

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

**DESENVOLVIMENTO DE UMA SOLUÇÃO PARA
VERIFICAÇÃO RÁPIDA DE MÁQUINAS DE
MEDIR POR COORDENADAS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para
obtenção do grau de Mestre em Metrologia

Vitor Camargo Nardelli

Florianópolis, 28 de Setembro de 2006

DESENVOLVIMENTO DE UMA SOLUÇÃO PARA VERIFICAÇÃO RÁPIDA DE MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS

Vitor Camargo Nardelli

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

“MESTRE EM METROLOGIA”

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

ORIENTADOR

Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Ph. D.

COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing.

Prof. Celso Luiz Nickel Veiga, Dr. Eng.

Prof. Edison da Rosa, Dr. Eng.

Prof. Albert Weckenmann, Dr. Ing.

*Dedico este trabalho à minha família,
aos meus pais Tarcizio e Neuza,
e aos meus irmãos Flavio e Tarsila.*

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, pela oportunidade oferecida.

Aos professores Carlos Alberto Flesch, Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Carlos Alberto Schneider e Marco Antônio Martins Cavaco pela dedicação e senso crítico.

Ao Labmetro, seus estagiários e colaboradores, em especial ao Francisco Arenhart pela participação e dedicação na implementação experimental do projeto e ao Mário Resende por me indicar o Pós MCI.

A Rosana Vieira, pelo profissionalismo e prontidão.

À turma 2004, pelo excelente ambiente de trabalho, de amizade e de estudo criado.

À Fundação CERTI, por todo suporte oferecido, em especial aos colaboradores Alexandre Lucas, Ademir Linhares Oliveira, Matheus Dieckmann de Oliveira e Anderson Schmidt.

Ao meu orientador Gustavo Daniel Donatelli, pelo comprometimento, discussões e amizade.

...e a todos que de alguma maneira contribuíram para conclusão deste trabalho.

RESUMO

A utilização de máquinas de medir por coordenadas (MMC) no ambiente industrial aumentou significativamente nos últimos anos. Entretanto, assim como qualquer outro sistema de medição, o resultado da medição deve ser confiável. O desempenho da MMC pode variar entre intervalos de verificação de desempenho (normalmente 6 meses) e de calibração (1 a 2 anos). Não detectar estas alterações pode comprometer a validade das futuras medições. A fim de se evitar medições não confiáveis e suas conseqüências, recomenda-se a implementação de ensaios conhecidos internacionalmente por “*interim checks*” (denominados aqui por verificação rápida), por serem ensaios mais simples e principalmente muito mais rápidos do que os ensaios de calibração.

Apesar deste conceito ser amplamente difundido, é pouco aplicado nas indústria brasileira, especialmente nas empresas de pequeno e médio porte, que não vêem a necessidade em investir em freqüentes verificações de suas máquinas. Diante deste fato, esta dissertação apresenta o resultado do desenvolvimento de um artefato e de um *software* para processamento de dados a fim de estimular a execução de ensaios de verificação rápida (*interim check*) em MMC utilizadas na indústria. Os requisitos de projeto foram escolhidos de tal forma que o produto resultante fosse economicamente acessível e eficientemente aplicável nas empresas de pequeno e médio porte. Para isso, foi escolhido um artefato bidimensional com quatro elementos de apalpação, com algumas diferenças em relação aos conceitos existentes para este tipo de padrões corporificados. O objetivo é reduzir o custo e fazer com que o artefato seja fácil de ser manuseado através de redução de peso e eliminação de operações de montagem e desmontagem durante a preparação para a medição, mantendo a rigidez e utilizando materiais de elevada estabilidade geométrica.

ABSTRACT

The use of coordinate measuring machines (CMM) in the manufacturing industry have significantly increased over the past years. However, like any other measurement system, the result of a measurement must be reliable. The behavior of a coordinate measuring machine may change during the interval between performance verifications (usually 6 months) and calibrations (usually 1 to 2 years). Undocumented changes in the state of the CMM may compromise the validity of all future measurement. To avoid unreliable measurements and its consequences, the implementation of interim checks, which are much faster and simpler than complete verifications, is strongly recommended by standards such as ISO 10360-2.

Even though the interim check concept is widely known, it is seldom applied in Brazilian industry, specially small and medium size companies. They do not perceive the need to invest in frequent performance tests of their CMM. Due to this fact, this dissertation presents the results of the development of an artifact and its application software to be used in the interim check of industrial grade, intermediate accuracy CMM. The design constrains have been chosen in such a way that the resulting product can be purchased by and effectively applied in small and medium sized industries. To fulfill it, a bi-dimensional artifact with four probing elements was chosen, regarding some changes from the existing concepts. The aim was to reduce cost and make it more easily handle by reducing weight and eliminating assembly operations during set up, maintaining the stiffness with long term geometrical stability material.

LISTA DE ABREVIATURAS

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> (Sociedade Americana dos Engenheiros Mecânicos)
BS	<i>British Standard</i> (Norma Inglesa)
CAA	<i>Computer Aided Accuracy</i> (Exatidão Corrigida por Computador)
CEP	Controle Estatístico de Processo (<i>Statistic Process Control</i>)
CL	<i>Center Line</i> (Linha Média)
CMMA	<i>Coordinate Measuring Machine Manufacturers Association</i> (Associação dos Fabricantes de Máquinas de Medir por Coordenadas)
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> (Controle Numérico por Computador)
DKD	<i>Deutscher Kalibrierdienst</i> (Rede Alemã de Calibração)
EA	<i>European Accreditation</i> (Acreditação Européia)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método dos Elementos Finitos)
GD&T	<i>Geometric Design and Tolerance</i> (Projeto e Tolerância Geométrica)
GPS	<i>Geometrical Product Specifications</i> (Especificação Geométrica de Produto)
ISO	<i>International Standardization Organization</i> (<i>Organização Internacional de Normatização</i>)
JIS	<i>Japanese Industrial Standard</i> (Norma Industrial Japonesa)
LCL	<i>Lower Control Limits</i> (Limite de Controle Inferior)
MAP	<i>Measurement Assurance Program</i> (Programa de Garantia da Qualidade das Medições)
MPE	<i>Maximum Permissible Error</i> (Erro Máximo Admissível)
MMC	Máquina de Medir por Coordenadas (<i>Coordinate Measuring Machines</i>)
NF	<i>Norme Française</i> (Norma Francesa)
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt (Instituto nacional de metrologia da Alemanha)

UCL	<i>Upper Control Limits</i> (Limite de Controle Superior)
VDE	<i>Verband der Elektrotechnik</i> (Associação Alemã de Engenharia Elétrica, Engenharia Eletrônica e Tecnologia da Informação)
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i> (Associação dos Engenheiros Alemães)
VIM	Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais Gerais de Metrologia

LISTA DE SÍMBOLOS

A	ponto referente à origem do sistema de coordenadas do apalpador.
E	modulo de elasticidade [GPa].
L	distância entre dois pontos [mm].
M_p	matriz de transformação para compensação de erros do sistema de apalpação.
P	ponto em que o apalpador entra em contato com a peça a ser medida.
T	temperatura.
${}^{i-1}T_i$	matriz de transformação entre o sistema de coordenadas $i-1$ e o i .
X, Y, Z	eixos do sistema de coordenadas cartesiano.
b_x, b_y, b_z	componentes do vetor \mathbf{b} que define o raio do apalpador nas coordenadas x, y e z respectivamente.
c, s, t	co-seno, seno e tangente respectivamente
d_r	matriz usada para compensar os erros induzidos eletricamente num sistema de apalpação <i>touch-trigger</i> .
d_b	matriz usada para compensar a flexão da haste do apalpador.
e_x, e_y, e_z	componentes do vetor do erro volumétrico nas coordenadas x, y e z respectivamente.
k_t	condutividade térmica [w/m·K],
k	fator de abrangência para calcular a incerteza expandida.
\mathbf{n}	matriz de orientação da força de apalpação.
\mathbf{r}_0	vetor que indica a posição do ponto P em coordenadas máquina.
\mathbf{r}_m	vetor que indica a posição do cabeçote do sistema de apalpação em coordenadas máquina.

r_a	vetor que indica a posição do ponto A através do sistema de coordenadas do braço $(x_{3,}, y_{3,}, z_{3,})$.
t_x, t_y, t_z	elementos do vetor translação.
u, v, w	sistema de coordenadas peça.
x_a, y_a, z_a	sistema de coordenadas do apalpador.
x_d, y_d, z_d	distância deslocada pelo portal, pelo carro e pelo braço da MMC respectivamente.
x_h, y_h, z_h	sistema de coordenadas ortogonal.
x, y, z	sistema de coordenadas da MMC.
xpx	erro de posicionamento na coordenada X para deslocamento ao longo do eixo X.
xt_y, xt_z	erro de retitude nas coordenadas Y e Z respectivamente quando o movimento ocorre na direção do eixo X.
xrx, xry, xrz	erro de rotação nas coordenadas X, Y e Z respectivamente quando o movimento ocorre na direção do eixo X.
xwy, xwz, ywz	erro de ortogonalidade dos planos XY, XZ e YZ respectivamente.
ypy	erro de posicionamento na coordenada Y para deslocamento ao longo do eixo Y.
yt_x, yt_z	erro de retitude nas coordenadas X e Z respectivamente quando o movimento ocorre na direção do eixo Y.
yry, yry, yrz	erro de rotação nas coordenadas X, Y e Z respectivamente quando o movimento ocorre na direção do eixo Y.
zpz	erro de posicionamento na coordenada Z para deslocamento ao longo do eixo Z.
zt_x, zt_y	erro de retitude nas coordenadas X e Y respectivamente quando o movimento ocorre na direção do eixo Z.
zrx, zry, zrz	erro de rotação nas coordenadas X, Y e Z respectivamente quando o movimento ocorre na direção do eixo Z.

α	coeficiente de dilatação térmica [$\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$].
δ	correção do valor da estimativa de uma fonte de incerteza.
κ	ângulo de rotação ao redor do eixo Z.
ν	coeficiente de Poisson, graus de liberdade.
ν_{eff}	graus de liberdade efetivos.
ρ	massa específica [kg/m^3].
φ	ângulo de rotação ao redor do eixo Y.
ω	ângulo de rotação ao redor do eixo X.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO.....	16
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	16
2 VERIFICAÇÃO PERIÓDICA DE MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS.....	18
2.1 MODELO CINEMÁTICO DE UMA MMC.....	19
2.2 AVALIAÇÃO DE MMC	29
2.2.1 Calibração	30
2.2.2 Verificação do desempenho de máquinas de medir por coordenadas.....	31
2.2.3 Verificação rápida (<i>Interim Check</i>).....	34
2.3 SISTEMA DE APALPAÇÃO.....	35
2.3.1 Fontes de erro.....	35
2.3.2 Modelo matemático.....	36
2.3.3 Avaliação do sistema de apalpação.....	38
2.4 ARTEFATOS MECÂNICOS PARA AVALIAÇÃO DE MMC.....	39
2.4.1 Unidimensionais.....	40
2.4.2 Bidimensionais.....	43
2.4.3 Tridimensionais.....	45
2.5 DISCUSSÃO.....	46
3 UMA SOLUÇÃO PARA VERIFICAÇÃO RÁPIDA DE MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS.....	48
3.1 SOLUÇÃO CONCEITUAL PARA O ARTEFATO.....	49
3.1.1 Aspectos funcionais.....	52
3.1.2 Forma e método construtivo.....	54
3.1.3 Seleção do material.....	55
3.1.4 Análise da solução através do método de elementos finitos (FEM).....	57
3.1.5 Solução para os apoios.....	62
3.2 PROCEDIMENTO DE VERIFICAÇÃO.....	64
3.2.1 Verificação da MMC.....	64
3.2.2 Verificação do apalpador.....	66
3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	66
3.3.1 Equacionamento.....	66

3.3.2 Estudo de estabilidade	68
4 QUADRA MENSURA: FABRICAÇÃO E TESTES	71
4.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO	72
4.1.1 Processo de fundição	72
4.1.2 Usinagem	73
4.2 CALIBRAÇÃO DO ARTEFATO	75
4.2.1 Método	75
4.2.2 Resultado da calibração	77
4.3 SOFTWARE DESENVOLVIDO PARA PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	82
4.4 APLICAÇÃO INICIAL	89
5 CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES FUTURAS	101
5.1 CONCLUSÕES	101
5.2 OPORTUNIDADES FUTURAS	103
REFERÊNCIAS.....	104
APÊNDICE: RELATÓRIO DE ESTABILIDADE	112

1 INTRODUÇÃO

A metrologia geométrica é fundamental para garantia da qualidade da produção industrial no setor metal-mecânico. As contribuições vão desde medições de apoio à fase de pesquisa e desenvolvimento de novos produtos, onde alta exatidão é desejada, até medições de inspeção da produção, onde o tempo e a simplicidade de medição são importantes requisitos. O desenvolvimento tecnológico tem deixado os produtos com tolerâncias geométricas cada vez mais apertadas e geometrias cada vez mais complexas. A necessidade por sistemas de medição versáteis, de fácil automação e com exatidão boa o suficiente para atender os requisitos de inspeção e desenvolvimento de produtos tem feito com que a utilização de máquinas de medir por coordenadas (MMC) tenha aumentado significativamente nos últimos anos tanto no Brasil como no mundo^{[1],[2],[3]}.

No entanto, assim como qualquer sistema de medição, o resultado da medição com uma MMC deve ser confiável. A qualidade do resultado de uma medição é caracterizada pelo valor da incerteza da medição^[4]. A garantia da qualidade das medições é obtida através de constante avaliação do processo de medição com o objetivo de assegurar que o valor atribuído à incerteza continua válido. Esta constante avaliação do processo de medição é feita paralelamente ao controle do processo de produção, e é também conhecida como programa de garantia da qualidade das medições (MAP)^{[4],[5]}. O MAP propõe a aplicação do mesmo conceito apresentado por Shewhart, que consiste em monitorar as variações dos produtos através do controle estatístico de processo (CEP), nos processos de medição. Desta forma, o intervalo entre calibrações pode deixar de ser fixo. Como a calibração de MMC é normalmente realizada por terceiros, a prorrogação do prazo para uma nova calibração significa redução direta dos custos. Além disso, caso a MMC sofra alguma alteração o serviço de calibração pode ser acionado imediatamente, garantindo, assim, a validade de inspeções futuras.

O monitoramento contínuo das MMC é recomendado por normas como a ISO 10360-2^[6] e a VDI/VDE 2617-5^[7] e é denominado “*Interim Check*” (ou verificação rápida). Os dados para o monitoramento são obtidos através de medição de artefatos calibrados ou peças padrão. Para as MMC de uso dedicado ou semi-dedicado, ou seja, usadas para inspecionar uma diversidade limitada de peças, é vantajoso o ensaio com peça padrão já que é possível obter diretamente os desvios sistemáticos^[8]. Já para MMC de uso geral, que inspecionam diferentes tipos peça, é recomendado o uso de artefatos¹.

Apesar do conceito ser amplamente difundido e de relevante importância na garantia dos resultados das medições, é pouco aplicado nas indústrias brasileiras. Dados de uma pesquisa realizada, entre 1997 e 1999^[9], mostram que pelo menos 58% dos usuários de MMC no Brasil não monitoram suas máquinas na frequência adequada² (Figura 1). As causas desta situação precisam ser claramente identificadas para que se possa propor uma solução que venha efetivamente satisfazer as necessidades dos usuários de MMC. Desde então, o número de MMC instaladas aumentou significativamente, propagando a tecnologia às pequenas e médias empresas. Embora se careça de dados sobre estado de aplicação de verificações rápidas, a experiência mostra que a situação pode ser ainda pior que em 1999.

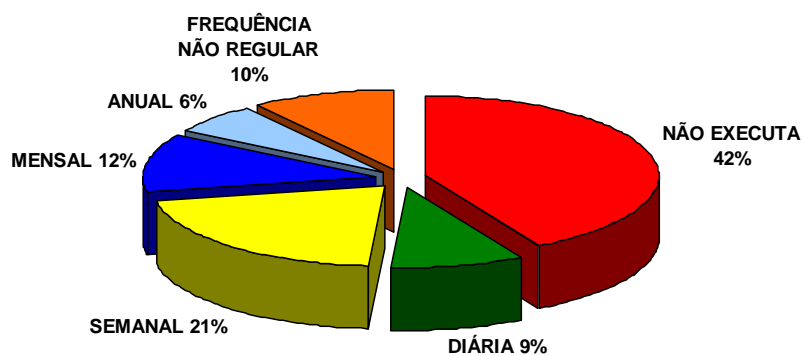


Figura 1 – Frequência em que os usuários brasileiros de MMC realizam testes de verificação rápida. Dados obtidos de ^[9].

¹Artefato no contexto desta dissertação se refere a um padrão corporificado dimensional aplicado à avaliação de máquinas de medir por coordenadas.

²A frequência de monitoramento depende da intensidade de utilização do sistema de medição, podendo ser a cada hora, diária, semanal ou quando um processo de medição for realizado^[4].

1.1 OBJETIVO

Diante do cenário apresentado, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma solução para a aplicação de programas de garantia da qualidade dos processos de medição utilizando MMC, que seja viável para a realidade industrial brasileira, especialmente das pequenas e médias empresas.

De uma maneira mais específica podem-se listar os objetivos como sendo:

- Desenvolver uma base de conhecimento com relação ao problema e às soluções existentes através de uma revisão da literatura técnica, produtos e patentes.
- Avaliar as soluções existentes. Identificar os pontos positivos e negativos. Determinar o que pode ser aproveitado e o que deve ser evitado.
- Projetar e fabricar um protótipo de artefato com características que encorajem o uso diário, e que ao mesmo tempo seja viável economicamente.
- Desenvolver um *software*³ para processamento dos dados, que seja fácil de ser operado, instrutivo e disponibilize o resultado de forma que seja facilmente interpretado.
- Determinar os procedimentos dos ensaios para monitoramento das MMC e do sistema de apalpação.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O desenvolvimento da proposta de solução é apresentado da seguinte forma. Inicialmente, no capítulo 2 é apresentado o modelo cinemático de uma MMC a fim de facilitar a compreensão da influência dos erros sistemáticos sobre os resultados de medição. Em seguida, é apresentado o resultado de uma revisão bibliográfica sobre os tipos de avaliação, destacando-se a diferença entre eles. É apresentado também

³ *Software: programas de computador que são usados pelo usuário para executar uma certa tarefa.*

o estado da arte em artefatos mecânicos, destacando a aplicação destes em ensaios de verificação rápida.

No capítulo 3 é apresentada uma proposta de solução para o problema de verificação rápida. Além do projeto de um novo artefato, apresentam-se os procedimentos de ensaio e a forma como é realizado o processamento dos dados.

As condições encontradas durante a fabricação do protótipo e os resultados de uma aplicação preliminar são apresentados no capítulo 4. Neste capítulo, também é apresentado o *software* desenvolvido para processamento de dados.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

Vale ressaltar que no decorrer desta dissertação serão encontrados alguns termos ou palavras do idioma inglês, pois são amplamente utilizados. No entanto serão traduzidos quando aparecerem pela primeira vez no texto.

2 VERIFICAÇÃO PERIÓDICA DE MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS

As máquinas de medir por coordenadas proporcionam a representação física de um sistema de coordenadas^[10], que no caso desta dissertação, é um sistema cartesiano ortogonal tridimensional. Para isso, existe uma diversidade de configurações disponíveis, sendo mais comumente usadas as de portal móvel, portal fixo, *cantilever* (viga em balanço), braço horizontal e ponte. A configuração tem um efeito importante sobre a exatidão, flexibilidade, tempo de medição e custo da MMC.

A capacidade da máquina é também afetada pelo comportamento dos vários subsistemas que a compõem (Figura 2).

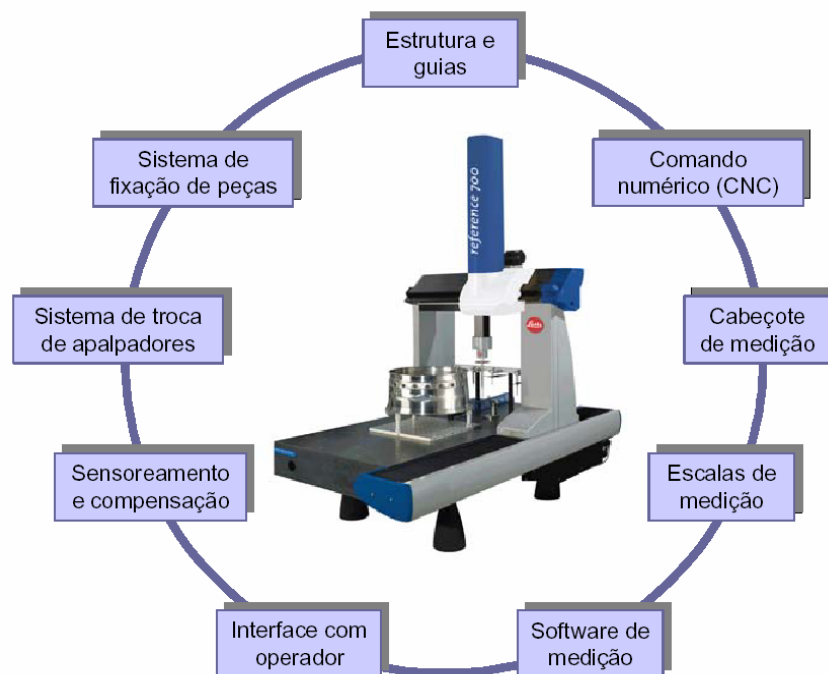


Figura 2 – Subsistemas de uma máquina de medir por coordenadas ^[1].

Desde que as MMC se tornaram um produto disponível, tanto fabricantes quanto usuários, têm expressado a necessidade de avaliar eficazmente seu desempenho^[11]. As máquinas devem ser verificadas não só quando instaladas, mas também durante operação. Este capítulo apresenta os métodos de avaliação de MMC e o estado da arte do projeto de artefatos mecânicos para verificação. Inicia-se, porém, com a apresentação do modelo matemático do efeito dos erros paramétricos de uma MMC, a fim de facilitar a compreensão da relação entre os métodos de avaliação e a influência dos erros sistemáticos nas medições.

2.1 MODELO CINEMÁTICO DE UMA MMC

Existem muitos fatores que contribuem para geração de erros que influenciam os resultados das medições com MMC^{[10],[12]}. A figura 3 mostra como estes fatores interagem entre si. Embora todos estes fatores afetem o desempenho da MMC, cada categoria é tratada independentemente.

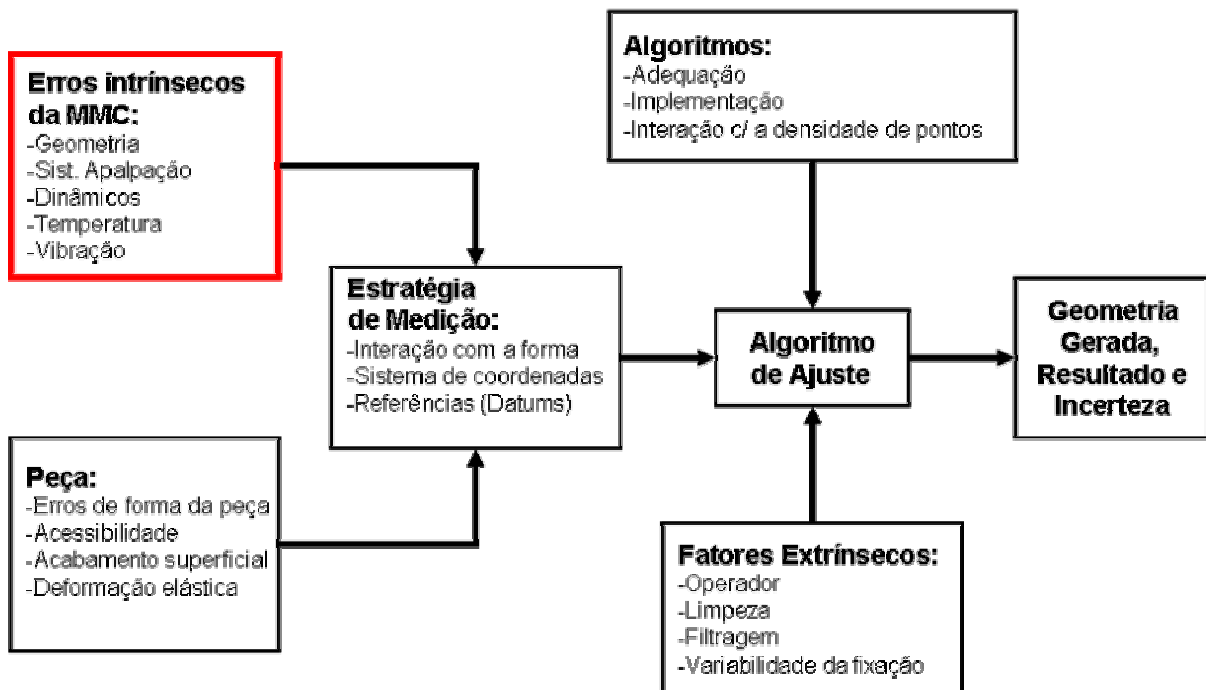


Figura 3 – Fatores que afetam a medição com uma MMC (adaptado^[12]).

Neste trabalho é tratado o conjunto dos erros intrínsecos à própria máquina, já que este é o foco da maioria das normas sobre avaliação de desempenho. Dentre estes pode-se listar como os mais relevantes^{[12],[13],[14],[15]}:

- **Erros geométricos.** Como as guias de uma MMC possuem geometria imperfeita, devido a limitações construtivas, ocorrem desvios em função de erros de forma e deficiência de orientação das guias, folgas nos eixos das guias e não linearidade das escalas.
- **Erros derivados de efeitos térmicos.** Variações de temperatura e gradientes térmicos causam dilatação e empenamento dos componentes da máquina, além de influenciar as dimensões da peça que se deseja medir.
- **Erros devido às forças estáticas.** Deformações nas estruturas da máquina causadas pelo próprio peso de seus componentes ou pela peça a ser medida.
- **Erros dinâmicos.** Deformação na estrutura causada por forças de aceleração e vibrações. Os erros dinâmicos estão ligados diretamente às características estruturais da máquina, tais como rigidez dos componentes, distribuição de massa, amortecimento de vibrações além de controle e distribuição de forças.

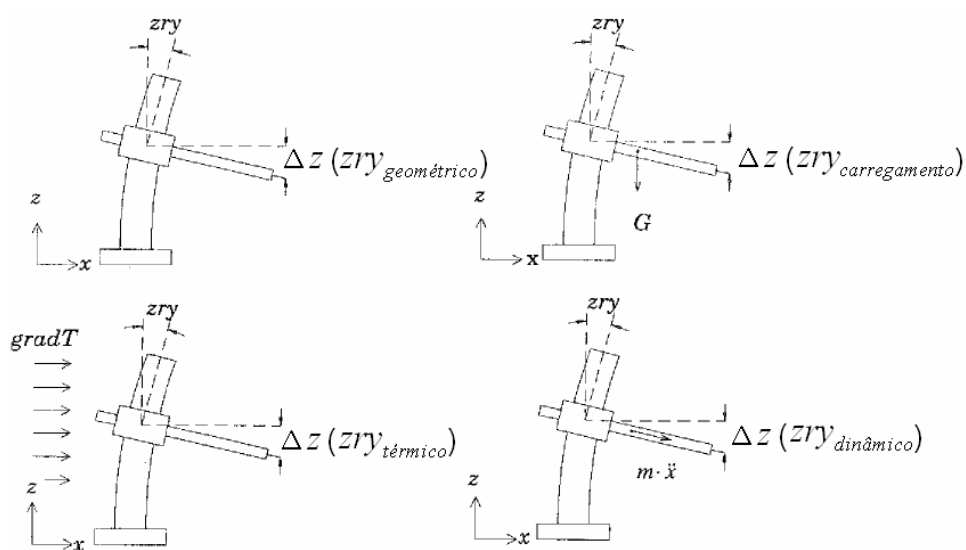


Figura 4 – Efeito das diferentes fontes de erro sobre o mesmo componente da máquina (adaptado^[16]).

Considerando a hipótese de corpo rígido⁴, a superposição dos efeitos dos erros descritos acima podem ser simplificados a apenas efeitos cinemáticos. A figura 4 ilustra o efeito das fontes de erro descritas acima e relaciona os respectivos desvios Δz ao efeito cinemático de rotação do carro em relação à guia do eixo de referência Y (zry). A superposição de efeitos pode ser representada da seguinte forma^[16]:

$$zry = zry_{\text{geométrico}} + zry_{\text{térmico}} + zry_{\text{carregamento}} + zry_{\text{dinâmico}} \quad (1)$$

O **modelo cinemático** de uma MMC^{[17],[18],[19],[20],[21],[22],[23],[24]} define a relação espacial entre os componentes da máquina e a posição do apalpador. Existem vários métodos para desenvolvimento matemático deste modelo. Dentre estes, propõe-se um método matricial genérico, baseado na notação de Denavit-Hartenberg^[25]. Esta notação consiste no estabelecimento ordenado de um sistema de coordenadas fixo a cada elemento de uma cadeia cinemática, a fim de descrever a translação e rotação entre eles. A estrutura física da MMC é composta por quatro elementos, sendo três móveis e uma base fixa. A relação do movimento entre estes elementos é denominada de **seqüência cinemática** (Figura 5).

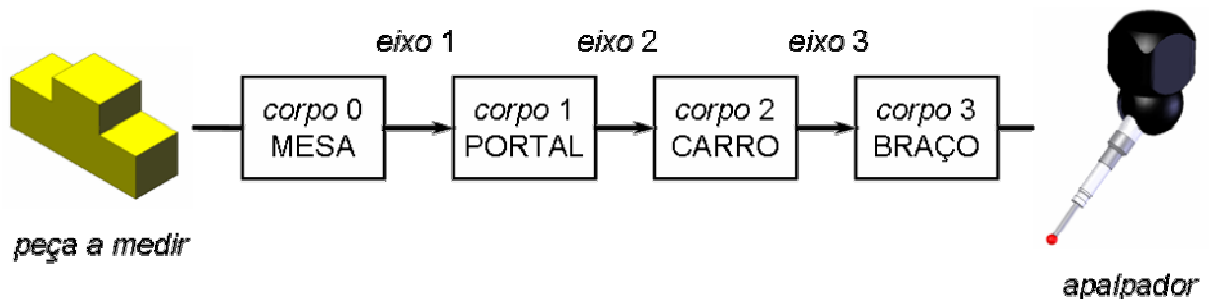


Figura 5 – Seqüência cinemática de uma MMC.

O modelo apresentado neste trabalho corresponde a uma máquina cuja configuração é portal móvel e mesa fixa, já que é a mais comum. Esta é composta por três eixos lineares ortogonais entre si, gerando a geometria de um sistema de coordenadas cartesiano. Para efeitos de modelagem da MMC, apenas é relevante a ordem pela qual surgem os eixos (e não a ordem pela qual surgem os corpos). A

⁴ Corpo cuja distância entre qualquer dois pontos, pertencentes a este, é invariável.

seqüência cinemática adotada é $X \rightarrow Y \rightarrow Z$, correspondendo aos eixos dos movimentos dos corpos 1, 2 e 3, respectivamente (Figura 6).

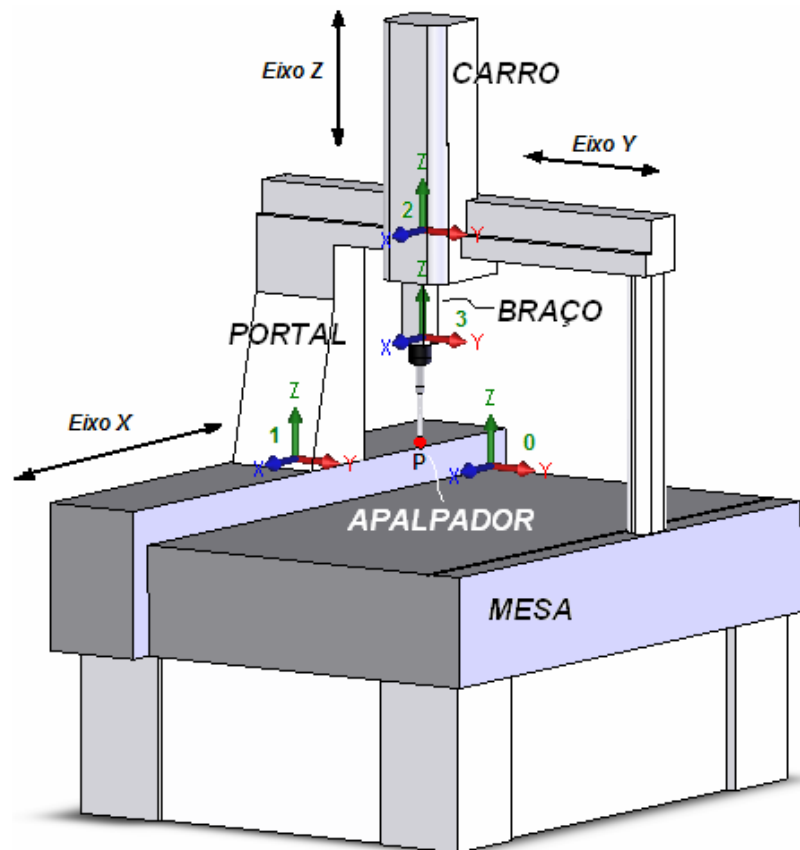


Figura 6 – Representação dos sistemas de coordenadas referente a cada corpo de uma MMC.

