante a medição por rebatimento; assume-se uma estabilidade de temperatura de 0,07 K para placas de aço e de 0,04 K para placas de alumínio.	$10^{-6} \cdot L$	$0.7 \cdot 10^{-6} \cdot L$
Desvio de linearidade dos erros de posição da CMM (paralelo aos eixos usados para a medição da placa).	$\pm 0,7 \mu\text{m}$	0,5 µm
Incerteza da calibração do padrão de comprimento.	$0,3 \mu\text{m} + 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot L$	
Incerteza da transferência de comprimento devido à incerteza de apalpação, contaminações, tensão.	$0,3 \mu\text{m} + 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot L$	
Incerteza de medição de temperatura durante a transferência de comprimentos devido à diferença de temperatura entre padrão de comprimentos e placa.	0,07 K (aço) 0,04 K (alu)	$0,8 \cdot 10^{-6} \cdot L$
Incerteza dos coeficientes de expansão térmicos - basicamente a incerteza da diferença dos coeficientes do padrão de comprimentos e da placa é relevante; - as medições são executadas com um desvio máximo permitido de 0,5 K da temperatura de referência 20°C.	10^{-6}K^{-1}	$0,5 \cdot 10^{-6} \cdot L$
Influência de contaminações durante a medição por rebatimento (há 8 medições completas e independentes).	1,5 µm	0,5 µm
Raiz da soma quadrática de todas as contribuições de incerteza para:	pequenos comprimentos: 0,8 µm grandes comprimentos (diagonal): 1,9 µm	
Assim para placas de até 1 m de diagonal a incerteza de calibração “u” é estimada como uma função da distância “L” entre os centros das esferas /furos arbitrários:	$U = (0,8 + L/910) \mu\text{m}$ m (L em mm)	

Figura 3.2 – Exemplo de balanço de incerteza para calibração de placas /34/

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DE PLACAS PADRÃO	
PROCESSO	OPERAÇÕES A DESENVOLVER
Inspeção de recepção da placa	<ul style="list-style-type: none"> • Conferir a identidade da placa; • Registrar os acessórios da placa.
Documentação interna	<ul style="list-style-type: none"> • Ordem de serviço interna; • Fixar data e responsabilidades para a calibração.
Medições por rebatimento e transferência dos dados	<ul style="list-style-type: none"> • Limpar placa e apalpadores; • Avaliar a validade de calibração dos termômetros (sensores) e da CMM; • Instalar os sensores de temperatura da placa (com pasta térmica); • Posicionar e alinhar a placa na CMM; • Verificar as condições ambientais do laboratório; • Permitir a estabilização da temperatura; • Realizar 4 medições por rebatimento da placa (posições de centro dos furos ou esferas); • Verificar os valores de medição com respeito à repetitividade; • Transferir dados da CMM para PC; • Registrar o tempo dispensado na calibração.
Transferência de comprimentos	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliar a validade de calibração dos termômetros (sensores) e da barra de furos ou de esferas; • Limpar as esferas ou furos da barra e dos apalpadores; • Instalar sensores de temperatura na placa e na barra (preferencialmente com pasta térmica); • Posicionar a placa e a barra na CMM. A placa deve estar na sua posição básica, ou seja, seu eixo X paralelo ao eixo X da CMM; • Permitir a estabilização da temperatura; • Medir a distância de duas esferas/furos da placa; • Medir a distância de duas esferas/furos da barra; • Repetir os dois processos 4 vezes cada; • Posicionar a placa e a barra sobre a CMM, com a placa rotacionada 90° em relação à sua posição básica (seu eixo X paralelo ao eixo Y da CMM) e a barra paralela ao eixo X da CMM; • Permitir a estabilização da temperatura; • Medir a distância de duas esferas/furos da placa; • Medir a distância de duas esferas/furos da barra; • Repetir os dois processos 4 vezes cada; • Registrar o tempo dispensado na comparação de comprimentos.
Avaliação da medição (completa)	<ul style="list-style-type: none"> • Compor os resultados da medição por rebatimento e da medição dos comprimentos; • Verificar os resultados; • Reavaliar (caso os requisitos não tenham sido atendidos); • Registrar o tempo total dispensado; • Arquivar dados finais.
Emissão e verificação do certificado	<ul style="list-style-type: none"> • Imprimir o certificado de calibração; • Especificar o conteúdo da fatura; • Colocar os dados de calibração em um banco de dados; • Verificar o certificado; • Assinar o certificado; • Colar o selo de calibração na placa.
Embalagem e despacho da placa	<ul style="list-style-type: none"> • Preparar e empacotar; • Especificar o manuseio da placa e solicitar o despacho.
Arquivamento	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivar dados de calibração; • Arquivar cópias: certificado de calibração, dados de calibração e ordem de serviço interna.

Figura 3.3 - Síntese dos processos e passos para proceder uma calibração de placas

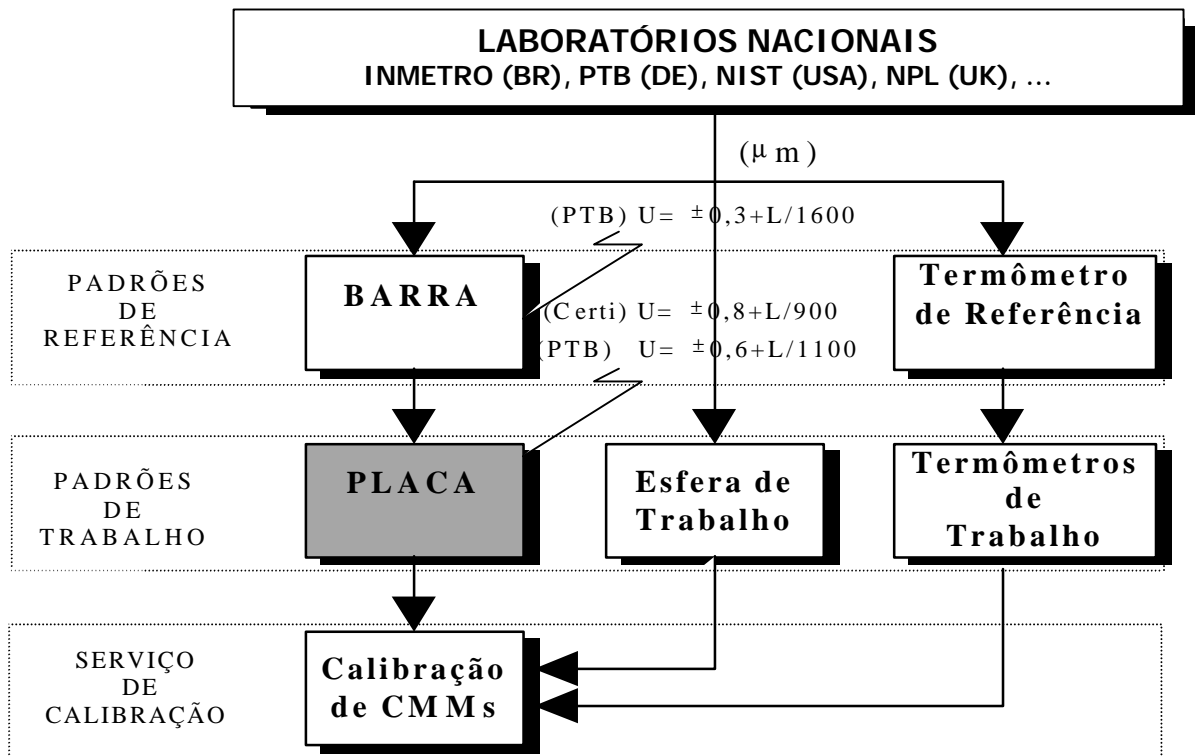


Figura 3.4 – Diagrama de definição de rastreabilidade na calibração de CMMs com Placas Padrão

Finalmente, para facilitar e agilizar o processamento dos dados obtidos durante a calibração (seja ela de placas ou máquinas) utiliza-se, geralmente, um software de avaliação (ver sub-seção 3.5.2). O software utilizado pelo Laboratório DKD no Brasil para a calibração de placas é o PKAL e os utilizados para calibração de máquinas são o KALKOM e o MEGAKAL, desenvolvidos pelo PTB /35, 39, 40/.

3.4 APLICAÇÃO DE PLACA DE ESFERAS PARA AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE CMMs

A maior dificuldade encontrada para se calibrar uma CMM reside no fato desta ser capaz de desempenhar uma universalidade de funções. Por esta razão, alguns ensaios estão padronizados com o objetivo primeiro de estabelecer parâmetros que pudessem ser comparado com especificações como as fornecidas pelo fabricantes de CMMs /41/.

Apesar da placa ser um padrão já disponível no mercado e ser citada em algumas normas e diretrizes /2, 3, 8/, ela ainda não é considerada um padrão "formal" pois ainda não está oficializada dentro de cadeias de rastreabilidade de medidas materializadas na área dimensional de institutos primários. Mesmo assim, as placas já são vistas como uma boa

possibilidade para calibrar CMMs pois potencializam a quantidade de comprimentos possíveis de serem avaliados em uma única posição.

A Figura 3.5 ilustra uma placa de esferas, que é um padrão bidimensional com $5 \times 5 = 25$ esferas. A posição X,Y do centro de cada esfera é conhecida com precisão através de um processo próprio de calibração, fazendo-a rastreada aos padrões de comprimento. Furos de precisão podem ser adotados em lugar das esferas. Como a placa de furos não é objeto do presente trabalho, ela não será abordada em maiores detalhes.

Na calibração da CMM, a medição da placa permite determinar o erro com que a máquina mede a posição de cada esfera. Sendo um padrão bidimensional, pode-se dizer que a vantagem imediata da placa sobre os padrões unidimensionais é a de permitir uma avaliação mais abrangente da CMM e com uma menor demanda de tempo e esforço do que o que seria necessário utilizando um padrão unidimensional.

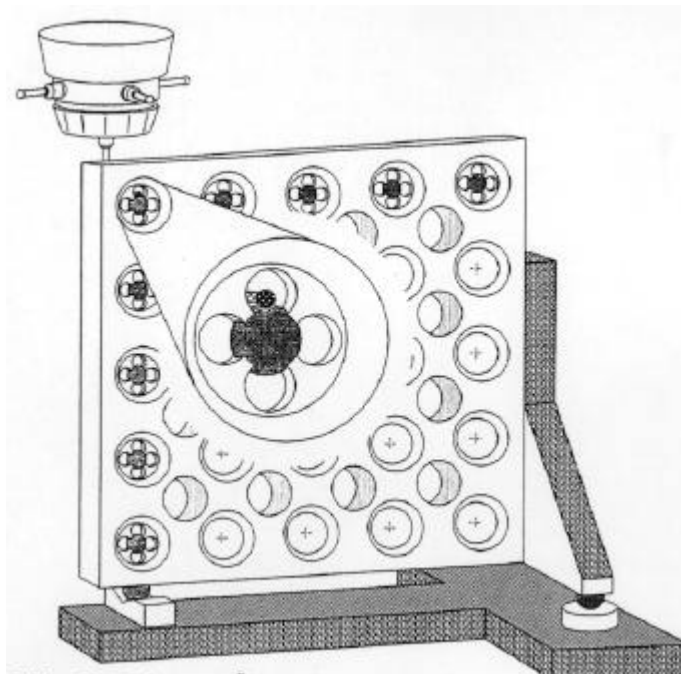


Figura 3.5 - Placa de esferas tipo 5x5 e seu acesso para apalpação

A diretriz VDI/VDE 2617 - parte 5 /2/ – ou a diretriz DKD /8/ propõem o emprego das placas para avaliar a *capacidade* de medição das CMMs, como uma alternativa aos blocos padrão. O ensaio da CMM com placas de esferas é mais rápido e abrange melhor os seus erros já que permite avaliar diversos comprimentos em uma única posição da placa. Este ensaio deve ser realizado periodicamente, envolvendo a medição da placa em posições inclinadas ou paralelas aos planos coordenados da CMM (Figura 3.6). Para cada medição com a placa pode-se conduzir as seguintes avaliações:

- a) Erro de indicação das posições (Figura 3.7): permite avaliar qualitativamente alguns erros da CMM como posicionamento, perpendicularidade e retilineidade;

b) Erro na medição de comprimentos: pela combinação de pares de esferas entre si, permite calcular um grande número de distâncias entre centros em diferentes orientações (como, por exemplo, par de esferas 1-2, 1-3, 1-4 ... 24-25, perfazendo um total de 300 distâncias). Este processo se assemelha a uma hipotética medição de blocos padrão em diversas posições dentro do plano da placa. Resultados obtidos nessa avaliação são melhor representados de maneira gráfica (Figura 3.8).

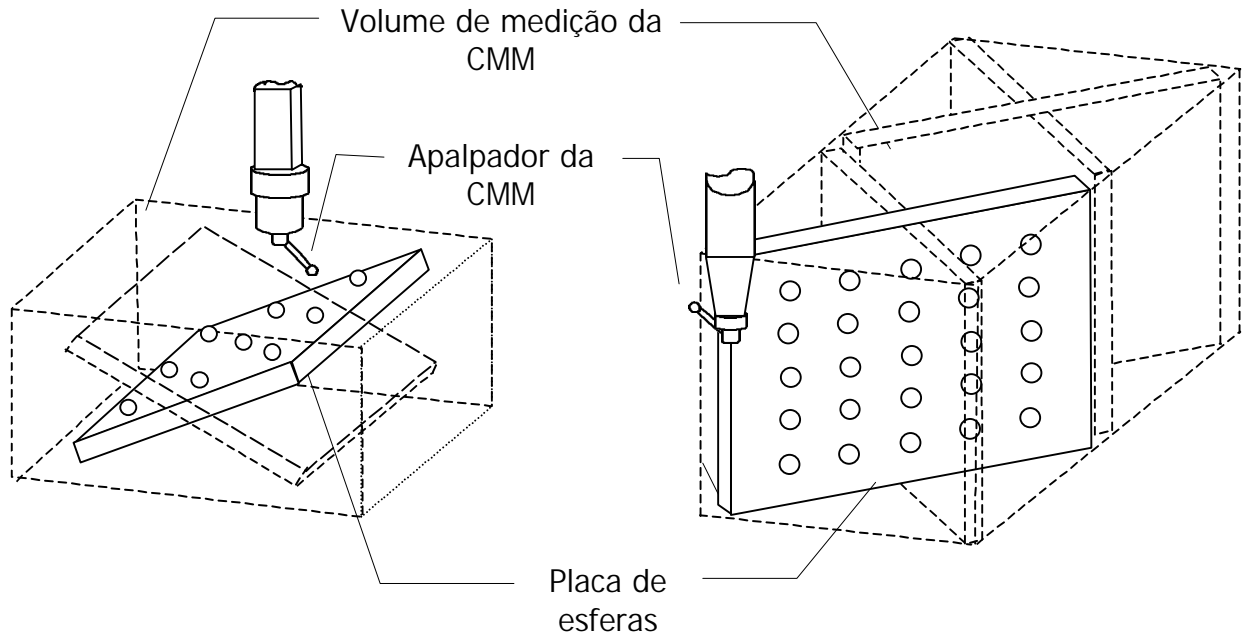


Figura 3.6 - Ensaio de verificação de CMMs com placas de esferas tipo 5x5 /2/

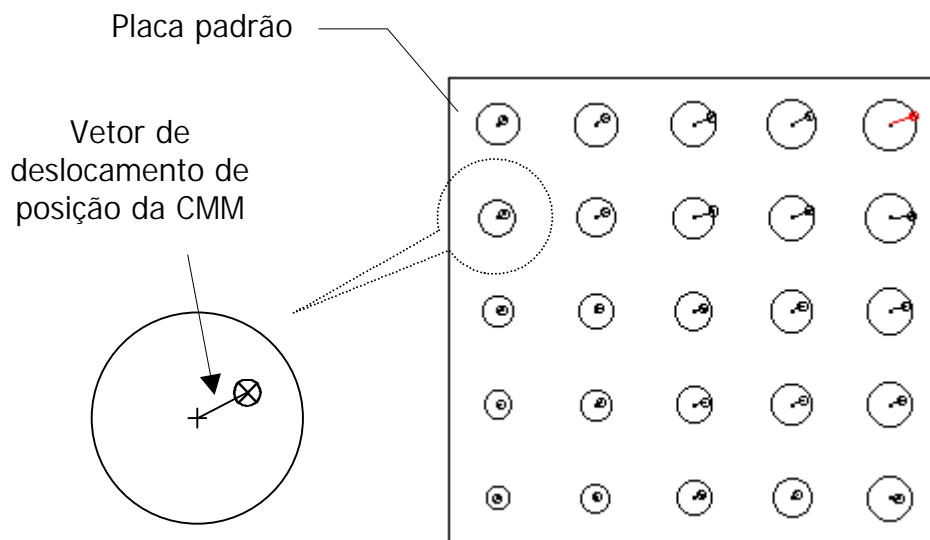


Figura 3.7- Vetores de erro de posição da CMM na medição de uma placa tipo 5x5 /49/

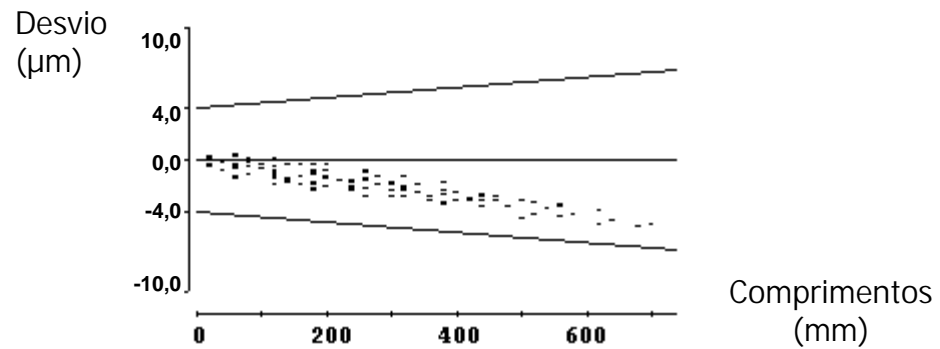


Figura 3.8- Representação gráfica de erros na medição de comprimentos /49/

De posse dos erros avaliados, pode-se determinar as especificações de incerteza. Estas, entretanto, encontram maior respaldo por parte das normas para os ensaios com padrões unidimensionais (atendendo a uma uniformidade de critérios para a comparação com especificações). O ensaio com padrões bidimensionais - como é o caso das placas -, apesar de não tão difundido, realiza uma amostragem mais abrangente do volume de medição e é, portanto, mais realista, tendendo a revelar uma maior gama de erros do que seriam detectados pelos ensaios com padrões unidimensionais.

Constata-se, na prática, que uma CMM muito bem ajustada apresenta bons resultados quando faz uso de qualquer método de ensaio conhecido (como, por exemplo, os apresentados na sub-seção 2.5 independente do padrão utilizado - uni ou bidimensional).

As vantagens e desvantagens da utilização de padrões bidimensionais e unidimensionais na avaliação de CMMs foram muito bem sintetizadas por Hageney e Pressel /42/. Segundo eles, a placa fornece diferentes linhas de medição com diferentes comprimentos e direções. Ao contrário, as medidas materializadas tipo unidimensional (como bloco padrão ou padrão escalonado) oferecem somente uma direção de medição com um pequeno valor relativo de comprimentos. Isto significa que a medição de uma placa em uma ou duas orientações oferece mais informações.

Outro fator a favor das placas é o componente segurança oferecido. Através da apalpação definida sobre uma esfera ou um anel, o comportamento do sistema de apalpação da CMM estará automaticamente verificado. Isto assegura que o comprimento medido de uma placa não será transferido erroneamente devido a pontos randômicos de apalpação.

A Figura 3.9 a seguir apresenta as principais vantagens da utilização de placas sobre padrões unidimensionais.

COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DE PADRÕES	
Montagem de Blocos Padrão ou Padrão Escalonado	Placa de esferas
<ul style="list-style-type: none"> + Alta exatidão de calibração - Limitada exatidão de transferência de comprimento do padrão para a CMM - Necessidade de montagem e fixação cuidadosa - Por montagem somente uma direção de medição com poucos comprimentos - Para um número suficiente de informações são necessários vários posicionamentos no volume de trabalho da CMM 	<ul style="list-style-type: none"> + Grande número de informações (<i>para placa com 25 esferas : 300 linhas de medição de diferentes comprimentos e inclinações entre 25 centros de esferas</i>) + Ensaio do sistema de apalpação integrado + Superfície de medição protegida (<i>placa com elementos internos</i>) + Fácil manuseio para montagem e desmontagem + Tempo geral de medição pequeno + Fácil avaliação de resultados + Exata transferência de comprimento do padrão para a CMM - Grande incerteza de calibração

Figura 3.9 - Vantagens (+) e Desvantagens (-) na utilização de placas de esferas ou de padrões unidimensionais na avaliação de CMMs /42/

A seguir é apresentado um exemplo comparativo entre os métodos de verificação de CMMs utilizando os padrões uni e bidimensionais através de um comprimento avaliado de 500 mm. Apesar da incerteza de calibração do padrão unidimensional (bloco padrão) ser bem menor (0,35 μm) que a incerteza de calibração do padrão bidimensional (placa de esferas) (1,0 μm), existem vários fatores que influenciam na transferência de comprimento medido do padrão na CMM, como é mostrado na Figura 3.10. Isso comprova que esta diferença de incertezas de calibração entre os padrões uni e bidimensionais, neste caso, torna-se irrelevante (Figura 3.11) /42/.

INFLUÊNCIAS E EFEITOS NA TRANSFERÊNCIA DE COMPRIMENTO DE PADRÕES UNI E BIDIRECIONAL		
Fatores de influência	Efeito com Bloco Padrão	Efeito com Placa de esferas
Alinhamento espacial segundo um plano com base pequena	Necessário. Atua na parte dependente do comprimento	Não é necessário alinhamento espacial (análise de distância polar - entre centro de esferas)
Desvio do diâmetro do apalpador	Atua na parte não-dependente do comprimento	Não atua na distância das coordenadas entre os centros das esferas
Histerese da CMM e sistema de apalpação	Atua na parte não-dependente do comprimento	Não influencia na distância das coordenadas entre os centro das esferas
Dispersão de um ponto (por exemplo, influência por sujeira)	Influencia totalmente o resultado	Influencia só parcialmente o resultado

Figura 3.10 - Influências sofridas e efeitos causados pela transferência de comprimento de um padrão (uni ou bidimensional) para a CMM

INCERTEZAS DE MEDIÇÃO DE PADRÕES UNI E BIDIRECIONAL E SUAS INCERTEZAS DE TRANSFERÊNCIA DE COMPRIMENTOS		
Tipo do padrão	Incerteza de calibração (µm)	Incerteza da transferência do comprimento (µm)
Bloco Padrão (aço)	$u = (0,1 + L / 2000)$	$u = (0,3 + L / 3330)$
Placa de esferas (aço)	$u = (0,6 + L / 1110)$	$u = (0,2 + L / 5000)$
Placa de esferas (material com coeficiente de dilatação desprezível – invariável)	$u = (0,6 + L / 2000)$	$u = (0,2 + L / 5000)$

Figura 3.11 - Incertezas de calibração de padrões uni e bidimensionais e parte da incerteza da transferência de comprimento para uma CMM de alta classe de precisão (L em mm)

Concluindo, convém lembrar que, como os ensaios de aceitação têm base contratual (na compra ou manutenção), é recomendável que o fornecedor coloque à disposição do

comprador as especificações próprias para a modalidade de ensaios com placas, já que esta avalia a CMM de maneira mais detalhada (para critérios adicionais para escolha de uma CMM ver também a seção 2.2. A diretriz VDI/VDE 2617- parte 5 ou a diretriz DKD podem ser utilizadas como base de referência neste tipo de ensaios.

Por último, é de se ressaltar que todos os pontos levantados até aqui têm como objetivo maior apontar os fatores técnicos associados à calibração de CMMs com placas. Não se pode esquecer que tão importante quanto esses fatores é a correta estruturação de um sistema da qualidade que garanta uma adequada aplicação da tecnologia e das técnicas disponíveis. Uma orientação para desenvolvimento e implantação desse sistema em laboratórios será apresentada na próxima seção.

3.5 SISTEMA DA QUALIDADE PARA CALIBRAÇÃO DE CMMs COM PLACAS PADRÃO

Laboratórios que queiram trabalhar com serviços de calibração com o padrão placas devem ter um Sistema da Qualidade (QS) implantado /43, 44/ e serem, preferencialmente, credenciados junto a um órgão com reconhecimento nacional (Rede Brasileira de Calibração (RBC), no caso do Brasil) /45/ ou mesmo internacional (Deutscher Kalibrierdienst (DKD) – Alemanha; United Kingdom Accreditation Service (UKAS) - Inglaterra, etc.). Assim, além de atenderem às exigências de normas para credenciamento de laboratórios, receberão o reconhecimento formal de que são competentes para realizar o serviço de calibração.

O credenciamento junto à RBC poderá ser futuramente reconhecido na Europa, já que o INMETRO tem formalizado o pedido para assinatura do reconhecimento junto à European Cooperation for Accreditation (EA)¹ /46/.

