

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

Mateus Dieckmann de Oliveira

**CALIBRAÇÃO DE MEDIDAS MATERIALIZADAS DE**  
**COMPRIMENTO UTILIZANDO UM *LASER***  
**INTERFEROMÉTRICO DE RASTREAMENTO**  
**AUTOMÁTICO E UMA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR**  
**COORDENADAS**

Florianópolis

2014



Mateus Dieckmann de Oliveira

**CALIBRAÇÃO DE MEDIDAS MATERIALIZADAS DE  
COMPRIMENTO UTILIZANDO UM *LASER*  
INTERFEROMÉTRICO DE RASTREAMENTO  
AUTOMÁTICO E UMA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR  
COORDENADAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Gustavo Daniel Donatelli

Coorientador: Prof. Dr.-Ing. Mauricio de Campos Porath

Florianópolis

2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Oliveira, Mateus Dieckmann de

Calibração de Medidas Materializadas de Comprimento  
Utilizando um Laser Interferométrico de Rastreamento  
Automático e uma Máquina de Medição Por Coordenadas /  
Mateus Dieckmann de Oliveira ; orientador, Gustavo Daniel  
Donatelli ; coorientador, Mauricio de Campos Porath. -  
Florianópolis, SC, 2014.

149 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Metrologia científica. 3.  
Coordenadas. 4. Laser de Rastreamento Automático. 5.  
Incerteza de Medição. I. Donatelli, Gustavo Daniel. II.  
Porath, Mauricio de Campos. III. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica. IV. Título.

Mateus Dieckmann de Oliveira

**CALIBRAÇÃO DE MEDIDAS MATERIALIZADAS DE  
COMPRIMENTO UTILIZANDO UM LASER  
INTERFEROMÉTRICO DE RASTREAMENTO AUTOMÁTICO  
E UMA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 07 de março de 2014.



---

Prof. Gustavo D. Donatelli, Dr. Eng.  
Orientador e Presidente da Banca



---

Prof. Mauricio C. Porath Dr.-Ing.  
Coorientador

**Banca Examinadora:**



---

Prof. Armando Albertazzi G. Junior, Dr. Eng.  
Membro e Coordenador do Curso



---

Prof. Tiago L. F. da Costa Pinto, Dr. Eng.  
Membro



---

Celso Luiz Nickel Veiga, Dr. Eng.  
Membro



## **AGRADECIMENTOS**

A minha esposa, Liliane, essa grande mulher que, com sabedoria, se aloja no meu coração, obrigado por tanto amor, pela boa convivência, pelo carinho e compreensão e por se esforçar diariamente em fazer de mim uma pessoa melhor.

Ao orientador e colega Prof. Dr. Gustavo Daniel Donatelli, pela orientação, motivação, apoio e pelo fato de ter me deixado à vontade para documentar meu trabalho com minhas próprias palavras.

À Fundação CERTI, pela oportunidade de fazer parte deste time de elite da metrologia. A todos os colegas de trabalho, pelo suporte, em especial ao Dr. Crhistian Raffaello Baldo, ao Eng. Alexandre Lucas e ao Téc. Clodoaldo de Campos Marques.

Ao Prof. Dr.-Ing. Mauricio de Campos Porath, a quem tenho como amigo de longa data. Pelas contribuições preciosas no desenvolvimento e enriquecimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, professores, alunos e colaboradores, em especial ao Prof. Dr. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior por sua sapiência, tranquilidade e profissionalismo na condução do Programa.



## RESUMO

A confirmação da rastreabilidade metrológica para padrões de comprimento maiores do que 100 mm, considerando a adequação da incerteza de medição para aplicações atuais, não denota uma tarefa trivial, apesar de haver uma demanda cada vez maior, resultado das novas tecnologias de fabricação. É o caso, por exemplo, dos fabricantes de peças e componentes para aerogeradores e máquinas-ferramenta de ultraprecisão. Em geral, apenas laboratórios de calibração no exterior podem prover a incerteza alvo requerida, visto que nenhum laboratório de calibração acreditado no Brasil e nem mesmo o Laboratório de Metrologia Dimensional do Inmetro é capaz de entregar incertezas de medição adequadas na calibração de padrões de comprimento de grande porte.

Com a motivação dada pelo cenário atual para calibração de padrões de comprimento de grande porte, esta dissertação de mestrado objetiva a concepção e a caracterização experimental de uma sistemática para calibração de padrões de comprimento maiores do que 100 mm, baseada na fusão de um sistema de interferometria a *laser* com rastreamento automático e uma máquina de medição por coordenadas de alta exatidão com portal móvel. A sistemática proposta foi intensivamente testada e aprimorada continuamente para torná-la adequada e viável, dentro da rotina de um laboratório de calibração, e para reduzir a incerteza de medição. O principal resultado do projeto de pesquisa proposto foi um

sistema de medição capaz de entregar incertezas melhores do que as fornecidas pelo laboratório de metrologia dimensional do Inmetro para a calibração de padrões de comprimento de grande porte, com potencial de alcançar incertezas comparáveis às oferecidas por laboratórios de calibração existentes no exterior.

**Palavras-chave:** Metrologia por coordenadas, calibração de padrões de comprimento, padrão escalonado, bloco padrão, haste padrão, interferometria *laser* com rastreamento automático.

## ABSTRACT

Metrological traceability achievement for length artefacts longer than 100 mm with very low measurement uncertainty is not a trivial task, despite the increasing demand from current manufacturing technologies for such a reduced uncertainty. That is an issue handled, for instance, by manufacturers of wind turbine components and ultraprecise machine tools. In general, only international calibration laboratories can provide the required target uncertainty, since there's no national laboratory accredited to perform calibration of long length artefacts and even the National Metrology Institute are not able to reach very low uncertainty, due to inadequate laboratory resources.

The matter of this master project was designing and experimentally characterizing a fused measurement apparatus to calibrate long length artefacts with low uncertainty. The association of a self-tracking laser interferometer system and a high-end movable-bridge coordinate measuring machine was intensively tested and continuously improved in search of making the proposed method feasible in the laboratory routine and enhancing the measurement uncertainty. The main outcome of this research project was a fused measurement method capable of delivering uncertainties for the calibration of long step gauges lower than those uncertainties provided by the national metrology institute, with potential to reach uncertainties comparable to foreign calibration laboratories.