Para que uma MMC determine as coordenadas de um dado ponto P sobre uma peça, os corpos 1, 2 e 3 devem se deslocar até que o apalpador entre em contacto com o ponto P da peça. Assim, através da qualificação do apalpador se conhece a posição do ponto A em relação ao sistema de coordenadas 3 (correspondente ao braço) e através do valor lido em cada escala é possível definir a posição de cada corpo em relação ao sistema de coordenadas de seu adjacente⁵. Os deslocamentos entre corpos podem ser representados por operadores de translação através da utilização de **transformadas homogêneas** [15],[17],[18],[21],[23],[25]

⁵ Ponto A corresponde ao centro da esfera do apalpador.

Ponto A = Ponto P, pressupondo: sensor de raio nulo; e cabeçote rígido (ver seção 2.3.2).

conforme mostrado na expressão (2). A relação entre o sistema de coordenadas $i-1$ e o i é obtida através da aplicação da matriz de transformação, ${}^{i-1}T_i$.

$$[trans] = {}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

O vetor translação é representado pelos elementos t_x , t_y , t_z .

Considerando que apenas o deslocamento x_d do portal é necessário para acessar o ponto P , as coordenadas fornecidas pela máquina (x , y , z) são obtidas da seguinte forma.

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_d \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_d + x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Onde x_3 , y_3 e z_3 são as componentes do vetor que liga o ponto de referência (neste caso, o sistema de coordenadas 3, referente ao braço) ao centro da esfera do apalpador.

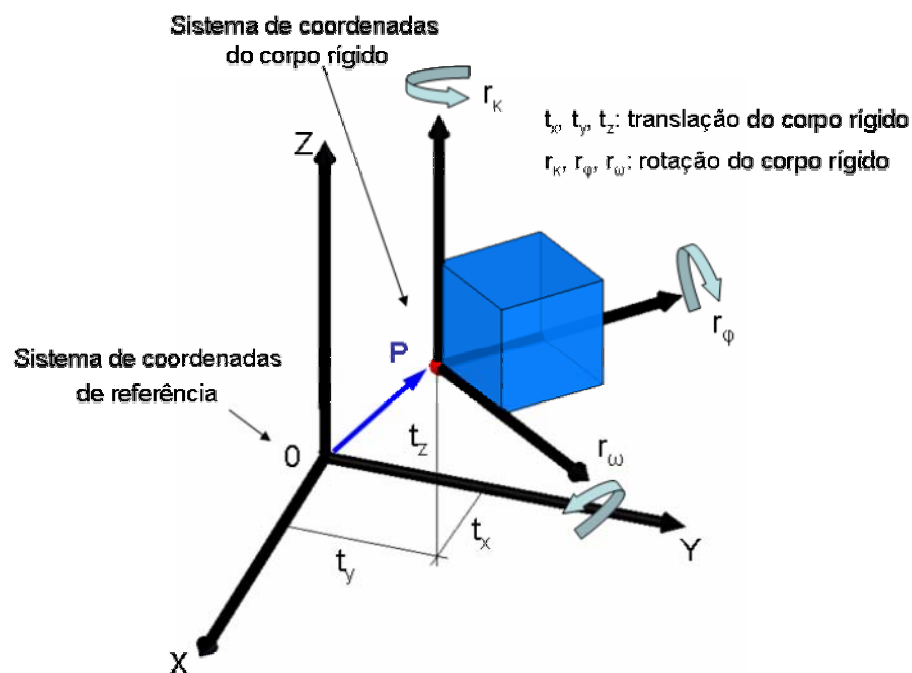


Figura 7 – Localização de um corpo rígido num sistema de coordenadas cartesiano.

Porém, na realidade o deslocamento de cada corpo de uma máquina de medir por coordenadas não possui apenas um grau de liberdade, mas seis graus de liberdade (Figura 7). Assim cada corpo móvel contribui com seis erros paramétricos: três erros de rotação, rolamento (*roll*), tombamento (*pitch*) e guinamento (*yaw*); e três erros de translação, dois erros de retitude (translação perpendicular ao sentido do eixo) e posicionamento (translação no sentido do eixo). Desta forma, a diferença entre o valor indicado pela máquina e a posição exata do ponto que se deseja medir é definido como erro volumétrico^{[15],[20],[26]} (Figura 8).

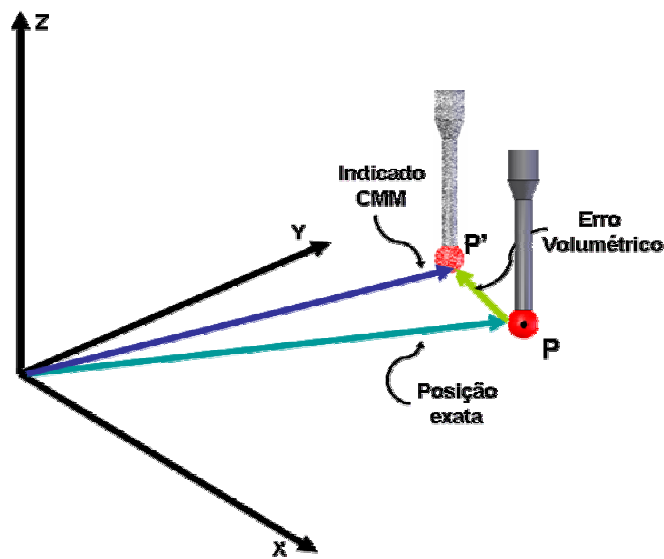


Figura 8 – Representação vetorial do erro volumétrico.

$$[EV] = [MMC_{indicado}] - [MMC_{exato}] \quad (4)$$

Onde,

EV – erro volumétrico;

MMC_{exato} – posição onde o apalpador realmente se encontra;

$MMC_{indicado}$ – posição indicada pela máquina.

A matriz MMC_{exato} modela o comportamento real da máquina e pode ser obtida através do produto das transformações homogêneas que descrevem os movimentos no percurso, desde a origem até o ponto de apalpação como mostra a equação (5):

$$[MMC_{exato}] = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{Bmatrix} = [{}^0T_1] \cdot [{}^1T_2] \cdot [{}^2T_3] \cdot \begin{Bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Como o movimento de cada corpo da MMC é descrito por seis parâmetros em relação ao sistema de coordenadas do corpo adjacente, a transformação que relaciona cada corpo com seu adjacente apresenta a seguinte forma:

$${}^{i-1}T_i = [trans_x] \cdot [trans_y] \cdot [trans_z] \cdot [rot_\kappa] \cdot [rot_\varphi] \cdot [rot_\omega] \quad (6)$$

Onde, as matrizes de translação são derivadas da equação (2) e as matrizes de rotação são expressas da seguinte forma.

$$[rot_\kappa] = \begin{bmatrix} c\kappa & -s\kappa & 0 & 0 \\ s\kappa & c\kappa & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad [rot_\varphi] = \begin{bmatrix} c\varphi & 0 & s\varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\varphi & 0 & c\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad [rot_\omega] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\omega & -s\omega & 0 \\ 0 & s\omega & c\omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Desenvolvendo a equação (6),

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c(\kappa) \cdot c(\varphi) & -s(\kappa) \cdot c(\omega) + c(\kappa) \cdot s(\varphi) \cdot s(\omega) & s(\kappa) \cdot s(\omega) + c(\kappa) \cdot s(\varphi) \cdot c(\omega) & t_x \\ s(\kappa) \cdot c(\varphi) & c(\kappa) \cdot c(\omega) + s(\kappa) \cdot s(\varphi) \cdot s(\omega) & -c(\kappa) \cdot s(\omega) + s(\kappa) \cdot s(\varphi) \cdot c(\omega) & t_y \\ -s(\varphi) & c(\varphi) \cdot s(\omega) & c(\varphi) \cdot c(\omega) & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Onde, ω , φ , κ , t_x , t_y e t_z representam:

- Para movimento do portal, $\omega = xrx$, $\varphi = xry$, $\kappa = xrz$, $t_x = x_d + xpx$, $t_y = xty$ e $t_z = xtz$;
- Para movimento do carro, $\omega = yrx$, $\varphi = yry$, $\kappa = yrz$, $t_x = ytx$, $t_y = y_d + ypy$ e $t_z = ytz$;
- Para movimento do braço, $\omega = zrx$, $\varphi = zry$, $\kappa = zrz$, $t_x = ztx$, $t_y = zty$ e $t_z = z_d + zpz$.

Assim, as transformações que representam cada deslocamento podem ser representadas conforme as equações (7), (8) e (9), considerando que para ângulos muito pequenos, o valor do seno é aproximadamente o valor do próprio ângulo e o valor do co-seno é aproximadamente igual a um. A multiplicação entre dois valores muito pequenos também foi considerada como aproximadamente igual a zero.

Movimento do portal:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & -xrz & xry & x_d + xpx \\ xrz & 1 & -xrx & xty \\ -xry & xrx & 1 & xtz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Movimento do carro:

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} 1 & -yrz & yry & ytx \\ yrz & 1 & -yrx & y_d + ypy \\ -yry & yrx & 1 & ytz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Movimento do braço:

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & -zrz & zry & ztx \\ zrz & 1 & -zrx & zty \\ -zry & zrx & 1 & z_d + zpz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Substituindo (7), (8) e (9) em (5), temos:

Para o deslocamento do portal,

$$\begin{aligned} x &= x_d + x_3 + e_x \\ e_x &= xpx + ytx + ztx - xrz \cdot y_d - (xrz + yrz + zrz) \cdot y_3 \\ &\quad + (xry + yry) \cdot z_d + (xry + yry + zry) \cdot z_3 \end{aligned}$$

Para o deslocamento do carro,

$$\begin{aligned} y &= y_d + y_3 + e_y \\ e_y &= xty + ypy + zty + (xrz + yrz + zrz) \cdot x_3 - (xrx + yrx) \cdot z_d \\ &\quad - (xrx + yrx + zrx) \cdot z_3 \end{aligned}$$

Para o deslocamento do braço,

$$\begin{aligned} z &= z_d + z_3 + e_z \\ e_z &= xtz + ytz + zpz - (xry + yry + zry) \cdot x_3 + xrx \cdot y_d \\ &\quad + (xrx + yrx + zrx) \cdot y_3 \end{aligned}$$

A tabela 1 é uma forma simplificada de apresentar o modelo cinemático de uma MMC.

Tabela 1 – Modelo matemático da interação dos erros paramétricos da MMC.

Eixo	Erro paramétrico	Fator de correção			Eixo	Erro paramétrico	Fator de correção			Eixo	Erro paramétrico	Fator de correção			
		x	y	z			x	y	z			x	y	z	
X (portal)	xpx	1			Y (carro)	ytx	1			Z (braço)	ztx	1			
	xty		1			ypy		1			zty		1		
	xtz			1		ytz			1		zpz			1	
	xrx		$-z_d$	y_d		yry	z_d		$-x_3$		zrx		$-z_3$	y_3	
	xry	z_d		$-x_3$		yrz	$-y_3$	x_3			zry	z_3		$-x_3$	
	xrz	$-y_d$									zrz	$-y_3$	x_3		
		$-y_3$	x_3												

Conforme apresentado até aqui, uma MMC constituída por três partes móveis deslocando-se ao longo de três eixos resulta num total de 18 erros paramétricos. Entretanto, é comum se referir a este tipo de máquina como tendo um total de 21 erros paramétricos. Estes três outros parâmetros são os chamados **desvios de ortogonalidade**. Um desvio de ortogonalidade ocorre quando as retas que melhor se ajustam às curvas de deslocamento dos corpos móveis sobre cada eixo de uma MMC não são perpendiculares entre si^[27]. Os desvios dos ângulos nos planos XY, YZ e ZX são normalmente simbolizados por xwy , ywz e xwz , respectivamente. Ângulos maiores que 90° resultam em desvio de ortogonalidade positivo (Figura 9).

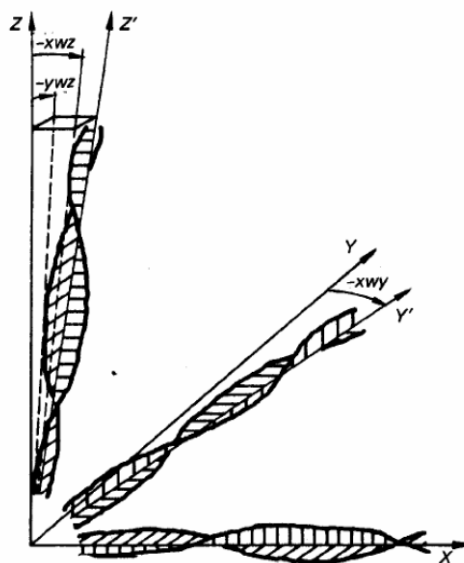


Figura 9 – Sistema de coordenadas resultante de desvio de retidão e ortogonalidade^[27].

Embora matematicamente os desvios de ortogonalidade não precisem ser tratados separadamente, existem diferentes formulações visando adequar os modelos matemáticos às práticas de compensação dos erros.

Alguns autores^{[10],[24],[29],[30]} consideram que o efeito do desvio de ortogonalidade atua sobre o vetor translação. Desta forma, as equações (8) e (9) são expressadas da seguinte forma:

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} 1 & -yrz & yry & ytx - xwy \cdot y_d \\ yrz & 1 & -yrx & yd + ypy \\ -yry & yrx & 1 & ytz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & -zrz & zry & ztx - xwz \cdot z_d \\ zrz & 1 & -zrx & zty - ywz \cdot z_d \\ -zry & zrx & 1 & zd + zpz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Por outro lado, Vicente^[19] propõe o uso de uma matriz H de ortogonalização, ou seja uma matriz de mudança da base ortogonal para base não ortogonal derivada da construção da máquina.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & -s(xwy) & & -s(xwz) \\ 0 & c(xwy) & & \frac{-s(xwy)s(xwz) - s(ywz)}{c(xwy)} \\ 0 & 0 & \pm \sqrt{c^2(xwz) - t^2(xwy)s^2(xwz) - \frac{s^2(ywz)}{c^2(xwy)} - \frac{2s(xwy)s(xwz)s(ywz)}{c^2(xwy)}} & \end{bmatrix}$$

Esta matriz permite determinar as coordenadas (x_h, y_h, z_h) de um ponto em relação a um referencial ortogonal, conhecidas suas coordenadas em relação ao referencial não ortogonal (x, y, z) .

$$\begin{Bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \end{Bmatrix} = [H] \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}$$

Para fins de compensação de erros, o equacionamento mais adequado depende do julgamento de quem vai aplicá-lo, ou seja, o responsável pela calibração, que normalmente é o próprio fabricante da MMC. Apesar da compensação de erros paramétricos não fazer parte do escopo desta dissertação, é importante apresentar o conceito de erro de ortogonalidade por ser um desvio facilmente percebido em ensaios de verificação rápida.

2.2 AVALIAÇÃO DE MMC

De uma maneira geral a avaliação do desempenho de uma MMC pode ser dividida em três categorias.

- **Calibração**, ensaios onde os erros sistemáticos são acessados e correções físicas ou ajustes no CAA⁶ da máquina são efetuados.
- **Verificação de desempenho**, ensaios normalmente confundidos com calibração, onde se verifica se o erro encontrado nas medições feitas em um artefato está entre os valores limites especificados.
- **Verificação rápida**, ensaios mais curtos, usados para verificar a estabilidade da MMC.

Segundo o PTB⁷, os métodos ideais para verificação rápida, verificação de desempenho e calibração, devem combinar as seguintes propriedades^[29]:

- Uso de padrões rastreáveis - A verificação de desempenho e a verificação rápida não garantem a rastreabilidade das medições com MMC. Entretanto é reconhecido que, em ambiente industrial, estas verificações são hoje o que mais se aproxima do conceito de rastreabilidade disponível ao usuário^[31].
- A incerteza do resultado da avaliação deve apresentar valores aceitáveis internacionalmente.
- As três categorias de ensaio devem usar o mesmo conceito de artefato e de processamento de dados.

⁶ CAA: *Computer Aided Accuracy – Sistema de compensação de erros da MMC com auxílio do computador.*

⁷ PTB: *Physikalisch Technische Bundesanstalt – Instituto nacional de metrologia da Alemanha.*

- Os resultados devem ser compatíveis entre as categorias.
- Deve existir compatibilidade com os padrões (artefatos) existentes.
- Baixos custos, em relação à necessidade de recursos humanos, *hardware*⁸ e *software*.

A seguir são apresentadas mais detalhadamente as diferentes categorias de avaliação de MMC.

2.2.1 Calibração

De acordo com o VIM^[32], calibração é o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um sistema de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões. Entretanto, devido à grande versatilidade dos sistemas de medição por coordenadas e à complexidade dos erros sistemáticos, o processo de calibração de uma MMC se torna impraticável para todas as tarefas de medição possíveis. Por outro lado, as verificações de desempenho descritas nas principais normas não garantem a rastreabilidade das medições. Kunzmann *et al*^[29] entendem que calibração significa conhecer o comportamento dos erros de um sistema de medição para todos os tipos de configuração e de aplicação pretendida. A solução proposta pela diretriz EAL-G17^[31] é o conceito de calibração voltada para **tarefa específica de medição**⁹. Desta forma os métodos para calibração de MMC podem ser divididos em princípio do comparador e técnica da síntese dos erros (ou técnica paramétrica), conforme definidos a seguir:

- **Princípio do comparador** – Consiste na comparação dos valores obtidos na medição de um objeto de referência rastreado e com essencialmente o mesmo tamanho e forma geométrica da peça que se deseja medir. Esse procedimento permite obter um resultado de medição rastreável com alta exatidão e com esforço relativamente baixo.

⁸ *Hardware: unidades físicas.*

⁹ *Tarefa específica de medição: só são analisadas as fontes de erro que afetam determinada tarefa de medição. Exemplo: se a tarefa de medição for medir um diâmetro, a calibração deve ser feita com um padrão de mesmo diâmetro nominal usado na mesma posição da MMC.*

- **Técnica da síntese dos erros (mapeamento dos erros paramétricos)** – Consiste em acessar individualmente os erros paramétricos de uma MMC através de medições específicas. Estes erros são compensados através da substituição dos valores medidos em modelos matemáticos. Os erros paramétricos podem ser determinados através de dois métodos:
 - **Medições diretas** onde são usados artefatos e equipamentos de medição convencionais, como laser interferométrico, padrões escalonados, réguas, esquadros, entre outros.
 - **Medições indiretas** onde os erros paramétricos são estimados a partir da diferença entre valor indicado pela MMC e o valor calibrado de um artefato como placa de furos/esferas ou padrão escalonado.

2.2.2 Verificação do desempenho de máquinas de medir por coordenadas

Embora as MMC tenham surgido no mercado na segunda metade da década de 50, foi apenas com o surgimento de procedimentos normalizados para verificação de desempenho que a qualidade das máquinas teve um avanço significativo^[33]. O propósito primário destas normas foi o de melhorar a relação comercial entre usuários e fabricantes. Hoje, porém, com o aumento da preocupação com a garantia da qualidade das medições, em normas como a ISO 10360-2^[6], ocorre a separação da verificação de desempenho em **testes de aceitação** e **testes de reavaliação**. Testes de aceitação são executados de acordo com especificações e procedimentos do fabricante, enquanto os testes de reavaliação são executados de acordo com a especificação do usuário, ao invés de seguir o procedimento do fabricante. Entretanto, quando são adotadas distintas metodologias, a comparação entre máquinas avaliadas seguindo diferentes normas torna-se difícil e confusa.

A maioria das normas e diretrizes estão, essencialmente, baseadas em verificar o desempenho da tarefa de medição de comprimento, bem como verificar os erros de apalpação (Tabela 2). A indicação de erro de comprimento máximo admissível, E [μm], de uma MMC é normalmente expressa por:

$$E = A + \frac{L}{K} \quad (10)$$

Onde:

A [μm] e K [adimensional] são constantes fornecidas pelos fabricantes;

L [mm] é o comprimento medido.

Os desvios resultantes das medições dos comprimentos de artefatos (blocos padrão, padrão escalonado, placas de furos/esfera) devem estar dentro do intervalo determinado por E , conforme representado na figura 10.

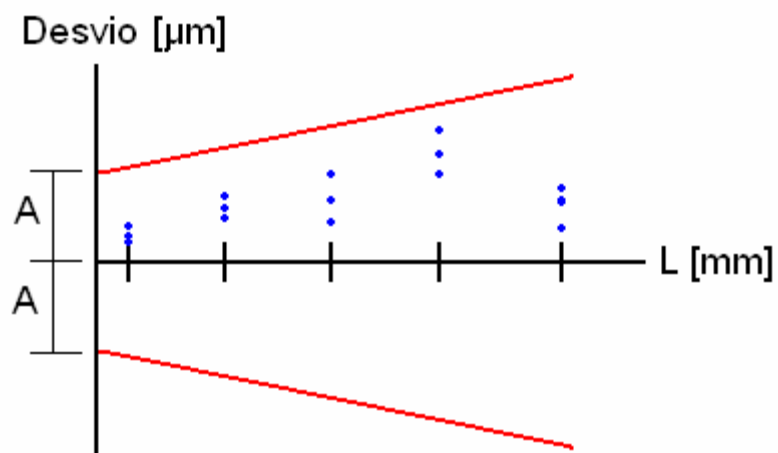


Figura 10 – Representação gráfica do ensaio de verificação de desempenho.

Tabela 2 – Comparação entre normas (adaptado ^[11]).

Parâmetros	Normas para Avaliação de Desempenho de Máquinas de Medir por Coordenadas						
	ISO 10360-2	BS 6808	ASME B89.1.12M	VDI/VDE 2617	NF E11 150	JIS B 7440	CMMA
Tarefa de Medição	Comprimento	Comprimento	Vários	Comprimento	Vários	Vários	Vários
Comprimentos	5	5 ou 10	Depende da MMC	5	8	5	3
Repetições	3	5 ou 10	1	10	5	5	3
Intervalo de confiança	100%	95%	100%	95%	100%	95%	95%
Repetitividade	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Sim
Artefatos	Blocos padrão; Padrão escalonado	Blocos padrão; Padrão escalonado	Barra com 2 esferas	Blocos padrão; Padrão escalonado	Vários - Elementos geométricos e blocos padrão	Blocos padrão; Padrão escalonado	Blocos padrão
Posições	7	8	20-30	7	12	5	7
Deriva térmica	Não	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim
Ensaio do apalpador	Sim	Não	Sim	Opcional	Não	Não	Não

2.2.3 Verificação rápida (*Interim Check*)

Durante sua aplicação regular, uma MMC e seus subsistemas devem expressar os mesmos erros que apresentavam após a última calibração. Não identificar uma alteração no estado da máquina pode comprometer a validade dos resultados de todas as futuras medições. Uma forma efetiva de assegurar o desempenho de uma MMC é através do ensaio aqui denominado de “verificação rápida”, e conhecido internacionalmente por *interim check*. Este consiste em verificar todo o sistema de medição, incluindo os subsistemas como o de apalpação e o de compensação de temperatura. Não há interesse em diagnósticos, e sim em monitorar alguns parâmetros dos subsistemas da MMC através de gráficos de controle estatístico de processo.

O tempo de duração do ensaio não é tão extenso quanto os ensaios de aceitação ou mapeamento de erros paramétricos. Aliás, por razões econômicas e práticas, o tempo do ensaio deve ser o menor possível. Os ensaios devem ocorrer em diferentes horas do dia para enriquecer a amostragem dos diversos fatores que influenciam a medição, como os operadores da MMC e variação térmica e vibracional do ambiente. Embora a execução de verificações rápidas seja recomendada por uma variedade de normas e diretrizes, não existem, no entanto, procedimentos específicos. A norma ISO 10360-2^[6] faz uma forte recomendação para que as MMC sejam regularmente verificadas durante intervalos entre avaliações de desempenho. A frequência deve ser determinada pelo usuário de acordo com as condições ambientais e com a incerteza desejada para as medições. Recomenda-se também que a MMC seja verificada após qualquer evento que possa causar alteração no sistema (alteração brusca de temperatura, impacto).

A verificação rápida de uma MMC é normalmente realizada através da comparação do resultado da medição de um artefato com seu valor calibrado. A escolha do artefato deve levar em consideração o tipo de tarefa realizada pela máquina. Os artefatos devem ser dimensionalmente estáveis, mecanicamente robustos e com acabamento superficial bom o suficiente para não afetar significativamente o resultado da medição. Entre os artefatos mais comumente usados temos as placas de esferas ou furos, barra de esferas, anéis padrão entre

outros. Também podem ser usados padrões para uma finalidade específica, ou mesmo peças padrão no caso de máquinas de uso dedicado.

2.3 SISTEMA DE APALPAÇÃO

O sistema de apalpação é o componente que relaciona a posição do ponto a ser medido ao sistema de coordenadas da máquina^[34]. Atualmente existe uma variedade de sistemas de apalpação para diferentes aplicações. Entre estes se destacam os sistemas com cabeçote comutador (*touch-trigger probes*, figura 11 - esquerda), os com cabeçote medidor ou analógico (*measuring probes*, figura 11 - direita) e os com cabeçotes ópticos.

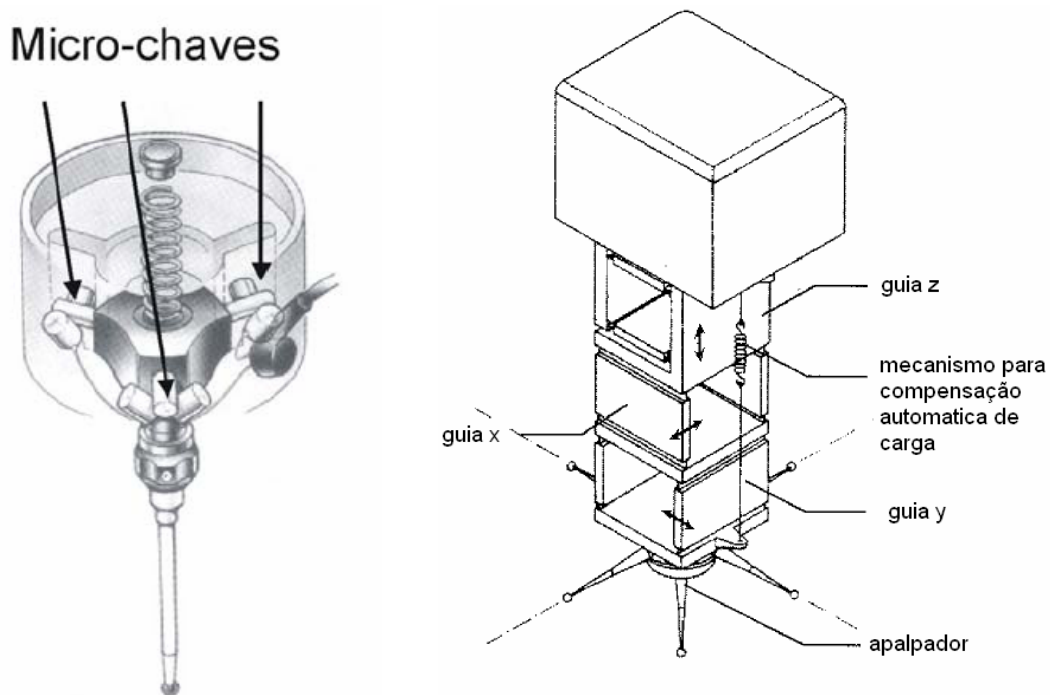


Figura 11 – Cabeçote tipo comutador (esquerda, Renishaw^[10]) e cabeçote tipo medidor (direita, adaptado^[35]).

2.3.1 Fontes de erro

Erros causados pelo sistema de apalpação são caracterizados por desvios na posição de referência do apalpador. Em geral as fontes de erro do sistema de apalpação são parcialmente as mesmas que envolvem as MMC^[35]. Algumas das potenciais causas de erros são:

- **Erros geométricos.** São resultado de limitações envolvendo processo de fabricação. Por exemplo, erro de forma da esfera de apalpação, desalinhamento da haste em função de erros de montagem.
- **Rigidez limitada.** A principal causa do *pre-travel*¹⁰ é a flexão da haste do apalpador. No entanto, há também o efeito de deformação elástica da peça apalpada e da esfera do apalpador em função da chamada tensão Hertziana¹¹.
- **Efeitos térmicos.** A localização do centro da esfera pode sofrer deslocamentos caso haja dilatação da haste. Além disso, deformação térmica de componentes internos pode comprometer o funcionamento.
- **Erros induzidos eletronicamente.** Este tipo de erro pode ser principalmente observado em apalpadores comutadores quando há “atraso” no tempo de resposta dos circuitos eletrônicos.
- **Erros construtivos.** Causados por limitações do projeto ou limitações construtivas. Por exemplo, histerese, padrão de lóbulos observados em medição de círculos com apalpadores do tipo comutador, repetitividade no acoplamento de cabeçotes indexadores, etc.

2.3.2 Modelo matemático

Conforme apresentado na equação (11), a posição do ponto P , vetor r_0 em coordenadas máquina (x, y, z) , é obtida através do produto da matriz de transformação que define o posicionamento do cabeçote em relação à máquina r_m , da matriz de transformação que define o posicionamento do centro da esfera do apalpador (ponto A) em relação ao cabeçote r_a , e do vetor b que liga o ponto realmente apalpado (ponto P) ao ponto A (Figura 12).

¹⁰ *Pré-travel* é o termo relacionado ao deslocamento do sensor (apalpador) entre o momento em que este toca a peça e o momento do sistema computar a medição.

¹¹ *Tensão Hertziana* é causada pelo contato entre dois corpos^[34].

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{Bmatrix} = [{}^0T_3] \cdot [{}^3T_A] \cdot \begin{Bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \\ 1 \end{Bmatrix} = \{\bar{r}_m\} + \{\bar{r}_a\} + \{\bar{b}\} \quad (11)$$

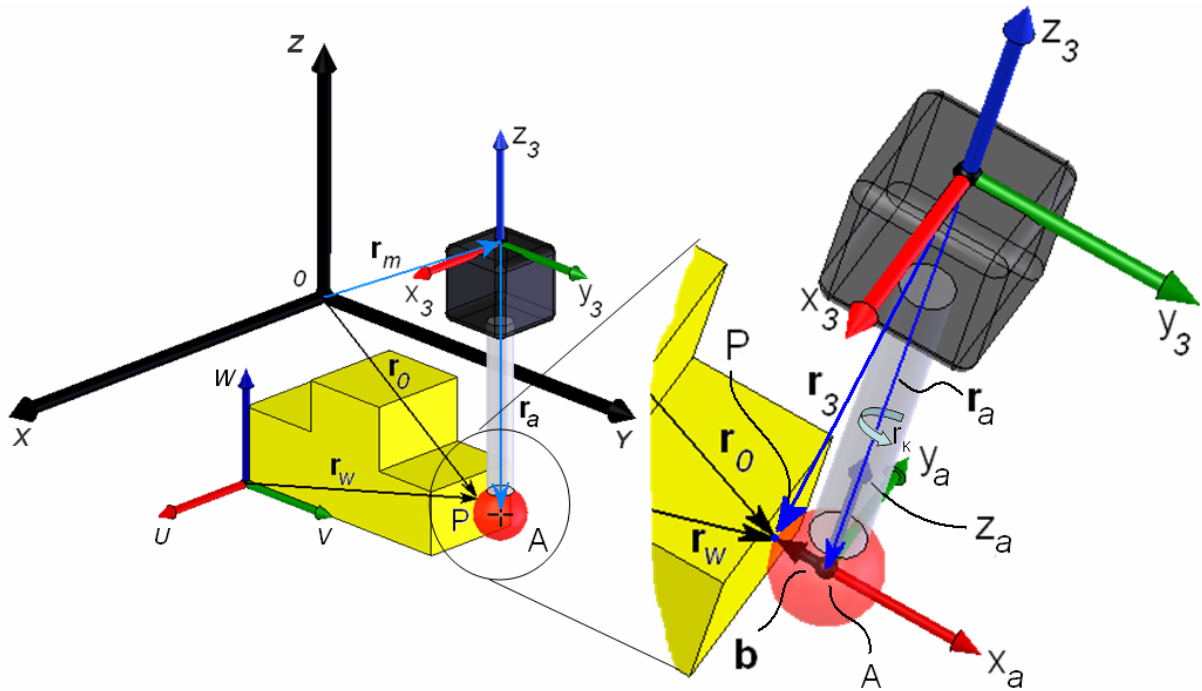


Figura 12 – Sistema de apalpação em medição por coordenadas (adaptado^[34]).

A relação do posicionamento do ponto P com o ponto A , origem do sistema de coordenadas do apalpador (x_A, y_A, z_A), pode ser descrita através da matriz de transformação M_P , conforme a equação (12).

$$\begin{Bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{Bmatrix} = \{\bar{r}_3\} = [M_P] \begin{Bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

Onde o vetor (b_x, b_y, b_z) é o raio b da esfera do apalpador. A matriz de transformação M_P é definida pelo tipo de apalpador, pelas propriedades elásticas dos materiais dos componentes¹², pelo *software* de compensação, pela força de apalpação e pelos demais fatores que afetam o desempenho do sistema de apalpação. Um exemplo simplificado de uma matriz de transformação é apresentado

¹² Principalmente a haste do apalpador.

na equação (13), baseado no modelo mecânico descrito por Estler *et al* ^[36] para compensação de erros de sistemas de apalpação do tipo comutador.

$$\begin{aligned} [M_p] &= [\delta][n] \\ \text{onde:} & \\ [\delta] &= [d_R][d_B]; \quad [n] = [rot_\kappa][rot_\varphi] \end{aligned} \tag{13}$$

A matriz d_R , considerando a hipótese de corpo rígido para todos os componentes, é usada para compensar o deslocamento devido à rotação infinitesimal que ocorre em função do “atraso” na resposta do acionamento de uma das três micro-chaves (Figura 12). A matriz d_B corresponde à flexão da haste. Já a matriz n é a matriz de orientação da força de apalpação.

2.3.3 Avaliação do sistema de apalpação

Qualificação do apalpador é um experimento que tem como objetivo compensar os desvios sistemáticos inerentes ao sistema de apalpação. Um sistema de apalpação virtual ideal é definido através de uma esfera efetiva (menor que a real) e uma haste que não deforma, a partir de medições feitas em um artefato calibrado^[34].

