

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

**APLICAÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS NA
CALIBRAÇÃO DE MEDIDAS MATERIALIZADAS**

Tese submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Para obtenção do grau de

DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ LEONARDO NORONHA

Florianópolis, 07 de março de 2003

Biografia do autor

José Leonardo Noronha nascido em Itajubá - Minas Gerais, em 1961, filho de Sebastião Martins de Noronha e de Terezinha Ribeiro Noronha. É o oitavo filho de uma família de doze irmãos, nove homens e três mulheres. Morou no Bairro Campinho, Brazópolis - MG até 1985. Realizou seus primeiros estudos nas Escolas Estaduais Liberalina Rezende Ribeiro e Sebastião Pereira Machado em Piranguinho - MG. Tendo completado o segundo grau em 1978 no Colégio Itajubá. Em 1983 formou-se em Engenharia Mecânica na Escola Federal de Engenharia de Itajubá, atualmente Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. Em 1984 atuou como Engenheiro Mecânico na empresa TECMED - Equipamentos Médico - Hospitalares de São José dos Campos -SP. Em 1985 fez o curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica na UNIFEI, na área de Máquina de Fluxo. Em 1985 casou-se com Silvia Mara Mota Noronha em Piranguinho. Em 1986 iniciou suas atividades como professor no Departamento de Produção do Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, nas áreas de Metrologia, Tecnologia Mecânica, Projeto de Produtos e Tempos e Métodos. Nasce em 1988 seu primeiro filho, Vinícius José Mota Noronha e em 1993 nasce sua filha Mariana Mota Noronha. Em 1994 obteve o título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Metrologia e Instrumentação, na Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, em Florianópolis, com sua dissertação sobre a *Calibração de Máquinas de Medir por Coordenadas com padrões corporificados*. Membro fundador da Sociedade Brasileira de Metrologia - SBM em 1995. A partir de 1997 iniciou seu Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, na UFSC, onde participou de diversos cursos e congressos na área de Metrologia. Desde de 2002 participa da Diretoria do Conselho Municipal dos Direitos da Criança e do Adolescente de Piranguinho.

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

**APLICAÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS NA
CALIBRAÇÃO DE MEDIDAS MATERIALIZADAS**

JOSÉ LEONARDO NORONHA

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de
DOUTOR EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing. - Orientador

Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing. - Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Olívio Novaski, Dr. Eng. - Relator
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Paulo Augusto Cauchick Miguel, Ph.D.
Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng.
Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina - CEFET/SC

Precisa-se de pessoas

Pessoas que tenham os pés na terra e a cabeça nas estrelas.

Capazes de sonhar, sem medo de seus sonhos.

Tão idealistas que transformem seus sonhos em metas.

Pessoas tão práticas que sejam capazes de tornar suas metas em realidade.

Pessoas determinadas que nunca abram mão de construir seus destinos e planejar suas vidas.

Que não temam mudanças e saibam tirar proveito delas.

Precisa-se de pessoas que questionem, não pela simples contestação, mas pela necessidade íntima de só aplicar as melhores idéias.

Pessoas que mostrem sua face serena de parceiros legais, sem se mostrar superiores nem inferiores, mas... iguais.

Pessoas com coragem para abrir caminhos, enfrentar desafios, criar soluções, correr riscos, sem medo de errar.

Precisa-se de pessoas que construam suas equipes e se integrem nelas.

Pessoas que não tomem para si o poder, mas saibam compartilhá-lo.

Pessoas que não se empolguem com seu próprio brilho, mas com o brilho do resultado alcançado em conjunto.

Precisa-se de pessoas que enxerguem as árvores, mas também prestem atenção na magia da floresta, que tenham a percepção do todo e da parte.

Seres humanos justos, que inspirem confiança e demonstrem confiança nos parceiros, estimulando-os, energizando-os, sem receio que lhe façam sombra e sim orgulhando-se deles.

Precisa-se de pessoas que criem em torno de si um ambiente de entusiasmo, de liberdade, de responsabilidade, de determinação, de respeito e de amizade.

Precisa-se de seres racionais, tão racionais que compreendam que sua realização pessoal está atrelada à vazão de suas emoções.

É na emoção que encontramos a razão de viver.

Estamos precisando de gente assim para reforçar o nosso time e um melhor Projeto de Vida.

Autoria desconhecida
Construindo Fraternidade
Novembro de 2001

À minha mulher, Silvia
Aos meus filhos, Vinícius e Mariana
Aos meus pais.

Agradecimentos

À Deus pelo dom da vida e a força necessária para realização desse trabalho.

À Silvia, Vinícius e Mariana, minha família, pelo amor, apoio, companhia e a paciência durante toda fase do trabalho.

Aos meus pais, Sebastião e Terezinha, que sempre foram meus orientadores e exemplos para a vida.

Aos professores da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, que com dedicação compartilharam seus conhecimentos. Em especial nesse trabalho ao professor Carlos Alberto Schneider, pela orientação.

Aos amigos, colegas e funcionários da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, do LABMETRO da UFSC e da Fundação CERTI, que contribuíram direta ou indiretamente, na execução desse trabalho e pelo companheirismo demonstrado ao longo destes anos. Em especial, agradeço a Luiz Fernando Barca, Marco Aurélio de Souza, André Roberto de Souza, Ricardo Sutério, Ademir Linhares de Oliveira, Maurício Porath, Bruno Ribeiro Vicente, Marcelo Niehues Schlickmann, Olga Maria da Rosa, Rosana Magali Vieira e Aucinei Brandão.

À UNIFEI, pela dispensa para capacitação e apoio durante o curso.

Ao LABMETRO - UFSC e a Fundação CERTI, pela infra-estrutura e recursos disponibilizados.

À CAPES pela bolsa de estudos.

Sumário

Biografia do autor	i
Agradecimentos	v
Sumário	vi
Resumo	x
Abstract	xi

Capítulo 1

Contextualização do Trabalho	1
1.1 Medidas Materializadas.....	2
1.2 Demanda na Calibração de Medidas Materializadas.....	3
1.3 Problemas na Calibração de Medidas Materializadas.....	4
1.4 Proposta de Solução	5

Capítulo 2

Calibração de Medidas Materializadas com Métodos Convencionais	7
2.1 Exigências para o Padrão na Calibração	7
2.1.1 Fração da tolerância ou do erro admissível que pode ser consumida pela incerteza na calibração de medidas materializadas.....	8
2.1.2 Estimativa da incerteza na calibração de sistemas de medição.....	8
2.2 Calibração de Blocos Padrão.....	9
2.2.1 Métodos de calibração.....	10
2.2.2 Comparação entre os métodos de calibração	13
2.2.3 Limitações dos métodos de calibração	14
2.3 Calibração de Padrão Escalonado.....	14

2.3.1	Métodos de calibração.....	15
2.3.2	Limitações dos métodos	15
2.4	Calibração de Calibradores.....	17
2.4.1	Métodos de calibração.....	18
2.4.2	Limitações dos Métodos	18
2.5	Calibração de Esquadros.....	19
2.5.1	Métodos de calibração de esquadros de aço.....	20
2.5.2	Métodos de calibração de esquadros cilíndricos.....	20
2.5.3	Limitações nos métodos de calibração.....	22
2.6	Calibração de Réguas.....	22
2.6.1	Método de calibração usando régua padrão.....	23
2.6.2	Limitações do método	23
2.7	Considerações.....	24

Capítulo 3

A Máquina de Medir por Coordenadas como Padrão de Calibração **26**

3.1	Desempenho Metrológico da CMM.....	26
3.2	Método CMM Virtual.....	28
3.2.1	Fontes de incertezas do processo de apalpação.....	31
3.2.2	Fontes de incerteza dos erros geométricos.....	31
3.2.3	Método CMM Virtual do Physikalish - Technische Bundesanstalt..	32
3.2.4	Vantagens do Método da CMM Virtual.....	35
3.3	Considerações.....	35

Capítulo 4

Estratégias de Viabilização da Calibração de Medidas Materializadas em CMM **36**

4.1	Causas de erros na Calibração de Medidas Materializadas.....	36
4.2	Avaliação da incerteza de medição na calibração de medidas materializadas utilizando o Método CMM Virtual.....	37
4.2.1	Estimativa das componentes de erros da CMM.....	37
4.2.2	Simulação dos erros para tarefas de medição.....	39
4.3	Método do Rebatimento.....	46
4.3.1	Medição de retlineidade pelo método do rebatimento.....	46
4.3.2	Medição de perpendicularidade pelo método do rebatimento.....	47
4.4	Método de Calibração por Comparação.....	48
4.5	Avaliação da Incerteza de Medição na Calibração.....	51

4.5.1 Componentes de Incerteza – Calibração de Medidas Materializadas 51

Capítulo 5**Estudo de Casos e Desempenho Efetivo da Calibração de Medidas Materializadas em CMM 57**

5.1	Simulações de medições de distâncias e diâmetros para calibração de medidas materializadas utilizando CMM Virtual.....	57
5.1.1	Simulações de medições distâncias de 100 mm.....	59
5.1.2	Simulações de medições distâncias de 400 mm.....	60
5.1.3	Simulações de medições diâmetros de 100 mm.....	61
5.1.4	Simulações de medições de diâmetros de 400 mm.....	63
5.2	Calibração de Blocos Padrão em CMM.....	64
5.2.1	Estratégia de calibração.....	64
5.2.2	Comparação da Calibração de Blocos Padrão utilizando Software de Simulação, CMM e Máquina de Abbé.....	69
5.3	Calibração de Padrões Escalonados na CMM.....	73
5.3.1	Procedimento / Estratégia de Calibração.....	74
5.3.2	Avaliação da Incerteza de Medição.....	75
5.3.3	Aplicação - Calibração de Padrão Escalonado com Tambor Micrométrico na CMM.....	76
5.3.4	Avaliação dos Resultados.....	81
5.4	Calibração de Calibradores.....	81
5.4.1	Estratégia de calibração de calibradores anéis lisos cilíndricos na CMM.....	82
5.4.2	Resultados da calibração.....	84
5.4.3	Calibração na Máquina de Abbé.....	84
5.4.4	Resultados da Calibração.....	86
5.4.5	Avaliação dos resultados para Calibração.....	86
5.5	Calibração de Esquadros.....	89
5.5.1	Estratégia de Calibração.....	89
5.5.2	Incerteza de medição.....	90
5.5.3	Avaliação dos Resultados.....	93

Capítulo 6**Considerações Operacionais, Econômicas e Metrológicas 95**

6.1	Análises Operacional e Econômica.....	95
6.2	Avaliação Metrológica.....	98

Capítulo 7**Conclusões** **101****Referências Bibliográficas** **104**

Resumo

As medidas materializadas são importantes na metrologia dimensional, e suas calibrações são usualmente realizadas através de métodos convencionais. Estes métodos, normalmente não são flexíveis, exigindo diferentes sistemas de medição e dispositivos, recursos humanos especializados e levando um grande tempo para preparação e execução da calibração.

As Máquinas de Medir por Coordenadas (*Coordinate Measuring Machines - CMMs*) são sistemas de medição versáteis e amplamente usadas no controle dimensional de peças nas empresas metal-mecânicas. No trabalho foram desenvolvidas estratégias para calibração de medidas materializadas em CMM, baseadas nos métodos da CMM Virtual, da comparação e do rebatimento, e mostra que CMMs podem ser usadas também para calibração de medidas materializadas (blocos padrão, padrões escalonados, calibradores, esquadros, réguas, etc.) com vantagens competitivas em relação aos métodos convencionais.

Estratégias, calibrações de medidas materializadas e avaliações da incerteza de medição em CMM foram conduzidas durante o trabalho, de forma a se avaliar os desempenhos metrológico, operacional e econômico, comparativamente aos métodos convencionais utilizados para essa finalidade, e os resultados indicam que as calibrações com CMM são viáveis. Com redução dos tempos e dos custos para realizar as mesmas calibrações nos métodos convencionais, são obtidos resultados com uma confiabilidade metrológica da mesma ordem, ao se considerar certas dimensões e classes de erros de medidas materializadas.

Abstract

Material measures are important in dimensional metrology. Their calibrations are usually made through conventional methods. These calibration methods are not often flexible because they demand different measuring systems and devices, specialized human resources, and long time of preparation and execution.

Coordinate Measuring Machines (CMMs) are flexible measuring systems, widely used in the dimensional control of parts in manufacturing. In this work, strategies were developed for calibration of material measures in CMM based on Virtual CMM, comparison and reversal methods. Moreover, it shows that CMMs can also be used for calibration of material measures (gauge blocks, step gauges, gauge, square, straight edges, etc.), with competitive advantages if compared to conventional methods.

Related to uncertainty of measurement in CMM, this research deals with some specific points such as strategies, calibration of material measures, and evaluation. The main target here is to evaluate the metrological, operational and economic performance of the strategies in comparison with the conventional methods. The result shows that the calibrations with CMM are feasible with lead-time and costs reduction if compared to conventional methods. These comparisons were made with equivalent metrological reliability when taking in consideration dimensions and material measures errors.

Capítulo 1

Contextualização do Trabalho

A fabricação de produtos sem defeitos e com garantia de qualidade é o resultado final de uma seqüência de etapas, em que a inspeção e as técnicas de medição assumem funções fundamentais.

A metrologia permite integrar a qualidade horizontalmente com várias fases do ciclo de vida do produto: o desenho, os processos de produção e os métodos de inspeção. O emprego inadequado dos sistemas de medição faz chegar produtos defeituosos ao cliente, rejeitar produtos corretos, produzir dados de qualidade errôneos, falsear as avaliações, etc., o que origina custos adicionais [1].

Nesse contexto, o controle de sistemas de medição é um elemento vital do sistema de garantia da qualidade [2-7]. É fundamental calibrar regularmente os sistemas de medição que são usados para a verificação de peças. A calibração e a correção dos erros dos sistemas de medição (instrumentos, máquinas de medir, padrões) abrangem tarefas e ações para assegurar sua exatidão, confiabilidade e aplicação técnica. Somente dentro destas condições, a medição e os resultados de ensaios podem ser confiáveis. Várias empresas especialmente as de fabricação de automóveis, aviões, máquinas ferramentas bem como as indústrias elétricas e eletrônicas exigem por esta razão de seus fornecedores um controle rigoroso dos sistemas de medição [8].

Com o controle metrológico, pode-se garantir a rastreabilidade dos sistemas de medição aos padrões nacionais e internacionais e escolher sistemas de medição com melhor desempenho e menor incerteza de medição para garantir a qualidade dos produtos, diminuindo a possibilidade de uso de sistemas de medição com

incerteza incompatível com a exatidão requerida na medição.

1.1 Medidas Materializadas

Na área da metrologia dimensional, as medidas materializadas (fig.1.1) são dispositivos que podem ser utilizados:

- no controle geométrico de peças.
- na calibração de instrumentos de medição;
- nos ensaios geométricos de máquinas de medir e máquinas ferramentas;
- na calibração ou inspeção de máquinas de medir por coordenadas;

As medidas materializadas muitas vezes fazem parte e são importantes padrões na cadeia de rastreabilidade metrológica, como se pode ver na figura 1.2, que apresenta o caso particular da rastreabilidade de dimensões lineares.

MEDIDAS MATERIALIZADAS	
1	PADRÕES DE COMPRIMENTO Arame para medição de roscas Barra de esferas Blocos padrão retangular Calibrador anel liso cilíndrico Calibrador anel liso cônico Calibrador de boca fixo e ajustável Calibrador tampão liso cilíndrico Calibrador tampão liso cônico Calibradores em Geral Esfera-Padrão Haste-padrão para micrômetro Padrão de altura com bloco padrão e micrômetro Padrão escalonado para calibração de paquímetro e traçadores de altura Padrão escalonado para calibração de micrômetros de profundidade Padrão escalonado para máquinas ferramentas e máquinas de medir Pino-Padrão Placas de esferas/furos
2	PADRÕES ROSCADOS Calibrador anel roscado cilíndrico Calibrador anel roscado cilíndrico API Calibrador anel roscado cônico Calibrador tampão roscado cilíndrico Calibrador tampão roscado cilíndrico API Calibrador tampão roscado cônico
3	PADRÕES DE ÂNGULO Bloco padrão angular Esquadro cilíndrico Esquadros de aço Esquadros de granito
4	OUTRAS MEDIDAS MATERIALIZADAS Desempeno de granito Desempeno de ferro fundido Régua de aço Régua de granito

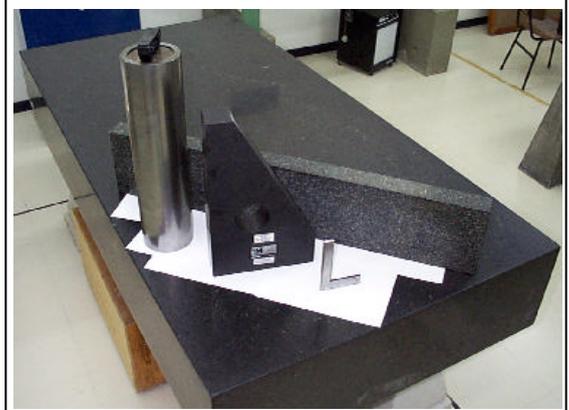


Figura 1.1 – Classificação de medidas materializadas na área dimensional

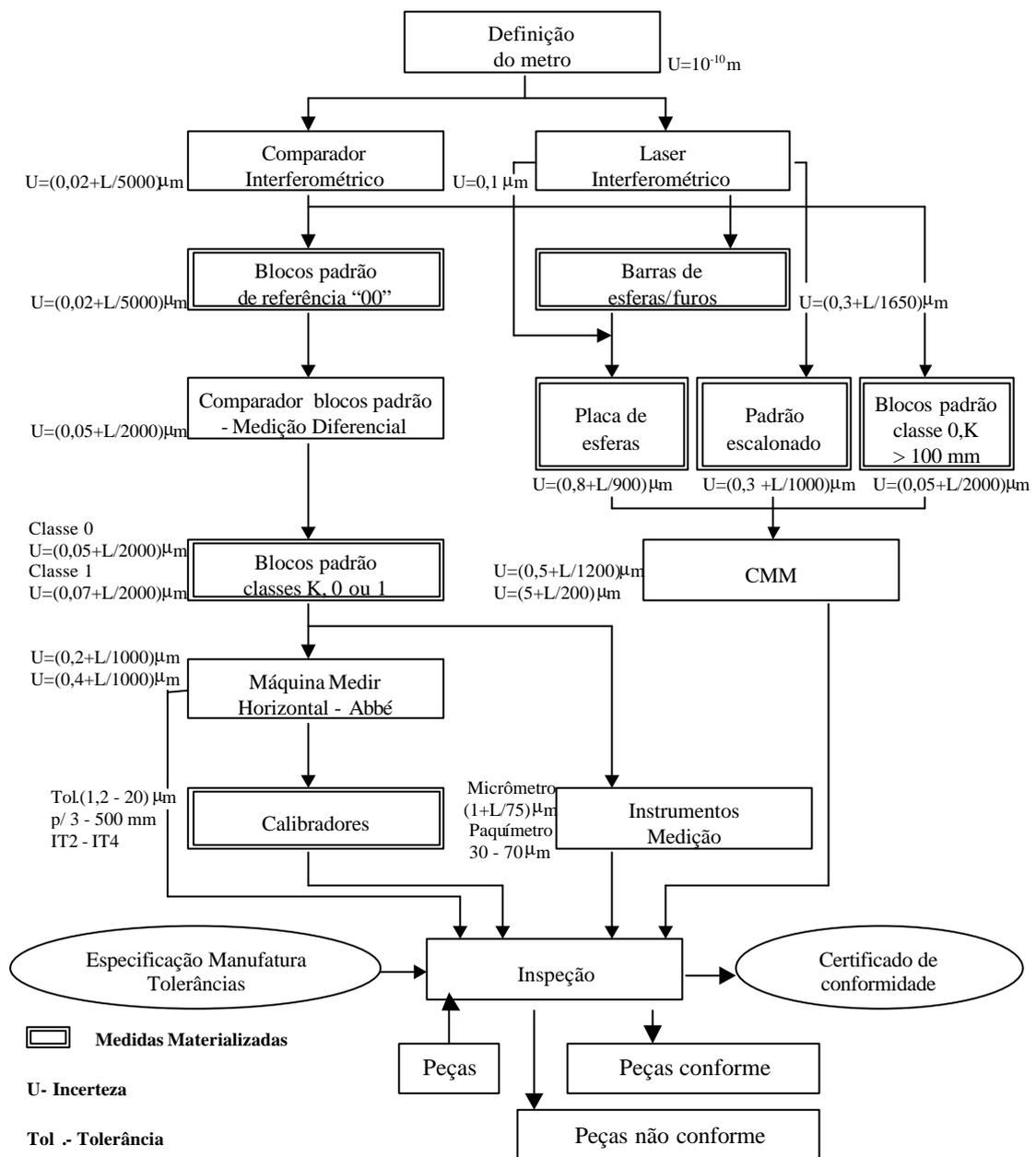


Figura 1.2 – Medidas materializadas na rastreabilidade metrológica (área dimensional)

1.2 Demanda na Calibração de Medidas Materializadas

As médias e grandes empresas metal-mecânicas possuem uma grande quantidade de instrumentos e medidas materializadas na área da metrologia dimensional. Pode-se citar como exemplos, montadoras e autopeças como DaimlerChrysler (Fábrica Untertürkheim) e Bosch (Fábrica Feuerbach) na Alemanha, as quais supervisionam respectivamente cerca de 150.000 e 80.000 instrumentos de medição de chão de fábrica e calibradores [9,10].

Os laboratórios de metrologia de indústrias e de outras instituições têm, portanto, necessidades e realizam muitas calibrações, como por exemplo podem-se citar alguns dados de laboratórios de indústrias na Alemanha e no Brasil:

- O laboratório da Bosch (Fábrica Feuerbach em Stuttgart) realiza a calibração de 96 mil sistemas de medição por ano [10];
- O laboratório da DaimlerChrysler (Fábrica em Stuttgart) realiza a calibração de 54 mil calibradores por ano [9];
- O laboratório da Imbel (Fábrica em Itajubá - MG) realiza a calibração de 54 mil calibradores por ano;
- O laboratório da WEG (Fábrica em Jaraguá do Sul - SC) realiza a calibração de 20 mil sistemas de medição por ano [11];
- O laboratório de Metrologia da Embraco (Fábrica em Joinville - SC) realiza 12 mil calibrações de calibradores e padrões variados por ano [12].

Um levantamento das necessidades metrológicas das indústrias catarinenses [13], chegou-se ao resultado que a demanda mais expressiva está na calibração de medidas materializadas, e de instrumentos de medição de deslocamento e dimensões lineares.

1.3 Problemas na Calibração de Medidas Materializadas

As medidas materializadas são calibradas por diferentes métodos com o objetivo de se conhecer os erros efetivos. Estes métodos de calibração apresentam limitações em relação aos procedimentos, praticidade e custos.

A calibração de medidas materializadas nos métodos convencionais normalmente exige sistemas de medição dedicados e caros, com faixa de medição limitada e tempos de preparação e execução elevados.

Uma das conseqüências dessa situação faz com que a freqüência de calibração de muitas medidas materializadas seja menor do que o necessário, com prejuízos para a confiabilidade das medições e conseqüentemente da qualidade dos produtos dependentes dessas medidas materializadas.

1.4 Proposta de Solução

Em função das limitações dos métodos convencionais, da quantidade de medidas materializadas encontradas nas empresas e da necessidade crescente de se realizar calibrações, no atual trabalho são propostas estratégias de calibração de medidas materializadas utilizando a tecnologia de medição por coordenadas.

Devido às suas potencialidades intrínsecas de alta de flexibilidade, automatização e informatização, a tecnologia de medição por coordenadas é uma candidata natural para atuar em operações de calibração de medidas materializadas. No entanto, essa alta flexibilidade operacional da medição por coordenadas normalmente traz consigo uma incerteza de medição maior do que sistemas dedicados. Essa incerteza de medição faz com que, embora possuindo grandes vantagens operacionais, as máquinas de medir por coordenadas não mostrem confiáveis para a calibração de muitas medidas materializadas.

Existe assim o desafio de fazer o processo de medição por coordenadas ser confiável para tirar proveito da sua flexibilidade e utilizá-la em substituição a sistemas dedicados para a calibração de medidas materializadas. Esse desafio é a motivação principal para a realização deste trabalho, que defende a tese de que:

“É possível calibrar a maior parte das medidas materializadas da área de metrologia dimensional em Máquinas de Medir por Coordenadas com vantagens competitivas e obter resultados tão confiáveis quanto os métodos convencionais”.

Essa quebra de paradigma possibilitará uma série de desdobramentos positivos para a cadeia de rastreabilidade que fundamenta as ações de garantia da qualidade industrial, a saber:

- Menores tempos e custos de calibração;
- Motivação para uma maior frequência nas calibrações de medidas materializadas;
- Maior riqueza de informação das medições, proporcionada pelas enormes potencialidades matemáticas da medição por coordenadas;
- Menores riscos de danos para padrões durante os procedimentos de calibração;
- Novas fronteiras de atuação da medição por coordenadas, possibilitando a sua aplicação em outras operações de medição na área de engenharia de precisão.

Para isso, grandes desafios são colocados pois, para reduzir a incerteza de medição para níveis muito baixos, são necessários o estabelecimento de estratégias de medição e processamento muito criteriosos, de modo a aproveitar todo o potencial de exatidão que a tecnologia permite.

As atividades realizadas para validar essa tese estão descritas ao longo dos capítulos a seguir, estruturados da seguinte forma:

- O capítulo 2 trata da calibração de medidas materializadas com métodos convencionais, procurando-se focar o método, a infra-estrutura necessária, rastreabilidade e as suas limitações;
- No capítulo 3 são apresentadas as principais fontes de erros da CMM, o método da CMM Virtual para estimativa dos erros e das incertezas de medição e mostra que é possível utilizar a CMM como padrão de calibração;
- No capítulo 4 são apresentadas as estratégias para a viabilização da calibração de medidas materializadas em CMM, tendo como base os métodos da CMM Virtual, da comparação e do rebatimento;
- O capítulo 5 traz a verificação experimental realizada no trabalho, com calibrações de medidas materializadas utilizando as estratégias propostas e comparação dos resultados com os métodos convencionais;
- O capítulo 6 faz as considerações finais e conclusões sobre o trabalho.

Capítulo 2

Calibração de Medidas Materializadas com Métodos Convencionais

Neste capítulo são apresentadas as exigências em relação à incerteza de medição e rastreabilidade do padrão que pode ser utilizado para a calibração de medidas materializadas. Alguns métodos convencionais são apresentados, procurando-se enfatizar o método, a infra-estrutura necessária, rastreabilidade e seus pontos críticos.

Inicialmente, procurou-se estudar as medidas materializadas que são encontradas em maiores quantidades e possuem uma maior demanda de calibração: blocos padrão, padrão escalonado, calibradores, esquadros e régua [13]. Não foram considerados inicialmente, os padrões roscados e desempenos em razão de suas características construtivas, metrológicas e das vantagens dos métodos de calibração com sistemas de medição dedicados utilizados atualmente.

2.1 Exigências para o Padrão na Calibração

Para que um sistema de medição ou medida materializada possa ser adotado como padrão, é necessário que seus erros sejam menores que os erros no sistema de medição ou medida materializada a calibrar, como será citado nas regras a seguir. Tecnicamente, quanto menores os erros do padrão, melhor. Economicamente, quanto menores os erros do padrão mais caro este é. Procurando buscar o equilíbrio técnico e econômico e garantir a rastreabilidade existem regras que podem ser utilizadas na calibração de medidas materializadas:

2.1.1 Fração da tolerância ou do erro admissível que pode ser consumida pela incerteza na calibração de medidas materializadas

Adota-se como padrão um sistema de medição ou medida materializada que, nas condições de calibração e para cada ponto de calibração, apresente incerteza não superior a um décimo da tolerância ou erro admissível para a medida materializada a calibrar. Em casos onde é muito difícil de se obter um padrão com incerteza 1/10 vezes menor que a tolerância ou erro admissível da medida materializada, usam-se o limite de 1/5, 1/4, ou até mesmo 1/3 para a razão entre incerteza e tolerância [6,14-16]. Estes últimos devem ser analisados com cuidado para que a incerteza da calibração não venha a ser muito elevada.

2.1.2 Estimativa da incerteza na calibração de sistemas de medição

O guia - ISO/TR 14253-2 [17] estabelece um método simplificado e iterativo, para avaliar a incerteza nas medições no processo produtivo e nas calibrações de sistemas de medição, está baseado nas recomendações do Guia de Expressão da Incerteza de Medição - ISO GUM [18].

Na figura 2.1 tem-se o Procedimento de Gerenciamento de Incerteza (Procedure for Uncertainty Management - PUMA), onde o gerenciamento é realizado baseado na definição da tarefa de medição, dada a incerteza alvo - U_T , através das ações [19]:

- a) escolher o princípio de medição;
- b) definir o método, procedimento e as condições de medição;
- c) avaliar a incerteza padrão dos componentes, completando uma interação;
- d) comparar a incerteza expandida estimada (U_E) com a incerteza alvo (U_T):
 - se U_E é aceitável ($U_E \leq U_T$), então o sistema de medição está conforme;
 - se $U_E \ll U_T$, então o sistema de medição e suas condições de medição são aceitáveis, mas alguns requisitos podem ser modificados para reduzir custos. Uma nova interação irá determinar o $U_{E\text{final}}$;
 - se U_E não é aceitável ($U_E > U_T$), o processo iterativo continua;
- e) avaliar as fontes de incerteza, identificando as que mais contribuem para a incerteza resultante;
- f) se $U_E > U_T$, modificar o sistema de medição ou aprimorar o conhecimento sobre as fontes de incerteza, dando ênfase nas predominantes;
- g) realizar nova interação para avaliação da incerteza;

- h) quando as possibilidades de redução de incerteza começam a se tornar escassas, analisar mudanças no método, no procedimento ou nas condições de medição;
- i) se as mudanças no método, procedimento ou condições não satisfazem a condição de aceitação, mudanças no princípio devem ser consideradas. Iniciar novamente projeto e a avaliação da incerteza;
- j) se as mudanças no princípio não conseguiram reverter à situação, a tarefa de medição ou a incerteza alvo devem ser revisadas. Iniciar o procedimento novamente;
- k) se mudanças na tarefa de medição e na incerteza alvo não são possíveis, não existem condições de se atingir a incerteza alvo.

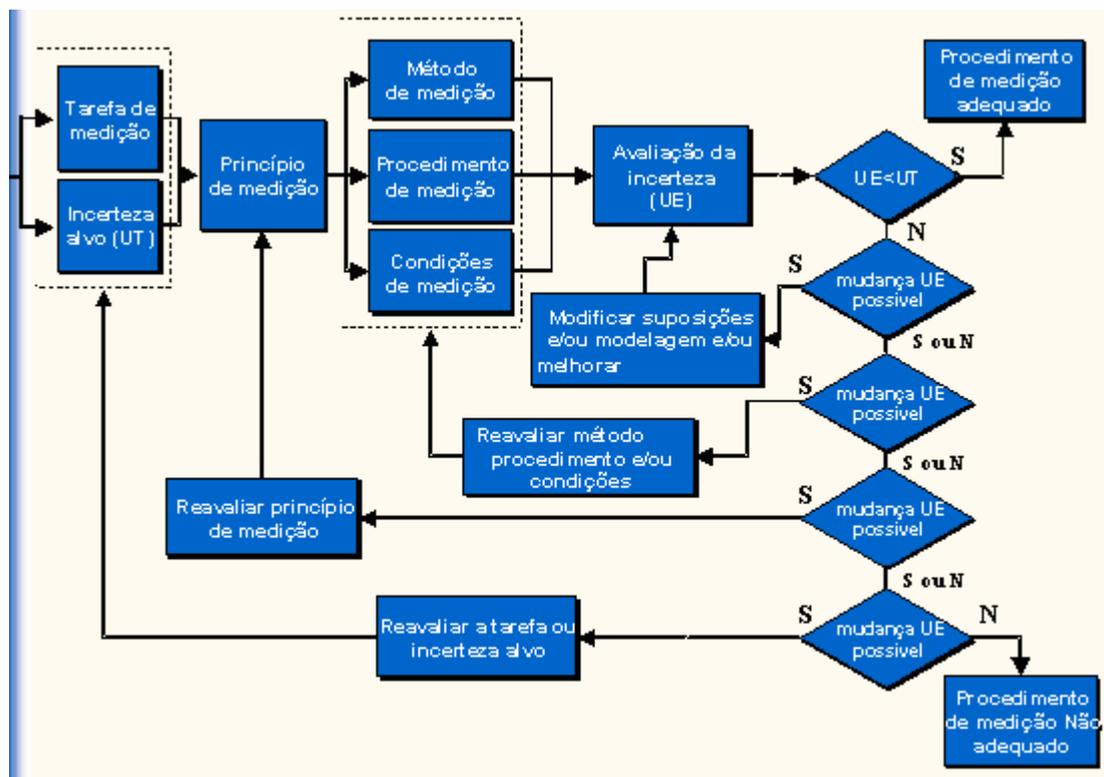


Figura 2.1 – Procedimento de gerenciamento de incerteza [17]

2.2 Calibração de Blocos Padrão

Os parâmetros mais importantes que caracterizam metrologicamente os blocos padrão são o erro do meio e a variação do comprimento (desvio de paralelismo e planeza associados).