**Keywords:** Coordinate metrology, length calibration, step gauge, gauge block, length bar, self-tracking laser interferometer.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bloco padrão.....	35
Figura 2 - Variação do comprimento .....	36
Figura 3 - Blocos padrão em liga de lítio-alumínio-silicato .....	38
Figura 4 - Padrão escalonado .....	41
Figura 5 - Efeitos da flexão do padrão escalonado [meramente ilustrativa] .....	42
Figura 6 – Ilustração de um padrão escalonado de exatidão .....	43
Figura 7 - Vista lateral em corte de um padrão escalonado.....	44
Figura 8 - Erro de cosseno decorrente do desalinhamento do <i>laser</i> interferométrico .....	46
Figura 9 – Influência do desalinhamento na forma de erro de cosseno.	47
Figura 10 - Erro de primeira ordem.....	48
Figura 11 - Erro de Abbé demonstrado sobre a guia de um equipamento .....	49
Figura 12 – Faces de medição no padrão escalonado.....	55
Figura 13 - Apoio adequado para blocos padrão.....	56
Figura 14 - Pesquisadores e instituições.....	59
Figura 15 - MMC tipo portal com mesa móvel e <i>laser</i> interferométrico .....	60

Figura 16 - MMC tipo portal móvel e <i>laser</i> interferométrico .....	61
Figura 17 - Arranjo entre MMC e <i>laser</i> interferométrico .....	62
Figura 18 - Diagrama de montagem no LAMED .....	64
Figura 19 – Montagem do sistema para configuração simples .....	66
Figura 20 – Montagem do sistema para configuração de quatro feixes .....	66
Figura 21 - Incerteza de medição em laboratórios privados .....	72
Figura 22 – Sistema de interferometria <i>laser</i> de rastreio automático - LaserTracer .....	76
Figura 23 – Diagrama dos componentes do LaserTracer.....	77
Figura 24 – MMC Prismo Ultra.....	80
Figura 25 - Planta baixa esquemática dos laboratórios de metrologia..	81
Figura 26 - Apalpador de medição com refletor integrado .....	84
Figura 27 - Montagem do apalpador integrado.....	85
Figura 28 - Sinal do LaserTracer representado no tempo .....	87
Figura 29 - Ângulos de elevação e azimutal .....	90
Figura 30 - Acoplamento dos sistemas coordenados cartesiano e polar	91
Figura 31 - Trajetória do apalpador no plano cartesiano .....	92
Figura 32 - Deslocamento do LaserTracer.....	93
Figura 33 - Diagrama do volume de avaliação dos gradientes térmicos	96
Figura 34 - Disposição dos sensores de temperatura .....	97
Figura 35 - Estudo de apalpação com MMC .....	101

Figura 36 - Ensaio de posicionamento .....	105
Figura 37 – Montagem simples, inviabilizada pelo peso da estrutura.	108
Figura 38 – Etapas de alinhamento do primeiro experimento.....	109
Figura 39 - Montagem da primeira rodada de experimentos.....	110
Figura 40 - Plano Cartesiano - Sistema de Eixos .....	111
Figura 41 - Alinhamento matemático do sistema coordenado .....	112
Figura 42 – Análise do erro de cosseno .....	114
Figura 43 - Reconfiguração da fixação utilizando calços niveladores	120
Figura 44 - Calços niveladores e fixação .....	121
Figura 45 - Etapas de alinhamento do segundo experimento.....	122
Figura 46 - Etapas de alinhamento no terceiro experimento.....	126
Figura 47 - Detalhe dos calços niveladores e da influência da força de medição .....	128
Figura 48 – Consulta ao escopo acreditado Fundação CERTI em Janeiro/2014.....	139



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Exemplo de erro de apalpação bidirecional na medição por coordenadas.....	55
Gráfico 2 - Característica de apalpação da MMC (força x tempo).....	67
Gráfico 3 - Resultado da intercomparação laboratorial para padrão escalonado.....	69
Gráfico 4 - Mapeamento do comportamento do sinal do LaserTracer..	88
Gráfico 5 - Sinal do LaserTracer na faixa de interesse.....	89
Gráfico 6 - Variação da temperatura ambiente.....	98
Gráfico 7 - Validação dos sensores de temperatura .....	99
Gráfico 8 - Resultados do erro de apalpação bidirecional sobre bloco padrão de 10 mm.....	102
Gráfico 9 - Resultados das medições realizadas sobre o bloco de 60 mm .....	103
Gráfico 10 - Monitoramento da temperatura no ensaio de posicionamento .....	105
Gráfico 11 - Erro de posicionamento – Ao longo do eixo Y.....	106
Gráfico 12 - Resultados médios do primeiro experimento.....	113
Gráfico 13 - Comportamento do erro de cosseno.....	116
Gráfico 14 - Amplitude de leituras e posição do LaserTracer.....	118
Gráfico 15 - Resultados do segundo experimento.....	123

Gráfico 16 - Resultados terceiro experimento - Padrão Escalonado...	127
Gráfico 17 - Contribuição do erro de cosseno .....	133
Gráfico 18 - Desvio padrão do LaserTracer em função do comprimento .....	135
Gráfico 19 - Erro normalizado em relação ao método acreditado .....	141
Gráfico 20 - Erro normalizado em relação ao certificado de referência .....	142

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CERTI: Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras

CMC: Capacidade de medição e calibração

DAkKS: *Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH*

EURAMET: *European Association of National Metrology Institutes*

HP: *Hewlett-Packard*

ISO: *International Organization for Standardization*

JSSC: *Japan Calibration Service System*

KRISS: *Korea Research Institute of Standards and Science*

METAS: *Federal Institute of Metrology is the Swiss National Metrology Institute*

MMC: Máquina de medição por coordenadas

NIM: *National Institute of Metrology (China)*

NPL: *National Physical Laboratory*

RBC: Rede Brasileira de Calibração

SIOS: *SIOS Meßtechnik GmbH*

U: Incerteza de medição expandida

VDI: *Vereins Deutscher Ingenieure*

VDE: *Verbands der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik*



# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	27
1.1	Rastreabilidade na calibração de padrões lineares de grande porte 27	
1.2	Problemática da calibração de padrões de grande comprimento no Brasil.....	28
1.3	Objetivos específicos .....	29
1.4	Estrutura da dissertação.....	30
2	FUNDAMENTOS METROLÓGICOS DA CALIBRAÇÃO DE PADRÕES DE COMPRIMENTO.....	33
2.1	Características relevantes das medidas materializadas de comprimento no escopo deste trabalho .....	33
2.1.1	Blocos padrão retangulares.....	33
2.1.2	Padrões escalonados .....	40
2.2	Erros típicos na calibração de padrões de comprimento .....	45
2.2.1	Erro de cosseno ou de segunda ordem.....	45
2.2.2	Erro de seno ou de primeira ordem.....	47
2.2.3	Efeitos térmicos .....	49
2.2.4	Correção do índice de refração do ar .....	51
2.2.5	Deformação das superfícies de contato.....	52
2.2.6	Erro de apalpação bidirecional.....	53
2.2.7	Deformação por peso próprio .....	56
2.3	Calibração de medidas materializadas de grande porte.....	57