Entretanto, os desvios efetivos não são totalmente compensados. Isto ocorre devido à limitação em relação à amostragem de pontos da qualificação, à repetitividade e à diferente condição de qualificação em relação à medição. Algumas normas, como ASME B89.1.1.2M^[10], VDI/VDE 2617-3^[27] e ISO 10360-2^[6] (Tabela 3), descrevem testes para **verificação do desempenho** do sistema de apalpação a fim de estimar os desvios residuais.

De acordo com a norma ASME B89.1.1.2M^[10], três configurações¹³ de apalpador são avaliadas. Com cada configuração, são medidos 49 pontos distribuídos sobre uma esfera com baixo erro de forma. O resultado da verificação é o erro de forma da esfera obtido através do algoritmo dos mínimos quadrados.

A norma VDI/VDE 2617-3^[27] especifica testes uni-, bi- ou tridimensionais com o objetivo de estimar a incerteza do sistema de apalpação (Figura 13). O teste

¹³ Por configuração do apalpador entende-se orientação das hastes.

tridimensional é semelhante ao da norma ASME B89.1.1.2M^[10], onde o resultado é erro de forma de uma esfera definida por 50 pontos.

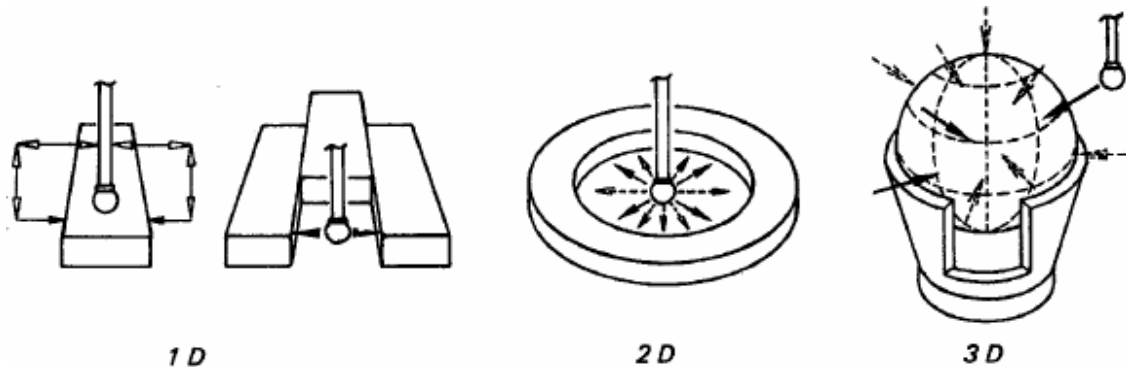


Figura 13 – Ensaio para avaliação de desempenho do sistema de apalpação^[27].

Já a norma ISO 10360-2^[6] propõe a medição de 25 pontos sobre o hemisfério de uma esfera para cálculo do erro de forma. O ensaio descrito na ISO 10360-5^[37] é voltado para apalpadores com cabeçotes indexadores ou de múltiplas hastes (*Multiple Styli*). São medidos 25 pontos com cinco configurações diferentes. Os parâmetros avaliados são: o erro de forma; o erro de posicionamento; e o erro de tamanho. Maiores detalhes são apresentados na seção 3.3.1.

2.4 ARTEFATOS MECÂNICOS PARA AVALIAÇÃO DE MMC

Uma variedade de métodos e padrões de referência foram propostos e aplicados nas últimas décadas com o objetivo de avaliar as MMC. Estes métodos podem ser classificados em três grupos principais: métodos baseados no uso de artefatos mecânicos; técnicas ópticas; e métodos opto-mecânicos^[11]. Artefatos mecânicos possibilitam a avaliação da capacidade do sistema de medição por coordenadas através de tarefas de medições semelhantes à aplicação prática, onde se comparam comprimentos calibrados e medidos. Técnicas ópticas, como LASER interferométrico, podem mapear 18 das 21 componentes de erros paramétricos, porque erro de rolamento (*roll*) não pode ser medido diretamente^[11]. Os métodos opto-mecânicos combinam o sistema de apalpação mecânico com a medição através de LASER interferométrico. Em geral medições envolvendo técnicas ópticas são mais aplicadas a ensaios de calibração e são normalmente métodos caros e demorados, tornando-se inviável sua aplicação em ensaios de verificação rápida.

O uso de artefato mecânico, mais precisamente blocos padrão e padrão escalonado, é recomendado pelas principais normas de avaliação de desempenho^{[6],[38]} (Tabela 2). O efeito disto pode ser visto na figura 14 onde são apresentados os principais padrões utilizados pelos usuários de MMC no Brasil. Destaca-se a utilização de blocos padrão em 50% dos casos, seguida do padrão escalonado com 27%^[9]. Artefatos como barras de esferas, *machine checking gauge*[®] (MCG, figura 17), e placas de furos ou esferas aparecem com menor incidência de utilização, embora sejam recomendados pela ISO 10360-2^[6] para ensaios de verificação rápida.

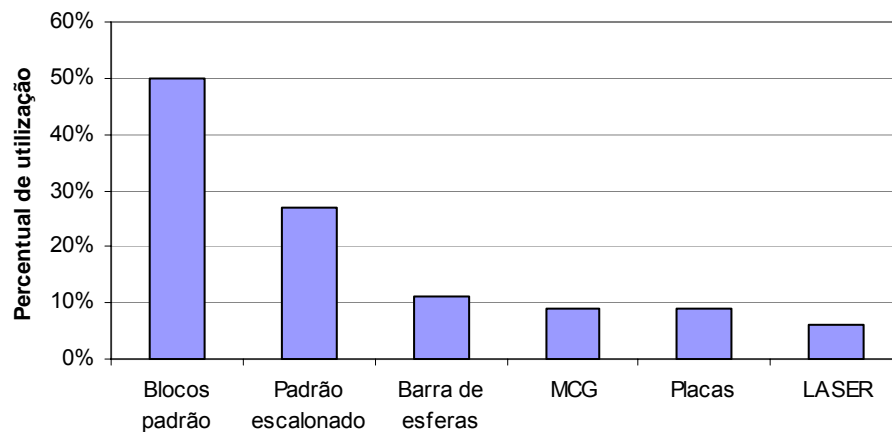


Figura 14 – Utilização de padrões para avaliação de máquinas de medir por coordenadas no Brasil. (dados obtidos de ^[9]).

É comum que os artefatos sejam categorizados de acordo com o número de coordenadas espaciais associadas às principais características calibradas^[39], podendo ser unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais.

2.4.1 Unidimensionais

Os ensaios de verificação de desempenho com **blocos padrão** (Figura 15 esquerda) consistem em medir um conjunto de blocos em uma variedade de posições e orientações. Entretanto, para ensaios de verificação rápida pode-se usar suportes que facilitam o posicionamento sobre a mesa das MMC. O **padrão escalonado** (Figura 15 direita) tem a função da montagem de um conjunto de blocos padrão, porém em apenas uma peça. Apesar de ser mais robusto que os blocos padrão, possuem uma menor exatidão. É uma solução recomendada^{[31],[6]} para

ensaios de verificação de desempenho e calibração, mas pode ser usado também em ensaios de verificação rápida se o número de comprimentos medidos for reduzido.

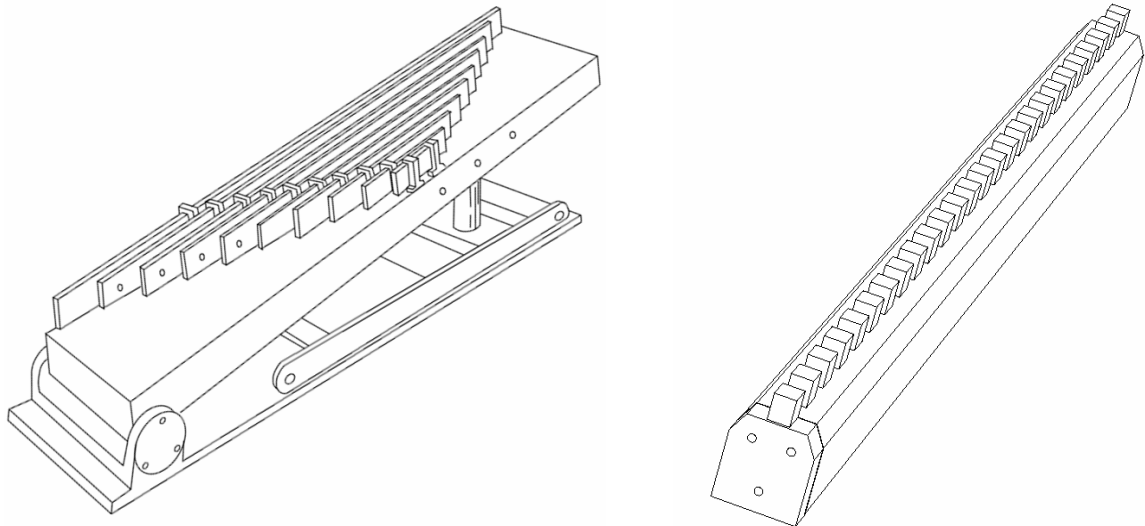


Figura 15 – Montagem de blocos padrão^[38] (esquerda) e padrão escalonado (direita).

As **barras com esferas nas extremidades** (*Ball-ended Bars*) são mais recomendadas para ensaios de verificação rápida do que os artefatos citados previamente. Consistem de duas esferas, com bom acabamento e baixo erro de forma, posicionadas nas extremidades de uma barra rígida. Estes artefatos foram inicialmente criados com o objetivo de avaliar máquinas manuais com mancais de ar, com a barra de esferas fixa ao cabeçote de apalpação (*probe holder*)^[40]. As principais vantagens são o baixo custo e a portabilidade. Porém, assim como os blocos padrão e padrões escalonados, têm a desvantagem de envolver ensaios demorados devido à necessidade de se medir várias posições. Montagens como a apresentada na figura 16 (esquerda) têm como objetivo simplificar o ensaio, tornando-o mais rápido, embora se perca com o aumento de massa e de custo.

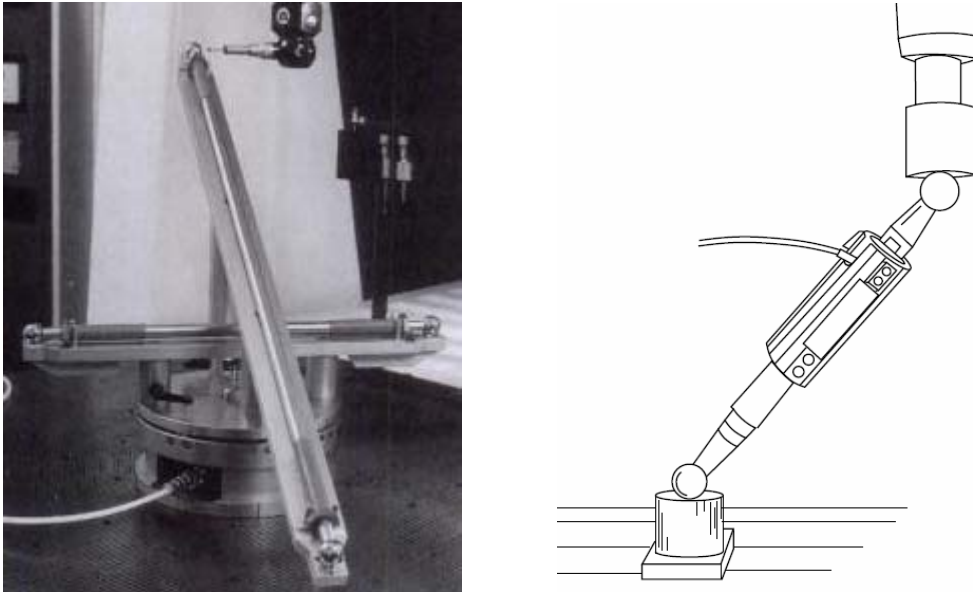


Figura 16 – Montagens de barras de esferas (esquerda)^[10]. Barra de esferas telescópica com encaixe magnético^[38] (direita).

Outra alternativa para a necessidade de reposicionamento das barras de esferas é conhecido como **barra de esferas telescópica com encaixe magnético** (*telescoping magnetic ball bar*, figura 16 direita). Este método consiste em fixar um soquete magnético na mesa da MMC e outro no cabeçote de apalpação. O cabeçote realiza movimentos circulares ao redor do soquete posicionado na mesa da MMC e um transdutor de deslocamento incorporado à barra de esferas mede a variação de distância, sendo assim possível avaliar o desempenho da máquina^[41]. A complexidade em processar o sinal do transdutor é apresentada como principal inibidor para aplicação^{[38],[42]}.

Uma barra que pode ser cinematicamente localizada entre uma esfera de referência fixa e a esfera do apalpador pode ser uma solução para o problema do múltiplo posicionamento das barras de esferas. Este tipo de dispositivo é conhecido no mercado por **Machine Checking Gauge**[®] (Figura 17) e consiste de uma base de suporte para um pivô calibrado, uma barra (disponível comercialmente em seis comprimentos) e um apalpador especialmente calibrado^{[43],[44],[45]}. Entre as principais vantagens estão a portabilidade, a facilidade de utilização e o tempo de ensaio. Porém não é tão robusto como outros artefatos e só pode ser usado em máquinas capazes de deslocar o apalpador em movimentos circulares, ou seja, não é adequado para máquinas manuais.

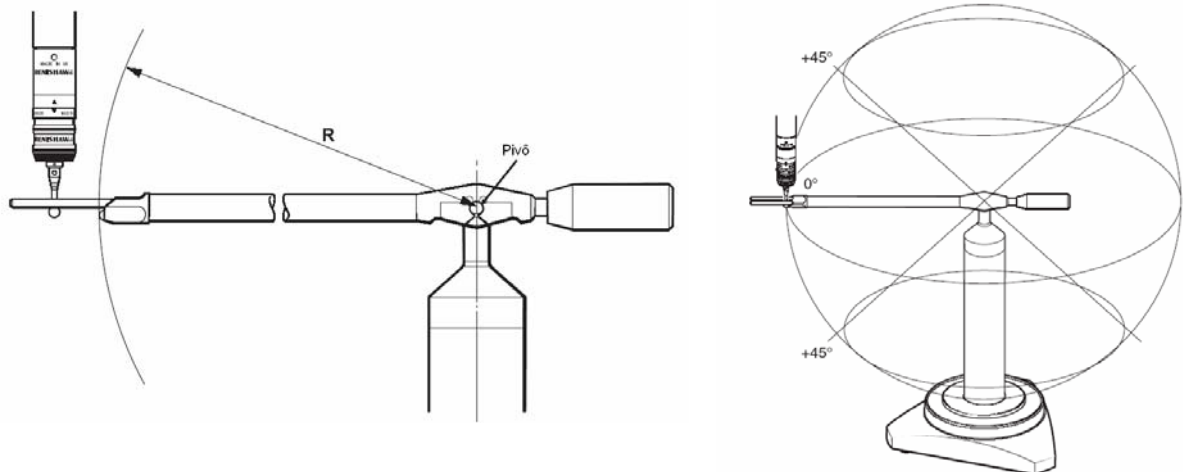


Figura 17 – Machine Checking Gauge^[45]

2.4.2 Bidimensionais

Artefatos bidimensionais como **placas de esferas** (Figura 18) e de **furos** (Figura 19) começaram a se propagar na década de 90 quando surgia a necessidade por métodos de avaliação mais práticos, que necessitavam de montagens menos complicadas e acompanhados por *softwares* para auxílio no processamento^[46]. São padrões cuja aplicação não está tão difundida quanto os padrões unidimensionais, mas são recomendados por algumas normas e diretrizes^{[6],[7],[31],[38]}.

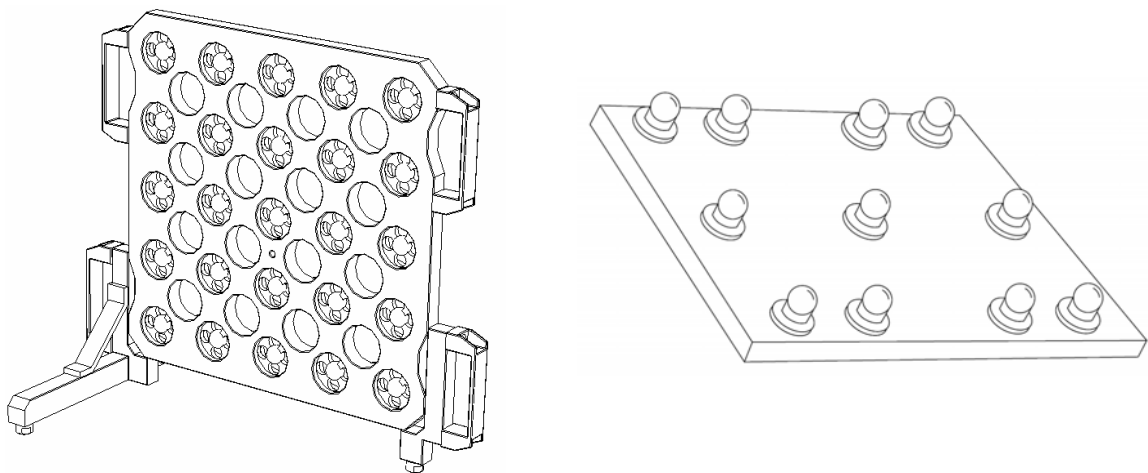


Figura 18 – Placas de esferas.

O método proposto pelo PTB^[31], para ensaios de calibração em MMC com três eixos lineares, utiliza uma placa calibrada com elementos de apalpação distribuídos de forma equidistante entre si em linhas e colunas. O método para

calibração¹⁴ consiste em medir a placa (como são dispostos os furos) em quatro posições com cinco configurações de apalpador resultando em seis medições. A calibração com placas padrão é considerada uma solução adequada, porque podem ser calibradas com uma baixa incerteza ($\pm 0,8 + 1,1 \times 10^{-6} L$ [mm]) μm [29],[46]. As placas são relativamente baratas (se comparadas a padrões tradicionais de mapeamento de erros geométricos através de medições diretas) e a quantidade de informação obtida por unidade de tempo de medição em uma calibração é significativamente superior se comparada a outros padrões.

Segundo VDI/VDE 2617-5.1^[7] e conforme recomendação do PTB^[29], uma placa de 5 X 5 elementos de referência, utilizada em calibração, pode ser usada para executar verificações rápidas. Entretanto, dificuldades operacionais levaram ao desenvolvimento de novos conceitos de placas. Com uma placa de quatro furos (Figura 19, direita), medida nas mesmas posições do procedimento de calibração proposto pelo PTB, pode-se obter uma aproximação linear dos erros de rotação, posicionamento e ortogonalidade^[49].

Uma placa de três furos foi desenvolvida exclusivamente para ensaios de verificação rápida^[47] (Figura 19, esquerda). O método proposto consiste em medir a placa em quatro posições monitorando desvios de ortogonalidade e a capacidade da máquina de medir tamanho e diâmetro.

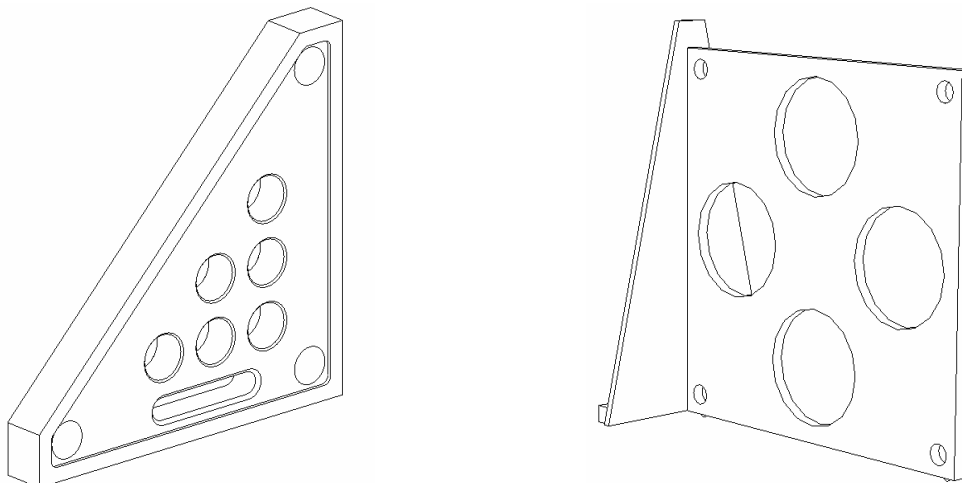


Figura 19 – Placas furos.

¹⁴ Método da síntese dos erros por medição indireta.

Um artefato circular com diâmetro calibrado e circularidade certificada, tal como um **anel padrão**, é outra opção para verificação de MMC^{[6],[48]}. Recomenda-se medir um anel padrão em pelo menos duas posições com diferentes configurações de apalpador. Knapp^[11] sugere que o artefato seja medido pelo método de scanning ou com amostragem de 30 pontos. Pode-se observar o efeito dos erros geométricos da máquina através da comparação entre o gráfico de erro de forma do padrão, obtido na calibração, e o resultado da medição.

2.4.3 Tridimensionais

O objetivo dos ensaios com artefatos tridimensionais não é mapear erros geométricos ou cumprir requisitos de aceitação, mas indicar quando uma avaliação mais completa é necessária^[11]. Em geral, a aplicação deste conceito em verificações rápidas vêm se mostrando popular desde o início dos desenvolvimentos das MMC^[38]. O principal atrativo destes padrões é redução no tempo de ensaio devido à necessidade de um menor número de posicionamentos. Entretanto, com a redução do número de posicionamentos, surge a necessidade de ocupar um volume relativamente grande elevando assim a massa do artefato e afetando sua rigidez.

O **bloco de esferas** consiste de uma estrutura para sustentar oito esferas nos vértices de um cubo. A estrutura é normalmente do tipo de caixa ou treliça e pode ser composta de fibra de carbono, aço, alumínio, vidro, quartzo ou cerâmica. A escolha do material depende do tipo de avaliação desejada: apenas a MMC, ou a MMC sob suas condições ambientais^[49]. Um aperfeiçoamento deste método permite determinar, através de uma aproximação linear, os erros de rotação, posicionamento e ortogonalidade^[50].

Uma estrutura com quatro elementos de apalpação esféricos conectados entre si por barras de fibra de carbono, formando a geometria de um **tetraedro**, é uma solução satisfatória ao problema da relação massa rigidez apresentado anteriormente. Por ser necessária apenas uma configuração de apalpador para medir as quatro esferas, o ensaio de verificação é muito rápido sendo, em geral, necessária apenas uma posição sobre a mesa. Apesar de ser um conceito antigo¹⁵, aperfeiçoamentos recentes têm tornado a solução ainda mais atrativa. Um tetraedro,

¹⁵ Uso recomendado pela norma BS 6808-3^[38] publicada em 1989.

onde as esferas e as barras são conectadas por forças magnéticas, possibilitam a montagem e desmontagem da estrutura, facilitando significativamente o transporte^[51].



Figura 20 – Cubo de esferas^[52] (esquerda) e tetraedro^[53] (direita).

2.5 DISCUSSÃO

Este capítulo iniciou com a apresentação do modelo cinemático de uma MMC a fim de ilustrar como estes erros influenciam os resultados das medições. O entendimento do modelo cinemático também facilita a compreensão e diferenciação dos métodos para avaliação de desempenho da MMC. Na seqüência foram apresentadas, de forma breve, as categorias em que os ensaios de avaliação estão divididos, com o objetivo de facilitar a distinção dos ensaios de verificação rápida. Por fim, foi dada uma ênfase aos artefatos mecânicos, já que englobam a quase totalidade das soluções para ensaios de verificação rápida, inclusive a solução proposta nesta dissertação.

Em geral artefatos unidimensionais são mais baratos e fáceis de transportar. Entretanto, Trapet e Franke^[54] relatam que, para se obter o mesmo volume de informação¹⁶, é necessário medir 18 elementos num padrão tridimensional (cubo de oito esferas), 19 num padrão bidimensional (placa de quatro furos) ou 32 num

¹⁶ Se refere a quantidade de informação, como sendo a quantidade de erros paramétricos que um artefato é capaz de determinar.

unidimensional (barra de duas esferas). Em geral, apesar dos artefatos tridimensionais serem mais vantajosos quanto à quantidade de informação por número de posições, levam desvantagem em relação aos artefatos bidimensionais no que diz respeito a custo de produção, dificuldade de transportar e robustez.

Conforme mencionado, mesmo havendo uma grande variedade de opções, os ensaios de verificação rápida são pouco aplicados no Brasil. Acredita-se que o fato da maioria destes artefatos serem importados, aliado ao pouco conhecimento em relação às conseqüências da não realização de verificações rápidas, podem estar entre as principais causas para o problema no Brasil.

No próximo capítulo será apresentada uma proposta de solução visando reduzir as dificuldades encontradas na aplicação dos artefatos atuais.

3 UMA SOLUÇÃO PARA VERIFICAÇÃO RÁPIDA DE MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS

Conforme apresentado no capítulo 1, pelo menos 58% dos usuários de MMC no Brasil não verificam suas máquinas com a frequência recomendada. Este dado mostra que apesar de haver uma multiplicidade de ofertas, estas não satisfazem as necessidades da maioria dos usuários brasileiros. Identificou-se, então a necessidade de projetar um artefato que encoraje o uso freqüente, que esteja de acordo com as recomendações da ISO 10360-2^[6] e que seja economicamente viável.

A definição do problema é o primeiro passo no desenvolvimento de um projeto. Esta definição pode ser feita através do estabelecimento de requisitos funcionais que satisfaçam as necessidades identificadas^[55]. Os requisitos funcionais estabelecidos para este projeto são:

1. **Baixo tempo de ensaio** – por razões econômicas, a duração dos ensaios deve ser a menor possível já que se propõe que os mesmos ocorram diariamente ou semanalmente.
2. **Facilidade no manuseio** – baixo peso e ausência de suportes pesados e de difícil montagem. A fim de motivar seu uso freqüente, é fundamental que o artefato possa ser facilmente manuseado por apenas uma pessoa.
3. **Baixo custo** – para incentivar uso em pequenas e médias empresas brasileiras, o preço final é relevante. Assim deve-se reduzir o máximo possível o custo de fabricação.

4. **Fácil de calibrar** – deve ser possível calibrar o artefato no Brasil com valores de incerteza adequados.
5. **Permitir o monitoramento dos principais erros paramétricos** – os erros de posicionamento e ortogonalidade são os de maior relevância.
6. **Robustez** – suficiente para suportar pequenos impactos sem levantar dúvida sobre a integridade e validade da calibração do artefato.
7. **Possibilidade de ser fabricado em diferentes tamanhos** – para melhor diagnóstico volumétrico, o tamanho do artefato deve ser pelo menos 50% do comprimento do menor eixo da MMC.
8. **Estabilidade dimensional** – imprescindível para padrões.
9. **Bom acabamento dos elementos de apalpação** – baixo erro de forma e rugosidade na superfície de apalpação reduzem a incerteza da calibração e dos resultados da aplicação.
10. **Elementos de apalpação com formas geométricas básicas bem definidas** – elementos geométricos reconhecidos pelos softwares da MMC, por exemplo, esferas, cilindros, planos entre outros.

Alguns destes requisitos podem ser quantificados pelos valores a seguir.

1. Tempo de execução do ensaio deve ser inferior a 30 min.
2. Massa total deve ser inferior a 10 kg.
3. Preço de mercado inferior a R\$ 10.000,00, resultando em um produto competitivo e acessível.

3.1 SOLUÇÃO CONCEITUAL PARA O ARTEFATO

Uma vez formalizada a definição do problema através dos requisitos funcionais, idéias são geradas para criação do protótipo. Estas idéias são então analisadas e comparadas com os requisitos funcionais pré-estabelecidos. Caso os requisitos não sejam atendidos, novas idéias devem ser geradas ou novos requisitos estabelecidos. Este é um processo iterativo que continua até que um resultado aceitável seja atingido. O resultado do processo criativo de uma peça, por exemplo,

é a definição da inter-relação entre sua função, o material selecionado, a geometria e o processo de fabricação^[56] (Figura 21).

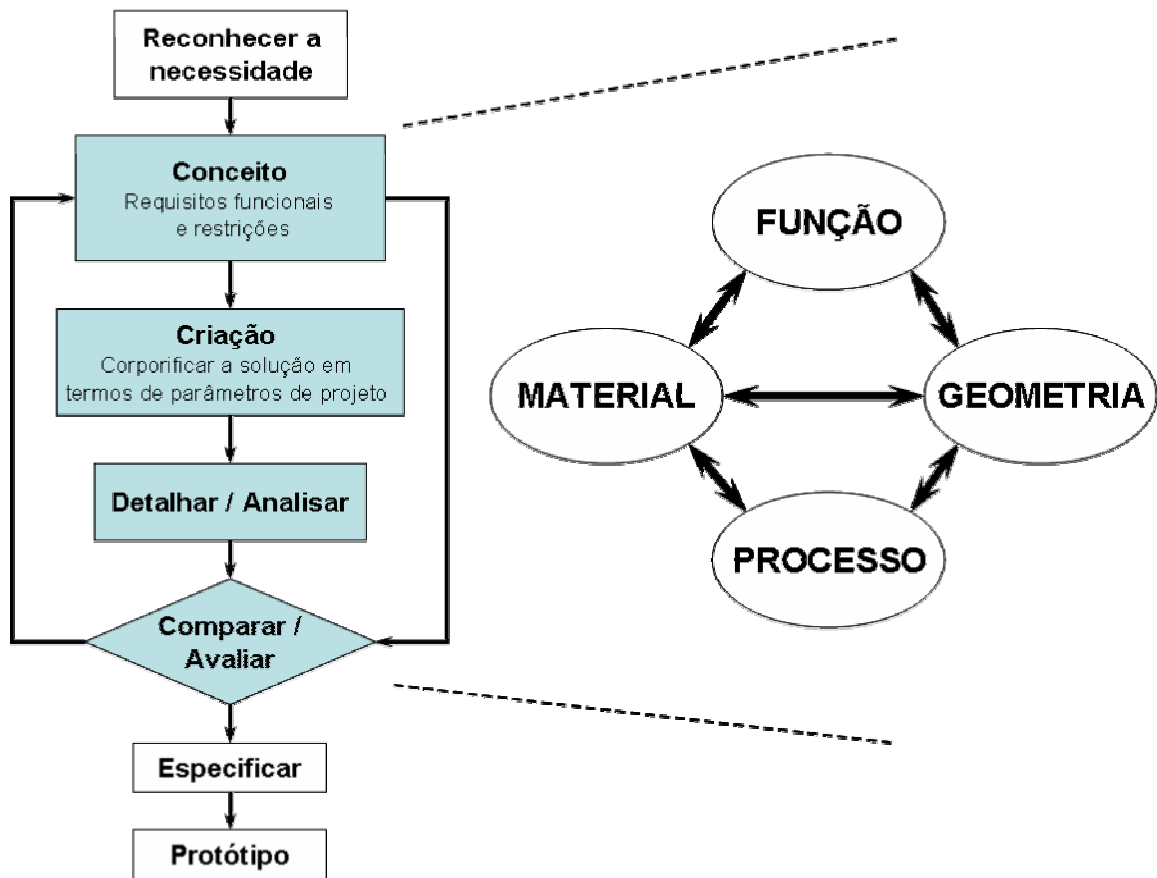


Figura 21 – O processo de desenvolvimento do produto.

Nesta seção será apresentado o resultado do processo criativo, caracterizado através dos seguintes parâmetros:

1. Número de coordenadas espaciais que os elementos de apalpação definem.
2. Quantidade e distribuição dos elementos de apalpação.
3. Estrutura mecânica.
 - a. Definição da geometria e projeto estrutural.
 - b. Sistema de apoios.
 - c. Seleção do material.
 - i. Preço
 - ii. Massa específica

- iii. Estabilidade dimensional
- iv. Propriedades elásticas (E, ν)¹⁷
- v. Dureza da superfície de contato dos elementos de apalpação (influência sobre usinabilidade e desgaste por contato com o apalpador)

A Tabela 3 apresenta as relações entre parâmetros e requisitos.

Tabela 3 – Requisitos funcionais e os parâmetros escolhidos para satisfazê-los.

Requisitos	Parâmetros	Número de coordenadas espaciais	Qtd. e distribuição dos elem. de apalpação	Geometria - projeto estrutural	Sistema de apoio	Preço (do material)	Massa específica	Estabilidade dimensional do material	Propriedades elásticas (E, ν)	Dureza
1 Tempo de ensaio	x	x		x						
2 Manuseio	x		x	x		x				
3 Custo	x	x	x	x	x					
4 Calibração	x	x	x	x						
5 Monitoramento dos erros paramétricos	x	x								
6 Robustez			x				x	x	x	
7 Tamanho			x			x		x		
8 Estabilidade dimensional do artefato	x		x				x		x	
9 Acabamento superficial dos elem. de apalpação			x							x
10 Geometia dos elementos de apalpação (plano, esfera, cilindro, cone)	x		x							

Após as iterações necessárias para ajustar o comportamento do artefato aos requisitos definidos acima, foi alcançado o resultado mostrado na figura 22. Na seqüência são apresentadas as análises e justificativas das escolhas realizadas.

¹⁷ E = Módulo de elasticidade; ν = coeficiente Poisson.