3.5.1 Considerações Iniciais e Aspectos Gerais

Antes de se começar o trabalho de implantação do Sistema da Qualidade, a instituição que pretende trabalhar com placas para serviços de calibração deve ter definições claras destes serviços, tais como, métodos, rastreabilidades, limitações, etc. Estas definições podem ser o resultado de uma análise de mercado realizada para definir necessidades e análise de viabilidade econômica ou mesmo executada com o intuito de planejar melhor os investimentos necessários para a disponibilização do serviço de calibração (Figura 3.12). Exemplificando, a prática mostra que uma das grandes necessidades de mercado é a calibração de CMMs do tipo portal com um método que se fundamente numa avaliação abrangente dos erros da CMM e na posterior avaliação da incerteza de medição.

¹ Em novembro de 1997 houve a fusão da European Cooperation for the Accreditation of Laboratories (EAL) com o European Accreditation of Certification (EAC), resultando no European Cooperation for Accreditation (EA).

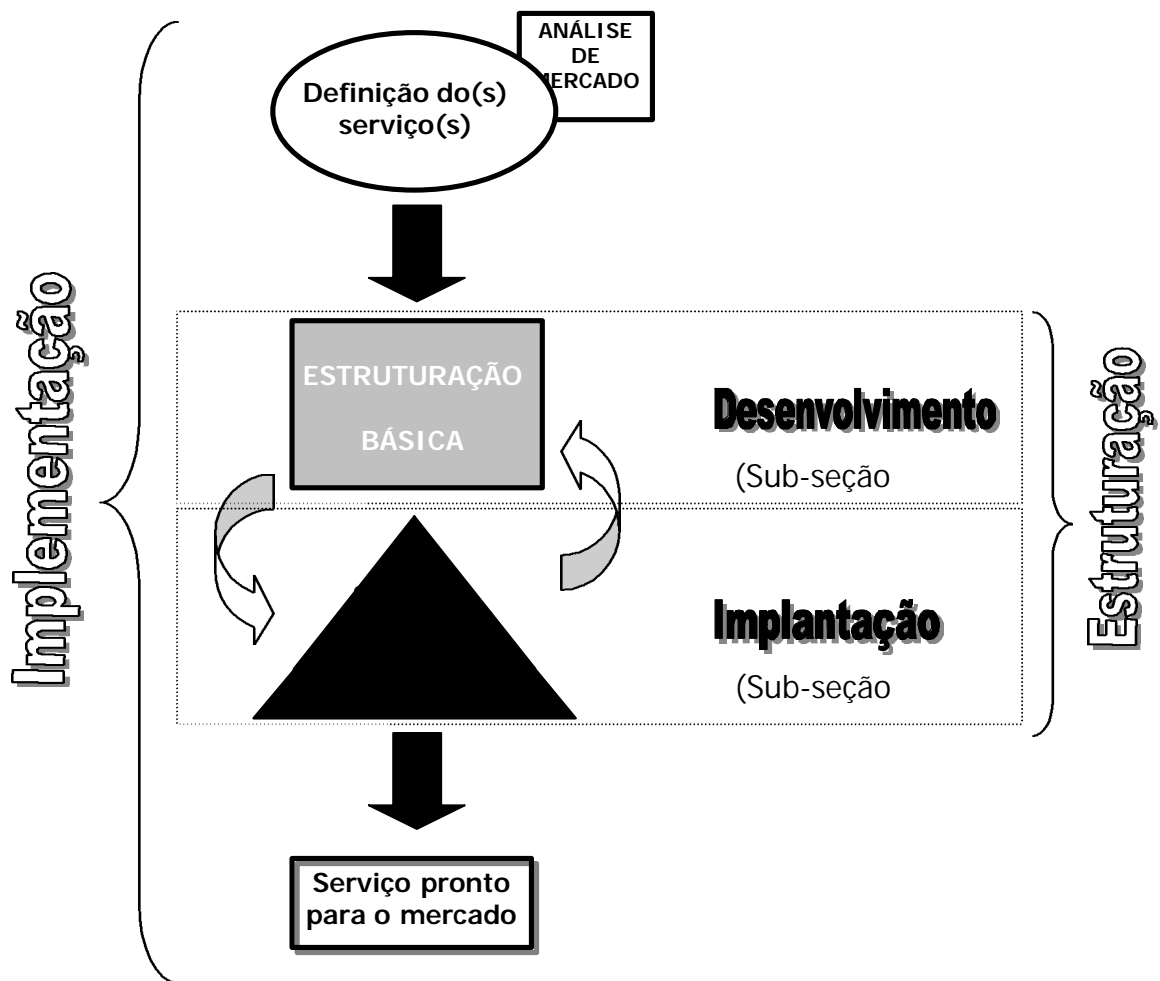


Figura 3.12 - Etapas para implementação de um Sistema da Qualidade

Todo o processo de estruturação (desenvolvimento + implantação) deve ser conduzido de forma organizada, concisa e simplificada. Alguns dos fatores que influenciam nesta estruturação são apresentados na Figura 3.13.

Ainda, há de se considerar que a estruturação do Sistema da Qualidade exige que metas coerentes sejam seguidas. Para que isso ocorra, faz-se necessária uma análise da situação atual ("as-is analysis") do laboratório bem como uma análise de eventuais pontos fracos ("weak-points analysis"). De posse dessas informações, fica mais fácil sugerir um modelo a ser adotado ("should-be concept") /47/. É sempre bom lembrar que introdução de novas tecnologias ou metodologias, como é o caso do Sistema da Qualidade, impõe mudanças culturais no ambiente de trabalho. Atitudes e comportamentos são afetados merecendo, portanto, deferência por parte de quem está envolvido no processo.

IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DA QUALIDADE	
ASPECTOS POSITIVOS	ASPECTOS NEGATIVOS
a) Experiência e bom nível de especialização da equipe do laboratório;	a) Falta de documentação de procedimentos técnicos e administrativos que são desenvolvidos com sucesso;
b) Familiarização com o uso de normas e especificações técnicas;	b) Crença que alguns trabalhos de garantia da qualidade irão aumentar a burocracia e que estes são menos importantes que os trabalhos técnicos;
c) Sistematização dos serviços tecnológicos de calibração, pela aplicação de procedimentos pré-definidos;	c) A complexidade do sistema de calibração para garantir a rastreabilidade.
d) Necessidade de ter um bom sistema de armazenamento e registro dos resultados de calibrações realizadas.	

Figura 3.13 - Aspectos gerais que influenciam a estruturação de um QS

Alternativamente, pode-se fazer uso de uma estrutura temporária do Sistema da Qualidade, visando à permanente. Entretanto, isso só é recomendado no caso de não se ter recursos (financeiros, humanos, de tempo) disponíveis no momento da estruturação do processo. Duas destas variáveis (tempo e custo) serão abordados na sub-seção 3.5.5.

As duas próximas sub-seções apresentarão em mais detalhes o “corpo” (estruturação básica do laboratório) e a “alma” (hierarquia do Sistema da Qualidade) (Figura 3.14).

3.5.2 Estruturação Básica de um Sistema da Qualidade

Quando se fala de uma estrutura *básica* laboratorial, fala-se necessariamente de organização. Esta organização pode ser encontrada quer seja, em uma boa adequação do leiaute do laboratório - especialmente da sala onde serão realizadas medições – quer seja no acesso e alojamento dos padrões (de trabalho e de referência), acessórios, instrumentos auxiliares, sistema computacional para avaliação e documentação necessária.

Além de um controle interno de temperatura e umidade documentados (controle das condições ambientais), deve haver também uma preocupação com a construção do laboratório que deve possuir, por exemplo: isolamentos para evitar a influência de fatores ambientais externos (parede dupla e separada), fundação do laboratório isolada do prédio para evitar vibrações, etc. Todo investimento na estruturação laboratorial e controle de seu pleno funcionamento devem ser voltados para garantir as incertezas nas medições propostas.

Também faz parte de uma estruturação básica, uma quantidade mínima desejada de equipamentos e acessório auxiliares como, por exemplo: CMM adequada (na incerteza, no volume de trabalho, no sistema de apalpação, etc.), sistema de fixação, padrões de trabalho, etc. No caso específico deste trabalho – calibração de CMMs utilizando placas de esferas -, deve-se ter a disposição alguns padrões de trabalho tais como sistema de aquisição de temperatura, esfera padrão e a placa de esferas.

Finalmente, é de extrema valia que um laboratório possa contar em sua estruturação básica com softwares de avaliação de resultados (tanto para avaliação de calibração de máquinas quanto para avaliação de calibração de placas). Estes devem ser, preferencialmente, *certificados* ou reconhecidos pelo Instituto Primário no país (INMETRO, no caso do Brasil). Isso garantirá uma maior segurança ao usuário do software em relação aos resultados obtidos. Adicionalmente, vale ressaltar que um software certificado ou reconhecido pelo INMETRO encontra o aceite junto à Rede Brasileira de Calibração (RBC).

A título de ilustração serão listadas abaixo algumas funções consideradas interessantes de serem disponibilizadas pelos softwares de avaliação. (Uma descrição mais detalhada de funcionalidades pode ser encontrada em /35, 39, 40, 48, 49/):

- Aceitação de diferentes tipos de padrões / máquinas;
- Possibilidade de entrada manual de temperaturas na medição (placa, máquina e ambiente)
- Avaliação por comparação de um padrão (entrada de dados: comparação de comprimentos, coeficientes de dilatação térmica, comprimentos medidos e nominais, temperatura na medição de comparação);
- Possibilidade de análise gráfica entre calibrações;
- Possibilidade de geração de relatório final com data de execução, responsável, local da calibração, tabela com valores obtidos na calibração, condições ambientais durante a calibração, características dos padrões utilizados.

Concluindo, ressalta-se a importância do elemento humano à estruturação básica laboratorial. Na realidade, neste caso, básica não seria uma palavra tão apropriada quanto essencial. Motivação e treinamento têm enfoques importantes na implantação de um QS. É extremamente recomendável que estes sejam conduzidos, monitorados e evidenciados (documentados). A definição de funções e de responsabilidades das pessoas envolvidas nos serviços prestados fazem parte das várias ações dentro do QS. Para serviços com placas pode-se exemplificar algumas destas funções:

- Definição da estrutura organizacional;
- Definição de responsabilidades da alta administração;
- Designação de um funcionário para assumir as funções de Gerência da Qualidade do Laboratório e de seu substituto, definindo qualificações e experiência mínimas para o cargo além de suas atribuições e responsabilidades;

- Designação de um funcionário para assumir as funções de Gerência Técnica do Laboratório e de seu substituto, definindo qualificações e experiência mínimas para o cargo além de suas atribuições e responsabilidades;
- Registro de assinaturas e rubricas para os gerentes e seus substitutos;
- Definição de qualificação, experiência, atribuições e responsabilidades para os cargos dos demais integrantes subordinados às gerências e ligados diretamente ao serviço;
- Definição clara de atribuições para o QS entre a Gerência do Laboratório e Gerência da Qualidade;
- Estabelecimento de um plano de treinamento e registros de treinamento internos;
- Garantia da imparcialidade na tomada de decisões técnicas pelo Gerente do Laboratório;
- Acordos e assinaturas pela alta administração do Manual da Qualidade e suas revisões contendo o autor e o responsável técnico.

3.5.3 Hierarquia do Sistema da Qualidade

O que caracteriza um Sistema da Qualidade é o conjunto de documentos produzidos com a finalidade de reunir e organizar informações que possam servir para orientar os serviços a serem prestados. Para este conjunto de documentos costuma-se definir uma hierarquia que os classifique por níveis de atuação. A estrutura hierárquica piramidal foi a escolhida pela Fundação CERTI para o seu Sistema da Qualidade de seus laboratórios /34, 50/ (Figura 3.14).

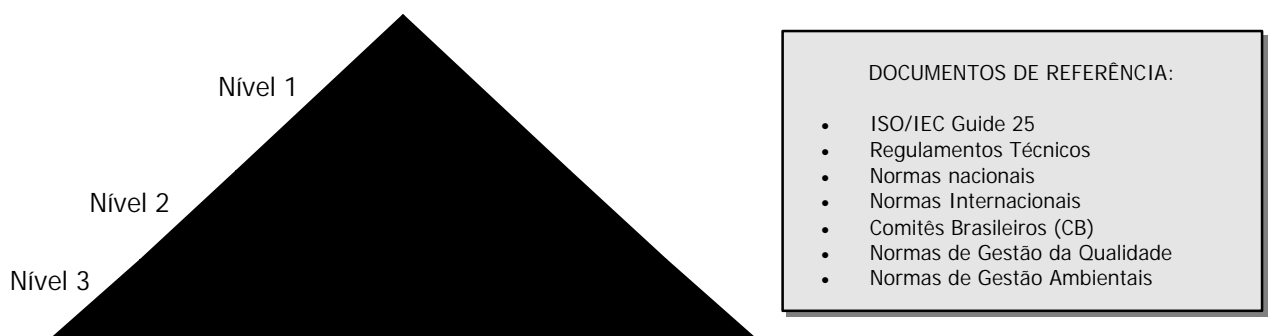


Figura 3.14 - Hierarquia do Sistema da Qualidade dos laboratórios da Fundação CERTI

A definição dos níveis (quantidade e foco) deve ser de acordo a atender as necessidades da instituição, devendo ser embasada em documentos técnicos de referência. Esta estrutura deve estar vinculada aos planos de desenvolvimento da qualidade. No caso da Figura 3.14, tem-se os seguintes níveis:

NÍVEL 1 - Define a política, as diretrizes, as estratégias, a metodologia e as responsabilidades para diversos aspectos relacionados ao serviço em um documento comumente chamado de "Manual da Qualidade";

NÍVEL 2 - Define "Quem", "O Quê", "Quando" e "Como" o serviço deve ser feito (este nível é passível de uma subdivisão no caso "Como");

NÍVEL 3 - Evidencia o funcionamento do Sistema da Qualidade.

Como parte da filosofia de melhoramento contínuo do sistema, realiza-se periodicamente (anualmente, por exemplo) uma avaliação crítica do sistema, em todos os seus níveis. Essa avaliação deve ser executada pela alta administração da instituição (chefes de alto calão não ligados diretamente ao serviço executado) em conjunto com as gerências técnicas envolvidas.

Como o foco deste trabalho é a calibração de CMMs utilizando placas de esferas, serão apresentados abaixo alguns procedimentos considerados básicos para o serviço com placas. A seqüência em que serão expostos não indica importância maior ou menor; cada procedimento vai ter situações específicas, com prioridades próprias. São eles:

- Elaboração de procedimentos de Calibração, Administrativos, Manuais de Operação, Planilhas, Formulários;
- Codificação e controle de Documentos e Registros;
- Coordenação dos Serviços tecnológicos, custos e avaliação técnica de pessoal (inclusive registro de treinamento);
- Controle de acesso aos laboratórios (inclusive limpeza);
- Recebimento, manuseio, armazenagem, expedição/transporte e manutenção de materiais e equipamentos (inclusive para serviços em campo);
- Cálculo de incerteza de medição e intervalos de calibração;
- Tratamento de reclamação de clientes e não-conformidades;
- Auditoria Interna de calibrações e análise crítica do QS;
- Garantia da Confiabilidade, Segurança e Rastreabilidade das Informações.

Os procedimentos acima citados não necessariamente precisam ter esta denominação utilizada; podem inclusive ser subdivididos ou mesmo agrupados de acordo com cada QS.

Depois de visto como desenvolver e implantar um Sistema da Qualidade, cabe concluir que, além de toda a estruturação básica requerida e da definição da hierarquia necessária, todo planejamento associado ao processo como um todo deve estar sempre voltado aos aspectos humanos, motivacionais, comportamentais e culturais. Isso, com certeza, ajudará no sucesso da implantação do QS na instituição pois, deste modo, os envolvidos se sentirão responsáveis e dispostos a atingir as metas desejadas.

3.5.4 Credenciamento de Laboratório para Execução de Serviços com Placa Padrão

O credenciamento é o reconhecimento formal de que um determinado laboratório é competente para realizar um serviço. No Brasil, o único órgão credenciador é o INMETRO e o único laboratório DKD para calibração de placas de furos e de esferas além de calibração de CMMs com reconhecimento por parte do INMETRO é o laboratório de medição por coordenadas (LMC) da Fundação CERTI – Florianópolis, SC.

É condição *sine qua non* para a realização de um credenciamento que o laboratório possua um Sistema da Qualidade. Além disso, as seguintes etapas são necessárias para que o credenciamento seja executado de maneira adequada:

- Solicitação formal junto ao órgão credenciador oficial (no caso do Brasil, o INMETRO);
- Preenchimento da documentação fornecida pelo órgão credenciador e pagamento de taxas;
- Análise da documentação pelo órgão credenciador;
- Solicitação de avaliação formal por parte do órgão credenciador (no caso da documentação estar de acordo);
- Avaliação do Sistema da Qualidade e dos requisitos técnicos do serviço oferecido além de levantamento de não-conformidades por parte do órgão credenciador;
- Aceite por parte do laboratório solicitante do credenciamento de ações corretivas;
- Análise das evidências das ações corretivas implementadas por parte do órgão credenciador;
- Órgão credenciador avalia, revisa o processo e recomenda ou não o credenciamento (etapas de credenciamento devem ser repetidas no caso de uma recomendação negativa de credenciamento);
- Órgão credenciador envia contrato e Certificado de Credenciamento com lista adicional de serviços passíveis de serem oferecidos.

Cumpridas as etapas acima mencionadas, o laboratório passa a ser considerado um laboratório credenciado e a fazer parte da Rede Brasileira de Calibração (RBC). Com isso, passa a oferecer aos seus cliente vantagens adicionais, como:

- Aumento da confiabilidade dos resultados;
- Reconhecimento multilateral com laboratórios;
- Reconhecimento da competência do laboratório;
- Redução de auditorias/avaliações por parte de clientes;
- Maior aceitação de relatórios e certificados pela indústria;
- Aumento da confiabilidade no qs por parte dos clientes;
- Atendimento a requisitos de outros sistemas da qualidade (ISO 9000, QS 9000, VDA 6.1 e outros).

As vantagens oferecidas pelo credenciamento só estarão, entretanto, acessíveis aos laboratórios se estes possuírem um Sistema da Qualidade, como mencionado anteriormente.

Finalizando a seção que trata do Sistema da Qualidade para calibração de CMMs com placas, a próxima sub-seção tratará dos tempos e custos envolvidos no processo de desenvolvimento e implantação de um QS.

3.5.5 Tempos e Custos envolvidos na Estruturação de um Sistema da Qualidade

Tanto o tempo quanto os custos de desenvolvimento e implantação de um Sistema da Qualidade dependem do tamanho do laboratório que almeja esta estruturação. A Figura 3.15 apresenta alguns dos fatores associados aos tempos e custos deste processo.

ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA DA QUALIDADE	
TEMPOS ENVOLVIDOS	CUSTOS ENVOLVIDOS
a) Complexidade das mudanças e melhorias necessárias; b) Consideração do grau de dificuldade dos serviços a serem prestados pelo laboratório; c) Desenvolvimento do Sistema da Qualidade e elaboração da documentação (Manual da Qualidade e Procedimentos); d) Implantação do Sistema; e) Condições técnicas da equipe e treinamento interno de pessoal; f) Atividades administrativas; g) Manutenção do Sistema: <ul style="list-style-type: none"> • auditorias internas; • revisões; • melhoria contínua. 	a) Credenciamento, anuidade / semestralidade; b) Taxas com processos de auditorias; c) Despesas com assessorias; d) Treinamento de pessoal externo; e) Aquisição de equipamentos e materiais; f) Contratação de pessoal.

Figura 3.15 - Fatores que influenciam os tempos e custos de estruturação do QS

Por último, vale lembrar que aos fatores listados na coluna "tempo", também estão associados custos internos à empresa que, apesar de não constituírem saída de caixa, representam despesas que não devem deixar de ser consideradas.

A calibração de CMMs com placas continuará sendo o foco das atenções nos dois próximos capítulos. O capítulo 4 introduzirá o método da CMM Virtual e, juntamente com o capítulo 5, apresentará alguns estudos de caso com o intuito de facilitar o entendimento e a compreensão da técnica proposta neste trabalho.

CAPÍTULO 4

MÉTODO DA CMM VIRTUAL

Os capítulos anteriores procuraram deixar claro que *placas de esferas* servem como padrão para a calibração de CMMs e que *calibração* refere-se à determinação de erros paramétricos da CMM. Dentre os métodos mais conhecidos para calibração de CMMs com placas, foram citados neste trabalho a diretriz VDI/VDE 2617 - parte 5 /2/ e a diretriz DKD /8/. Por ser um método mais recente e, conseqüentemente, mais comprometido em relação à demanda do mercado atual além de realizar uma avaliação mais abrangente da máquina – como será apresentado logo a seguir -, o Método da CMM Virtual será objeto de estudo mais aprofundado deste trabalho e servirá de base para a técnica proposta.

4.1 DESCRIÇÃO DETALHADA DO MÉTODO

A CMM Virtual aplica uma estratégia especial de medição da placa, de avaliação da incerteza de medição de comprimentos e de avaliação da incerteza de apalpação. O método, desenvolvido pelo Instituto Primário alemão PTB, considera cada parte construtiva da CMM como um corpo rígido, onde os erros da posição de um componente da CMM dependem apenas da sua própria posição e não da posição dos demais componentes /51/.

Em uma primeira instância, o método da CMM Virtual permite uma compensação de erros sistemáticos da CMM mais abrangente (correção por software), incluindo os erros rotacionais que são considerados de segunda ordem. Em uma segunda instância, um algoritmo computacional é empregado para simular o efeito da superposição dos erros na determinação de elementos geométricos permitindo avaliar, então, a denominada “incerteza de medição para tarefas específicas de medição” (uma aplicação prática é apresentada na seção 4.5). Esta simulação passa a ser conhecida como *máquina virtual*. Com isso, a avaliação da incerteza pela CMM Virtual baseia-se na superposição dos erros que surgem dos fatores de medição mencionados acima - CMM e estratégia de medição - e das influências do meio ambiente.

Resumidamente, o método consiste de dois passos (Figura 4.1):

- a) ensaio da CMM, para conhecer seus erros;
- b) a simulação computacional da medição, para estimar o erro que a CMM cometeria ao executar uma tarefa específica de medição.

O terceiro passo (Figura 4.1) é a aplicação da CMM, ou seja, a medição efetiva da tarefa de medição (após a simulação do resultado de medição no passo 2). Parâmetros tais como a geometria a ser medida e a estratégia que será utilizada na medição também são

dados utilizados na simulação. A realização dos passos 1 e 2 garante, a priori, a avaliação da incerteza de medição total da CMM. Isso é conseguido através da simulação da medição de um grande número de distâncias (por exemplo mais de 10.000) paralelas a cada um dos eixos da CMM combinando todos os pontos entre si.

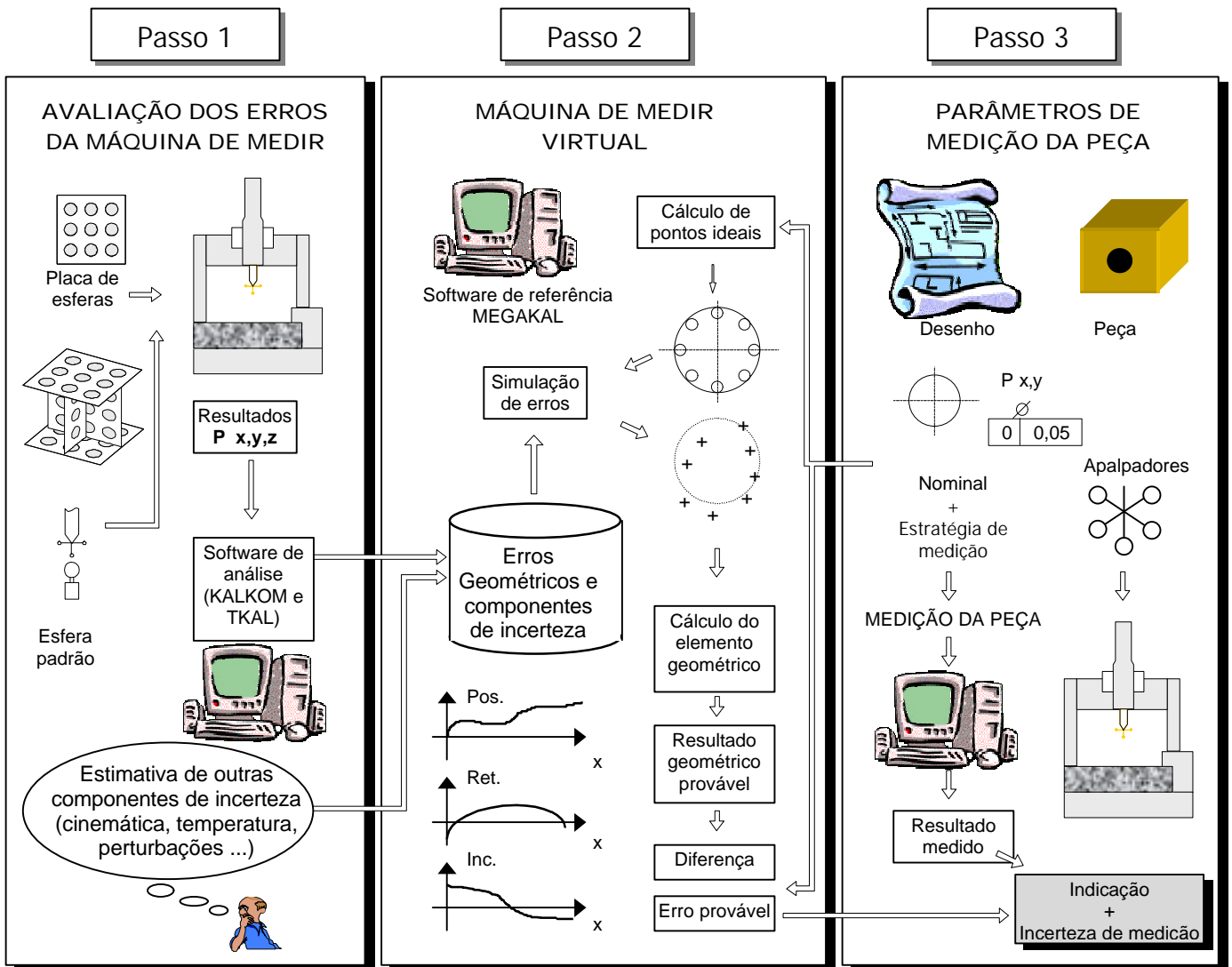


Figura 4.1 – Passos para a avaliação da Incerteza de Medição utilizando o Método da CMM Virtual /52/

A simulação para avaliar a incerteza de uma tarefa específica requer o conhecimento das diversas componentes desta incerteza. O lado esquerdo da Figura 4.1 (passo 1) mostra o levantamento das fontes de erro para o cálculo dessa incerteza. Preferencialmente, as componentes devem ser determinadas através de ensaio com placa (o método da CMM Virtual foi desenvolvido especialmente para a utilização de placas). Quando isso não for viável, devem ser estimadas a partir de outras bases de conhecimento como, por exemplo, históricos de erros da máquina.