Na figura 2.2, tem-se a representação do erro do meio – EM, variação do comprimento – VC, desvio positivo máximo – Dpos, desvio negativo máximo – Dneg, desvio admissível do comprimento – Dadm, assim como os valores admissíveis para blocos até 1000 mm das classes de exatidão 00, K, 0, 1 e 2 e os métodos de calibração usuais para estes blocos.

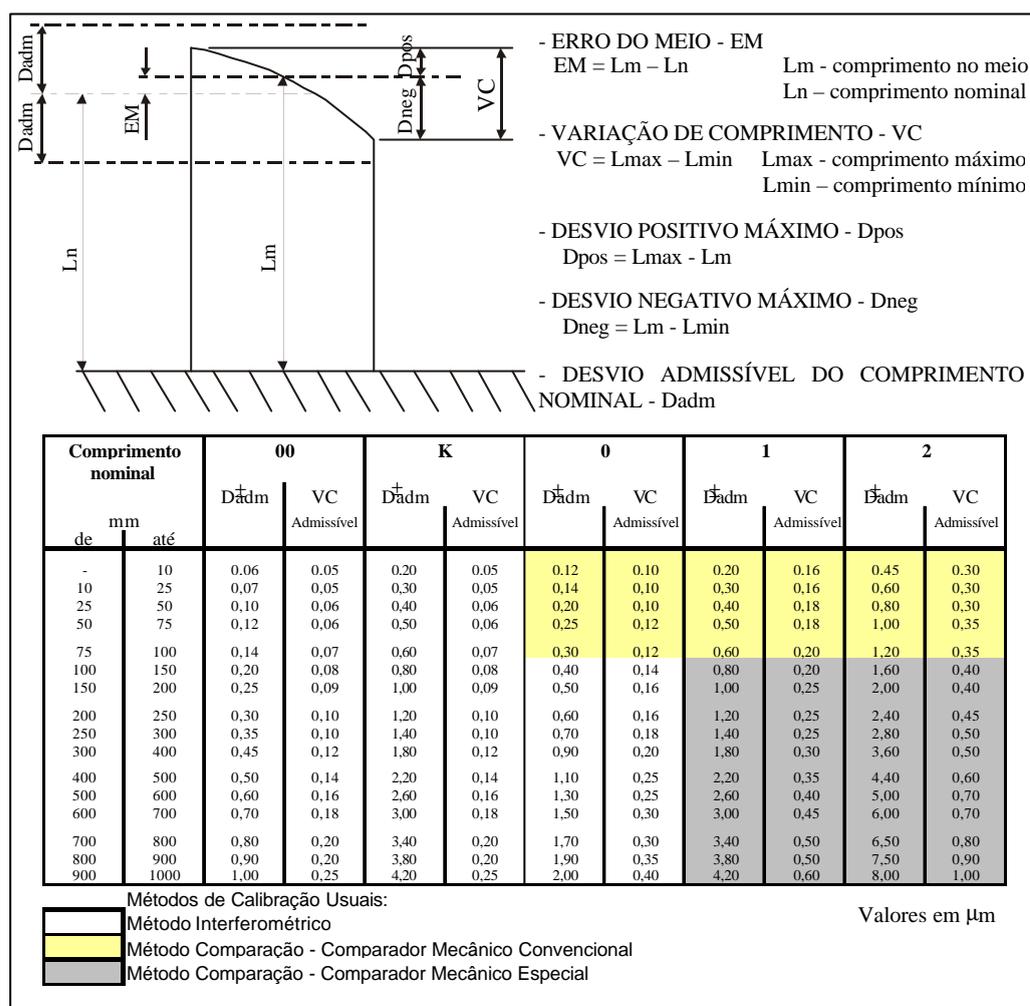


Figura 2.2 – Erro do meio, variação de comprimento, desvios admissíveis e métodos usuais de calibração de blocos padrão [20,21]

2.2.1 Métodos de calibração

Na calibração de blocos padrão são utilizados o método por comparação mecânica (diferencial) e o método interferométrico.

a) Método por comparação mecânica

No método por comparação mecânica, para medir o erro do meio deve-se comparar

um bloco com outro de classe superior, denominado de bloco de referência, utilizando um comparador de blocos padrão (fig.2.3). Para a variação de comprimento, mede-se o comprimento do bloco em cinco posições (fig.2.3 c). A variação de comprimento é a diferença entre o comprimento máximo e mínimo determinado.

Este método é normalmente utilizado para calibração de blocos até 100 mm, das classes de exatidão 0, 1, 2. Para blocos padrão maiores que 100 mm, precisa-se de comparadores mecânicos especiais para calibração.

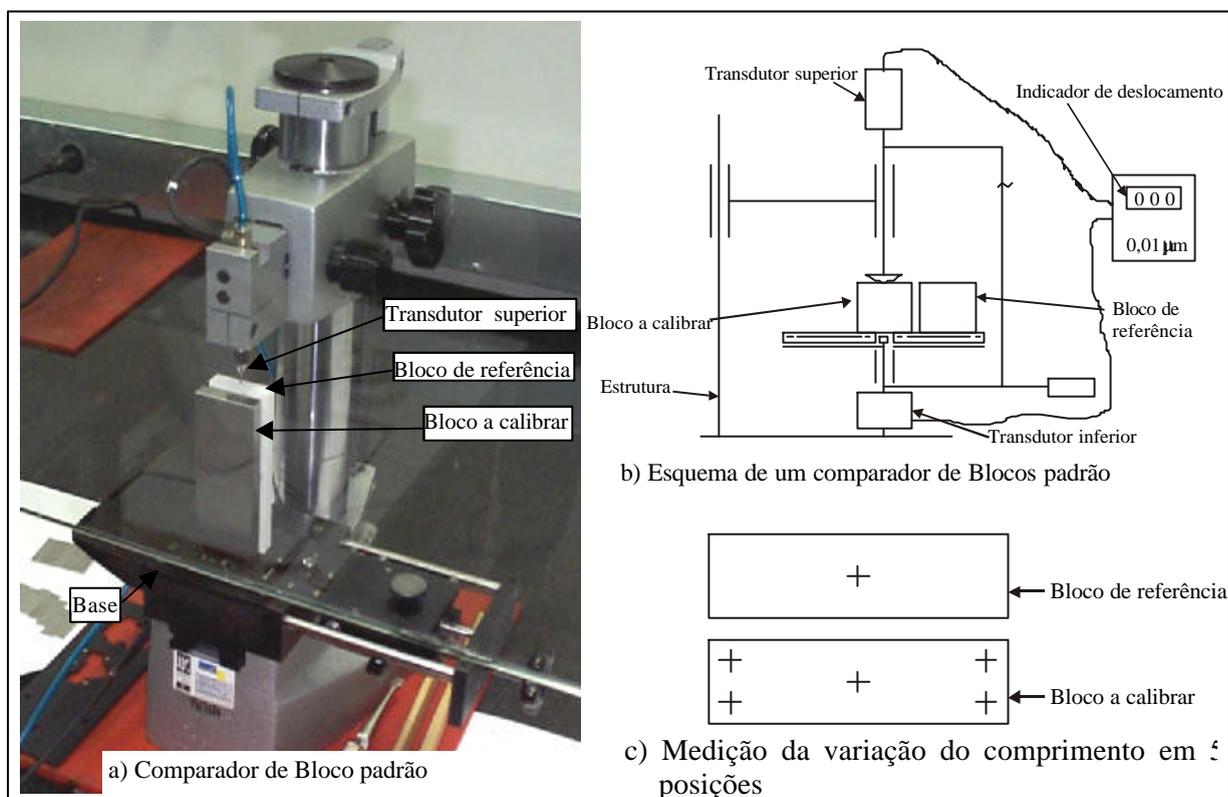


Figura 2.3 – Calibração de blocos padrão – Método da comparação/diferencial [14]

b) Método interferométrico

A superposição de dois feixes luminosos de comprimento de onda determinado, oriundos de uma mesma fonte, pode ocasionar um fenômeno de interferência. Surge então uma sucessão de zonas nas quais as amplitudes de duas ondas luminosas se adicionam ou se subtraem.

Os interferômetros destinados a estudar este fenômeno permitem visualizar as

zonas sucessivas sob a forma de linhas, claras ou escuras, de maneira alternada, denominada franjas de interferência. A distância que as separa está diretamente relacionada ao comprimento de onda - λ e sua posição depende do comprimento dos trajetos percorridos pelas duas ondas antes de se sobreponem. Esta propriedade permite determinar um comprimento por comparação com o comprimento de onda λ .

As técnicas de interferometria permitem medir frações de um milésimo a um décimo de milésimo de franja, o que corresponde a uma distância de 0,03 nm [22].

Como princípio de medição na calibração de blocos padrão, utiliza-se o comprimento de onda - λ como padrão para determinar o comprimento do bloco padrão [23,24].

Um padrão de franjas se gera no interferômetro pela interferência do feixe de luz refletido do espelho de referência na superfície superior do bloco e na base de apoio (placa de referência). O comprimento do bloco padrão é baseado na medição do deslocamento relativo - D entre os padrões de franjas localizados sobre o bloco padrão e sobre a placa de referência (fig. 2.4). Com isso, o comprimento do bloco padrão - LB :

$$LB = n \left(\frac{\lambda}{2} \right) + D \quad (2.1)$$

Onde:

n = Número de franjas

D = Deslocamento relativo entre os padrões de franjas

λ = Comprimento de onda da luz

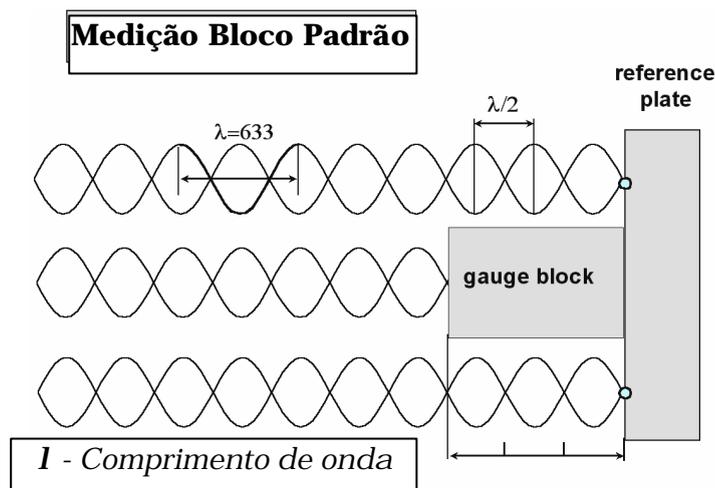


Figura 2.4 – Calibração de blocos padrão – Método interferométrico [25]

Para a calibração de blocos padrão classes 00 e K e classe 0 acima de 100 mm este método é o mais recomendado.

2.2.2 Comparação entre os métodos de calibração

A seguir tem-se uma comparação entre os métodos interferométrico e da comparação para calibração de blocos padrão [24]:

a) Método interferométrico:

- Incerteza de medição típica: $U = (0,02 + L/5000) \mu\text{m}$, com fator de abrangência $K = 3$, L em mm;
- Tem necessidade de sistemas de medição sofisticado, caros e além disso tanto a manutenção como sua recalibração acarretam custos maiores;
- O tempo de duração da calibração é maior que o método da comparação mecânica;
- requer uma melhor superfície em relação a planeza e limpeza das faces dos blocos;
- requer uma maior experiência e especialização do operador;
- condições ambientais recomendadas mais exigentes.

b) Método da comparação mecânica:

- Incerteza de Medição típica: $U = (0,05 + L/2000) \mu\text{m}$, com fator de abrangência $K = 2$, L em mm;
- limitação da faixa de medição, para calibração, normalmente de 0 a 100 mm.

2.2.3 Limitações dos métodos de calibração

Na calibração dos blocos padrão, em relação a alguns aspectos, os métodos convencionais mostram-se limitados. É crescente a demanda pela utilização de blocos maiores que 100 mm, podendo chegar até 1000 mm. No entanto, existem dificuldades para calibrações de blocos padrão maiores que 100 mm: incerteza de medição, tempo de execução e custos. Assim sendo, estudar e avaliar os aspectos metrológicos envolvidos em um procedimento de calibração de blocos padrão acima de 100 mm, se faz necessário.

A calibração pelo método interferométrico é demorada, cara e de oferta muito limitada, pois apenas os laboratórios primários dispõem deste serviço. Isto torna a rastreabilidade dos blocos maiores que 100 mm, praticamente inacessível às empresas. Por outro lado, as aplicações industriais não necessitam da incerteza de medição obtida por interferometria. Assim sendo é preciso viabilizar o atendimento das demandas do setor industrial pela rastreabilidade dos seus blocos padrão de trabalho a custos e prazos acessíveis.

2.3 Calibração de Padrão Escalonado

Existem diversos tipos de padrões escalonados, com diferentes faixas de medição e erros admissíveis que são largamente utilizados nas medições diretas ou por comparação de alturas, verificação de máquinas ferramentas e máquinas de medir por coordenadas, calibração de medidor interno com relógio, calibração de micrômetro interno, micrômetros de profundidade, calibração de paquímetros e traçadores de altura.

Na figura 2.5 têm-se as partes principais do padrão escalonado com tambor micrométrico com os erros admissíveis para a distância da superfície de medição e do fuso micrométrico. Na calibração de padrões escalonados deve-se fazer a medição de ressaltos no padrão escalonado sem tambor micrométrico e medição de ressaltos e do fuso micrométrico para o padrão escalonado com tambor micrométrico.

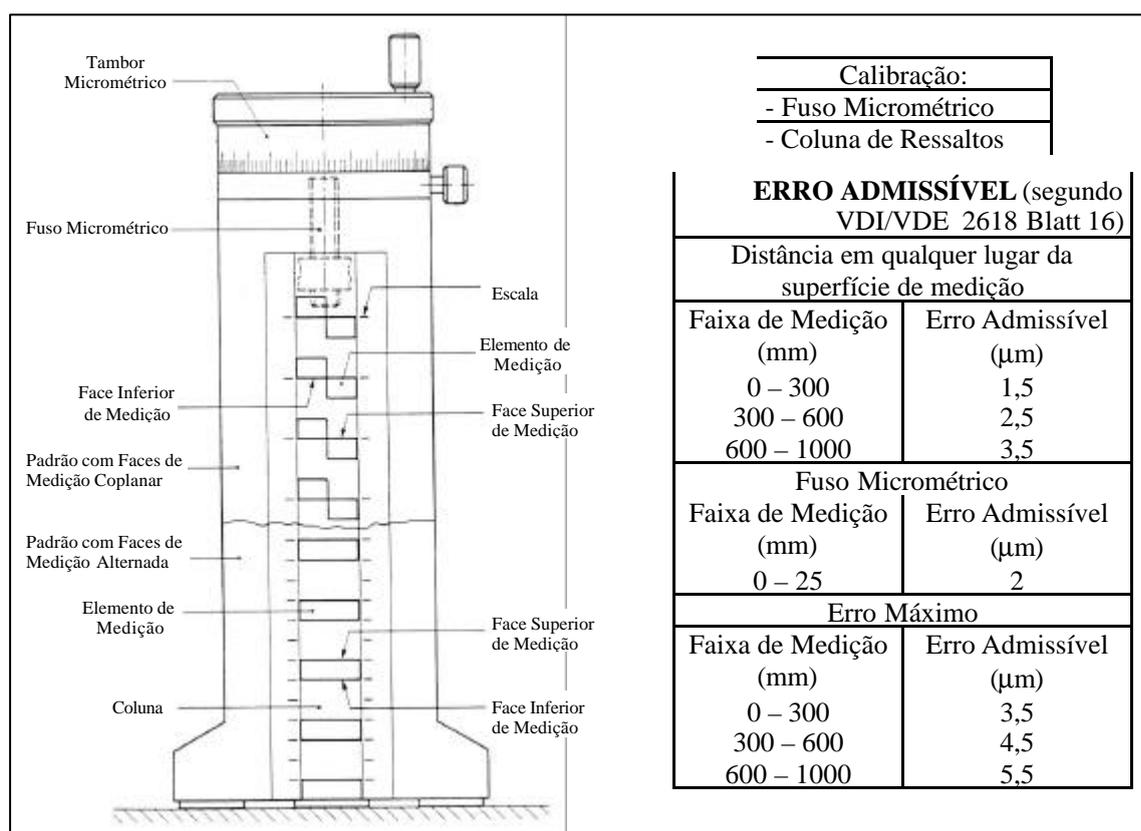


Figura 2.5 – Partes principais do padrão escalonado com tambor micrométrico e erros admissíveis [26,27]

2.3.1 Métodos de calibração

Os padrões podem ser calibrados através do método da comparação, utilizando:

- sistema de medição de deslocamento e blocos padrão (fig. 2.6.a);
- sistema de medição de deslocamento com laser interferométrico e apalpador eletrônico (fig.2.6.b), com incerteza de medição de $(0,2 + L/360) \mu\text{m}$ [28].

2.3.2 Limitações dos métodos

Ambos os métodos possuem limitações que tornam o ensaio demorado, caro e com certos riscos para os padrões, como pode ser visto a seguir:

- Sistema de medição com apalpador eletrônico e blocos padrão:
 - A faixa de medição é limitada pelo sistema de medição de deslocamento e comprimentos dos blocos padrão;

- há a necessidade de deslocamento manual do apalpador durante a calibração, com perigo de riscar os blocos;
- os tempos de preparação e calibração são relativamente altos (em torno de 3 horas), em função da montagem e posicionamento dos blocos padrão;
- o preço de um jogo de 6 blocos padrão de 100, 150, 200, 300, 400 a 500 mm, classe 0 é aproximadamente 20 mil reais;
- existe a necessidade de diferentes sistemas de medição e padrões e de um desempenho com erro de planeza desprezível para a calibração.

b) Sistema de medição com laser interferométrico:

- Deslocamento manual dos sistemas de medição durante a calibração;
- não obedece o princípio de Abbé, como pode ser visto na figura 2.6.b;
- os tempos de preparação, montagem e alinhamento, são relativamente altos (em torno de uma hora);
- o preço do laser interferométrico com acessórios para medições lineares é aproximadamente 85 mil reais;
- necessidade de um desempenho com erro de planeza desprezível para calibração.

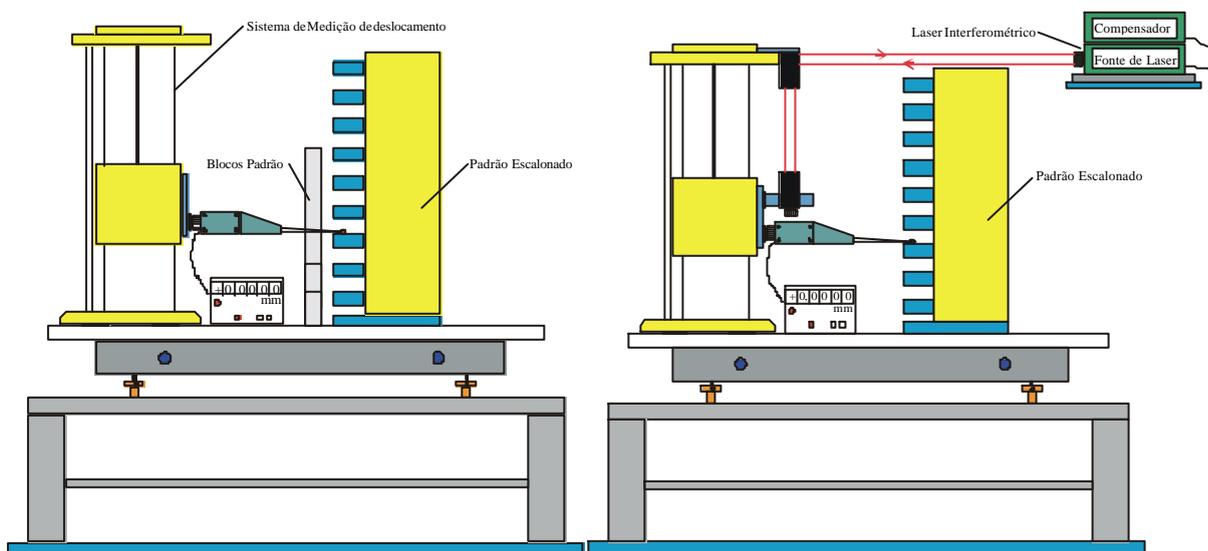


Figura 2.6 - Calibração de padrão escalonado utilizando sistema de medição de deslocamento e: a) blocos padrão b) laser interferométrico [28]

2.4 Calibração de Calibradores

As condições em que é executado o controle de qualidade utilizando-se calibradores, trazem consigo um desgaste relativamente rápido dos mesmos devido ao atrito existente entre o calibrador e a peça a ser controlada. Portanto, é importante realizar a calibração dos calibradores com uma frequência bem maior do que a determinada a outros padrões. A calibração consiste em determinar as dimensões efetivas dos mesmos pela comparação com valores normalizados.

As tolerâncias para calibradores variam em função da qualidade de fabricação (fig. 2.7) e os calibradores também possuem erros máximos admissíveis para seus desvios de forma, o que implica, em alguns casos no controle dimensional e de forma na calibração.

Dimensão Nominal (mm)		Tolerâncias (μm)		
De	até	IT2	IT3	IT4
-	3	1,2	2	3
3	6	1,5	2,5	4
6	10	1,5	2,5	4
10	18	2	3	5
18	30	2,5	4	6
30	50	2,5	4	7
50	80	3	5	8
80	120	4	6	10
120	180	5	8	12
180	250	7	10	14
250	315	8	12	16
315	400	9	13	18
400	500	10	15	20

Figura 2.7 – Tolerâncias admissíveis em função da dimensão para calibradores [29,30]

2.4.1 Métodos de calibração

Utiliza-se na calibração o método da comparação, podendo utilizar diferentes sistemas de medição, como se pode observar na figura 2.8. Na figura 2.9 tem-se a calibração de um calibrador anel liso cilíndrico na Máquina de Abbé (Máquina de Medir Longitudinal), que é uma máquina bastante utilizada para calibração de calibradores, tais como calibradores anel liso e roscado cilíndrico e cônico, calibradores tampão liso e roscado cilíndrico e cônico, calibradores de boca fixos e ajustáveis com incerteza de medição $(0,3 + L/500) \mu\text{m}$ [31, 32].

Calibradores	Item	Método	Sistema Medição/Padrão
Tampão Liso Cilíndrico	Diâmetro externo	Direto	Máquina de Abbé
		Comparação	Sistema de Medição de deslocamento e blocos padrão
	Circularidade Cilindricidade	Direto	Máquina de Medição de Forma
Anel Liso Cilíndrico	Diâmetro interno	Comparação	Máquina de Abbé e anel de referência
	Circularidade Cilindricidade	Direto	Máquina de Medição de Forma
De boca	Comprimento	Direto	Máquina de Abbé
		Comparação	Blocos padrão
	Paralelismo Planeza	Comparação	Blocos padrão Plano óptico

Figura 2.8 -- Métodos e sistemas de medição para calibração de calibradores [30]

2.4.2 Limitações dos Métodos

As limitações encontradas nestes métodos são:

- Operação manual para as medições;
- Necessidade de montagem de dispositivos diferentes em função do tipo de calibrador;
- Os sistemas de medição convencionais, normalmente, não permitem a calibração de muitos calibradores simultaneamente;
- O tempo de calibração é elevado (por exemplo, para calibrador anel e tampão liso cilíndrico e calibrador de boca, de 20 a 30 minutos, na Máquina de Abbé).

Essas limitações fazem com que se calibre esses calibradores com menor frequência.

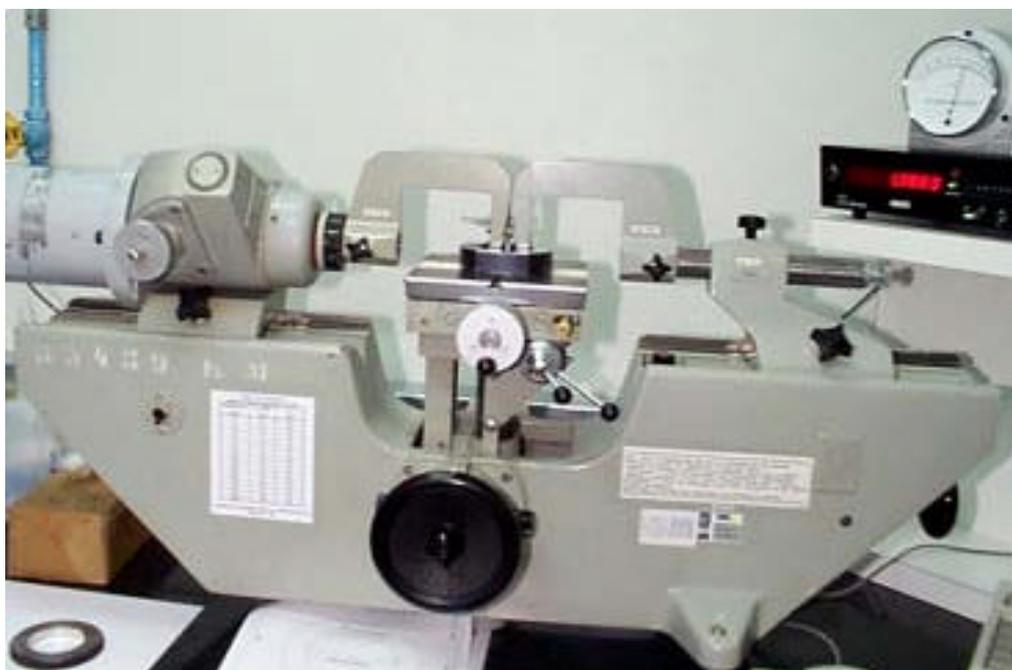


Figura 2.9 – Calibração de calibrador anel liso cilíndrico na Máquina de Abbé

2.5 Calibração de Esquadros

Na calibração de esquadros deve-se determinar o desvio de perpendicularidade, o desvio de planeza ou retilidade e o desvio de paralelismo das superfícies. As tolerâncias de perpendicularidade, planeza ou retilidade (fig. 2.10) para esquadros de diferentes classes de exatidão são normalizadas .

ESQUADROS DE AÇO		
Classe de exatidão	Tolerância de perpendicularidade (μm)	Tolerância de Planeza (μm)
00	$2 + L/100$	$2 + L/250$
0	$5 + L/50$	$2 + L/100$
1	$10 + L/10$	$4 + L/50$
2	$20 + L/10$	$8 + L/25$
ESQUADRO DE GRANITO		ESQUADRO CILÍNDRICO
Tolerância de perpendicularidade (μm) $2 + L/100$ (L em mm)		Tolerância de perpendicularidade (μm) $2 + L/200$ (L em mm)
		Tolerância de cilindridade (μm) $2 + L/200$

Figura 2.10 – Tolerâncias para esquadros de aço, de granito e cilíndrico [33-36]

2.5.1 Métodos de calibração de esquadros de aço

De acordo com [35,36] a calibração pode ser feita pelo:

a) Método do esquadro padrão e blocos padrão

O desvio de perpendicularidade – DP é determinado sobre um desempenho, com auxílio de um esquadro de referência de tamanho adequado e de blocos padrão (fig. 2.11.a).

Assim, quando o lado menor do esquadro está na base:

$$DP = \frac{\Delta L_{BP} \cdot L_1}{L_{tbase}} \quad (2.2)$$

Onde:

ΔL_{BP} = Diferença dos comprimentos dos blocos padrão.

L_1 = Comprimento total do lado maior do esquadro.

L_{tbase} = Comprimento total da base

Se o lado maior está na base:

$$DP = \Delta L_{BP} \quad (2.3)$$

b) Método do esquadro padrão e medidor de deslocamento

O desvio de perpendicularidade é obtido comparando-se os resultados obtidos na medição do esquadro padrão e no esquadro a calibrar com um medidor de deslocamento (fig. 2.11.b).

A incerteza de medição para calibração de esquadros com faixa de medição de 0 até 1000 mm é de 1,5 μm [37].

2.5.2 Métodos de calibração de esquadros cilíndricos

Os métodos de calibração de esquadros cilíndricos podem ser realizados pelo [36]:

a) Método por comparação com esquadro de referência

O desvio de perpendicularidade é obtido comparando-se os resultados de medição com um medidor de deslocamento na parte superior, central e inferior de um esquadro de referência e um esquadro a calibrar. O desvio de perpendicularidade é obtido da máxima diferença de cada geratriz (fig. 2.11.c).

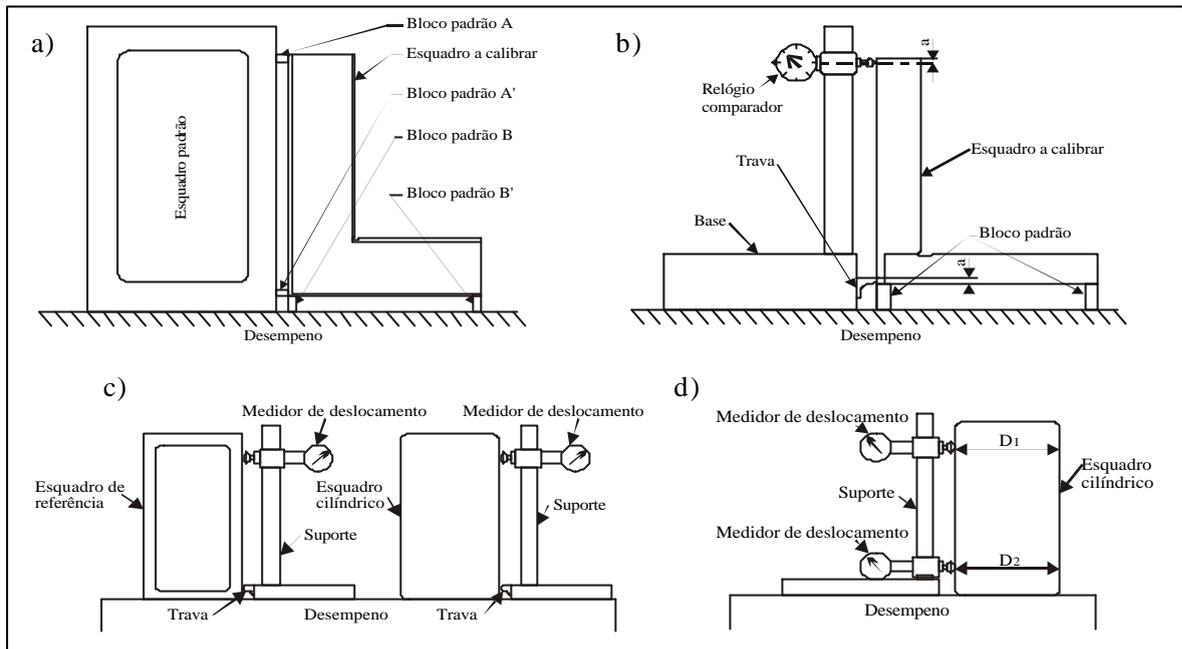


Figura 2.11 – Calibração de esquadros: a) Método do esquadro padrão e blocos padrão, b) Método do esquadro padrão e medidor de deslocamento, c) Método da comparação – Esquadro cilíndrico, d) Método sem esquadro de referência – Esquadro cilíndrico [35,36]

b) Método de determinação sem esquadro de referência

A determinação do desvio de perpendicularidade é feita utilizando-se medidores de deslocamento sobre um desempenho (fig.2.11.d). Na primeira geratriz A, determina-se a diferença das indicações dos sistemas de medição de deslocamento (ΔA), em seguida rotacionando o esquadro de 180 graus, próximo à geratriz C determina-se a diferença das indicações (ΔC). Além disto, determina-se os diâmetros D_1 e D_2 sobre a geratriz A-C em suas respectivas alturas, utilizam-se as equações a seguir para obter o desvio de perpendicularidade – DP :

$$DPA = 1/2[(\Delta A - \Delta C) + (D_1 - D_2)] \quad (2.4)$$

$$DPC = 1/2[(\Delta C - \Delta A) + (D_1 - D_2)] \quad (2.5)$$

Onde:

DPA = Desvio de perpendicularidade na geratriz A.

DPC = Desvio de perpendicularidade na geratriz C.

DA = Diferença das indicações dos sistemas de medição de deslocamento na geratriz A

DC = Diferença das indicações dos sistemas de medição de deslocamento na

geratriz C

$D1$ = Diâmetro 1

$D2$ = Diâmetro 2

Deve-se também fazer as medições na parte inferior e central e determinar a máxima diferença para cada geratriz. Do mesmo modo, determinar a máxima diferença para as geratrizes B e D. A maior diferença é o desvio de perpendicularidade.

A incerteza de medição para calibração de esquadros cilíndricos com faixa de medição até 600 mm é de 1,5 μm [37].

2.5.3 Limitações nos métodos de calibração

- A calibração normalmente envolve diferentes sistemas de medição;
- a calibração é realizada manualmente;
- para esquadros com comprimentos nominais maiores que 500 mm, tem-se dificuldade de se conseguir esquadros de referência;
- existe a necessidade de um esquadro de referência, nos métodos apresentados, exceto no método do esquadro cilíndrico.

2.6 Calibração de Réguas

Para a representação de eixos de referência e de linhas retas nos ensaios geométricos de reticidade, em muitos casos são empregadas as réguas. Na figura 2.12 têm-se as tolerâncias de reticidade normalizadas para réguas de aço e de granito.