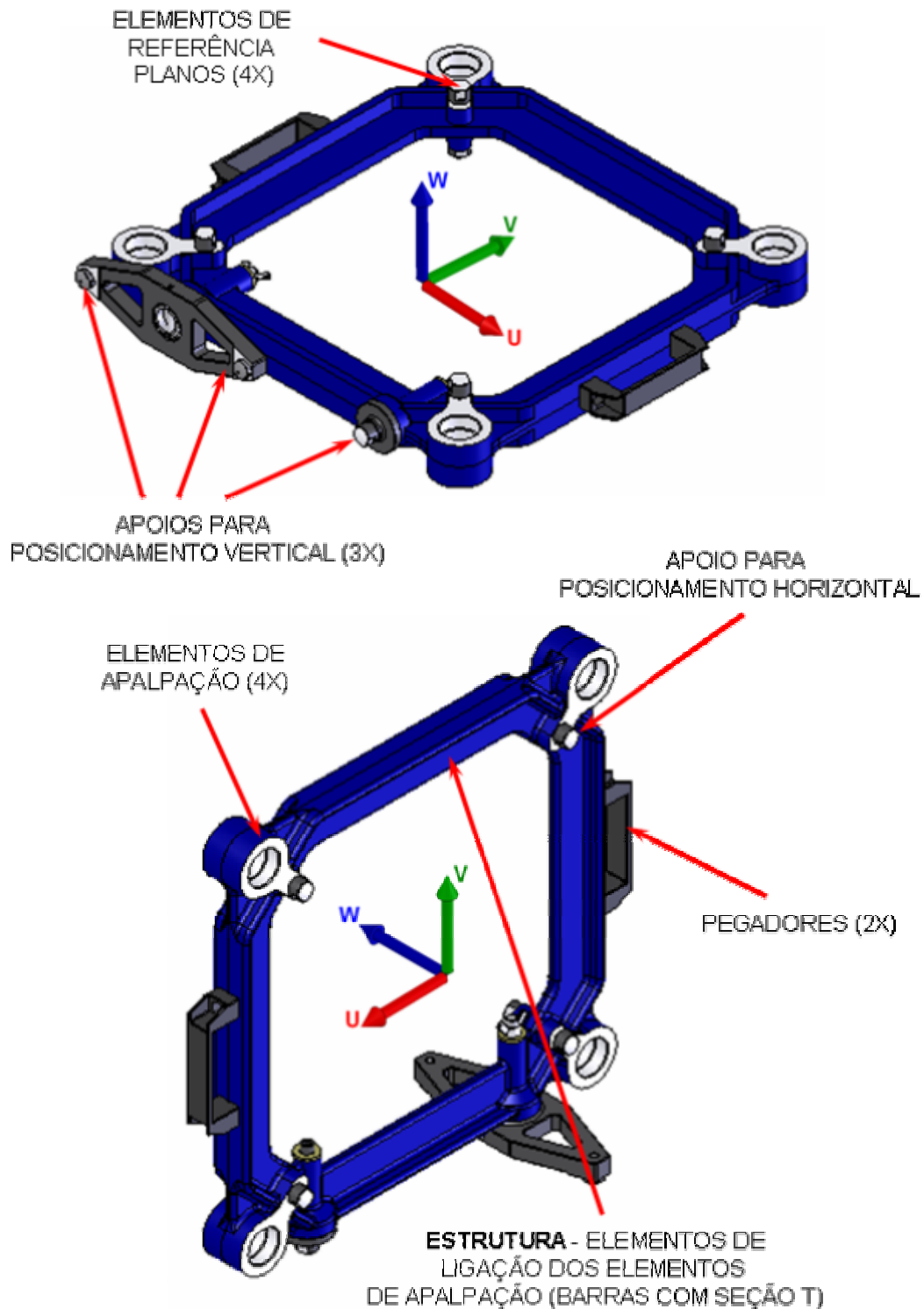


Figura 22 – Solução conceitual nas posições de uso, horizontal (acima) e vertical (abaixo)

3.1.1 Aspectos funcionais

A função de um padrão é definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de referência para uma grandeza^[32], neste caso, o

metro. Desta forma, a função de um artefato¹⁸ é definida ao se especificar a quantidade de elementos de apalpação e como estes estão posicionados entre si.

Conforme apresentado no capítulo 2, os artefatos podem ser classificados de acordo com o **número de coordenadas espaciais** associadas ao posicionamento dos elementos de apalpação entre si.

Com artefatos tridimensionais é possível obter uma quantidade de informações equivalentes à obtida com outros tipos, porém, sem necessidade de reposicionamentos durante o ensaio. Por isso é o conceito que melhor atende ao requisito de baixo tempo de ensaio. Contudo, apresentam algumas desvantagens em relação aos artefatos unidimensionais e bidimensionais. São normalmente mais difíceis de acomodar, transportar e manusear. Apesar de haver um grande esforço para solucionar tais problemas, as soluções existentes ainda são relativamente caras e dependendo do caso, não são completamente estáveis nem robustas.

Por outro lado, artefatos unidimensionais tendem a ser mais baratos, apresentam melhores resultados na calibração e são mais fáceis de transportar e manipular. No entanto, o tempo de ensaio é elevado, devido à necessidade de um número maior de posições. Para facilitar esse reposicionamento precisam, dependendo do modelo, de suportes pesados e caros.

Diante destes problemas a escolha mais apropriada para a aplicação desejada é o conceito bidimensional. É vantajoso em relação aos artefatos tridimensionais quanto à rigidez e transportabilidade. Também leva vantagem sobre os artefatos unidimensionais em relação ao número de posições de ensaio, apenas três. Dependendo da disposição dos elementos de apalpação, pode ser aplicada a técnica de rebatimento na calibração, o que resulta em menores incertezas.

A **quantidade de elementos de apalpação** também tem uma influência direta no tempo de duração do ensaio. Além disso, a forma como estes elementos estão distribuídos irá determinar a capacidade do artefato em detectar variações na MMC. Assim, um bom conceito deve ser capaz de monitorar o maior número de parâmetros com o menor número de elementos de apalpação.

¹⁸ Lembrando que artefato no contexto desta dissertação se refere a um padrão corporificado dimensional aplicado à avaliação de máquinas de medir por coordenadas.

A solução considerada mais adequada são quatro elementos posicionados nos vértices de um quadrado (Figura 22). O mínimo para artefatos bidimensionais são três elementos, porém com quatro elementos medidos em três posições paralelas aos planos XY , YZ e XZ da MMC, é possível detectar variações causadas pelos erros paramétricos de posicionamento, ortogonalidade, rolamento (*roll*), guinamento (*yaw*) e tombamento (*pitch*). Três elementos não são sensíveis a todos os erros de rotação e acima de quatro elementos o tempo dos ensaios começa a aumentar de maneira a inviabilizar a aplicação.

3.1.2 Forma e método construtivo

Ao definir a quantidade e a forma com que os elementos de apalpação estão distribuídos, boa parte da solução está caracterizada. Entretanto a definição da estrutura que conecta estes elementos de apalpação é fundamental para o atendimento dos requisitos (Tabela 3). Existem diversas alternativas estruturais para artefatos bidimensionais com diferentes finalidades. Na figura 23 pode-se observar algumas das soluções estruturais existentes.

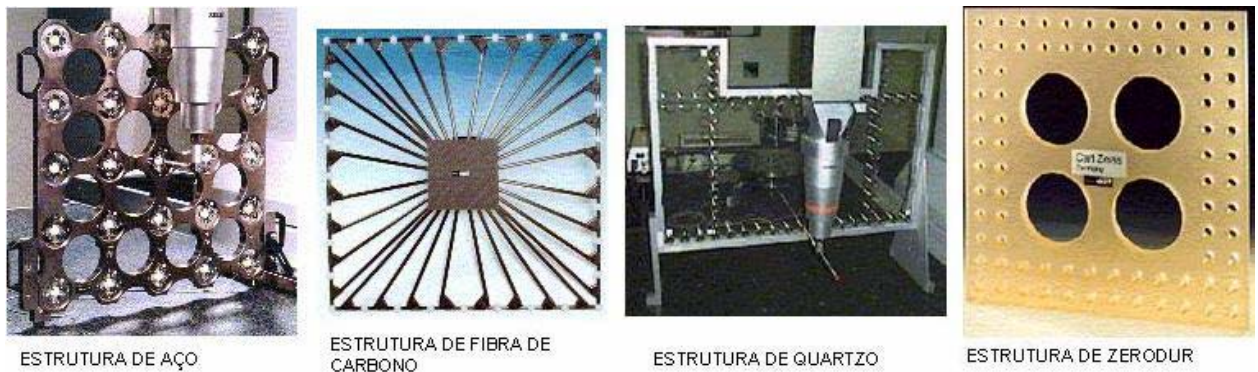


Figura 23 – Diferentes tipos de estruturas para placas padrão^[57].

Um dos requisitos mais importantes, para que o artefato seja usado frequentemente, é boa **manuseabilidade**. Para isso é fundamental que o artefato tenha baixa massa. Uma solução intuitiva seria o uso de estruturas pré-fabricadas, de materiais de menor massa específica em uma estrutura de treliça. Porém, para atender este requisito optou-se por uma estrutura pouco convencional para artefatos do tipo placa. Os elementos de apalpação são conectados entre si apenas por quatro barras com seção em forma de T (Figura 22).

No entanto, além de ser leve, o artefato tem que ser suficientemente **robusto** a fim de sofrer pequenos impactos sem que sua calibração seja posta em dúvida. Para não comprometer a robustez e a estabilidade da estrutura do artefato foram evitadas soluções envolvendo montagens, uso de cola ou solda. A opção foi por uma estrutura fundida, resultando num artefato constituído de uma única peça.

O processo de fundição foi escolhido para reduzir os **custos** de fabricação. O processo de usinagem é usado apenas nas regiões de apalpação e nas relacionadas com o apoio, onde um melhor acabamento superficial é necessário. A definição da seção do tipo T foi consequência da escolha do processo de fabricação. Além disso, este tipo de seção apresenta boa resistência à flexão. Uma análise mais aprofundada da estrutura é apresentada na seção 3.1.4.

A **geometria dos elementos de apalpação** deve ser uma das padronizadas por *softwares* operacionais de MMC. Podem ser cilindros, esferas, planos, cones, entre outros. A opção por planos e por furos cilíndricos é considerada a mais adequada, uma vez que podem ser usinados na própria peça e ainda atender ao requisito de bom acabamento superficial. Assim, se evita que o elemento de apalpação seja montado ou colado à estrutura garantindo maior rigidez e estabilidade dimensional.

3.1.3 Seleção do material

Algumas propriedades e características devem ser consideradas na seleção do material para um padrão aplicado à metrologia dimensional. Pode-se listar:

- **Estabilidade dimensional** - é uma característica fundamental para materiais usados em padrões corporificados. Os materiais que não possuem esta característica sequer podem ser considerados.
- **Propriedades elásticas** - o conjunto geometria-material deve ser suficientemente rígido de modo a não influenciar a aplicação do artefato.
- **Dureza** - como se deseja um artefato sem insertos, os elementos de apalpação devem possuir uma adequada resistência ao desgaste.

- **Massa específica** - é fundamental para que o artefato seja de fácil manuseio.
- **Fabricação** - o tipo de material tem influência direta nos custos da produção e da qualidade do acabamento dos elementos de apalpação.
- **Propriedades térmicas** - são características não restritivas, mas é desejável que o valor do coeficiente de expansão térmica do artefato seja aproximadamente igual ao das peças medidas pela MMC avaliada ou possua valores próximo de zero. Além disso, a condutividade térmica é indiretamente proporcional ao tempo necessário para estabilidade térmica do artefato.
- **Preço por kg** - o custo final é um requisito restritivo. Desta forma materiais com excelentes propriedades, porém caros podem ser descartados.

Dentre os materiais normalmente usados em artefatos, alguns podem ser destacados. Zerodur e Invar possuem coeficientes de expansão térmica inferiores a $1,5 \mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$; materiais cerâmicos além de possuírem boas propriedades térmicas, possibilitam bom acabamento superficial; fibras de carbono possuem elevada rigidez e baixa massa específica; granitos possuem excelente estabilidade dimensional.

Contudo, esses materiais são caros, frágeis, difíceis de trabalhar ou resultam em artefatos pesados. Assim a comparação ficou limitada às ligas que podem ser mais facilmente processadas por fundição, ou seja, ferro fundido (FoFo), alumínio e titânio. Na tabela 4 são apresentadas as propriedades destes materiais.

Tabela 4 – Propriedade dos materiais considerados^{[58],[59],[61]}.

Propriedades →	ρ	Dureza	E	ν	α	k_t
Unidades →	kg/m^3	HB	GPa	-	$\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
Aluminio 40 E	2795	70	71	0,33	24,7	138
FoFo (Gr 50)	7150	262	130	0,29	11	46
Titânio	4400	70	115	0,33	8,9	17

Não há dúvidas que o titânio seja uma opção muito atrativa. Porém foi descartada por se tratar de um material caro e pouco comercializado no Brasil.

O **ferro fundido** possui boa resistência ao desgaste, boa rigidez, não sofre relativamente nenhuma influência da umidade. O coeficiente de expansão térmica é semelhante ao do aço, o que pode ser uma vantagem dependendo do material que a MMC a ser verificada inspeciona. Além do mais é um dos materiais mais estáveis que existem^[60].

O **alumínio 40 E** é uma liga AL-Zn que apresenta uma boa combinação de propriedades mecânicas sem necessidade de tratamento térmico. Possui boa resistência a impacto e a corrosão, boa estabilidade dimensional, além de boa usinabilidade^[61]. Estas características aliadas à baixa massa específica e a um custo relativamente baixo fazem com que esta liga atenda bem aos requisitos, levando vantagem sobre o ferro fundido em relação à massa específica e à condutividade térmica. A norma ISO 10360-2^[6] recomenda que o artefato tenha o mesmo coeficiente de expansão térmico das peças inspecionadas. No entanto estes efeitos podem ser matematicamente compensados se o coeficiente de expansão térmica do material do artefato for conhecido e se a temperatura do artefato for corretamente medida durante a verificação da máquina. Além disso, é comum que as MMC sejam usadas para inspecionar peças de alumínio.

Assim, decidiu-se realizar o protótipo em liga 40E, embora o ferro fundido não esteja completamente descartado.

3.1.4 Análise da solução através do método de elementos finitos (FEM).

Um dos principais desafios durante o desenvolvimento do projeto foi definir a localização dos apoios de maneira a minimizar os deslocamentos causados pela deformação da estrutura durante a calibração e a aplicação. Ainda no início, a condição de apoio isostática para o posicionamento horizontal foi descartada, pois, resultava em uma deformação assimétrica da estrutura. Com a finalidade de minimizar o efeito de rotação do elemento de apalpação, gerado pela deformação da estrutura quando o artefato é posicionado na horizontal, foram definidas a geometria da junção entre o elemento de apalpação e o restante da estrutura, além da localização dos apoios para posicionamento horizontal. A especificação destes parâmetros foi resultado de um processo iterativo utilizando o método dos elementos finitos (FEM).

FEM é uma técnica computacional usada para simular o comportamento de um sistema físico sob determinada condição. Para este estudo foi utilizado o *software* COSMOSWorks[®]. As hipóteses assumidas por este *software* são:

- **Carregamento estático.**
- Materiais que se comportam linearmente (**Lei de Hooke**), ou seja, tensão é diretamente proporcional à deformação.

A malha gerada para a simulação é composta por elementos lineares de primeira ordem¹⁹ no formato geométrico de um tetraedro. Este elemento é definido por quatro nós conectados entre si por seis arestas retas.

A carga aplicada é apenas o efeito da gravidade G sobre a massa da estrutura. As condições de contorno usadas para simular a condição de apoio vertical são apresentadas na figura 24.

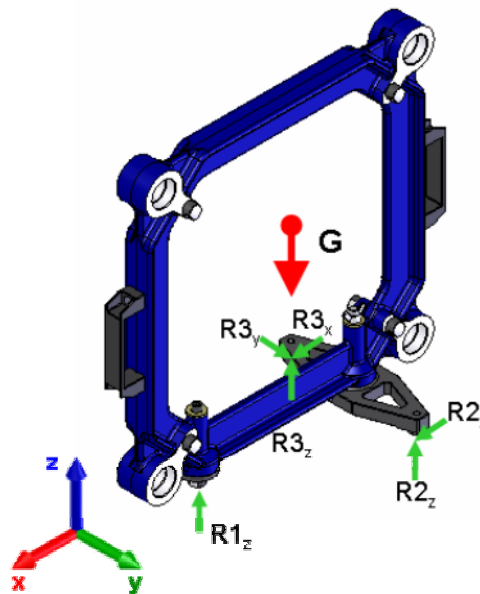


Figura 24 – Condições de contorno para simulação da análise de deslocamento na posição vertical.

Os gráficos apresentados na figura 25 correspondem ao resultado da simulação da análise de deslocamento quando o artefato é apoiado na posição vertical. O efeito da deformação está ampliado em 50.000 vezes. A escala de cores, no entanto, fornece uma informação mais útil, já que corresponde ao deslocamento dos nós. A figura 25(a), corresponde ao deslocamento no sentido eixo Z. Pode-se

¹⁹ Elementos de segunda ordem possuem seis nós e seis arestas parabólicas.

observar que o comportamento do deslocamento entre elementos de apalpação se assemelha ao de um “corpo rígido”. As regiões próximas aos elementos de apalpação apresentam diferenças de deslocamento inferiores a $0,5 \mu\text{m}$. O mesmo pode ser observado na figura 25 (b), que corresponde ao deslocamento no sentido do eixo X.

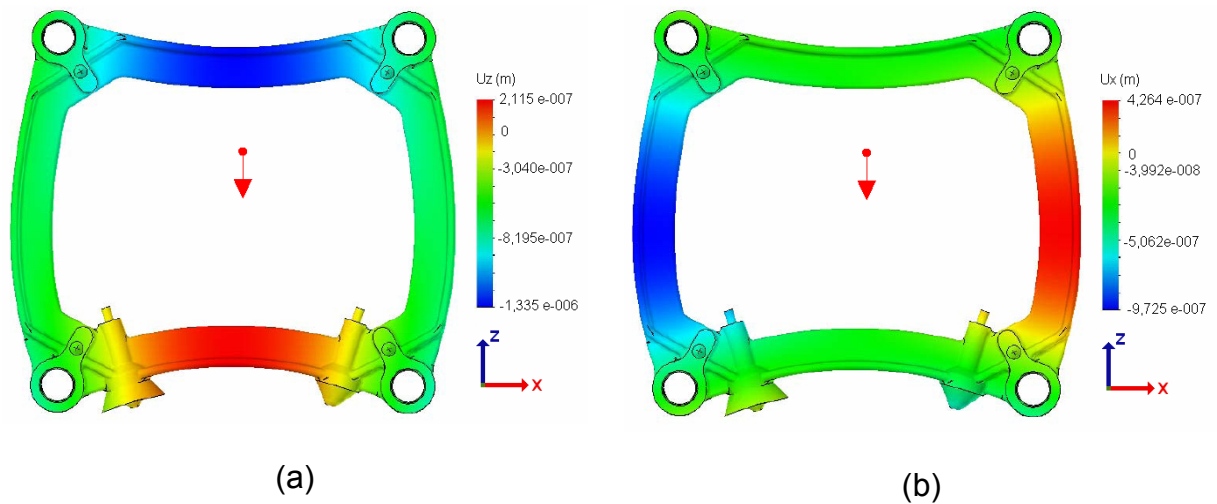


Figura 25 – Estudo de deslocamento sob ação da gravidade na posição vertical.

O resultado da análise de deslocamento para quando o artefato é apoiado na posição horizontal (Figura 26) é apresentado na figura 27. Em (a), o gráfico dos deslocamentos no sentido do eixo Y; em (b) os deslocamentos ao longo do eixo X. Pode-se observar que em ambos os gráficos o maior deslocamento é inferior a $0,2 \mu\text{m}$.

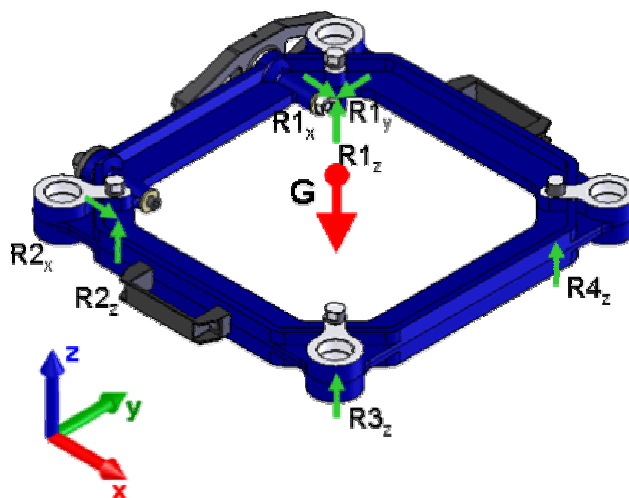


Figura 26 - Condições de contorno para simulação da análise de deslocamento na posição horizontal

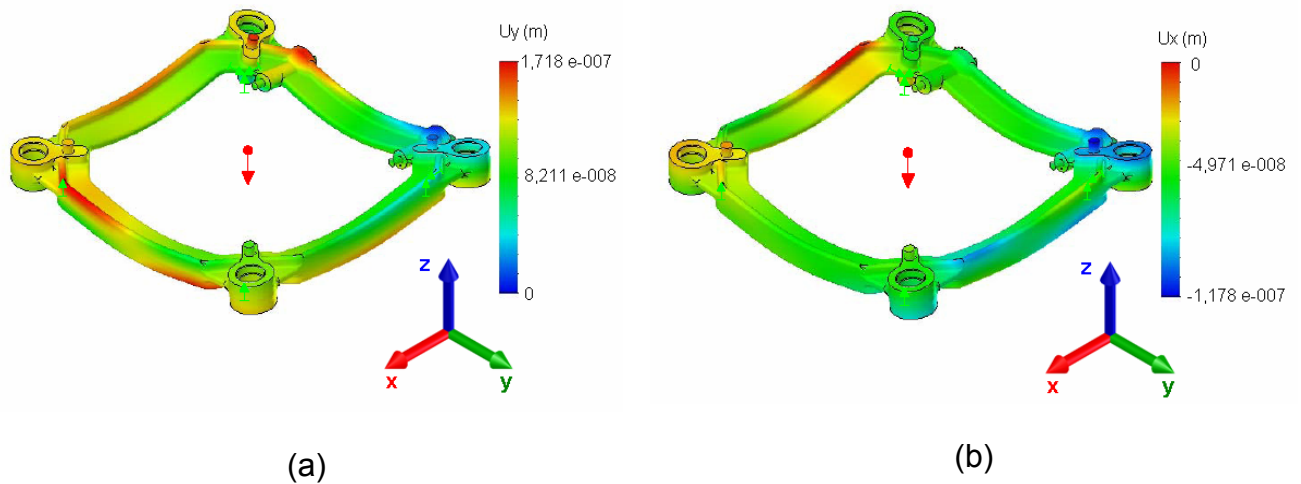


Figura 27 – Estudo de deslocamento sob ação da gravidade na posição horizontal.

Dentre os resultados obtidos com a aplicação do FEM, pode-se destacar a especificação do detalhe da geometria que une a estrutura aos elementos de apalpação (Figura 28).

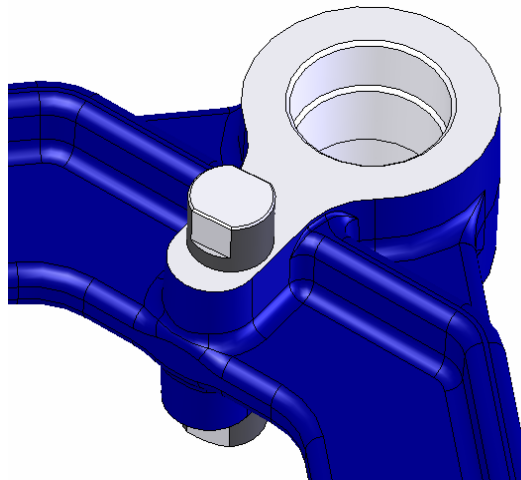


Figura 28 – Detalhe da junção do elemento de medição com a estrutura.

O gráfico da figura 29 corresponde ao deslocamento resultante dos nós. É possível observar que as regiões próximas aos elementos de apalpação possuem desvios inferiores a $0,6 \mu\text{m}$. Desta forma os desvios de ortogonalidade do eixo dos furos (ou seja, rotação dos elementos de apalpação) com relação à mesa da MMC, são minimizados.

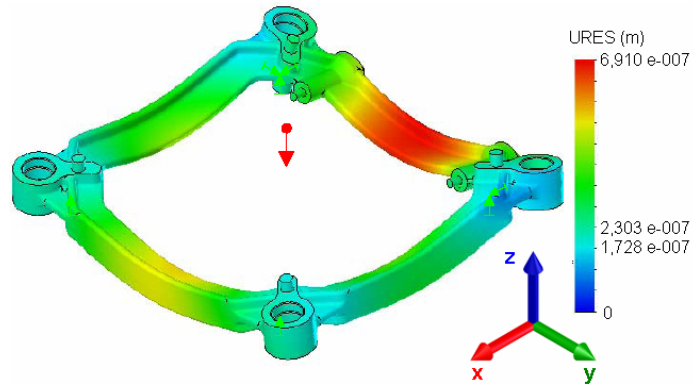


Figura 29 - Estudo de deslocamento resultante sob ação da gravidade na posição horizontal.

Outro aspecto analisado foi a opção pela condição de apoio hiperestática quando o artefato é posicionado horizontalmente. Em função da rigidez estrutural relativamente baixa, a hipótese de se usar três apoios foi descartada, visto que, com quatro apoios, a estrutura se comporta de maneira satisfatória (deformação aproximadamente simétrica e deslocamento dos elementos de apalpação próximos à condição de apoio vertical). Para esta análise são usadas as mesmas condições de contorno da figura 26, porém sem a restrição $R4_z$. Isso simula o apoio do artefato em apenas três suportes e permite verificar sua capacidade de se adequar aos erros de planeza da mesa (desempeno) da MMC²⁰. O gráfico de deformação é apresentado na figura 30. O possível deslocamento na direção do eixo Z é aproximadamente 60 μm . Assim apoiado o artefato sobre uma superfície de boa planeza, como a mesa de uma MMC, a condição hiperestática não apresenta maiores problemas, evitando assim suportes complexos e maiores complicações na geometria do artefato.

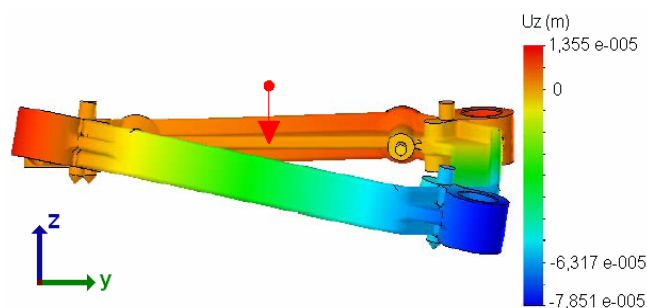


Figura 30 – Estudo de deslocamento para avaliar a viabilidade da hipótese hiperestática.

²⁰ Mesa de classe AA tem planeza $\sim 1,5 \mu\text{m}$ [63].

3.1.5 Solução para os apoios

Um problema identificado em algumas soluções é o tempo perdido durante a preparação para medição. Isso ocorre principalmente quando há necessidade de montagem dos apoios ou quando estes possuem elevada massa, dificultando o manuseio. A idéia inicial foi projetar um artefato constituído de uma única peça, apoiado por sua própria estrutura. Porém, esta hipótese foi descartada considerando a facilidade com que o artefato poderia tombar quando usado nos planos perpendiculares ao desempenho. Optou-se então por desenvolver um mecanismo que atendesse aos seguintes requisitos:

- Garantir a estabilidade²¹ na posição vertical;
- Eliminar as operações de montagem e desmontagem;
- Em virtude da geometria relativamente flexível do artefato, a massa do mecanismo não deve influenciar significativamente o carregamento da estrutura.

Conforme apresentado, a condição de apoio do artefato quando posicionado verticalmente é isostática. Os apoios são de aço, com elevada resistência mecânica, e acabamento esférico. Destes um está fixado ao artefato através de uma base simples de alumínio. Os outros dois estão fixados através de um suporte de aço denominado “base de apoio duplo”. Este suporte, uma porca borboleta e a peça denominada “eixo de fixação”, também de aço, com rosca em uma das extremidades e uma calota esférica na outra, compõe o mecanismo desenvolvido para atender aos requisitos citados. Com a porca aparafusada, a calota esférica do eixo de fixação entra em contato com um furo cônico da base de apoio duplo, pressionando-o contra o artefato. Desparafusando parcialmente, a base de apoio duplo fica livre para girar e para se deslocar perpendicularmente ao eixo do parafuso, possibilitado o posicionamento horizontal. A figura 31 mostra o funcionamento do mecanismo de fixação. Como pode ser observado, o mecanismo foi projetado de tal maneira que, quando posicionado na horizontal, a base de apoio duplo fica apoiada sobre a mesa da MMC. Com isso a estrutura do artefato não sofre solicitação de carga pelo peso da base de apoio.

²¹ Não oscilar ou correr risco de tombar durante as medições.

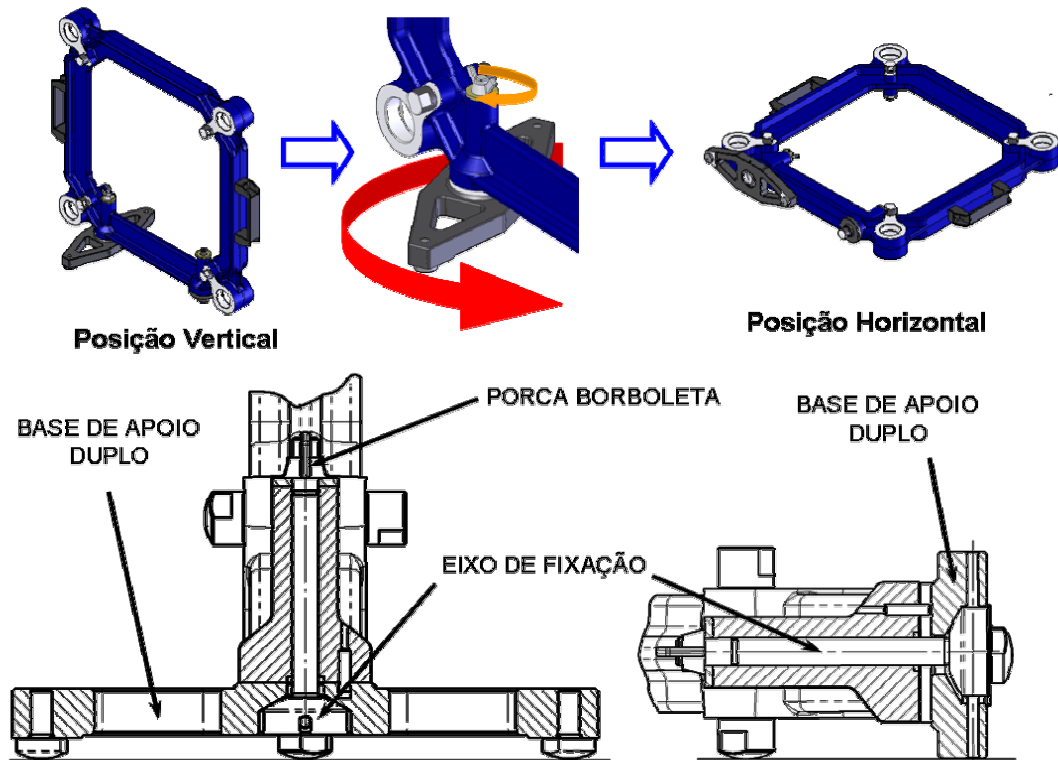


Figura 31 – Funcionamento do mecanismo de apoio.

Para a condição de apoio na horizontal, hiperestática, são utilizadas quatro calotas esféricas, também de aço. Estas são aparafusadas a um prisioneiro, que por sua vez está aparafusado ao elemento de apalpação denominado “elemento de referência”. O detalhe desta montagem pode ser visto na figura 32. Esse elemento de referência é usado para localizar o plano de simetria da placa, onde estão os pontos de medição dos elementos de apalpação.

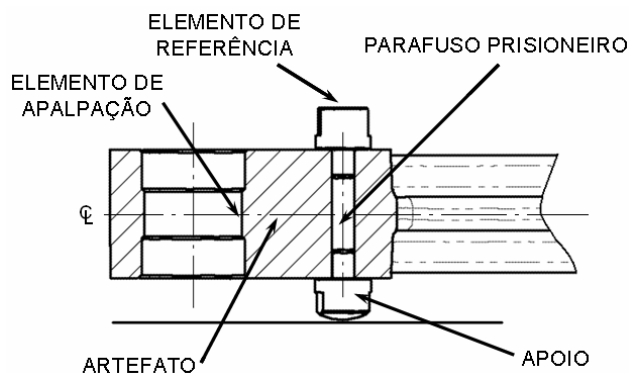


Figura 32 – Detalhe da montagem do sistema de apoio para posição horizontal.

Desta forma, ficou solucionado o problema de re-posicionar o artefato rapidamente e sem necessidade de utilizar suportes pesados.

3.2 PROCEDIMENTO DE VERIFICAÇÃO

3.2.1 Verificação da MMC

O posicionamento do artefato sobre a mesa da MMC é o mesmo proposto pelo PTB para calibração de MMC utilizando placas padrão^[31]. Esta escolha resulta em um método fácil de ser compreendido e executado pelo operador. O procedimento de verificação rápida difere da calibração quanto ao número de posições (três ao invés de seis) e quanto ao número de elementos de apalpação, apenas quatro. A figura 33 apresenta um exemplo de como o artefato deve ser posicionado.