2.4 Disponibilidade de serviços de calibração de padrões lineares de grande porte .....	70
2.4.1 Cenário nacional .....	70
2.4.2 Cenário internacional .....	71
3 PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVOS.....	73
4 EQUIPAMENTOS E MÉTODOS.....	75
4.1 Componentes do Sistema.....	75
4.1.1 <i>Laser</i> interferométrico de rastreo automático - LaserTracer .....	75
4.1.3 Máquina de medir por coordenadas (MMC).....	78
4.1.4 Local de instalação.....	80
4.1.5 Medidas materializadas de referência .....	81
4.1.6 <i>Softwares</i> .....	82
4.2 Integração dos sistemas .....	82
4.2.1 Montagem do espelho do LaserTracer .....	83
4.2.2 Integração de <i>software</i> .....	86
4.2.3 Alinhamento relativo.....	90
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	95
5.1 Caracterização da temperatura.....	95
5.1.1 Estabilidade térmica e gradientes térmicos do laboratório .....	95
5.1.2 Capacidade de medição de temperatura por contato .....	99
5.2 Caracterização do desempenho metrológico da máquina de medição por coordenadas.....	100
5.2.1 Estudo do erro de apalpação bidirecional.....	100
5.2.2 Estudo do erro de posicionamento .....	104
5.3 Experimentos integrados.....	107
5.3.1 Primeiro experimento.....	107

5.3.2 Segundo experimento .....	119
5.3.3 Terceiro experimento .....	124
5.4 Estimativa de incerteza de medição .....	129
5.4.1 Modelo matemático do processo de medição .....	129
5.4.2 Descrição das fontes de incerteza e quantificação .....	131
5.4.3 Balanço de incertezas .....	136
5.5 Comparação entre métodos por substituição e proposto .....	139
5.6 Comparação dos resultados do método proposto com calibração de referência.....	141
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	145



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Rastreabilidade na calibração de padrões lineares de grande porte

Medidas materializadas de comprimento são artefatos especialmente construídos para servirem como objetos de referência para dimensões lineares, apresentando requisitos específicos de dureza elevada, baixo erro de forma e geometria simples, e também rigidez adequada. As medidas materializadas de comprimento devem ainda ser estáveis mecânica e termicamente.

No contexto da evolução de processos industriais de fabricação, não há como desassociar a evolução das máquinas-ferramenta e a necessidade de medidas materializadas de comprimento para suporte ao controle da qualidade. A condição de intercambiabilidade dos componentes que, na indústria bélica, por exemplo, era imprescindível para o adequado desempenho dos armamentos, impactou positivamente toda a cadeia de transformação. Da necessidade de garantia da intercambiabilidade, surgiram desafios e também oportunidades. Nos desafios, destacam-se a adoção do Sistema Internacional de Medidas e o estabelecimento de critérios bem definidos de comparabilidade. Nas oportunidades, o desenvolvimento e produção de padrões corporificados que fossem aceitos no âmbito científico e industrial.

O abismo, em termos de exatidão, entre a metrologia dimensional para calibrar uma dimensão de até 75 mm e algo em torno de 400 mm remete aos tempos do surgimento dos primeiros padrões corporificados.

No Brasil, este cenário é ainda mais distante quando se fala em rastreabilidade adequada a padrões lineares de grande porte, e grandes esforços necessitam ser empreendidos na busca por incertezas de medição suficientemente baixas.

## **1.2 Problemática da calibração de padrões de grande comprimento no Brasil**

No Brasil, uma parte expressiva dos padrões de grande porte é usada para calibração de instrumentos manuais e outras aplicações onde não se requer uma elevada exatidão. Esses padrões são calibrados em laboratórios da Rede Brasileira de Calibração (RBC) que utilizam geralmente o método de comparação. Conseqüentemente, o serviço oferecido não tem capacidade para fornecer rastreabilidade com incertezas de medição baixas. Apenas o Inmetro realiza a calibração de padrões lineares de grande porte com incertezas baixas, mas, mesmo assim, maiores que as oferecidas por outros laboratórios estrangeiros.

Hoje em dia, laboratórios e instituições que necessitam de calibrações de padrões lineares de comprimento de grande porte com incerteza de medição reduzida recorrem, frequentemente, a calibrações em laboratórios de calibração no exterior. O envio de padrões para calibração no exterior, por sua vez, demanda processos de exportação temporária, sabidamente morosos e burocráticos e, na maioria dos casos, resulta em um longo período de indisponibilidade do padrão, além de ser dispendioso e arriscado do ponto de vista logístico.

Visando ao preenchimento de uma lacuna no âmbito da rastreabilidade metrológica brasileira, mais especificamente no que diz respeito à calibração de padrões lineares de grande porte, propõe-se o

desenvolvimento de uma metodologia para calibração de padrões escalonados e blocos padrão de grande porte, a partir de uma associação entre um sistema de interferometria *laser* e uma máquina de medição por coordenadas do tipo portal móvel.

### **1.3 Objetivos específicos**

No contexto de um Laboratório acreditado junto à RBC, almeja-se evidenciar a capacidade para calibração de padrões de até 1000 mm, com capacidade de medição e calibração (CMC) comparáveis às do Inmetro.

Objetiva-se que o método proposto não converta a máquina de medição por coordenadas em um equipamento dedicado à calibração de medidas materializadas de grande porte.

## 1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos.

2. FUNDAMENTOS METROLÓGICOS DA CALIBRAÇÃO DE PADRÕES DE COMPRIMENTO, neste capítulo são detalhadas as características de blocos padrão de grande porte e padrões escalonados de impacto sobre resultados de medição. São abordados os erros típicos na calibração de padrões lineares de grande porte e reportados os desenvolvimentos de pesquisadores sobre o tema. Para melhor contextualização, foi inclusa uma abordagem a respeito dos cenários nacional e internacional de provedores de serviços de calibração, aplicáveis a padrões de grande porte.

3. PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVOS, neste capítulo é justificada a necessidade de desenvolvimento de uma alternativa, aplicável no âmbito laboratorial e industrial, na provisão de serviços de calibração, com baixas incertezas de medição, aplicáveis a padrões de grande porte.