Régua de Aço		Tolerância de Reticidade
- Com fio		$(2 + L/250) \mu\text{m}$
- Paralela	Classe exatidão	
	00	$(1 + L/250) \mu\text{m}$
	0	$(2 + L/100) \mu\text{m}$
	1	$(4 + L/60) \mu\text{m}$
	2	$(8 + L/40) \mu\text{m}$
- Paralela em duplo T		$(4 + L/60) \mu\text{m}$
Régua de Granito		Tolerância de Reticidade
- Paralela		$(2 + L/100) \mu\text{m}$ L em mm

Figura 2.12 – Tolerâncias de reticidade – régua [38-41]

2.6.1 Método de calibração usando régua padrão

Neste método, coloca-se uma régua padrão paralela à régua a calibrar apoiadas paralelamente à superfície de um despeno sobre dois blocos padrão localizados nos apoios de Bessel, isto é, nos pontos correspondentes à mínima deflexão. Com um sistema de medição de deslocamento montado sobre a régua padrão e o apalpador sobre a superfície da régua a calibrar compara-se as retilideades (fig. 2.13).

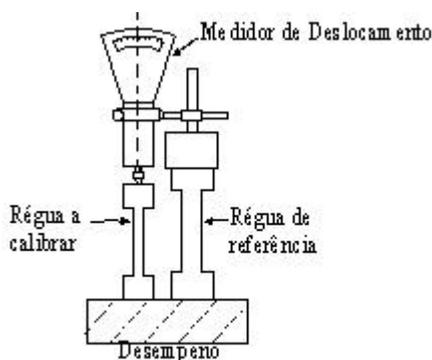


Figura 2.13 – Calibração de réguas: pelo método da comparação [40]

Com tais sistemas de medição pode-se alcançar uma resolução de até $0,1 \mu\text{m}$. Os erros de medição são função proporcional do sistema de medição de deslocamento, da qualidade da régua padrão e da distância entre as réguas. Pode ser alcançada uma incerteza de medição até da ordem de $\pm (0,2 \mu\text{m} + 1,0 \mu\text{m}/\text{m})$. Conhecendo-se os erros sistemáticos da régua padrão, pode-se, com auxílio de um computador, fazer uma compensação dos erros sistemáticos da régua padrão calibrada e desta forma, obter-se resultados de medição com melhores incertezas [42].

2.6.2 Limitações do método

O método apresenta as seguintes limitações:

- necessita de variados sistemas de medição e padrões: blocos padrão, despeno, medidor de deslocamento e régua padrão, o que torna a calibração mais demorada e cara;

- o uso da régua padrão é limitado em função de seu comprimento, que normalmente se restringe a 1,5 m;
- a aplicação da régua se torna difícil em função dos pontos de apoio, pois mudando estes pontos, deixará de existir a retilineidade especificada;
- as calibrações são realizadas manualmente.
- no método da comparação usando régua padrão tem-se o erro em função da disposição da régua padrão e régua à calibrar, não obedece o princípio de Abbé (fig.2.13).

2.7 Considerações

Nos métodos convencionais de calibração de medidas materializadas, apesar das incertezas de medição reduzidas (figura 2.14), foram encontradas e apresentadas limitações em relação aos procedimentos, flexibilidade e tempo de execução:

- Para a confiabilidade dos resultados na calibração é necessária a rastreabilidade dos padrões, que no caso de calibrações de medidas materializadas pelos métodos convencionais envolvem muitos padrões;
- alguns dispositivos e peças padrão complexas não podem ser calibrados por métodos convencionais;
- nas empresas existe uma grande variedade de medidas materializadas, que necessitam de rapidez na calibração, o que nem sempre é possível com métodos convencionais;
- os custos da calibração nos métodos convencionais em geral são elevados;
- os procedimentos de calibração são pouco automatizados e dependem muito da experiência do operador.

Por essas limitações e suas conseqüências negativas, a existência de estratégias que tornassem a calibração mais rápida e com menor custo traria grandes vantagens para as calibrações de medidas materializadas. No próximo capítulo é apresentada a Máquina de Medir por Coordenadas como alternativa para as calibrações.

Medida Materializada	Faixa de Medição (mm)	Incerteza de Medição(μm)
Bloco Padrão	0-100	$(0,05+L/2000)$
Haste Padrão	0-1000	$(0,4+L/1000)$
Padrão Escalonado	0-2000	$(0,5+L/1000)$
Calibrador Anel Liso Cilíndrico	2-100	$(0,3+L/500)$
Calibrador Tampão Liso Cilíndrico	0-150	$(0,3+L/700)$
Calibrador de Boca	20-400	0,5
Esfera Padrão	0-50	$(0,3+L/500)$
Arame para medição de Roscas	0-10	0,3
Pino Padrão	0-35	0,3
Esquadro de aço e de granito	0-950	$(1,4+L/2000)$
Régua de aço e de granito	0-950	$(1+L/500)$

Figura 2.14 - Incertezas de medição típicas para calibração de medidas materializadas – Métodos Convencionais [31,37,43]

Capítulo 3

A Máquina de Medir por Coordenadas como Padrão de Calibração

Por causa da flexibilidade intrínseca da tecnologia de medição por coordenadas e devido às limitações existentes em métodos convencionais de calibração, relativos a procedimentos, rastreabilidade e custos, se propõe a calibração de grande parte das medidas materializadas em Máquina de Medir por Coordenadas (CMM).

Neste capítulo serão apresentados o desempenho metrológico da CMM e suas principais fontes de erros, o método da CMM Virtual e suas vantagens para estimativa dos erros e das incertezas de medição.

3.1 Desempenho Metrológico da CMM

A CMM [44] possui diversos módulos e um elevado número de elementos móveis (3 ou 4 eixos coordenados), que operando de uma forma integrada, provocam (apesar das avançadas técnicas construtivas) erros na medição [45].

As principais fontes de erros na medição com CMM estão apresentadas na figura 3.1. De todas as fontes de erros pode-se dizer que as principais fontes de erros são associadas às componentes da máquina como a estrutura mecânica, subsistema de medição de deslocamento, subsistema de apalpação e software utilizado. É claro que existem causas importantes que não são associadas diretamente com a máquina e sim provocadas por condições externas a elas, tais como temperatura e vibrações. A incerteza de medição resulta do efeito conjunto de cada componente individual da máquina.

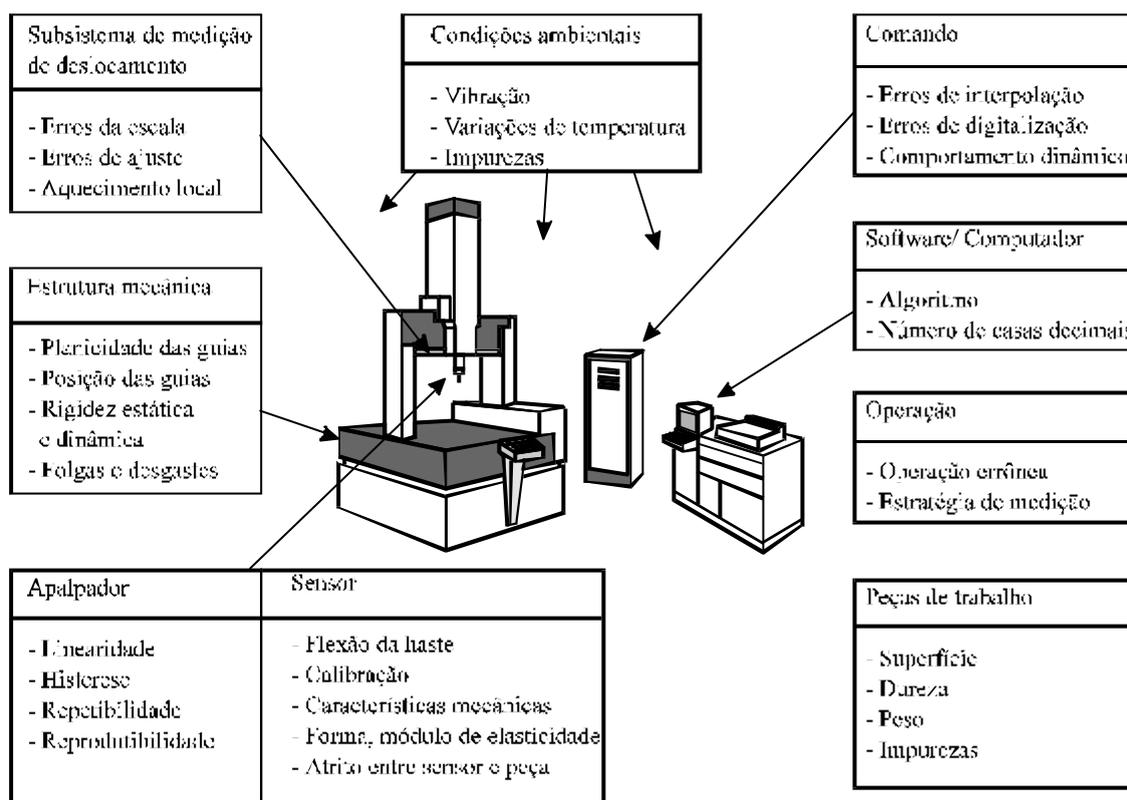


Figura 3.1 – Fontes de erros em uma CMM [45, 46]

Alguns métodos são utilizados pelos fabricantes para diminuir a incerteza de medição das CMMs, tais como [47]:

a) Fabricação e ajustes - melhoria da incerteza através da fabricação precisa dos componentes da CMM e de seus ajustes;

b) Melhoramentos do projeto - devem ser considerados fatores que influenciam o comportamento metrológico. A temperatura é o mais crítico parâmetro de influência da exatidão. E para melhorar o projeto em relação aos efeitos de temperatura pode-se:

- encapsular a CMM, isolando dos efeitos de temperaturas externos;
- posicionar as fontes de calor internas (por exemplo, motores, etc.) em lugares que não são termicamente críticos;
- usar materiais de alta condutividade térmica, que minimiza os gradientes de térmicos;
- usar escalas com material de baixo coeficiente de expansão térmica (por exemplo, com zerodur $\alpha < 0,05 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$);

c) Software – correção de erros

Por vários meios os fabricantes têm conseguido reduzir mecanicamente a incerteza de medição e atualmente, esse aumento na exatidão das CMMs é complementado com a correção dos erros matematicamente. O método consiste de corrigir os erros sistemáticos de linearidade das guias, os desvios de perpendicularidade e os erros das escalas. Este método tem a denominação Computer Aided Accuracy – CAA (Exatidão assistida por computador).

Em CMM com CAA, são realizadas correções em vários pontos por eixo, que são armazenados no computador. Também são corrigidos os erros de perpendicularidade entre os eixos, resultando uma correção total de 21 componentes de erros sistemáticos. Isto é válido para máquinas tipo portal em que os erros das guias e posições não se influenciam entre si ou que podem ser desconsiderados. As correções devem ser realizadas com rigor e existe a necessidade de atualizá-los periodicamente.

Na figura 3.2 têm-se as incertezas de medição, faixa de medição e aplicações típicas para CMMs Industrial e Laboratorial sem CAA, Laboratorial com CAA de diferentes fabricantes. Observa-se atualmente a redução das incertezas de medição das CMMs, para uma CMM Laboratorial com CAA a incerteza tridimensional típica é de $U_{3D}=0,7+L/600\mu\text{m}$.

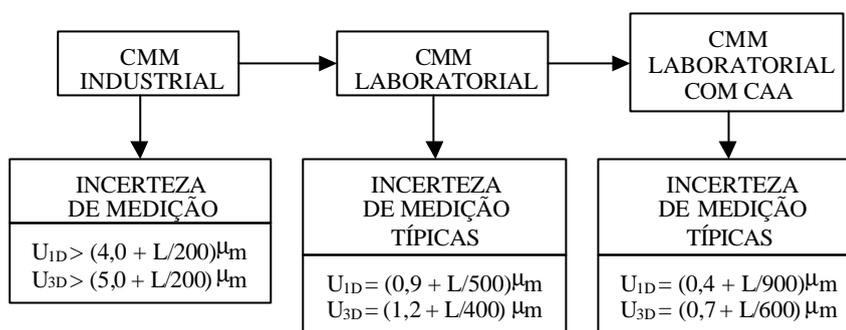
Para reduzir a incerteza de medição da CMM para a calibração de medidas materializadas, pode-se atuar também no controle de variações de temperatura do ambiente (da CMM e das medidas materializadas), na escolha de apalpadores e na estratégia de medição.

Para a avaliação do desempenho metrológico e determinação dos erros geométricos da CMM existem diferentes métodos e padrões [45,48-52], com uma tendência para uso de padrões bidimensionais [53].

3.2 Método CMM Virtual

O método da CMM Virtual [54-61] consiste essencialmente de programas computacionais nos quais são introduzidas informações sobre vários fatores que influenciam o desempenho da CMM – erros geométricos, erros de apalpação, etc. – as quais, quando combinadas, dão como resultados, estimativas dos erros e das

incertezas de tarefas de medição executadas pela máquina.



Características Típicas	Coluna	Portal	Lança	Ponte
Incerteza Medição (μm)	$U_1 = (0,5 + L/1200)$ $U_3 = (0,8 + L/800)$	$U_1 = (0,4 + L/900)$ $U_3 = (0,7 + L/600)$	$U_3 = (23 + L/45)$ $U_3 = (60 + L/25)$	$U_3 = (7 + L/125)$ $U_3 = (20 + L/50)$
Faixa Medição	Até 410 mm	Até 1,2 m no maior eixo	De 1,5 a 2,5 m no maior eixo	Até 10 m no maior eixo
Aplicações	Laboratorial Calibração de padrões e instrumentos	Laboratorial e Industrial Calibração de padrões e calibradores e peças	Industrial Ex.: Carrocerias de carros e caminhões	Industrial Ex.: Automotiva e Aeronáutica

Figura 3.2 – Incertezas de medição, faixa de medição e aplicações típicas para CMM industrial, laboratorial e laboratorial com CAA

Na figura 3.3 tem-se a representação da medição pelo método CMM Virtual e a medição real. Na medição virtual as influências de erros (variação da temperatura, erros geométricos da CMM, erros de apalpação, peça de trabalho, etc.) são simuladas por um programa de computador, para se obter o resultado da medição com sua incerteza.

As contribuições de incerteza consideradas pelo método CMM Virtual consistem basicamente de contribuições sistemáticas conhecidas e contribuições aleatórias. Sempre que possível, as contribuições de incerteza usadas na simulação devem ser avaliadas por medição e, se não for possível, elas devem ser estimadas. Na figura 3.4 têm-se as principais contribuições de incertezas consideradas durante a medição simulada – Método da CMM Virtual.

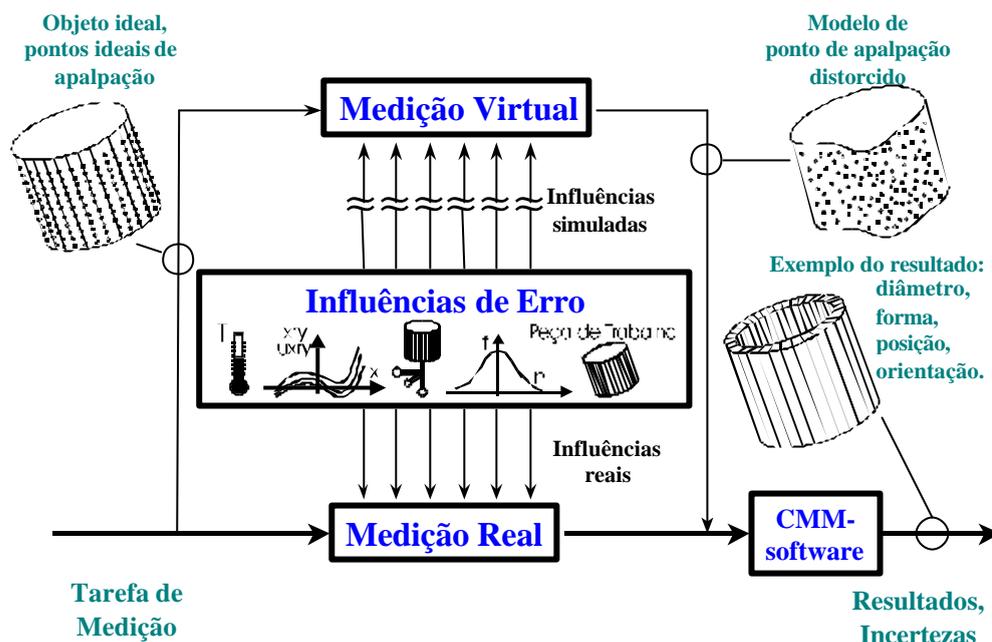


Figura 3.3 – Medição real e virtual em CMM Virtual [59]

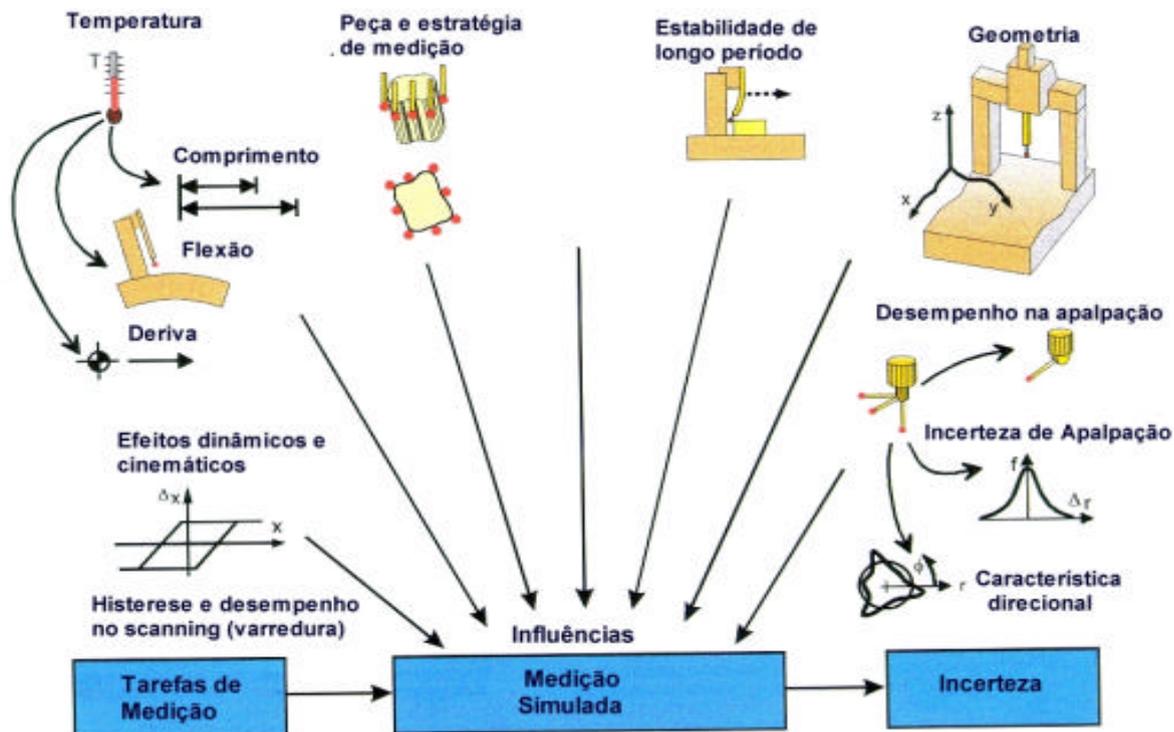


Figura 3.4 – Contribuições de incertezas consideradas durante a medição simulada – CMM Virtual [60]

As fontes de incertezas a serem avaliadas na calibração de medidas materializadas são:

- fontes de incerteza do processo de apalpação;
- fontes de incerteza dos erros geométricos da CMM;
- fontes de incerteza das medidas materializadas.

3.2.1 Fontes de incertezas do processo de apalpação

Junto com a geometria do sistema de eixos cinemáticos, o processo de apalpação é uma fonte de contribuição de incerteza de primeira ordem para os resultados de medição. A análise de incerteza para o processo de apalpação deve ser capaz de considerar todos efeitos relacionados e ser válido para diferentes configurações de hardware (por exemplo, diferentes princípios de apalpação e diferentes softwares de correção para erros de apalpação).

Basicamente um processo de apalpação de um ponto tridimensional é associado com a característica de erro direcional e contribuições de incerteza aleatórias. A característica direcional varia com diferentes parâmetros, como configuração de apalpadores, força e velocidade de apalpação e deflexão da haste do apalpador.

3.2.2 Fontes de incerteza dos erros geométricos

Na CMM têm-se 18 componentes de erros dependentes da posição e adicionalmente 3 erros de perpendicularidade entre eixos (fig. 3.5):

- erros de posicionamento: x_{px} , y_{py} , z_{pz} ;
- erros de retilineidade: x_{ty} , x_{tz} , y_{tx} , y_{tz} , z_{tx} , z_{ty} ;
- erros rotacionais ou angulares (rolamento, inclinação e guinamento): x_{rx} , x_{ry} , x_{rz} , y_{rx} , y_{ry} , y_{rz} , z_{rx} , z_{ry} , z_{rz} ;
- erros de perpendicularidade: x_{wy} , x_{wz} , y_{wz} .

As principais contribuições individuais de incerteza para as 21 componentes de erros são:

- incerteza da calibração dos padrões usados para calibrar a CMM;
- incerteza devido às influências do ambiente (principalmente temperatura);
- incerteza devido a mudanças de longo período da CMM.

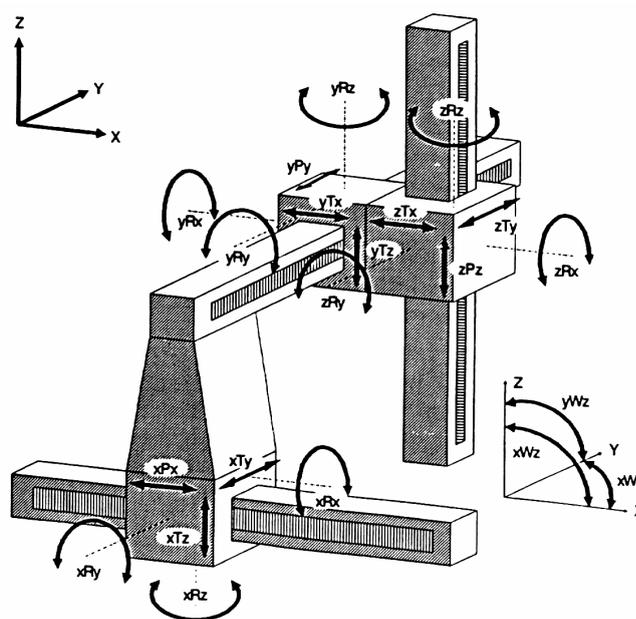


Figura 3.5 – Componentes de erros em uma CMM tipo portal [62]

Estas três contribuições têm que ser estimadas ou avaliadas por experimentos e adicionadas quadraticamente para produzir o valor de incerteza final para cada componente de erro a ser considerado no método da CMM Virtual [60].

3.2.3 Método CMM Virtual do Physikalish - Technische Bundesanstalt

O método consiste de ensaios metrológicos abrangentes sobre o comportamento geométrico da CMM e de posterior estimativa da sua incerteza por simulação computacional da tarefa de medição.

A calibração de CMM pelo método CMM Virtual do Physikalish - Technische Bundesanstalt (PTB) é apresentada na figura 3.6. Nos parâmetros de medição da peça, estão envolvidos a tarefa de medição e suas características nominais (por exemplo o furo, o seu diâmetro e posição do centro), a estratégia de medição, configuração dos apalpadores e a própria CMM.

A simulação para avaliar a incerteza de uma tarefa específica requer o conhecimento das diversas componentes desta incerteza. O lado esquerdo da figura 3.6 mostra o levantamento das fontes de erro para o cálculo dessa incerteza. Preferencialmente, as componentes devem ser determinadas através de ensaio com placa (o método da CMM Virtual foi desenvolvido especialmente para a utilização de placas).

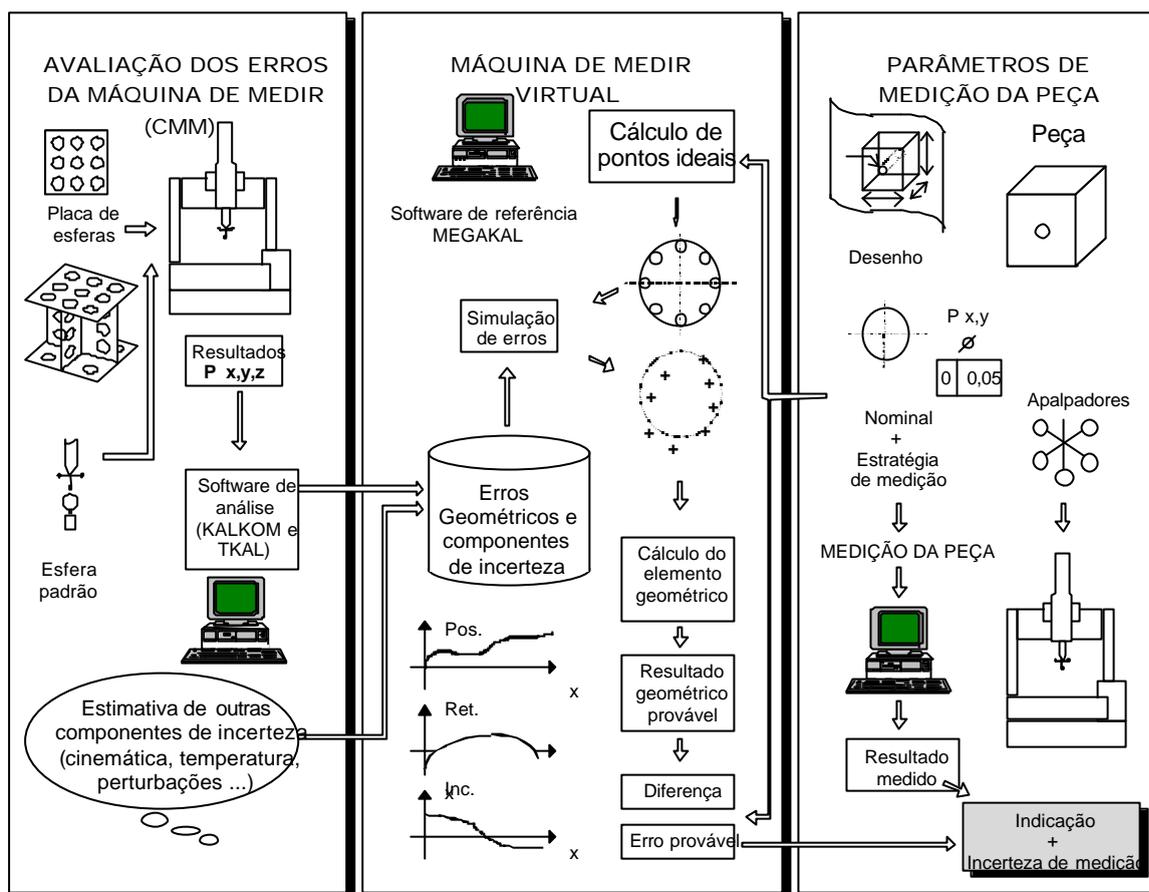


Figura 3.6 – Princípio da CMM Virtual – PTB [63]

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

O centro da figura 3.6 mostra a simulação da tarefa específica de medição. Depois de introduzidos no software os dados levantados na avaliação dos erros da CMM, a simulação pode ser executada a qualquer tempo e pode compreender as seguintes

etapas:

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

Adicionalmente, podem ser realizadas as seguintes etapas:

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

Finalmente, o lado direito da figura 3.6 representa a aplicação da CMM, ou seja, a medição efetiva da tarefa de medição (após a simulação do resultado de medição). Parâmetros tais como a geometria a ser medida e a estratégia que serão utilizados na medição, também são dados utilizados na simulação. A realização da avaliação dos erros e simulação da tarefa específica garante, a priori, a avaliação da incerteza de medição total da CMM. Isso é conseguido através da simulação da medição de um grande número de distâncias (por exemplo mais de 10.000) paralelas a cada um dos eixos da CMM combinando todos os pontos entre si.

3.2.4 Vantagens do Método da CMM Virtual

As vantagens da CMM Virtual são [54,64]:

- simulação de tarefas complexas, demoradas e às vezes onerosas;
- obtenção antecipada de informações, tais como, incerteza e até custos dependendo da implementação;
- estimativa da incerteza para tarefas de medições específicas;
- mapeamento dos erros no volume de trabalho da máquina simulada, independentemente de qualquer tarefa de medição, permitindo determinar as condições ótimas para posição de medição no volume de trabalho e escolher a região da CMM que oferece a menor incerteza para tarefas específicas.

3.3 Considerações

Neste capítulo mostrou-se que é possível diminuir a incerteza de medição da CMM, através de melhoramentos do projeto, fabricação e correção de erros. Tem-se como exemplo a incerteza de uma CMM com CAA, onde a incerteza tridimensional é:

$$U_{3D} = (0,7+L/600) \mu\text{m}.$$

Além disso, um método para avaliar a incerteza de medição de CMM foi explanado: Método da CMM Virtual. Este método serve para estimar a incerteza de medição com as vantagens citadas anteriormente.

Com as CMMs laboratoriais e o método da CMM Virtual amplia-se a possibilidade de aplicação para as CMMs serem utilizadas, na calibração de medidas materializadas, substituindo em muitas aplicações sistemas de medição dedicados, com as vantagens já mencionadas.

O desafio que se coloca agora é desenvolver estratégias de calibração e validar essas tecnologias para tarefas de medição com incertezas tão baixas, como na calibração de medidas materializadas. No próximo capítulo serão apresentadas estas estratégias de calibração.

Capítulo 4

Estratégias de Viabilização da Calibração de Medidas Materializadas em CMM

Neste capítulo são apresentadas as estratégias para calibração de medidas materializadas em CMM, tendo como base os métodos da CMM Virtual, do rebatimento e da comparação. Com o método CMM Virtual simula-se, através de um programa de computador, as tarefas de calibração de medidas materializadas, obtendo-se informações antecipadas sobre incertezas e ainda escolhe-se a região dentro do volume de medição da CMM com menor incerteza de medição. Os métodos do rebatimento e da comparação serão utilizados complementando a simulação para reduzir ainda mais a incerteza da medição.

4.1 Causas de erros na Calibração de Medidas Materializadas

Nas estratégias de calibração de medidas materializadas devem ser avaliadas as causas de erros na calibração. Na figura 4.1 têm-se as causas de erros, o erro gerado e ação para minimização destes erros na calibração de medidas materializadas:

- Deformações indesejáveis podem ocorrer pelo peso próprio da medida materializada e pelo dispositivo de fixação, especialmente se for apoiada inadequadamente;
- os desvios geométricos (micro e macrogeométricos) afetam o processo de medição;
- o sensor da CMM deve ter a forma correspondente para a medida materializada, afim de que se obtenha um contato geometricamente bem definido;

- erros geométricos de posição são evitados, de forma mais segura pelo emprego do método da comparação e procurando obedecer o princípio de Abbé;
- deve-se dar atenção especial à temperatura em virtude da deformação térmica sofrida pela CMM, padrões e medidas materializadas.

CAUSAS DE ERROS	ERROS GERADOS	AÇÃO DE MINIMIZAÇÃO
Peso próprio da medida materializada	Deformação da medida materializada	Escolher pontos de apoio para mínima deformação
Desvios geométricos da medida materializada	Erros no processo de calibração	Realizar medidas em diferentes posições
Erros de forma do sensor / medida materializada	Erros de contato	Contato deve ser geometricamente definido
Relações geométricas de posição	Erros geométricos	Utilizar método da comparação e obedecer o princípio de Abbé
Diferenças de temperaturas do ambiente, padrão e medidas materializadas	Deformação térmica	Estabilização das temperaturas Correção $\Delta L = L(\Delta t_1 \alpha_1 - \Delta t_2 \alpha_2)$

Figura 4.1 – Causas de erros e ação para minimização na calibração de medidas materializadas

4.2 Avaliação da incerteza de medição na calibração de medidas materializadas utilizando o Método CMM Virtual

Nesta seção o método da CMM Virtual será utilizado para a avaliação da incerteza na calibração de medidas materializadas. A finalidade é apresentar a estratégia de determinação da incerteza de medição específica de tarefas de medição na calibração.

4.2.1 Estimativa das componentes de erros da CMM

Para a aquisição das componentes de desvios geométricos das máquinas de medir por coordenadas (CMM) é utilizado o software Kalkom desenvolvido pelo PTB [65]. O software é aplicável para todas as CMMs com três eixos cartesianos e comportamento rígido.

Este software pressupõe que uma placa de esferas ou furos calibrada tenha sido medida duas vezes em cada um dos planos coordenados da CMM (Fig. 4.2). Para tanto, as projeções ortogonais aos dois primeiros eixos da cadeia cinemática foram medidos com dois apalpadores distintos, assim como a projeção ortogonal ao

terceiro eixo foi medida em duas posições paralelas deslocadas (Fig. 4.3).