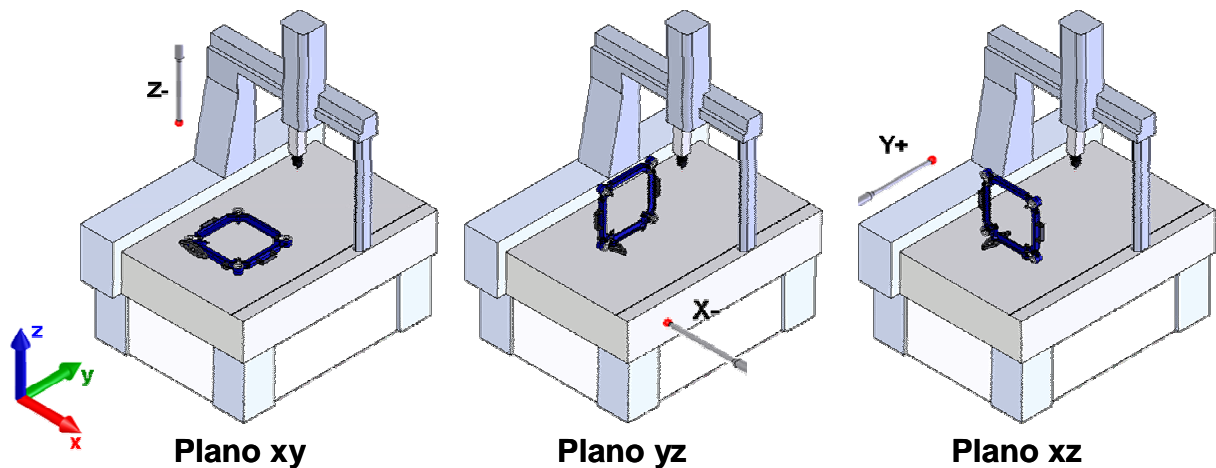


Figura 33 - Posições de medição com o artefato.

A execução do ensaio de verificação consiste inicialmente em alinhar o sistema de coordenadas peça (do artefato) ao sistema de coordenadas máquina. A figura 34(a) apresenta o sistema de coordenadas do artefato. O **plano UV** é definido pelo método dos mínimos quadrados através da medição de quatro pontos, um sobre cada elemento de referência. A origem do sistema de coordenadas peça é o centro do furo 1 e a direção do eixo U é o vetor que passa pelo centro dos furos 1 e 2. A origem do **eixo W** (ortogonal ao plano UV) é o plano de simetria do artefato (Figura 34(c)).

Com o sistema de coordenadas peça definido, o passo seguinte é determinar as coordenadas do centro de cada um dos quatro furos pelo método dos mínimos

quadrados, medindo 4 pontos na direção dos eixos U e V do artefato, conforme figura 34(d).

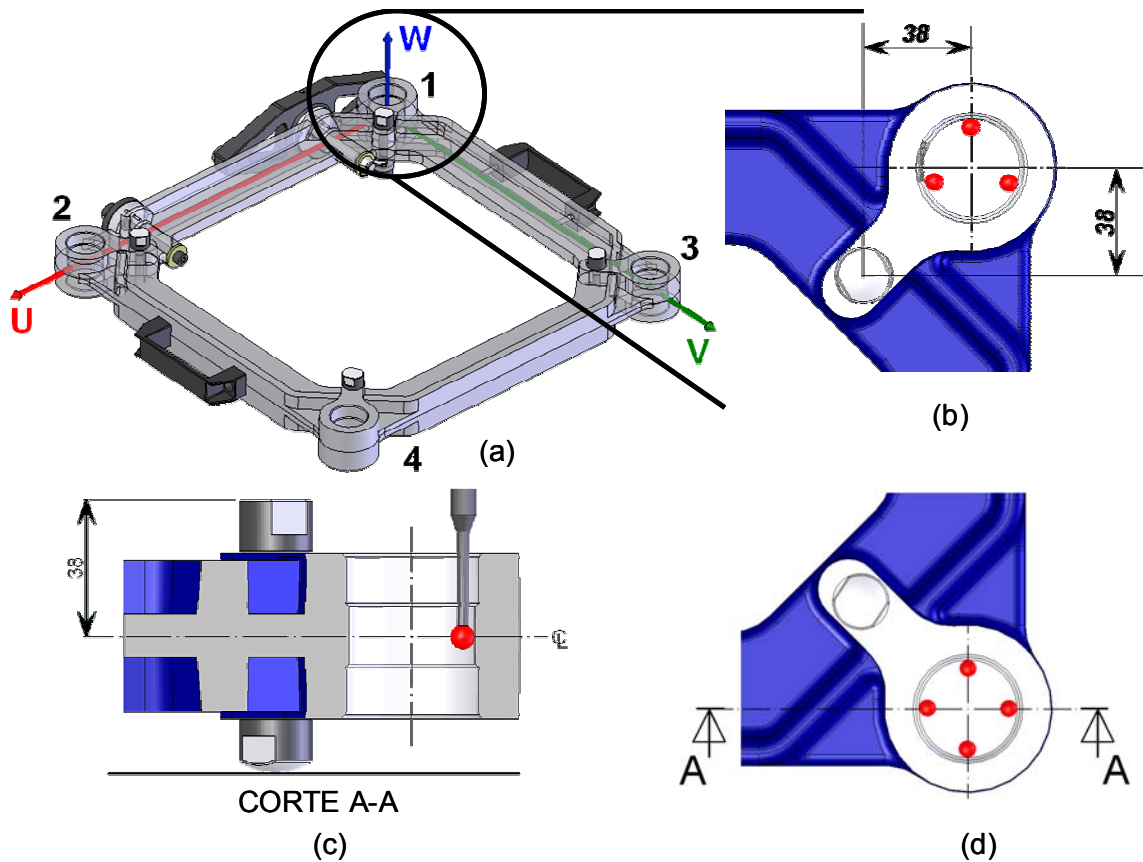


Figura 34 – Alinhamento: (a) Distribuição dos furos e orientação do sistema de coordenadas peça (u, v, w); (b) 3 pontos para alinhamento; (c) Região de apalpação - plano de simetria do artefato; (d) 4 pontos para medição.

O artefato deve sempre repetir a sua posição sobre a mesa da máquina. Assim o resultado da medição sofre sempre influência dos mesmos erros geométricos. Outro aspecto que deve ser observado é a estabilidade da temperatura do artefato e a presença de gradiente térmico. Manter o artefato climatizado e usar apenas os pegadores na manipulação minimizam estes efeitos.

A temperatura do artefato durante a medição deve ser registrada para compensação matemática. Também faz parte do procedimento manter um diário de bordo, anotando qualquer anomalia que ocorra tanto durante a verificação, quanto durante qualquer outra medição.

3.2.2 Verificação do apalpador

O procedimento adotado é o mesmo descrito na norma ISO 10360-5^[37]. Esta propõe que o conjunto de configurações de hastes mais frequentemente usadas sejam avaliadas. O procedimento pode ser o mesmo usado no teste de aceitação. O princípio do teste é, através do método dos mínimos quadrados, medir tamanho, erros de forma e localização de uma esfera de referência, usando 5 configurações diferentes (Figura 35(b)). Recomenda-se evitar o uso da mesma esfera do processo de qualificação do apalpador. Deve-se medir 25 pontos com cada uma das 5 configurações. Os pontos devem estar distribuídos uniformemente (Figura 35(a)).

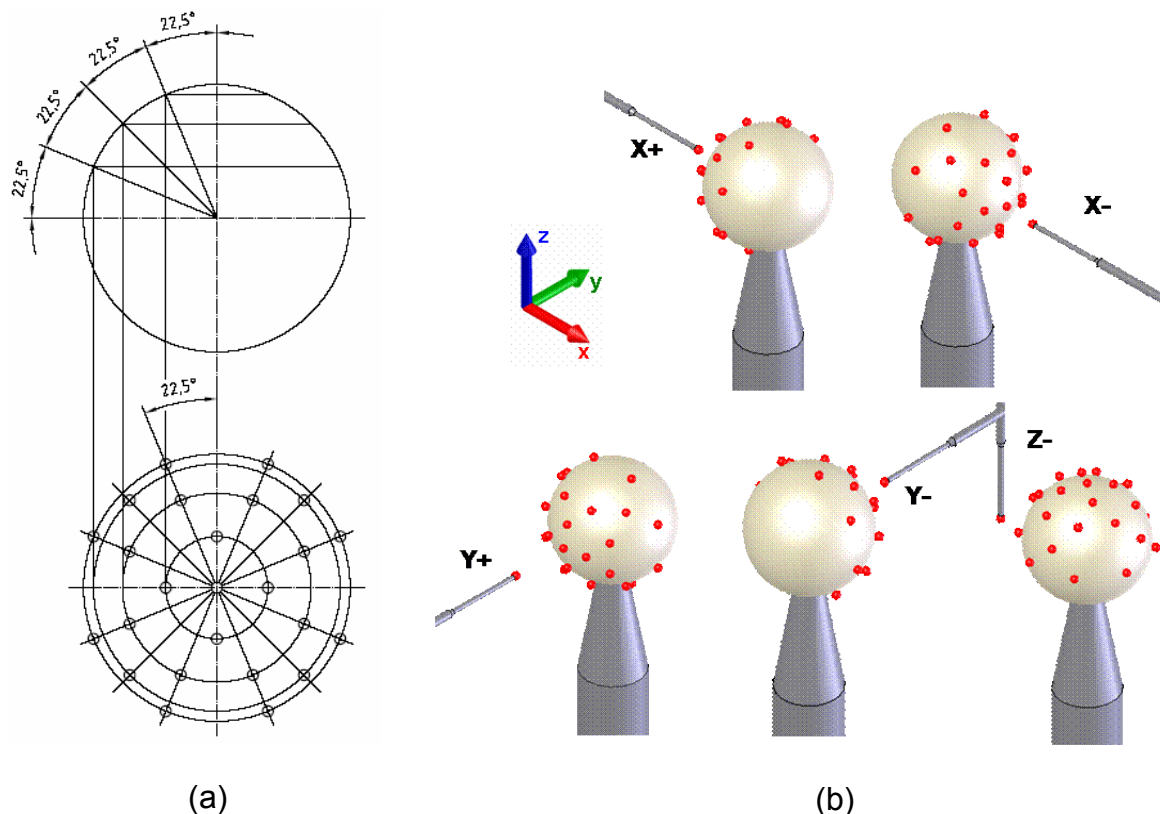


Figura 35 – Avaliação do sistema de apalpação segundo ISO 10360-5^[37].

3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

3.3.1 Equacionamento

Um estudo de longo prazo sobre os erros sistemáticos de uma MMC confirmou a hipótese de que os parâmetros de posicionamento e ortogonalidade são suficientes para monitorar sua estabilidade^[43]. Por esta razão, apesar da

possibilidade de se estimar valores dos erros de rotação, o monitoramento da estabilidade da máquina será feito através do controle dos desvios encontrados na direção dos eixos e dos erros de ortogonalidade (equações (14) e (15) respectivamente).

Os desvios respectivos a cada eixo da máquina são definidos da seguinte forma:

$$\begin{aligned} dx = dy &= L_{12\text{medido}} - L_{12\text{calibrado}}; \\ dz &= L_{13\text{medido}} - L_{13\text{calibrado}} \end{aligned} \quad (14)$$

Sendo dx , dy e dz obtidos através das medições do artefato nos planos XY, YZ e XZ respectivamente (Figura 33).

Já os erros de ortogonalidades são obtidos a partir da equação abaixo²² (Figura 36):

$$xwy = xwz = ywz = \frac{2[(L_{23\text{calibrado}} - L_{23\text{medido}}) - (L_{14\text{calibrado}} - L_{14\text{medido}})]}{[(2 \cdot L_{23\text{calibrado}} - L_{23\text{medido}}) + (2 \cdot L_{14\text{calibrado}} - L_{14\text{medido}})]} \quad (15)$$

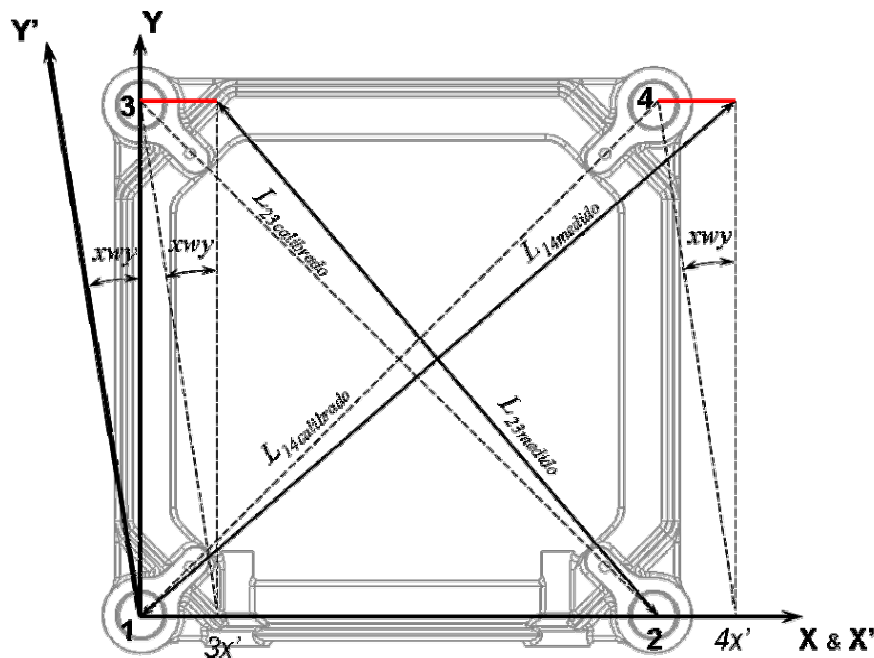


Figura 36 – Estimativa do erro de ortogonalidade (plano XY).

Com relação ao sistema de apalpação, o resultado do ensaio de verificação consiste das coordenadas cartesianas de 125 pontos. Segundo a norma

²² Deduzido a partir do equacionamento apresentado por Phillips^[10].

ISO 10360-5^[37], a estabilidade do sistema apalpação pode ser monitorada através do controle de três parâmetros (Figura 37): o máximo erro permissível de posicionamento (MPE_{ML}); o de forma (MPE_{MF}); e o de tamanho (MPE_{MS}).

- **Erro de posicionamento** (MPE_{ML}): As medições realizadas com cada configuração do apalpador resultam em cinco nuvens de pontos, com 25 pontos cada. Através do método dos mínimos quadrados são definidas cinco esferas, uma para cada configuração de apalpador. O centro de cada uma destas cinco esferas pode ser representado por três componentes vetoriais com a mesma direção dos eixos cartesianos da MMC. A maior diferença entre centros em uma determinada direção, considerando todos os eixos cartesianos, é o erro de posicionamento.

- **Erro de forma** (MPE_{MF}): A partir do centro da esfera definida pelos 125 pontos medidos, o erro de forma é a diferença entre o ponto mais distante ($R_{máx}$) deste centro e o ponto mais próximo ($R_{mín}$).

$$MPE_{MF} = R_{máx} - R_{mín} \quad (16)$$

- **Erro de tamanho** (MPE_{MS}): A diferença entre o diâmetro obtido pelos 125 pontos através do método dos mínimos quadrados e o diâmetro calibrado (D_{Cal}).

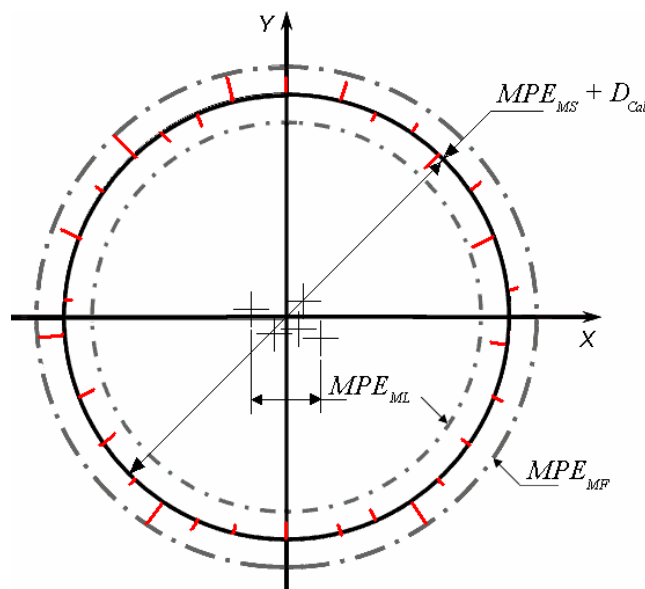


Figura 37 – Parâmetros de avaliação do sistema de apalpação.

3.3.2 Estudo de estabilidade

O programa de garantia da qualidade do processo de medições (PMAP[®]) é um conceito de verificação contínua para dispositivos de medição, que tem como

objetivo determinar, monitorar, controlar e melhorar a capacidade do sistema de medição em seu ambiente operacional^[5]. Através de um PMAP[®], pode-se garantir que um processo de medição continua a medir dentro dos limites confiáveis de incerteza, utilizando-se para isso técnicas de controle estatístico de processo^[62].

Os gráficos de controle são constituídos de valores de amostragens obtidos em intervalos de tempo aproximadamente regulares, de uma **linha média** (CL) e por **limites de controle superior** (UCL) e **inferior** (LCL). A linha média corresponde à média dos valores obtidos durante um determinado período de amostragens denominado de fase 1. Com estes mesmos valores, os limites de controle são determinados estatisticamente, correspondendo a três desvios padrão acima e abaixo da linha média.

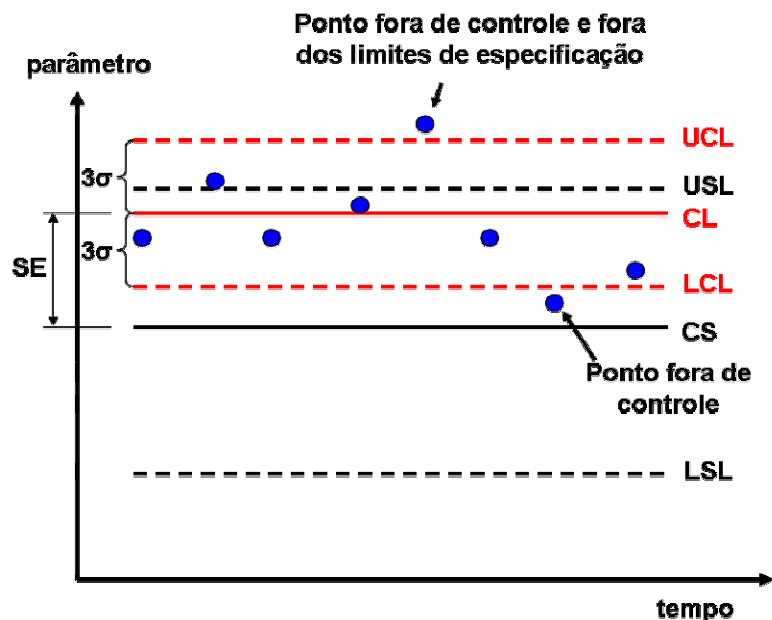


Figura 38 – Modelo de gráfico de controle para PMAP[®] (adaptado^[5]).

Recomenda-se que os primeiros gráficos²³ sejam construídos com base em 20 a 25 subgrupos, cada um contendo quatro a cinco medições^[4]. Entretanto, como em geral o comportamento de uma MMC em curto prazo é muito bom, isto é, tem uma baixa variabilidade, neste trabalho optou-se pela aplicação de “gráficos de indivíduos” para economizar o tempo com repetições.

²³ Correspondem à fase 1 do CEP. São medições de controle, realizadas em um padrão de controle por um especialista.

Faz parte de um gráfico de controle para PMAP[®] comparar os resultados obtidos com as especificações do sistema de medição (Figura 38). No entanto, na aplicação descrita neste trabalho, o **valor de referência** (CS) é zero e a linha média corresponde diretamente ao **erro sistemático** (SE). Ou seja, os dados usados são os desvios definidos nas equações (14) e (15). Os **limites de especificação superior e inferior** (USL e LSL, respectivamente) da MMC também não estão no gráfico de controle. A comparação dos resultados com as especificações da MMC é feita através gráficos semelhantes ao apresentado na figura 10, já que é uma forma mais familiar aos usuários de MMC.

4 QUADRA MENSURA: FABRICAÇÃO E TESTES

No capítulo 1 foi justificada a necessidade de realizar verificações freqüentes das MMC. No capítulo 2 foram apresentadas opções existentes no mercado, onde foi questionada a viabilidade de aplicação destas no cenário industrial brasileiro. No capítulo 3 foi apresentada uma proposta de artefato, que ao ser comparada com as soluções existentes, levaram à decisão de concretização da idéia. Neste capítulo é apresentado o protótipo (*hardware e software*) da solução proposta no capítulo anterior, denominado “*Quadra Mensura*” (Figura 39), assim como os resultados de sua calibração e aplicação.



Figura 39 – Protótipo alfa do Quadra Mensura (400 x 400 mm).

4.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

A fabricação do protótipo pode ser dividida em duas etapas. Na primeira, a estrutura do artefato é obtida através do processo de fundição; numa etapa posterior as superfícies de contato e apalpação são usinadas, bem como outros elementos e acessórios. As principais experiências adquiridas durante a fabricação são apresentadas a seguir.

4.1.1 Processo de fundição

O processo de fundição em areia pode ser classificado de acordo com o tipo de molde usado: areia verde (*green sand*), areia seca (*dry sand*), cura a frio (*no-bake*) e coquilha, entre outros. A escolha do tipo de molde foi discutida com a empresa executora²⁴, levando em consideração a geometria da peça, o material e razões econômicas, em virtude principalmente da pequena quantidade de peças a fundir na etapa de prototipagem. A princípio, tanto o molde de areia verde quanto o de cura a frio foram julgados apropriados.

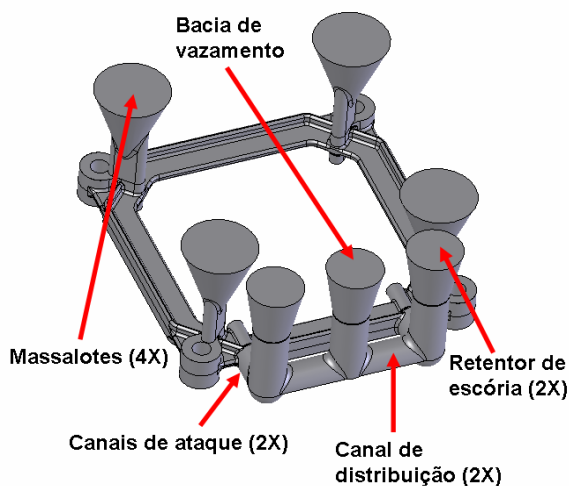


Figura 40 – Alimentação e massalotes.

Areia verde é o método mais difundido e possui custo de fabricação inferior. Porém havia receio de ocorrer empenamento e acabamento superficial de baixa qualidade. Assim, para fabricação dos primeiros protótipos foi escolhido o molde de

²⁴ São Lázaro Indústria de Injeção Ltda

cura a frio. O método de **cura a frio**, apesar de mais caro e da temperatura do molde ser um parâmetro crítico durante a fabricação, resulta em um molde mais resistente e num produto com melhor acabamento superficial e maior exatidão dimensional.

Entretanto, o resultado não foi satisfatório. A rigidez do molde, aliada ao posicionamento dos massalotes (Figura 40), impediu que a peça se contraísse livremente. Obtiveram-se peças trincadas e até mesmo partidas (Figura 41). A solução encontrada foi reconsiderar o uso de um molde de areia verde, já que oferece menos resistência à contração. Ao contrário do que se temia, a estrutura não empenou e o acabamento superficial foi relativamente bom.



Figura 41 – Resultado da fundição com molde de cura a frio. (a) peça quebrada; (b) trincas.

4.1.2 Usinagem

O resultado do processo de usinagem foi satisfatório, com exceção do atendimento à tolerância de planeza (Figura 42), necessária para satisfazer o requisito do apoio hiperestático. Uma avaliação com o sistema de apoio horizontal montado sobre uma mesa (desempeno) de planeza classe AA²⁵, resultou num apoio incerto - apenas três dos quatro apoios estavam em contato com a mesa. Foram identificadas²⁶ como possíveis causas do problema:

- Dificuldade em fixar a peça (protótipo) na máquina ferramenta em função da geometria;

²⁵ Aproximadamente $1,5 \mu\text{m}$ [63].

²⁶ Segundo a HEF, a empresa que executou o processo de usinagem.

- Dificuldade em obter a referência física A (Figura 42). Cada plano é composto por quatro superfícies distintas e de pequena área;

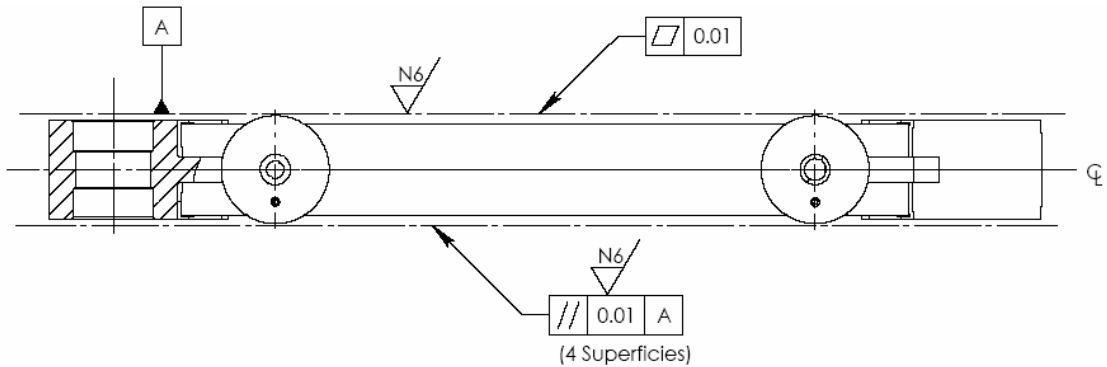


Figura 42 – Especificação de planeza e paralelismo.

A solução proposta pela empresa executora foi a aplicação da técnica de rasqueteamento²⁷ para atender os requisitos de planeza e paralelismo (Figura 43). Avaliando então a condição de aplicação, ou seja, com o conjunto montado, devidamente apoiado na posição horizontal e usando o método dos mínimos quadrados com uma amostragem de quatro pontos medidos sobre os planos de referência, e quatro repetições, o maior valor encontrado para planeza foi 12 μm . Embora a especificação de paralelismo não seja perfeitamente atendida, o artefato pode ser apoiado de ambos os lados (condição necessária para o processo de calibração) e ainda satisfazer a condição de apoio horizontal. Com relação a influência sobre o resultado da avaliação da MMC, o efeito é de segunda ordem.



Figura 43 – Superfície rasqueteadada.

²⁷ Rasqueteamento (scraping): é uma técnica manual de se criar planos^[60].

4.2 CALIBRAÇÃO DO ARTEFATO

4.2.1 Método

O método adotado para calibrar o artefato é baseado na diretriz DKD^{[46],[64],[65],[66]}, o mesmo usado para placa de esferas ou furos. A calibração é executada em duas etapas.

Na **primeira etapa** o artefato é medido em quatro posições diferentes utilizando a técnica do rebatimento seguindo o sentido anti-horário (Figura 44).

- Posição 0: o eixo U aponta na direção do eixo X da MMC e o eixo V aponta para o eixo Y da MMC.
- Posição Z: é feita com a placa em uma posição rotacionada 180° em torno do eixo Z da MMC, em relação à posição 0.
- Posição Y: é feita com a placa em uma posição rotacionada de 180° em torno do eixo Y da MMC, em relação à posição 0.
- Posição X: é feita com a placa em uma posição rotacionada de 180° em torno do eixo X da MMC, em relação à posição 0.

Em todas as quatro posições o artefato ocupa o mesmo volume da máquina. Em cada posição são determinadas as posições do centro de cada furo orientados em relação ao sistema de coordenadas peça (u, v, w). O objetivo desta etapa é compensar o efeito dos erros de retitude, rotação e ortogonalidade da MMC usada na calibração, através da média aritmética dos valores obtidos para cada coordenada.

Na **segunda etapa** são compensados os efeitos dos erros de posicionamento da MMC, não corrigidos pelo procedimento da etapa anterior. Nesta etapa é estabelecida a rastreabilidade de comprimento. As distâncias entre os centros dos furos 1 e 2, assim como dos furos 1 e 3, são comparadas a padrões de comprimento (blocos padrão) posicionados paralelamente aos eixos X e Y da MMC, respectivamente (Figura 45).

O método requer uma boa repetitividade da MMC e variação de temperatura entre o artefato e o padrão dentro do intervalo $\pm 0,04 \text{ K}$ ^[64].

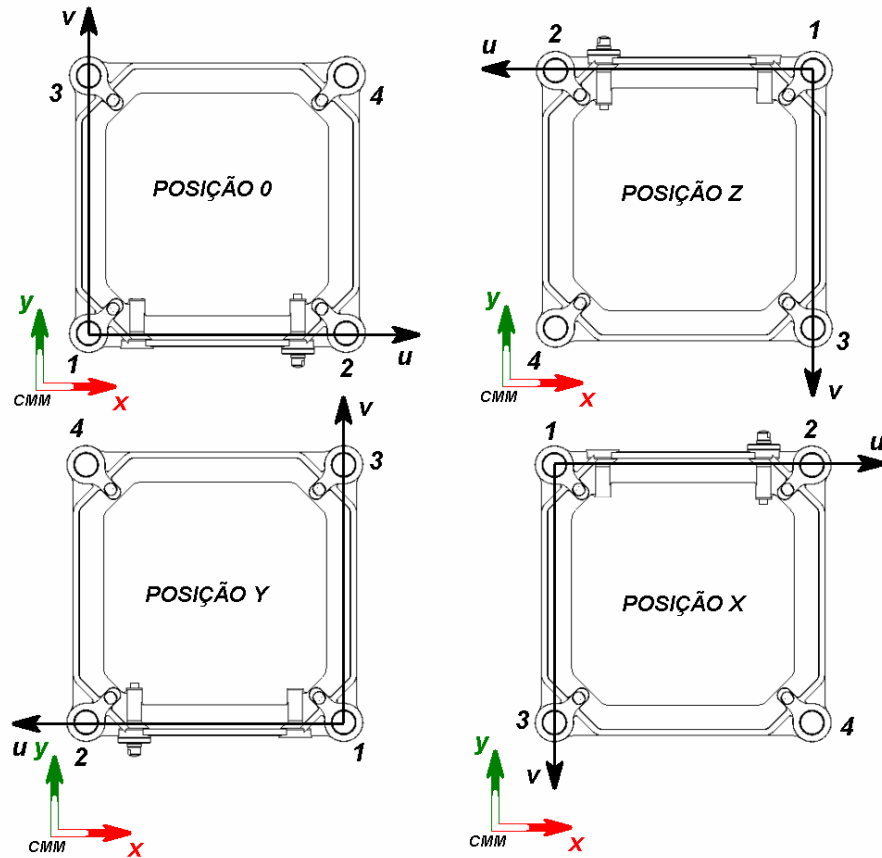


Figura 44 – Orientação do sistema de coordenadas peça em relação ao sistema de coordenadas máquina para as quatro posições do rebatimento.

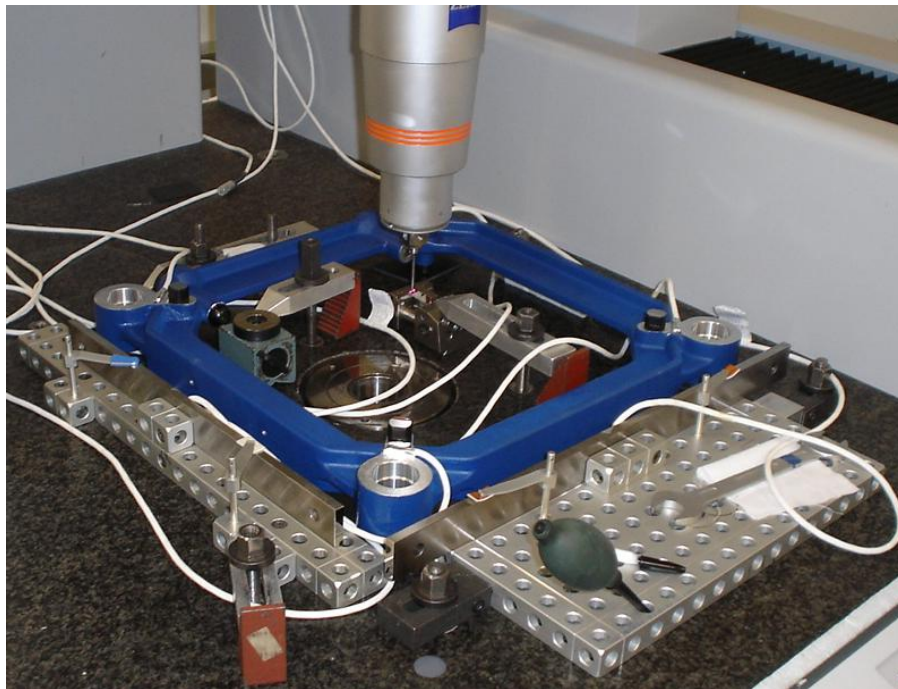


Figura 45 – Montagem do ensaio de calibração.

O processo de qualificação do apalpador foi realizado utilizando um bloco padrão de 10 mm, para que fosse qualificada apenas a orientação desejada. Como os padrões de referência são também blocos padrão, este procedimento minimiza os efeitos do erro de forma da esfera do apalpador. Foi utilizado também um anel padrão para a correção devido à transferência de comprimento, uma vez que os elementos de apalpação do artefato e do padrão de referência são diferentes, ou seja, cilindros e planos respectivamente.

Também faz parte do procedimento de calibração o controle de temperatura, tanto do padrão de referência quanto do artefato. Para isso são utilizados quatro sensores de contato para medir a temperatura do artefato e um sensor em cada padrão. Os valores medidos são usados na correção do tamanho devido à diferença de temperatura em relação à temperatura de referência 20 °C.