4. EQUIPAMENTOS E MÉTODOS, neste capítulo são detalhados o ambiente de medição e os equipamentos utilizados no desenvolvimento da proposta, suas características e limitações. É descrita a sistemática de integração de *softwares*, considerando-se que os equipamentos apresentam plataformas de operação distintas.

5. RESULTADOS, neste capítulo são descritos os resultados de três rodadas de experimentos de aplicação prática e a série de ensaios auxiliares que foi realizada, para incremento do nível de conhecimento a respeito do desempenho da máquina de medição por coordenadas, em associação ao sistema interferométrico de rastreamento automático. É

demonstrado um balanço de incertezas, que corresponde à melhor capacidade de medição obtida com o método proposto.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES, neste capítulo são apresentadas as conclusões e as condições que permeiam a obtenção de resultados confiáveis. Foram inclusas neste capítulo, as sugestões para continuidade de pesquisa no tema e descritas as ações necessárias para que a proposta avance para uma atualização de escopo de acreditação junto à CGCRE.



## **2 FUNDAMENTOS METROLÓGICOS DA CALIBRAÇÃO DE PADRÕES DE COMPRIMENTO**

Este capítulo é dedicado à descrição dos padrões lineares de grande porte que pertençam ao escopo desta dissertação e aos processos envolvidos em suas calibrações. Faz-se uma revisão das principais componentes do erro de medição e, por último, uma compilação do estado da arte relativo à calibração de padrões lineares de grande porte.

### **2.1 Características relevantes das medidas materializadas de comprimento no escopo deste trabalho**

No escopo deste trabalho são descritas características relevantes inerentes a medidas materializadas de comprimentos entre 100 mm a 1100 mm, aplicáveis à calibração de outros padrões de comprimento e à calibração de equipamentos de medição. A calibração de barras de esferas e hastes padrão não está contemplada no escopo desta dissertação, uma vez que não apresentam característica de faces planas.

#### **2.1.1 Blocos padrão retangulares**

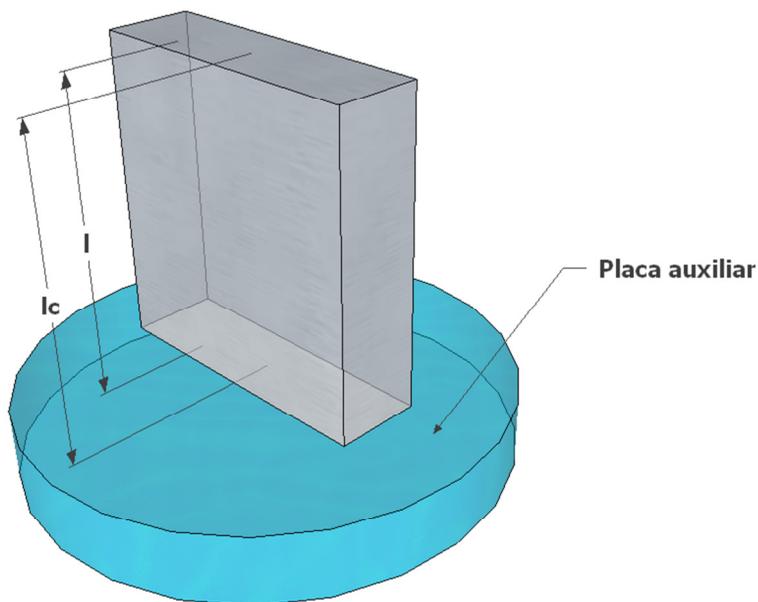
Os blocos padrão retangulares são medidas materializadas de comprimento com ampla utilização pela indústria. Constituem a base da cadeia de rastreabilidade no setor metalomecânico e seguem critérios bem definidos de construção, os quais são delineados nos parágrafos seguintes.

De acordo com norma ISO 3650 <sup>(18)</sup>, os blocos padrão possuem comprimentos padronizados de 0,5 mm a 1000 mm. Os blocos padrão são construídos em corpos retangulares, com faces planas e paralelas, que possuem grau de acabamento de lapidação e elevado grau de exatidão dimensional e geométrica, o que permite sua adesão, por atração molecular, e a associação de blocos padrão para a obtenção de dimensões de referência com valores fracionados.

A prática de associação de blocos padrão de até 100 mm é bastante usual, entretanto exige bom estado de conservação das faces de medição. A atração molecular só é possível em faces planas, livres de arranhões, amassamentos e oxidação. Além disso, o cuidado com o manuseio e a limpeza é fundamental para garantir a montagem. Em blocos longos, acima de 100 mm, a adesão é bastante difícil e exige acessórios de fixação que podem gerar dúvidas a respeito da qualidade da união das faces associadas. Os limites máximos admissíveis de planeza e paralelismo das faces são maiores, além do peso próprio dos blocos que complica sua adesão molecular, restringindo bastante a aplicabilidade nas operações de alta exatidão.

A definição de comprimento “l” descrita na norma ISO 3650 <sup>(18)</sup> para um bloco padrão considera a distância perpendicular entre qualquer ponto específico da face de medição e a superfície plana de uma placa auxiliar, de mesmo material e textura superficial, sobre a qual a outra face de medição está aderida, conforme figura 1.

Figura 1 - Bloco padrão

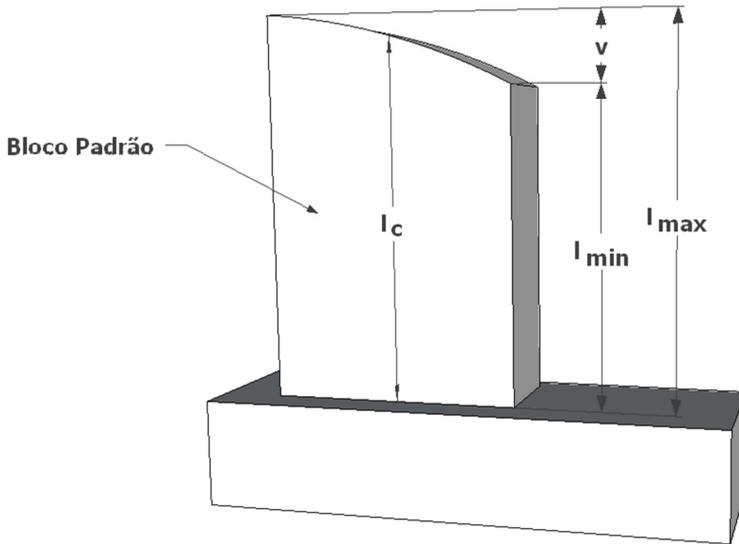


Fonte: <sup>(18)</sup>

Na figura 1, também é demonstrado o comprimento no ponto central do bloco padrão " $l_c$ ", que é definido como o comprimento tomado no ponto central da face de medição.