Pelo método da CMM Virtual, os erros geométricos da CMM são obtidos a partir de medições de uma placa nos seus 3 planos coordenados, de modo a cobrir todo o volume de medição da máquina e assim mapear todos os seus erros. Deste modo, todos os efeitos se manifestam nos resultados das posições das esferas. Obtém-se, desta forma, componentes de erros como posicionamento, retilidade, inclinação e perpendicularidade. Estes erros também podem ser determinados por métodos de ensaios geométricos convencionais (sub-seção 2.5). Adicionalmente, o ensaio de apalpação fornece outras parcelas aleatórias e sistemáticas de incerteza. Além disso, a estabilidade geométrica de longo prazo (obtida do histórico entre calibrações), os efeitos de temperatura (análise cinemática dos efeitos dos gradientes), os efeitos de vibrações e as impurezas são normalmente estimados para compor a incerteza total.

O centro da Figura 4.1 (passo 2) mostra a simulação da tarefa específica de medição. Depois de introduzidos no software de avaliação os dados levantados no passo 1, a simulação pode ser executada a qualquer tempo e pode compreender as seguintes etapas:

- Determinação de pontos teóricos (simulados) dentro do volume de medição que a máquina ocuparia para medir o elemento geométrico (tarefa específica de medição). Essa simulação é realizada com a ajuda de um software de referência /40/;
- Cálculo dos pontos afetados pelos erros da CMM, para reconstrução do seu comportamento geométrico a partir da base de erros e de incertezas, como se o elemento geométrico tivesse sido realmente medido por ela;
- Cálculo do elemento geométrico sobre estes pontos agora afetados pelos erros da CMM (o software de avaliação determina o resultado geométrico provável). A diferença entre este resultado calculado e aqueles valores nominais, que alimentaram a simulação, caracteriza o erro provável na medição do elemento geométrico sob as condições específicas;
- Repetição da simulação sob variações das influências externas buscando introduzir efeitos aleatórios não considerados na fase anterior (como efeitos da temperatura sobre a geometria da CMM, por exemplo). A amplitude dos erros assim obtidos caracteriza a incerteza da CMM para aquela tarefa específica.

Adicionalmente, podem ser realizadas as seguintes etapas:

- Simulação de tarefas em diversas posições da CMM, levantando incertezas específicas para tarefas, mas independentes da posição na CMM; e
- Pesquisa da região da CMM que oferece a menor incerteza para tarefas específicas.

Usualmente, o software de simulação é também bastante utilizado para outros fins além da determinação da incerteza de tarefas específicas. Entre as aplicações especiais e potencial da técnica, podem ser mencionadas:

- Simulação automática de um grande número de distâncias (mais de 10.000, como mostrado na Figura 4.2), definidas pela combinação de diferentes pontos dentro do volume de medição. Esta avaliação expressa a incerteza de medição de comprimentos de modo bastante abrangente;
- Simulação de elementos geométricos regulares (círculo, reta, elipse, plano, cone, cilindro, esfera) e algumas associações, como distâncias e interseções;
- Avaliação das componentes de erros da CMM, para correção pelo seu software. A vantagem reside aqui no levantamento dos erros no local próprio da CMM.
- Medição de peças de referência, com uma CMM calibrada, a serem empregadas na verificação periódica de outras CMMs;
- Integração com softwares de medição das CMMs, com a finalidade de avaliar a incerteza em tempo real;
- Pesquisa da CMM que, entre um grupo cadastrado, é capaz de atender tarefas específicas;
- Integração com sistemas CAD para simulação com dados nominais e avaliação "off-line" do processo de medição /52/.

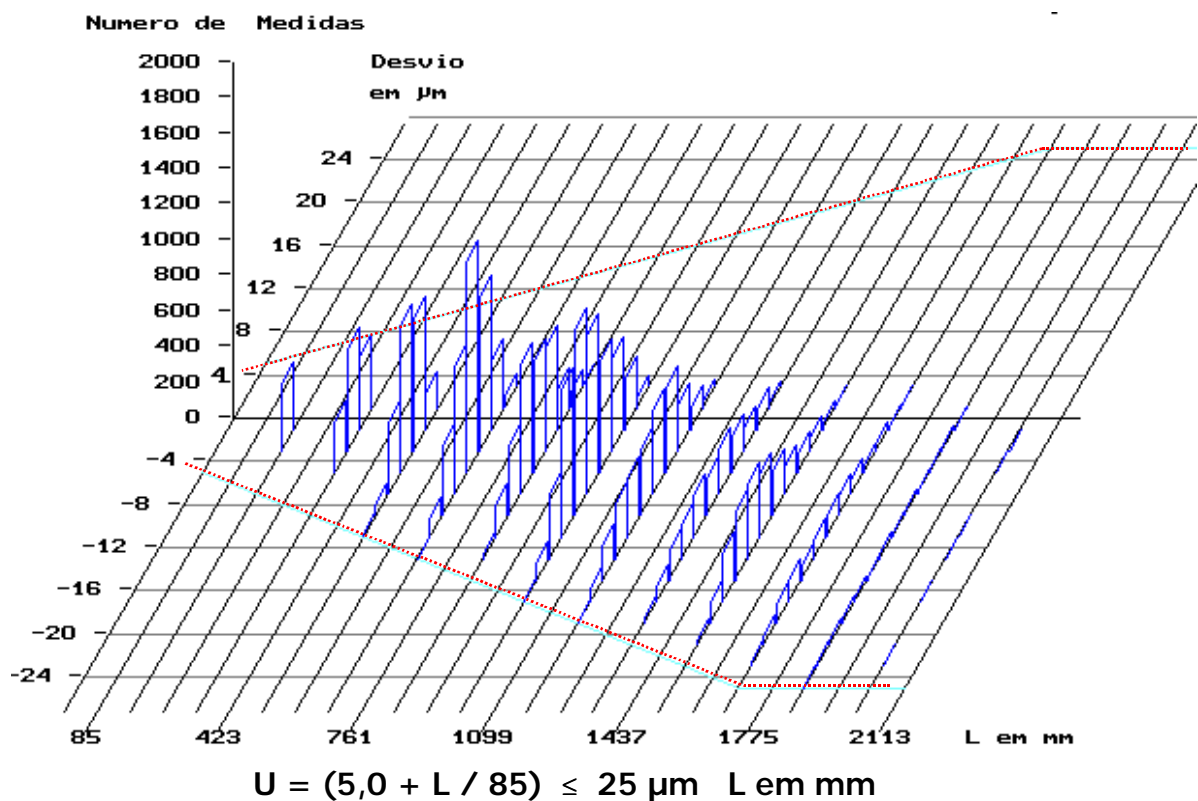


Figura 4.2 – Representação gráfica da Incerteza de medição para comprimentos quaisquer no espaço

Finalmente, o lado direito da Figura 4.1 (passo 3) representa a aplicação da CMM e a necessidade de conhecer a incerteza para realizar uma tarefa específica de medição, que envolve fatores próprios como: características nominais do elemento geométrico, estratégia de medição (número e distribuição dos pontos, por exemplo), configuração dos apalpadores, a própria CMM sendo utilizada.

4.2 COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS DE ENSAIO

As diretrizes VDI/VDE 2617 e DKD, assim como a norma ISO 10360-2, foram utilizadas para realizar uma comparação entre métodos de ensaio que fazem uso de bloco padrão (ou padrão escalonado), placa de esferas e CMM Virtual. A comparação foi simulada pela CMM Virtual na medição de comprimentos no espaço, com os procedimentos previstos segundo orientações técnicas /2, 3, 8/.

A Figura 4.3 mostra os valores médios encontrados para a simulação em um grupo de 12 CMMs.

MÉTODOS DE ENSAIO E SUAS PARCELAS DE INCERTEZA NA MEDIÇÃO DE COMPRIMENTOS	
Método de ensaio	Parcela detectada da incerteza na medição de comprimentos (média)
Método da CMM Virtual (Diretriz DKD) (baseado na simulação de mais de 10.000 comprimentos)	100% (referência)
VDI/VDE 2617 parte 5, placa de esferas em duas posições cruzadas	81%
VDI/VDE 2617, ISO 10.360/2, padrão escalonado ou blocos padrão	60% (aproximadamente)

Figura 4.3 - Comparativo do percentual médio da incerteza de medição para a simulação de 12 CMMs – baseado em /10, 25/

Estes dados mostram que a avaliação com os padrões unidimensionais é bastante singela, em função das poucas posições em que os padrões são medidos. Expressar aproximadamente 60% dos erros significa que a incerteza de medição da CMM pode ser sensivelmente maior do que aquela apresentada pelo ensaio. Entretanto, o resultado que mais interessa nessa análise comparativa é a comprovação de que o ensaio com placas de esferas detecta uma parcela de incerteza mais abrangente (81%) do que os ensaios que fazem uso de padrões unidimensionais /10, 25/.

4.3 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO ORIENTATIVO PARA O USO DO MÉTODO

Antes de expor mais detalhadamente as linhas gerais do procedimento de calibração usando a CMM Virtual cabe retomar, devido à confiabilidade por ela imposta aos resultados obtidos, o tema rastreabilidade. A publicação EA-4/10 (antigo EAL-G17) /53/ orienta os laboratórios credenciados que uma satisfatória rastreabilidade para CMMs pode ser alcançada por dois métodos: a medição por comparação e a CMM Virtual.

No método por comparação, a CMM é utilizada como comparador, medindo um padrão de referência conhecido e a peça, alternadamente, na mesma posição da CMM. Um exemplo pode ser a medição de um furo, tendo-se medido previamente um anel padrão. Da medição do padrão obtém-se o erro da CMM a ser corrigido na medição da peça. Cabe aqui destacar que esta medição envolve condições específicas de analogia padrão-mensurando, como a natureza da geometria, a localização dentro do volume de medição, a estratégia de medição, os apalpadores, etc. Este método é recomendado quando se deseja manter a incerteza de medição em níveis mais baixos, mas a custo de um processo mais lento e oneroso.

O correto conceito de calibração aplicado à área de CMMs iria requerer que distintos padrões (correspondentes às tarefas de medição), com diversas dimensões, fossem medidos em diferentes posições da máquina. A CMM Virtual consiste de uma técnica que contorna esta inviabilidade prática e permite avaliar a incerteza a ser associada ao resultado de tarefas específicas de medição. Este método foi desenvolvido pelo PTB, como já mencionado anteriormente, e transferido para a Fundação CERTI - Florianópolis, através de um projeto de cooperação técnica. Como resultado concreto deste projeto, a CERTI é um laboratório credenciado pelo serviço alemão de calibração DKD - Deutscher Kalibrierdienst - para a calibração de placas de furos e esferas e para a calibração de CMMs /54, 55, 56/.

Considerando que quanto maior for o potencial de medição de uma CMM, mais sofisticada tende a ser a técnica para sua calibração, pode-se afirmar, pelo que foi visto até agora, que a CMM Virtual é um meio bastante adequado para fornecer rastreabilidade às CMMs. Convém também mencionar que esforços estão sendo empreendidos para difundir o método da CMM Virtual, como por exemplo este trabalho, objetivando a difusão tecnológica bem como a disponibilização de resultados mais exatos ao usuário de CMM.

Feitas essas considerações iniciais quanto à rastreabilidade da CMM, serão apresentados de maneira resumida na figura a seguir os passos que devem ser dados por uma Instituição que presta serviços de calibração de CMMs com placas padrão (Máquina Virtual), juntamente com os processos a eles associados /34/.

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DE CMMS	
PROCESSO	OPERAÇÕES A DESENVOLVER
Pré - análise (CMM e Laboratório)	<ul style="list-style-type: none"> • Registrar a temperatura do laboratório por pelo menos 1 semana (tarefa para o cliente); • Analisar as condições de temperatura do laboratório; • Planejar as posições de medição da placa.
Preparação das medições no local	<ul style="list-style-type: none"> • Analisar as condições do laboratório e da CMM; • Registrar os dados da CMM; • Instalar os sensores de temperatura ambiente nos cantos (de um cubo), ao redor da CMM; • Instalar sensores de temperatura de contato na CMM e na placa; • Determinar os erros de apalpação; • Limpar as esferas da placa e do apalpador.
Medições da placa	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionar e alinhar a placa sobre a CMM (para cada posição de medição); • Permitir a estabilização de temperatura da placa (para cada posição de medição); • Ativar a correção de temperatura da CMM (peça e escalas); • Realizar no mínimo 6 medições da placa através de 4 posições; • Verificar os valores medidos com respeito à repetitividade.
Avaliação da incerteza de apalpação	<ul style="list-style-type: none"> • Medir uma esfera calibrada em 2 posições na diagonal do volume de trabalho da CMM; • Avaliar a incerteza de apalpação; • Transferir dados da CMM para PC; • Registrar o tempo total dispendido;
Avaliação das medições da placa	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliar os 21 erros paramétricos da medição; • Verificar os resultados; • Arquivar dados eletronicamente (medidos na CMM e os transferidos para o PC); • Arquivar dados .
Estimativa da contribuição de incerteza não medida	<ul style="list-style-type: none"> • Considerar: <ul style="list-style-type: none"> a) Contribuição do ambiente (térmica); b) Contribuição da incerteza de calibração da placa. • Introduzir no software de avaliação: <ul style="list-style-type: none"> a) Resultados da calibração; b) Incerteza de apalpação; c) Avaliação da medição completa.
CMM Virtual	<ul style="list-style-type: none"> • Simular (para pelo menos 10.000 comprimentos); • Avaliar a incerteza da medição de comprimentos final.
Emissão e verificação do certificado	<ul style="list-style-type: none"> • Imprimir o certificado de calibração; • Especificar o conteúdo da fatura; • Verificar o certificado; • Assinar o certificado.
Arquivamento	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivar os dados de calibração; • Copiar a ordem de serviço interna; • Arquivar cópias do certificado de calibração, dos dados de calibração e da ordem de serviço interna.

Figura 4.4 - Síntese dos processos e passos para proceder uma calibração de CMMS usando placas de esferas

4.4 ERROS E INFLUÊNCIAS NA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Sintetizando o que foi visto até agora sobre CMM Virtual, pode-se afirmar que o seu princípio básico de funcionamento se vale da comparação dos resultados de uma medição específica simulada avaliada:

- pelas coordenadas dos pontos de apalpação nominal (onde esses pontos são gerados por um software de simulação através de parâmetros teóricos ou baseados nas medições atuais), e
- após modificação destas coordenadas de acordo com suas incertezas esperadas (as modificações são geradas a partir de erros e influências de incerteza que tem que ser introduzidas no software de simulação – MEGAKAL).

Já os erros e as influências na incerteza podem ser determinados através de:

a) medição, como os:

- erros paramétricos da geometria da CMM;
- erros de apalpação.

b) estimativas, como a:

- incerteza de calibração do padrão usado para o acesso aos erros da CMM;
- influências do meio ambiente.

Algumas considerações sucintas ainda podem ser tecidas acerca da determinação desses erros:

a) Erros de Geometria da CMM: para a determinação desses erros, também conhecidos por erros paramétricos, uma placa de furos ou de esferas (calibrada) é medida em posições estratégicas, utilizando-se uma determinada configuração de apalpadores. As medições representam os erros de geometria da CMM nas regiões transversais do volume de trabalho da CMM. As seções transversais requeridas são 3 pares perpendiculares aos 3 eixos coordenados e cada par utilizando a placa nos seus 2 lados (exceto no eixo Z que utiliza o mesmo lado da placa nas suas posições). Se o padrão (placa de furos ou de esferas) não cobrir inteiramente os comprimentos de cada um dos 3 eixos da CMM, estes eixos podem ser medidos repetitivamente em posições sobrepostas até um máximo de 3 posições sobrepostas.

b) Erros de Apalpação da CMM: para a determinação desses erros, uma esfera de referência calibrada é medida com os parâmetros de apalpação similares aos utilizados em medições usuais. Os pontos de apalpação são distribuídos sobre a superfície inteira acessível de uma esfera de referência com uma divisão de espaçamento suficientemente próxima. As medições são executadas com pelo menos 4 diferentes posições de apalpadores com $\frac{1}{4}$ de eixo da CMM de comprimento (atendendo os limites

recomendados pelo fabricante da CMM). Todos os apalpadores devem ser calibrados antes do início da medição da esfera. Os pontos medidos (mínimo de 40 pontos) sobre a esfera devem ser distribuídos de maneira que cubram as direções de apalpação da calota da esfera.

c) Erros sistemáticos da CMM: esses erros, que são introduzidos na CMM Virtual, não são usualmente determinados com uma incerteza negligente (devido à disponibilidade da incerteza de calibração da placa) nem tão pouco são determinados absolutamente no tempo, pois há de se considerar as variações da CMM, do meio ambiente e as influências ambientais de correção construtivas da CMM, o que limita a precisão da determinação dos erros. Este paradoxo é levado em consideração na CMM Virtual pela atribuição de incertezas individuais para todos os erros sistemáticos. Estas contribuições de incerteza estimadas são introduzidas no software de simulação (MEGAKAL / SIPKO).

São recomendadas avaliações periódicas na CMM ("interim checks") com um objeto de referência calibrado (como a placa de esferas, por exemplo) para verificar a validade da estimativa de incerteza e determinação de erros, ou seja, para verificar se as condições identificadas na calibração permanecem válidas e dentro dos limites pressupostos.

Finalizando, convém explicitar que, apesar de todas as vantagens advindas da utilização do método da CMM Virtual, esta ainda apresenta algumas restrições. Como principais limitações podemos citar o fato deste método ainda não avaliar o erro de cálculo cometido pelo software da CMM - porque a CMM Virtual ainda calcula os elementos geométricos com seu próprio algoritmo - e a constatação de que, para CMMs grandes, o emprego de instrumentação convencional para levantamento das componentes de erros ainda é necessário no lugar da placa de esferas /41/.

As quatro seções subseqüentes (duas neste capítulo e duas no capítulo 5) apresentarão estudos de caso realizados pelo autor fazendo uso da diretriz DKD, ou seja, aplicando o método da CMM Virtual. A seção 4.5 apresenta a aplicação da CMM Virtual para uma tarefa específica de medição; a seção 4.6 mostra como determinar a incerteza total da máquina fazendo uso de uma placa de esferas comercial tipo 5X5; a seção 5.1 simula o estudo de caso apresentado na seção 4.6 mas considerando uma placa de esferas comercial tipo 3X3; e, finalmente, a seção 5.2 realiza de fato a calibração simulada na seção 5.1 para comprovar a viabilidade da técnica proposta por esse trabalho. Cabe aqui ressaltar que calibrações, independente do método escolhido, devem ser sempre realizadas por pessoas qualificadas e treinadas. A execução de uma calibração por uma pessoa sem a devida competência, mesmo fazendo uso de um método eficaz e tecnologicamente avançado - como é o caso do método da CMM Virtual -, muito provavelmente acarretará em resultados não confiáveis.

4.5 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO ESPECÍFICA PARA UMA DADA TAREFA

O estudo de caso que será apresentado nesta seção (e também os estudos de caso que serão apresentados nas seções subseqüentes) fará referência à Figura 4.1, que ilustra o procedimento de utilização da CMM Virtual segundo à execução de três passos distintos.

Neste estudo de caso em questão, como a finalidade é a de apresentar a determinação da incerteza de medição específica de uma dada tarefa, o passo 1 (levantamento dos erros da CMM) será considerado como determinístico, ou seja, os dados obtidos neste passo serão considerados somente para efeito de "input" no software da CMM Virtual. Alguns pequenos detalhes referentes ao passo 1 serão apresentados mas somente a título de caráter ilustrativo, sem a preocupação de fornecer detalhes adicionais, os quais serão devidamente abordados, principalmente, na seção 4.6.

A máquina que foi objeto do estudo é uma CMM tipo portal, instalada em ambiente industrial climatizado, com um limite de incerteza especificado pelo usuário de $U_{3D} = (1,5 + L / 300) \mu\text{m}$, sendo 'L' um comprimento qualquer (em mm) /52/.

A Figura 4.5 e a Figura 4.6 representam, respectivamente, as disposições dos apalpadores da máquina e as disposições da placa de esferas no ensaio, de modo a cobrir cada plano coordenado da CMM .

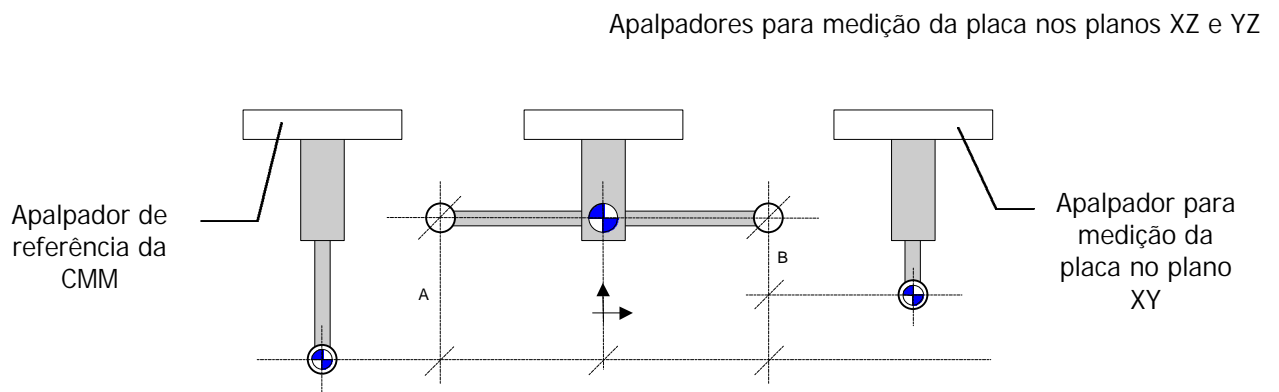
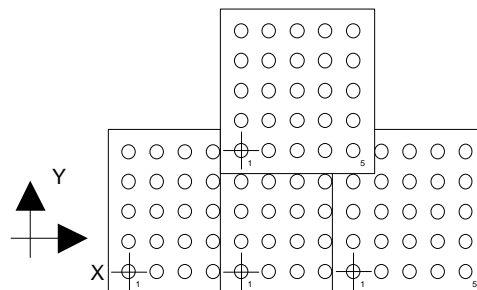
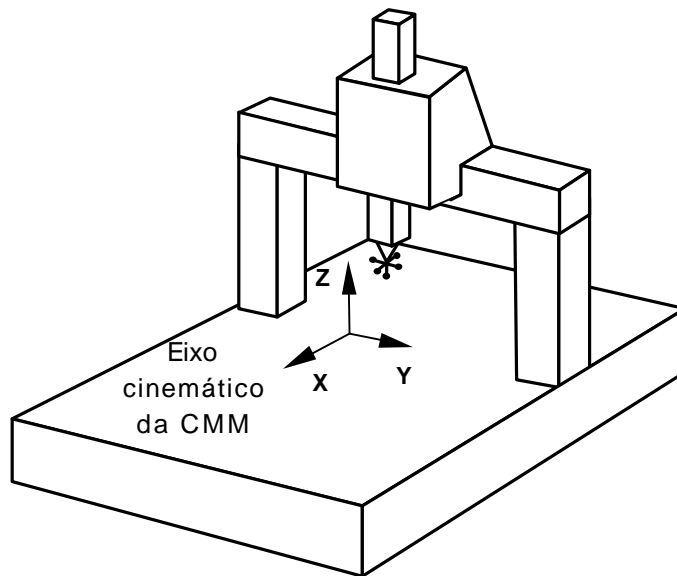
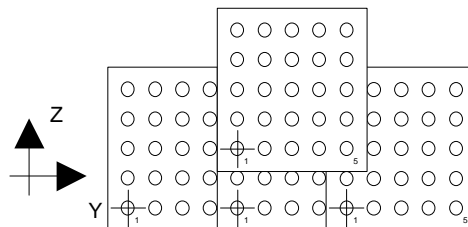


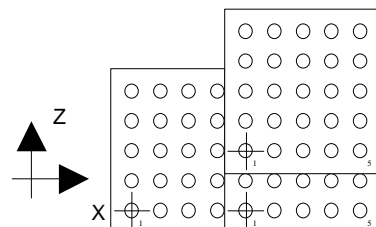
Figura 4.5 - Disposição dos apalpadores da CMM utilizados na calibração



Disposição da placa de esferas
paralelamente ao plano XY



Disposição da placa de esferas
paralelamente ao plano XZ



Disposição da placa de esferas
paralelamente ao plano YZ

Figura 4.6 - Disposições da placa padrão tipo 5x5 nos planos coordenados da CMM na sua calibração

A Figura 4.7 apresenta os erros de posição (movimento) da CMM, expressos pelas medições da placa nos planos coordenados. Pode-se observar o seguinte:

- As componentes de retilidade vertical de X e Y (Figura 4.7c e d), assim como as respectivas componentes de inclinação, sugerem existir um abaulamento das guias voltado para cima;
- Os resultados mostram a correlação coerente entre os erros de retilidade e de inclinação, muito embora ela não deva necessariamente existir. Assim, um erro de retilidade, neste caso, afeta um correspondente erro de inclinação, que por sua vez interfere no posicionamento em diferentes regiões da CMM;
- O plano XZ (Figura 4.7c) mostra um clara inclinação do portal, resultando em erros de posicionamento na região superior do volume maiores do que na inferior. Este fato também é revelado na diferença entre os resultados dos planos superior e inferior de XY;
- O plano YZ (Figura 4.7d) mostra um efeito semelhante ao descrito acima, porém inverso e de menor magnitude. Os erros são menores na região superior da CMM.