4.2.2 Resultado da calibração

O resultado da calibração são as coordenadas dos centros dos quatro furos, no sistema de coordenadas peça (u, v, w), obtidos a partir da medição dos comprimentos L_{ij} entre os furos i e j . As coordenadas dos centros dos furos são calculadas resolvendo um sistema de seis equações (17).

$$L_{ij} = \sqrt{(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2 + (w_i - w_j)^2} \quad (17)$$

As equações (18) e (19) representam as funções de medição das primeira etapa e da segunda respectivamente. A distância entre furos $L_{ij_rebatido}$ é a média aritmética das distâncias obtidas em cada posição do rebatimento, conforme a equação:

$$L_{ij_rebatido} = \frac{L_{ij_0} + L_{ij_Z} + L_{ij_Y} + L_{ij_X}}{4} \quad (18)$$

O comprimento entre furos $L_{ij_posição}$ em cada posição é definido pela equação:

$$L_{ij_posição} = L_A + (L_{P_cal} - L_P) \quad (19)$$

Os valores de incerteza foram determinados de acordo com a publicação EA-4/02^[67]. A estimativa da distância entre dois furos $L_{ij_posição}$, é obtida através da equação:

$$\begin{aligned}
L_{ij_posição} = & (L_A + \delta_{resA}) \cdot [1 - \alpha_A \cdot (T_A + \delta_{resT_A} + \delta_{T_A} - T_0)] + L_{P_cal} - \\
& - (L_P + \delta_{resP}) \cdot [1 - \alpha_P \cdot (T_P + \delta_{resT_P} + \delta_{T_P} - T_0)] + \\
& + \delta_{P_10mm} + \delta_{1D} + \delta_{res1D} + \delta_{Anel} + \delta_{2D} + \delta_{res2D} + \delta_{Tranf}.
\end{aligned} \tag{20}$$

Onde:

- L_A - Estimativa do valor indicado para a distância entre dois furos do artefato pela MMC. Média de 5 ciclos de medição.
- δ_{resA} - Correção devida à resolução finita da MMC na estimativa do valor entre dois furos do artefato. Considerada como sendo $0 \pm 0,05 \mu\text{m}$ (metade do valor da resolução, distribuição retangular).
- α_A - Estimativa do coeficiente de expansão térmica do artefato. Considerado como sendo $24,7 \pm 3,7 \mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}^{[61]}$ e valor da incerteza considerado como sendo $\pm 15\%$ do valor estimado^[10].
- T_A - Estimativa do valor indicado pelo sistema de medição de temperatura do artefato. Média dos valores lidos nos 4 sensores de temperatura por contato fixados no artefato.
- δ_{resT_A} - Correção devida à resolução finita do sistema de medição de temperatura. Considerada como sendo $0 \pm 0,005 \text{ }^\circ\text{C}$ (metade do valor da resolução, distribuição retangular).
- δ_{T_A} - Correção devida à calibração do sistema de medição de temperatura do artefato. Considerada como sendo $0 \pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}^{[68]}$ ($k=2$, distribuição normal).
- T_0 - Temperatura de referência.
- L_{P_cal} - Comprimento do padrão. Incerteza igual a $\pm 0,4 \mu\text{m}^{[70]}$ para o padrão de valor nominal 400 mm ($k=2$, distribuição normal).
- L_P - Estimativa do valor indicado para o comprimento do padrão pela MMC. Média de 6 ciclos de medição.
- δ_{resP} - Correção devida à resolução finita da MMC na estimativa do valor do comprimento do padrão. Considerada como sendo $0 \pm 0,05 \mu\text{m}$ (metade do valor da resolução, distribuição retangular).
- α_P - Estimativa do coeficiente de expansão térmica do padrão. Considerado como sendo $11,5 \pm 1,2 \mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$, dado obtido do certificado de calibração do bloco padrão e valor da incerteza considerado como sendo $\pm 10\%$ do valor estimado^[10].
- T_P - Estimativa do valor indicado pelo sistema de medição de temperatura do padrão. Média dos 6 ciclos de medição usando sensor de temperatura por contato fixado no padrão.
- δ_{resT_P} - Correção devida à resolução finita do sistema de medição de temperatura do padrão. Considerada como sendo $0 \pm 0,05 \mu\text{m}$ (metade do valor da resolução, distribuição retangular).

- δ_{T_P} - Correção devida à calibração do sistema de medição de temperatura do padrão. Considerada como sendo $0 \pm 0,05 \text{ } ^\circ\text{C}^{[68]}$ (k=2, distribuição normal)
- δ_{P_10mm} - Correção devida ao valor calibrado do padrão de valor nominal 10 mm . Incerteza = $\pm 0,08 \text{ } \mu\text{m}^{[72]}$ (k=2, distribuição normal).
- δ_{1D} - Correção devida à qualificação do apalpador usando padrão de 10 mm. Média de 10 ciclos de medição.
- δ_{res1D} - Correção devida à resolução finita da MMC na estimativa do valor do comprimento do padrão de 10 mm. Considerado como sendo $0 \pm 0,05 \text{ } \mu\text{m}$ (metade do valor da resolução, distribuição retangular).
- δ_{Anel} - Correção devida ao valor calibrado do anel padrão de valor nominal 20 mm. Incerteza = $\pm 0,7 \text{ } \mu\text{m}^{[73]}$ (k=2, distribuição normal).
- δ_{2D} - Correção devida à comparação entre resultado da qualificação do apalpador usando padrão de 10 mm e usando o anel padrão. Média de 10 ciclos de medição.
- δ_{res2D} - Correção devida à resolução finita da MMC na estimativa do valor do comprimento do anel padrão de 20 mm. Considerada como sendo $0 \pm 0,05 \text{ } \mu\text{m}$ (metade do valor da resolução, distribuição retangular).
- $\delta_{Transf.}$ - Correção devida à transferência de comprimento. Considerada como sendo $0 \pm$ (diferença entre o valor estimado para o padrão L_P antes e depois da medição do artefato) $\mu\text{m}/\text{m}$.

As equações utilizadas no cálculo dos coeficientes de sensibilidade são apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial L_{ij}}{\partial L_A} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{resA}} = 1 - \alpha_A \cdot (T_A + \delta_{resT_A} + \delta_{T_A} - T_0)$$

$$\frac{\partial L_{ij}}{\partial \alpha_A} = L_A \cdot (-T_A - \delta_{resT_A} - \delta_{T_A} + T_0)$$

$$\frac{\partial L_{ij}}{\partial T_A} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{resT_A}} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{T_A}} = -(L_A + \delta_{resA}) \cdot \alpha_A$$

$$\frac{\partial L_{ij}}{\partial L_P} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{resP}} = 1 - \alpha_P \cdot (T_P + \delta_{resT_P} + \delta_{T_P} - T_0)$$

$$\frac{\partial L_{ij}}{\partial \alpha_P} = L_P \cdot (-T_P - \delta_{resT_P} - \delta_{T_P} + T_0)$$

$$\frac{\partial L_{ij}}{\partial T_P} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{resT_P}} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{T_P}} = -(L_P + \delta_{resP}) \cdot \alpha_P$$

$$\frac{\partial L_{ij}}{\partial L_{P_cal}} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{P_10mm}} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{1D}} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{res1D}} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{Anel}} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{2D}} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{res2D}} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{Trans}} = 1$$

Os balanços de incerteza resultantes da segunda etapa, onde é estabelecida a rastreabilidade de comprimento, são semelhantes ao apresentado na tabela 5, referentes à distância entre os furos 1 e 2. .

Tabela 5 – Balanço de incerteza da estimativa da distância entre os furos 1 e 2.

Grandeza	Estimativa da grandeza	Valor bruto	Tipo de distribuição	Fator divisor	Tipo	Incerteza padrão	Coef. de sensibilidade	Contribuição incerteza	Graus de liberdade
X_i	x_i					$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$	ν
L_A	399,9510 mm	0,00005	normal	$n^{1/2}$	A	0,00002	1	2,4E-05	4
$\delta_{res A}$	0,0000 mm	0,00005	retangular	$3^{1/2}$	B	0,00003	1	2,9E-05	∞
α_A	2,47E-05 K ⁻¹	1,00E-08	retangular	$3^{1/2}$	B	5,8E-09	11,5	6,6E-08	∞
T_A	20,12 °C	0,021	normal	$n^{1/2}$	A	0,012	-9,9E-03	-0,0001	3
$\delta_{res T_A}$	0,00 °C	0,005	retangular	$3^{1/2}$	B	0,003	-9,9E-03	0,0000	∞
δ_{T_A}	0,00 °C	0,050	normal	2	B	0,025	-9,9E-03	-0,0002	∞
L_{P_cal}	500,0008 mm	0,00050	normal	2	B	0,00025	1	0,0003	∞
L_P	500,0008 mm	0,00005	normal	$n^{1/2}$	A	0,00002	-1	-2,4E-05	5
$\delta_{res P}$	0,0000 mm	0,00005	retangular	$3^{1/2}$	B	0,00003	1	2,9E-05	∞
α_P	1,15E-05 K ⁻¹	1,00E-08	retangular	$3^{1/2}$	B	5,8E-09	-4,4	-2,5E-08	∞
T_P	20,14 °C	0,000	normal	$n^{1/2}$	A	0,000	5,8E-03	0,0E+00	5
$\delta_{res T_P}$	0,00 °C	0,005	normal	2	B	0,003	5,8E-03	1,4E-05	∞
δ_{T_P}	0,00 °C	0,050	normal	2	B	0,025	5,8E-03	0,0001	∞
δ_{P_10mm}	0,0000 mm	0,00008	normal	2	B	0,00004	1	4,0E-05	∞
δ_{1D}	0,0000 mm	0,00005	normal	$n^{1/2}$	A	0,00002	1	1,5E-05	9
$\delta_{res 1D}$	0,0000 mm	0,00005	retangular	$3^{1/2}$	B	0,00003	1	2,9E-05	∞
δ_{Anel}	0,0000 mm	0,00050	normal	2	B	0,00025	1	0,0003	∞
δ_{2D}	0,0000 mm	0,00020	retangular	$3^{1/2}$	B	0,00012	1	0,0001	∞
$\delta_{res 2D}$	0,0000 mm	0,00005	retangular	$3^{1/2}$	B	0,00003	1	2,9E-05	∞
$\delta_{Transf.}$	0,0000 mm	0,00001	retangular	$3^{1/2}$	B	4,3E-06	1	4,3E-06	∞
L_{12_0}	399,9513 mm							0,0004	5E+12
$k_{95,45\%}$	2								
$U(L_{12_0})$	0,0009 mm								

Como pode ser observado, o valor correspondente ao número de graus de liberdade efetivo tende ao infinito. Isto demonstra que as fontes de incerteza do tipo A, ou seja, as obtidas estatisticamente, têm baixa contribuição no resultado. Isto pode ser mais bem observado na figura 46, onde é apresentado o diagrama de Pareto com os valores da contribuição para incerteza padrão das diversas fontes de incerteza consideradas. Seis entre os sete maiores valores encontrados, correspondem à incerteza de calibração dos padrões ou sistemas de medição utilizados. Uma atenção especial deve ser dada ao sistema de medição de temperatura, já que o procedimento de calibração corrige as variações de tamanho em função da diferença de temperatura. Como pode ser observado, entre as fontes

de incerteza do tipo A, a repetitividade dos valores registrados para temperatura T_A é o que mais contribui com a incerteza do resultado. Além disso, a incerteza da calibração do sistema de medição de temperatura δ_{T_A} está entre os maiores valores.

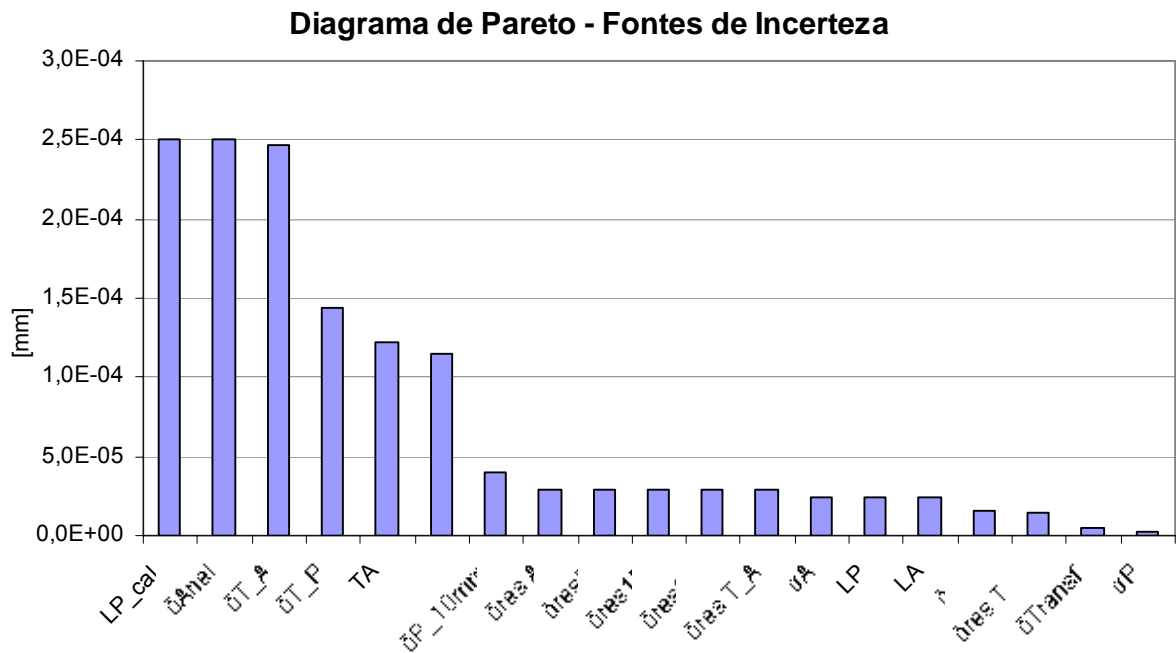


Figura 46 – Diagrama de Pareto da influência das fontes de incerteza no resultado da calibração.

O resultado final da calibração é apresentado na tabela 6.

Tabela 6 – Resultado da calibração.

	Distância entre os furos				Coordenadas dos centros dos furos		
	L [mm]	$U_{95\%}$ [mm]	k	v_{eff}	Furo	u	v
L_{12}	399,9507	0,0009	2	∞			
L_{13}	399,9546	0,0009	2	∞	1	0,0000	0,0000
L_{14}	565,5692	0,0012	2	∞	2	399,9507	0,0000
L_{23}	565,6546	0,0012	2	∞	3	-0,0511	399,9546
L_{24}	399,9320	0,0009	2	∞	4	399,9036	399,9320
L_{34}	399,9547	0,0009	2	∞			

4.3 SOFTWARE DESENVOLVIDO PARA PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os resultados dos ensaios são processados por um *software* de aplicação *off-line*²⁸, desenvolvido em plataforma Labview. O *software* é alimentado com os dados do certificado de calibração do artefato, com o resultado do ensaio de verificação, com os registros da temperatura do artefato durante o ensaio e os resultados do ensaio de avaliação do apalpador.

O principal “produto” do *software* é um relatório (ver apêndice) para estudo de estabilidade da MMC e do sistema de apalpação. O relatório é composto de gráficos de CEP para cada um dos 9 parâmetros de avaliação, apresentados na seção 3.3. Para os parâmetros obtidos com a medição do artefato é opcional a compensação dos efeitos térmicos. Também é mantido um histórico onde é registrado o operador que executou cada ensaio além de qualquer anomalia observada entre verificações através de um diário de bordo. O diagrama da figura 47 apresenta os dados de entrada e saída do *software* enquanto a figura 48 apresenta o fluxograma de ações realizadas pelo mesmo.

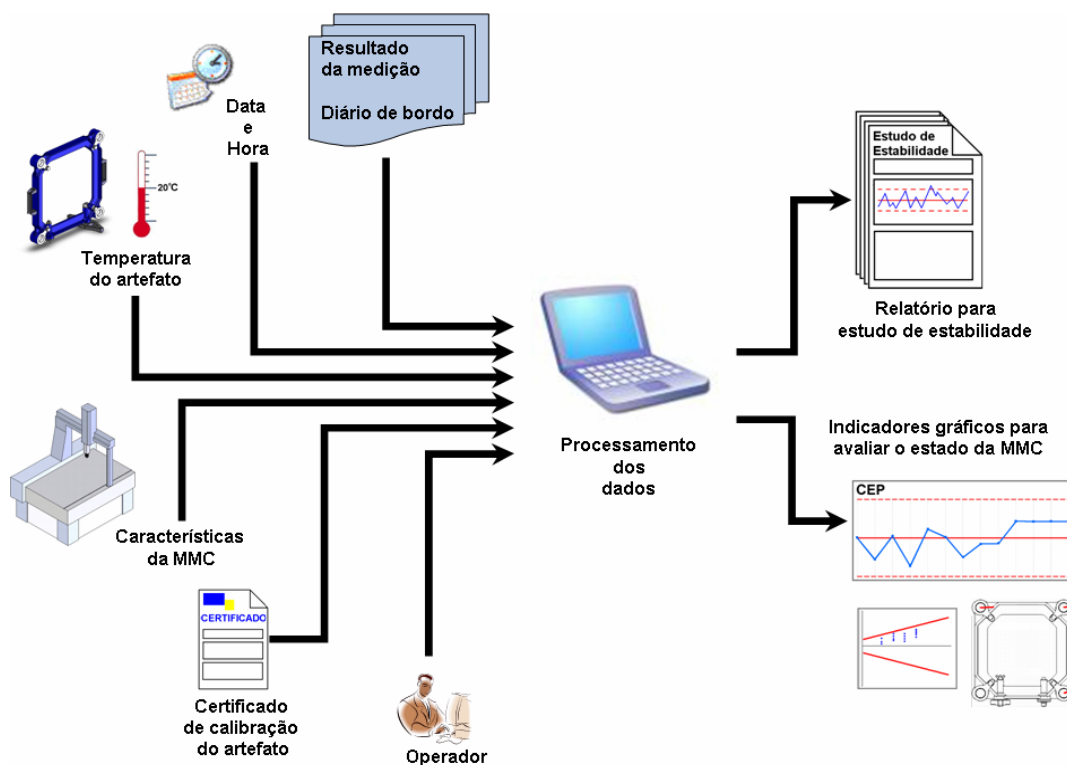


Figura 47 - Dados de entrada e saída para o programa de processamento dos dados.

²⁸ *Off-line*: independente do computador que controla a MMC. Aplicação remota.

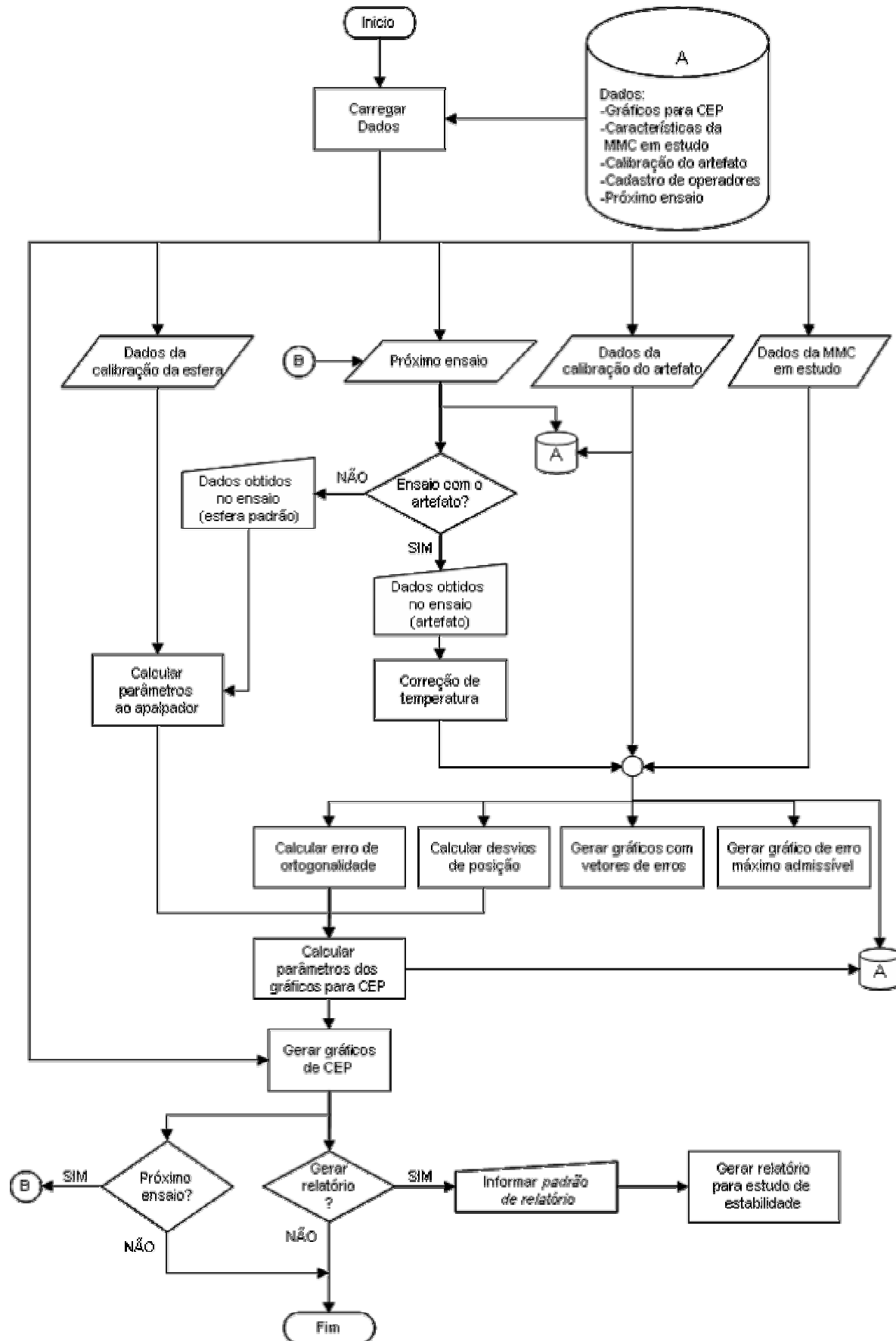


Figura 48 – Fluxograma do programa de processamento de dados.

A **interface com o usuário** foi desenvolvida com o objetivo de ser auto-explicativa, tornando o *software* fácil de ser operado e interpretado. O procedimento de utilização do *software* pode ser resumido em seis ações principais (Figura 49):

- 1 e 2. **Log in**²⁹ – tem como objetivo registrar o usuário que realizou a verificação. Apenas o usuário administrador pode criar ou excluir outros usuários. Esta informação pode ser usada para estratificar os dados e determinar se há efeito do operador.
- 3 e 4. **Alimentação do software com dados da MMC e do artefato** – são estes: as especificações de erro máximo permissível da MMC; dados de identificação da máquina; dados do certificado de calibração do artefato e da esfera de verificação do apalpador. Estes dados são alterados apenas após calibração do artefato ou da máquina.
5. **Alimentação do software com dados do ensaio de verificação** –
 - Para verificação da MMC, são as coordenadas peça (u, v, w) dos centros dos furos do artefato e a temperatura registrada durante o ensaio.
 - Para verificação do cabeçote apalpador, são os parâmetros calculados pela própria máquina: desvio de forma da esfera, diâmetro e coordenadas do centro de cada uma das 5 esferas geradas por cada configuração do apalpador³⁰. Alternativamente podem ser fornecidas as coordenadas dos 125 pontos amostrados, com o cálculo sendo efetuado pelo *Quadra Mensura*.
6. **Gerar relatório para controle de estabilidade da MMC** – tem como objetivo imprimir e arquivar os resultados do estudo de estabilidade. As informações do controle estatístico do desempenho da MMC e do sistema de apalpação são enviadas para preencher um arquivo modelo (*template*) em formato tipo: *.xls³¹.

²⁹ Login: registro

³⁰ Maiores detalhes na seção 3.3.1.

³¹ Microsoft Office Excel.

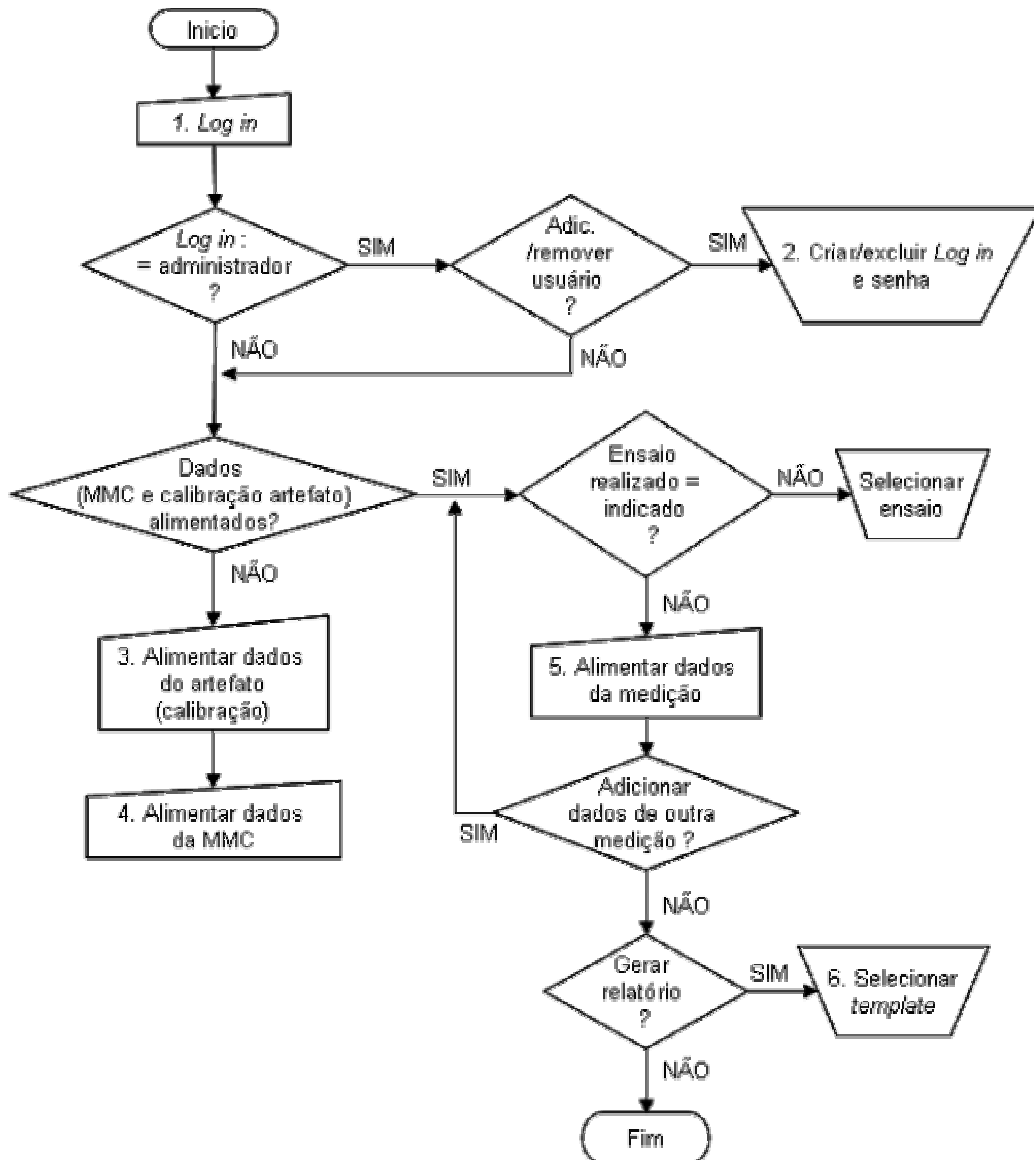


Figura 49 – Fluxograma do procedimento de utilização do programa.

As ações 1 e 2 são executadas acessando janelas específicas através do menu “Iniciar”. Da mesma forma as ações 3, 5 e 6 são executadas, porém acessando o menu “Ferramentas”. Os dados referentes à MMC são alimentados na janela denominada “Especificação” (Figura 50). Nesta janela também são mostrados os gráficos de erro máximo admissível da MMC e dos vetores de erro correspondentes a cada furo. No canto superior esquerdo de todas as janelas há uma figura para orientação do próximo ensaio que deve ser executado. As janelas com os gráficos de controle dos parâmetros de avaliação (Figura 51) e de temperatura (Figura 52) são acessadas por abas no lado inferior da janela principal (Figura 50).

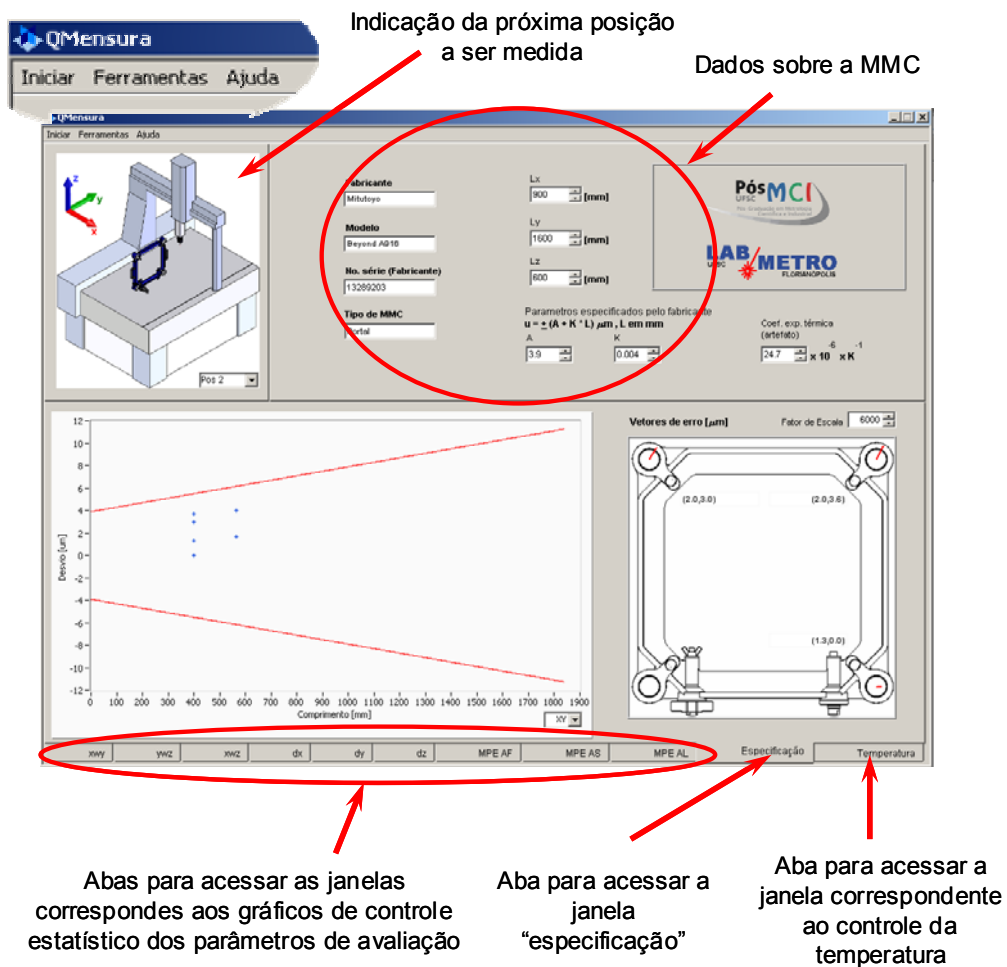


Figura 50 – Janela denominada “especificação”.

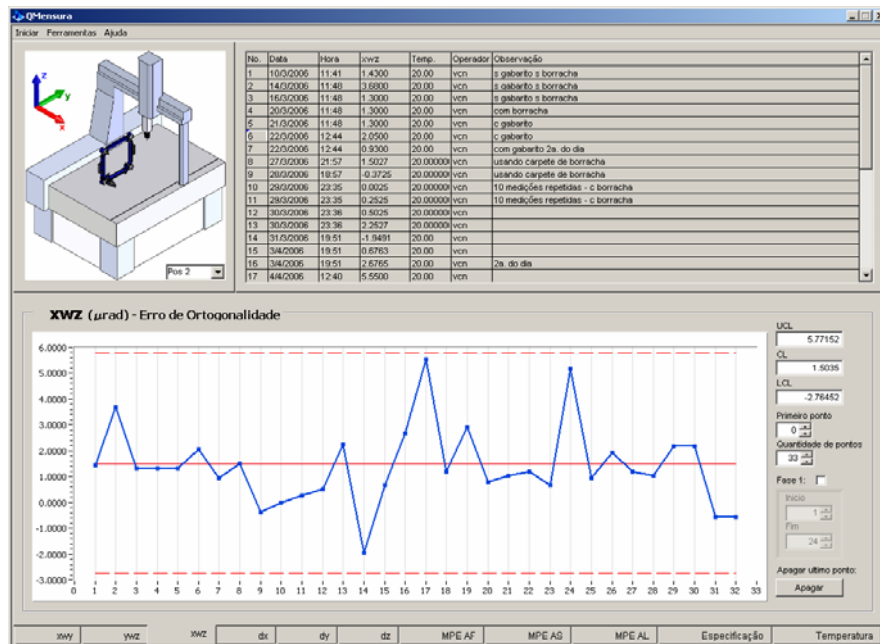


Figura 51 – Uma dentre as nove janelas correspondente aos gráficos para controle estatístico dos parâmetros de avaliação.