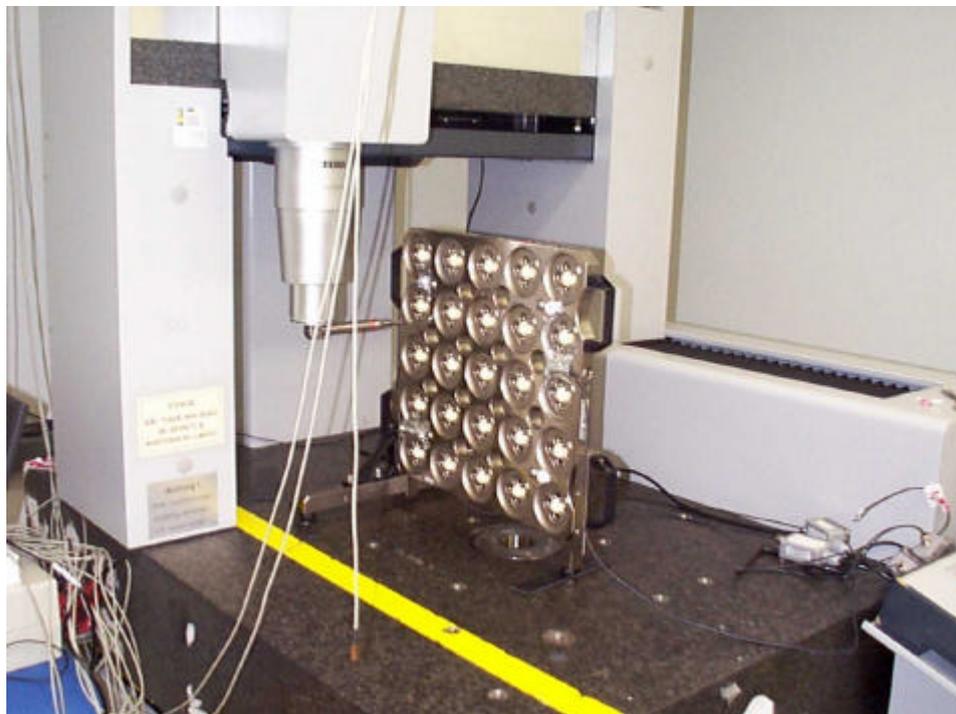


Figura 4.2 - Placa de esferas no plano vertical para calibração da CMM

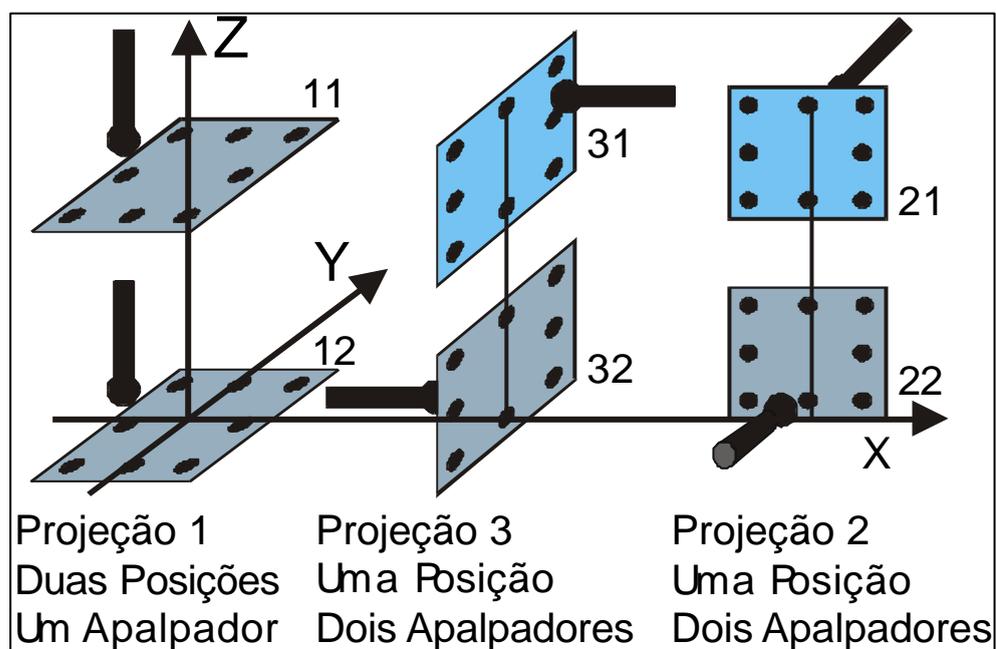


Figura 4.3 - Posições da placa para a determinação dos desvios geométricos [65]

4.2.2 Simulação dos erros para tarefas de medição

Utiliza-se um programa de simulação dos erros de medição de tarefas de medição em máquinas de medir por coordenadas do PTB - MEGAKAL [66]. Os parâmetros sistemáticos de erros da CMM e as características de erros manifestadas pelos palpadores servem como dados de entrada. As tarefas de medição que podem ser simuladas são: pontos, distâncias, planos, círculos, cilindros e esferas.

As medidas materializadas com geometrias específicas podem ser medidas em qualquer posição do volume de medição. Como resultado obtém-se o relatório de uma medição virtual que fornece uma conclusão sobre a incerteza de medição da CMM para a tarefa de medição simulada.

No programa de simulação os procedimentos são orientados da mesma maneira como nas medições reais. A figura 4.4 mostra a correlação entre as medições reais e simuladas.

<i>Medição</i>	<i>Simulação</i>
<i>Selecionar a máquina</i>	<i>Carregar os erros da máquina</i> <i>Carregar ou definir os palpadores</i>
<i>Definir a medida materializada</i>	<i>Definir as geometrias específicas</i>
<i>Gerar a distribuição de pontos</i>	<i>Gerar os pontos nominais</i>
<i>Realizar as apalpações</i>	<i>Simular as apalpações</i>
<i>Avaliar</i>	<i>Avaliar</i>

Figura 4.4 – Correlação entre a medição e simulação na CMM

a) Sistema coordenado

As especificações do Megakal são feitas no sistema coordenado da máquina. O eixo Z da máquina situa-se na posição vertical. A figura 4.5 mostra a localização do sistema coordenado na máquina.

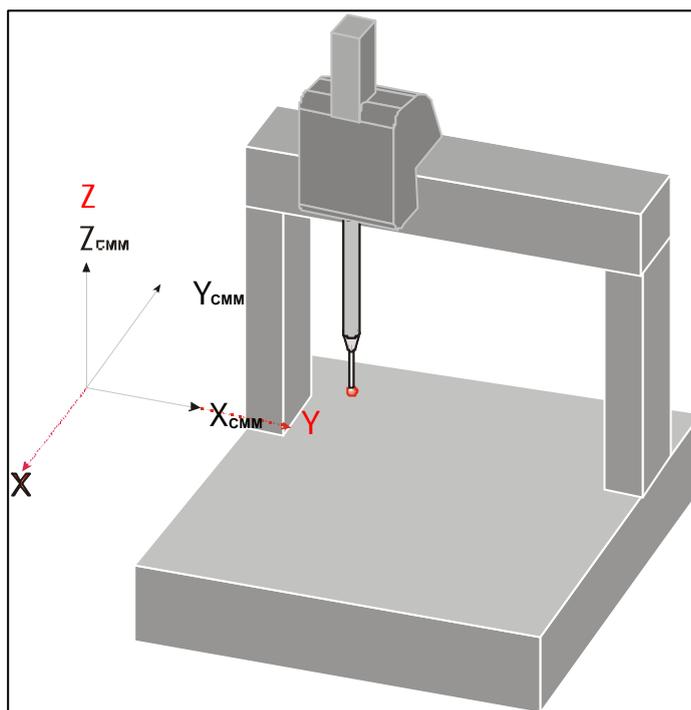


Figura 4.5 – Comparação do sistema coordenado da máquina (X_{CMM} , Y_{CMM} , Z_{CMM}) com o do Megakal (X , Y , Z) [66].

A força de medição é considerada na simulação dos erros do sistema de apalpação e deve ser selecionada conforme as especificações do fabricante para a máquina simulada.

b) Manuseio das configurações de apalpadores

Na medição simulada de elementos geométricos devem-se considerar diversos apalpadores, pois muitos elementos (como esferas) requerem eventuais apalpações por diversos lados. Cinco locais são colocados à disposição no Megakal para manusear as configurações de apalpadores. Estes locais podem ser preenchidos pela definição de apalpadores ou pelo carregamento de apalpadores a partir de arquivos.

Desta forma, pode-se instalar até cinco apalpadores ao mesmo tempo, que são automaticamente selecionados na simulação de acordo com a direção preferencial de apalpação. É selecionado o apalpador cuja direção preferencial melhor se adapte à normal à superfície apalpada, ou seja, aquele onde o ângulo alfa entre a direção de apalpação e a direção preferencial seja mínimo, como pode ser visto na figura 4.6.

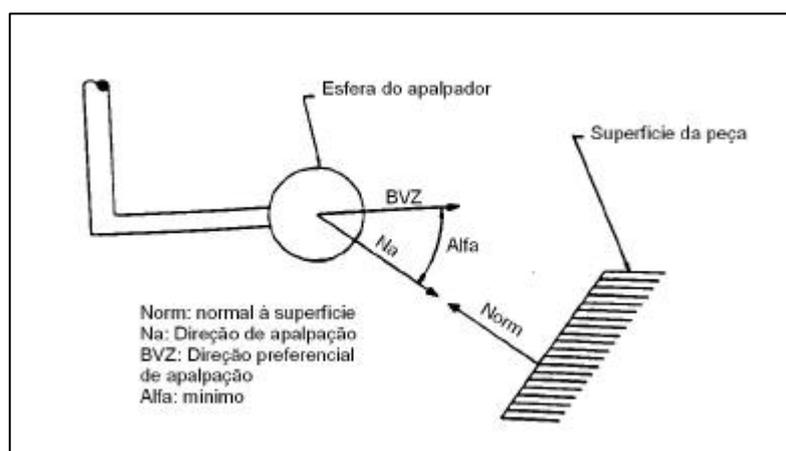


Figura 4.6 – Seleção do apalpador de acordo com a direção de apalpação [66]

Para tanto devem ser previstos apalpadores para determinadas faixas de apalpação. A direção preferencial de apalpação oferece uma possibilidade simples de controlar a utilização de apalpadores sem que seja necessário prescrever individualmente o apalpador para cada ponto de apalpação. A título de exemplo, a figura 4.7 mostra a aplicação de apalpadores em um círculo no plano XZ.

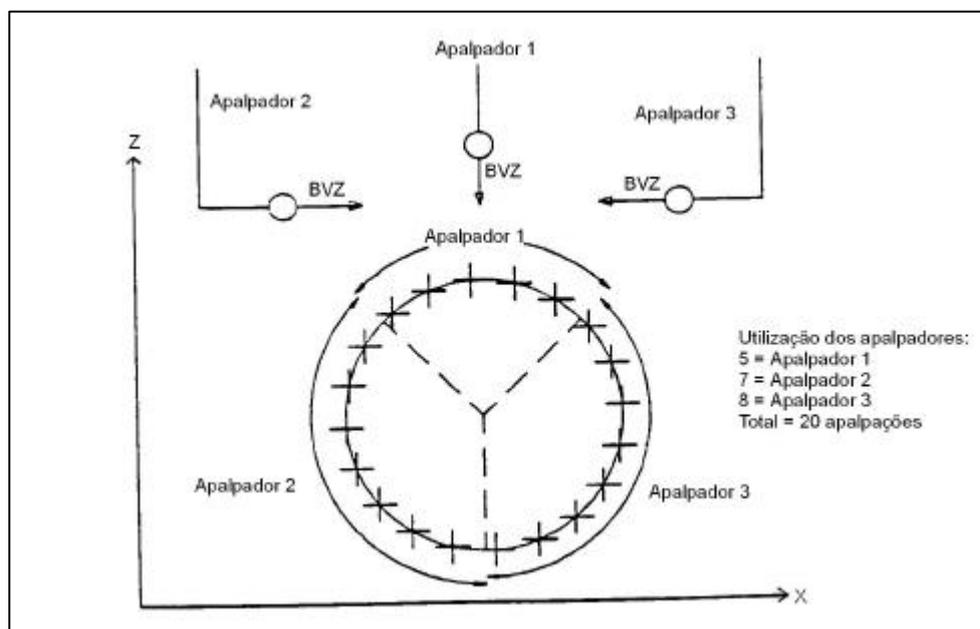


Figura 4.7 – Utilização de uma configuração de apalpadores em um círculo do plano XZ [66]

Também para a simulação deveriam ser empregados apalpadores como se fossem utilizados em uma medição real. Deve ser observado que o Megakal não reconhece

se partes do apalpador colidem com a peça ou se uma apalpação ocorre por dentro da peça. Entretanto, isto pode ser evitado na maioria das vezes por uma escolha conveniente das direções preferenciais de apalpação.

No relatório de medição são listados os apalpadores empregados com o número de apalpações e o maior ângulo ocorrido. Através disto é possível julgar a configuração de apalpadores e eventualmente repetir a simulação com outra configuração.

c) Geração dos elementos geométricos

Primeiro um elemento é selecionado e são feitas as entradas necessárias para a geração do elemento. Isto significa que são descritos a localização, a forma, o tamanho e a distribuição dos pontos. Em seguida, os pontos de medição nominais sobre a superfície da geometria são gerados a partir destas especificações. Os parâmetros necessários para a descrição de alguns elementos geométricos estão esclarecidos a seguir.

- **Distância (comprimento):** uma distância é definida pelo seu ponto final e pelo seu método de apalpação (uni ou bidirecional, interna ou externa - fig. 4.8). Este elemento pode ser usado na simulação da medição de um bloco padrão.

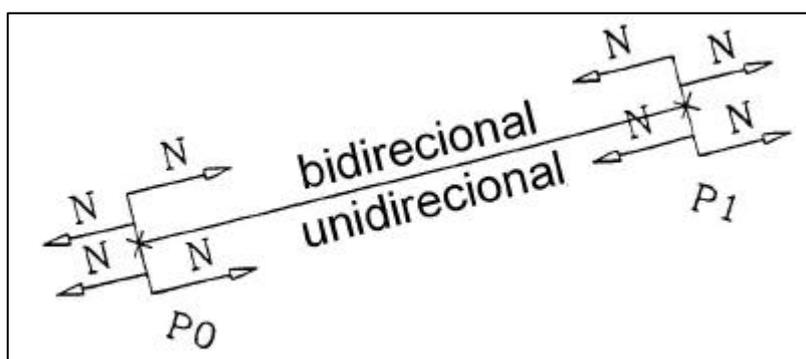


Figura 4.8 - Descrição de uma distância [66].

A distância é gerada pelo Megakal em qualquer posição no volume de medição da CMM, como é mostrado na figura 4.9. Nesta figura, o Megakal gerou uma distância que foi definida através de seus pontos terminais $P_1(200, 200, -100)$ e $P_2(300, 300, -200)$.

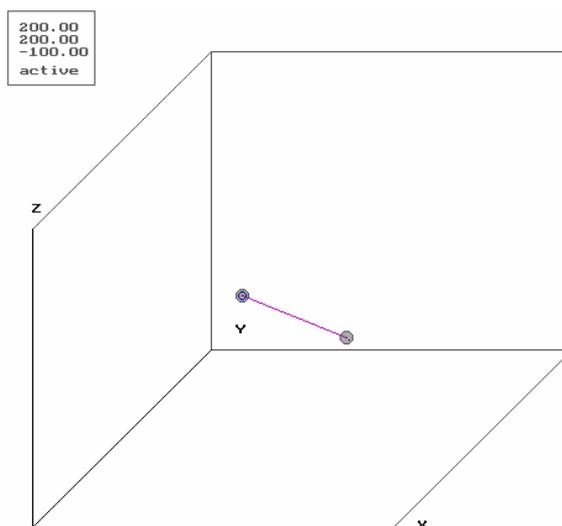


Figura 4.9 – Geração do elemento distância no Megakal.

- **Círculo:** um círculo de apalpação é descrito pelo seu centro P_0 , seu diâmetro D , sua orientação no espaço N e por uma malha de apalpações dW (figura 4.10), o círculo pode ser apalpado por dentro (furo) e por fora (eixo). Na definição deve ser especificado se a avaliação acontece em 2D ou 3D. São necessários no mínimo três pontos para compor um elemento médio na avaliação.

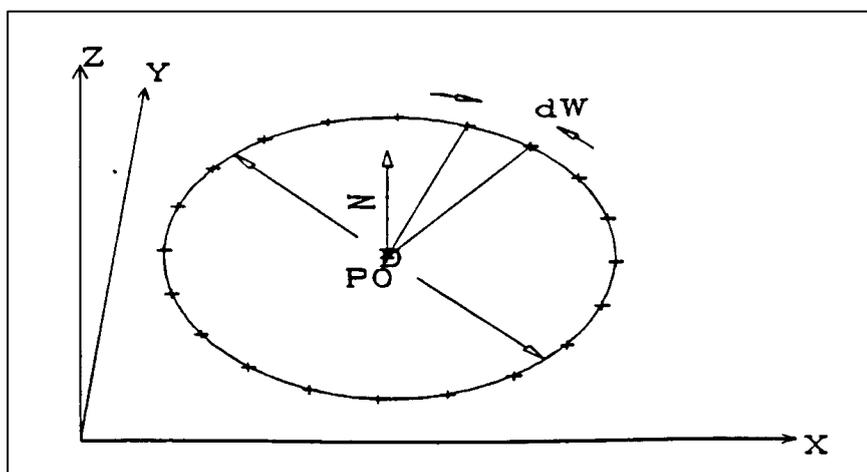


Figura 4.10 – Descrição de um círculo [66].

A figura 4.11 mostra o elemento círculo gerado pelo Megakal, com centro $P_0(200, 250, 0)$, diâmetro igual a 300 mm, orientado na direção do vetor normal $N(0, 1, 1)$ e com uma malha de apalpação definida por um intervalo dW igual a 5° .

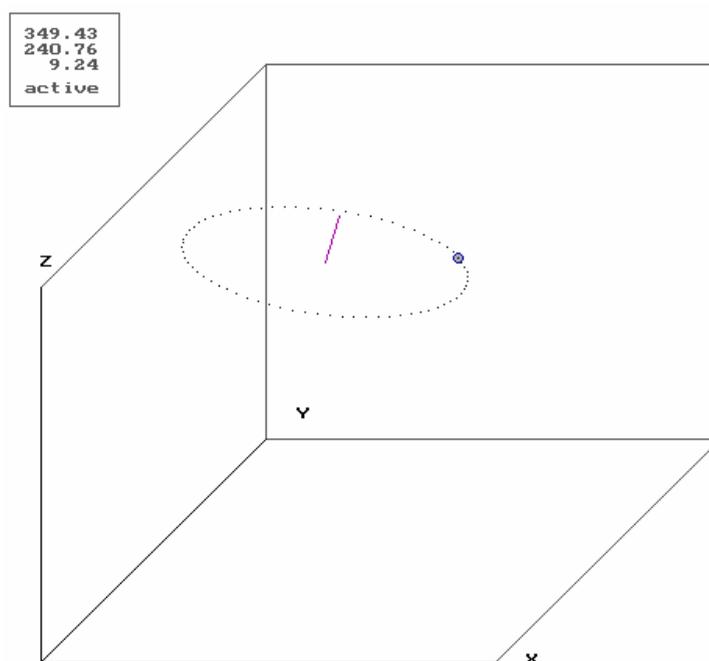


Figura 4.11 – Geração do elemento círculo no Megakal.

- **Esfera:** uma esfera é descrita pelo seu centro P_0 e pelo seu diâmetro D . A malha para a distribuição de pontos é determinada pelo azimute e elevação (figura 4.12). A distribuição dos seus pontos de medição pode ser pelos ângulos de azimute e de elevação. O ângulo de azimute é medido no plano XY , partindo do eixo X no sentido anti-horário. A elevação do plano XY na direção da calota superior ($+Z$) é positiva e, inversamente, negativa na direção da calota inferior. São necessários no mínimo 4 pontos para compor um elemento para a avaliação.

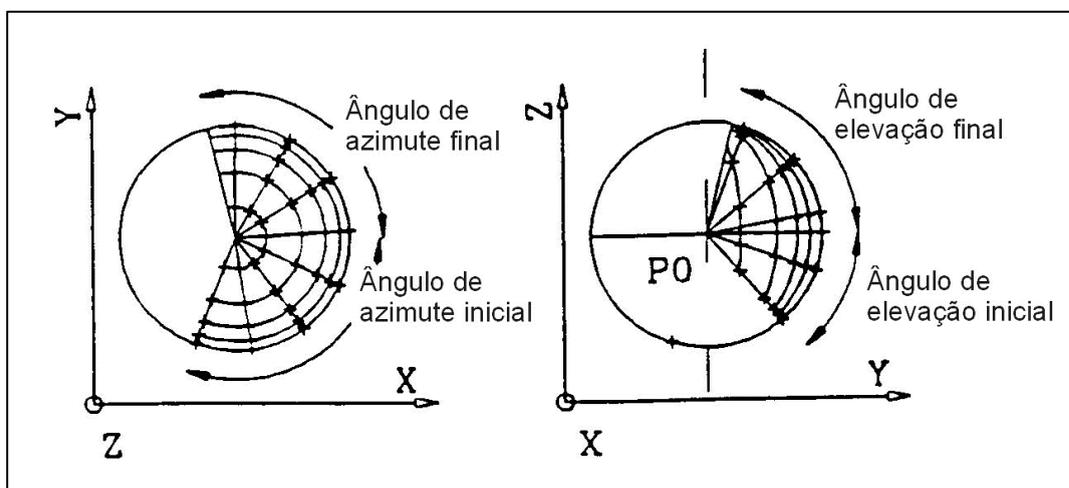


Figura 4.12 – Descrição de uma esfera [66].

Na figura 4.13, o centro da semi-esfera é P0(300, 200, 0) e seu diâmetro mede 350 mm. Os pontos são distribuídos uniformemente ao longo de toda a superfície esférica, em um ângulo de azimute de 0 a 360 graus e em um ângulo de elevação de -90 a +90 graus. No exemplo, para apalpar apenas o hemisfério superior, o limite de elevação inferior foi definido como 0 grau. A apalpação múltipla de um polo na geração dos pontos é evitada em qualquer caso.

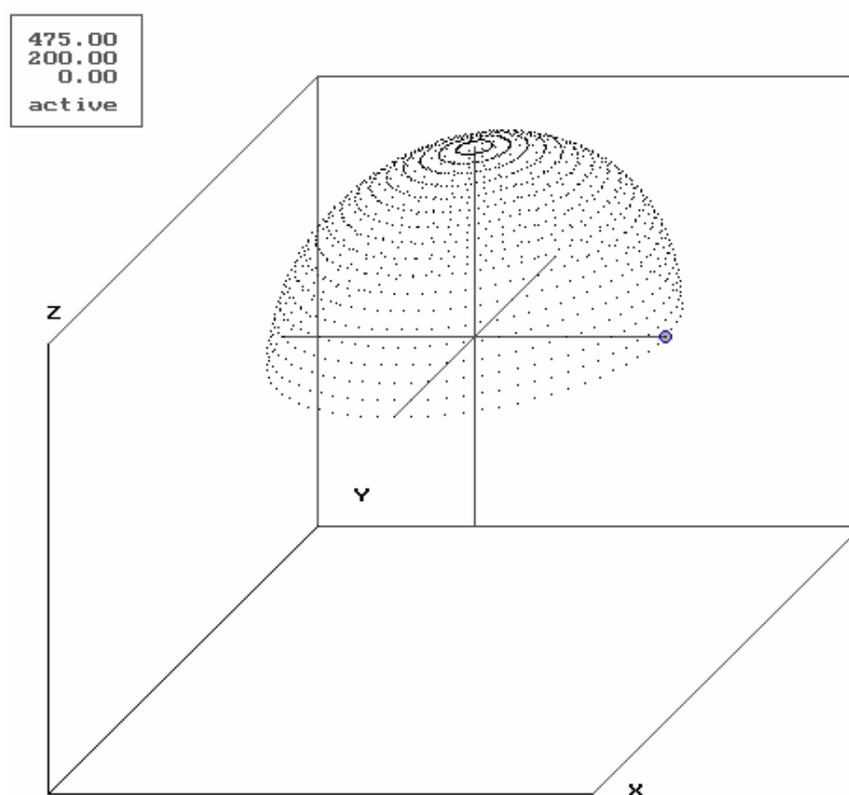


Figura 4.13 – Geração de uma semi-esfera no Megakal.

d) Resultado da simulação

O resultado propriamente é uma descrição dos elementos nominal e ajustado, e uma comparação entre eles. Uma análise estatística é emitida adicionalmente, de modo equivalente às especificações dos softwares de avaliação usuais. Entretanto, na interpretação da estatística deve-se considerar que o desvio padrão surge apenas através dos desvios de medição da CMM simulada, pois o elemento medido é ideal.

Juntamente com a comparação entre os elementos nominal e ajustado, é possível então tirar conclusões sobre a incerteza de medição da CMM na tarefa de medição.

Na figura 4.14 têm-se os resultados da simulação de uma medição de distância no Megakal, com os pontos de medição 1 e 2, e resultados de tendência, desvio padrão, incerteza de medição e desvio de forma:

- Distância = 173,20508 mm
- Tendência = -0,81 μm
- Desvio padrão = 0,37 μm
- Incerteza de Medição = 1,6 μm

■]		Evaluation 7			7=[1
Parameter		Nominal	Bias (aver. dev.)	Standard- deviation	Uncertainty 95% incl.bias
Point 1 of distance	X	300.00000	-0.00067	0.00028	0.00112
	Y	300.00000	-0.00049	0.00024	0.00082
	Z	-200.00000	0.00013	0.00013	0.00037
Offset				0.00026	0.00135
Point 2 of distance	X	200.00000	0.00008	0.00029	0.00061
	Y	200.00000	0.00011	0.00019	0.00036
	Z	-100.00000	0.00008	0.00015	0.00032
Offset				0.00014	0.00071
Distance		173.20508	-0.00081	0.00037	0.00159
Statistic of form deviation					
Number of points		64			
Standard deviation		0.00000 mm			
Max deviation		0.00000 mm			

Figura 4.14 - Relatório da simulação de uma distância no Megakal.

4.3 Método do Rebatimento

No método do rebatimento, os erros das medidas materializadas aparecem rebatidos [67-69]. Este método pode ser aplicado na calibração de réguas, esquadros de aço e granito, esquadros cilíndricos e placas de esferas e furos, permitindo separar erros sistemáticos.

4.3.1 Medição de retlineidade pelo método do rebatimento

A medição da retlineidade de uma régua pelo método do rebatimento é feita por uma rotação do objeto em torno do eixo de medição (fig. 4.15). Assumindo que o desvio de retlineidade da CMM é dado por $M(x)$ e o desvio de retlineidade da régua por $R(x)$, as indicações para as duas posições são:

$$I_1(x) = M(x) + R(x) \quad (4.1)$$

$$I_2(x) = -M(x) + R(x) \quad (4.2)$$

Onde:

$I_1(x)$ = Indicação do sistema de medição na posição 1.

$M(x)$ = Desvio de retilidade da CMM.

$R(x)$ = Desvio de retilidade da régua.

$I_2(x)$ = Indicação do sistema de medição na posição 2.

Então:

$$M(x) = [I_1(x) - I_2(x)]/2 \quad (4.3)$$

$$R(x) = [I_1(x) + I_2(x)]/2 \quad (4.4)$$

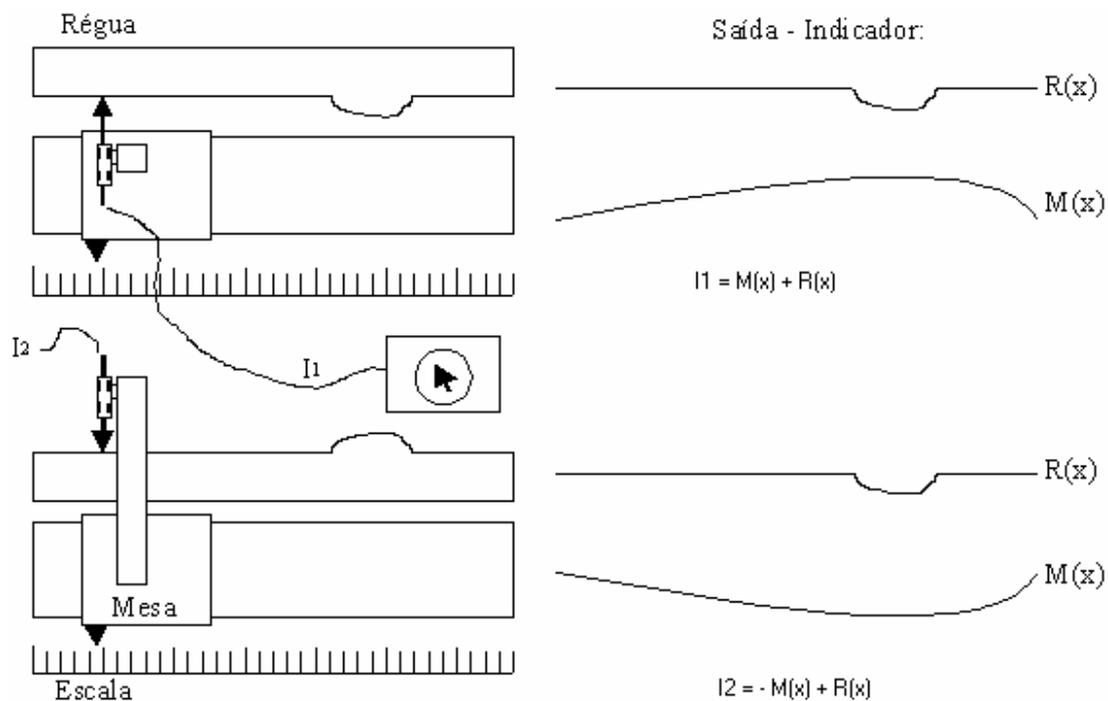


Figura 4.15 – Método do rebatimento – Medição de régua [69]

Para um melhor desempenho da calibração de réguas na CMM, a medição deve ser feita no plano horizontal evitando as influências da gravidade.

4.3.2 Medição de perpendicularidade pelo método do rebatimento

A calibração de um esquadro pelo método do rebatimento é mostrada esquematicamente na figura 4.16. Na figura, α é o desvio de perpendicularidade do eixo da máquina e β do esquadro, e as indicações nas duas posições são:

$$I_1 = a + b \quad (4.5)$$

$$I_2 = a - b \quad (4.6)$$

Onde:

I_1 = Indicação do sistema de medição na posição 1.

a = Desvio de perpendicularidade do eixo da CMM.

b = Desvio de perpendicularidade do esquadro.

I_2 = Indicação do sistema de medição na posição 2.

Então:

$$a = (I_1 + I_2)/2 \quad (4.7)$$

$$b = (I_1 - I_2)/2 \quad (4.8)$$

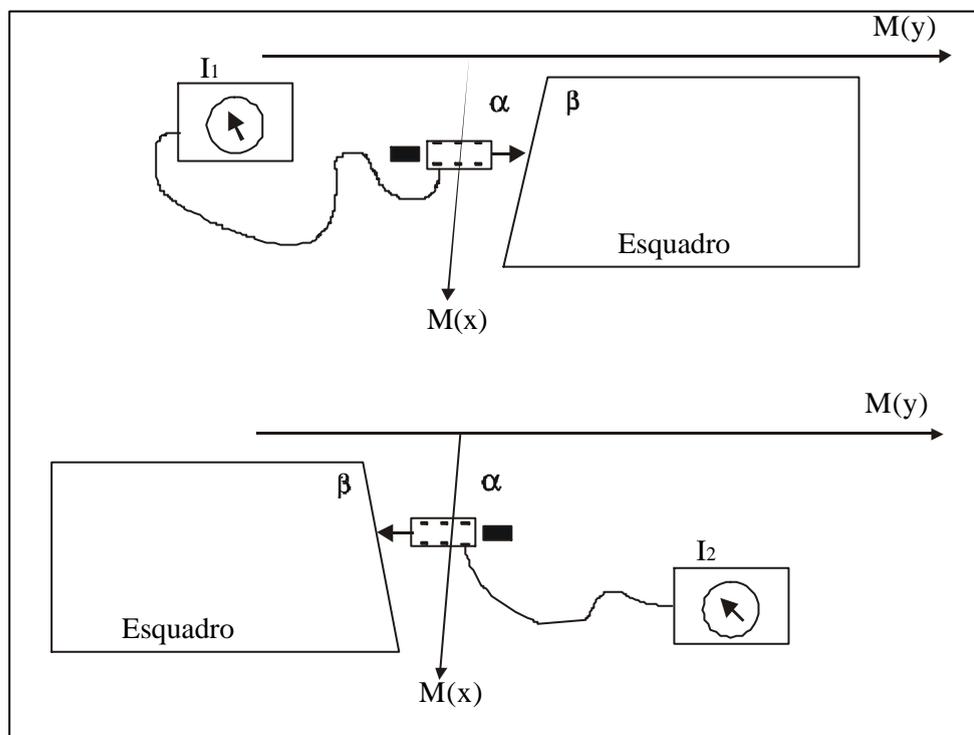


Figura 4.16 – Método do rebatimento – Medição de esquadro [69]

4.4 Método de Calibração por Comparação

No método de calibração por comparação, tem-se a determinação direta dos erros pela medição de um padrão semelhante à medida materializada a ser calibrada (fig. 4.17). Neste método, a CMM é reduzida a um comparador, mas que também introduz seus erros.

Os erros associados com os parâmetros da medida materializada devido à incerteza de medição da CMM (incluindo o software) podem ser determinados diretamente.