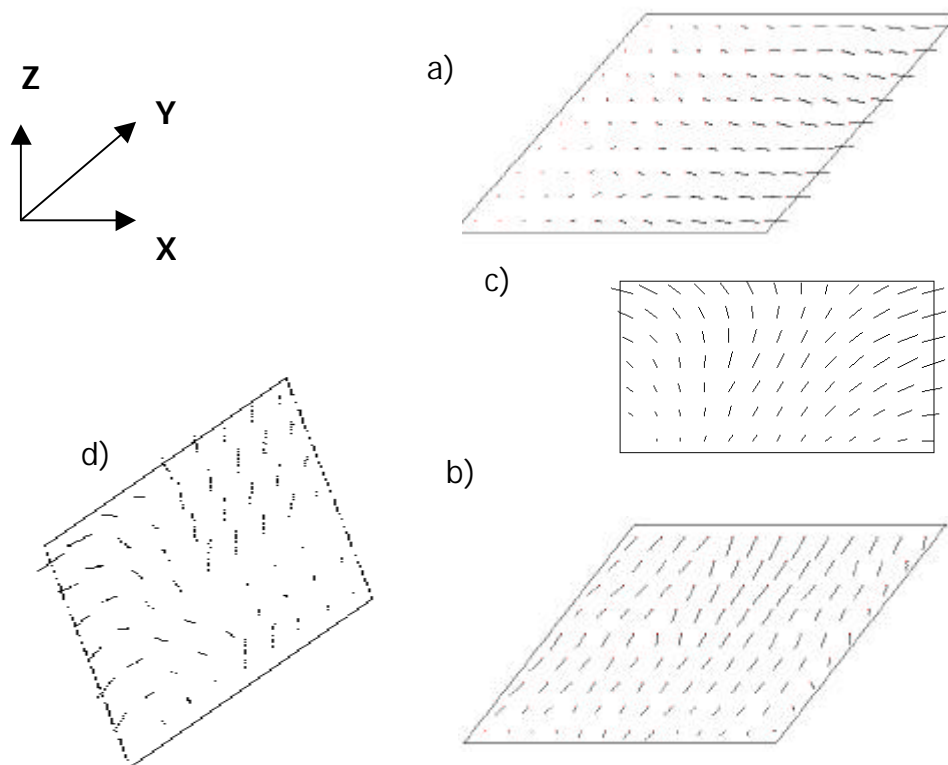


Figura 4.7 – Representação dos erros de posição (movimento) da CMM expressos pelas medições da placa padrão nos planos coordenados

A Figura 4.8 mostra algumas componentes de erros, obtidas na etapa de processamento pelo software KALKOM (Passo 1 da Figura 4.1). Os gráficos a seguir expressam algumas das observações feitas acima referentes à Figura 4.7. Estes resultados poderiam ser utilizados na atualização da matriz de erros da CMM, desde que a correção por software exista e esteja disponível para alteração.

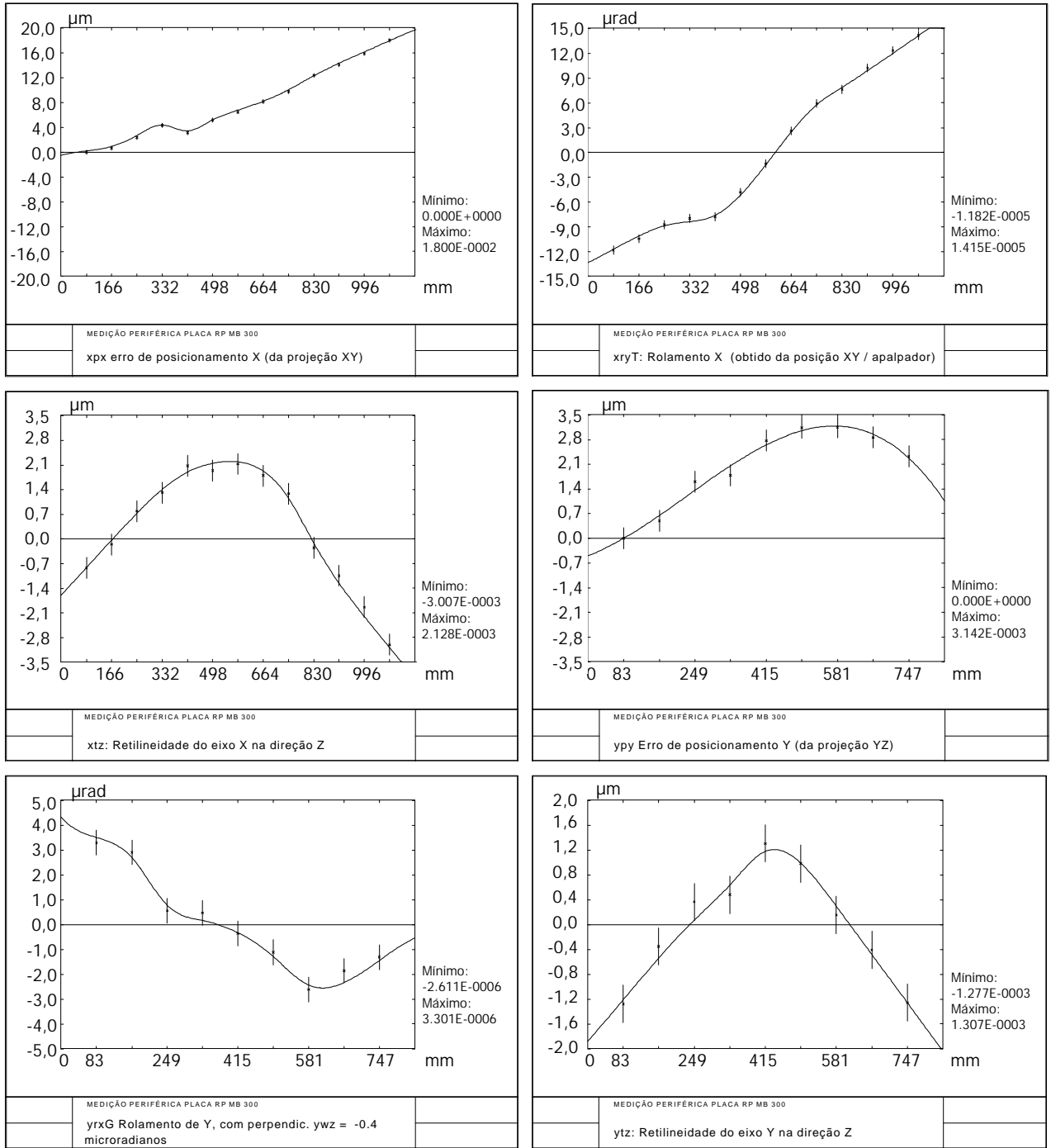


Figura 4.8 – Exemplos de representações gráficas de erros geométricos da CMM /39/

O passo seguinte (passo 2 da Figura 4.1) é a simulação computacional da medição. Nele, a medição de comprimentos será simulada, considerando dois pontos de apalpação. A análise realizada considerou apenas as componentes sistemáticas dos erros geométricos. As componentes aleatórias, como de apalpação e de estabilidade da CMM, foram desconsideradas para facilitar a análise de relações causa-efeito. A incerteza admissível especificada pelo usuário foi adotada como limite de comparação. Duas situações foram simuladas para confronto, pelo software MEGAKAL /40/ e estão descritas nas duas sub-seções a seguir.

4.5.1 Simulação de Comprimentos: disposições mais usuais

As normas e recomendações técnicas são omissas quanto à definição das posições em que as componentes devem ser medidas aventurando-se, no máximo, a sugerir orientações genéricas /2, 3/. Nesta situação, adotou-se para este estudo de caso as regiões central e inferior como sendo a região de trabalho da CMM. Neste contexto, assumiu-se como tarefa específica (passo 3 da Figura 4.1: parâmetros de medição) a medição de 6 comprimentos - 10, 100, 200, 300, 400 e 500 mm - como se fossem um conjunto de 6 blocos padrão dispostos nas diversas orientações e posições representadas na Figura 4.9.

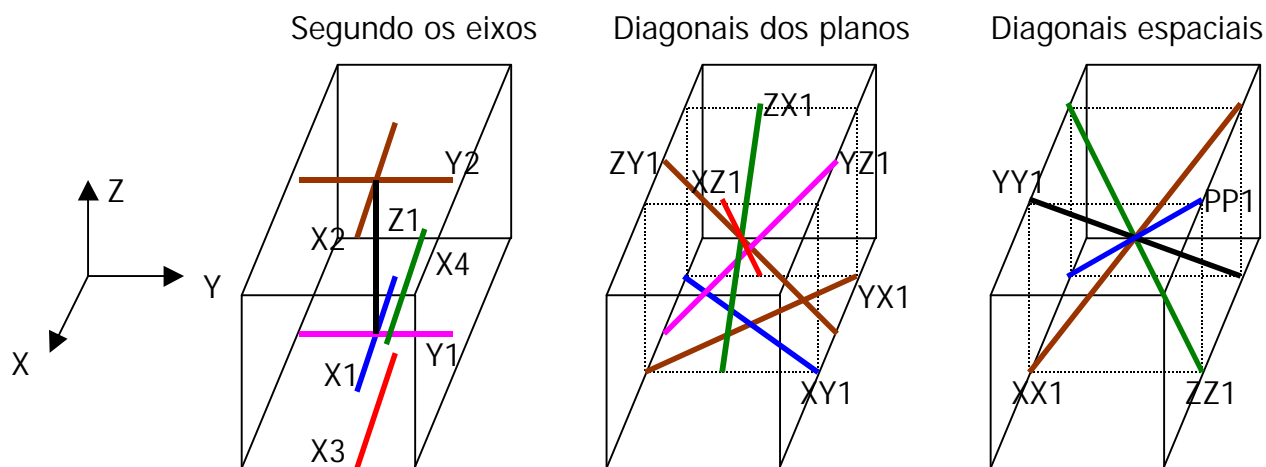


Figura 4.9 - Disposições simuladas (CMM Virtual) de blocos padrão 10 mm a 500 mm em diversas orientações e posições

Adicionalmente, foram incluídas duas posições de ensaio X e Y no plano superior do volume de medição, a fim de avaliar os erros nesta região que é usualmente desconsiderada (Figura 4.9, segundo os eixos). Essa decisão foi tomada a partir da interpretação da Figura 4.7 que levava a crer que a CMM teria um erro maior naquela região (como de fato é comprovado pela Figura 4.10).

Os resultados da avaliação de todas as orientações e posições simuladas estão representados na Figura 4.10 (segundo os eixos), na Figura 4.11 (diagonais dos planos) e na Figura 4.12 (diagonais espaciais).

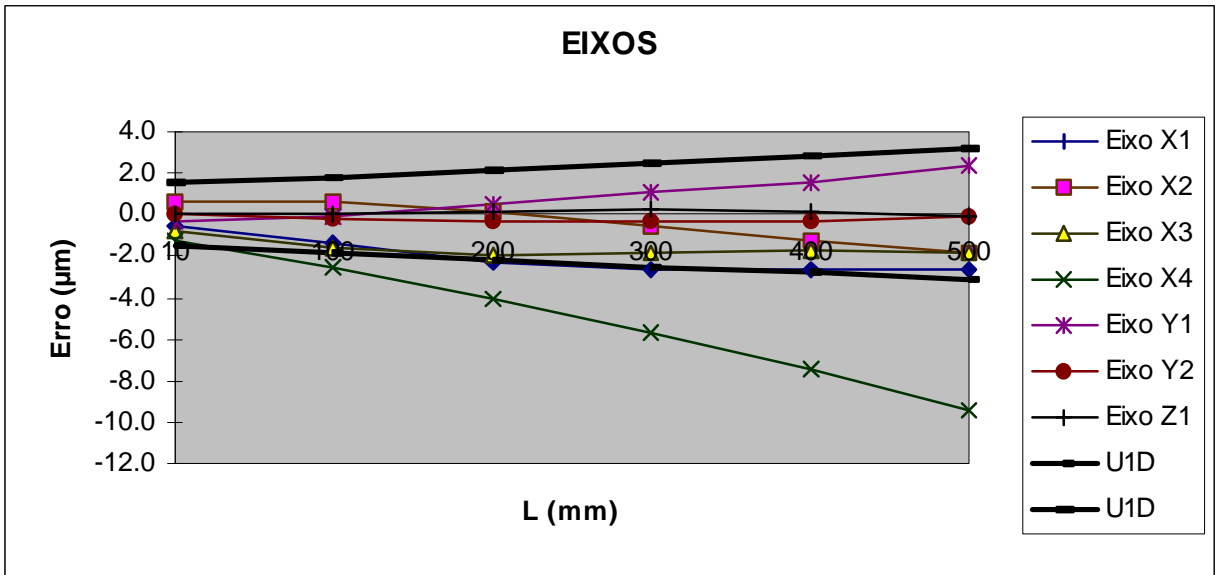


Figura 4.10 - Erros na medição de comprimentos segundo os eixos

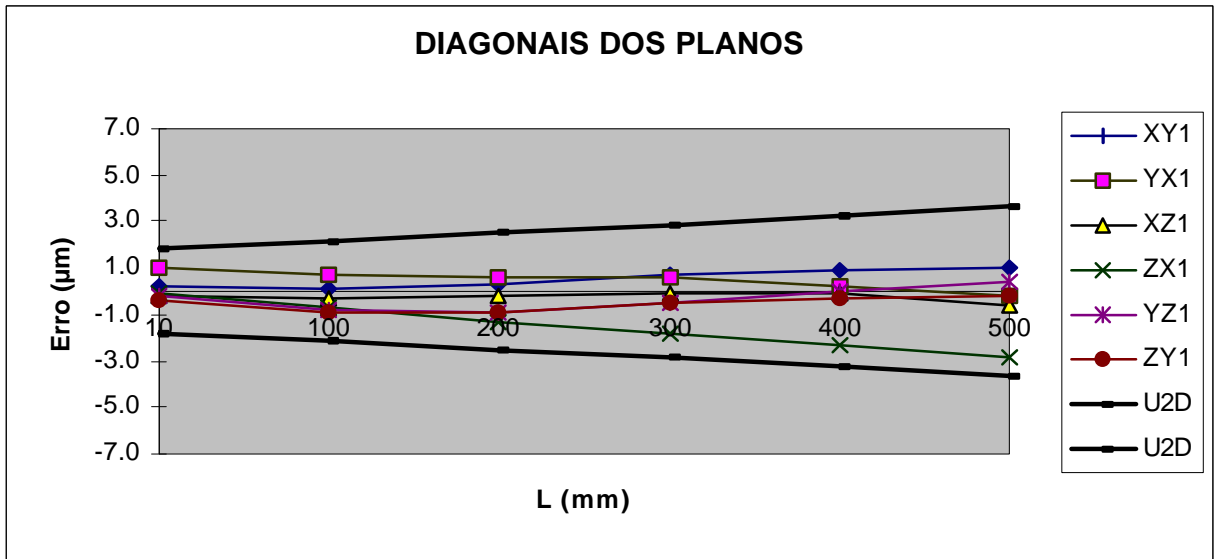


Figura 4.11 - Erros na medição de comprimentos segundo as diagonais dos planos

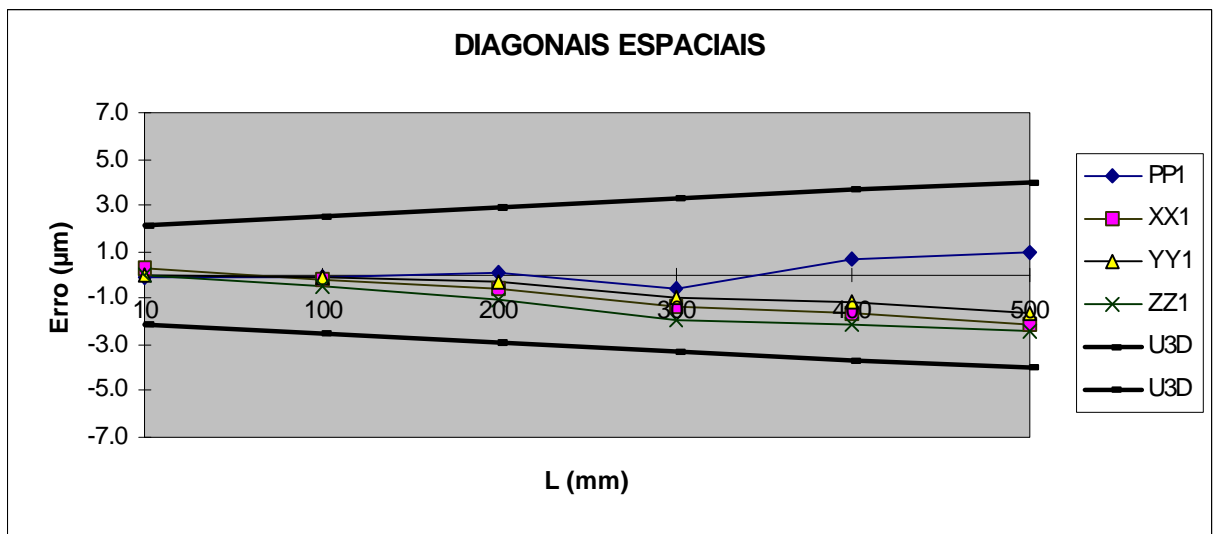


Figura 4.12 - Erros na medição de comprimentos segundo as diagonais espaciais

Pode-se concluir dos gráficos anteriores que:

- nas diagonais dos planos e nas diagonais espaciais, os erros praticamente não superam os limites especificados pelo usuário ($U_{3D}: 1,5 + L / 300$) μm , L em mm;
- na simulação segundo os eixos coordenados, constata-se que os limites são excedidos, particularmente, na região superior na direção X (como era esperado pela interpretação do inclinação do portal segundo a Figura 4.7).

Este comportamento do eixo X não seria detectado se esta região não tivesse sido submetida ao ensaio adicional (como normalmente acontece nos ensaios convencionais, que costumam desconsiderar o plano superior). A confirmação da existência deste erro foi obtida posteriormente ao ensaio, pelo próprio usuário, através da medição de um comprimento (aproximadamente 1 m) nas regiões inferior e superior da CMM.

Uma análise deste estudo de caso mostra que o maior erro (na região superior na direção X) não seria detectado por um ensaio convencional mais simples (com padrões unidimensionais), pois:

- o padrão seria colocado na região inferior da CMM, por questão de praticidade;
- o padrão normalmente tem até 500 mm de comprimento, e não avaliaria todo o volume da CMM;
- os ensaios nas diagonais encurtam ainda mais o comprimento ensaiado do eixo (com um certo padrão de comprimento).

Ainda, o efeito deste erro identificado poderia manifestar-se nas peças ou conjuntos mais altos. Neste caso, supondo a medição de um cilindro (esquadro cilíndrico), esta seria afetada da seguinte maneira:

- a seção superior apresentaria menor diâmetro e maior erro de circularidade do que a inferior;
- as geratrizes não seriam paralelas e o ângulo dependeria da posição em que o cilindro é medido; e
- outras medições de concentricidade ou posição na região superior ficariam afetadas diretamente pelo erro de posicionamento em X .

Finalmente, cabe aqui mencionar algumas observações acerca da aplicação do método da CMM Virtual, como o que foi aplicado neste estudo de caso.

- O método é principalmente recomendado para situações onde a incerteza associada ao resultado de uma medição deva ser extremamente confiável (laboratórios de calibração, produtos de alta responsabilidade, peças padrão, etc.);
- Análises quantitativa e qualitativa dos erros da CMM podem ser realizadas para subsidiar a manutenção ou as ações de otimização na utilização da máquina;

- O tempo de ensaio é menor, se comparado com outros ensaios convencionais, para um mesmo grau de expressão dos resultados;
- As especificações usuais (de fabricantes ou as fornecidas pelo usuários da CMM) tendem a ser inferiores à incerteza efetiva da CMM, pois a amostragem é, geralmente, menor e abrange pouco os efeitos dos erros de inclinação;
- O método continua evoluindo no sentido de avaliar mais concretamente as componentes de incerteza consideradas na simulação evitando, com isso, estimativas conservadoras ou otimistas.

4.6 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO TOTAL DA CMM

Neste estudo de caso, o passo 1 (levantamento dos erros da CMM) da Figura 4.1 será o foco principal das atenções. Será apresentada, portanto, a calibração realizada para a determinação das parcelas de erro que irão compor a incerteza de medição total da CMM. A máquina utilizada, os padrões e o sistema de medição de temperatura adotados, bem como as variáveis que influenciam diretamente o levantamento realizado (condições ambientais, volume de medição calibrado, etc.) além do procedimento de calibração serão introduzidos de maneira a fornecer ao leitor subsídios necessários para o entendimento do cálculo da incerteza de medição total da CMM, a ser efetuado pelo software da CMM Virtual (passo 2 da Figura 4.1). Neste estudo de caso, não serão consideradas tarefas específicas passíveis de serem realizadas na CMM Virtual (passo 3 da Figura 4.1) pois estas não constituem a essência do tema abordado nesta seção. Cabe, entretanto, ressaltar que a execução de tarefas específicas de medição é, também, perfeitamente viável neste estudo de caso e deveria ser tratada, se fosse o caso, como o exemplo apresentado na seção 4.5.

Ainda, convém mencionar que este estudo de caso propiciou a geração de um *Certificado de Calibração DKD para a CMM* avaliada, executado e emitido pelo gerente do laboratório DKD da Fundação CERTI /57/.

Para facilitar o entendimento no decorrer deste trabalho, este estudo de caso, será aqui chamado de “Método Pleno”.

A seguir serão apresentadas algumas características dos principais elementos envolvidos nesta calibração, tais como a CMM, os padrões, os softwares de avaliação, assim como algumas condições ambientais presentes na calibração e o volume de medição calibrado.