A variação do comprimento " $v$ ", apresentada na figura 2, é definida pela diferença entre o comprimento máximo " $l_{max}$ " e o comprimento mínimo " $l_{min}$ " entre as faces de medição do bloco padrão. Na calibração pelo método da comparação, também conhecido como método diferencial, considera-se a diferença de comprimento entre o centro do bloco padrão e as suas quatro extremidades, em relação ao centro de um bloco padrão de referência.

Figura 2 - Variação do comprimento



Fonte: adaptada de <sup>(18)</sup>

O comprimento de um bloco padrão de até 100 mm de comprimento nominal refere-se à orientação do bloco na posição vertical, estando dispostas suas faces de medição na posição horizontal. Por sua vez, o comprimento de um bloco padrão superior a 100 mm de comprimento nominal refere-se à orientação horizontal. Estando o bloco apoiado sobre uma das faces laterais estreitas, sem esforço adicional, por meio de suportes adequados situados sobre os pontos de Bessel (cada um a uma distância de 0,211 vezes o comprimento nominal das extremidades). Quando blocos longos são medidos pelo processo de interferometria na posição horizontal, o peso da placa auxiliar aderida em uma das faces de medição deve ser compensado <sup>(18)</sup>.

A classificação dos blocos padrão depende fundamentalmente de seu grau de exatidão, definido com base nos resultados do processo de calibração. A tabela 1 exemplifica o grau de exatidão para blocos longo de até 1000 mm, de acordo com a ISO 3650 <sup>(18)</sup>.

Tabela 1 - Limites de erro para blocos padrão

Comprimento nominal, $l_n$  mm	Calibração Classe K		Classe 0		Classe 1	
	Limite de desvio de comprimento  $\pm t_e$ $\mu\text{m}$	Tolerância para variação no comprimento  $t_v$ $\mu\text{m}$	Limite de desvio de comprimento  $\pm t_e$ $\mu\text{m}$	Tolerância para variação no comprimento  $t_v$ $\mu\text{m}$	Limite de desvio de comprimento  $\pm t_e$ $\mu\text{m}$	Tolerância para variação no comprimento  $t_v$ $\mu\text{m}$
700 < $l_n \leq 800$	3,4	0,2	1,7	0,3	3,4	0,5
800 < $l_n \leq 900$	3,8	0,2	1,9	0,35	3,8	0,5
900 < $l_n \leq 1000$	4,2	0,25	2	0,4	4,2	0,6

Fonte: adaptada de <sup>(18)</sup>, os valores inferiores a 700 mm foram omitidos

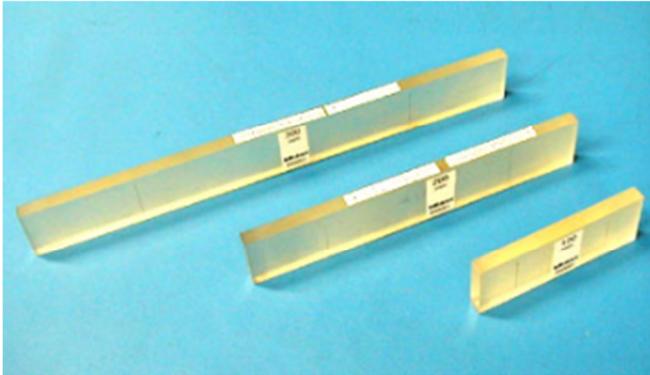
A temperatura de referência para calibração de blocos padrão é definida na ISO 1: 2002 <sup>(19)</sup> e tem seu valor fixado em 20 °C.

O coeficiente de dilatação térmica típico para blocos de aço é de  $(11,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Para blocos de aço com grau de exatidão da classe K, o coeficiente de dilatação térmica calibrado e sua respectiva estimativa de incerteza de medição são também informados no certificado de calibração fornecido pelo fabricante. Para todo o tipo de bloco padrão, construído em material diferente do aço, essas informações também devem ser fornecidas.

Em relação a blocos padrão construídos em outros materiais, destacam-se os de ligas especiais de metal duro, cerâmica e as combinações de lítio-alumínio-silicato (vidro), comercialmente conhecidos por denominações do tipo ZERODUR, SUPER-INVAR e

CERVIT, que possuem coeficiente de dilatação térmica próximo a zero. Um exemplo é exibido na figura 3.

Figura 3 - Blocos padrão em liga de lítio-alumínio-silicato



Fonte:<[www.mitutoyo.co.jp](http://www.mitutoyo.co.jp)>

A calibração de blocos padrão de referência é realizada por interferometria, a partir da definição básica da unidade de comprimento. O metro é definido como o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo em  $1/299792458$  de um segundo (17<sup>a</sup>. Conferência Geral de Pesos e Medidas, 1983). A definição é estabelecida para os comprimentos de onda padronizados, recomendados pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM).

O comprimento medido de um bloco padrão é rastreável a padrões nacionais ou internacionais de medida, se o resultado de medição relaciona-se a uma cadeia ininterrupta de medições de comparação, cada uma com incertezas de medição estabelecidas. No caso de um bloco padrão que foi calibrado por interferometria, a cadeia ininterrupta remete aos comprimentos de onda de referência que foram utilizados <sup>(5)</sup>.

Pela necessidade de adesão molecular do bloco padrão a calibrar com uma placa auxiliar, para a realização da calibração por interferometria, há severa restrição à calibração de blocos que apresentem quaisquer riscos, imperfeições ou amassamentos em suas respectivas faces de medição.

Em alternativa à calibração por interferometria, associado à vantagem do custo de calibração, do tempo dispendido no processo e da disponibilidade de oferta de provedores, dispõe-se do método da calibração diferencial. Contudo, este método apresenta limitações em relação à incerteza de medição superiores às obtidas com a calibração por interferometria.

Na medição de blocos de até 100 mm é utilizado um comparador de blocos padrão, onde ficam dispostos lado a lado o bloco de referência e o bloco a calibrar. O sistema desliza o par de blocos sobre roletes paralelos, possibilitando a movimentação e posicionamento dos blocos. As faces são tocadas por dois sensores contrapostos e a diferença de comprimentos é obtida pelo indicador.