Devido à complexa estrutura de erros das CMMs, as calibrações deste tipo somente são válidas para medidas materializadas com essencialmente a mesma forma geométrica e tamanho do padrão de referência utilizado, medida na mesma localização e usando a mesma estratégia de medição.

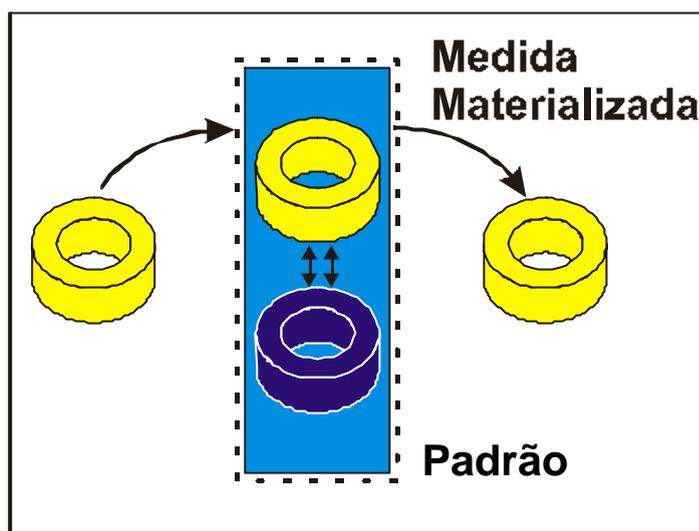


Figura 4.17 – Representação – Calibração Método da comparação / substituição [55]

Na figura 4.18 são apresentadas exigências para a calibração usando o princípio da comparação. Devido à grande variedade de tarefas de medições que pode ser executada na CMM, a lista destas exigências tem sido limitada às mais importantes.

O método pode ser estendido para satisfazer exigências práticas para:

- Intervalo de tempo significativo entre uma medida materializada e o padrão. Neste caso a incerteza de medição devido às variações das condições ambientais (principalmente temperatura) deve ser rigorosamente investigada. Isto pode ser feito pela medição do padrão de referência dentro de condições ambientais típicas, ou por meio de avaliação de incerteza. Em muitos casos pode ser necessário verificar a estabilidade da CMM no tempo.
- As medidas materializadas podem ser medidas em diferentes localizações dentro do volume de trabalho da CMM. Neste caso, é necessária uma avaliação em posições dentro do volume de trabalho, verificando como os erros geométricos da CMM influenciam os valores medidos.

PARÂMETRO	RECOMENDAÇÃO PARA MÁXIMA VARIAÇÃO
<ul style="list-style-type: none"> Características geométricas 	<ul style="list-style-type: none"> 10% - diferença nos comprimentos, ângulos, etc. Grandes diferenças necessitam de uma verificação experimental para o julgamento.
<ul style="list-style-type: none"> Exatidão da característica geométrica 	<ul style="list-style-type: none"> 50% - desvio da geometria matematicamente ideal (circularidade, planeza, etc.) com referência a incerteza de calibração requerida.
<ul style="list-style-type: none"> Calibração do padrão de referência 	<ul style="list-style-type: none"> Como requerido pelo balanço de incertezas
<ul style="list-style-type: none"> Equivalência das propriedades não geométricas (ex. elasticidade, dureza, textura superficial, massa) 	<ul style="list-style-type: none"> “suficientemente igual” para a aplicação
<ul style="list-style-type: none"> Equivalência da estratégia de medição e condições <ul style="list-style-type: none"> - Posição da medida materializada - Orientação da medida materializada objeto - “Offset” dos pontos medidos - Força de Medição - Configuração apalpadores - Sequência dos pontos medidos - Condições ambientais 	<ul style="list-style-type: none"> 10% da dimensão relevante do objeto ou 25 mm o que for maior, 5° * Dependente da “ondulação” da superfície ideal. 20% * 10% do comprimento do apalpador* Mesmos pontos e tarefa da medição Avaliada pelo balanço de incerteza ou experimentalmente
<ul style="list-style-type: none"> Máximo tempo transcorrido entre a calibração e a aplicação 	<ul style="list-style-type: none"> Dependente da tarefa e das condições ambientais

* Estes valores devem ser verificados experimentalmente na CMM para cada tarefa

Figura 4.18 – Exigências para a calibração na CMM pelo Método da Comparação [70]

Na figura 4.19, tem-se um exemplo de melhoria da exatidão na medição de diâmetros de calibradores anéis, quando se utiliza o método da comparação substituindo a medição direta em CMMs em ambiente industrial e laboratorial.

CMM1 em ambiente industrial	
Medição direta	Método da comparação
Tendência = - 6 μm	Tendência = 0,5 μm
CMM2 em ambiente laboratorial	
Medição direta	Método da comparação
Tendência = -1,4 μm	Tendência = 0,2 μm

Figura 4.19 – Comparação medição direta e método da comparação [67]

4.5 Avaliação da Incerteza de Medição na Calibração

A avaliação da incerteza de medição será baseada no “Guia para expressão da incerteza de medição” [18,71]. Para esta avaliação tem-se as seguintes etapas [18,71,72]:

- a) Determinar o modelo matemático que relaciona a grandeza de entrada com a saída:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4.9)$$

- b) Identificar todas as correções a serem feitas ao resultado de medição.
- c) Listar componentes sistemáticos da incerteza associada a correções e tratar efeitos sistemáticos não corrigidos como parcelas de incerteza.
- d) Atribuir valores de incertezas e distribuição de probabilidades com base em conhecimentos experimentais práticos ou teóricos.
- e) Calcular a Incerteza Padrão (u_i) para cada componente de incerteza;
- f) Calcular a Incerteza Combinada (u_c).
- g) Calcular a Incerteza Expandida (U).

4.5.1 Componentes de Incerteza – Calibração de Medidas Materializadas

Cada fonte de incerteza deve ser claramente identificada. Recomenda-se o uso de termos simples e que evitem interpretações ambíguas. Se for conveniente, um símbolo pode ser associado à fonte de incertezas.

Recomenda-se também explicitar a unidade em que os valores relativos à fonte de

incertezas serão expressos. Se esta unidade difere da unidade do mensurando, recomenda-se que seja também indicado o fator multiplicativo que converte o efeito da fonte de erro em termos de alteração da indicação do sistema de medição. Se esta relação não for linear, deve ser claramente apresentada no memorial de cálculo.

a) Incerteza da CMM - UCMM

Os efeitos desta fonte de incerteza são estimados tendo como base dados já existentes de uma calibração previamente realizada e apresentados no respectivo certificado. No método da comparação é considerada apenas a parcela independente do comprimento na incerteza de medição, a parcela relativa ao comprimento é compensada pela medição diferencial.

A incerteza da CMM pode ser obtida através da calibração da CMM com Placa de Esferas – Método CMM Virtual ou com padrão escalonado. Obtêm-se:

$$U_{CMM} = A + B.L \quad (4.10)$$

Onde:

- A = Parcela da incerteza de medição independente do comprimento.
- B = Parcela da incerteza de medição dependente do comprimento.
- L = Comprimento avaliado.

Considerando o Método da comparação para calibração de medidas materializadas:

$$U_{cmm} = \sqrt{(Iap_{1D})^2 + (Inl)^2 + (Ipos)^2} \quad (4.51)$$

Onde:

- Iap_{1D} = Incerteza de apalpação 1D (Medição segundo um dos eixos da CMM), obtida através de bloco padrão ≤ 30 mm.
- Inl = Incerteza devido a não linearidade da CMM, obtido através de resultado experimental do ensaio com laser interferométrico ou padrão escalonado.
- $Ipos$ = *Incerteza devido a diferença de posicionamento do padrão e da medida materializada no volume da CMM.*

Com base em ensaios realizados no Laboratório de Metrologia da Fundação CERTI, utilizando Laser interferométrico, pode-se considerar $I_{pos} = EL/2$, onde: EL - erro de linearidade

Quando o comprimento L da medida materializada é diferente do padrão e/ou posições diferentes no volume de medição, deve-se considerar o EL. Se os comprimentos são iguais posso eliminar o EL.

b) Incerteza de medição da temperatura da medida materializada

$$UT_{MM} = L_{MM} \alpha_{MM} \sqrt{\left(\frac{U_{term}}{2}\right)^2 + \left(\frac{VT}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (4.16)$$

Onde:

UT_{MM} = Incerteza da medição da temperatura da medida materializada.

L_{MM} = Comprimento da medida materializada.

α_{MM} = Coeficiente de expansão térmica da medida materializada.

U_{term} = Incerteza expandida do termômetro.

VT = Variação da temperatura, considerada nos casos onde for significativa a variação no tempo.

$$VT = T_{Máx} - T_{Mín} \quad (4.17)$$

Onde:

$T_{Máx}$ = Temperatura máxima.

$T_{Mín}$ = Temperatura mínima.

c) Incerteza de medição da temperatura do padrão

$$UT_P = L_P \alpha_P \sqrt{\left(\frac{U_{term}}{2}\right)^2 + \left(\frac{VT}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (4.14)$$

Onde:

UT_P = Incerteza da medição da temperatura do padrão.

L_P = Comprimento do padrão.

α_P = Coeficiente de expansão térmica do padrão.

U_{term} = Incerteza expandida do termômetro.

VT = Variação da temperatura.

d) Incerteza devido a não correção das temperaturas - UTemp

As variações de temperatura do padrão e da medida materializada em relação à temperatura de referência podem ser avaliadas previamente para diferentes serviços de calibração, tornando desnecessária a medição durante a calibração. A incerteza devido a não correção das temperaturas é dada pela equação:

$$U_{Temp} = L_P \cdot \alpha_P \Delta T_P + L_{MM} \cdot \alpha_{MM} \Delta T_{MM} \quad (4.15)$$

Onde:

- U_{Temp} = Incerteza da medição devido a não correção das temperaturas.
- L_P = Comprimento do padrão.
- α_P = Coeficiente de expansão térmica do padrão.
- L_{MM} = Comprimento da medida materializada.
- α_{MM} = Coeficiente de expansão térmica da medida materializada.
- ΔT_P = Variação das temperaturas do padrão e da medida materializada em relação à temperatura de referência (20 °C).
- ΔT_{MM}

e) Incerteza dos coeficientes de expansão térmica - Ucoef

A incerteza dos coeficientes de expansão térmica é calculada da seguinte forma:

$$U_{coef} = \sqrt{(L_P \cdot U_{\alpha_P} \cdot \Delta T_P)^2 + (L_{MM} \cdot U_{\alpha_{MM}} \cdot \Delta T_{MM})^2} \quad (4.16)$$

Onde:

- L_P = Comprimento do padrão.
- U_{α_P} = Incerteza do coeficiente de expansão térmica do padrão.
- ΔT_P = Variação da temperatura do padrão em relação à temperatura de referência.
- L_{MM} = Comprimento da medida materializada.
- $U_{\alpha_{MM}}$ = Incerteza do coeficiente de expansão térmica da medida materializada
- ΔT_{MM} = Variação da temperatura da medida materializada em relação à temperatura de referência.

f) Incerteza do padrão de referência - Up

A incerteza do padrão de referência é obtida do certificado de calibração.

g) Instabilidade de fixação da medida materializada - Ufix

A incerteza devida à instabilidade da fixação da medida materializada pode ser estimada por experiência.

h) Estabilidade da CMM no tempo – UestCMM

Em função do tempo transcorrido após a calibração, as características da CMM podem se degradar. A instabilidade pode ocorrer em função de variação nas condições ambientais e de outros fatores no decorrer do tempo. A avaliação é feita com base em informações do certificado de calibração.

i) Incerteza padrão tipo A – u_A

A avaliação da incerteza – u_A fica definida como o desvio padrão experimental da média das indicações da CMM, então:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.17)$$

Onde:

s = Desvio padrão.
 n = Número de medidas.

k) Incerteza Combinada – u_c

A incerteza combinada (u_c) da influência das várias fontes de incerteza é estimada a partir das incertezas padrão de cada fonte de erro por:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (4.18)$$

Onde:

u_i = incerteza padrão associada a i -ésima fonte de incerteza.

l) Incerteza Expandida – U

Na engenharia é comum o trabalho com níveis da confiança de 95%. Para atingir níveis de confiança de aproximadamente 95%, a incerteza combinada - u_c deve ser multiplicada pelo fator de abrangência (o fator de Student), calculando-se a incerteza expandida (U).

Assim:

$$U = k \cdot u_c \quad (4.19)$$

Onde:

u_c = Incerteza Combinada.
 k = Fator de abrangência.

O número de graus de liberdade efetivos (n_{ef}) é obtido através da equação de Welch-Satterthwaite:

$$\mathbf{n}_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{\mathbf{n}_i}} \quad (4.20)$$

Onde:

- u_c = Incerteza Combinada.
- u_i = Incerteza padrão associada a i -ésima fonte de incerteza
- \mathbf{n}_i = Número de graus de liberdade associado a i -ésima fonte de incerteza
- N = número total de fontes de incertezas analisadas.

Da aplicação da Equação 4.20 resulta o número de graus de liberdade efetivo. O valor de “ k ” para nível de confiança de 95,45% pode então ser obtido da figura 4.20.

\mathbf{n}_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,23	2,20	2,17

\mathbf{n}_{ef}	18	20	25	30	35	40	45	50	60	80	100	∞
k	2,15	2,13	2,11	2,09	2,07	2,06	2,06	2,05	2,04	2,03	2,02	2,00

Figura 4.20 - Fator de abrangência em função do número de graus de liberdade

Para valores fracionários de \mathbf{n}_{ef} , interpolação linear pode ser usada se $\mathbf{n}_{ef} > 3$. Alternativamente o valor de k corresponde ao valor de \mathbf{n}_{ef} imediatamente inferior na tabela pode ser adotado.

Assim, finalmente a incerteza expandida pode ser calculada por:

$$U_{95\%} = k \cdot u_c \quad (4.21)$$

No próximo capítulo serão apresentados estudos de casos utilizando os métodos da CMM Virtual, da comparação e do rebatimento e avaliações das incertezas para calibrações de medidas materializadas em CMM.

Capítulo 5

Estudo de Casos e Desempenho Efetivo da Calibração de Medidas Materializadas em CMM

Neste capítulo são apresentadas estratégias para a calibração de medidas materializadas em CMM, com avaliação de incertezas de medição (fontes de incertezas, equacionamentos), tempos de preparação e execução na calibração de medidas materializadas.

Foram desenvolvidas estratégias para a calibração de blocos padrão, calibradores anéis, padrões escalonados, esquadros, utilizando métodos da CMM Virtual, comparação e rebatimento fazendo comparações com os métodos convencionais. A viabilização da calibração de medidas materializadas na CMM depende das dimensões das medidas materializadas, incerteza de medição e tempo de calibração.

5.1 Simulações de medições de distâncias e diâmetros para calibração de medidas materializadas utilizando CMM Virtual

O estudo de caso que será apresentado nesta seção utilizará o método da CMM Virtual na calibração de medidas materializadas. Neste estudo a finalidade é a de apresentar a determinação da incerteza de medição específica de tarefas, o levantamento dos erros da CMM será considerado como determinístico, ou seja, os dados obtidos neste passo serão considerados somente para efeito de “input” no software da CMM Virtual.

A máquina que foi objeto do estudo é uma CMM tipo portal, instalada no Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI, Florianópolis – SC, possuindo as seguintes características:

- Fabricante: Zeiss
- Modelo: ZMC - 550
- Identificação: RC - 0542
- Volume de medição:
Eixo X - 0 a 550 mm
Eixo Y - 0 a 500 mm
Eixo Z - 0 a 450 mm
- Resolução: 0,1 μm
- Incertezas de medição 1D e 3D, especificado pelo fabricante segundo VDI/VDE 2617:

$$U_{1D} = (1,0 + L/400) \mu\text{m}$$

$$U_{3D} = (1,5 + L/250) \mu\text{m}$$

Onde: L é um comprimento qualquer em mm.

Foi realizada uma série de simulações de medições de distâncias e diâmetros utilizando o software Megakal do PTB. Estas simulações foram feitas com o intuito de se conhecer melhor o comportamento metrológico da máquina de medir por coordenadas para calibração de medidas materializadas. Através da análise dos resultados que será feita neste caso, será possível afirmar qual a melhor localização dentro do volume de medição da máquina para se realizar a calibração (Fig. 5.1).

Para que os resultados das simulações sejam os mais abrangentes possíveis, optou-se por simular medições de distâncias e de diâmetros de 100 mm, para analisar o comportamento da máquina para pequenos comprimentos e de 400 mm para analisar o comportamento para grandes comprimentos dentro do volume de medição.

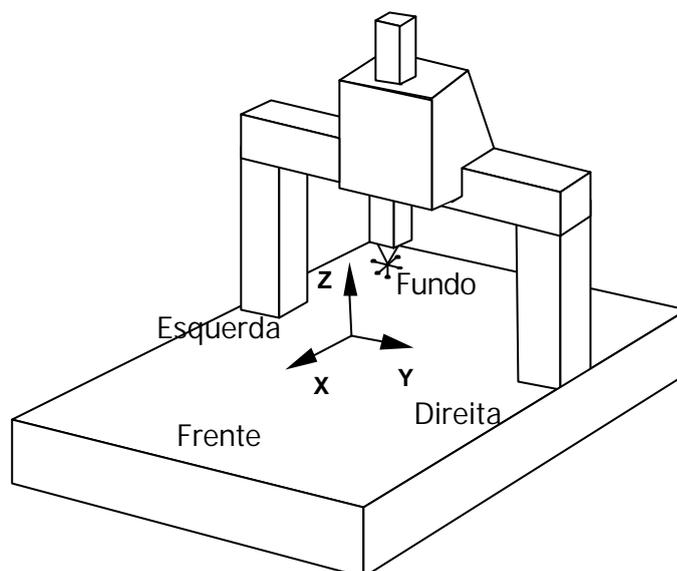


Figura 5.1 – Localizações na CMM para escolha das posições de calibração

5.1.1 Simulações de medições distâncias de 100 mm

Foram realizadas simulações de distâncias (32 ciclos de repetições) tomando-se o cuidado de utilizar diversos setores do volume da CMM (Fig. 5.2).

Distâncias 100 mm	A partir do ponto	Eixo X		Eixo Y		Eixo Z	
		Incerteza (mm)	Até ponto	Incerteza (mm)	Até ponto	Incerteza (mm)	Até ponto
	(0,0,0)	1,7	(100,0,0)	1,1	(0,100,0)	1,3	(0,0,-100)
	(200,0,0)	2,2	(300,0,0)	1,4	(200,100,0)	1,3	(200,0,-100)
	(300,400,0)	1,9	(400,400,0)	1,0	(300,300,0)	1,2	(300,400,-100)
	(100,0,-300)	1,3	(200,0,-300)	2,5	(100,100,-300)	1,2	(100,0,-200)
	(400,0,-300)	2,0	(500,0,-300)	1,3	(400,100,-300)	1,8	(400,0,-200)
	(100,200,-300)	1,2	(200,200,-300)	1,5	(100,300,-300)	1,5	(100,200,-200)
	(300,200,-300)	2,4	(400,200,-300)	1,4	(300,300,-300)	1,3	(300,200,-300)
	(100,350,-300)	1,6	(200,350,-300)	0,8	(100,450,-300)	1,8	(100,350,-200)
Valor máximo (mm)		2,4		2,5		1,8	
Valor mínimo (mm)		1,2		0,8		1,2	
Desvio padrão (mm)		0,4		0,5		0,2	
		Melhor Posição: embaixo, meio, fundo		Melhor Posição: embaixo, direita, fundo		Melhor Posição: alto, direita, frente	

Figura 5.2 - Resultados da simulação de medição de distâncias de 100 mm em diferentes localizações na CMM

Para distâncias paralelas ao eixo X, o melhor local da CMM para se efetuar medições é a parte próxima à mesa, no meio e no fundo, pois a incerteza encontrada é menor. Para distâncias paralelas ao eixo Y, a menor incerteza aparece próxima à mesa, na direita e no fundo. Por fim, para distâncias paralelas ao eixo Z, a melhor posição é no alto, na direita e na frente.

Percebeu-se que para distâncias verticais (eixo Z), a variação da posição

praticamente não interfere na incerteza (Desvio padrão = 0,2 μm). Já em relação aos eixos X e Y, o local onde é feita a medição tem influência na incerteza.

Como conclusão final, tem-se que a melhor posição para se efetuar a medição de distâncias de 100 mm, na CMM em estudo, é colocá-las paralelas ao eixo Y, próxima à mesa, na direita e no fundo.

5.1.2 Simulações de medições distâncias de 400 mm

Foram realizadas simulações de medições de distâncias de 400 mm (Fig. 5.3). Destas, foram feitas simulações de distâncias paralelas ao eixo X, paralelas ao eixo Y e paralelas ao eixo Z. Nestas simulações, tomou-se o cuidado de escolher o apalpador com a direção de apalpação mais apropriada para cada medição das distâncias.

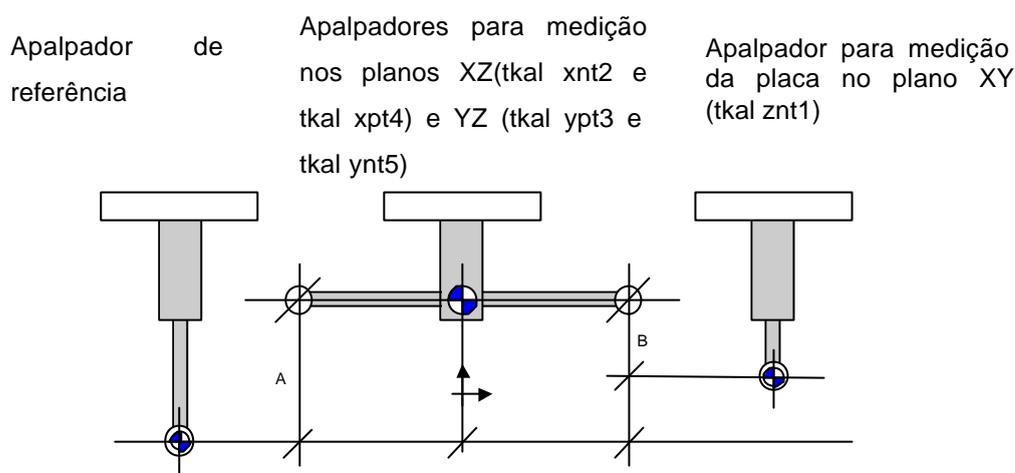
Distâncias 400 mm	A partir do ponto	Eixo X		Eixo Y		Eixo Z	
		Incerteza (mm)	Até ponto	Incerteza (mm)	Até ponto	Incerteza (mm)	Até ponto
Apalpador tkal ZN1	(50,300,-300)	3,0	(450,300,-300)				
	(50,30,-300)	2,9	(450,30,-300)				
	(50,490,-300)	3,0	(450,490,-300)				
	(300,100,-300)			2,0	(300,500,-300)		
	(60,100,-300)			1,9	(60,500,-300)		
	(450,100,-300)			2,1	(450,500,-300)		
Apalpador tkal XNT2	(300,300,-325)					1,0	(300,300,75)
Apalpador tkal xPT4	(300,300,-325)					1,2	(300,300,75)
Apalpador tkal YPT3	(300,300,-325)					0,9	(300,300,75)
Apalpador tkal ynt5	(300,300,-325)					0,9	(300,300,75)
Valor máximo (mm)		3,0		2,1		1,2	
Valor mínimo (mm)		2,9		1,9		0,9	
Desvio padrão (mm)		0,04		0,09		0,13	
		Melhor Posição: embaixo, esquerda		Melhor Posição: embaixo, fundo		Melhor Apalpador: tkal ynt5	

Figura 5.3 - Resultados da simulação de medição de distâncias de 400 mm em diferentes localizações na CMM

Para distâncias em X, o melhor local para se efetuar medições é na posição próxima à mesa e na esquerda. Apesar disso, a incerteza desta posição comparada com as das posições da esquerda e da direita é praticamente a mesma. Esta diferença corresponde a um desvio padrão de 0,04 μm .

A medição de distâncias paralelas ao eixo Y tem o mesmo comportamento das que são paralelas ao eixo X: a diferença entre as incertezas é pequena (0,09 μm). Sem levarmos este fato em consideração, pode-se afirmar que a melhor posição se encontra próxima à mesa, no fundo da CMM.

Com relação às simulações de distâncias verticais, em vez de variar suas posições dentro do volume da CMM, variou-se os apalpadores (fig.5.4). Com isso, descobriu-se que o melhor apalpador para medir distâncias verticais é o que toca a peça no sentido -Y (tkal ynt5, com comprimento da haste, $L = 135$ mm e diâmetro do sensor, $\varnothing = 10$ mm).



Apalpadores com comprimento da haste de 135 mm e diâmetro do sensor de 10 mm:

tkal znt1: Sentido negativo, - Z = -135 mm

tkal xnt2: Sentido negativo, - X = -135 mm

tkal xpt4: Sentido positivo, X = 135 mm

tkal ypt3: Sentido positivo, Y = 135 mm

tkal ynt5: Sentido negativo, - Y = -135 mm

Figura 5.4 - Disposição dos apalpadores da CMM utilizados na calibração

Em termos gerais, a incerteza de medição de uma distância de 400 mm é bem menor quando colocada na posição vertical. Deste modo, recomenda-se fazer medições de distâncias na posição vertical, no meio da mesa da CMM com o apalpador na orientação Y.

5.1.3 Simulações de medições diâmetros de 100 mm

A medição de diâmetro de círculos é realizada, diretamente ou no software de simulação, com pelo menos três pontos de apalpação. Através das posições destes pontos, é possível então calcular o diâmetro do círculo em questão. Dentro disto, as simulações, com 32 ciclos de repetições, foram feitas para cada posição do círculo

com 4, 36 e 120 pontos de apalpação (Fig.5.5). Para 4 pontos de apalpação, o círculo é tocado pelo apalpador a cada 90°. Para 36 pontos de apalpação, o círculo é tocado a cada 10°. Analogamente, para 120 pontos de apalpação, o círculo é tocado a cada 3°.

Após a realização das simulações, conclui-se que não vale a pena apalpar o círculo em mais de 36 pontos, uma vez que a incerteza reduz pouco. Para medições que não exijam uma pequena incerteza de medição, aconselha-se medir o diâmetro do círculo através da apalpação de 4 pontos, para medições que exijam pequena incerteza de medição, aconselha-se utilizar no máximo 36 pontos de apalpação.

Diâmetros 100 mm	Centro	Plano	Incerteza (mm)			Apalpador	
			4 pts apalp.	36 pts apalp.	120 pts apalp.		
	(200,200.-300)	XY	1,5	1,4	1,4	tkal zn1	
	(400,100.-300)		1,6	1,4	1,4		
	(400,400.-300)		1,5	1,5	1,5		
	(100,250.-300)	YZ	1,9	1,7	1,6	tkal xnt2	
	(100,250.-250)		1,7	1,6	1,6		
	(250,250.-250)		1,7	1,6	1,6		
	(350,100.-250)		1,4	1,4	1,3		
	(350,100.-250)		1,6				tkal xpt4
	(350,400.-250)		1,5				tkal xnt2
	(350,400.-250)		1,6				tkal xpt4
	(100,250.-250)	XZ	1,4	1,3		tkal ynt5	
	(250,250.-250)		1,3	1,0			
	(400,100.-250)		1,2	1,1			
	(400,400.-250)		1,2	1,1			
	(400,400.-250)		1,3				tkal ypt3
Valor máximo (mm)			1,9	1,7	1,6		
Valor mínimo (mm)			1,2	1,0	1,3		
Desvio padrão (mm)			0,2	0,2	0,1		
			Melhor Posição: embaixo, meio, meio, plano XZ, apalpador tkal ynt5				

Figura 5.5 – Resultados da simulação de medição de diâmetro de 100 mm em diferentes localizações na CMM

As simulações foram feitas com os círculos paralelos a cada um dos planos na máquina (XY, YZ, XZ), e dentro destes planos variava-se a posição dentro do volume da CMM. Concluiu-se que diâmetros de círculos medidos paralelamente ao plano XZ, usando-se 4 pontos de apalpação, na posição frontal e próxima à mesa de medição têm incertezas menores que nas outras posições (1,2 μm). Assim, aconselha-se medir diâmetros de círculos na posição em questão, quando utilizados 4 pontos de apalpação.

Para diâmetros medidos com a utilização de 36 pontos de apalpação, o plano que possibilitou uma incerteza menor foi também o XZ, no meio e próximo à mesa da CMM. A incerteza encontrada neste local foi de 1,0 μm .

5.1.4 Simulações de medições de diâmetros de 400 mm

Para a simulação da medição de círculos de 400 mm, não foram mais utilizados 120 pontos de apalpação, porque concluiu-se no item anterior que seu uso é inviável. No restante, foram utilizados os mesmos critérios das simulações de círculos de 100 mm de diâmetro (Fig. 5.6).

Diâmetros 400 mm	Centro	Plano	Incerteza (mm)		Apalpador
			4 pts apalp.	36 pts apalp.	
	(250,250,-300)	XY	2,2	1,9	tkal zn1
	(250,250,-200)		1,9	1,9	
	(250,250,-100)		2,0	1,8	
	(100,250,-130)	YZ	2,3	2,3	tkal xnt2
	(250,250,-130)		2,4	2,3	
	(350,250,-130)		2,5	2,3	
	(250,100,-130)	XZ	1,5	1,4	tkal xpt4
	(250,250,-130)		1,6	1,5	tkal ynt5
	(250,400,-130)		1,7	1,8	tkal ypt3
				1,6	tkal ynt5
				2,0	tkal ypt3
Valor máximo (mm)			2,5	2,5	
Valor mínimo (mm)			1,5	1,4	
Desvio padrão (mm)			0,37	0,37	

Melhor Posição:
esquerda, plano XZ,
apalpador tkal ynt5

Figura 5.6 - Resultados da simulação de medição de diâmetro de 400 mm em diferentes localizações na CMM

Para círculos paralelos ao plano XY, foram simuladas 3 posições diferentes: próxima à mesa de medição, em uma altura média e no alto. Para este plano, a menor incerteza é encontrada em uma altura média.

As incertezas na medição de diâmetros de círculos paralelos ao plano YZ foram as maiores encontradas, e por isso esta posição não é recomendada. Já em relação ao plano XZ, as incertezas foram as menores encontradas. Com o círculo localizado na esquerda, paralelo ao plano XZ foi encontrada uma incerteza de medição de 1,5 μm ,

a menor de todas.

Em termos gerais, tanto para 4 pontos de apalpação como para 36 pontos de apalpação, o local da máquina que oferece a menor incerteza é a parte esquerda, como círculo paralelo ao plano XZ.

5.2 Calibração de Blocos Padrão em CMM

Neste caso, é apresentada a calibração de um bloco padrão pelos métodos da CMM Virtual e comparação na CMM, comparando os resultados com a calibração utilizando o software de simulação Megakal e com a calibração numa Máquina de Abbé.

5.2.1 Estratégia de calibração

Um bloco padrão de aço com comprimento nominal de 500 mm, foi calibrado na CMM com CNC especificada no item 5.1, com incerteza de medição unidirecional especificada pelo fabricante de $U_{1D} = (1 + L/400) \mu\text{m}$.

No método da CMM Virtual, através da simulação, escolheu-se a melhor posição para calibração dos blocos padrão dentro do volume de medição da CMM.

No método da comparação, os blocos padrão de referência e a calibrar são dispostos paralelamente ao eixo X da CMM (Fig. 5.7). Estabeleceu-se como referência para os blocos uma de suas respectivas faces de medição. O comprimento do bloco padrão a calibrar foi determinado medindo-se os pontos centrais de suas faces, após o ajuste da CMM com o bloco padrão de referência.

a) Avaliação da Incerteza de Medição

Para a avaliação da incerteza de medição, determinou-se:

- Incerteza da CMM - U_{cmm}

Pelo método da comparação à incerteza da CMM é dada por:

$$U_{cmm} = \sqrt{(Iap_{1D})^2 + (Inl)^2 + (Ipos)^2}$$

Onde:

Iap_{1D} = Incerteza de apalpação 1D = 0,5 μm

Inl = Incerteza devido à não linearidade da CMM é $0,6 \mu\text{m}$, como o bloco padrão a calibrar tem o mesmo comprimento do bloco padrão de referência, $Inl = 0,0 \mu\text{m}$.