A CMM tipo portal utilizada possui as seguintes especificações / características:

Fabricante:	Carl Zeiss
Modelo:	ZMC-550
Número de série:	82098
Identificação do cliente:	RC 0542
Curso dos eixos (mm):	X 550 Y 500 Z 450
Cabeçote apalpador tipo:	High Speed
Incerteza de medição de comprimentos (especificação do fabricante segundo VDI/VDE 2617):	$U_{3D} = (1,5 + L/250) \mu\text{m}$, L em mm
Local de realização da calibração:	Laboratório de Medição por Coordenadas – LMC Fundação CERTI – Florianópolis, SC

Foram utilizados, pelo laboratório prestador do serviço, os seguintes padrões para esta calibração:

a) Placa de esferas comercial tipo 5X5

Fabricante:	Retter
Modelo:	MB 300 Typ A - 332 mm x 332 mm
Número de série:	RP0540092.04
Registro interno:	RC 1776
Incerteza de medição:	$(0,8 + L / 910) \mu\text{m}$, L em mm
Certificado de calibração:	0022/98, calibrado pela CERTI em 10/02/98

b) Esfera padrão de cerâmica

Fabricante:	Kolb und Baumann
Modelo:	30 mm
Número de série:	941102
Registro interno:	RC 1793 C
Incerteza de medição:	0,1 μm
Certificado de calibração:	3167 PTB 97, calibrado pelo PTB em 18/06/97

c) Sistema de medição de temperatura

Fabricante:	Heraeus
Modelo:	QUAT 70, sensores ambiente modelo QUAT 1340
Registro interno:	RC 2110
Incerteza de medição:	0,03 °C
Certificado de calibração:	0297/98, calibrado pela CERTI em 05/03/98

E os softwares utilizados foram:

- KALKOM: versão 2.0, para determinação das 21 componentes de erros da CMM
- TKAL: versão 2.0, para determinação dos erros de apalpação
- MEGAKAL: versão 2.0, medição específica para a calibração da CMM através de simulação

As seguintes condições ambientais estiveram presentes nesta calibração:

Temperaturas das escalas: 20,07 °C +/- 0,06 °C

Gradientes de temperatura (na região da CMM): 0,4 °C /m

A situação das temperaturas durante a calibração é apresentada resumidamente na figura a seguir: (os eixos coordenados correspondem aos descritos no volume de medição calibrado, que será apresentado após as considerações sobre as condições ambientais)

TEMPERATURAS AVALIADAS DURANTE A CALIBRAÇÃO DA CMM			
TEMPERATURAS DAS ESCALAS (°C)			
	mínima	média	máxima
Eixo X	20,03	20,06	20,10
Eixo Y	20,01	20,07	20,12
Eixo Z	não foi medida	não foi medida	não foi medida
(Para efeito de correção, assumiu-se para a escala Z a mesma temperatura de X)			
TEMPERATURAS MÉDIAS ESPACIAIS DO AMBIENTE (°C)			
Média de todos os sensores	mínima	média	máxima
	19,5	19,8	20,3
GRADIENTES DE TEMPERATURAS ESPACIAIS NO AMBIENTE (°C / m)			
		média	
	Direção X	0,2	
	Direção Y	0,4	
	Direção Z	0,2	

Figura 4.13 - Avaliação das temperaturas durante a calibração da CMM

As coordenadas medidas dos centros das esferas foram convertidas para a temperatura de 20°C através do software da CMM. Os resultados desta calibração valem portanto para a temperatura de referência de 20 °C, assumindo-se um coeficiente de dilatação das escalas de $7,8 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$. O coeficiente de dilatação térmica da placa padrão é de $11,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

O volume de medição calibrado considera, para a aplicação da diretriz DKD para este tipo de CMM, que a conversão entre as coordenadas cinemáticas e as coordenadas do fabricante ocorre como segue:

- a origem das coordenadas é mantida;
- o eixo X do fabricante torna-se o eixo Y do sistema cinemático;
- o eixo Y negativo do fabricante torna-se o eixo X do sistema cinemático;
- as coordenadas Z são mantidas.

Feitas essas considerações, é apresentado abaixo, em coordenadas universais – cadeia cinemática -, o volume de medição calibrado abrangido com a medição da placa e considerado na simulação (passo 2 da Figura 4.1):

X: de 43	até	458 mm
Y: de 26,5	até	524,5 mm
Z: de -307,5	até	8,5 mm

4.6.1 Procedimento de Calibração da CMM

Para o estudo de caso em questão, foi adotado na íntegra o procedimento de calibração de CMMs elaborado para ser utilizado no laboratório DKD da Fundação CERTI /34/. Todos os passos, os processos a eles associados além dos requisitos que devem ser considerados para cada passo foram cuidadosamente seguidos, a fim de que a calibração fosse realizada de maneira adequada e pudesse, assim, contar com uma margem segura de sucesso. Toda a documentação gerada seguiu os preceitos recomendados pelo Manual da Qualidade do laboratório prestador do serviço e os responsáveis pela execução dos passos do procedimentos foram devidamente envolvidos em todas as instâncias necessárias.

Como princípio orientativo, a descrição a seguir se limitará a apresentar sucintamente os esforços concentrados para os posicionamentos da placa e para a determinação das parcelas de erro (incluindo a determinação da incerteza de apalpação) que irão compor a incerteza de medição total da CMM.

A colocação da placa em cada uma das posições recomendadas pelo procedimento adotado se deu após a realização de um planejamento detalhado, que resultou na elaboração do “Plano das posições de medição da placa”. Esses posicionamentos podem ser observados nas três figuras que seguem.

A Figura 4.14 mostra as “Posições 11” que significam as medições da placa no plano XY superior da CMM. Os valores indicados em X_{11} , Y_{11} e Z_{11} são as coordenadas do eixo da CMM do ponto de referência do apalpador até o centro da “esfera 1” da placa para, no caso, 3 posições da placa neste plano. T_{Z11} é o comprimento do apalpador, medido a partir do seu ponto de referência até o centro da esfera de apalpação. As “Posições 12” seguem a mesma seqüência das “Posições 11”, mas agora, para o plano XY inferior.

As “Posições 21” da Figura 4.15 significam os posicionamentos da placa no plano XZ da CMM, sendo medida pelo lado “mais positivo” do eixo Y em relação a placa, enquanto que para as “Posições 22” a placa é medida pelo lado “menos positivo” do eixo Y. Para este plano houve apenas uma superposição da placa, ou seja, 2 posicionamentos da placa e 4 medições.

As “Posições 31” e “Posições 32”, no plano YZ, (Figura 4.16) seguem a mesma seqüência descrita nas posições da Figura 4.15, agora, em relação ao eixo X da CMM.

POSIÇÕES DO CENTRO DA ESFERA "1" DA PLACA NO PLANO XY DA CMM EM RELAÇÃO AO EIXO COORDENADO DA CMM E AO PONTO DE REFERÊNCIA DO

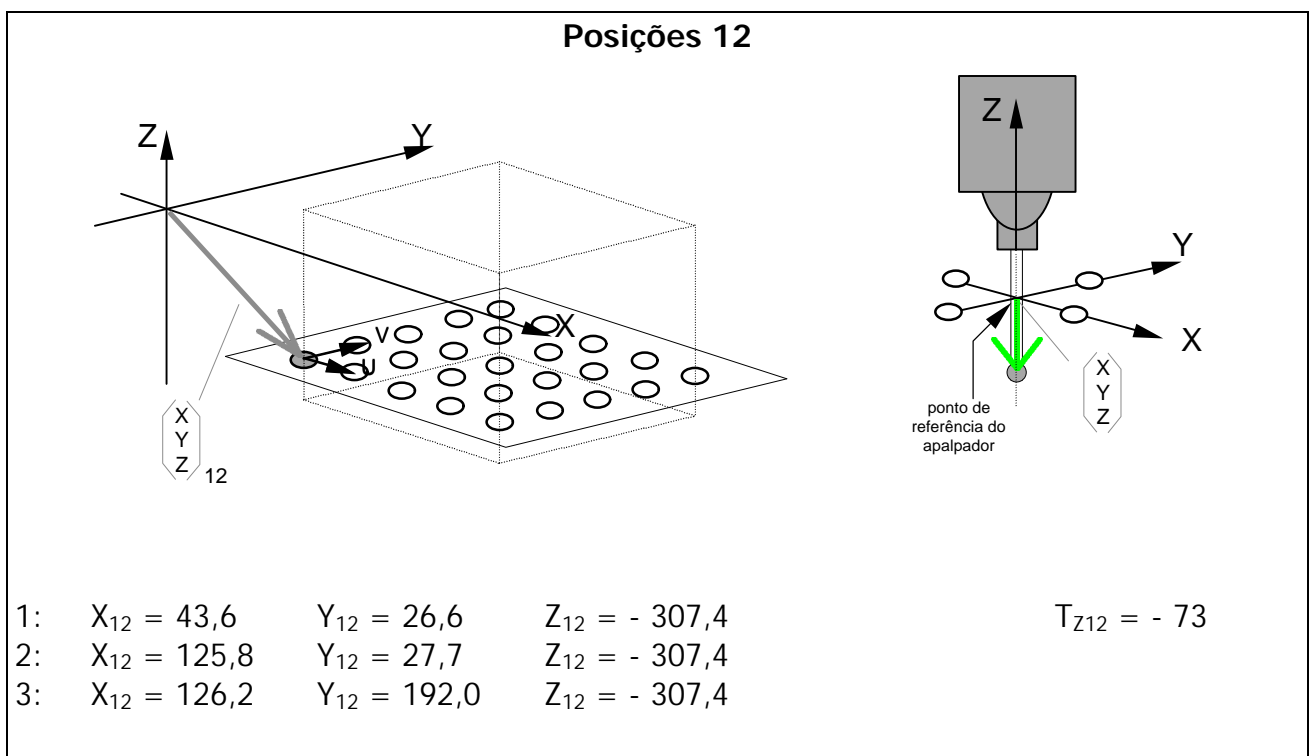
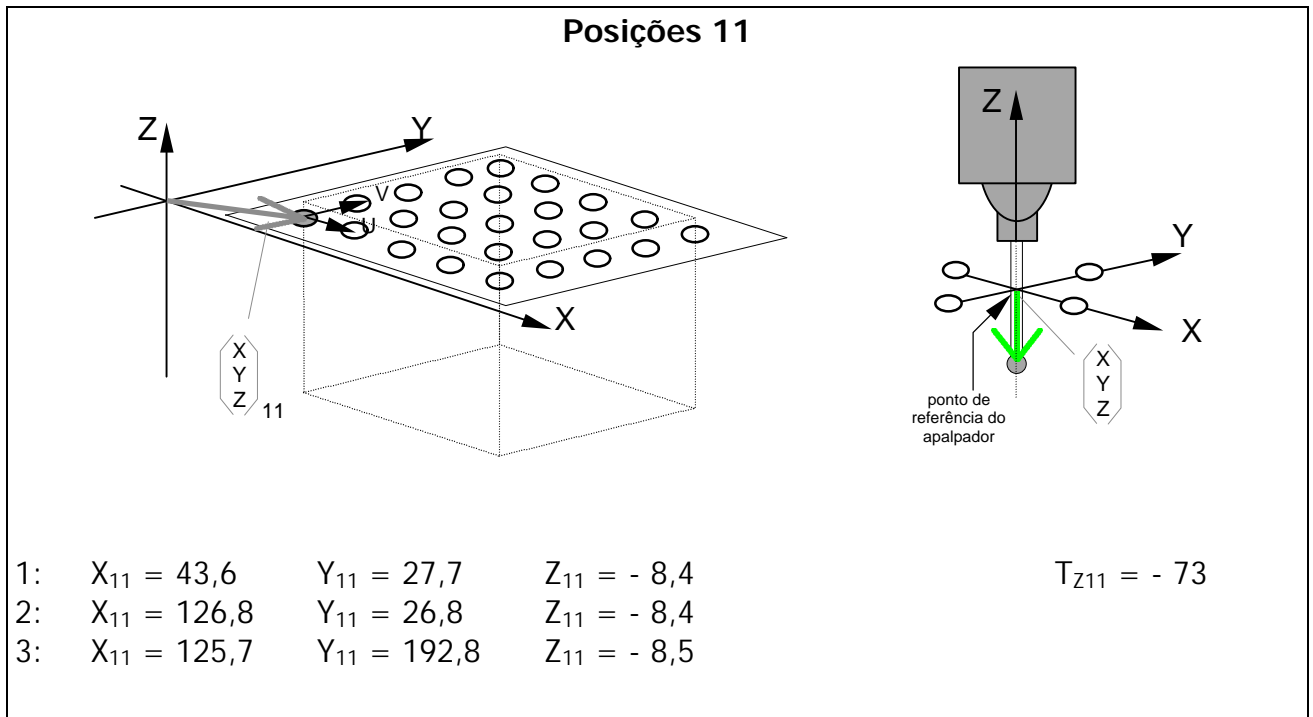
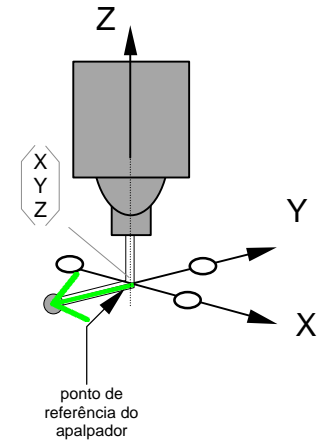
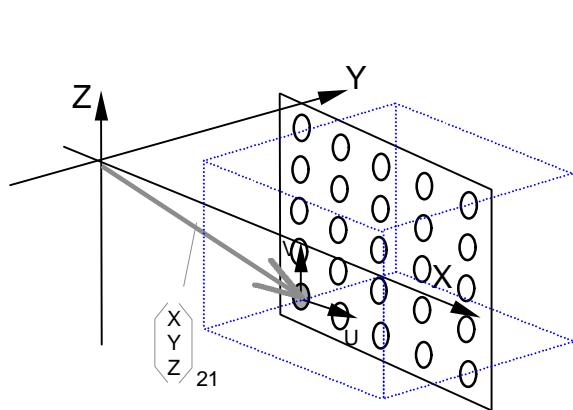


Figura 4.14 - Disposição da placa de esferas paralelamente ao plano XY de acordo com o "Plano de Posições de Medição da Placa" para esta calibração

POSIÇÕES DO CENTRO DA ESFERA "1" DA PLACA NO PLANO XZ DA CMM EM RELAÇÃO AO EIXO COORDENADO DA CMM E AO PONTO DE REFERÊNCIA DO

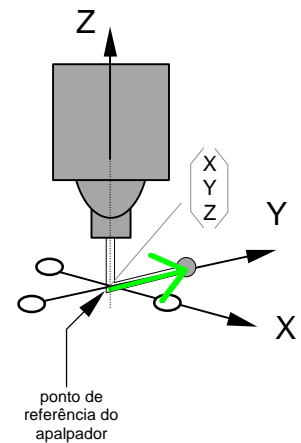
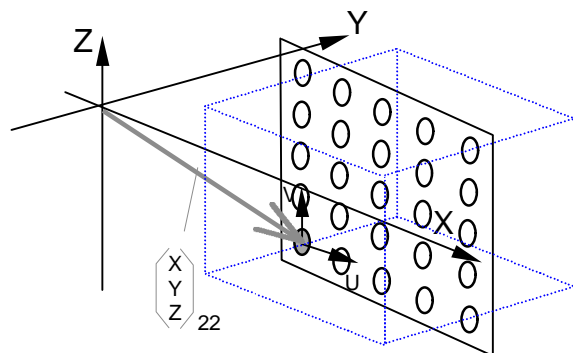
Posições 21



$$\begin{array}{l} 1: X_{21} = 42,4 \quad Y_{21} = 275,6 \quad Z_{21} = - 289,0 \\ 2: X_{21} = 124,8 \quad Y_{21} = 280,7 \quad Z_{21} = - 289,0 \end{array}$$

$$T_{Y21} = - 122$$

Posições 22



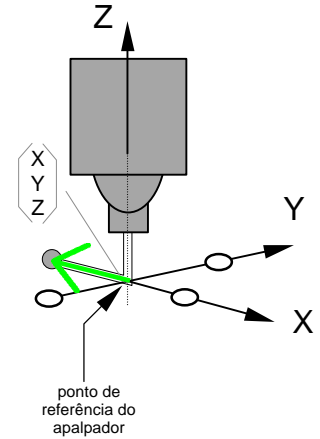
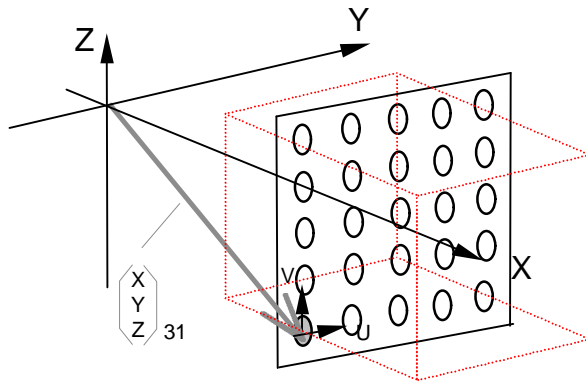
$$\begin{array}{l} 1: X_{22} = 42,4 \quad Y_{22} = 275,6 \quad Z_{22} = - 289,0 \\ 2: X_{22} = 124,8 \quad Y_{22} = 280,7 \quad Z_{22} = - 289,0 \end{array}$$

$$T_{Y22} = 122$$

Figura 4.15 - Disposição da placa de esferas paralelamente ao plano XZ de acordo com o "Plano de Posições de Medição da Placa" para esta calibração

POSIÇÕES DO CENTRO DA ESFERA "1" DA PLACA NO PLANO YZ DA CMM EM RELAÇÃO AO EIXO COORDENADO DA CMM E AO PONTO DE REFERÊNCIA DO

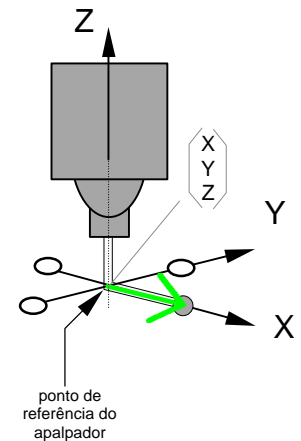
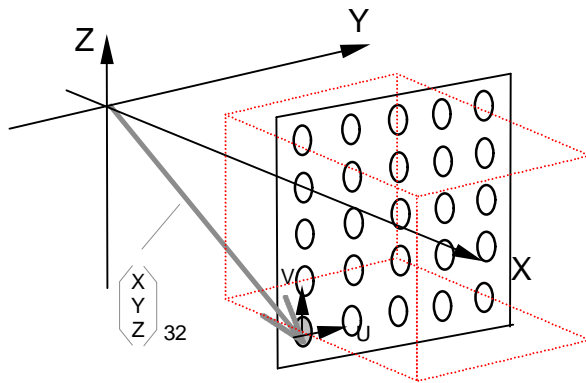
Posições 31



$$\begin{array}{l} 1: X_{31} = 251,5 \quad Y_{31} = 26,1 \quad Z_{31} = -289,0 \\ 2: X_{31} = 252,1 \quad Y_{31} = 189,8 \quad Z_{31} = -289,0 \end{array}$$

$$T_{X31} = -122$$

Posições 32



$$\begin{array}{l} 1: X_{31} = 251,5 \quad Y_{31} = 26,1 \quad Z_{31} = -289,0 \\ 2: X_{31} = 252,1 \quad Y_{31} = 189,8 \quad Z_{31} = -289,0 \end{array}$$

$$T_{X32} = 122$$

Figura 4.16 - Disposição da placa de esferas paralelamente ao plano YZ de acordo com o "Plano de Posições de Medição da Placa" para esta calibração

As 21 componentes de erro, que irão compor a incerteza de medição total da CMM, foram obtidas com auxílio do programa de avaliação KALKOM /39/, a partir das medições da placa em cada um dos planos coordenados da CMM.

A incerteza de apalpação, que também comporá a incerteza de medição total da CMM, foi avaliada com uma esfera padrão medida nas seguintes posições aproximadas:

$$X = 210 \quad Y = 420 \quad Z = 77 \quad (\text{mm}) \text{ e}$$

$$X = 300 \quad Y = 180 \quad Z = -295 \quad (\text{mm})$$

Foram empregados apalpadores de 135 mm de comprimento, orientados nas direções $\pm X$ e $\pm Y$. Uma quantidade de 338 pontos foi medida na esfera, distribuídos na calota perpendicular a cada apalpador.

4.6.2 Avaliação da Incerteza de Medição Total da CMM

A incerteza do processo de calibração e as alterações esperadas das características de erros da CMM já estão contidas no processo de cálculo do software da CMM Virtual (MEGAKAL), que fornecerá a incerteza de medição total (U_k). Tais contribuições de incerteza compõem-se de dispersões aleatórias e de parcelas estimadas de erros sistemáticos não corrigidos.

A incerteza de medição total calculada para esta CMM levou em consideração a temperatura de referência de calibração (20 °C). Isso significa que essa incerteza só poderá ser utilizada pela CMM se a temperatura das escalas e a do objeto a ser medido forem, também, corrigidas de modo a considerar a temperatura de referência. Caso esta correção não seja conduzida (pelo usuário da CMM), as contribuições correspondentes de incerteza devem ser calculadas separadamente, em função da situação térmica específica e dos coeficientes de dilatação da CMM e da peça. Tal componente de incerteza deve ser somada quadraticamente à incerteza apresentada nesta calibração.

A parcela devida às 21 componentes de erro é calculada por:

$$U_{k0(\text{espaço})} = (0,5 + L / 48) \leq 4,6 \mu\text{m} \quad L \text{ em mm}$$

Os valores obtidos são o resultado da simulação computadorizada de apalpações bidirecionais com o programa MEGAKAL / SIPKO /40/, a partir das componentes de erros e dos parâmetros de incerteza de apalpação (parcelas aleatória e sistemática). Pelo menos 10.000 comprimentos (sob distintas orientações de medição) são considerados nesta simulação. A Figura 4.17 sintetiza estes resultados de forma gráfica.

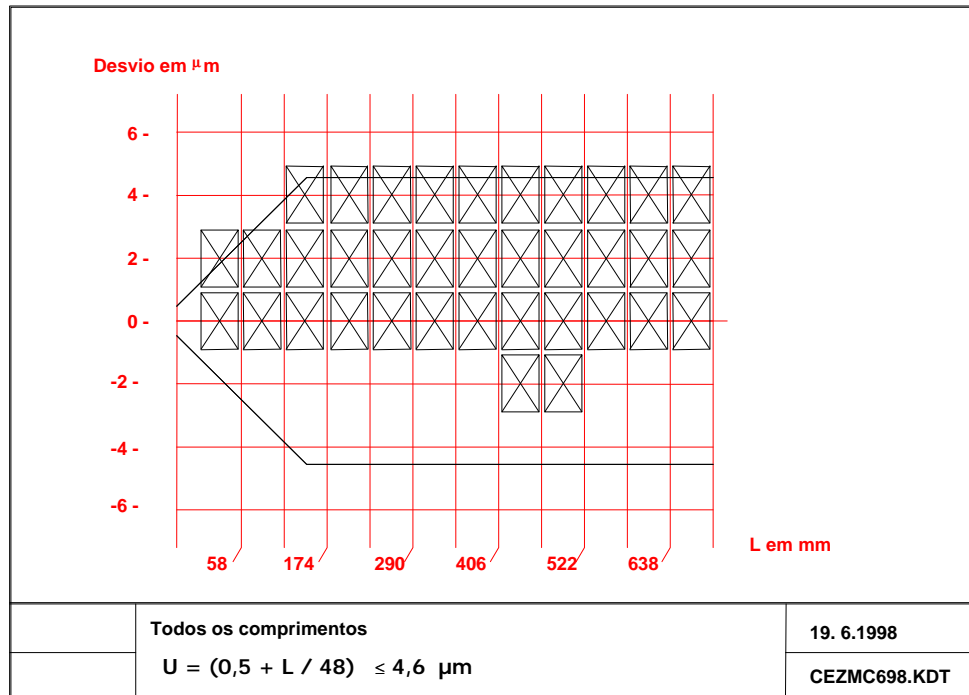


Figura 4.17 - Representação gráfica da incerteza de medição para todos os comprimentos simulados no espaço

As parcelas de influências estimadas são calculadas por:

a) $U_t = (0,7 + L / 263) \mu\text{m}$ L em mm

(para temperatura e *drift* durante os ensaios)

b) $U_v = (0,8 + L / 910) \mu\text{m}$ L em mm

(para incerteza devida ao padrão utilizado)

A **incerteza de medição total** constitui-se da incerteza de medição de comprimentos no espaço U_k (espaço) para apalpações bidirecionais em todo o volume da CMM. O seu cálculo final leva em consideração as parcelas de incerteza apresentadas anteriormente (U_{ko} , U_t , U_v), a incerteza de apalpação (U_p - fornecida pelo software de avaliação de incerteza de apalpação TKAL /48/) e , quando disponível, a incerteza gerada devido aos erros de longo período da máquina (U_e - obtidos pelo histórico de calibrações da CMM). Todas essas parcelas de erros que comporão a incerteza de medição total deste estudo de caso estão detalhadamente apresentadas na Figura 4.18 e na Figura 4.19.

Desta forma, a incerteza de medição total obtida por este estudo de caso é:

$$U_{k(\text{espaço})} = (1,2 + L / 47) \leq 5,5 \mu\text{m}$$

(L é um comprimento qualquer no espaço - em mm)

Finalizando, convém lembrar que a avaliação das contribuições de incerteza - por medição e por estimativa - terá validade somente enquanto os "interim checks" feitos na CMM mostrarem que a incerteza de medição total ($U_{k(\text{espaço})}$) não é ultrapassada.