A calibração mais usual é restrita à avaliação do desvio do comprimento central, a alternativa mais criteriosa inclui a determinação da variação do comprimento. A calibração mais simples é tipicamente utilizada em blocos das classes mais baixas e em blocos longos. A segunda, mais adequada a blocos padrão de até 100 mm, permite acompanhar o desgaste das faces de medição, muitas vezes causado pela associação inadequada de blocos padrão.

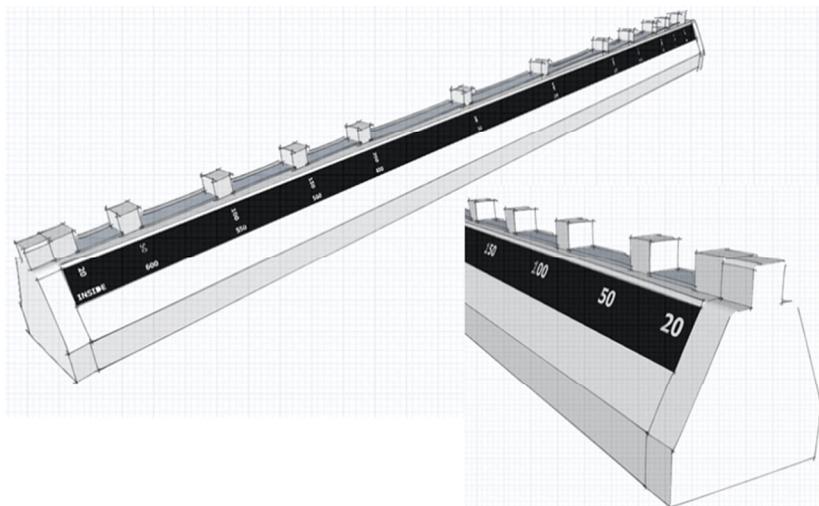
### 2.1.2 Padrões escalonados

Concebidos por Carl Edvard Johansson, por volta de 1890 <sup>(23)</sup>, os padrões escalonados foram elementos pioneiros na padronização e organização do sistema de medidas atual <sup>(23)</sup>. Estudos revelam que, com base no seu conceito e utilização, derivou-se o modelo de coleção de blocos padrão, com artefatos de medidas padronizadas, organizadas em um conjunto disposto em uma caixa adequada para o transporte e manuseio.

Os padrões escalonados atuais pouco ou nada se parecem com os padrões inicialmente concebidos. Os padrões comercialmente disponíveis no mercado são compostos de conjuntos fixos de blocos retangulares, de forma intercalada, e apresentam várias faces de medição paralelas e espaçadas a intervalos uniformes ou não uniformes. São usados como referência para calibração de diferentes instrumentos de medição, tais como paquímetros e micrômetros, e também equipamentos de medição mais complexos, incluindo as máquinas de medir por coordenadas. A figura 4 ilustra o tipo mais comum de padrão escalonado utilizado por fabricantes de equipamentos, laboratórios de calibração e indústrias.

Historicamente, utilizam-se padrões escalonados calibrados para testes de verificação de desempenho, calibração e monitoramento de comportamento ao longo do tempo em máquinas de medir por coordenadas, dentro do escopo da norma ISO 10360-2 <sup>(20)</sup>.

Figura 4 - Padrão escalonado

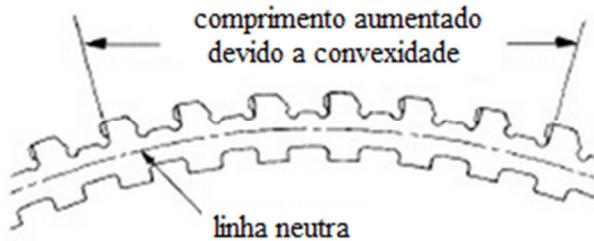


Fonte: autor

Este tipo de padrão apresenta as faces de referência dispostas em uma linha, na posição superior do corpo, constituindo uma vantagem em relação ao acesso de apalpadores de medição. Entretanto, algumas desvantagens são decorrentes desta opção de forma construtiva, das quais se destaca a deformação da linha de referência, ou seja, a alteração dos comprimentos calibrados, quando o padrão é submetido à fixação inadequada.

Os efeitos da flexão do padrão escalonado decorrentes de uma fixação inadequada são de ordem micrométrica e submicrométrica. Tais efeitos são amplamente mencionados na literatura técnica e promovem alterações significativas no comprimento calibrado, conforme se pode observar na figura 5.

Figura 5 - Efeitos da flexão do padrão escalonado [meramente ilustrativa]



Fonte: <sup>(23)</sup>

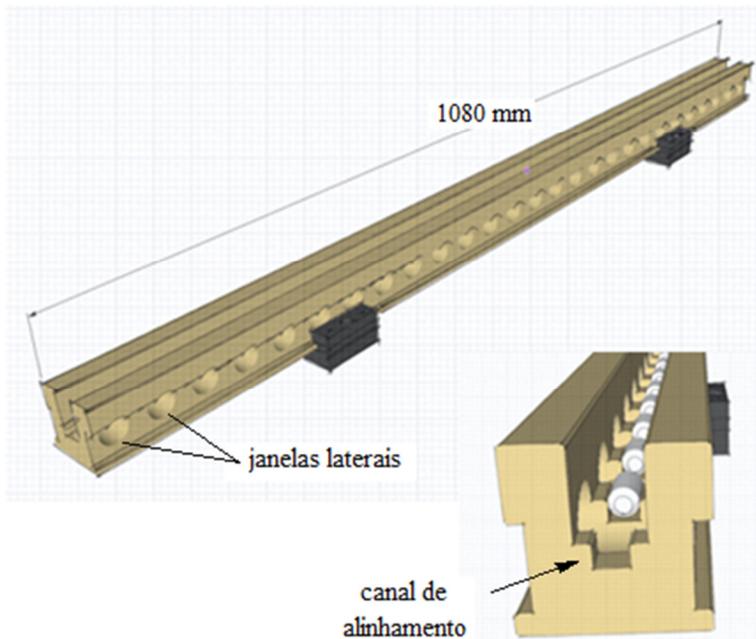
São comuns as divergências de resultados entre calibrações periódicas decorrentes de problemas de estabilidade dimensional <sup>(29)</sup>, provavelmente resultantes de quedas ou choques, uma vez que a coluna de blocos fica completamente exposta e, assim, desprotegida em relação a manuseio inadequado.