$Ipos$ = Incerteza devido à diferença de posicionamento do bloco padrão de referência e do bloco padrão a calibrar no volume da CMM = $Inl/2 = 0,0 \mu\text{m}$.

$$\text{Então: } U_{cmm} = \sqrt{0,5^2 + 0,0^2 + 0,0^2} = 0,5 \text{ mm}$$

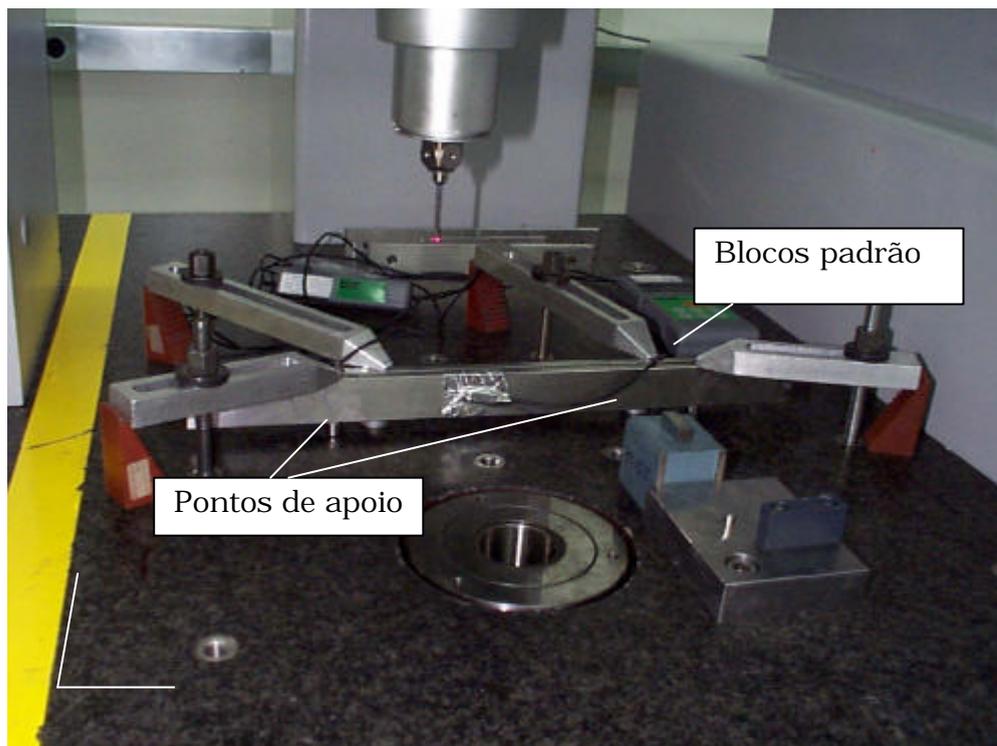


Figura 5.7 – Calibração do bloco padrão de 500 mm na CMM

– **Incerteza da medição do bloco padrão provocada pela medição da temperatura do bloco padrão de referência - UT_{BPref}**

A incerteza da medição da temperatura do bloco de referência é dada por:

$$UT_{BPref} = L_{BPref} \cdot \alpha_{BPref} \cdot U_{Term}$$

Onde:

L_{BPref} - Comprimento do bloco padrão de referência = $500,00190 \text{ mm}$

α_{BPref} - Coeficiente de expansão térmica do bloco padrão de referência = $11,5 \mu\text{m/mK}$

U_{Term} - Incerteza dos termômetros = $0,03 \text{ } ^\circ\text{C}$

Portanto:

$$UT_{BPref} = 0,17 \mu\text{m}$$

– **Incerteza da medição do bloco padrão provocada pela medição da temperatura do Bloco padrão à calibrar - UTBP**

A incerteza da medição da temperatura do bloco padrão a calibrar é dada por:

$$UT_{BP} = L_{BP} \cdot \alpha_{BP} \cdot U_{Term}$$

Onde:

L_{BP} - Comprimento bloco padrão = 499,99992 mm

α_{BP} - Coeficiente de expansão térmica do bloco padrão = 11,5 $\mu\text{m}/\text{mK}$

U_{Term} - Incerteza dos termômetros = 0,03 ° C

Portanto:

$$UT_{BP} = 0,17 \mu\text{m}$$

– **Incerteza da Medição devido à não correção das temperaturas - UTemp**

A incerteza da medição devido à não correção das temperaturas é dada por:

$$U_{Temp} = (L_{BPref} \cdot \alpha_{BPref} + L_{BP} \cdot \alpha_{BP}) \Delta T$$

Onde:

L_{BPref} - Comprimento do bloco padrão de referência

α_{BPref} - Coeficiente de expansão térmica do bloco padrão de referência

L_{BP} - Comprimento do bloco padrão a calibrar

α_{BP} - Coeficiente de expansão térmica do bloco padrão a calibrar

ΔT - Variação das temperaturas do bloco padrão de referência e bloco padrão a calibrar em relação à temperatura de referência (20 °C).

Houve correção das temperaturas, então:

$$U_{Temp} = 0,0 \mu\text{m}$$

– **Incerteza da medição do bloco padrão devido à incerteza dos coeficientes de expansão térmica - Ucoef**

A incerteza da medição dos coeficientes de expansão térmica é dada por:

$$U_{coef} = \sqrt{(L_{BPref} \cdot U\alpha_{BPref} \cdot \Delta T_{BPref})^2 + (L_{BP} \cdot U\alpha_{BP} \cdot \Delta T_{BP})^2}$$

Onde:

$U\alpha_{BPref}$ - Incerteza do coeficiente de expansão térmica do bloco padrão referência = $1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

$U\alpha_{BP}$ - Incerteza do coeficiente de expansão térmica do bloco padrão a calibrar = $1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

ΔT_{BPref} , ΔT_{BP} – Variação das temperaturas do bloco padrão de referência e bloco padrão a calibrar em relação à temperatura de referência (20 °C).

Neste caso, as variações das temperaturas são desprezíveis, portanto:

$$U_{coef} = 0,0 \mu\text{m}$$

– **Incerteza da Medição do Bloco padrão de referência - UBPref**

A incerteza da medição do bloco padrão de referência é obtido do certificado de calibração: $U_{BPref} = 0,5 \mu\text{m}$

– **Estabilidade de fixação dos blocos padrão - UFixBP**

Através de avaliações experimentais no Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI, conclui-se que a incerteza devido à instabilidade de fixação é desprezível neste caso:

$$U_{FixBP} = 0,0 \mu\text{m}$$

– **Estabilidade da CMM no tempo - UEstCMM**

Em função do tempo transcorrido após a calibração e informações do certificado de calibração, as características da CMM não se degradaram. Então, a instabilidade da CMM no tempo foi considerada desprezível:

$$U_{EstCMM} = 0,0 \mu\text{m}$$

– **Incerteza padrão do Tipo A - uA**

A avaliação da incerteza padrão do Tipo A é dada por:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$u_A = \frac{1,342 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{5}} = 0,00006\text{mm} \text{ ou } u_A = 0,06\text{mm}$$

– **Incerteza Expandida (U)**

A partir da incerteza combinada e do fator de abrangência, na planilha de cálculo de incertezas (figura 5.8), chegou-se à incerteza expandida:

$$U = k \cdot u_c, \quad U = 0,7 \mu\text{m}$$

Serviço nº:	PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS					Comp.(mm):	500,00
0						V. temp.:	0,3
Símbolo	COMPONENTES DE INCERTEZA	(mm)	Prob.	Divisor	C	u [mm]	V
U_{cmm}	Incerteza da CMM	0,00050	Normal	2,000	1	0,00025	50
U_{TBPref}	Incerteza da Medição da Temperatura do BP ref	0,00017	Normal	2,000	1	0,00009	50
U_{TBP}	Incerteza da Medição da Temperatura do BP ref	0,00017	Normal	2,000	1	0,00009	50
U_{temp}	Incerteza devido à não Correção das Temperaturas	0,00000	Normal	2,000	1	0,00000	50
U_{coef}	Incerteza dos Coeficientes de Expansão Térmica	0,00000	Retangular	1,732	1	0,00000	Infinito
U_{BP}	Incerteza do Bloco Padrão Longo de Referência	0,00050	Normal	3,000	1	0,00017	50
$U_{Fix.BP}$	Estabilidade de Fixação dos BP	0,00000	Retangular	1,732	1	0,00000	Infinito
$U_{est.CMM}$	Estabilidade da CMM no Tempo	0,00000	Retangular	1,732	1	0,00000	Infinito
u_A	Incerteza padrão do tipo A	0,00006	Normal	1,000	1	0,00006	4
U_c	Incerteza Combinada		Normal			0,00033	119
U_{95}	Incerteza Expandida		k = 2,02			0,0007	

Figura 5.8 – Planilha de cálculo das incertezas

b) Avaliação dos Resultados

Na figura 5.9 tem-se o resultado da calibração do bloco padrão. Inicialmente fez-se a correção da tendência da CMM, através da medição do bloco padrão de referência. O erro do meio encontrado para o bloco padrão é de - 0,08 μm com incerteza expandida de 0,7 μm . A variação do comprimento (VC) encontrada é de 1,8 μm , valor grande para blocos padrão, ou seja neste caso não se deve fazer a medição de VC na CMM.

Medição do bloco padrão de referência			
Média das Indicações (MI) = 500,00148 mm			
Valor verdadeiro convencional (VVC) = 500,0019 mm			
Tendência (Td) = MI-VVC = - 0,00042 mm			
Correção para CMM = 0,42 μm			
Medição do bloco padrão a calibrar			
MI = 499,9995 mm			
Média da Indicação corrigida = MIc = 499,99950 + 0,00042 = 499,99992 mm			
Erro do meio (EM) = MIc - Comprimento Nominal = 499,99992 - 500,0000 = - 0,08 μm			
Comprimento efetivo (mm)	Erro do meio - EM (mm)	Incerteza Expandida U(mm)	Fator de Abrangência - k
499,9999	-0,08	0,7	2,03

Figura 5.9 - Resultado da calibração do bloco padrão

5.2.2 Comparação da Calibração de Blocos Padrão utilizando Software de Simulação, CMM e Máquina de Abbé

Neste caso será apresentada a comparação dos resultados na calibração de blocos padrão - BP utilizando:

- Software de simulação – CMM Virtual,
- CMM – medição direta e por comparação,
- Máquina de Abbé.

O bloco padrão avaliado possui certificado de calibração, com a seguinte característica:

Comprimento do bloco padrão = $500,00032 \pm 0,00012$ mm

a) Simulação da calibração do bloco padrão na CMM

Utilizando o software Megakal desenvolvido pelo PTB, simulou-se a medição de comprimento e sua incerteza, considerando as componentes de erros geométricos e incerteza de apalpação obtidos na calibração da CMM.

Definiu-se a configuração do apalpador utilizado (diâmetro do sensor de 5 mm, comprimento do apalpador de 60 mm com haste de aço) e posição do bloco padrão no volume da CMM. Os resultados de 3 simulações, com 32 ciclos de repetições, estão apresentados na figura 5.10.

Simulação	Tendência – Td (μm)	Desvio padrão, s (μm)	Incerteza de Medição (μm)
1	-0,20	0,7	1,8
2	-0,02	0,6	1,1
3	-0,20	0,8	1,5
Média	-0,14	0,7	1,5

Figura 5.10 - Resultado da simulação para bloco padrão de 500 mm

b) Calibração do bloco padrão na CMM

- Medição direta

A medição direta do bloco padrão foi realizada na mesma posição e mesma configuração do apalpador da simulação. As fontes de incerteza consideradas são:

- Incerteza da CMM – $U_{1D} = (1+L/400) \mu\text{m} = 2,2 \mu\text{m}$
- Resolução da CMM – $U_{\text{Res}} = R/2 = 0,1/2 = 0,05 \mu\text{m}$
- Diferença de temperatura entre CMM e BP

$$U_{Temp} = (L_{CMM} \cdot \alpha_{CMM} + L_{BP} \cdot \alpha_{BP}) \Delta T$$

Onde:

$$L_{CMM}=L_{BP}= 0,5 \text{ m}$$

$$\alpha_{CMM}= 7,8 \text{ } \mu\text{m/mK}$$

$$\alpha_{BP}= 11,5 \text{ } \mu\text{m/mK}$$

$$\Delta T= 0,03 \text{ K}$$

$$\text{Portanto: } U_{Temp} = 0,29 \text{ } \mu\text{m}$$

- A estabilidade de fixação do bloco padrão pode ser considerada desprezível
- Incerteza do tipo A - $s=0$, $U_A= 0$

Assim o resultado da calibração fica:

$$\text{Média das indicações, } MI = 499,99936 \text{ mm}$$

$$\text{Tendência, } Td = MI - VVC = -0,96 = - 1,0 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\text{Incerteza expandida} = 2,3 \text{ } \mu\text{m}$$

- Medição por comparação

Na medição por comparação, as fontes de incerteza consideradas foram:

- Incerteza da CMM;
- Incerteza da Medição da Temperatura do Bloco padrão de referência;
- Incerteza da Medição da Temperatura do Bloco padrão a calibrar;
- Incerteza da Medição devido à não correção das temperaturas;
- Incerteza da Medição dos coeficientes de expansão térmica;
- Incerteza da Medição do Bloco padrão de referência;
- Estabilidade de fixação dos blocos padrão;
- Estabilidade da CMM no tempo;
- Incerteza padrão do Tipo A.

A incerteza expandida encontrada na calibração do bloco padrão por este método é de 0,7 μm .

c) Calibração do bloco padrão na Máquina de Abbé

Neste caso a calibração do bloco padrão foi realizada pelo método da comparação utilizando a Máquina de Abbé (Fig. 5.11).

As fontes de incerteza consideradas na calibração utilizando a Máquina de Abbé são:

- Incerteza da Máquina de Abbé - $U_{\text{Abbé}} = 0,22 \mu\text{m}$
- Incerteza do bloco padrão de referência - U_{BPref}
Do certificado de calibração, $U_{\text{BPref}} = 0,4 \mu\text{m}$
- Variação da temperatura ambiente - $U_{\text{temp}} = 0,06 \mu\text{m}$
- Erro de resolução da Máquina de Abbé - $U_{\text{Re}} = 0,05 \mu\text{m}$
- Erro de alinhamento do bloco padrão a calibrar - U_{AIBP}
Estimado em $2x$ Resolução da Máquina de Abbé, $U_{\text{AIBP}} = 0,2 \mu\text{m}$
- Erro de alinhamento do bloco padrão de referência - $U_{\text{AIBPref}} = 0,2 \mu\text{m}$
- Incerteza padrão tipo A - $u_A = 0,04 \mu\text{m}$

Portanto, a incerteza expandida calculada é : $U = 0,6 \mu\text{m}$.



Figura 5.11 - Calibração do bloco padrão na Máquina de Abbé

d) Avaliação dos resultados na calibração

Na figura 5.12 tem-se a comparação dos resultados de calibração, utilizando a simulação do método da CMM Virtual, medição direta na CMM, calibrações por comparação na CMM e na Máquina de Abbé. Podem-se observar valores próximos para tendência e incerteza de medição na simulação e nos métodos por comparação

na CMM e na Máquina de Abbé. Nota-se também a redução significativa do tempo de calibração utilizando a CMM. No tempo de calibração está incluído o tempo de preparação dos sistemas de medição e padrões. A Máquina de Abbé necessita de um tempo de preparação maior em função da troca de dispositivos e fixação dos blocos de referência e a calibrar.

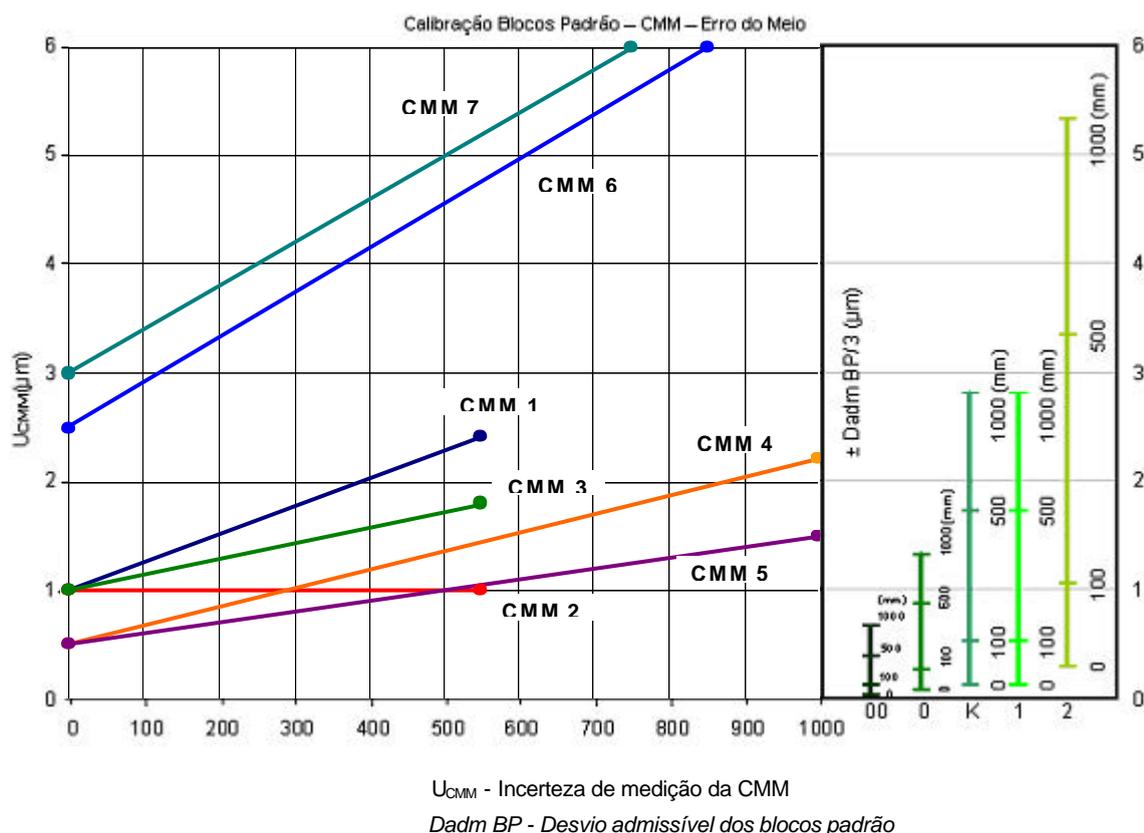
	Média das Indicações (mm)	Tendência (mm)	Incerteza de medição (mm)	Tempo de calibração (min)
Simulação	500,0000	-0,14	1,5	0,5
Medição direta na CMM	499,99936	-1,0	2,3	3
Medição por Comparação na CMM	500,0002	-0,12	1,0	7,5
Medição por comparação na Máquina de Abbé	500,0002	-0,12	0,6	9

Figura 5.12 - Comparação da calibração de um bloco padrão na CMM

Para escolha de uma CMM para calibração de blocos padrão tem-se na figura 5.13 a relação entre as incertezas de medição de CMMs tipo portal e 1/3 do desvio admissível dos blocos padrão, onde pode ser avaliada qual CMM deve ser utilizada, em função das classes de erros e comprimentos dos blocos padrão.

A CMM1 é uma máquina com CAA, com incerteza de medição $U1D = (1+L/400) \mu\text{m}$, a CMM2 é a CMM1 quando se utilizam os Métodos da CMM Virtual e da comparação e a CMM3 é a CMM1 com o método da CMM Virtual, $U1D = (1+L/670) \mu\text{m}$. A CMM4 é uma máquina com $U1D = (0,5+L/670) \mu\text{m}$ e a CMM5 é a CMM4 utilizando o método da comparação. A CMM6 é uma máquina com incerteza $U1D = (2,5+L/250) \mu\text{m}$ e CMM7 é uma CMM manual e sem CAA com $U1D = (3,0+L/250) \mu\text{m}$.

Pode-se observar, por exemplo, que com a CMM2, CMM que utiliza os métodos da CMM virtual e da comparação, pode-se determinar o erro do meio de blocos padrão da classe 0 acima de 500 mm, classe K e 1 acima de 200 mm e classe 2 acima de 90 mm. Com a CMM7 só é possível determinar o erro do meio de blocos classe 2, acima de 400mm.



CMM 1 - Especificação do fabricante: $U1D = (1 + L / 400) \mu m$.

CMM 2 - CMM 1 utilizando o Método da CMM virtual e da comparação: $U1D = 1,0 \mu m$.

CMM 3 - CMM 1 com método CMM Virtual: $U1D = (1 + L/670) \mu m$.

CMM 4 - Especificação do fabricante: $U1D = (0,5 + L/600) \mu m$

CMM 5 - CMM 4 utilizando o Método da comparação: $U1D = (0,5 + L / 1000) \mu m$

CMM 6 - Especificação do fabricante: $U1D = (2,5 + L / 250) \mu m$

CMM 7 - CMM manual e sem CAA (Especificação do fabricante): $U1D = (3,0 + L / 250) \mu m$

Figura 5.13 – Relação entre Incerteza de Medição de CMMs e Desvio admissível dos blocos padrão

5.3 Calibração de Padrões Escalonados na CMM

Neste caso é apresentada a estratégia para calibração de padrões escalonados utilizando a CMM com procedimento de avaliação da incerteza de medição, e análise dos resultados, mostrando a viabilidade de se utilizar a CMM na calibração. Outros detalhes sobre a calibração de padrões escalonados em CMM podem ser vistos em [73].

Os métodos da CMM Virtual e da comparação foram utilizados com blocos padrão para calibração da coluna de ressaltos e do fuso de um padrão escalonado com tambor micrométrico (fig.2.5).

5.3.1 Procedimento / Estratégia de Calibração

Com o método da CMM Virtual através de simulações determinou-se a região dentro do volume de medição da CMM com menor incerteza de medição de comprimento

Na calibração de padrões escalonados na CMM, os erros podem ser determinados pela medição das distâncias entre os ressaltos do padrão escalonado a calibrar, comparando os resultados com uma medição de referência sobre um padrão de comprimento. A medição do padrão de referência fornece diretamente os erros associados com a tarefa de medição específica. Faz-se a avaliação e correção de erros utilizando blocos padrão de referência calibrados. Com os blocos padrão posicionados paralelamente ao padrão escalonado na CMM (fig.5.14), alguns erros do processo de medição podem ser determinados e corrigidos/eliminados na calibração do padrão escalonado.

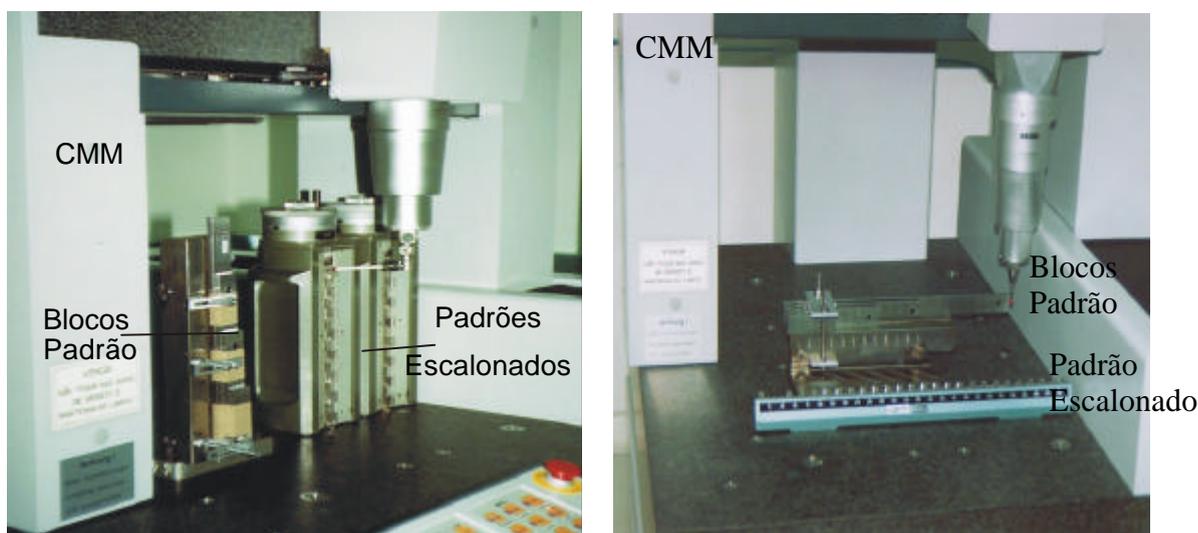


Figura 5.14 - Calibração de padrões escalonados (com tambor micrométrico e horizontal) utilizando CMM e blocos padrão

O procedimento inicia-se com a medição de um bloco de aproximadamente 10 mm, onde se compensam os erros sistemáticos advindos da flexão e raio do apalpador da CMM. Após isso, um bloco de comprimento aproximadamente igual ao comprimento do padrão escalonado, é medido de modo a compensar os erros devidos, principalmente, às escalas da CMM.

Dependendo do tipo de padrão escalonado, o procedimento sofre alterações. Na calibração de padrão escalonado com tambor micrométrico o alinhamento do sistema coordenado é feito em relação ao eixo Z da CMM. Na medição dos ressaltos, um programa CNC executa os seguintes passos: apalpa um ponto sobre a mesa da CMM, apalpa no centro das faces inferiores dos ressaltos de baixo para cima, as faces superiores de cima para baixo e novamente a mesa da CMM. Para o fuso micrométrico apalpa-se a face superior do último ressalto, sobre a qual define-se o zero. Os pontos de medição dependem do curso do fuso.

Posiciona-se o fuso manualmente nas posições de medição, sendo que o sensor continua apalpando o último ressalto durante toda calibração.

Na calibração de padrão escalonado horizontal, o alinhamento do sistema coordenado é feito em relação aos eixos X ou Y, através da medição de pontos sobre a superfície de referência e a lateral do primeiro ressalto. Nos ressaltos mede-se um ponto no centro das faces de medição, inclusive no ressalto de referência.

5.3.2 Avaliação da Incerteza de Medição

Na avaliação da incerteza de medição têm-se as estimativas da incerteza padrão (u) por meios estatísticos (avaliação tipo A) e por meio não estatísticos (avaliação tipo B). Na calibração do padrão escalonado com tambor micrométrico devem ser consideradas as seguintes fontes de incertezas:

a) Repetitividade da indicação da CMM (Incerteza padrão tipo A - u_A)

A avaliação da incerteza padrão tipo A - u_A fica definida como o desvio padrão experimental da média das indicações da CMM.

b) Incerteza da CMM (Avaliação tipo B)

Os efeitos desta fonte de incerteza são estimados tendo como base dados já existentes de uma calibração previamente realizada e apresentados no respectivo certificado. No método da comparação é considerada apenas a parcela independente do comprimento na incerteza de medição. A parcela relativa ao comprimento é compensada pela medição diferencial com o bloco padrão de referência.

c) Estabilidade do zero da CMM

Pode ocorrer em função de variação nas condições ambientais e de outros fatores no decorrer do tempo. A avaliação é feita com base no certificado de calibração.

d) Resolução do tambor micrométrico (Avaliação tipo B)

O valor da incerteza expandida, o tipo de distribuição e o fator de abrangência dependem se o mostrador do padrão escalonado é analógico ou digital. Para calibração com indicador digital, adota-se como caso geral o valor de incerteza padrão igual ao incremento digital dividido por raiz de 3 (Distribuição retangular).

Para calibração com indicador analógico, assume-se como valor de incerteza, devida à divisão da escala, a própria resolução adotada e distribuição retangular.

e) Incerteza da medição devido à não correção das temperaturas

Incertezas devido às diferenças de temperatura entre o padrão escalonado, o bloco padrão e a temperatura de referência 20°C (U_T).

$$U_T = L_{BP} \cdot \alpha_{BP} \cdot \Delta T_{BP} + L_{PE} \cdot \alpha_{PE} \cdot \Delta T_{PE}$$

Onde:

L_{BP} - Comprimento do bloco padrão

L_{PE} - Comprimento do padrão escalonado

α_{BP} - Coeficiente de expansão térmica do bloco padrão

α_{PE} - Coeficiente de expansão térmica do padrão escalonado

ΔT_{BP} , ΔT_{PE} - Variações das temperaturas do bloco padrão e padrão escalonado em relação à temperatura de referência 20°C.

f) Estabilidade de fixação do bloco padrão e do padrão escalonado

A incerteza devida à instabilidade da fixação do bloco padrão de referência e o padrão escalonado pode ser determinado por avaliação experimental.

5.3.3 Aplicação - Calibração de Padrão Escalonado com Tambor Micrométrico na CMM

Na calibração de um padrão escalonado de 275 mm de comprimento utilizou-se uma CMM tipo portal e os blocos padrão de 10 mm e 350 mm (fig.5.15), com as

seguintes incertezas expandidas (U), para um fator de abrangência $k=2$ e nível de confiança 95 %:

- CMM, $U=\pm 1,0 \mu\text{m}$, considerando o método da comparação;
- Blocos Padrão de 350 e 10 mm, com $U= \pm 0,09 \mu\text{m}$ e $\pm 0,06 \mu\text{m}$, respectivamente.

As condições laboratoriais durante a calibração foram de $(20,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}$ para temperatura ambiente e $(50 \pm 10) \%$ para a umidade relativa do ar.

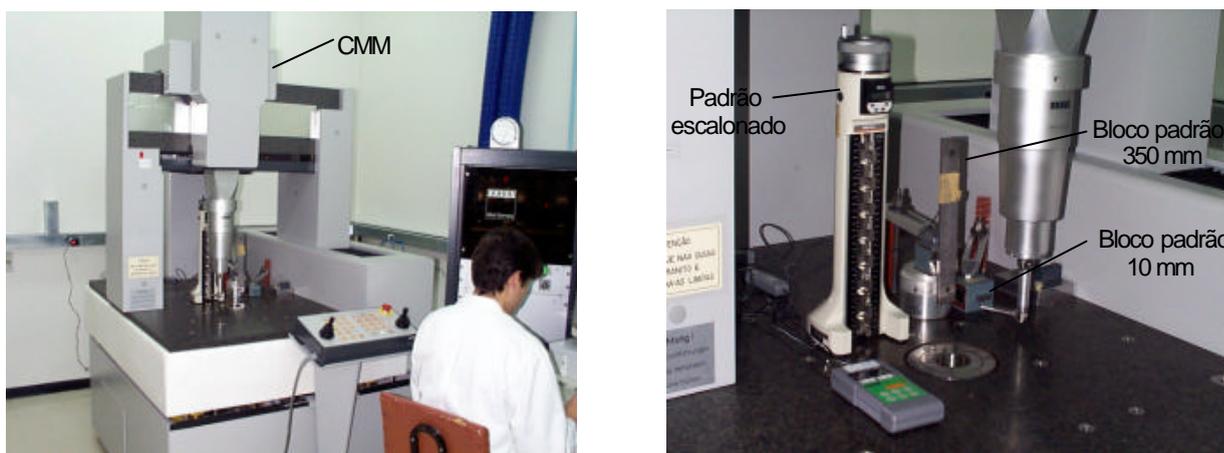


Figura 5.15 - Calibração de padrão escalonado com tambor micrométrico utilizando CMM, bloco padrão de 350 mm e bloco padrão de 10 mm.

a) Estimativa da incerteza no fuso micrométrico

O padrão escalonado foi colocado sobre a mesa da CMM na posição vertical. A posição do zero foi definida na face superior do último ressalto, com o mostrador analógico do tambor micrométrico indicando zero. O tambor micrométrico foi posicionado manualmente por valores crescentes e decrescentes a fim de se avaliar a histerese e foram realizados 3 ciclos de medição. A identificação e a contribuição das fontes de incerteza, para 27 mm, estão apresentadas na figura 5.16, sendo que u é a incerteza padrão e u_{eff} é o grau de liberdade efetivo.

O valor da flutuação (estabilidade) do zero (U_{Flut}) foi estimado experimentalmente em $\pm 0,2 \mu\text{m}$ e a estabilidade de fixação do bloco padrão ($U_{\text{Fix,BP}}$) foi estimada em $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Portanto, considerando as fontes de incerteza, tem-se a Incerteza Combinada (u_c):

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} = 0,92 \mu\text{m}$$

E a Incerteza Expandida (U), para 27 mm, sendo $u_{\text{eff}} = 22$, $k = 2,12$:

$$U = k \cdot u_c = 2,0 \text{ mm}$$

Símbolo	COMPONENTES DE INCERTEZA		DISTR. DE PROBABILIDADES		C _i	u _i ± [mm]	u _i ou u _{eff}
	FONTES	VALOR ± [mm]	TIPO	DIVISOR			
U_{CMM}	Incerteza da CMM	0,0010	Normal	2	1	0,0005	50
U_{Res}	Incerteza devida à Resolução do Parafuso	0,0010	Retangular	1,7321	1	0,0006	infinito
$U_{Dif.Temp}$	Diferença de Temp. entre Paraf. e Escala CMM	****	****	****	****	****	****
U_{BP10}	Incerteza do Bloco Padrão de 10 mm	****	****	****	****	****	****
U_{Flut}	Flutuação do Zero	0,0002	Retangular	1,7321	1	0,0001	infinito
$U_{Fix.BP}$	Estabilidade de fixação do BP	0,0001	Retangular	1,7321	1	0,0001	infinito
U_{Fix}	Estabilidade da Fixação do Padrão Escalonado	****	****	****	****	****	****
U_A	Incerteza Padrão Tipo A	0,0005	Normal	1,000	1	0,0005	2
u_c	INCERTEZA COMBINADA		NORMAL			0,00092	22
U	INCERTEZA EXPANDIDA		NORMAL K= 2,12			0,0020	

OBSERVAÇÕES:
 A incerteza de medição apresentada é a maior da faixa de medição, calculada no ponto 27 mm.
 **** : Fonte Desprezível.

Figura 5.16 - Avaliação das incertezas de medição do fuso micrométrico do padrão escalonado na posição 27 mm

b) Estimativa da incerteza na coluna de ressaltos

O fuso micrométrico foi posicionado em 25 mm, de modo que o ressalto inferior ocupasse essa posição. As alturas do padrão escalonado foram medidas em relação à face superior do primeiro ressalto (50 mm, face de referência). A posição de cada face foi determinada pela apalpação de um ponto aproximadamente em seu centro e foram realizados três ciclos de medição. A identificação e a contribuição das fontes de incerteza estão apresentadas na figura 5.17 para 250 mm.