PLANILHA PARA AVALIAÇÃO DA INCERTEZA TOTAL DA CMM – PARTE 1			
DESCRIÇÃO	Símbolo	Valor	Unidade
Distância da escala X, na direção Z	Hxz	0,45	m
Distância da escala X, na direção Y	Hxy	0,8	m
Distância da escala Y, na direção Z	Hyz	0,65	m
Altura da coluna do Portal	Hp	0,65	m
Comprimento máximo calibrado	L_{max}	0.68	m
Coeficiente de dilatação térmico da escala X	α_x	7,8	K^{-1}
Coeficiente de dilatação térmico da escala Y	α_y	7,8	K^{-1}
Coeficiente de dilatação térmico da escala Z	α_z	7,8	K^{-1}
Coeficiente de dilatação térmico da mesa da CMM	α_m	6	K^{-1}
Coeficiente de dilatação térmico do Portal	α_p	6	K^{-1}
Coeficiente de dilatação térmico da Coluna do Portal	α_c	11,5	K^{-1}
Coeficiente de dilatação térmico da Placa	α_f	11,5	K^{-1}
Temperatura média no ensaio (CMM sem correção de temperatura)	T_m $\pm \Delta T$	19,8 0,3	$^{\circ}C$ K
Temperatura esperada para a Placa (CMM sem correção de temperatura)	T_p $\pm \Delta T$	19,6 0,2	$^{\circ}C$ K
Gradiente de temperatura X (por metro)	gradX	0,2	K/m
Gradiente de temperatura Y (por metro)	gradY	0,4	K/m
Gradiente de temperatura Z (por metro)	gradZ	0,2	K/m
Varição de temperatura admissível em X	ΔT_x	0,3	K
Varição de temperatura admissível em Y	ΔT_y	0,3	K
Varição de temperatura admissível em Z	ΔT_z	0,3	K
Incerteza da correção de temperatura da escala X	ΔC_x	0,2	K
Incerteza da correção de temperatura da escala Y	ΔC_y	0,2	K
Incerteza da correção de temperatura da escala Z	ΔC_z	0,2	K
Incerteza da correção de temperatura da placa	ΔC_p	0,2	K
Drift máximo nas medições da placa	u_{t7}	0,7	μm
Ensaio de apalpação - Erro no Diâmetro da Esfera	ΔR	0,5	μm
Ensaio de apalpação - Desvio padrão	s	0,5	μm

Figura 4.18 - Planilha de cálculo das parcelas de erros que comporão a incerteza de medição total da CMM - parte 1 – /58/

PLANILHA PARA AVALIAÇÃO DA INCERTEZA TOTAL DA CMM – PARTE 2				
DESCRIÇÃO FÓRMULA	Símbolo	Fator 1	Fator 2	Fator 3
Dilatação da escala, CMM sem correção $Ut_1 = \max(\alpha_i \cdot \Delta Ti)$	Ut ₁	Utx	Uty	Utz
	0,00	2,34	2,34	2,34
Dilatação da escala, CMM com correção $Uc_1 = \max(\alpha_i \cdot \Delta Ci)$	Uc ₁	Ucx	Ucy	Ucz
	1,56	1,56	1,56	1,56
Rolamento X - xry (pitch) $Ut_2 = \alpha m \cdot \text{gradZ} \cdot Hxz$	Ut ₂	αm	gradZ	Hxz
	0,54	6,00	0,2	0,45
Guinamento X - xrz (yaw) $Ut_3 = \alpha m \cdot \text{gradY} \cdot Hxy$	Ut ₃	αm	gradY	Hxy
	1,92	6,00	0,4	0,8
Rolamento Y - yrx (pitch) $Ut_4 = \alpha p \cdot \text{gradZ} \cdot Hyz$	Ut ₄	αp	gradZ	Hyz
	0,78	6,00	0,2	0,65
Perpendicularidade xwz (squareness) $Ut_5 = \alpha c \cdot \text{gradX} \cdot Hp$	Ut ₅	αc	gradX	Hp
	1,5	11,50	0,2	0,65
Temperatura da Placa, sem correção. $Ut_6 = (Tp - 20 \text{ °C}) \cdot \alpha f$	Ut ₆	αf	Tp	
	0,00	-	-	
Temperatura da Placa., com correção $Uc_6 = \Delta Cp \cdot \alpha f$	Uc ₆	αf	ΔCp	
	2,30	11,50	0,2	
Soma dos efeitos da temperatura (prop. compr.) $Kt = \sqrt{(Ut_1, Uc_1)^2 \max + (Ut_2)^2 + (Ut_3)^2 + (Ut_4)^2 + (Ut_5)^2 + (Ut_6, Uc_6)^2 \max}$	Kt			
	3,81			
Incerteza Tipo A - simulação medição compr. - * MEGAKAL (com / sem incerteza apalpação)	Uko	Ako	Kko	Bko
		0,50	21,00	4,60
Incerteza de calibração da Placa (do processo)	Uv	Av	Kv	
		0,80	1,10	
Incerteza devido aos efeitos da temperatura $At = Ut_7$	Ut	At	Kt	
		0,7	3,81	
Incerteza de apalpação (se não introd. megakal) $Up = 2 \cdot \Delta R + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot s$	Up	ΔR	s	
Erros de longo período da CMM (mudança estrut.) * histórico de calibrações ou 1/2 U _{3D} fabric.	Ue	Ae	Ke	
Incerteza TOTAL $Ak = \sqrt{(Ako)^2 + (Up)^2 + (Av)^2 + (At)^2 + (Ae)^2}$	Ak			
	1,17			
Incerteza TOTAL $Kk = \sqrt{(Kko)^2 + (Kv)^2 + (Kt)^2 + (Ke)^2}$	Kk			
	21,37			
Incerteza TOTAL $Bk = \sqrt{(Bko)^2 + (Up)^2 + (Av)^2 + (At)^2 + [(Kv)^2 + (Kt)^2 + (Ke)^2] \cdot (L_{\max})^2}$	Bk			
	5,54			

Obs.: A apresentação da parcela "K" nesta tabela considera L em μm e o coeficiente na forma não fracionária

Figura 4.19 - Planilha de cálculo das parcelas de erros que compõem a incerteza de medição total da CMM - parte 2 – /58/

CAPÍTULO 5

UMA TÉCNICA ECONÔMICA, RÁPIDA E METROLOGICAMENTE EFICIENTE PARA CALIBRAÇÃO DE CMMS

Neste capítulo será desenvolvida a proposta deste trabalho, que é de adequar o Método da CMM Virtual para utilização nas indústrias de modo a torná-lo mais econômico e rápido mantendo o nível de eficiência metrológico semelhante ao método original.

Como base para o desenvolvimento da nova técnica, será utilizado o estudo de caso apresentado na seção 4.6, onde se aplicou o Método da CMM Virtual com uma Placa Padrão de Esferas comercial tipo 5x5, seguindo a metodologia em sua plenitude. Assim, este método será denominado neste trabalho de "*Método Pleno*".

Primeiramente, a técnica proposta será definida e caracterizada, através das suas principais simplificações e será denominada de "*Técnica Enxuta*". Em seguida dois estudos de caso serão apresentados: o primeiro, baseado no "*Método Pleno*", simulando a "*Técnica Enxuta*" utilizando a placa padrão 5x5 como se fosse uma do tipo 3x3 e considerando os mesmos elementos e condições utilizados (CMM, apalpadores, condições ambientais, software, etc.), servirá para avaliar a viabilidade da técnica.

O segundo caso executará, de fato, a calibração da CMM através do "*Técnica Enxuta*" como forma de validação da técnica proposta.

Finalmente será feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos com o Método Pleno e a Técnica Enxuta.

5.1 DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA TÉCNICA ENXUTA

A Técnica Enxuta está baseada no Método da CMM Virtual e propõe uma simplificação quando do uso de placas padrão de esferas mais conhecidas, utilizadas e comercialmente disponíveis (tipo 5x5) para calibração de máquinas de medir por coordenadas. Para tanto, calibra-se a CMM de acordo com o Método da CMM Virtual mas utilizando a placa de esferas tipo 5X5 como sendo uma tipo 3X3 (Figura 5.1). Placas do tipo 3x3 também poderiam ser comercializadas, mas, possivelmente, não com um custo muito abaixo de uma 5x5. Com isso, as tipo 5x5 ainda tem a vantagem de poderem ser utilizadas em sua totalidade para uma calibração ainda mais detalhada, como por exemplo, para a correção da matriz de correção da CMM, conhecida como CAA (Computer Aided Accuracy).

As principais simplificações para esta técnica proposta são:

- Redução do número de esferas para cada medição da placa padrão de 50 para 18 (mantendo-se o sentido espiral de medição, iniciando na esfera 1 em sentido

positivo do eixo X da placa na medição de ida e reversão do sentido na volta), ou seja, uma placa padrão tipo 5x5 será tratada como 3x3;

- Redução do número de posicionamentos da esfera padrão, na avaliação da incerteza de apalpação, de 2 (na diagonal do volume de medição da CMM) para 1 (no parte central do volume de medição da CMM);
- Redução do número de apalpadores para a medição da esfera padrão, na avaliação da incerteza de apalpação, de 4 para 2, sendo um na horizontal e outro na vertical (valor mínimo de 40 pontos apalpados em cada posição da esfera padrão).

Cabe ressaltar que, nesta técnica proposta, poderá acontecer a diminuição de posicionamentos da placa padrão caso o volume de medição da CMM seja ultrapassado quando de uma superposição da placa.

Estas simplificações foram embasadas também levando em consideração algumas recomendações sugeridas pelas diretriz VDI/VDE 2617 e norma ISO 10360-2 quanto ao número mínimo de posicionamentos e direções dos padrões utilizados bem como quanto ao número mínimo de comprimentos medidos.

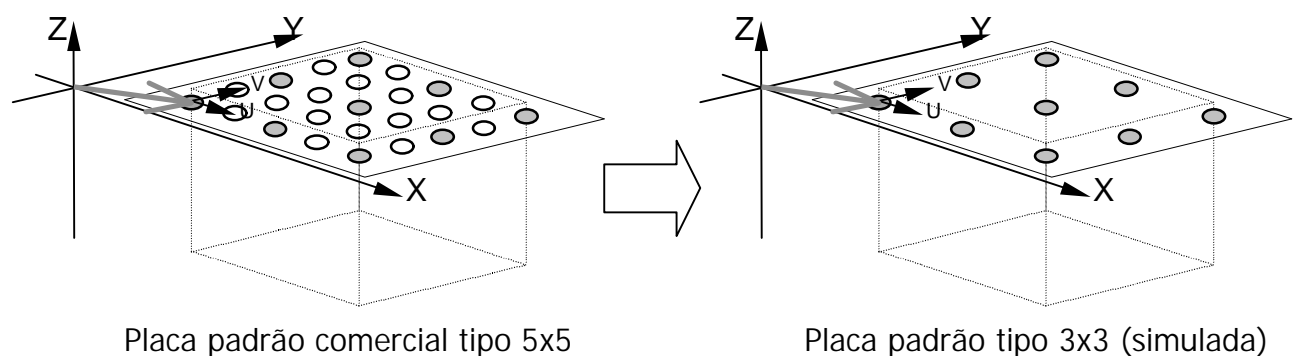


Figura 5.1 – Simulação de uma placa de esferas 3x3 a partir de uma 5x5

5.2 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO TOTAL DA CMM ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO PELA TÉCNICA ENXUTA

Esta seção simulará o estudo de caso do Método Pleno considerando a placa padrão 5x5 como sendo 3x3, para que a viabilidade da técnica seja analisada e avaliada. Adicionalmente, essa simulação ajudará a melhor caracterizar a técnica sugerida. Este experimento foi conduzido a partir do empiriocriticismo sugerido pelos filósofos alemães Richard Avenarius (1843-1896) e Ernst Mach (1878-1916) /59/. O estudo foi caracterizado, sobretudo, pela concepção da experiência como soma de impressões e

sensações subjetivas do autor. Entretanto, ao contrário do que foi pregado por Avenarius e Mach, este trabalho não nega o valor da ciência, nem tão pouco dos princípios técnicos que podem levar à comprovação científica da tese e ao conhecimento da verdade. Desta forma, após apresentado este estudo de caso, a seção seguinte se encarregará de imprimir a este experimento o caráter científico necessário e desejado, validando o que aqui é proposto.

Esta simulação fez uso dos mesmos elementos e condições (CMM, palpadores, condições ambientais, software, etc.) do exemplo descrito no Método Pleno (seção 4.6). Como simplificações mais relevantes temos:

- Redução dos posicionamentos da placa: (de 10 – Método Pleno – para 7 posicionamentos);
- Redução do número de esferas medidas: (de 50 – Método Pleno - para 18 esferas a cada medição da placa).

A Figura 5.2 mostra uma comparação entre o Método Pleno e a Técnica Enxuta no que se refere ao número de posicionamentos e medições realizadas na placa padrão.

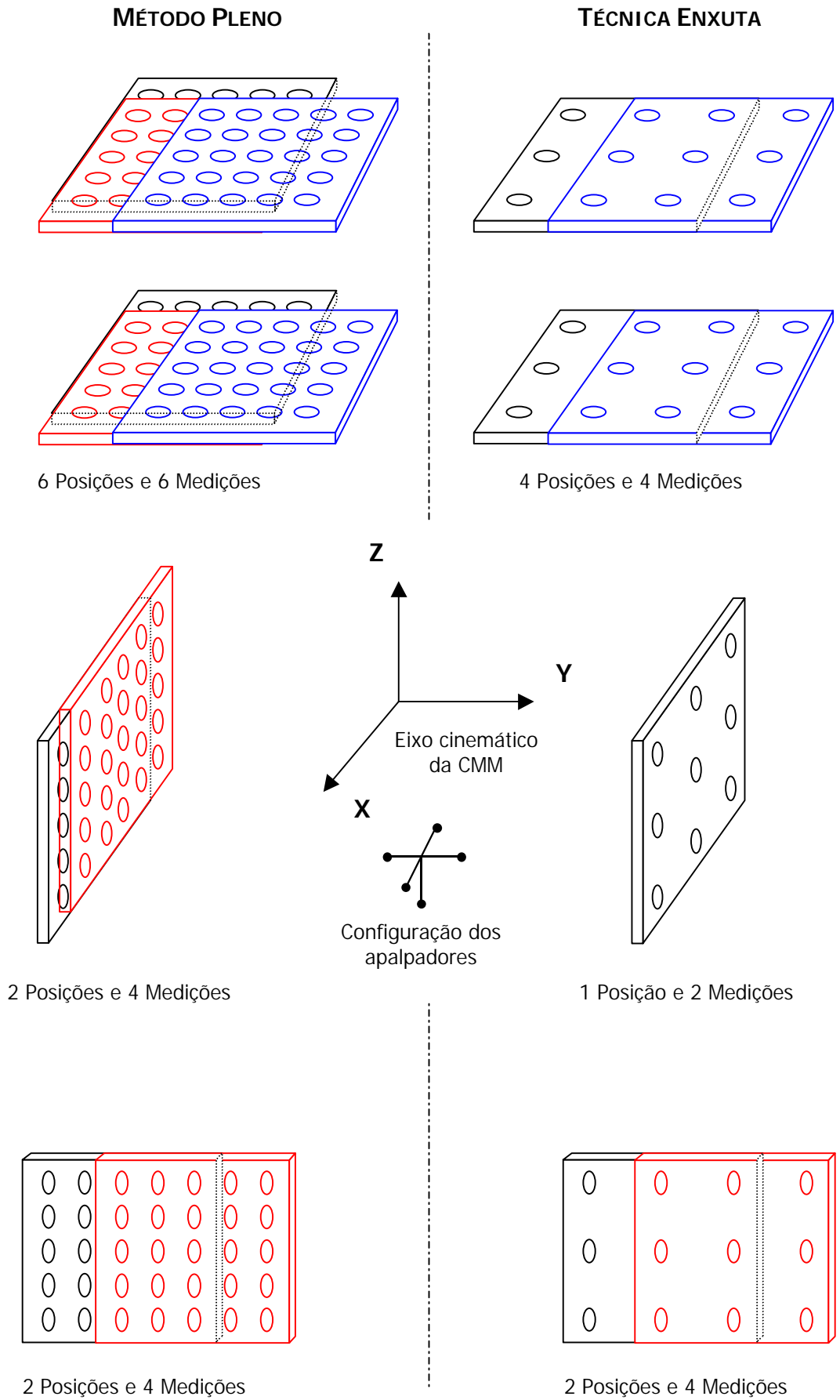


Figura 5.2 – Comparação entre o número de posicionamentos e medições realizadas com a placa de esferas no Método Pleno e com a Técnica Enxuta

Convém mencionar que a simulação dos comprimentos medidos levou em consideração um volume de medição calibrado similar ao do estudo de caso do *Método Pleno*. Analogamente ao que foi feito naquele caso, também aqui foi gerada uma malha de pontos (Figura 5.3), de acordo com os mesmos parâmetros utilizados no *Método Pleno*, sobre a qual foram simuladas todas as distâncias paralelas a cada um dos eixos X, Y e Z, combinando todos os pontos entre si. A incerteza de medição de comprimentos foi avaliada através do programa MEGAKAL/ SIPKO que simula a medição de diferentes comprimentos sob distintas orientações de medição.

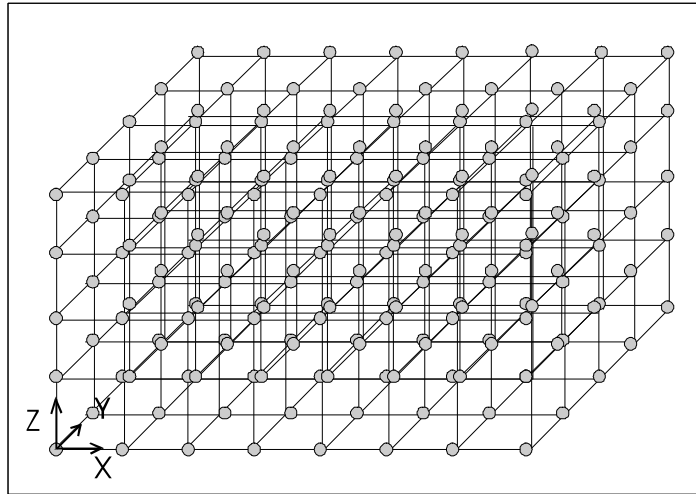


Figura 5.3 – Exemplo de uma malha de pontos gerada sobre a qual foram simuladas todas as distâncias entre si /52/

5.2.1 Avaliação da Incerteza de Medição Total da CMM

O processo de cálculo da incerteza de medição total da CMM segue o mesmo procedimento realizado no *Método Pleno*. O maior diferencial deste cálculo está no fato de que o número de comprimentos avaliados para efeito de cálculo é de 7.000 (contra os 10.000 comprimentos utilizados no estudo de caso do *Método Pleno*). Esta menor quantidade de comprimentos é justificada por uma conjunção de dois fatores: (1) ter-se considerado o mesmo procedimento para a determinação da malha do volume de trabalho calibrado e (2) ter-se diminuído o número de esferas da placa (de 25 para 9) o que faz com que o número de comprimentos entre as esferas também diminua.

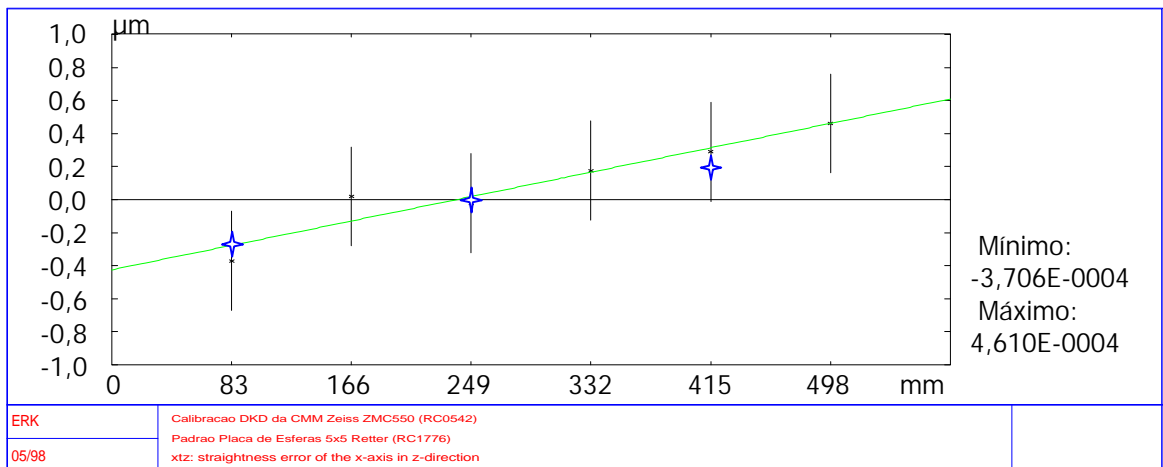
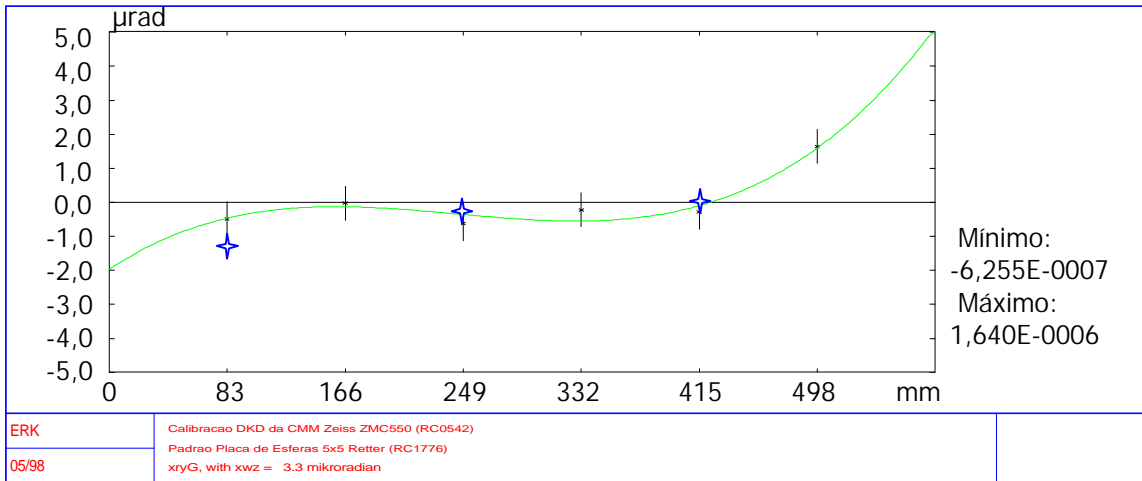
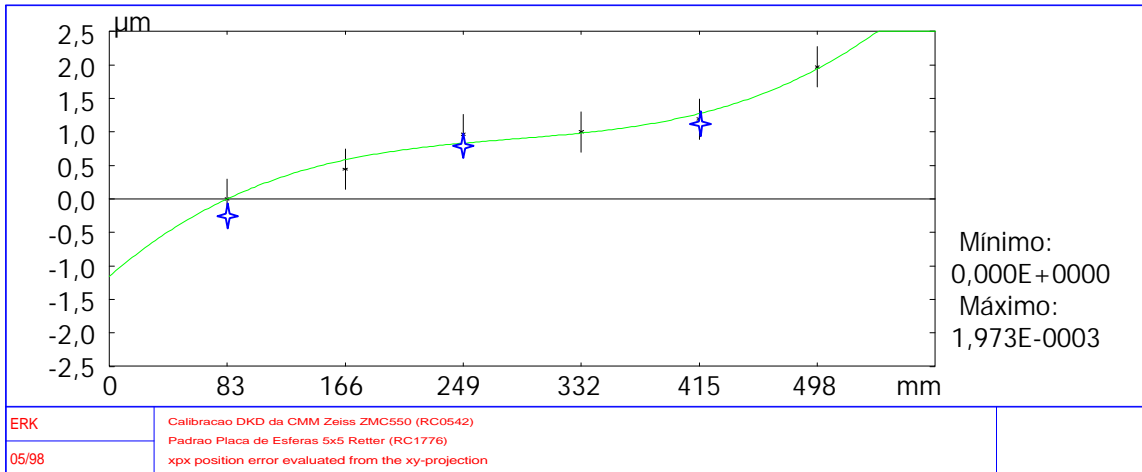
A parcela devida às 21 componentes de erro é calculada por:

$$U_{ko(\text{espaço})} = (0,4 + L / 36) \leq 5,1 \mu\text{m} \quad L \text{ em mm}$$

A Figura 5.4 apresenta alguns dos gráficos, gerados pelo software KALKOM, de erros geométricos da CMM do eixo X para o *Método Pleno* e para a simulação da *Técnica Enxuta* (baseada nos dados obtidos na *calibração completa*). A comparação desses gráficos serve como uma primeira análise da factibilidade da técnica proposta.

MÉTODO PLENO

SIMULAÇÃO DO TÉCNICA ENXUTA



Obs.: A repetitividade apresentada no resultado do Método Pleno varia de $\pm 2s$

Figura 5.4 – Comparação entre os gráficos de Posicionamento (da projeção XY), Rolamento e de Retilidade (na direção Z) do eixo X do Método Pleno e da Simulação da Técnica Enxuta

De maneira idêntica ao que foi executado para o caso do *Método Pleno*, os valores obtidos são o resultado da simulação computadorizada de apalpações bidirecionais com o programa MEGAKAL / SIPKO, a partir das componentes de erros e dos parâmetros de incerteza de apalpação (parcelas aleatória e sistemática). Em torno de 7.000 comprimentos (sob distintas orientações de medição) são considerados nesta simulação. A Figura 5.5 sintetiza estes resultados de forma gráfica.