Conhecidas as desvantagens da forma construtiva anteriormente citada, foi desenvolvida uma forma alternativa que posiciona a linha de escalonamentos de dimensões calibradas sobre a linha neutra do corpo do padrão. Os padrões escalonados de maior exatidão, conforme apresentado na figura 6, adotam esta forma construtiva com a linha de medição (linha por onde passam as faces de medição) posicionada exatamente sobre a linha neutra do corpo do padrão. E essa linha do corpo não sofre deformação longitudinal por flexão, minimizando efeitos de deformação causados por uma fixação não ideal. Além disso, a forma construtiva fornece uma proteção às faces de medição.

No caso deste tipo de padrão, as janelas laterais obtidas pela furação fornecem a possibilidade de visualização do contato do apalpador com a face de referência, ou ainda, facilitam o acesso ao

apalpador, caso o padrão escalonado esteja fixado em posições atípicas. Além disso, também proporcionam a redução da massa total do padrão.

Figura 6 – Ilustração de um padrão escalonado de exatidão

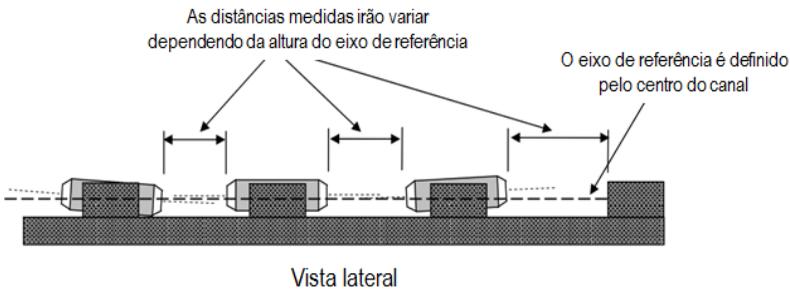


Fonte: autor

É interessante mencionar que, na superfície inferior, há dois indexadores de posição que orientam a fixação com os respectivos suportes para que o padrão escalonado seja apoiado sobre nos pontos de Bessel. Em conjunto com um padrão escalonado deste tipo, é fornecido como acessório um suporte bastante rígido, que permite a inclinação do padrão, bem como sua colocação na posição vertical, tornando-o bastante adequado às verificações recomendadas <sup>(20)</sup> para máquinas de medir por coordenadas.

Um aspecto importante para o sistema coordenado, na calibração de padrões escalonados, é a definição da origem, no centro da face de contato. Padrões escalonados com blocos montados individualmente podem apresentar variações significativas no alinhamento de suas faces em relação ao eixo de medição. A figura 7 detalha de forma adequada esta possibilidade de ocorrência.

Figura 7 - Vista lateral em corte de um padrão escalonado



Fonte: <sup>(29)</sup>

É fundamental conhecer este tipo de problema, e pode ser necessário, em alguns casos, calibrar o padrão escalonado com alinhamentos diferentes, de forma a contemplar a variabilidade de sua geometria <sup>(29)</sup>.

Em relação aos requisitos de calibração dos padrões escalonados, segundo a recomendação do documento DOC-CGCRE-004 <sup>(9)</sup> - “Orientação para a Realização de Calibrações no Grupo de Serviços de Calibração em Metrologia Dimensional”, os parâmetros ou características a serem calibrados limitam-se às “distâncias indicadas” e em relação à posição central de medição.

## 2.2 Erros típicos na calibração de padrões de comprimento

Tipos de fatores de influência ou erros de medição são basicamente diferenciados entre influências sistemáticas e aleatórias. Os erros causados por fatores conhecidos de influências sistemáticas são usados para corrigir o resultado da medição <sup>(26)</sup>.

Nesta seção, são descritos alguns erros sistemáticos que estão presentes no processo de calibração de padrões de comprimento, tais como erro de primeira e segunda ordem, erros associados a efeitos térmicos, erros associados à medição por contato e erros decorrentes da ação da força da gravidade.

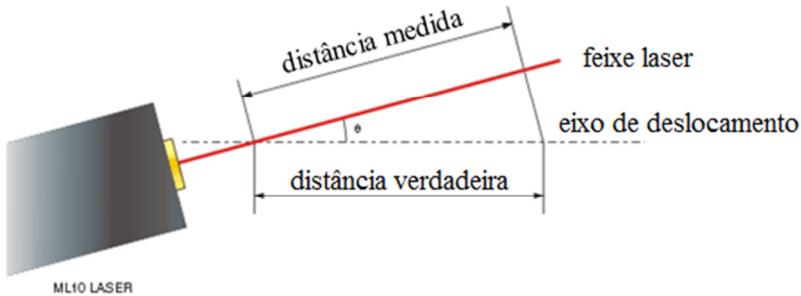
### 2.2.1 Erro de cosseno ou de segunda ordem

Grande parte dos problemas encontrados em resultados de medição dimensional está associado a erros, dos quais, um dos mais comuns é o erro de segunda ordem (segunda ordem, pois, para ângulos pequenos, o erro é proporcional à segunda potência do ângulo em radianos <sup>(26)</sup>), que ocorre quando o instrumento de medição não está perfeitamente alinhado com o comprimento a medir.

Os erros de segunda ordem são bastante comuns em sistemas de interferometria *laser*. O desalinhamento angular da trajetória do feixe do *laser* em relação à direção do deslocamento que se deseja verificar resulta em um erro entre o comprimento medido e o comprimento deslocado <sup>(14)</sup>. A dimensão desse erro é inversamente proporcional ao cosseno do ângulo do desalinhamento.

Diferentemente do comportamento clássico, o desalinhamento do sistema *laser* interferométrico faz com que a dimensão medida seja sempre menor <sup>(14)</sup>. A verdadeira distância é a hipotenusa do triângulo retângulo, conforme se observa na figura 8.