Considerando a diferença de temperatura entre o padrão escalonado e o bloco Padrão ($U_{Dif.Temp.}$) de 0,15 K, tem-se:

$$U_{Dif.Temp.} = \Delta L = L \Delta_a \Delta T, \text{ para o aço } \Delta_a = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}.$$

Para a maior incerteza da faixa de medição (250 mm):

$$U_{Dif.Temp.} = 0,0004 \text{ mm}$$

Símbolo	COMPONENTES DE INCERTEZA		DISTR. DE PROBABILIDADES		C ⁱ	u _i ± [mm]	u _i ou u _{eff}
	FONTES	VALOR ± [mm]	TIPO	DIVISOR			
U_{CMM}	Incerteza da CMM	0,0010	Normal	2	1	0,0005	50
$U_{Dif.Temp}$	Diferença de Temp. entre BP e Padrão Esc.	0,0004	Retangular	1,7321	1	0,0002	infinito
U_{BP10}	Incerteza do Bloco Padrão de 10 mm	****	****	****	****	****	****
U_{BP}	Incerteza do Bloco Padrão de 350 mm	****	****	****	****	****	****
$U_{Flut.}$	Flutuação do Zero	0,0002	Retangular	1,7321	1	0,0001	infinito
$U_{Fix.BP}$	Estabilidade de fixação do BP	0,0001	Retangular	1,7321	1	0,0001	infinito
U_{Fix}	Estabilidade da Fixação do Padrão Escalonado	****	****	****	****	****	****
u_A	Incerteza Padrão Tipo A	****	****	****	****	****	****
u_c	INCERTEZA COMBINADA		NORMAL			0,00057	82
U	INCERTEZA EXPANDIDA		NORMAL K= 2,03			0,0012	

OBSERVAÇÕES:
A incerteza de medição apresentada é a maior da faixa de medição, calculada no ponto 250 mm.
**** : Fonte Desprezível.

Figura 5.17 - Avaliação das incertezas de medição da coluna de ressaltos – face superior do padrão escalonado para a posição 250 mm

Portanto, considerando as fontes de incerteza, tem-se a Incerteza Combinada (u_c) para 250 mm:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} = 0,57 \text{ mm}$$

E a Incerteza Expandida (U) para $u_{\text{eff}} = 82$, $k = 2,03$: $U = k \cdot u_c = 1,2 \text{ mm}$

A avaliação das fontes de incerteza da coluna de ressaltos – face inferior do padrão escalonado pode ser feita de forma semelhante ao item anterior.

c) Correção e incerteza de medição em toda faixa de medição

Nas figuras 5.18 e 5.19 tem-se o resultado da calibração do padrão escalonado, apresentando-se as correções das indicações e as incertezas de medição expandidas (U) para os fatores de abrangências (k) associados a toda faixa de medição para a coluna de ressaltos e para o fuso micrométrico. As referências para os ressaltos são 50 mm para a face superior e 25 mm para a face inferior. Um sinal negativo na correção indica que a face de referência (superior ou inferior) da coluna de ressaltos está posicionada abaixo do valor nominal, em relação à base. Um sinal positivo indica o inverso.

INDICAÇÃO NO SMC [mm]	CORREÇÃO [mm]	U +/- [mm]	k
Coluna de Ressaltos - Face Superior			
50	0,0000	0,0011	2,04
100	-0,0015	0,0011	2,04
150	-0,0040	0,0011	2,04
200	-0,0056	0,0011	2,04
250	-0,0060	0,0012	2,03
Coluna de Ressaltos - Face Inferior			
25	0,0000	0,0011	2,04
75	-0,0013	0,0011	2,04
125	-0,0036	0,0011	2,04
175	-0,0048	0,0011	2,04
225	-0,0055	0,0012	2,04
275	-0,0059	0,0012	2,03

Figura 5.18 - Correção e incerteza de medição para a coluna de ressaltos.
Onde: SMC - Sistema de medição a calibrar - Padrão Escalonado

INDICAÇÃO NO SMC [mm]	MÉDIA DAS INDICAÇÕES NO SMP [mm]	CORREÇÃO [mm]	U +/- [mm]	k
2,0	2,0012	0,0012	0,0016	2,00
4,5	4,5003	0,0003	0,0016	2,00
7,1	7,1042	0,0042	0,0016	2,00
9,6	9,6042	0,0042	0,0016	2,00
12,2	12,1918	-0,0082	0,0016	2,00
14,7	14,6914	-0,0086	0,0016	2,00
17,3	17,2851	-0,0149	0,0017	2,03
19,8	19,7847	-0,0153	0,0017	2,02
22,4	22,3858	-0,0142	0,0017	2,02
24,9	24,8846	-0,0154	0,0017	2,03
27,0	26,9987	-0,0013	0,0020	2,12
27,0	26,9983	-0,0017	0,0016	2,00
24,9	24,8864	-0,0136	0,0016	2,00
22,4	22,3863	-0,0137	0,0016	2,00
19,8	19,7865	-0,0135	0,0016	2,00
17,3	17,2867	-0,0133	0,0016	2,00
14,7	14,6928	-0,0072	0,0016	2,00
12,2	12,1931	-0,0069	0,0016	2,00
9,6	9,6041	0,0041	0,0017	2,02
7,1	7,1044	0,0044	0,0016	2,00
4,5	4,4982	-0,0018	0,0016	2,00
2,0	1,9989	-0,0011	0,0016	2,00

Figura 5.19- Correção e incerteza de medição para o fuso micrométrico.
Onde: SMP - Sistema de medição padrão - CMM

5.3.4 Avaliação dos Resultados

Devido à flexibilidade, foi observado durante as calibrações no Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI, que a calibração de padrões escalonados na Máquina de Medir por Coordenadas pode ser executada num menor tempo de preparação, execução e processamento (redução de até uma hora) em relação aos métodos convencionais, tendo como vantagem ainda da calibração de mais de um padrão escalonado sem necessidade de trocas de dispositivos de fixação e medição.

A incerteza da CMM, a resolução do fuso micrométrico e as influências de temperatura contribuem de forma significativa para o resultado final da calibração. As influências de temperatura podem comprometer a calibração em situações onde as condições laboratoriais não são adequadas. O controle destas fontes de incerteza é recomendado, pois através dele pode-se melhorar a qualidade do resultado da calibração.

Com o procedimento de avaliação da incerteza de medição adotado obteve-se um resultado confiável possibilitando comparações com valores de referência de normas e especificações. Na calibração do padrão escalonado com CMM pelo método da CMM Virtual e da comparação, obteve-se resultados com incertezas expandidas de 1,1 a 1,2 μm para a coluna de ressaltos e de 1,6 a 2,0 μm para o fuso micrométrico, que são admissíveis para este padrão.

A estratégia com o método da CMM Virtual e da comparação nas CMMs é vantajosa pois reduz a incerteza de medição da CMM, possibilitando utiliza-la com vantagens operacionais e econômicas sobre métodos convencionais para a calibração de padrões escalonados. A incerteza de medição para calibração de padrão escalonado reduziu de 2 para 1 μm utilizando a estratégia com CMM.

5.4 Calibração de Calibradores

As condições em que é executado o controle de peças utilizando-se calibradores, trazem consigo um desgaste relativamente rápido dos mesmos devido ao atrito existente entre o calibrador e a peça a ser controlada. Portanto, é importante realizar a calibração dos calibradores, que consiste em determinar as dimensões

efetivas dos mesmos.

Os calibradores possuem tolerâncias e erros máximos admissíveis para suas dimensões nominais e desvios de forma que variam em função da qualidade de fabricação [29,30,65], isto implica que na calibração seja feito o controle dimensional e de forma.

Para os calibradores anéis lisos cilíndricos, que podem ser utilizados na verificação de eixos e na calibração e zeragem de sistemas de medição, são necessários, em alguns casos, além do controle do diâmetro, também o controle da circularidade. Normalmente, para a calibração é utilizado o método da comparação na Máquina de Abbé (Máquina de Medir Longitudinal) para a verificação do diâmetro e a Máquina de Medição de Formas para a avaliação da circularidade. Na verificação dos diâmetros na Máquina de Abbé as limitações encontradas são:

- operação manual para as medições;
- necessidade de montagem de dispositivos diferentes em função do tipo de calibrador;
- os sistemas de medição convencionais, normalmente, não permitem a fixação de vários calibradores para a calibração;
- o tempo de calibração é elevado (por exemplo, para calibrador anel de 20 a 30 minutos).

Neste caso é apresentada a calibração de calibradores anéis lisos cilíndricos na Máquina de Medir por Coordenadas, buscando resolver as limitações dos métodos convencionais. Alguns detalhes deste caso pode ser visto também em [75,76]. Para comparação apresenta-se também a calibração do calibrador na Máquina de Abbé.

5.4.1 Estratégia de calibração de calibradores anéis lisos cilíndricos na CMM

Utilizam-se os Métodos da CMM Virtual e da Comparação e a avaliação da incerteza de medição para a calibração de calibradores anéis lisos cilíndricos na CMM. Os calibradores anéis lisos cilíndricos podem ser medidos em diferentes posições angulares e alturas em função da tolerância e da sua aplicação [77]. Para medição do diâmetro são recomendadas de uma a duas posições angulares (0° e 90°) e uma altura ($H/2$) ou duas alturas ($H/3$ e $2H/3$), onde H é a altura do calibrador. Para

medição de circularidade, normalmente uma altura ($H/2$) é suficiente.

Através da simulação de medição de diâmetro, utilizando o Método da CMM Virtual, escolheu-se uma região dentro do volume de medição da CMM para a calibração do calibrador anel onde esta apresentasse as menores incertezas. No método da comparação mede-se um calibrador anel de referência, de forma que os erros geométricos, temperaturas, deriva e tendências do sistema de apalpação da CMM fiquem compensados. Para a calibração de um calibrador anel liso cilíndrico de diâmetro nominal de 100 mm na CMM (figura 5.20), um calibrador anel de referência de 149,9986 mm de diâmetro efetivo foi medido na mesma posição no volume da CMM e em uma posição angular e uma altura no calibrador de acordo com o certificado de calibração para compensação de erros da CMM. O diâmetro do anel a calibrar foi medido em duas posições angulares (0° e 90°) e em três alturas ($H/3$, $H/2$ e $2H/3$).

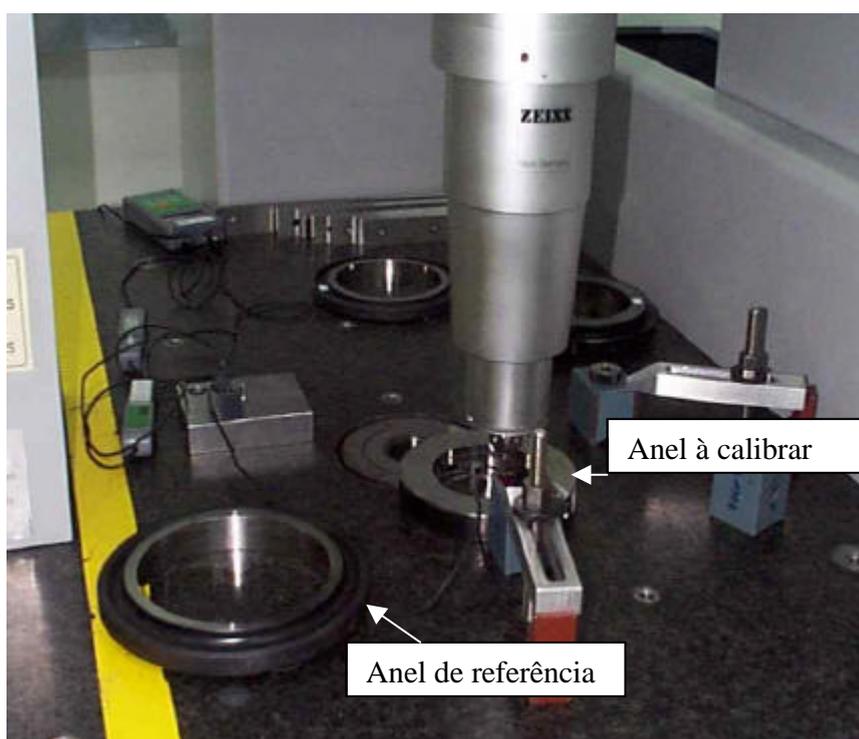


Figura 5.20 - Calibração do Calibrador Anel Liso Cilíndrico de 100 mm na CMM

Para determinação da incerteza de medição são consideradas as seguintes componentes (fontes) de incerteza:

- Incerteza de medição da CMM para medição de comprimentos considerando o método da comparação, onde é considerada a incerteza de apalpação para um dos eixos, o erro de linearidade e a diferença de posição ou diâmetro entre o calibrador anel de referência e o a calibrar, a parcela relativa ao comprimento é compensada pela medição diferencial entre os anéis;
- Incerteza do anel de referência, obtida do respectivo certificado de calibração;
- Incerteza devido à diferença de temperaturas entre o calibrador anel de referência e anel a calibrar;
- Incerteza devido à instabilidade da fixação dos anéis.

5.4.2 Resultados da calibração

As planilhas com as componentes e cálculo de incertezas e os resultados da calibração estão apresentadas nas figuras 5.21 e 5.22.

Serviço n°:	PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS						
XXXX/XX		Valor	Dist. de				
Símbolo	COMPONENTES DE INCERTEZA	(mm)	Prob.	Divisor	C	U [mm]	V
U_{CMM}	Incerteza Medição da CMM	0,00084	Normal	2,0000	1	0,00042	50
U_{ref}	Incerteza Medição do Anel de Referência	0,00040	Normal	2,0000	1	0,00020	50
$U_{Inst,fix}$	Instabilidade da Fixação	0,00000	Retangular	1,7321	1	0,00000	Infinito
$U_{dif,T}$	Diferença Temperatura Anel a calibrar e ref.	0,00017	Retangular	1,7321	1	0,00010	Infinito
u_A	Incerteza Padrão do Tipo A	0,00013	Normal	1,0000	1	0,00013	2
u_c	Incerteza Combinada		Normal			0,00049	74
U_{95}	Incerteza Expandida		k = 2,05	2,05		0,0010	

Figura 5.21- Cálculo de incerteza de medição na calibração na CMM do calibrador anel liso cilíndrico de 100 mm

5.4.3 Calibração na Máquina de Abbé

Para a calibração do calibrador anel liso cilíndrico de diâmetro nominal de 100 mm na Máquina de Abbé (figura 5.23), um calibrador anel de referência de 89,99623 mm de diâmetro efetivo foi medido em uma posição angular e uma altura de acordo com o certificado de calibração para compensação de erros da Máquina de Abbé. O diâmetro do anel a calibrar foi medido em duas posições angulares (0° e 90°) e em três alturas (H/3, H/2 e 2H/3).

ALTURA	POSIÇÃO [graus]	RESULTADO DA MEDIÇÃO MI +/- U [mm]	k
H/3	0	99,9989 +/- 0,0010	2,05
	90	99,9985 +/- 0,0010	2,05
H/2	0	99,9990 +/- 0,0010	2,05
	90	99,9987 +/- 0,0010	2,05
2H/3	0	99,9990 +/- 0,0010	2,05
	90	99,9988 +/- 0,0010	2,05
DIÂMETRO EFETIVO MR +/- (U + Vmáx) [mm]			k
99,9988 +/- 0,0014			2,05

Onde: MI é média das indicações de cada posição

MR é a média dos resultados (média das MI)

Vmáx é a maior diferença entre a MR e uma MI qualquer

U é a incerteza expandida

Figura 5.22 - Resultado da Calibração do Calibrador Anel Liso Cilíndrico na CMM



Figura 5.23 - Calibração do Calibrador Anel Liso Cilíndrico de 100 mm na Máquina de Abbé

Para determinação da incerteza de medição são consideradas as seguintes componentes (fontes) de incerteza:

- Incerteza de medição da Máquina de Abbé, conforme certificado de calibração;

- Incerteza de medição do calibrador anel liso cilíndrico usado como referência, obtido do certificado de calibração;
- Incerteza devido a variação da temperatura ambiente durante a calibração;
- Incerteza devido a resolução da Máquina de Abbé, considerada igual a metade da resolução adotada na calibração;
- Incertezas dos coeficientes de expansão linear do calibrador anel de referência e anel a calibrar;
- Incerteza devido ao erro de alinhamento dos sensores da Máquina de Abbé;
- Incertezas devido aos erros de alinhamento do calibrador anel de referência e o a calibrar.

5.4.4 Resultados da Calibração

A planilha com as componentes e cálculo de incertezas e os resultados da calibração estão apresentados nas figuras 5.24 e 5.25.

Serviço nº: XXXX/XX	PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS						
Símbolo	COMPONENTES DE INCERTEZA	(mm)	Dist. Probabilidade	Divisor	C	U [mm]	V
<i>U_{M. Abbé}</i>	Incerteza Medição da Máquina Abbé	0,00030	Normal	2,0000	1	0,00015	50
<i>U_{Anel Ref}</i>	Incerteza Medição do anel de referência	0,00030	Normal	2,0000	1	0,00015	50
<i>U_{temp}</i>	Variação da temperatura ambiente	0,00035	Retangular	1,7321	1	0,00020	infinito
<i>U_{ReAbbé}</i>	Erro de resolução Máquina Abbé	0,00005	Retangular	1,7321	1	0,00003	Infinito
<i>U_{coef. Anel ref}</i>	Incerteza coeficiente expansão linear anel ref.	0,00003	Retangular	1,7321	1	0,00002	Infinito
<i>U_{coef. Anel}</i>	Incerteza coeficiente expansão linear anel	0,00003	Retangular	1,7321	1	0,00002	Infinito
<i>U_{al. Sens}</i>	Erro de alinhamento dos sensores M. Abbé	0,00010	Retangular	1,7321	1	0,00006	infinito
<i>U_{al. Anel ref.}</i>	Erro de alinhamento doo anel de referência	0,00010	Retangular	1,732	1	0,00006	infinito
<i>U_{al. Anel}</i>	Erro de alinhamento do anel	0,00010	Retangular	1,732	1	0,00006	infinito
<i>U_A</i>	Incerteza Padrão do Tipo A	0,00010	Normal	1,0000	1	0,00010	2
<i>U_c</i>	Incerteza Combinada		Normal			0,00033	infinito
<i>U₉₅</i>	Incerteza Expandida		k = 2	2,00		0,0007	

Figura 5.24 - Cálculo de incerteza de medição na calibração na Máquina de Abbé do calibrador anel liso cilíndrico de 100 mm

5.4.5 Avaliação dos resultados para Calibração

Com o objetivo de avaliar e validar a CMM para calibração de calibrador anel liso cilíndrico, as calibrações foram realizadas em um anel padrão previamente calibrado na posição angular de 90° e altura H/2 pelo PTB. Os resultados encontrados para medição de diâmetro foram compatíveis, também foram comparados os tempos de calibração (preparação, calibração e certificado) onde observa um menor tempo da CMM comparado com a Máquina de Abbé, como pode ser visto na figura 5.26.

ALTURA	POSIÇÃO [graus]	RESULTADO DA MEDIÇÃO MI +/- U [mm]	k
H/3	0	99,9984 +/- 0,0007	2,00
	90	99,9986 +/- 0,0007	2,00
H/2	0	99,9985 +/- 0,0007	2,00
	90	99,9987 +/- 0,0007	2,00
2H/3	0	99,9986 +/- 0,0007	2,00
	90	99,9987 +/- 0,0007	2,00
DIÂMETRO EFETIVO MR +/- (U + Vmáx) [mm]			k
99,9986 +/- 0,0009			2,00

Onde: MI é média das indicações de cada posição

MR é a média dos resultados (média das MI)

Vmáx é a maior diferença entre a MR e uma MI qualquer

U é a incerteza expandida

Figura 5.25 - Resultado da Calibração do Calibrador Anel Liso Cilíndrico na Máquina de Abbé

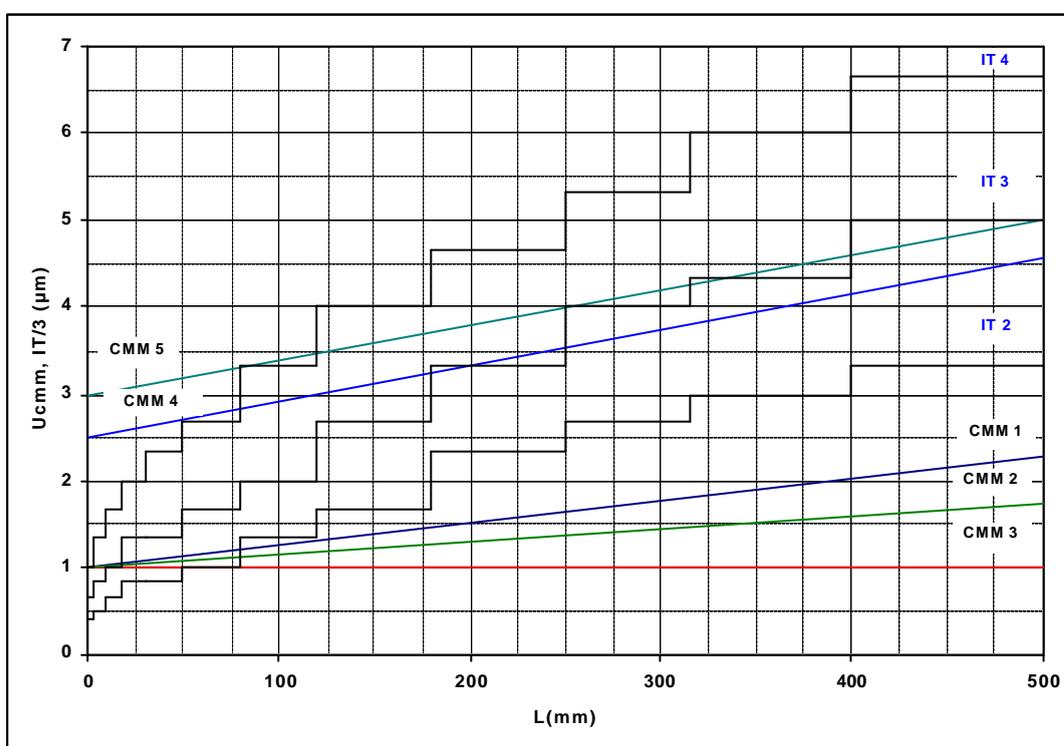
	Posição	Média (mm)	Incerteza Medição μm	Tempo de calibração min
PTB	90° - H/2	99,9985	0,1	Não disponível
Máquina de Abbé	90° - H/2	99,9987	0,7	45
CMM	90° - H/2	99,9987	1,0	32

Figura 5.26 - Comparação calibração CMM, Máquina de Abbé com resultado PTB - Medição de Diâmetro

Os resultados apresentados mostraram que a CMM pode ser utilizada para a calibração de calibradores anéis lisos cilíndricos, pois se obtém os resultados de referência e as incertezas de medição coerentes com suas tolerâncias admissíveis. Com a CMM a medição é automatizada, pode-se medir com um menor tempo de calibração em relação à Máquina de Abbé. A CMM possui ainda flexibilidade para medir outros tipos de calibradores sem precisar trocar os dispositivos auxiliares e com menores riscos de danos aos anéis.

A incerteza de medição na calibração de calibradores pode ser reduzida utilizando uma CMM com menor incerteza de apalpação e erro de linearidade ou eliminando a diferença entre a posição ou diâmetro entre o calibrador anel de referência e anel a calibrar.

Para escolha da CMM para calibração de calibradores, na figura 5.27 tem-se a relação entre as incertezas de medição de CMMs e intervalos de tolerâncias (IT/3), padrão com incerteza 1/3 menor que a tolerância admissível.



U_{CMM} - Incerteza de medição da CMM

Dadm BP - Desvio admissível dos blocos padrão

CMM 1 - Especificação do fabricante: $U1D = (1 + L / 400) \text{ mm}$.

CMM 2 - CMM 1 com método CMM Virtual: $U1D = (1 + L/670) \text{ mm}$.

CMM 3 - CMM 1 utilizando o Método da CMM virtual e da comparação: $U1D = 1,0 \text{ mm}$.

CMM 4 - Especificação do fabricante: $U1D = (2,5 + L / 250) \text{ mm}$

CMM 5 - CMM manual e sem CAA (Especificação do fabricante): $U1D = (3,0 + L / 250) \text{ mm}$

Figura 5.27 – Relação entre Incerteza de Medição de CMMs e intervalos de tolerâncias (IT/3) para calibradores

Escolhe-se a CMM em função do intervalo de tolerância dos calibradores. Neste caso, para a calibração recomenda-se:

- A CMM na condição normal (CMM 1), com a especificação do fabricante, para a calibração de calibradores a partir de IT2 com faixa de medição de 80 a 500 mm;
- a CMM utilizando os métodos CMM Virtual e comparação (CMM 2, CMM 3), para

calibração de calibradores de IT2 com faixa de medição de 80 a 500 mm, podendo atender também para a relação IT/5;

- a CMM 4, com a especificação do fabricante, para a calibração de IT3 com faixa de medição de 180 a 500 mm e IT4 com faixa de medição de 50 a 500 mm;
- e a CMM 5, com a especificação do fabricante, para a calibração de IT3 com faixa de medição de 400 a 500 mm e IT4 com faixa de medição de 80 a 500 mm.

5.5 Calibração de Esquadros

Em um levantamento das necessidades metrológicas das indústrias [13], chegou-se ao resultado que há uma demanda expressiva na calibração de esquadros. Os esquadros são calibrados por diferentes métodos com o objetivo de se conhecer os erros (desvios) efetivos e utilizá-los na calibração de outros esquadros e controle de perpendicularidade de peças. Estes métodos de calibração apresentam limitações em relação aos procedimentos, tempos de execução e custos. Em função destas limitações e da quantidade de esquadros encontrados nas indústrias, neste caso será apresentada uma estratégia que utiliza os métodos da CMM Virtual e do rebatimento para a calibração de esquadros na Máquina de Medir por Coordenadas, que é um sistema de medição automatizado, informatizado, flexível, capaz de verificar toda geometria de um esquadro com incerteza de medição compatível. Alguns detalhes desta calibração podem ser vistas em [78].

5.5.1 Estratégia de Calibração

Para a calibração de um esquadro, o método da CMM Virtual é utilizado para escolha da região dentro do volume de medição da CMM com menor incerteza de medição. No método do rebatimento os erros do esquadro aparecem rebatidos e para avaliação da incerteza de medição utilizou-se a metodologia do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição [71].

Na calibração de um esquadro de granito foram realizados quatro ciclos de medição com o esquadro apoiado na posição horizontal, sendo dois ciclos com o esquadro rebatido em relação aos demais (Fig. 5.28). Obtém-se os seguintes resultados através das medições:

- a superfície da face menor, sobre a qual definiu-se um plano geométrico médio;

- a superfície da face maior;
- uma reta na seção média de cada uma das faces de medição do esquadro.

Com estes resultados são avaliados a perpendicularidade das retas da face maior, em relação à superfície da face menor e entre as superfícies.

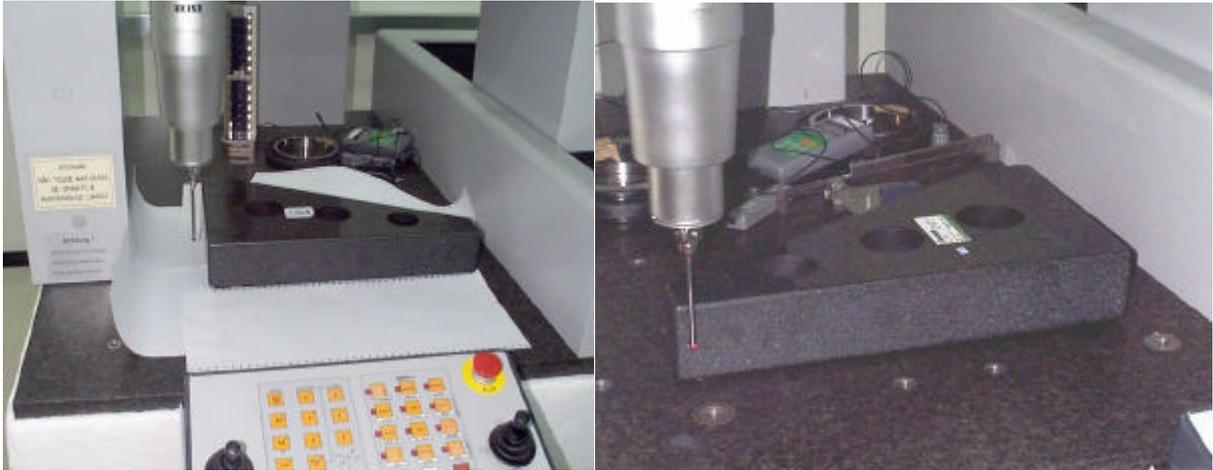


Figura 5.28 - Calibração esquadro de granito na CMM.

- Erro de perpendicularidade – E perp

$$E_{perp} = \frac{|MI(\text{Re batido}) + MI(\text{Original})|}{2}$$

Onde:

MI (Rebatido) = Média das indicações do esquadro posição - rebatido

MI (Original) = Média das indicações do esquadro posição - original

- a retilidade de cada face (seção média);
- a planeza das faces.

5.5.2 Incerteza de medição

Para a avaliação da incerteza da medição na calibração do esquadro de granito foram consideradas as seguintes fontes de incerteza para:

a) Medição do desvio de retilidade das faces de medição

Da calibração da CMM pelo método CMM Virtual do PTB, tem-se:

- Incerteza de medição de retilidade da CMM - Uret = 1 µm em 500 mm.

Para face maior do esquadro, L = 210 mm, U ret = 0,42 µm

Para face menor do esquadro, $L = 150 \text{ mm}$, $U_{\text{ret}} = 0,30 \text{ }\mu\text{m}$

- U_{Reb} – Incerteza do processo de rebatimento (Estimado)- $U_{\text{Reb}} = 0,03 \text{ }\mu\text{m}$
- Incerteza padrão – Tipo A

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = 0,0002 \text{ mm}$$

- Estabilidade da CMM no tempo

Em função do pouco tempo transcorrido desde a última calibração (menos de 6 meses), pode-se considerar que as características da CMM tenham se degradado de forma desprezível. A incerteza padrão correspondente então será considerada desprezível.

- Variações de Temperaturas

Antes da calibração, é necessário cuidado para que o esquadro e a máquina se estabilizem à temperatura do laboratório. A diferença entre a temperatura do esquadro e da máquina é assumida como sendo de $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. A diferença entre a temperatura média do esquadro e da máquina e a temperatura de referência é estimada em $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, considerando a variação de temperatura durante as medições e a incerteza na medição da temperatura.

A variação de comprimento devido à diferença entre a temperatura média da máquina e do esquadro e a temperatura de referência é calculada a partir de:

$$\Delta L = L d_a \Delta \bar{t}$$

Onde:

ΔL é a variação do comprimento devido à temperatura;

L é o comprimento medido;

d_a é a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica do esquadro ($6 \text{ }\mu\text{m/m K}$) e da escala de vidro da máquina ($7,8 \text{ }\mu\text{m/m K}$), que tem distribuição triangular com média $1,8 \text{ }\mu\text{m/m K}$ e incerteza padrão $u(d_a) = 1/\sqrt{6} \text{ }\mu\text{m}/(\text{m K})$.

$\Delta \bar{t}$ é a diferença de temperatura em relação à temperatura de referência ($20,0 \text{ }^\circ\text{C}$), que tem distribuição retangular entre $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ e incerteza padrão $u(\Delta \bar{t}) = 0,2/\sqrt{3}$.

O efeito combinado da distribuição triangular dos coeficientes, com a distribuição

retangular da temperatura, no comprimento medido, resulta em uma incerteza padrão que pode ser calculada por:

$$u_{Temp} = L\sqrt{\mathbf{d}_a^2 u(\Delta\bar{t})^2 + \Delta t^2 u(\mathbf{d}_a)^2 + u(\Delta\bar{t})^2 u(\mathbf{d}_a)^2}$$

$$u_{Temp} = 0,210\sqrt{1,8^2(0,2/\sqrt{3})^2 + 0^2(1,0/\sqrt{6})^2 + (0,2/\sqrt{3})^2(1,0/\sqrt{6})^2} = 0,04\text{mm}$$

Observando que para essa incerteza combinada, em que a diferença média da temperatura é igual a zero, o terceiro termo que aparece na equação deve ser considerado. Em outras situações, onde os valores médios dos parâmetros são diferentes de zero, esse termo é pouco significativo e usualmente é desconsiderado.