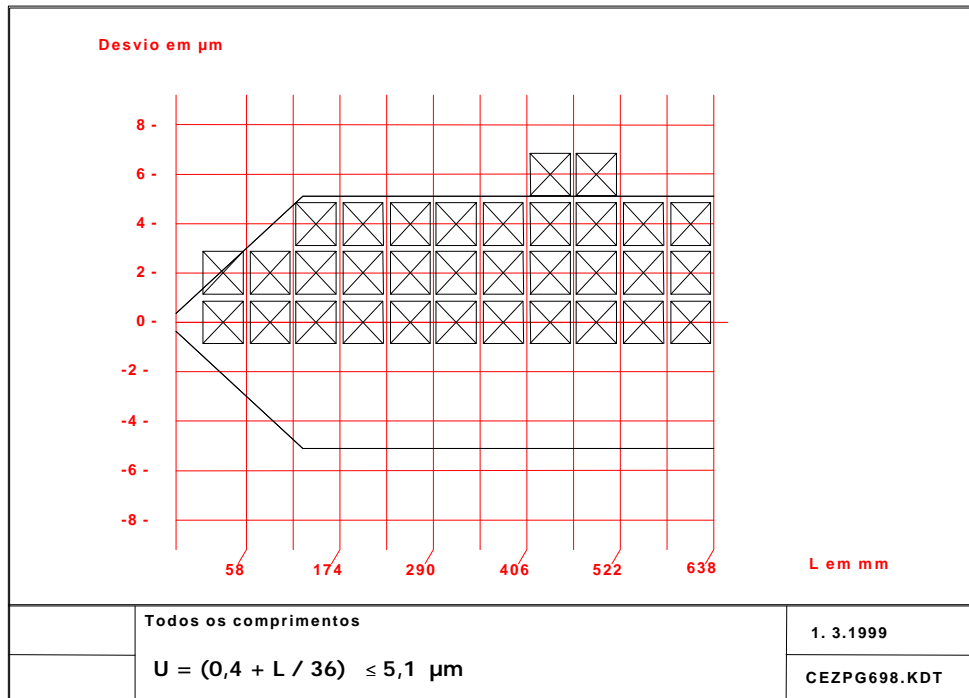


Figura 5.5 – Representação gráfica da incerteza de medição para todos os comprimentos simulados no espaço

As parcelas de influências estimadas são calculadas por:

a) $U_t = (0,7 + L / 263) \mu\text{m}$ L em mm
(para temperatura e *drift* durante os ensaios)

b) $U_v = (0,8 + L / 910) \mu\text{m}$ L em mm
(para incerteza devida ao padrão utilizado)

A determinação simulada da **incerteza de medição total**, ou seja, a incerteza de medição de comprimentos no espaço U_k (espaço) para apalpações bidirecionais em todo o volume da CMM, sofrerá influência direta da parcela calculada relativa às 21 componentes

de erros (U_{k0}). Essa e as outras parcelas de erros que comporão a incerteza de medição total deste estudo de caso estão detalhadamente apresentadas na Figura 5.6 e Figura 5.7. A incerteza de medição total obtida por este estudo de caso é, então, calculada por:

$$U_{k(\text{espaço})} = (1,1 + L / 35) \leq 5,9 \mu\text{m}$$

(L é um comprimento qualquer no espaço - em mm)

Este resultado obtido através da simulação da placa tipo 3X3, apesar de ser bastante satisfatório, não se encontra - até esta altura do trabalho - respaldado por uma base científica. Esta comprovação de cunho teórico-científico será apresentada na próxima seção.

PLANILHA PARA AVALIAÇÃO DA INCERTEZA TOTAL DA CMM – PARTE 1			
DESCRIÇÃO	Símbolo	Valor	Unidade
Distância da escala X, na direção Z	Hxz	0,45	m
Distância da escala X, na direção Y	Hxy	0,8	m
Distância da escala Y, na direção Z	Hyz	0,65	m
Altura da coluna do Portal	Hp	0,65	m
Comprimento máximo calibrado	L _{max}	0,68	m
Coeficiente de dilatação térmico da escala X	α_x	7,8	K ⁻¹
Coeficiente de dilatação térmico da escala Y	α_y	7,8	K ⁻¹
Coeficiente de dilatação térmico da escala Z	α_z	7,8	K ⁻¹
Coeficiente de dilatação térmico da mesa da CMM	α_m	6	K ⁻¹
Coeficiente de dilatação térmico do Portal	α_p	6	K ⁻¹
Coeficiente de dilatação térmico da Coluna do Portal	α_c	11,5	K ⁻¹
Coeficiente de dilatação térmico da Placa	α_f	11,5	K ⁻¹
Temperatura média no ensaio (CMM sem correção de temperatura)	T _m $\pm \Delta T$	19,8 0,3	°C K
Temperatura esperada para a Placa (CMM sem correção de temperatura)	T _p $\pm \Delta T$	19,6 0,2	°C K
Gradiente de temperatura X (por metro)	gradX	0,2	K/m
Gradiente de temperatura Y (por metro)	gradY	0,4	K/m
Gradiente de temperatura Z (por metro)	gradZ	0,2	K/m
Varição de temperatura admissível em X	ΔT_x	0,3	K
Varição de temperatura admissível em Y	ΔT_y	0,3	K
Varição de temperatura admissível em Z	ΔT_z	0,3	K
Incerteza da correção de temperatura da escala X	ΔC_x	0,2	K
Incerteza da correção de temperatura da escala Y	ΔC_y	0,2	K
Incerteza da correção de temperatura da escala Z	ΔC_z	0,2	K
Incerteza da correção de temperatura da placa	ΔC_p	0,2	K
Drift máximo nas medições da placa	ut ₇	0,7	μm
Ensaio de apalpação - Erro no Diâmetro da Esfera	ΔR	0,7	μm
Ensaio de apalpação - Desvio padrão	s	0,8	μm

Figura 5.6 - Planilha de cálculo das parcelas de erros que comporão a incerteza de medição total da CMM - parte 1 - /58/

PLANILHA PARA AVALIAÇÃO DA INCERTEZA TOTAL DA CMM – PARTE 2					
DESCRIÇÃO FÓRMULA	Símbolo	Fator 1	Fator 2	Fator 3	
Dilatação da escala, CMM sem correção $Ut_1 = \max(\alpha_i \cdot \Delta T_i)$	Ut ₁	Utx	Uty	Utz	
	0,00	2,34	2,34	2,34	
Dilatação da escala, CMM com correção $Uc_1 = \max(\alpha_i \cdot \Delta C_i)$	Uc ₁	Ucx	Ucy	Ucz	
	1,56	1,56	1,56	1,56	
Rolamento X - xry (pitch) $Ut_2 = \alpha_m \cdot \text{gradZ} \cdot Hxz$	Ut ₂	α_m	gradZ	Hxz	
	0,54	6,00	0,20	0,45	
Guinamento X - xrz (yaw) $Ut_3 = \alpha_m \cdot \text{gradY} \cdot Hxy$	Ut ₃	α_m	gradY	Hxy	
	1,92	6,00	0,40	0,80	
Rolamento Y - yrx (pitch) $Ut_4 = \alpha_p \cdot \text{gradZ} \cdot Hyz$	Ut ₄	α_p	gradZ	Hyz	
	0,78	6,00	0,20	0,65	
Perpendicularidade xwz (squareness) $Ut_5 = \alpha_c \cdot \text{gradX} \cdot Hp$	Ut ₅	α_c	gradX	Hp	
	1,50	11,50	0,20	0,65	
Temperatura da Placa, sem correção. $Ut_6 = (T_p - 20 \text{ }^\circ\text{C}) \cdot \alpha_f$	Ut ₆	α_f	Tp		
	0,00	-	-		
Temperatura da Placa., com correção $Uc_6 = \Delta C_p \cdot \alpha_f$	Uc ₆	α_f	ΔC_p		
	2,30	11,50	0,20		
Soma dos efeitos da temperatura (prop. compr.)	Kt				
	3,81				
$Kt = \sqrt{(Ut_1, Uc_1)^2 \max + (Ut_2)^2 + (Ut_3)^2 + (Ut_4)^2 + (Ut_5)^2 + (Ut_6, Uc_6)^2 \max}$					
Incerteza Tipo A - simulação medição compr. - * MEGAKAL (com / sem incerteza apalpação)	Uko	Ako	Kko	Bko	
		0,40	28,00	5,10	
Incerteza de calibração da Placa (do processo)	Uv	Av	Kv		
		0,80	1,10		
Incerteza devido aos efeitos da temperatura $At = Ut_7$	Ut	At	Kt		
		0,70	3,81		
Incerteza de apalpação (se não introd. megakal) $Up = 2 \cdot \Delta R + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot s$	Up	ΔR	s		
Erros de longo período da CMM (mudança estrut.) * histórico de calibrações ou 1/2 U _{3D} fabric.	Ue	Ae	Ke		
Incerteza TOTAL	Ak				
$Ak = \sqrt{(Ako)^2 + (Up)^2 + (Av)^2 + (At)^2 + (Ae)^2}$					
	1,14				
Incerteza TOTAL	Kk				
$Kk = \sqrt{(Kko)^2 + (Kv)^2 + (Kt)^2 + (Ke)^2}$					
	28,28				
Incerteza TOTAL	Bk				
$Bk = \sqrt{(Bko)^2 + (Up)^2 + (Av)^2 + (At)^2 + [(Kv)^2 + (Kt)^2 + (Ke)^2] \cdot (L_{\max})^2}$					
	5,87				

Obs.: A apresentação da parcela "K" nesta tabela considera L em μm e o coeficiente na forma não fracionária

Figura 5.7 - Planilha de cálculo das parcelas de erros que comporão a incerteza de medição total da CMM - parte 2 - /58/

5.3 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO TOTAL DA CMM ATRAVÉS DE CALIBRAÇÃO PELA TÉCNICA ENXUTA

A Figura 4.1, mais uma vez, serviu de referência para a execução do método. O procedimento para a realização dos passos, entretanto, não será apresentado pois não difere do que já foi visto no *Método Pleno* (salvo o fato de se estar utilizando uma placa 5x5 mas considerando que ela é 3x3). Talvez a única observação adicional que caiba ser feita é a de que no ensaio de apalpação deste caso a quantidade de pontos apalpados foi reduzida para 51 de acordo com /2, 8/. Para o ensaio de apalpação foi utilizado o software ITI /49/ por facilidade de programação e transferência de dados para o software.

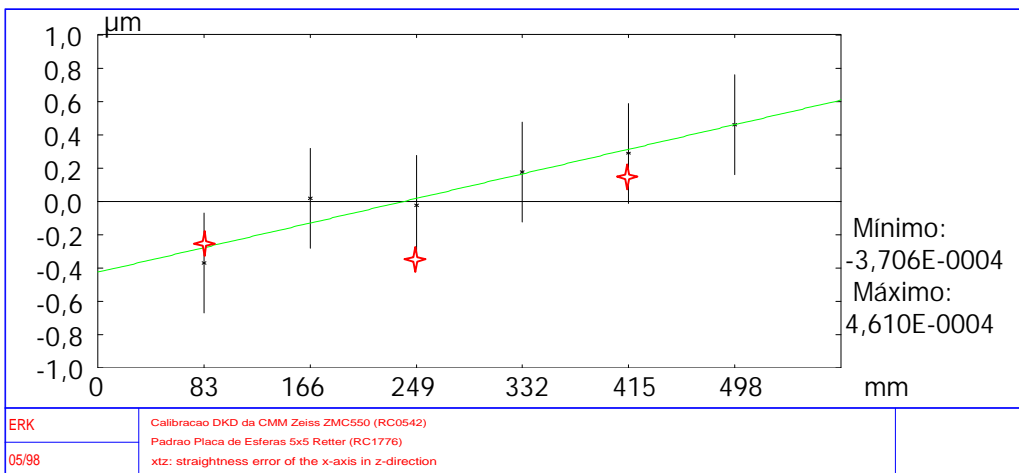
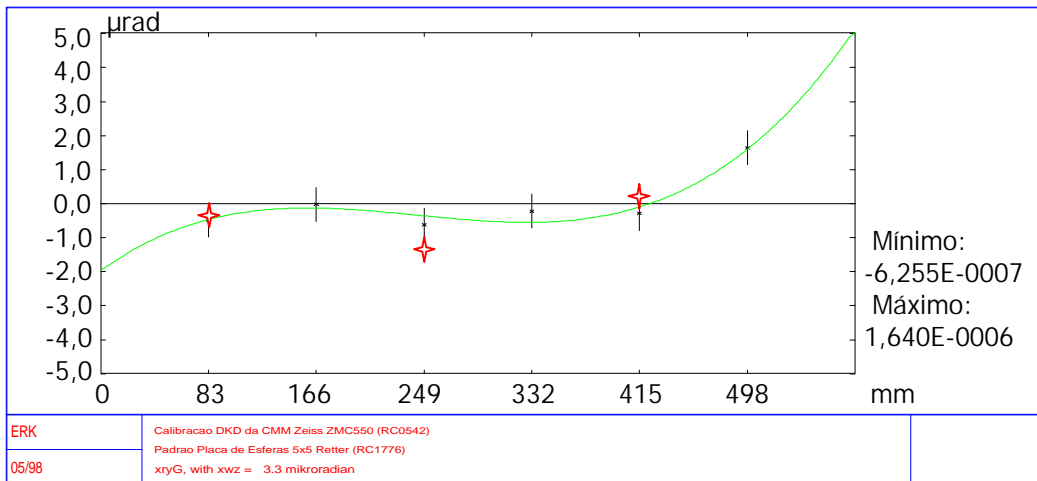
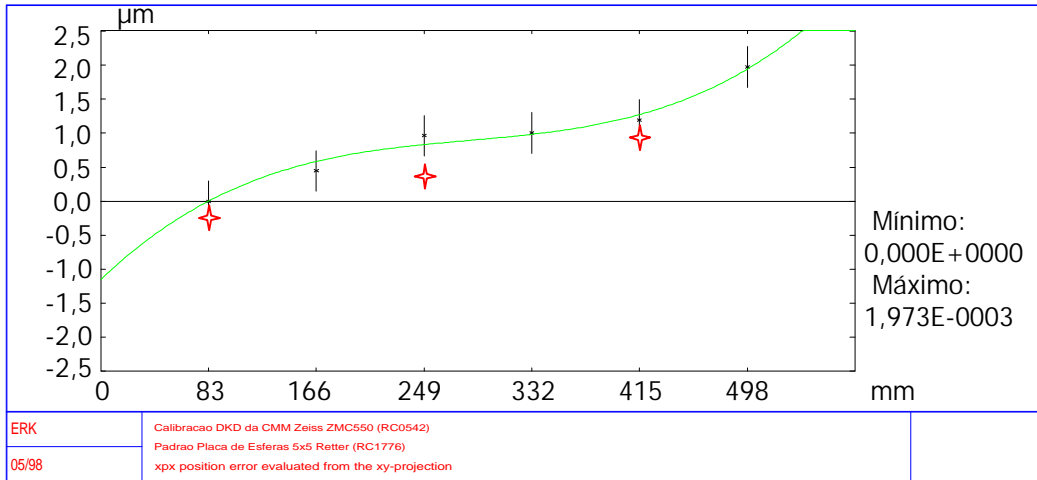
5.3.1 Avaliação da Incerteza de Medição Total da CMM

Para o cálculo da incerteza de medição total da CMM valem as mesmas considerações feitas para os dois estudos de caso anteriormente citados. Cabe ressaltar, mais uma vez, que para o cálculo deste caso o número de comprimentos avaliados é de 7.000 (contra os 10.000 comprimentos utilizados no estudo de caso do *Método Pleno*).

A parcela devida às 21 componentes de erro é calculada por:

$$U_{ko(\text{espaço})} = (1,1 + L / 30) \leq 7,5 \mu\text{m} \quad L \text{ em mm}$$

A Figura 5.8 apresenta alguns dos gráficos, gerados pelo software KALKOM, de erros geométricos da CMM do eixo X para o *Método Pleno* e para a *Técnica Enxuta*. A comparação desses gráficos mostra que a técnica proposta - mais simplificada - mostra que a tendência da CMM nos dois casos é bastante semelhante, o que vem de encontro às expectativas iniciais.



Obs.: A repetitividade apresentada no resultado do Método Pleno varia de $\pm 2s$

Figura 5.8 – Comparação entre os gráficos de Posicionamento (da projeção XY), Rola-mento e de Retilneidade (na direção Z) do eixo X do Método Pleno e da Técnica Enxuta

Novamente aqui fez-se uso da simulação computadorizada de apalpações bidirecionais com o programa MEGAKAL / SIPKO, a partir das componentes de erros e dos parâmetros de incerteza de apalpação (parcelas aleatória e sistemática). Os 7.000 comprimentos (sob distintas orientações de medição) estão apresentados de forma gráfica na Figura 5.9.

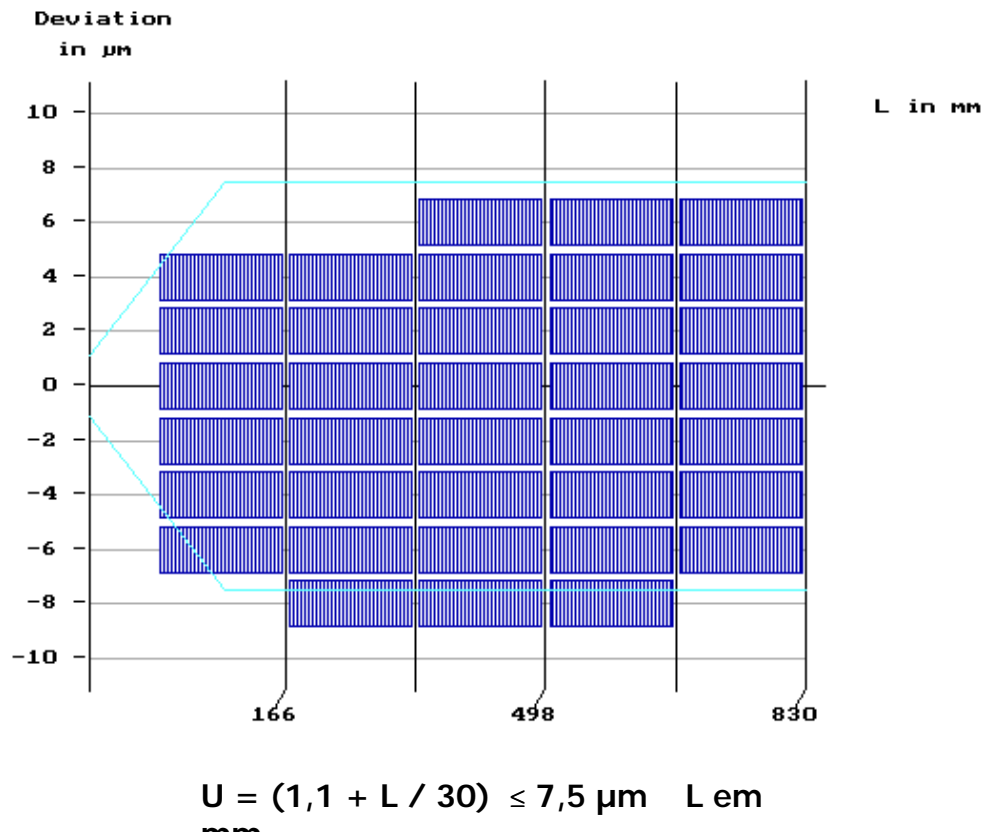


Figura 5.9 – Representação gráfica da incerteza de medição para todos os comprimentos simulados no espaço

As parcelas de influências estimadas são calculadas por:

- a) $U_t = (0,4 + L / 312) \mu\text{m} \quad L \text{ em mm}$
(para temperatura e *drift* durante os ensaios)
- b) $U_v = (0,8 + L / 910) \mu\text{m} \quad L \text{ em mm}$
(para incerteza devida ao padrão utilizado)

As parcelas que contribuirão para o cálculo final da incerteza de medição total deste caso estão detalhadamente apresentadas na Figura 5.10 e Figura 5.11.

O resultado final obtido para a incerteza de medição da técnica proposta é:

$$U_{k(\text{espaço})} = (1,5 + L / 30) \leq 8,0 \mu\text{m}$$

(L é um comprimento qualquer no espaço - em mm)

PLANILHA PARA AVALIAÇÃO DA INCERTEZA TOTAL DA CMM – PARTE 2			
DESCRIÇÃO	Símbolo	Valor	Unidade
Distância da escala X, na direção Z	Hxz	0,45	m
Distância da escala X, na direção Y	Hxy	0,8	m
Distância da escala Y, na direção Z	Hyz	0,65	m
Altura da coluna do Portal	Hp	0,65	m
Comprimento máximo calibrado	L _{max}	0,68	m
Coeficiente de dilatação térmico da escala X	α_x	7,8	K ⁻¹
Coeficiente de dilatação térmico da escala Y	α_y	7,8	K ⁻¹
Coeficiente de dilatação térmico da escala Z	α_z	7,8	K ⁻¹
Coeficiente de dilatação térmico da mesa da CMM	α_m	6	K ⁻¹
Coeficiente de dilatação térmico do Portal	α_p	6	K ⁻¹
Coeficiente de dilatação térmico da Coluna do Portal	α_c	11,5	K ⁻¹
Coeficiente de dilatação térmico da Placa	α_f	11,5	K ⁻¹
Temperatura média no ensaio (CMM sem correção de temperatura)	T _m $\pm \Delta T$	19,8 0,3	°C K
Temperatura esperada para a Placa (CMM sem correção de temperatura)	T _p $\pm \Delta T$	19,6 0,2	°C K
Gradiente de temperatura X (por metro)	gradX	0,1	K/m
Gradiente de temperatura Y (por metro)	gradY	0,3	K/m
Gradiente de temperatura Z (por metro)	gradZ	0,1	K/m
Varição de temperatura admissível em X	ΔT_x	0,3	K
Varição de temperatura admissível em Y	ΔT_y	0,3	K
Varição de temperatura admissível em Z	ΔT_z	0,3	K
Incerteza da correção de temperatura da escala X	ΔC_x	0,2	K
Incerteza da correção de temperatura da escala Y	ΔC_y	0,2	K
Incerteza da correção de temperatura da escala Z	ΔC_z	0,2	K
Incerteza da correção de temperatura da placa	ΔC_p	0,2	K
Drift máximo nas medições da placa	ut ₇	0,4	μm
Ensaio de apalpação - Erro no Diâmetro da Esfera	ΔR	0,5	μm
Ensaio de apalpação - Desvio padrão	s	0,4	μm

Figura 5.10 - Planilha de cálculo das parcelas de erros que compõem a incerteza de medição total da CMM - parte 1 - /58/

PLANILHA PARA AVALIAÇÃO DA INCERTEZA TOTAL DA CMM – PARTE 2				
Dilatação da escala, CMM sem correção $Ut_1 = \max(\alpha_i \cdot \Delta Ti)$	Ut1	Utx	Uty	Utz
	0,00	2,34	2,34	2,34
Dilatação da escala, CMM com correção $Uc_1 = \max(\alpha_i \cdot \Delta Ci)$	Uc1	Ucx	Ucy	Ucz
	1,56	1,56	1,56	1,56
Rolamento X - xry (pitch) $Ut_2 = \alpha m \cdot \text{gradZ} \cdot \text{Hxz}$	Ut2	αm	gradZ	Hxz
	0,27	6,00	0,10	0,45
Guinamento X - xrz (yaw) $Ut_3 = \alpha m \cdot \text{gradY} \cdot \text{Hxy}$	Ut3	αm	gradY	Hxy
	1,44	6,00	0,30	0,80
Rolamento Y - yrx (pitch) $Ut_4 = \alpha p \cdot \text{gradZ} \cdot \text{Hyz}$	Ut4	αp	gradZ	Hyz
	0,39	6,00	0,10	0,65
Perpendicularidade xwz (squareness) $Ut_5 = \alpha c \cdot \text{gradX} \cdot \text{Hp}$	Ut5	αc	gradX	Hp
	0,75	11,50	0,10	0,65
Temperatura da Placa, sem correção. $Ut_6 = (Tp - 20 \text{ }^\circ\text{C}) \cdot \alpha f$	Ut6	αf	Tp	
	0,00	-	-	
Temperatura da Placa., com correção $Uc_6 = \Delta Cp \cdot \alpha f$	Uc6	αf	ΔCp	
	2,30	11,50	0,20	
Soma dos efeitos da temperatura (prop. compr.) $Kt = \sqrt{(Ut_1, Uc_1)^2_{max} + (Ut_2)^2 + (Ut_3)^2 + (Ut_4)^2 + (Ut_5)^2 + (Ut_6, Uc_6)^2_{max}}$	Kt			
	3,25			
Incerteza Tipo A - simulação medição compr. - * MEGAKAL (com / sem incerteza apalpação)	Uko	Ako	Kko	Bko
		1,10	33,00	7,50
Incerteza de calibração da Placa (do processo)	Uv	Av	Kv	
		0,80	1,10	
Incerteza devido aos efeitos da temperatura $At = Ut_7$	Ut	At	Kt	
		0,40	3,25	
Incerteza de apalpação (se não introd. megakal) $Up = 2 \cdot \Delta R + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot s$	Up	ΔR	s	
	1,05	0,40	0,40	
Erros de longo período da CMM (mudança estrut.) * histórico de calibrações ou 1/2 U _{3D} fabric.	Ue	Ae	Ke	
Incerteza TO TAL $Ak = \sqrt{(Ako)^2 + (Up)^2 + (Av)^2 + (At)^2 + (Ae)^2}$	Ak			
	1,47			
Incerteza TO TAL $Kk = \sqrt{(Kko)^2 + (Kv)^2 + (Kt)^2 + (Ke)^2}$	Kk			
	33,18			
Incerteza TO TAL $Bk = \sqrt{(Bko)^2 + (Up)^2 + (Av)^2 + (At)^2 + [(Kv)^2 + (Kt)^2 + (Ke)^2] \cdot (L_{max})^2}$	Bk			
	7,98			

Obs.: A apresentação da parcela "K" nesta tabela considera L em μm e o coeficiente na forma não fracionária

Figura 5.11 - Planilha de cálculo das parcelas de erros que comporão a incerteza de medição total da CMM - parte 2 /58/

5.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO PLENO E A TÉCNICA ENXUTA

Ainda, durante a realização das calibrações da CMM – tanto do caso do *Método Pleno* (seção 4.6) quanto do caso da técnica proposta (seção 5.2) – foram feitas as tomadas de tempo mais significativas para a nova técnica proposta, que permitiram chegar à elaboração da Figura 5.12. Os tempos não mencionados na figura (como o de preparação da CMM, de colocação de sensores de temperatura, de calibração de apalpadores, de processamento dos dados de medição, etc.) foram considerados os mesmos para os dois casos, para efeito de simplificação.