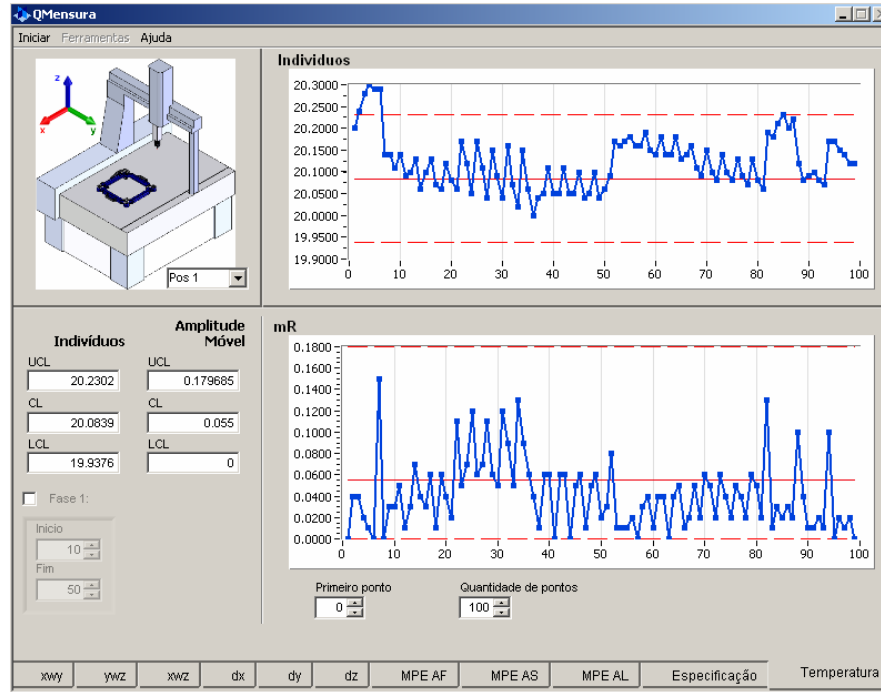


Figura 52 – Janela correspondente ao controle de temperatura.

Os gráficos com os vetores correspondentes aos desvios obtidos no ensaio de verificação podem ser simplificados interpretados conforme figura 53.

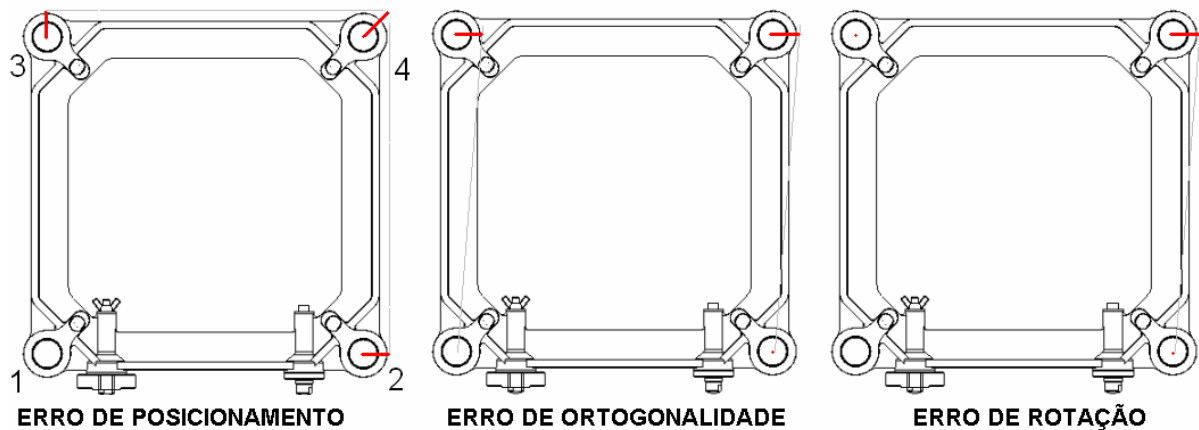


Figura 53 – Representação do efeito dos erros paramétricos de uma MMC através de gráficos de vetores de erro obtidos com a medição de um artefato bidimensional.

A tabela 7, com exceção da coluna “Gráfico de vetores”, contém o mesmo tipo de informação da tabela 1, apresentada no capítulo 2. São destacadas as células referentes aos erros paramétricos de uma máquina tipo portal móvel, que influenciam as medições do artefato em cada um dos planos usados no procedimento de verificação. Com o auxílio do gráfico de vetores é possível fazer um

diagnóstico aproximado dos erros paramétricos que estão influenciando o desempenho da MMC. Os símbolos utilizados na coluna “Gráfico de vetores” podem ser interpretados da seguinte forma:

- du e dv correspondem a desvios em um único ponto, no sentido dos eixos *U* e *V* respectivamente, conforme a representação do erro de rotação da figura 53.
- w corresponde ao erro de ortogonalidade (Figura 53) do plano avaliado.
- pu e pv correspondem ao erro de posicionamento no sentido dos eixos *U* e *V* respectivamente. Erro de posicionamento no sentido do eixo *U* corresponde a desvios du nos furos 2 e 4. Já no sentido do eixo *V* o erro de posicionamento pode ser observado como desvios dv nos furos 3 e 4. A representação de erro de posicionamento da figura 53 contém os erros no sentido dos eixos *U* e *V* simultaneamente.

Tabela 7 – Erros paramétricos de uma MMC e como estes são visualizados em gráficos de vetores.

Plano XY					Plano YZ					Plano ZX									
Eixo	Erro	Fator de correção			Gráfico de vetores	Eixo	Erro	Fator de correção			Gráfico de vetores	Eixo	Erro	Fator de correção			Gráfico de vetores		
		x	y	z				x	y	z				x	y	z			
Y (portal)	ytx	1			w	Y (portal)	ytx	1				Y (portal)	ytx	1					
	ypy		1		pv		ypy		1				pu	ypy		1			
	ytz			1			ytz			1			w	ytz			1		
	yrx		-z _d	y _d			yrx		-z _d	y _d			du em 4	yrx		-z _d	y _d		
	yry	z _d		-x ₃			yry	z _d		-x ₃			dv em 4	yry	z _d		-x ₃		
	y rz	-y _d	-z ₃	y ₃			y rz	-y _d	-z ₃	y ₃			pu	y rz	-y _d	-z ₃	y ₃		
X (carro)	xpx	1			pu	X (carro)	xpx	1				X (carro)	xpx	1			pu		
	xty		1		w		xty		1					xty		1			
	xtz			1			xtz			1				xtz			1		w
	xrx		-z _d	y _d			xrx		-z _d	y _d				xrx		-z _d	y _d		dv em 4
	xry	z _d		-x ₃			xry	z _d		-x ₃				xry	z _d		-x ₃		du em 4
	x rz	-y _d	-z ₃	y ₃			x rz	-y _d	-z ₃	y ₃				x rz	-y _d	-z ₃	y ₃		pu
Z (braço)	ztx	1				Z (braço)	ztx	1				Z (braço)	ztx	1			w		
	zty		1				zty		1		w		zty		1				
	zpz			1			zpz			1			pv	zpz			1		pv
	zrx		-z ₃	y ₃			zrx		-z ₃	y ₃				zrx		-z ₃	y ₃		pv
	zry	z ₃		-x ₃			zry	z ₃		-x ₃			pv	zry	z ₃		-x ₃		
	z rz	-y ₃	x ₃				z rz	-y ₃	x ₃				w	z rz	-y ₃	x ₃			pu

■ erros paramétricos de uma MMC tipo portal que influenciam a medição com o artefato
 ■■ erros paramétricos de uma MMC tipo portal que não influenciam as medições no plano indicado

4.4 APLICAÇÃO INICIAL

A aplicação inicial da solução proposta foi realizada no Laboratório de Metrologia Dimensional compartilhado entre a Fundação CERTI e o Labmetro/UFSC. O objetivo é avaliar a viabilidade operacional da solução e identificar possíveis necessidades não previstas anteriormente. É a primeira oportunidade de testar os procedimentos de verificação e sua eficiência em monitorar a variabilidade da MMC e do sistema de apalpação, além de avaliar a interação do usuário com a interface do *software* de processamento dos dados.

A MMC avaliada é uma Mitutoyo Beyond A916 tipo portal de acionamento CNC, cuja especificação interna para os valores de máximo erro admissível para todo volume da máquina é $\pm (3,9 + 4,0 \cdot L/1000)$ μm . A seqüência cinemática da MMC é $Y \rightarrow X \rightarrow Z$ (Portal \rightarrow Carro \rightarrow Braço). O sistema de apalpação é constituído do cabeçote Renishaw PH10M e do sensor TP200 do mesmo fabricante. A repetitividade da indexação especificada para o cabeçote é $0,5 \mu\text{m}$ ³². O erro de forma do sensor é $1,4 \mu\text{m}$ para medições de objetos tridimensionais. A temperatura ambiente especificada para o laboratório é $(20 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ e a umidade relativa é $(50 \pm 10) \%$.

O procedimento de execução do ensaio é o mesmo que o descrito na seção 3.2. Um programa CNC foi criado havendo apenas a necessidade de um alinhamento manual para localizar o artefato na MMC. O procedimento completo para as três posições, considerando montagem do ensaio e alinhamento manual, foi realizado em aproximadamente 20 minutos. No entanto, foram também testadas as hipóteses de uso de gabaritos e marcações sobre a mesa da MMC a fim de evitar a necessidade de alinhamento manual. Com isso, o tempo total de medição do artefato nas três posições diferentes reduziu para apenas 7 minutos, o que é um excelente resultado para este tipo de aplicação, indicando que o artefato é muito fácil de manusear.

Os ensaios de verificação rápida ocorreram entre os dias 20 de março e 01 de junho de 2006. Porém, os dados usados para gerar os gráficos para avaliação de estabilidade da máquina foram adquiridos a partir de 06 de abril de 2006. Os

³² Para 62 mm de distância entre centro da esfera do apalpador e eixo de giro do cabeçote.

primeiros dados foram descartados, pois foi observado que a força de atrito entre os apoios e a placa de aço sobre a qual o artefato era posicionado era insuficiente para evitar o deslocamento do artefato quando posicionado verticalmente. A partir deste momento se verificou a necessidade de usar massa de modelar para garantir a fixação dos apoios.

A medição da temperatura do artefato durante os ensaios foi feita utilizando-se um termômetro digital onde quatro sensores de contato foram fixados próximos aos elementos de apalpação (Figura 54). A média dos valores medidos foi utilizada na compensação dos efeitos de dilatação térmica.

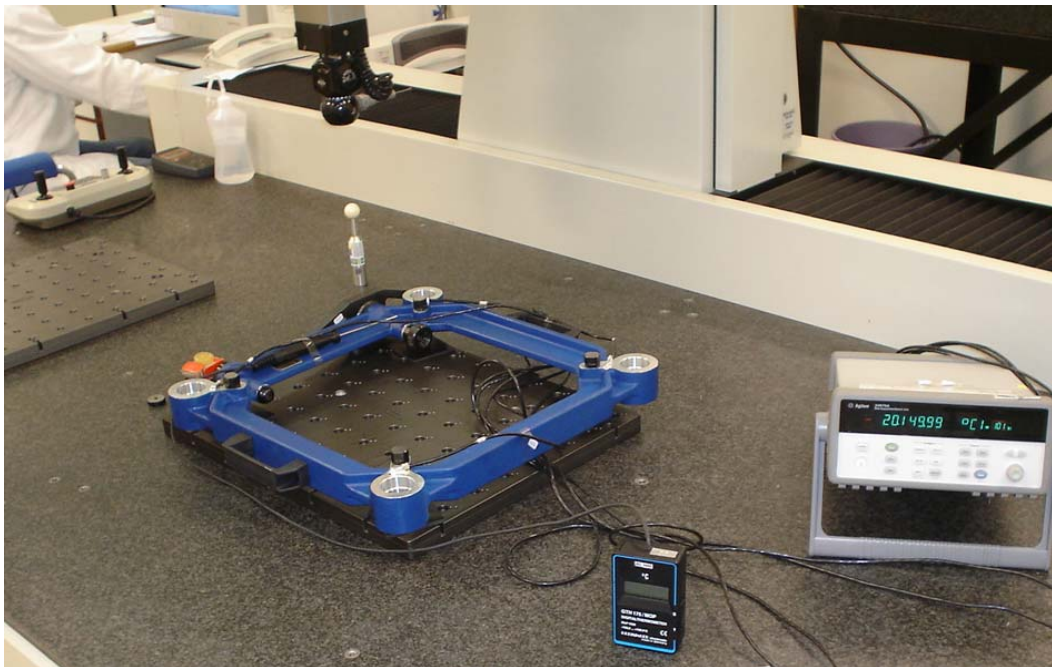


Figura 54 – Montagem da posição XY.

O intervalo entre ensaios não foi constante. Variou entre alguns minutos, diferentes horas do dia, de um dia para o outro ou períodos mais longos, como entre uma ou mais semanas. Para o estudo de estabilidade da MMC foram realizados 25 ensaios em cada posição (plano XY, YZ e ZX). Conforme apresentado na seção 3.3, são monitorados dois parâmetros em cada posição, um erro de posicionamento e o erro de ortogonalidade.

Inicialmente são apresentados os gráficos correspondentes ao controle de estabilidade dos desvios de posicionamento. O *software* para processamento dos dados permite escolher entre compensar ou não os efeitos de dilatação térmica do artefato. No entanto são apresentados os gráficos de CEP para ambos os casos.

Em relação aos ensaios realizados na posição XY, as figuras 55, 56 e 57 correspondem às medições de temperatura e aos desvios de posicionamento do eixo X da MMC sem correção e com correção dos efeitos de dilatação térmica respectivamente.

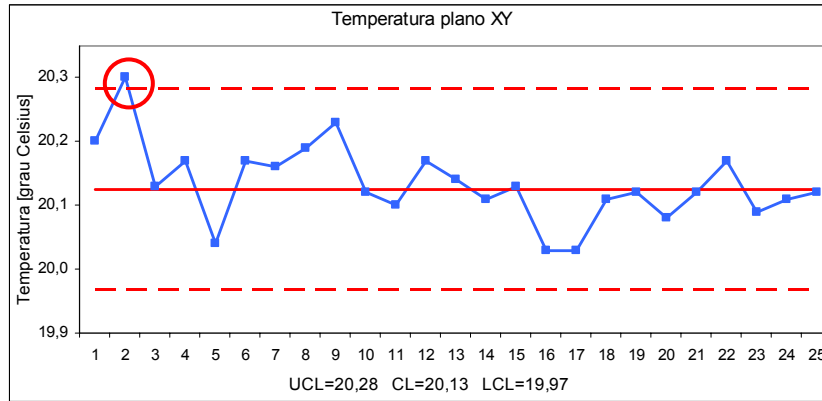


Figura 55 – Gráfico de controle da temperatura do artefato durante ensaios no plano XY.

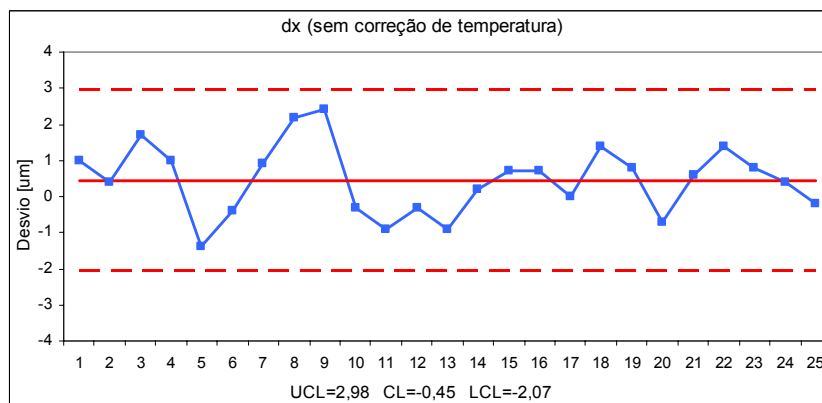


Figura 56 - Gráfico de controle do parâmetro dx (sem correção de temperatura).

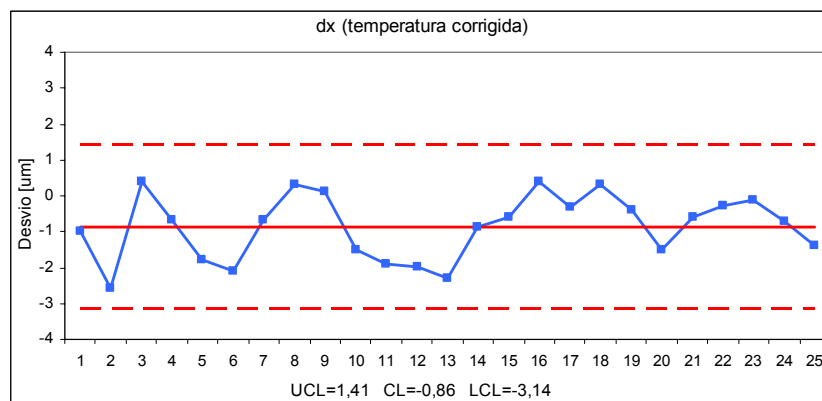


Figura 57 – Gráfico de controle do parâmetro dx (com temperatura corrigida).

A figura 58 corresponde aos valores de temperatura medidos durante os ensaios realizados na posição YZ. As figuras 59 e 60 correspondem aos estudos de estabilidade dos desvios de posicionamento do eixo Y da MMC sem correção e com correção dos efeitos de dilatação térmica respectivamente.

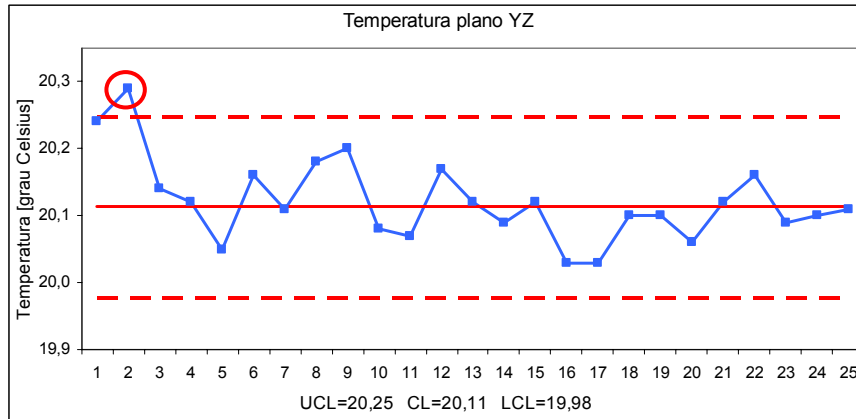


Figura 58 - Gráfico de controle da temperatura do artefato durante ensaios no plano YZ.

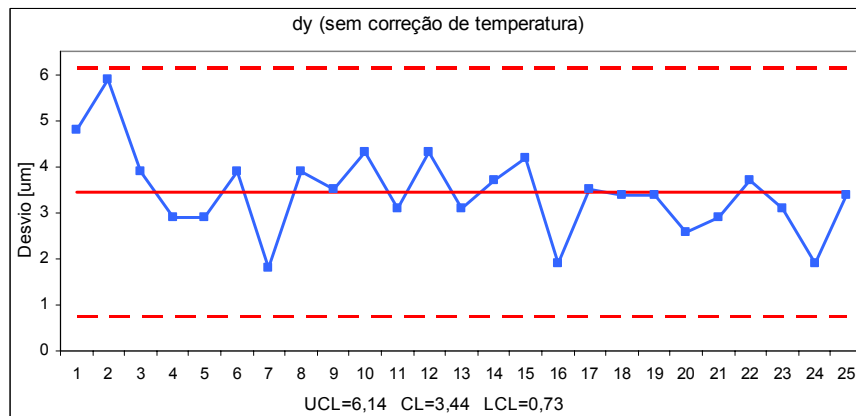


Figura 59 - Gráfico de controle do parâmetro dy (sem correção de temperatura).

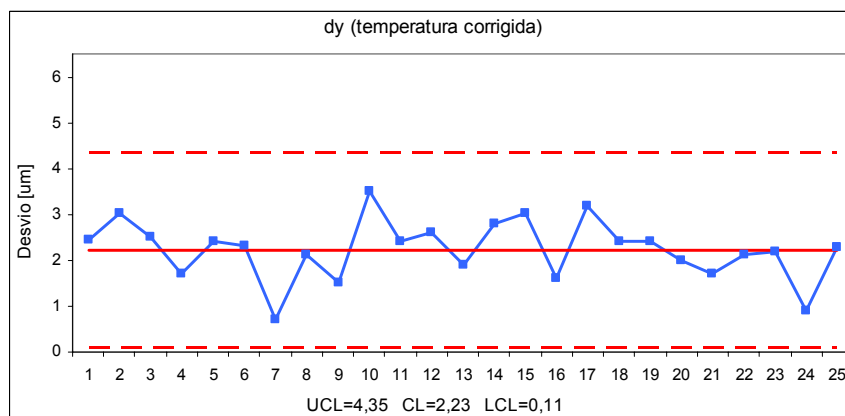


Figura 60 - Gráfico de controle do parâmetro dy (com temperatura corrigida).

Com relação aos ensaios realizados com o artefato na posição XZ, são apresentados nas figuras 61, 62 e 63, os gráficos de controle das medições de temperatura e da variação dos desvios de posicionamento referentes ao eixo Z da MMC sem correção e com correção dos efeitos de dilatação térmica.

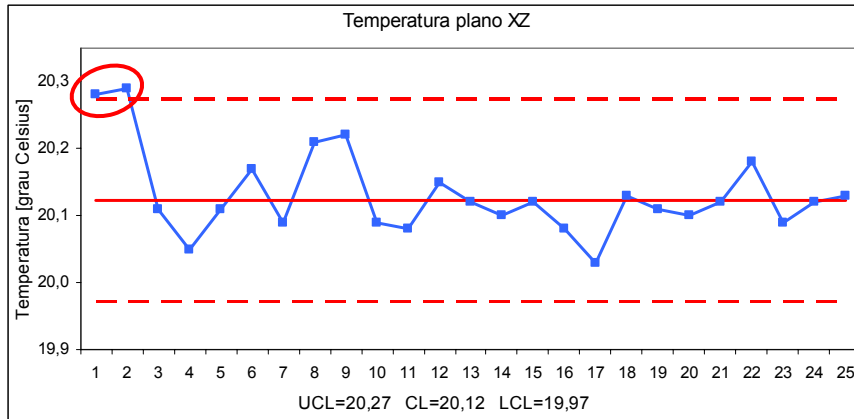


Figura 61 - Gráfico de controle da temperatura do artefato durante ensaios no plano YZ

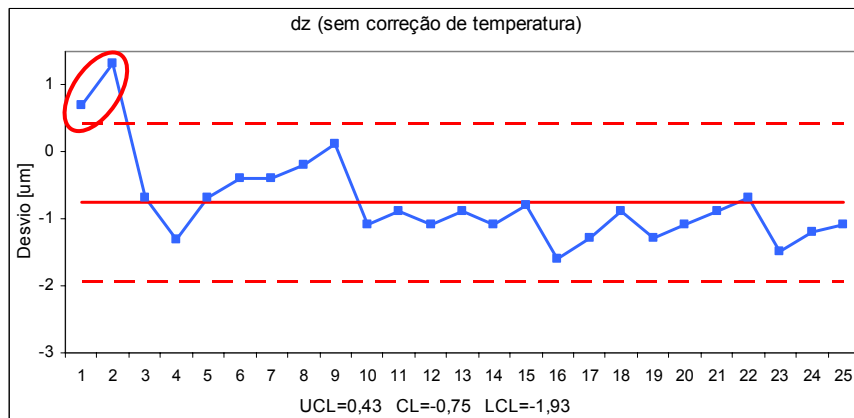


Figura 62 - Gráfico de controle do parâmetro dz (sem correção de temperatura).

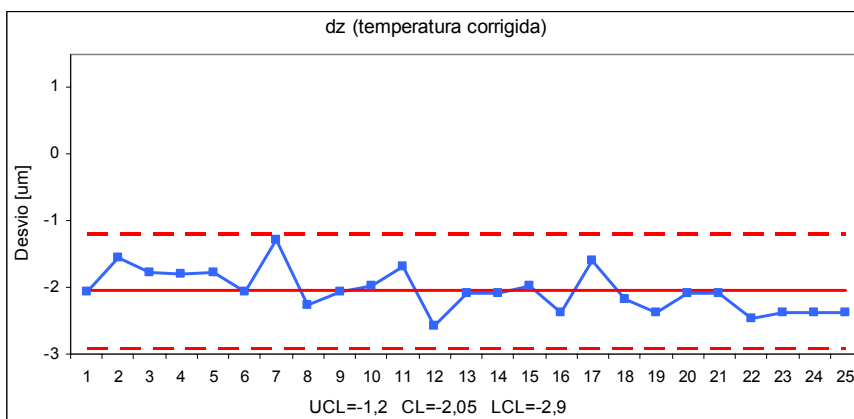


Figura 63 - Gráfico de controle do parâmetro dz (com temperatura corrigida).

Pode ser observado nos gráficos de controle referentes às temperaturas registradas para o artefato, que apesar dos dois primeiros pontos estarem fora dos limites de controle, estão dentro dos limites de especificação para o laboratório. Em relação aos gráficos de controle sem correção de temperatura, observa-se que não há pontos fora dos limites de controle, mas é possível perceber a correlação com a temperatura ao se comparar com os gráficos de controle com o efeito da temperatura corrigido, apresentados nas figuras 57, 60 e 63. Também é possível observar uma redução da dispersão dos valores quando a temperatura é corrigida.

Na seqüência é apresentado o estudo de estabilidade através do controle do erro de ortogonalidade para os três planos através dos gráficos das figuras 64, 65 e 66.

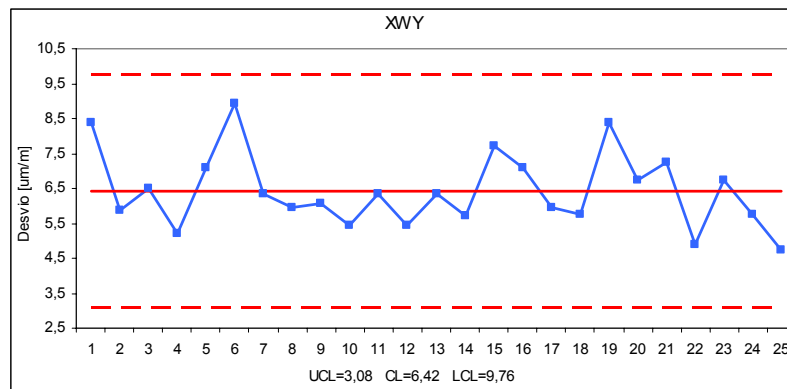


Figura 64 - Gráfico de controle do parâmetro xwy (µm/m)

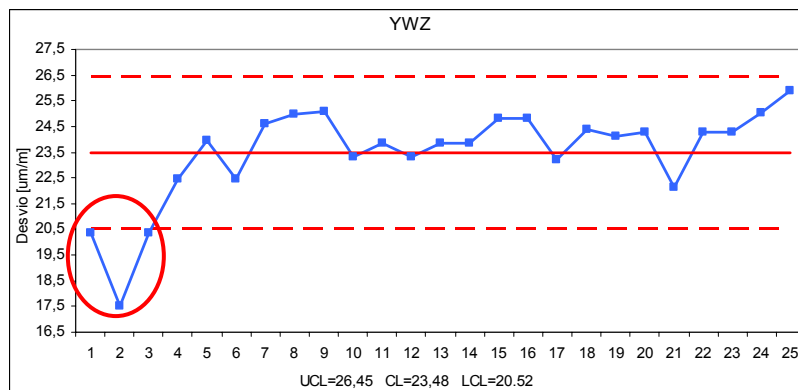


Figura 65 - Gráfico de controle do parâmetro ywz (µm/m)



Figura 66 - Gráfico de controle do parâmetro zwz ($\mu\text{m}/\text{m}$)

Pode-se observar que os três primeiros pontos da ortogonalidade no plano YZ ultrapassaram os limites de controle. De acordo com informações registradas no diário de bordo, não há nenhuma ocorrência que justifique os dois primeiros pontos fora dos limites de controle. No entanto, os pontos fora dos limites de controle são evidências da ocorrência de causas especiais. Uma hipótese é a possível presença de deformação causada por um gradiente no braço (eixo Z da MMC), já que o valor de temperatura registrado durante as medições dos dois primeiros pontos também estavam fora dos limites de controle (Figura 58). O terceiro ponto, apesar de estar com o valor de temperatura dentro dos limites de controle, apresentou uma amplitude de 0,14 K entre os valores registrados pelos quatro sensores de temperatura. Esta diferença de temperatura é suficiente para gerar um gradiente térmico no artefato da ordem de grandeza do desvio encontrado.

Nas figuras 67, 68 e 69, os resultados da medição do artefato em cada posição são apresentados através de gráficos de erro máximo admissível e de gráficos com vetores de erro. Estes gráficos correspondem ao resultado do vigésimo quinto ensaio de cada posição.

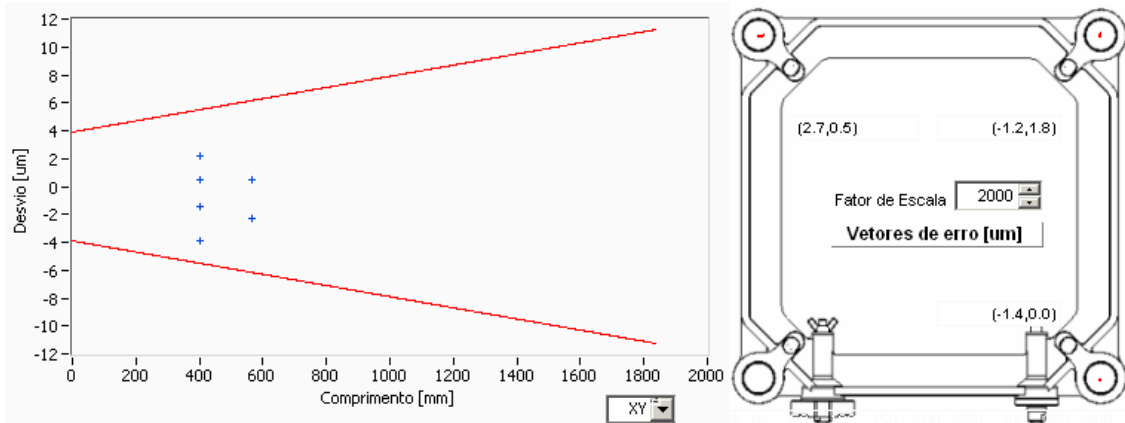


Figura 67 – Gráfico com os limites de especificação da MMC (esquerda) e gráfico dos vetores de erros para o plano XY (direita).

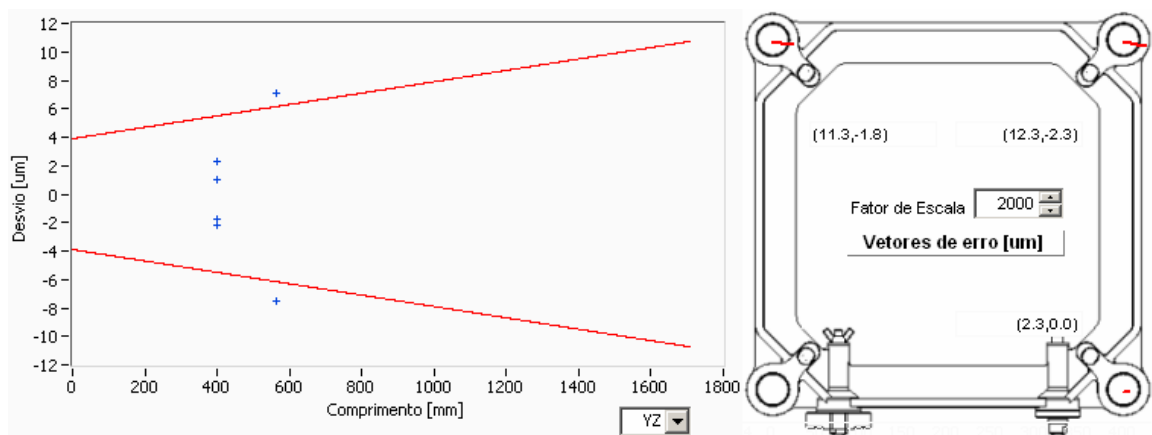


Figura 68 - Gráfico com os limites de especificação da MMC (esquerda) e gráfico dos vetores de erros para o plano YZ (direita).

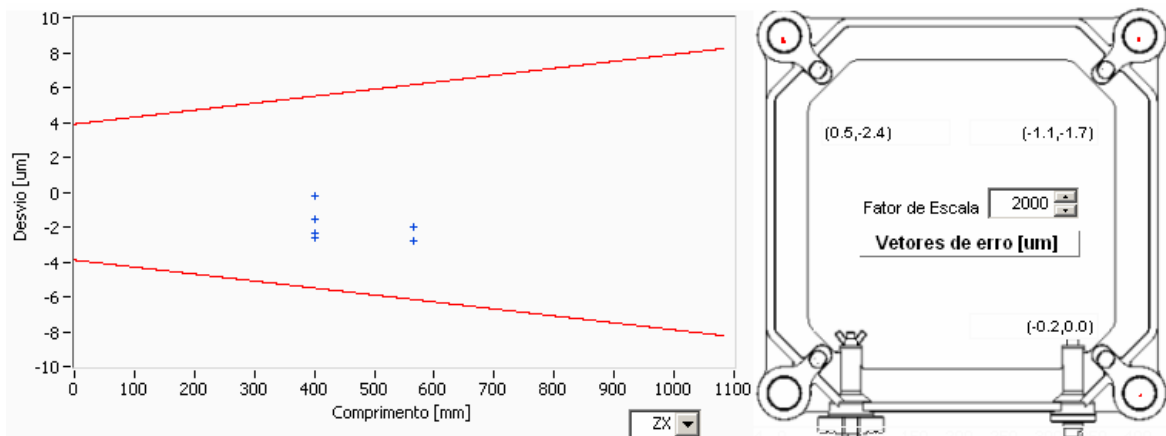


Figura 69 - Gráfico com os limites de especificação da MMC (esquerda) e gráfico dos vetores de erros para o plano XZ (direita).