Considerando a combinação destas fontes de incerteza, tem-se a incerteza expandida de 0,7 μm e 0,8 μm para a medição dos desvios de retilinearidade das faces de medição menor e maior, respectivamente, do esquadro.

b) Medição do desvio de perpendicularidade

Da calibração da CMM pelo método CMM Virtual do PTB, tem-se:

- Incerteza de medição do Desvio de perpendicularidade da CMM - U_{CMMperp}

No plano XY - $U_{\text{CMMperp}} = 1 \mu\text{m}/\text{m} = 0,2 \text{ ''}$

Para $L = L_{\text{ref}} = 210 \text{ mm}$ (Face maior do esquadro)

Incerteza CMM para medição de perpendicularidade - $U_{\text{CMMperp}} = 0,00021 \text{ mm}$

Para $L = L_{\text{ref}} = 150 \text{ mm}$ (Face menor do esquadro)

Incerteza CMM para medição de perpendicularidade - $U_{\text{CMMperp}} = 0,00015 \text{ mm}$

- Incerteza do processo de rebatimento (Estimado) - $U_{\text{Reb}} = 0,0003 \text{ mm}$

- Incerteza padrão - Tipo A - $u_A = 0,0004 \text{ mm}$

- Estabilidade de fixação do esquadro- desprezível

- Estabilidade CMM no tempo- desprezível

- Variações de Temperaturas

$$u_{Temp} = 0,04\text{mm}$$

A incerteza expandida para a medição do desvio de perpendicularidade é de 0,9 μm .

c) Medição de desvio de planeza das faces de medição

Fazendo a média quadrática das incertezas de medição das retilinearidades, tem-se:

Incerteza CMM para medição de planeza - U_{CMMplan} :

Para a Face maior - $L_1 = 210 \text{ mm}$ e $L_2 = 50 \text{ mm}$

Onde: L_1, L_2 - comprimento e largura em mm

$$U_{CMM_{plan}} = 0,00043 \text{ mm}$$

Para a Face menor - $L_1 = 150 \text{ mm}$ e $L_2 = 50 \text{ mm}$

$$U_{CMM_{plan}} = 0,00031 \text{ mm}$$

- Incerteza padrão - Tipo A - $u_A = 0,0001 \text{ mm}$
- Estabilidade de fixação - desprezível
- Estabilidade CMM no tempo - desprezível
- Variações de Temperaturas - $u_{Temp} = 0,04 \text{ mm}$

A incerteza expandida para a medição do desvio de planeza é de $0,6 \mu\text{m}$ e $0,7 \mu\text{m}$, respectivamente para a face menor e maior do esquadro.

5.5.3 Avaliação dos Resultados

Na figura 5.29 têm-se os resultados dos desvios de planeza, retilineidade e perpendicularidade e suas respectivas incertezas de medição para a calibração do esquadro de granito na CMM.

Os resultados apresentados mostram que, com os métodos da CMM Virtual e do rebatimento, a CMM pode ser utilizada com viabilidade técnica para a calibração de esquadros, pois se obtém os resultados de referência e as incertezas de medição coerentes com suas tolerâncias admissíveis (fig.2.9) para os desvios de planeza, retilineidade e perpendicularidade.

Parâmetros avaliados	Média Indicações [mm]	Incerteza de Medição [mm]	Fator de Abrangência
Planeza			
Face Menor	0,002	0,0006	2,05
Face Maior	0,002	0,0007	2,05
Retilineidade			
Face Menor	0,001	0,0007	2,05
Face Maior	0,001	0,0008	2,05
Perpendicularidade			
Entre retas	0,002	0,0009	2,00

Figura 5.29 - Desvios de planeza, retilineidade, perpendicularidade - Esquadro de granito

Com a CMM a medição é automatizada, substituindo a calibração realizada manualmente, gastando-se um menor tempo de calibração em relação aos métodos convencionais. A CMM possui ainda flexibilidade para medir diferentes tipos e tamanhos de esquadros sem a necessidade de trocar os dispositivos auxiliares.

Capítulo 6

Considerações Operacionais, Econômicas e Metrológicas

Este capítulo sintetiza a comparação dos aspectos operacional, econômico e metrológico nas estratégias e nos métodos convencionais de calibração de medidas materializadas. Essa análise fundamenta os argumentos para a validação das estratégias de calibração desenvolvidas neste trabalho, indica as principais limitações a serem superadas, e destaca as contribuições técnico-científicas.

6.1 Análises Operacional e Econômica

Na calibração de medidas materializadas além dos resultados confiáveis com incerteza de medição baixa, não se deve ter esforço operacional intenso e custos muito altos com a aquisição e utilização da tecnologia. Esses requisitos foram considerados durante o desenvolvimento das estratégias de calibração ao longo do trabalho e, neste momento, é feita uma análise comparativa com os métodos convencionais para apresentar as vantagens operacionais e econômicas, que as estratégias de calibração de medidas materializadas em CMM apresentam em relação aos métodos convencionais.

A maior vantagem da calibração utilizando CMM quando comparada com os métodos convencionais é o aumento da eficiência da calibração. A medição é automatizada e reduz o tempo de calibração, ou seja, algumas medidas materializadas podem ser calibradas em uma CMM no mesmo tempo que uma é calibrada no método convencional.

Quanto maior a sofisticação da CMM, menor o tempo de calibração. O operador

estará isento de tarefas que consumam tempo, tais como geração manual das medidas, checagem da seqüência de calibração, desenvolvimento de cálculos, com o benefício adicional de que os modelos mais sofisticados podem medir desvios geométricos, perfis e superfícies.

As CMMs com CNC eliminam certos erros humanos e reduzem tarefas que operador deve executar. Com os métodos convencionais, medidas materializadas complexas envolvendo inspeções dimensionais freqüentemente sugerem o uso de dispositivos para reduzir o tempo de calibração. Tais dispositivos têm custos elevados, tomam tempo para serem projetados e fabricados. A CMM, por outro lado, normalmente não requer dispositivo.

Na figura 6.1 tem-se a comparação entre os tempos e custos para a calibração de medidas materializadas em uma CMM com CNC e métodos convencionais. O tempo de calibração inclui os tempos para: limpezas das medidas materializadas padrão e a calibrar, preparação do sistema de medição com montagem de acessórios e dispositivos, fixação das medidas materializadas, calibração, análise dos resultados e elaboração e impressão do certificado de calibração. A CMM fornece rapidamente informações sobre a calibração da medida materializada, com os métodos convencionais a análise dos dados de calibração freqüentemente toma mais tempo com um maior custo.

A redução do custo de calibração de medidas materializadas em CMM é ainda maior quando se têm lotes de medidas materializadas para se calibrar. Na figura 6.2 tem-se a comparação da calibração de calibradores anéis lisos na Máquina de Abbé e na CMM. No método convencional com uma Máquina de Abbé só é possível montar um calibrador por vez, enquanto na mesa de uma CMM podem ser colocados vários calibradores anéis para calibração, com isso o tempo para calibração reduz, reduzindo conseqüentemente os custos de calibração.

Medidas Materializadas	CMM com CNC		Métodos Convencionais		Custos	
	Tempo (min)	Custo (R\$)	Tempo (min)	Custo (R\$)	Diferenças (R\$)	Redução (%)
Bloco padrão até 100 mm – Erro do meio e variação VC	NR	NR	50	66,70		
Bloco padrão de 100 a 530 mm – Erro do meio	70	116,67	NC	NC		
Bloco padrão até 530 mm – Erro do meio e variação VC	90	150,00	NC	NC		
Bloco padrão de 530 a 1000 mm – Erro do meio	90	150,00	NC	NC		
Calibrador anel cilíndrico 1p1h até 100 mm	31	51,67	42	56,03	-4,36	8
Calibrador anel cilíndrico 1p1h de 100 a 200 mm	32	53,33	45	60,03	-6,70	11
Calibrador anel cilíndrico 1p1h de 200 a 500 mm	33	55,00	NC	NC		
Calibrador anel cilíndrico 4p2h – Circularidade 1 h até 100 mm	50	83,34	80	106,72	-23,39	22
Calibrador anel liso cônico até 100 mm	50	83,34	65	86,71	-3,38	4
Calibrador tampão liso cilíndrico 2p 2h até 200 mm	35	58,33	60	80,04	-21,71	27
Calibrador tampão liso cilíndrico 4p 2h até 200 mm	37	61,67	65	86,71	-25,04	29
Calibrador tampão liso cônico – até 200 mm	37	61,67	65	86,71	-25,04	29
Calibrador de boca fixo até 530 mm	65	108,34	90	120,06	-11,72	10
Esquadro de aço	55	91,67	80	106,72	-15,05	14
Esquadro de granito	90	150,00	135	180,09	-30,09	17
Padrão escalonado horizontal até 530 mm	60	100,00	105	140,07	-40,07	29
Padrão escalonado horizontal de 530 a 950 mm	85	141,67	NC	NC		
Padrão escalonado vertical até 430 mm	65	108,34	135	180,09	-71,75	40
Padrão escalonado vertical de 430 a 600 mm	85	141,67	NC	NC		
Padrão escalonado vertical com tambor micrométrico até 430 mm	70	116,67	150	200,10	-83,43	42
Padrão escalonado vertical com tambor micrométrico de 430 a 600 mm	100	166,67	NC	NC		
Régua de fio	50	83,34	95	126,73	-43,40	34
Régua padrão de retilidade de aço até 550 mm	50	83,34	100	133,40	-50,07	38
Régua padrão de retilidade de aço de 550 mm a 1000 mm	55	91,67	NC	NC		
Régua padrão de retilidade de granito até 550 mm	55	91,67	115	153,41	-61,74	40

NR- Não recomendado e NC- Não convencional

Figura 6.1 - Comparação tempo calibração (min) e custos para medidas materializadas

	Máquina Abbé (Custo- R\$80,00/h)				CMM com CNC (Custo- R\$100,00/h)			
	1	2	3	10	1	2	3	10
Número de anéis	1	2	3	10	1	2	3	10
Limpeza	6	9	12	33	6	9	12	33
Montagem Dispositivo	5	5	5	5	2	2	2	2
Fixação	4	8	12	40	2	4	6	20
Calibração	15	30	45	150	7	14	21	70
Certificado	15	20	25	60	15	20	25	60
Tempo (min)	45	72	99	288	32	49	66	185
Custo (R\$)	60,00	96,00	132,00	384,00	53,00	81,66	110,00	308,00
Redução do custo (%)					12%	15%	17%	20%

Figura 6.2 - Comparação tempo calibração (min) e custos (R\$) para um Calibrador anel liso cilíndrico de 100 mm

6.2 Avaliação Metrológica

Nas estratégias de calibração, o método da CMM Virtual se mostrou adequado para simulação de tarefas específicas de calibração, obtendo antecipadamente informações, tais como, incertezas de medição e mapeamento dos erros no volume de trabalho da máquina simulada, independentemente de qualquer tarefa de medição, permitindo determinar as condições ótimas para posição de medição no volume de trabalho e escolher a região da CMM que oferece a menor incerteza para a calibração de medidas materializadas.

Na figura 6.3 tem-se a comparação dos resultados da calibração de uma medida materializada pelos métodos da comparação e da CMM Virtual, mostrando que com o método da CMM Virtual pode-se corrigir a tendência e reduzir a incerteza de medição.

As estratégias de calibração de medidas materializadas utilizando os métodos da CMM Virtual, da comparação ou do rebatimento com CMM com CAA em laboratórios com temperaturas controladas, com sensores de temperaturas na CMM e nas medidas materializadas, permitiriam a calibração de medidas materializadas com incertezas de medição ainda mais reduzidas.

Diâmetro de um calibrador anel liso cilíndrico - D
- Diâmetro efetivo
Posição no anel 0° - $D = (50,0002 \pm 0,0001)$ mm Posição no anel 90° - $D = (50,0001 \pm 0,0001)$ mm
- Calibração pelo Método da comparação na CMM
Posição no anel 0° - $D = (50,0003 \pm 0,0014)$ mm Posição no anel 90° - $D = (50,0002 \pm 0,0014)$ mm Diâmetro $D = (50,0003 \pm 0,0015)$ mm
- Calibração pelo Método da CMM Virtual
Medição - Média das indicações, $MI = 50,0012$ mm CMM Virtual - $D = 50,0000$ mm - Tendência, $Td = 0,0008$ mm - Desvio padrão, $s = 0,0001$ mm Diâmetro - $D = (MI \pm U)$ mm, - $D = (50,0012 \pm 0,0010)$ mm Com correção - $D = (MI - Td) \pm 2.s$ - $D = (50,0004 \pm 0,0002)$ mm

Figura 6.3 – Resultados – Calibração Calibrador anel liso cilíndrico – Método da Comparação e Simulação CMM Virtual

A incerteza da CMM é normalmente, a fonte de incerteza de maior contribuição na calibração de medidas materializadas, por exemplo, na calibração de um calibrador anel liso cilíndrico pelo método da comparação, a incerteza expandida avaliada é de 1,4 μm , sendo que a incerteza de medição da CMM é 1,2 μm .

Na figura 6.4 tem-se a comparação das incertezas das medições das estratégias propostas e dos métodos convencionais para a calibração de algumas medidas materializadas.

Medida Materializada	Método de Calibração e Sistemas de Medição (SM)	Incerteza de Medição (mm)
1- Blocos padrão	Método Interferométrico	$(0,02 + L/5000) \mu\text{m}$
	Comparador Convencional	$(0,08 + L/2000) \mu\text{m}$
	Método da Comparação na CMM	1 μm para comprimento até 1000 mm
2- Padrão Escalonado	Sistema de Medição com apalpador eletrônico e Laser Interferométrico	$(0,2 + L/360) \mu\text{m}$
	CMM e Laser Interferométrico	$(0,2 + L/750) \mu\text{m}$
	Método da comparação com CMM e Blocos padrão	$(1,1 + L/1200) \mu\text{m}$
3- Calibrador anel liso cilíndrico	CMM e Laser Interferométrico	0,10 μm para D=40 mm 0,15 μm para D=90 mm
	Método da comparação na Máquina de Abbé	$(0,3 + L/500) \mu\text{m}$
	Método da comparação na CMM	$(1,1 + L/1200) \mu\text{m}$
4- Esquadro de aço	Método convencional	1,5 μm para L até 1000 mm
	Método do Rebatimento na CMM	$(1,4 + L/2000) \mu\text{m}$
5- Esquadro de granito	Método convencional	1,5 μm para L até 1000 mm
	Método do Rebatimento na CMM	$(1,4 + L/2000) \mu\text{m}$

Figura 6.4- Comparação das incertezas de medição nos métodos propostos e nos convencionais

Capítulo 7

Conclusões

A pesquisa realizada neste trabalho resultou no desenvolvimento de estratégias que permitem realizar calibrações em CMMs de medidas materializadas de algumas dimensões e classes de erros com confiabilidade metrológica próxima aos métodos convencionais, mas com vantagens operacionais e econômicas. As CMMs têm ainda vantagens de poderem ser utilizadas na medição de peças e calibração de instrumentos de medição.

Atender a demanda por calibrações de medidas materializadas com velocidade e incerteza de medição reduzida é uma tarefa difícil. Os métodos convencionais de calibração se mostram lentos, poucos práticos e com custos elevados para aquisição de padrões e execução da calibração. Por isto, o uso das máquinas de medir por coordenadas é recomendado para medidas materializadas de determinadas classes de erros, pois permitem economia no tempo de calibração e custos com uma incerteza de medição aceitável.

Uma das comparações de tempo e custos das calibrações realizadas neste capítulo pode ser visualizada resumidamente na figura 6.2, atestando de forma conclusiva que para calibração de lotes de medidas materializadas é muito vantajosa economicamente a calibração utilizando CMM. Para um lote de 10 medidas materializadas tem-se uma redução do tempo de calibração de 40 % e do custo de 20 % realizando a calibração na CMM, redução que aumenta ainda mais com lotes maiores devido à redução do tempo de calibração. Conseguiu-se essas reduções com confiabilidade metrológica, no método convencional com uma incerteza de medição de 0,7 μm e na CMM uma incerteza de 1,0 μm .

As CMMs nas condições normais não atendem a determinadas dimensões e classes de erros de medidas materializadas, como foram apresentados nos casos dos blocos padrão e calibradores (figuras 5.13 e 5.27 no capítulo 5), mas as estratégias utilizando o método da CMM Virtual em conjunto com os métodos da comparação ou rebatimento mostraram-se plenamente confiáveis para CMMs com CAA e permitiram a redução da incerteza de medição e calibração de uma faixa mais ampla de medidas materializadas.

Na figura 7.1 comparam-se os métodos convencionais de calibração e as estratégias propostas, de acordo com alguns critérios, mostrando algumas vantagens de se calibrar medidas materializadas em CMM.

Critério	Métodos de Calibração Convencionais	Estratégias de Calibração em CMM
- Flexibilidade	Pouco flexíveis	Maior flexibilidade com adaptação simples às tarefas de medição
- Quantidade de sistemas de medição e dispositivos envolvidos	Maior número de sistemas de medição e acessórios	CMM e em alguns casos padrão de referência
- Determinação de dimensões, desvio de forma e posição	Separada Realização por diferentes sistemas de medição	Conjunta Realização na própria CMM
- Número de calibração	Uma medida materializada por vez	Calibração de lotes de medidas materializadas na mesa da CMM
- Tempo de preparação e execução	Tempo elevado	Diminuição do tempo
- Custos	Custo elevado	Diminuição dos custos

Figura 7.1 – Comparação métodos convencionais de calibração e estratégias utilizando CMM

Portanto, pode-se considerar, o uso da CMM na calibração pelas seguintes razões:

- Torna-se difícil atender à crescente demanda por calibração de medidas materializadas com alta velocidade e altos padrões de exatidão;

- Os calibradores, padrões e peças padrão estão se tornando cada vez mais complexos, com mais detalhes a serem medidos e tolerâncias mais apertadas;
- Os métodos convencionais são muito lentos, com custos elevados para aquisição dos sistemas de medição utilizados na calibração.

A tese mostrou-se válida, é possível calibrar medidas materializadas em CMM utilizando estratégias viáveis nos aspectos metrológicos, operacionais e econômicos.

Os aspectos inovadores do trabalho são:

- conjugação dos métodos CMM Virtual, rebatimento e comparação na calibração de medidas materializadas;
- desenvolvimento de estratégias e calibração de medidas materializadas em CMM;
- avaliação da incerteza de medição utilizando diferentes estratégias de calibração;
- contribuição para a elaboração de normas de calibração de medidas materializadas em CMM.

Existem aspectos a serem otimizados, como a redução das incertezas de medição, desenvolvimento de dispositivos de fixação de medidas materializadas, que devem ser considerados na evolução das estratégias de calibração.

Juntamente com as novas possibilidades surgidas com as estratégias, essas otimizações dão origem a sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de estratégias para calibração de padrões roscados, desempenos e dispositivos especiais em CMMs;
- Utilização do método da CMM Virtual para simulações de novas tarefas de medições em calibrações.

Referências Bibliográficas

- [1] PFEIFER, T.; TORRES, F. **Manual de gestión e ingeniería de la calidad.** Spain: Mira Editores, 1999. 589 p.
- [2] MELLO, C.H.P.; SILVA, C.E.S.; TURRIONI, J. B.; SOUZA, L.G.M. **ISO 9000: 2000 – Sistema de gestão da qualidade para operações e serviços.** São Paulo: Editora Atlas, 2002. 224 p.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Sistemas de gestão da qualidade – Fundamentos e vocabulário:** NBR ISO 9000. Rio de Janeiro, 2000.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos:** NBR ISO 9001. Rio de Janeiro, 2000.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Sistemas de gestão da qualidade – Diretrizes para melhoria de desempenho:** NBR ISO 9004. Rio de Janeiro, 2000.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Requisitos de garantia da qualidade para equipamentos de medição – Parte 1: Sistema de confirmação metrológica para equipamento de medição:** NBR 10012-1. Rio de Janeiro, 1997.
- [7] ANFAVEA **Requisitos do Sistema da qualidade:** QS – 9000. Segunda Edição Brasileira. São Paulo, 1998.
- [8] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, VERBAND DEUTSCHER ELEKTROTECHNIKER **Testing Instructions for Checking Gauges and Measuring Tools - Introduction:** VDI/VDE/DGQ 2618 - Part 1. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Januar, 1991.
- [9] WOHAK, H. **Komparatorverfahren mit Koordinatenmessgeräten in der Lehrenüberwachung.** Koordinatenmesstechnik; Tagung Erlangen; p.193-204; 17 und 18 April, 1996.
- [10] DONATELLI, G. D. **Algumas Considerações para Projeto e Utilização de Laboratórios de Metrologia Dimensional: Vivências de uma visita aos laboratórios de metrologia da Bosch na Alemanha.** Palestra, LABMETRO, Florianópolis, 1998.

- [11] WEG **WEG: Medições confiáveis.** Metrologia e Instrumentação, Ano I, N° 3, p. 52-57, São Paulo, 2000.
- [12] EMBRACO **O Sistema de Metrologia em Grandes Companhias: O caminho para assegurar rastreabilidade Internacional e Requisitos ISO 9000.** Artigo 1, Sessão 3, Seminário Internacional para Controle da Qualidade, Agosto, Florianópolis, 1995.
- [13] CERTI;
CTAI;
SENAI/SC **Estudos das necessidades metrológicas das indústrias Catarinenses.** Florianópolis, 1995.
- [14] SHOELER, N.;
VEIGA, C. L. N.;
FIDÉLIS, G. C. **Calibração e Certificação de Instrumentos da Metrologia Dimensional.** Curso Fundação CERTI/LABMETRO - UFSC, Florianópolis, 1997.
- [15] U. S. ARMY MISSILE
COMAND **Calibration Systems Requirements Military Standard: MIL - STD - 45662A,** USA, 1998.
- [16] NUCLEAR POWER
ENGINEERING
COMMITTEE OF
POWER
ENGINEERING
SOCIETY **IEEE Standard Requirements for the Calibration and Control of Measuring and Test Equipaments - Used in Nuclear Facilities Sponsor: IEEE Std 498.** Nuclear Power Engineering Committee of Power Engineering Society, USA, December, 1990.
- [17] INTERNATIONAL
ORGANIZATION
FOR
STANDARDIZATION **Geometrical Product Specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 2: Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement in calibration of measuring equipment and in product verification: ISO TR 14253-2,** Switzerland, 1997.
- [18] INTERNATIONAL
ORGANIZATION
FOR
STANDARDIZATION **Guide to the expression of uncertainty in measurement,** First Edition, Switzerland, 1993. 101 p.
- [19] BARP, A.M. **Metodologia de avaliação e de gerenciamento da incerteza de sistema de medição de temperatura.** 2000. 145 p.. Dissertação (Mestrado em Metrologia), Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [20] DEUTSCHES
INSTITUT FÜR
NORMUNG **Parallelendmasse - Begriffe: DIN 861-1.** Anforderungen, Prüfung, Januar, Germany, 1980.
- [21] INTERNATIONAL
ORGANIZATION
FOR
STANDARDIZATION **Gauge blocks: ISO 3650,** Switzerland, 1978.

- [22] INMETRO; SBM **Padrões e unidades de medida: referências metrológicas da França e do Brasil.** Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 1999. 120 p.
- [23] DECKER, J. E.; PEKELSKY, J. R. **Gauge Block Calibration by Optical Interferometry at the National Research Council Canada.** Presented at the Measurement Science Conference, Pasadena, California, 23-24 January, 1997. 17 p.
- [24] RODRIGUEZ, J. **Ventajas y desventajas de la calibración interferométrica de bloques frente al método de comparación.** Seminário de Intercomparação de Blocos Padrão com a participação de laboratórios primários e secundários do Sistema Interamericano de Metrologia - SIM, 04-17 Agosto, 1996.
- [25] TITOV, A.; MALINOVSKY, I.; MASSONE, C.A. **On accuracy problems of interferometric length measurements of gauge blocks.** Anais do METROCAL- Metrologia para la Productividad y Calidad, II Congreso Chileno e Internacional de Metrologia, p. 06-19, Chile, 2001.
- [26] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **Height setting micrometers and riser blocks: ISO 7863.** Switzerland, 1984.
- [27] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, VERBAND DEUTSCHER ELETROTECHNIKER **Prüfanweisung für Höhenmessschrauben: VDI/VDE/DGQ 2618 - Blatt 16,** Januar, 1991.
- [28] LINK, W. **Metrologia Mecânica - Expressão da Incerteza de Medição.** Programa RH - Metrologia e Sociedade Brasileira de Metrologia, Julho, São Paulo, 1997. 67 p.
- [29] JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION **JIS Handbook - Mechanical Instrumentation Tolerances - Allowable Deviations and Permissible Wears of Limit Gauges: JIS B 7421,** p. 416-426, Tokyo, 1993.
- [30] JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION **JIS Handbook Mechanical Instrumentation - Limit Gauges: JIS B 7420,** p. 393-415, Tokyo, 1993.
- [31] CERTI **Serviços Tecnológicos na Divisão de Medição e Qualificação - Metrologia Dimensional,** Florianópolis, 2001
- [32] NORONHA, J. L.; BARCA, L. F. **Cálculo de incerteza na calibração de Máquina de Medir Universal.** Anais em CD do CONEM- Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2002.

- [33] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG **Stahlwinkel 90°:** DIN 875, Berlin, März, 1981.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Esquadros de Aço 90°:** NBR 9972. - ABNT, Dezembro, Rio de Janeiro, 1993.
- [35] JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION **JIS Handbook - Mechanical Instrumentation Squares:** JIS B 7526, p. 861-873, Tokyo, 1993.
- [36] JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION **JIS Handbook - Mechanical Instrumentation Cylindrical Squares:** JIS B 7539, p. 802-808, Tokyo, 1993.
- [37] MITUTOYO **Lista de serviços do Laboratório de Calibração.** Laboratório de Metrologia, São Paulo, 2002.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Réguas com fio - Especificação:** NBR 8192, outubro, Rio de Janeiro, 1983.
- [39] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG **Lineale - Flachlineale aus Stahl, Masse Technische Lieferbedingungen:** DIN 874 - Blatt 1, Berlin, August, 1973.
- [40] JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION **Steel Straightedges:** JIS B7514, Tokyo, 1977.
- [41] MITUTOYO **Catálogo PG-41/2.** Mitutoyo Sul Americana Ltda; São Paulo, 1998.
- [42] SCHNEIDER, C. A.; SHOELER, N.; VEIGA, C. L. V. **Qualificação de Máquinas Ferramentas e Máquinas de Medir por Coordenadas.** Curso de treinamento CERTI/LABMETRO - UFSC, Florianópolis, 1989.
- [43] SENAI - MG **Relação de serviços credenciados RBC.** Laboratório de Metrologia Dimensional do SENAI, Contagem, 2002.
- [44] BOSCH, J. A. **Coordinate Measuring Machines and Systems.** New York: Marcel Dekker Inc., 1995. 444 p.
- [45] NORONHA, J. L. **Qualificação de Máquinas de Medir por Coordenadas com padrões corporificados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 1994. 134 p.
- [46] TRAPET, E.; WALDELE, F. **Quality Assurance of Coordinate Measuring Machines.** PTB, Braunschweig, 1993.
- [47] TRAPET, E.; WALDELE, F. **Coordinate Metrology - Flexibility in conflict with accuracy?** Seminário Internacional de Metrologia para o Controle da Qualidade, Florianópolis, 21 a 22 de agosto, 1997.

- [48] MIGUEL, P.A.C. **CMM performance verification, considerations for a virtual artefact approach.** PhD Thesis, School of Manufacturing and Mechanical Engineering, University of Birmingham, Edgbaston - Birmingham, 1996. 227 p.
- [49] BREZINA, I. **Metrological Testing of Coordinate Measuring Machines.** 3rd International IMEKO - Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control ISMQC, VDI Berichte, Vol. 761, pp. 55-60, 1989.
- [50] KNAPP, W.;
TSCHUDI, U.;
BUCHER, A. **Comparison of different artefacts for interim Coordinate Measuring Machine Checking: A report from the Swiss Standards Committee.** Precision Engineering, Vol. 13, N^o. 4, pp.277-291, october, 1991.
- [51] KUNZMANN, H.;
WALDELE, F. **Performance of CMM.** Annals of the CIRP, Vol. 37/2, pp. 633-640, 1988.
- [52] TRAPET, E.;
WALDELE, F. **Determination of the parametric error of Coordinate Measuring Machines and Machine Tools using reference objects.** 3rd International IMEKO - Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control ISMQC, VDI Berichte, Vol. 761, pp. 163-175, 1989.
- [53] PIRATELLI, A. **Método para avaliação do desempenho de Máquinas de Medir a Três Coordenadas através de planejamento de experimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1997. 225 p.
- [54] ABACKERLI, A. J.;
MIGUEL, P. A. C. **Máquina Virtual: boa para estimar as incertezas na medição por coordenadas.** Máquinas e Metais, p. 78-87, São Paulo, Fevereiro, 1997.
- [55] TRAPET, E. **Introduction to Traceability with the Virtual CMM.** Workshop on Traceability of Coordinate Measuring Machines, PTB, Braunschweig, October 9-10, 1997.
- [56] HANSEN, H. N.;
TRAPET, E. **An Approach to Uncertainty Estimation in Coordinate Metrology - Progress in Precision Engineering and Nanotechnology.** Proceedings of the 9th International Precision Engineering Seminar, Braunschweig, Germany, p. 295-297, 1997.
- [57] SCHWENKE, H.;
TRAPET, E.;
WÄLDELE, F. **Coordinate Measuring Machines - How to make best use their accuracy?** Advanced School of Mechanical Metrology, Canela, RS, April, 1997.
- [58] HÜSER, D.;
TRAPET, E.;
SCHWENKE, H.;
WÄLDELE, F.;
WIEGAND, U. **Calibration of Coordinate Measuring Machines Based on Ball Plates.** Physikalisch - Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany, 1994.

- [59] PTB; NPL; TUE. **Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine.** Proposed Guideline, PTB, Braunschweig, State: August, 1997.
- [60] PTB; NPL; TU EINDHOVEN; FEINMESS; BROWN AND SHARP; ZEISS **Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of Virtual Measuring Machine.** Proposed Guideline State: August 1997, Part 2 of the Draft Final Report, Project MAT1-CT94-0076, PTB, Braunschweig, August, 1998.
- [61] EUROPEAN COMMISSION **Development of methods and guidelines to establish traceability for measurements with Coordinate Machines.** Part 1 - EUR Report N° 18828 - Final Reporter, Part. II - PTB Reporter- Guidelines. Luxembourg, 1999.
- [62] BEUCK, W. H. **Entwicklung und Realisierung eines Kontur-Prüfkörpers für die aufgabenspezifische Überwachung von Koordinatenmessgeräten.** - Aachen; Alemanha., 1993.
- [63] VEIGA, C. L. N. **Tecnologia de Medição por Coordenadas - Verificação e Calibração.** Curso Fundação CERTI, Florianópolis, SC, Agosto, 1997.
- [64] VEIGA, C. L. N.; KLEN, E. R. **Calibração de Máquinas de Medir por Coordenadas com Placas de Esferas.** Seminário Internacional de Metrologia para o Controle da Qualidade, Florianópolis, Brasil, 21 a 22 Agosto, 1997.
- [65] VICENTE, B. R.; NORONHA, J. L. **Manual de utilização do Kalkom - Versão 2.0.** LABMETRO/PET-UFSC, 1999.
- [66] VICENTE, B. R.; NORONHA, J.L. **Manual de utilização do Megakal.** LABMETRO/PET-UFSC, 2000.
- [67] SCHWENKE, H.; TRAPET, E.; WÄLDELE, F. **Coordinate Measuring Machines - How to make best use their accuracy?** Advanced School of Mechanical Metrology, Canela, RS/Brazil, April, 1997.
- [68] SCHWENKE, H.; TRAPET, E.; WÄLDELE, F. **Pushing the Limits of Accuracy of Coordinate Measurements.** Proceeding of the 9th International Precision Engineering Seminar, 4th International Conference on Ultraprecision in Manufacturing Engineering, Braunschweig, Germany, vol. 1, p. 331-335, 26-30 May, 1997.
- [69] EVANS, J. **Self-Calibration: Reversal, Redundancy, Error Separation and "Absolute Testing.** Annals of the CIRP, vol. 45/2, p. 617-634, 1996.
- [70] EUROPEAN COOPERATION FOR ACCREDITATION OF LABORATORIES **Coordinate Measuring Machine Calibration: EAL-G17, Edition 1, 1995.**

- [71] ABNT; INMETRO; SBM **Guia para expressão da incerteza de medição" - Segunda edição brasileira do Guide to the expression of uncertainty in measurement.** INMETRO, Rio de Janeiro, 1998. 120 p.
- [72] NORONHA, J. L.; BARCA, L.F. **Controle de equipamentos de inspeção, medição e ensaios: Procedimento de cálculo de incerteza de medição em medições diretas.** Anais do XXI ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Salvador, 2001.
- [73] NORONHA, J. L.; SCHNEIDER, C. A.; BARROS, A. B. **Avaliação da incerteza na calibração de padrão escalonado em Máquinas de Medir por Coordenadas - Método da comparação.** Anais do CONEM - Congresso Nacional de Engenharia de Mecânica, Natal, 2000.
- [74] LOPES, O. **Tecnologia Mecânica - Elementos para fabricação em série.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1983. 178 p.
- [75] NORONHA, J. L.; SCHNEIDER, C. A. **Validação do uso das Máquinas de Medir por Coordenadas na calibração de anel calibrador anel liso cilíndrico.** Anais do METROCAL- Metrologia para la Productividad y Calidad, II Congresso Chileno e Internacional de Metrologia, p. 32-39, Chile, 2001.
- [76] NORONHA, J. L.; SCHNEIDER, C. A. **Máquinas de Medir por Coordenadas na calibração de calibradores.** Anais do COBEM- Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2001.
- [77] EUROPEAN COOPERATION FOR ACCREDITATION OF LABORATORIES **Extent of calibration for cylindrical diameter standards:** EAL-G29. European Cooperation for Accreditation of Laboratories, 1997.
- [67] NORONHA, J. L.; SCHNEIDER, C. A.; BARCA, L. F. **Calibração de esquadros em Máquinas de Medir por Coordenadas.** Anais do CONEM, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2002.