MÉTODO PLENO PLACA PADRÃO DE ESFERAS COMERCIAL TIPO 5x5			TÉCNICA PROPOSTA PLACA PADRÃO TIPO 3x3		
AÇÃO	TEMPO (h)	CUSTO (R\$)*	AÇÃO	TEMPO (h)	CUSTO (R\$)*
10 posicionamentos da placa padrão • tempo médio de 60 minutos para cada posicionamento da placa na CMM - inclusive com a estabilização da temperatura	10,0	1.000,00	7 posicionamentos da placa padrão • tempo médio de 60 minutos para cada posicionamento da placa na CMM - inclusive com a estabilização da temperatura	7,0	700,00
14 medições da placa padrão • tempo de cada medição da placa 5x5 em torno de 45 minutos (50 esferas - medição de ida e volta)	10,5	1.050,00	10 medições da placa padrão • tempo de cada medição da placa 3x3 em torno de 15 minutos (18 esferas - medição de ida e volta)	2,5	250,00
2 posicionamentos da esfera padrão em uma diagonal espacial - 4 medições - • tempo total de posicionamento em torno de 30 minutos e tempo de uma medição da esfera (com 338 pontos) 30 minutos	2,5	250,00	1 posicionamento da esfera padrão na região central - 2 medições - • tempo total de posicionamento em torno de 10 minutos e tempo de uma medição da esfera (com 51 pontos) 5 minutos	0,3	30,00
TOTAL	23,0	2.300,00	TOTAL	9,8	980,00

* Custo hora da CMM (estimado) \cong R\$ 100,00/h

Figura 5.12 – Comparação entre o Método Pleno e a técnica proposta de acordo com algumas ações e seus respectivos tempos e custos associados

Ainda, uma análise comparativa das incertezas de medição total dos estudos de casos apresentados nas seções 4.6, 5.1 e 5.2 resulta na Figura 5.13. Estes mesmos resultados estão expressos graficamente na Figura 5.14.

ESTUDO DE CASO	INCERTEZA DE MEDIÇÃO TOTAL	
MÉTODO PLENO PLACA PADRÃO COMERCIAL TIPO 5x5	$U = \pm (1,2 + L / 47) \leq 5,5 \mu\text{m}$	L em mm
SIMULAÇÃO DA TÉCNICA ENXUTA PLACA PADRÃO TIPO 3x3	$U = \pm (1,1 + L / 35) \leq 5,9 \mu\text{m}$	L em mm
TÉCNICA ENXUTA PLACA PADRÃO TIPO 3x3	$U = \pm (1,5 + L / 30) \leq 8,0 \mu\text{m}$	L em mm

Figura 5.13 – Incertezas de Medição calculadas para o Método Pleno e a Técnica Enxuta (simulação e validação)

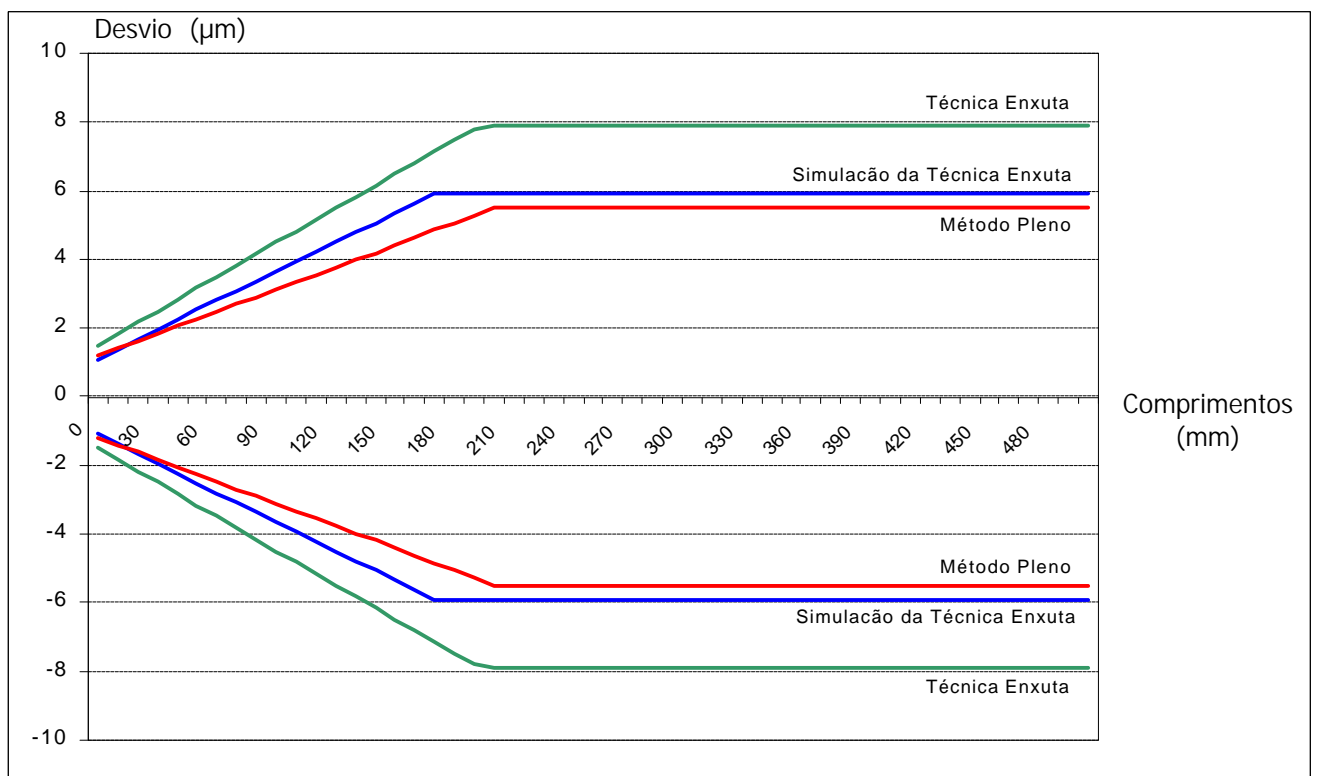


Figura 5.14 – Representação gráfica das Incertezas de Medição do Método Pleno e da Técnica Enxuta (simulação e validação)

Uma análise da Figura 5.12 e da Figura 5.13 (ou da Figura 5.14) mostra que a técnica proposta propiciou uma redução de tempo e custos associados na ordem de 60 %, mantendo-se o nível de eficiência da calibração.

Outras observações acerca desta técnica são listadas a seguir:

- Dado o fato de se medir menos esferas e, conseqüentemente, diminuir o tempo de medição, tanto a variação de temperatura na placa quanto o *drift* poderão ser menores, gerando um resultado mais consistente;
- O tempo de geração do programa CNC para medição da placa é menor (menos esferas medidas);
- Como a possibilidade de erros na concatenação dos posicionamentos das placas é maior - já que agora existem menos esferas de "ligação" entre as concatenações - recomenda-se que a calibração seja executada de modo cuidadoso;
- Como as possibilidades de ajuste de uma placa 3x3 ao volume de trabalho da CMM é menor do que de uma placa 5x5 (para placas de mesmas dimensões), sugere-se que, antes de se adotar a técnica proposta, seja feita uma avaliação de aplicabilidade;
- O menor comprimento que pode ser avaliado é o que corresponde à distância entre os centros das esferas. Para o caso de medições com comprimentos menores do que os oferecidos pela técnica proposta, também aqui é recomendável uma análise de aplicabilidade (a utilização do método de comparação pode ser uma alternativa);

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

A condução deste estudo foi motivada, basicamente, pela necessidade identificada pelo Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI de ter uma técnica alternativa de calibração de CMMs que atendesse a uma das grandes exigências dos usuários da Tecnologia de Medição por Coordenadas: a redução de tempo de máquina parada durante uma calibração. Rapidez, economia e eficiência metrológica, aliadas à qualidade dos resultados obtidos, foram as palavras-chave que guiaram o desenvolvimento deste trabalho.

Primeiramente foi realizado um estudo aprofundado do Método da CMM Virtual com dedicação especial ao Padrão Placa.

O Método da CMM Virtual foi, então, aplicado através de calibrações realizadas em diversas instituições e empresas no Brasil (Fundação CERTI – SC; SENAI/CETEMP – RS; EMBRACO – SC; VOLVO – PR) e na Alemanha (PTB – Braunschweig; DEUTSCHE AEROSPACE AIRBUS – Varel; 3DMESS – Peine).

Um projeto de cooperação internacional entre Brasil e Alemanha viabilizou a realização dessas calibrações que objetivava, entre outros, a transferência de tecnologia na área de Medição por Coordenadas. Um dos resultados deste projeto foi o credenciamento DKD do LMC (Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI) para a calibração de placas e de CMMs.

6.1 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

Entre os tópicos abordados neste trabalho podemos citar como principais contribuições:

- Difusão do Método da CMM Virtual e do padrão placa de esferas;
- Estabelecimento de critérios de seleção e escolha de uma CMM bem como elaboração de um guia básico de orientação ao usuário/comprador com o intuito de facilitar a interpretação dos critérios considerados mais críticos;
- Desenvolvimento de procedimentos orientativos para calibração de placas e de CMMs com placas;
- Proposta de estruturação (desenvolvimento e implantação) de como deveria ser um Sistema da Qualidade para serviços com placas;
- Desenvolvimento de uma técnica alternativa para calibração de CMMs com placas padrão;

- Redução do tempo e custos de calibração na ordem de 50% a 60% com a utilização da Técnica Enxuta;
- Redução do tempo de máquina parada durante a calibração com a Técnica Enxuta (conseqüentemente há um aumento do tempo de produtivo da CMM).

6.2 RECOMENDAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou aspectos relacionados a uma técnica para calibração de máquinas de medir por coordenadas desenvolvida através da adequação do Método da CMM Virtual. Com o intuito de difundir e disseminar este método, eficaz e tecnologicamente avançado, e o padrão placa de esferas para utilização nas indústrias, a técnica proposta apareceu como uma alternativa econômica e rápida que consegue manter o nível de eficiência semelhante ao método original. A utilização sistemática de métodos adequados aliados à disponibilidade de um ambiente laboratorial apropriado e pessoal devidamente treinado e qualificado para calibração de máquinas, proporciona um significativo avanço na qualidade e na confiabilidade dos resultados de medição.

A técnica proposta por este trabalho representa, então, um passo dado no sentido de tornar mais acessível às indústrias um método de calibração eficiente e confiável. Mas o ideal, para muitos usuários de CMMs, é que a calibração de máquinas de medir por coordenadas deixe de ser vista como um ônus ou uma obrigação vinculada a algum sistema de garantia da qualidade de produto e passe a ser considerada como um investimento seguro e indiretamente rentável para as empresas.

É recomendável, para uma satisfatória aplicação da Técnica Enxuta, que as seguintes providências sejam tomadas:

- Submeter a técnica proposta à apreciação do Instituto Primário Brasileiro – INMETRO;
- Credenciar a Técnica Enxuta junto à Rede Brasileira de Calibração (RBC).

Algumas sugestões de trabalhos, relacionadas com esta técnica proposta, que podem vir a contribuir dentro da Tecnologia de Medição por Coordenadas estão listadas abaixo:

- Testes exaustivos da técnica proposta em diversas CMMs a fim de determinar um valor percentual de variação da incerteza de medição global entre o Método Pleno e a simplificada (já que cada CMM tem sua própria incerteza de medição, que difere uma da outra, e considerando que a técnica sugerida foi aplicada somente a uma máquina);
- Validação da técnica proposta em um ambiente laboratorial industrial;
- Verificação da aplicabilidade da técnica proposta para placas comerciais 5x5 considerando somente a sua periferia;

- Desenvolvimento de softwares de simulação e avaliação mais amigáveis, com mais funcionalidades e desenvolvidos sobre uma plataforma aberta para possibilitar a integração com outros softwares.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- /1/ PFEIFER, T. **Fertigungsmesstechnik I**, Apostila didática, WZL – Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre, p 72 – 128, Aachen – Alemanha, 1992.
- /2/ VDI/VDE 2617 **Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten Kenngrößen und deren Prüfung Beuth Verlag, Berlin und Köln.**
 Blatt 1: Kenngrößen und deren Prüfung Grundlage, 1986,
 Blatt 2.1: Längenmessunsicherheit, 1986,
 Blatt 3: Komponenten der Messabweichung des Gerätes, 1989,
 Blatt 4: Kenngrößen und deren Prüfung, 1989,
 Blatt 5: Überwachung von Koordinatenmessgeräten durch Prüfkörper, 1993.
- /3/ ISO 10360-2 **Coordinate Metrology, Part 2, Performance Assessment of Coordinate Measuring Machines (CMM)**, 1992
- /4/ CMMA **Accuracy Specification for Coordinate Measuring Machines**, CMMA, Manufacturers Association, 1989
- /5/ ANSI/ASME B89.1.12M **Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines**, The American Society of Mechanical Engineers, 1990.
- /6/ JIS B7440 **Test Code for Accuracy of Coordinate Measuring Machines.** 1987.
- /7/ BS 6808 **Coordinate Measuring Machines, Part 2, Methods for Verifying Performance**, British Standards Institute, London, UK, 1987.

-
- /8/ TRAPET, E.
FRANKE, M.
HÄRTIG, F.
SCHWENKE, H.
WÄLDELE, F.
COX, M.
FORBES, A.
DELBRESSINE, F.
SCHELLEKENS, P.
TRENK, M.
MEYER, H.
MORITZ, G.
GUTH, T.
WANNER, N. **Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine**, Part 2 of the Final Project MAT1-CT94-0076, sponsored by European Commission under the Standards, Measurements, and Testing Programme, PTB-Bericht F-35, Braunschweig, Alemanha, 03/1999.
- /9/ MITUTOYO **Coordinate Measuring Machine**, Sales Guide, Mitutoyo, 07/1989.
- /10/ TRAPET, E.
WÄLDELE, F. **Quality Assurance of Coordinate Measuring Machines**, PTB, 1993.
- /11/ ISO/DIS 10360-1 Geometrical Product Specifications (GPS) – **Acceptance test and reverification test for coordinate measuring machines (CMM)**, (E), **Part 1: Terms and definitions**, 1998.
- /12/ WÄLDELE, F.
HEGELMANN, R.
TRAPET, E. **Coordinate Metrology**, PTB Bericht F-11, Braunschweig, Alemanha, 02/1992.
- /13/ VEIGA, C. L. N.
FIDÉLIS, G. C.
SCHOELER, N. **Metrologia Dimensional**, Apostila de Curso, Fundação CERTI, Labmetro, p 195 - 260, Florianópolis, SC, 09/1995.
- /14/ CARL ZEISS **Coordinate Metrology**, Technology and Application, 930041, 1990.
- /15/ RENISHAW
METROLOGY **Padrões e Acessórios para CMMs**, Catálogo comercial, H/1000/4020/03/A, Inglaterra, 1989.

-
- /16/ CARL ZEISS **QMP – Quartz Micro Probe**, Catálogo comercial, AW-IP-PM-I/95 Uoo, Alemanha.
- /17/ SCHWENKE, H. **Probing System for Microscopic Structures**, PTBnews, Publicação seriada, n.99.1, Alemanha,1999.
- /18/ MIGUEL,P. A. C.
ABACKERLI, A. J. **Princípios da Medição por Coordenadas**, Apostila de Curso, Centro de Tecnologia – UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, SP, 1997.
- /19/ MIGUEL,P. A. C. **CMM performance verification: considerations for a virtual artefact approach**, PhD Thesis, University of Birmingham, 227 p, England, 12/1996.
- /20/ BEUCK, W. H. **Entwicklung und Realisierung eines Kontur-Pruefkoerpers fuer die aufgabenspezifische Ueberwachung von Koordinatenmessgeraeten**, Verlag Sahker, Band 17, Aachen, Alemanha, 1993.
- /21/ GIGO, L. G. **Estação de Medição por Coordenadas na Produção de Peças Complexas – Metodologia de Especificação**, Dissertação, Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, UFSC, Florianópolis, SC, 11/1999.
- /22/ BÖSSER, F **Vertrauen in die 3D-Koordinaten-Messtechnik**, VDI Berichte 1258, VDI Verlag, p 233 - 239, 1996.
- /23/ VDI/VDE 2627 **Messräume – Klassifizierung und Kenngrößen, Planung und Ausführung**, Blatt 1, 08/1998.
- /24/ PONCE, A. **Quem comercializa máquinas de medição tridimensional no Brasil**, Máquinas e Metais, n 396, Aranda Editora, p 106 - 109, 01/1999.
- /25/ VEIGA, C. L. N.
KLEN, E. R. **É difícil calibrar CMMs?**, Controle da Qualidade, n 59, Editora Banas, São Paulo, SP, p 48 - 54, 04/1997.

-
- /26/ ABNT NBR ISO 10012-1 **Requisitos de garantia da qualidade para equipamentos de medição**, parte 1, Sistema de comprovação metrológica para equipamento de medição, 11/1993.
- /27/ ISO/DIS 14253-1 **Geometrical Product Specifications (GPS) Inspection by Measurement of workpieces and measuring instruments**, Part 1, Decision rules for proving conformance or non-conformance with specification, 12/1995.
- /28/ SCHNEIDER, C. A. **Entwicklung eines Laser-Geradheits-Messsystems**, Tese, Doutorado em Engenharia Mecânica, Aachen, Alemanha, 130 p, 1978.
- /29/ KOLB & BAUMANN **Padrões Escalonados e Placas de Esferas**, Catálogos comerciais KOBA, Alemanha, 1998.
- /30/ PHILLIPS, S. D.
BORCHARDT, B.
DOIRON, T.
HENRY, J. **Properties of free-standing ball bar systems**, NIST - National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA, 1993.
- /31/ KOLB & BAUMANN **Universalprüfkörper für KMG Kugelquader "KOBA-Q3"**, Catálogo comercial de Padrão Cubo de Esferas da KOBA, Alemanha, 1998.
- /32/ HUESER-TEUCHERT, D.
TRAPET, E.
WAELEDELE, F.
WIEGAND, U. **Kalibrierung von Kugel- und Lochplatten als Normale fuer Koordinatenmessgeraete**, PTB, Braunschweig, Deutschland, 04/1993.
- /33/ VEIGA, C. L. N.
KLEN, E. R. **Procedimento para Manuseio, Transporte e Armazenamento de Placas de Furos e de Esferas**, PA-040, revisão 000, Procedimento Administrativo, Sistema da Qualidade do CMCQ da Fundação CERTI, 11/1997.
- /34/ KLEN, E. R. **Quality Manual**, DQ-003, revisão 005, Sistema da Qualidade do CMCQ da Fundação CERTI, Florianópolis, SC, 1998.

-
- /35/ FRANKE, M. **PKAL – Bedienungsanleitung, Auswertung von Umschlagmessungen an Prüfplatten für Koordinatenmessgeräte**, PTB, Alemanha, 01/1992.
- /36/ INMETRO **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**, Portaria n 29, 03/1995.
- /37/ ISO/VIM **International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology**, 1993.
- /38/ HUESER-TEUCHERT, D.
TRAPET, E.
WAELEDELE, F.
WIEGAND, U. **Guideline for the DKD-calibration of test plates in the form of ball plates and bore plates**, Draft version, 01/1992.
- /39/ FRANKE, M. **Handbuch zu KALKOM, Auswertung der Messungen mit 2D-Referenzobjekten in mehreren Stellungen zur Ermittlung der 21 Komponentenabweichungen von Koordinatenmessgeräten**, PTB, Alemanha, 11/1991.
- /40/ SCHWENKE, H. **Benutzerhandbuch MEGAKAL, Messaufgaben-spezifische Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten durch Simulation**, PTB, Alemanha, 12/1996.
- /41/ VEIGA, C. L. N.
KLEN, E. R. **Vantagens e Técnicas da CMM Virtual**, Controle da Qualidade, n 65, Editora Banas, p 83 – 88, São Paulo, SP, 10/1997.
- /42/ HAGENEY, T.
PRESSEL, H. **Kugelplatten oder Endmasse?**, Zeitschrift Mess- und Prüftechnik, jahrg. 44, Carl Hanser Verlag, München, 06/1999.
- /43/ ISO/IEC Guide 25 **General requirements for the competence of testing and calibration laboratories**, Fourth edition, 1997.
- /44/ EN 45001 **General Criteria for the Operation of Testing Laboratories**, European Standard, 09/1989.

-
- /45/ NIG-DINQP-020 **Cr terios para o Credenciamento de Laboratórios de Calibra o e de Ensaio**, revisão 02, INMETRO, 10/1998.
- /46/ RBC/INMETRO **Na Medida - Metrologia**, Jornal, n 06, janeiro - mar o de 1998.
- /47/ PEREIRA KLEN, A. A. **An Approach to Conceptualize Learning Enterprises in the Manufacturing Sector**, Tese, Doutorado em Engenharia Mec nica, 256 p, Florian polis, SC, 1996.
- /48/ FRANKE, M. **Benutzerhandbuch TKAL, Bestimmung der Antastabweichungen von Dreikoordinatenmessger ten**, PTB, Alemanha, 12/1996.
- /49/ PLATH, H. H. **GUK-K - Genauigkeits-  berwachung von Koordinatenmessger ten - mit Hilfe von Kugelplatten**, Version 7.2, ITI - Ingenieurb ro f r Technik und Informatik GmbH, Barsb ttel, Alemanha, 1997.
- /50/ KLEN, E. R. **Manual da Qualidade**, DQ-001, revisão 007, Sistema da Qualidade do CMCQ da Funda o CERTI, 1999.
- /51/ TRAPET, E.
W LDELE, F. **Aseguramiento de la calidad para máquinas de medir por coordenadas**, Anais do Seminário en el Centro Espa ol de Metrologia, 06/1991.
- /52/ VEIGA, C. L. N.
KLEN, E. R. **Calibra o de Máquinas de Medir por Coordenadas com Placas de Esferas**, Anais do Seminário Internacional para Controle da Qualidade, Florianópolis, SC, 08/1997.
- /53/ EA-4/10
(EAL-G17) **Coordinate Measuring Machine Calibration**, Publication Reference EAL - European Cooperation for Accreditation of Laboratories, (EA - European Cooperation for Accreditation), 1995.

-
- /54/ DKD **Certificado de Credenciamento para o Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI**, DKD 16001, Calibração de Placas, Calibração de CMMs com placas, 08/1997.
- /55/ DKD **Certificado de Credenciamento DKD, para Edmilson Rampazzo Klen da Fundação CERTI**, Gerente Técnico de Laboratório, DKD 16001, Calibração de Placas, Calibração de CMMs com placas, 08/1997.
- /56/ DKD **Certificado de Credenciamento DKD, para Celso Luiz Nickel Veiga da Fundação CERTI**, Sub-gerente Técnico de Laboratório, DKD 16001, Calibração de Placas, Calibração de CMMs com placas, 08/1997.
- /57/ FUNDAÇÃO CERTI **Certificado de Calibração DKD para CMM**, 0660/98, Fundação CERTI, LMC – Laboratório de Medição por Coordenadas, Florianópolis, SC, 06/1998.
- /58/ KLEN, E. R. **Planilha para Avaliação da Incerteza de Medição de Máquinas de Medir por Coordenadas (segundo diretriz DKD)**, DQ-190, revisão 000, Sistema da Qualidade do CMCQ da Fundação CERTI, 07/05/1998.
- /59/ FERREIRA, A. B. H. **Novo dicionário da língua Portuguesa**, 2 edição, Editora Nova Fronteira S.A., 1986.