Analisando os gráficos de erro máximo admissível é possível observar que as medições nos planos XY e XZ apresentam resultado satisfatório, com todos os comprimentos medidos dentro dos limites especificados. Os valores dos desvios

apresentados nos gráficos de vetores são baixos, da mesma ordem de grandeza da incerteza da calibração do artefato. No entanto os resultados obtidos para as medições realizadas na posição YZ apresentam pontos fora do limite de especificação. Analisando os gráficos de vetores é possível identificar uma predominância do efeito do desvio de ortogonalidade sobre a medição.

Foi observado também, que sem correção de temperatura, algumas medições realizadas no plano XY também apresentam pontos fora dos limites da especificação de máximo erro admissível, mesmo com os valores de temperatura dentro do especificado (Figura 70).

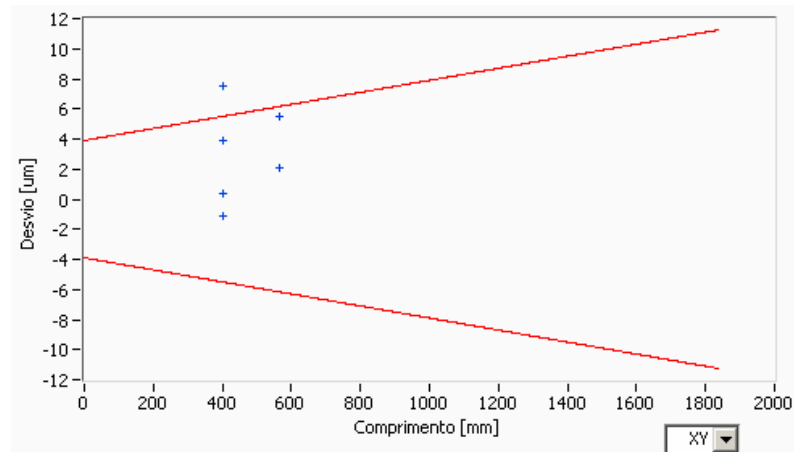


Figura 70 – Gráfico com limites de erro máximo admissível – ensaio no. 2 plano XY, sem correção de temperatura.

Após o período dedicado ao estudo de estabilidade, a MMC avaliada foi calibrada e ajustada pelo fabricante. Os resultados obtidos para os ensaios realizados nas três posições após a calibração estão dentro dos limites de especificação de erro máximo admissível. A figura 71 apresenta o resultado da avaliação do plano YZ após a calibração. Comparando com os resultados da figura 68, obtidos antes da calibração, é possível observar que os comprimentos antes fora dos limites de especificação estão agora em conformidade com o especificado, embora o erro de ortogonalidade ainda seja predominante. Esta comparação mostra a importância da realização dos ensaios de aceitação no acompanhamento do desempenho da MMC ao longo do tempo, tendo como referência o status no momento da calibração.

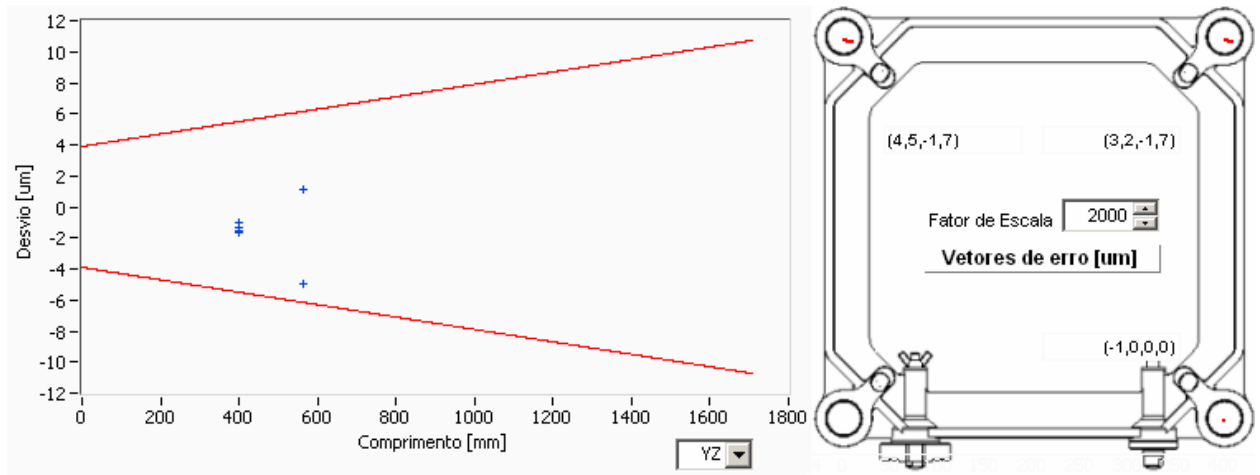


Figura 71 - Gráfico com os limites de especificação da MMC (esquerda) e gráfico dos vetores de erros para o plano YZ (direita) – valores obtidos após calibração.

As figuras 72, 73 e 74 apresentam os gráficos de controle dos parâmetros de avaliação do sistema de apalpação.

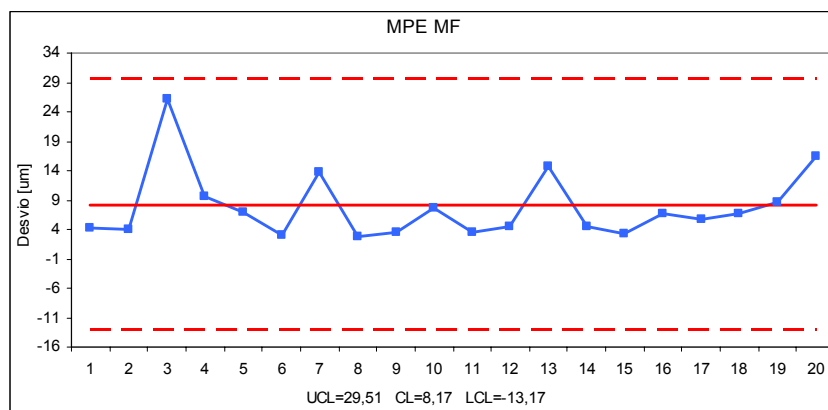


Figura 72 – Gráfico de controle do erro de forma (ensaio do apalpador).

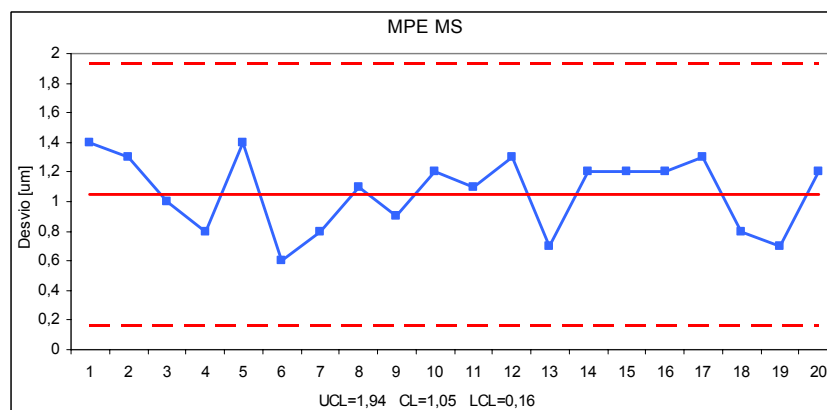


Figura 73 – Gráfico de controle do erro de tamanho (ensaio do apalpador).

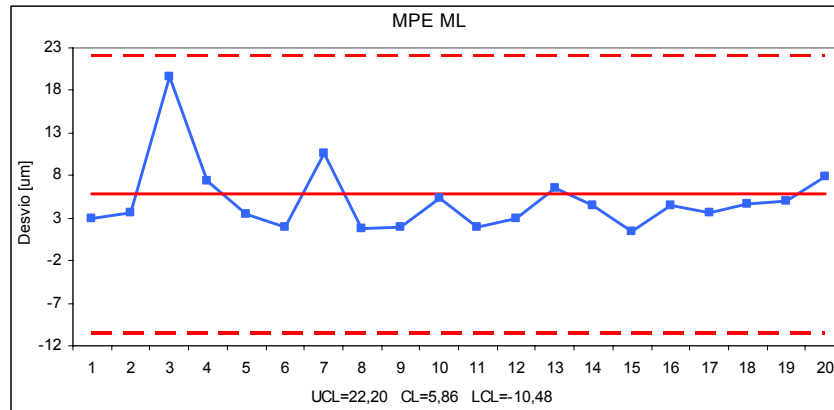


Figura 74 – Gráfico de controle do erro de posicionamento (ensaio do palpador).

Pode-se observar que apesar de estarem sob controle, os erros de forma e posição apresentam valores relativamente altos. Estes resultados elevam significativamente a incerteza das medições que dependem da indexação do cabeçote inviabilizando, desta forma, a inspeção de algumas tolerâncias geométricas (GPS e GD&T). Além disso, é possível observar que estes parâmetros são correlacionados (Figura 75). Como a posição de cada esfera é gerada a partir dos mesmos 25 pontos usados para calcular o erro de forma, é justificável a influência do erro de forma sobre a posição.

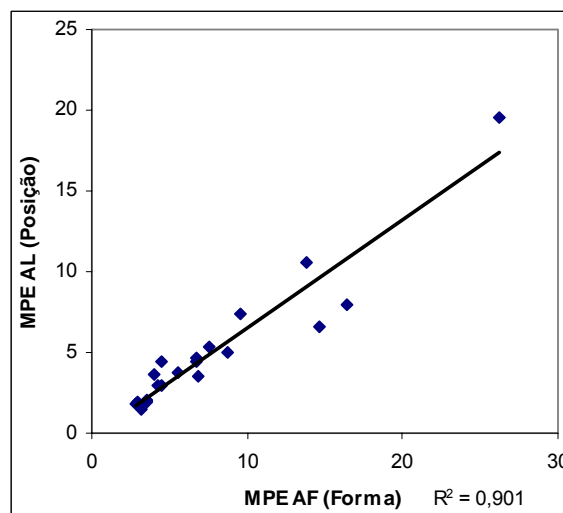


Figura 75 – Análise de correlação entre os parâmetros MPE AL e MPE AF.

Diante dos resultados obtidos, a utilização de gráficos de controle estatístico de processo para avaliar a estabilidade do desempenho de uma MMC foi considerada satisfatória. Conforme apresentado na seção 3.3, a vantagem do CEP é

garantir que o estado da MMC está sob controle. Isto pôde ser observado em função da boa condição ambiental do laboratório onde a MMC está instalada. No entanto, estabilidade não significa necessariamente que o processo atenda às especificações, mas facilita identificar tendências, principalmente quando a variação natural é baixa. Isso fica claro na figura 65, onde o erro de ortogonalidade é facilmente observado porque a variação natural ($6 \mu\text{m}$) é consideravelmente menor que a tendência ($23,5 \mu\text{m}$). Desta forma, ensaios de verificação rápida realizados em ambientes com elevada presença de ruídos (vibrações, temperatura) resultarão em gráficos pouco sensíveis às componentes sistemáticas.

A ausência dos limites de especificação nos gráficos de controle não é considerado um empecilho. O objetivo do *Quadra Mensura* não é identificar se a MMC apresenta resultados dentro dos limites de especificação, e sim, alertar sobre alterações nos erros paramétricos e nas condições ambientais. A evidência gerada mostra que esse objetivo está plenamente atingido.

5 CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES FUTURAS

Motivado pelo fato de que muitas empresas brasileiras ainda não realizam ensaios de verificação rápida em suas MMC, foi apresentada neste trabalho, uma proposta de solução, que consiste no desenvolvimento de um artefato e de um *software* de avaliação metrológica. No entanto, antes de se propor uma solução, foi desenvolvida uma base de conhecimento com a finalidade de adquirir domínio a respeito do tema. Além de captar informações sobre os métodos de avaliação e sobre o estado da arte em artefatos, também foi considerada importante a dedução do modelo cinemático de uma MMC visando facilitar a compreensão de como os erros sistemáticos influenciam os resultados das medições. A seguir são apresentadas as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento do projeto, além de recomendações para oportunidades futuras.

5.1 CONCLUSÕES

Analisando as soluções existentes no mercado concluiu-se que seria interessante projetar um novo artefato. Um protótipo de artefato bidimensional foi projetado e construído a fim de reduzir as principais dificuldades encontradas na aplicação dos artefatos atuais, encorajar a aplicação diária e ainda ser economicamente viável.

Os resultados obtidos até o momento são considerados satisfatórios. Os custos da fabricação do protótipo permitem estimar um preço de mercado para o artefato inferior aos encontrados para as atuais soluções, cumprindo assim a meta de R\$ 10.000,00 preestabelecida no capítulo 3. Com relação à aplicabilidade, a utilização de gráficos de controle foi considerada eficiente para avaliação da

estabilidade do desempenho de uma MMC. O procedimento de verificação proposto tanto para o artefato, quanto para o sistema de apalpação, também foi julgado adequado para o propósito do projeto. Além disso, o tempo de ensaio está dentro do limite estimado, ou seja, inferior a 30 min, e o artefato pode ser facilmente manuseado e transportado. A solução para os apoios, por ser simples, leve e fácil de manipular, dá uma resposta eficiente a um dos principais problemas para artefatos do tipo placa. Com relação à geometria, a rigidez estrutural não evidenciou problemas. Não foi possível identificar inconsistências entre as medições com o artefato posicionado na vertical e na horizontal.

Por se tratar de uma peça de alumínio, o artefato possui elevada sensibilidade à variação de temperatura. A idéia inicial era utilizar o sensor de temperatura da própria MMC para medir a temperatura das peças que devem ser inspecionadas. Porém, como a MMC empregada na aplicação inicial não tinha este recurso, foram utilizados 4 sensores, um em cada vértice do artefato, aproveitando para avaliar a presença de gradientes térmicos. Embora não se possa ser conclusivo ainda, a hipótese de se utilizar apenas um sensor parece ser inviável, pois uma das causas especiais encontrada no gráfico de controle da ortogonalidade do plano YZ foi a presença de gradiente térmico na peça. O controle de temperatura também foi um dos parâmetros mais críticos durante a calibração do artefato, principalmente porque seu coeficiente de expansão térmica é diferente do coeficiente de expansão térmica do padrão utilizado.

O artefato precisa ainda passar por uma avaliação de estabilidade para ser completamente validado. Até o momento apenas uma calibração foi realizada, mas como a MMC avaliada durante a aplicação inicial teve um comportamento estável, as expectativas, em relação à estabilidade da peça, são positivas. Além disso, por se considerar a geometria do artefato como sendo uma solução inovadora para o conceito de placas padrão, resolveu-se fazer um registro de patente para proteger a idéia antes de expô-la em publicações.

O *software* desenvolvido também atendeu às expectativas e está pronto para aplicação em ambiente industrial. O resultado é apresentado de forma clara e é fácil de ser operado, no entanto, ainda necessita melhorias. A alimentação dos dados leva tempo superior ao que se deseja para uma aplicação deste tipo e há pouca

versatilidade em relação à manipulação dos dados. Ou seja, não é possível mudar o tipo de controle estatístico de processo, por exemplo.

Por fim, pode-se dizer que entre os objetivos deste projeto está também a difusão da cultura metrológica no ambiente industrial brasileiro. Acredita-se que muitos usuários de MMC não conheçam de fato as verdadeiras potencialidades e limitações de seus equipamentos. Espera-se, sobretudo conscientizar o usuário a respeito das vantagens econômicas que podem ser obtidas com uma correta aplicação da metrologia. O intervalo entre calibrações não precisa ser fixo. E a falta de manutenção é uma prática que pode custar muito caro.

5.2 OPORTUNIDADES FUTURAS

Diante dos resultados obtidos e das dificuldades encontradas pode-se recomendar as seguintes oportunidades para trabalhos futuros:

- avaliar a viabilidade técnica e econômica do artefato possuir um sistema próprio para medição de temperatura.
- avaliar a viabilidade técnica e econômica de se desenvolver um padrão de referência para calibração que seja de um material com mesmo coeficiente de expansão térmico do artefato e com elementos de apalpação de mesma geometria.
- deve ser conduzido um estudo de estabilidade do artefato, onde novas calibrações devem ser realizadas em intervalos pré-definidos.
- deve ser realizada uma aplicação piloto, semelhante à aplicação descrita, mas em ambiente industrial. Um programa de intercomparação entre empresas, utilizando o *Quadra Mensura* como padrão, já está sendo desenvolvido.
- implementar melhorias no software de processamento de dos, principalmente em relação à aquisição de dados.
- criar um programa de assessoramento remoto via-internet, para auxiliar às empresas na implementação da solução.

REFERÊNCIAS

- [1] DONATELLI, G.D.; ALBERTAZZI, A.; SCHNEIDER, C.A.; PFEIFFER, G. **Metrologia Geométrica na Indústria - Tendências e Desafios**. Curso Fundação CERTI, Florianópolis, SC, Agosto, 1997.
- [2] L. DE OLIVEIRA, A.; DE SOUSA, A.R. **Validação de processos de medição por coordenadas em operações de controle da qualidade**. Anais do Metrologia 2003, Recife, Brasil, 2003.
- [3] SILVA, J. B. A.; BURDEKIN, M. **A modular space frame for assessing the performance of co-ordinate measuring machines (CMMs)**. Precision Engineering 26, pp. 37-48, 1995.
- [4] KIMOTHI, S. K., **The Uncertainty of Measurements**. ASQ Quality Press, Milwaukee, 2002.
- [5] EVERHART, J. L., **Developing a process measurement assurance program (PMAP™)**. CAL LAB The International Journal of Metrology, 1997.
- [6] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10360-2: Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification test for coordinate measuring machines (CMM) - Part 2: CMMs used for measuring size**, 2001.
- [7] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI/VDE 2617 Part 5.1: Accuracy of coordinate measuring machines - Parameters and their reverification – Interim check with ball plates**, 2000.
- [8] WECKENMANN, A.; LORZ, J. **Monitoring coordinate measuring machines by calibrated parts**. Journal of Physics: Conference Series, Volume: 13, 190-193, 2005.
- [9] ABACKERLI, A. Perfil do Uso das Máquinas de Medir por Coordenadas no Brasil. **Máquinas & Metais**, Novembro 2000, 112-127.

- [10] BOSCH, J.A. **Coordinate Measuring Machines and Systems**. Marcel Dekker, Inc., 1995.
- [11] CAUCHICK-MIGUEL, P., KING, K., DAVIS, J.:**CMM verification: a survey**. Measurement, vol. 17, /1/pp1-16, 1996.
- [12] WILHELM, R.G.; HOCKEN, R.; SCHWENKE, H. **Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement**, Annals of the CIRP, p.553, Keynote Papers Volume 2, 2001.
- [13] WEEKERS, W. G., SCHELLEKERS. P. H. J., **Assessment of Dynamic Errors of CMMs for Fast Probing**. Annals of the CIRP vol. 44 - 1(1995) pp 469 - 474.
- [14] SCHELLEKERS. P. H. J., ROSIELLE, N., **Design for precision: Current Status and Trends**. Annals of the CIRP, p. 557, Keynote Papers Vol. 47/2, 1998.
- [15] BARAKAT, M. A., ELBESTAWI, M. A., SPENCE, A. D., **Kinematic and Geometric Error Compensation of a Coordinate Measuring Machine**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. p. 833, Vol. 40, 2000.
- [16] WEEKERS, W. G. **Compensation for Dynamic Errors of Coordinate Measuring Machines**, Eindhoven - Holanda, 1996. Tese de Doutorado, Technische Universiteit Eindhoven.
- [17] ABACKERLI, A.,**Sistema de Rastreamento Interferométrico para Calibração Volumétrica de Robôs Industriais**. Tese de Doutorado, USP - Escola de Engenharia de São Carlos, 315p, São Carlos - SP,1992.
- [18] ROLIM, T.,**Sistemática Indicadora de Método para Calibração de MMC**. Tese de Doutorado, UFPB, 141p, João Pessoa - PB, 2003.
- [19] VICENTE, M., **Estimação dos Erros de uma Máquina Estacionária de Medição de Coordenadas, Departamento de Matemática**. - Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra,1997.

- [20] ABACKERLI, A., ORREGO, R., G., **Uma Macrovisão sobre a Modelagem Cinemática de Máquinas de Medir por Coordenadas.** Revista de Ciência & Tecnologia, vol. 8, nº18 pp. 31-43, 2001.
- [21] TEEUWSEN, J. W. M., SOONS, P. H. J., SCHELLEKERS. P. H. J., **A General Method for Error Description of CMMs Using Polynomial Fitting Procedures.** Annals of the CIRP, p. 505, Vol. 38/1, 1989.
- [22] HOCKEN, R., *et al.* **Three Dimensional Metrology.** Annals of the CIRP, p. 403, Keynote Papers Vol. 26/2, 1977.
- [23] BALAKRISHNAN, S., GADSBY, C., **An Affordable Coordinate Measuring Machine,** Society of Manufacturing Engineers, IQ86-749, 1986.
- [24] ZHANG, G., *et al.* **A Displacement Method for Machine Geometry Calibration.** Annals of the CIRP, p. 515, Vol. 37/1, 1988.
- [25] DENAVIT, J., HARTENBERG, R., **A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices,** ASME J. on Applied Mechanics, pp. 215-221, 1955.
- [26] NAWARA, L., KOWALSKI, M., **Analysis of the Random Component of Multicoordinate Measuring Machine and Metrological Robots Position Error .** Annals of the CIRP, p. 357, Vol. 36/1, 1987.
- [27] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI/VDE 2617 Blatt 3:** Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristic parameters and their checking – Components of Measurement Deviation, 1989.
- [28] ZHANG, G.X., ZANG, Y.F. **A method for machine geometry calibration using 1-D ball array.** Annals of the CIRP vol. 40 - 1(1991) pp 519 - 522.
- [29] KUNZMANN, H.; TRAPET, E.; WÄLDELE, F. **A Uniform Concept for Calibration, Acceptance Test, and Periodic Inspection of Coordinate Measuring Machines using Reference Objects.** In: Ann. CIRP 39 (1990), Nr. 1, S. 561-564.

- [30] SARTORI, S.; ZHANG, G. **Geometric error measurement and compensation of machines**, Annals of CIRP, p. 599, Keynote Papers Vol. 44/2, 1995.
- [31] EA-4/10 (EAL-G17), **Coordinate Measuring Machine Calibration**, Publication Reference EAL – European Accreditation of Laboratories, (EA – European Cooperation for Accreditation), 1995.
- [32] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **VIM: Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**. Brasília, 2000.
- [33] MITUTOYO. **Performance of CMM: Testing, Calibration, and Uncertainty**. Disponível em: <<http://www.mitutoyo.com/NewsEvents/trends03.pdf>> Acesso em: 4/4/2005.
- [34] WECKENMANN, A.; ESTLER, T.; PEGGS, G.; MCMURTRY, D. **Probing systems in dimensional metrology**. Annals of CIRP, p.197, Keynote Papers Volume 2, 2004.
- [35] VLIET, W. **Development of Fast Mechanical Probe for Coordinate Measuring Machines**, Eindhoven - Holanda, 1996. Tese de Doutorado, Technische Universiteit Eindhoven.
- [36] ESTLER, W., *et. al.* **Error Compensation for CMM Touch Trigger Probes**, Precision Engineering, 1996.
- [37] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10360-5: Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification test for coordinate measuring machines (CMM) - Part 5: CMMs using multiple-stylus probing systems**, 2000.
- [38] BRITISH STANDARD. **BS 6808 - Coordinate Measuring Machines – Part 3: Code of Practice**, British Standard Institute. London, UK, 1989.
- [39] PEGGS, G. N., **Creating a standards infrastructure for coordinate measurement technology in the U.K.** Annals of the CIRP vol. 38 (1989) 521 523.

- [40] FLACK, D. **CMM Verification**. National Physical Laboratory, NPL, UK, 2001.
- [41] YOSHIKI, K., YUKITOSHI, I., YOSHIO, N., **The Measurement of Motions Errors of NC Machine Tools and Diagnosis of their Origins by Using Telescoping Machine Ball Bar Method**. Annals of the CIRP, pp. 377-380, Vol. 36/1, 1987.
- [42] JOSTLEIN, HANS. **Automatic ball bar for coordinate measuring machine**. U.S. Patent Document 54647136, 1997.
- [43] TRAPET, E., *et. al.* **Development of Methods and Guidelines to Establish Traceability for Measurements with Coordinate Measuring Machines**, European Commission, 1999.
- [44] MCMURTRY, D. **Coordinate Positioning Apparatus**. , United States Patent 4777818, 1998.
- [45] RENISHAW. **Machine Checking Gauge: Installation Guide**, Renishaw plc., 2005. Disponível em : <<http://www.renishaw.com/UserFiles/acrobat/UKEnglish/H-1000-5080.pdf>> Acesso em: 20 mar 2006.
- [46] KUNZMANN, H., TRAPET, E., WÄLDELE, F., **Results of the International Comparison of Ball Plate Measurement in CIRP and WECC**. Annals of the CIRP vol. 44 - 1(1995) pp 479 - 482.
- [47] WATTS, W. A.: **Artifact and method for verifying accuracy of a positioning apparatus**. United States Patent 5313410.
- [48] KNAPP, W., **Accuracy of Length Measurement and Positioning: Statical Measurement and Contouring Mode**. Annals of the CIRP vol. 37 - 1(1988) pp 511 - 514.
- [49] TRAPET E, FRANKE M, HAERTIG F, SCHWENKE H, WAELDELE F, COX M, *et. Al.* **Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine: Final Project Report MAT1-CT94-0076**. PTB-Report F-35, Parts 1 and 2; 1999.
- [50] TRAPET, E.: **Ball Cube**. United States Patent 6023850, 2000.

- [51] BLONDEAU, J.: **Test specimen**. United States Patent 6505495, 2003.
- [52] KREIS, R., FRANKE, M., SCHWENKE, H., WÄLDELE, F., **Traceable Remote Monitoring of Measuring Instruments in dimensional Metrology**. Disponível em: < <http://efendi.ptb.de/pubs/npl.pdf>> Acesso em: 17 out 2004.
- [53] METRONOM, **tetronom® - a new 3D testing device for measuring instruments and machine tools**. Metronom AG. Disponível em: <www.metronom.de/en/download/tetronom_Bericht.pdf> Acesso em: 25 jun 2006.
- [54] FRANKE, M., TRAPET, E., **The ball cube method for CMM interim check**. Workshop on Traceability of Coordinate Measuring Machines, PTB Braunschweig, 1997.
- [55] SUH, NAM P., **The Principles of Design**. Oxford University Press, New York, NY, 1990.
- [56] ASHBY, M. F., **Materials Selection in Mechanical Design**. Disponível em: <<http://www.uofaweb.ualberta.ca/cme//pdfs/443ashbylectures2006.pdf>> Acesso em: 20 maio 2006.
- [57] PTB, **Department 5.3: Coordinate Metrology**. Disponível em: <<http://www.ptb.de/en/org/5/53/equip.htm#top>> Acesso em: 01 ago 2004.
- [58] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, **Material Properties Handbook**. MCGRAW-HILL, 1954.
- [59] MATWEB, **Material Properties Data**. Disponível em: <<http://www.matweb.com>> Acesso em: 01 jun 2005.
- [60] MOORE, W.R. **Foundations of Mechanical Accuracy**, Moore Special Tool Company, 1970.
- [61] AMERICAN SOCIETY FOR METALS; **Metals Handbook**. ASM International, 1978.

- [62] BALDO, C. R., **A Interação entre o Controle de Processos e a Metrologia em Indústrias de Manufatura**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- [63] STARRETT. **Granite Surface Plates and Accessories**. Disponível em: <<http://catalog.starrett.com/catalog/images/objects/4200/4172.pdf>> Acesso em: 01 jul 2006.
- [64] FUNDAÇÃO CERTI. **Procedimento para calibração de placas de furos ou de esferas**. PC-102, revisão 006.
- [65] NORONHA, J. L., **Qualificação de Máquinas de Medir por Coordenadas com Padrões corporificados**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.
- [66] KLEN, E. R., **Calibração de Máquinas de Medir por Coordenadas Utilizando Placas de Esferas – Uma Técnica Econômica, Rápida e Metrologicamente Eficiente**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.
- [67] EA-4/02, **Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration**, Publication Reference EAL – European Accreditation of Laboratories, (EA – European Cooperation for Accreditation), 1999.
- [68] FUNDAÇÃO CERTI. **Certificado de Calibração – RC 2987**, n. 4147/05, Fundação CERTI, Laboratório de Temperatura e Umidade, Florianópolis – SC, 2005.
- [69] BRALLA, J. G. **Design for Manufacturability Handbook**. McGraw-Hill Professional, 1998.
- [70] INMETRO. **Certificado de Calibração – RC 13944**, n. 1718/2003, INMETRO - Lamin, Laboratório de Metrologia Dimensional, 2003.

- [71] INMETRO. **Certificado de Calibração – RL 0874**, n. 1399/2003, INMETRO - Lamin, Laboratório de Metrologia Dimensional, 2003.
- [72] FUNDAÇÃO CERTI. **Certificado de Calibração – RL 0382**, n. 5979/05, Fundação CERTI, Laboratório de Metrologia Dimensional, Florianópolis – SC, 2005.
- [73] FUNDAÇÃO CERTI. **Certificado de Calibração – RL 2108**, n. 0697/03, Fundação CERTI, Laboratório de Metrologia Dimensional, Florianópolis – SC, 2003.

APÊNDICE: RELATÓRIO DE ESTABILIDADE

Relatório: CERTI #1

Data: 4/8/2006

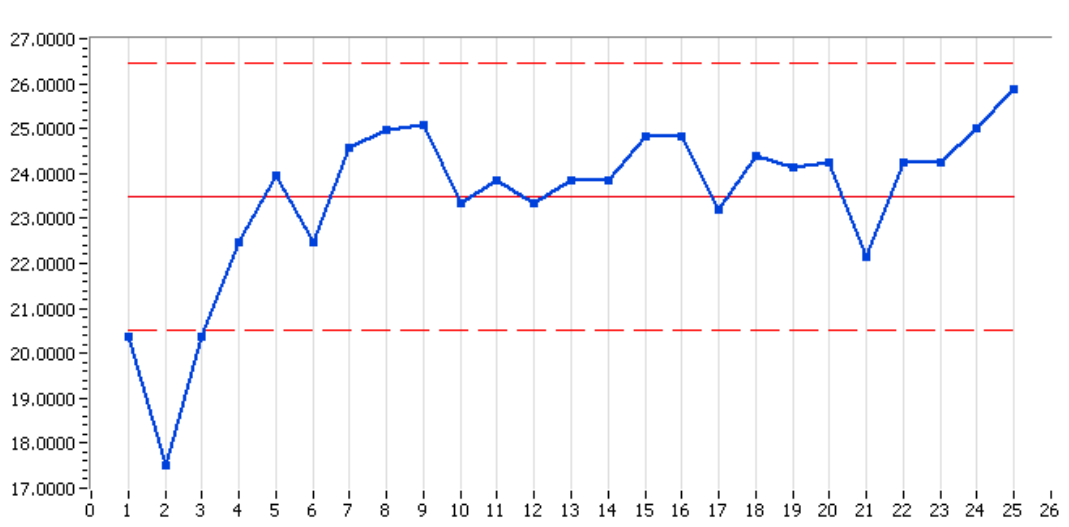
Fabricante: Mitutoyo

Parametro avaliado: ywz [um/m]

Modelo: Beyond A916

Tipo de MMC: Portal

Numero de série: 13289203



UCL: 26.4481

CL: 23.4844

LCL: 20.5207

No.	Data	Hora	ywz	T [°C]	Oper.	Observação
1	4/6/2006	08:55	20,38	20,24	vcn	c/ correção temperatura RC2448 - Gabarito - papel
2	4/6/2006	23:42	17,51	20,29	vcn	c/ correção temperatura RC2448 - Gabarito - papel
3	5/4/2006	20:30	20,38	20,14	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
4	5/4/2006	20:40	22,47	20,12	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
5	5/8/2006	20:00	23,96	20,05	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
6	5/8/2006	20:40	22,46	20,16	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - massinha
7	5/9/2006	12:16	24,58	20,11	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - apoio sobre 4 borrachinhas
8	5/10/2006	18:00	24,96	20,18	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
9	5/10/2006	18:15	25,08	20,2	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
10	5/11/2006	20:00	23,33	20,08	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
11	5/11/2006	20:20	23,83	20,07	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
12	15/5/2006	20:00	23,33	20,17	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
13	15/5/2006	20:20	23,83	20,12	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
14	19/5/2006	20:00	23,83	20,09	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
15	19/5/2006	20:32	24,83	20,12	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
16	22/5/2006	20:10	24,83	20,03	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - apoio sobre 4 borrachinhas
17	22/5/2006	20:35	23,21	20,03	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - apoio sobre 4 borrachinhas
18	26/5/2006	18:40	24,38	20,1	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
19	26/5/2006	19:00	24,13	20,1	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
20	29/5/2006	22:00	24,26	20,06	vcn	c/ corr. de temp. RC2448 - tapete de borracha
21	31/5/2006	21:30	22,13	20,12	vcn	RC2448 - tapete de borracha - novo apalpador
22	31/5/2006	21:45	24,26	20,16	vcn	RC2448 - tapete de borracha - novo apalpador
23	6/1/2006	18:45	24,26	20,09	vcn	RC2448 - tapete de borracha - novo apalpador
24	6/1/2006	19:10	25,01	20,1	vcn	RC2448 - tapete de borracha - novo apalpador
25	6/1/2006	19:30	25,88	20,11	vcn	RC2448 - tapete de borracha - novo apalpador