Figura 8 - Erro de cosseno decorrente do desalinhamento do *laser* interferométrico

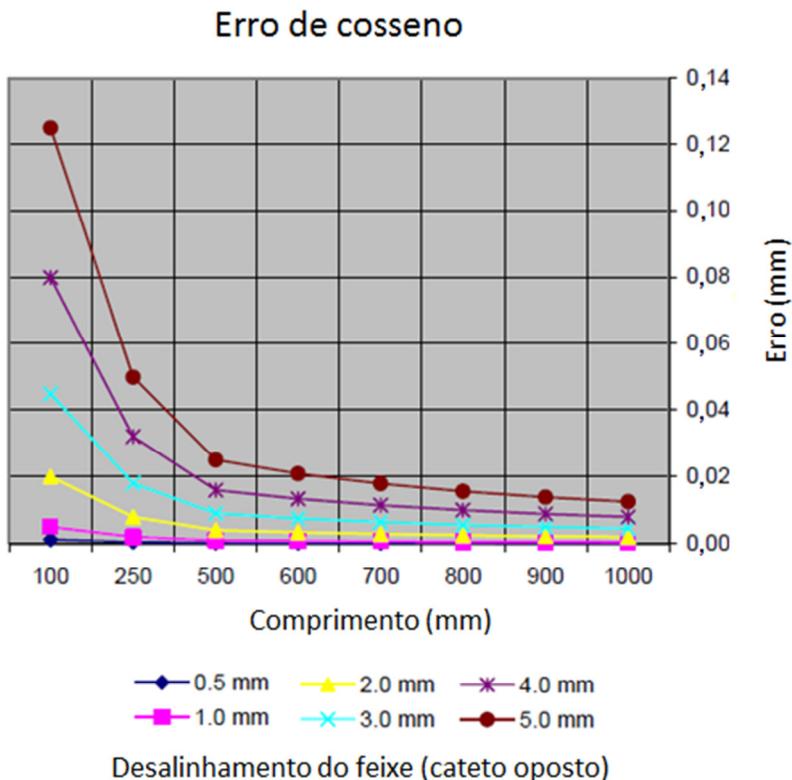


Fonte: <sup>(14)</sup>

De forma a minimizar o erro de cosseno é, portanto, necessário garantir um bom alinhamento, que pode não ser suficiente dependendo da exatidão requerida. Nesses casos, o erro de cosseno pode ser minimizado matematicamente, desde que se conheça com exatidão suficiente as componentes do ângulo em relação ao comprimento relacionado.

Como pode ser visualizado na figura 9, a magnitude do erro de cosseno se comporta de modo inversamente proporcional ao comprimento avaliado. No exemplo da figura, um desalinhamento de 4 mm (cateto oposto) gera um erro de cosseno da ordem de 0,08 mm em um comprimento de 100 mm. Em linhas gerais, quanto maior for o comprimento de alinhamento, menor significância terá o desalinhamento entre o feixe do *laser* e o deslocamento avaliado.

Figura 9 – Influência do desalinhamento na forma de erro de cosseno

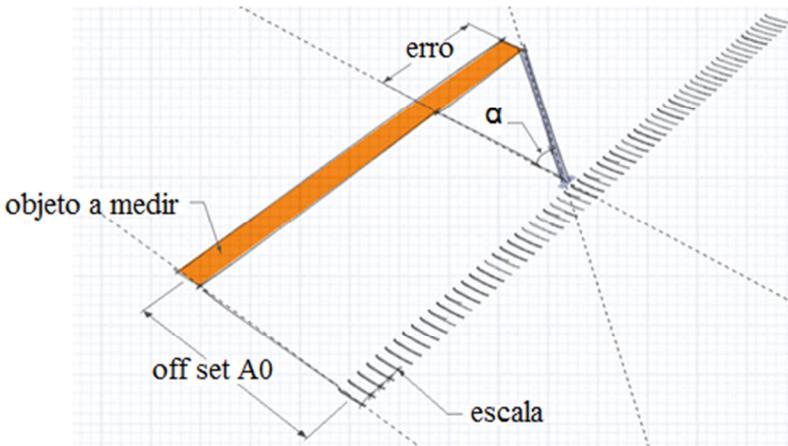


Fonte: <sup>(14)</sup>

### 2.2.2 Erro de seno ou de primeira ordem

O erro de primeira ordem acontece quando existe uma mudança da orientação angular do objeto a medir com respeito à orientação angular da superfície de referência do instrumento de medição <sup>(11)</sup>. Esse efeito torna-se significativo quando o comprimento a medir não é colinear com a referência de medição. No exemplo da figura 10, observa-se a tomada de medida na escala em posição angular não coincidente com a extremidade do objeto a medir.

Figura 10 - Erro de primeira ordem



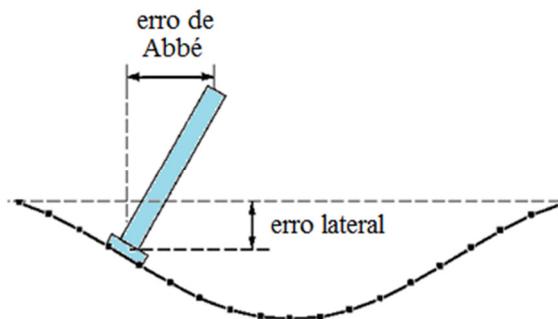
Fonte: adaptada de <sup>(11)</sup>

Desta forma, o erro será igual ao comprimento “A0” multiplicado pelo seno do ângulo  $\alpha$ . Para um ângulo alfa pequeno (menor que  $5^\circ$ ), a equação do erro pode ser reduzida ao comprimento “A0” multiplicado por alfa em radianos.

Nesse contexto, desde meados de 1890, Dr. Ernst Abbé já publicava o que representaria para muitos autores o primeiro princípio da metrologia <sup>(32)</sup>: A escala de medição deve ser definida como um prolongamento do comprimento a medir para evitar os erros de medição de primeira ordem <sup>(11)</sup>.

De forma análoga, um erro de retitude na guia de um equipamento de medição irá promover o erro de primeira ordem, conforme demonstrado na figura 11.

Figura 11 - Erro de Abbé demonstrado sobre a guia de um equipamento



Fonte: <sup>(11)</sup>

### 2.2.3 Efeitos térmicos

A condição ambiental, particularmente a temperatura, denota um dos fatores mais relevantes na metrologia dimensional que, contudo, também é uma das menos entendidas em sua magnitude <sup>(7)</sup>. O controle ambiental é muitas vezes inferior ao aceitável para medições com confiabilidade. Com o advento da compensação térmica automática, o entendimento do como e do porquê da compensação térmica ser realizada muitas vezes é deixado de lado.

Através da influência da temperatura, materiais, mais particularmente os metais, expandem-se de forma reversível com o aumento da temperatura <sup>(26)</sup>. Esta característica de expansão linear é descrita pela equação:

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Onde:

$\Delta L$  é a variação do comprimento

$L$  é o comprimento

$\alpha$  é o coeficiente de expansão linear

$\Delta T$  é a variação da temperatura

A importância do conhecimento a respeito da variação de temperatura frequentemente é substituída pelo cálculo e compensação automáticos. Para o metrologista, contudo, é fundamental compreender as limitações da compensação de temperatura, pois a determinação do comprimento deve ser realizada mediante condições especificadas. A exatidão na determinação do comprimento é diretamente proporcional ao quão bem essas condições forem atendidas e como rigidamente forem mantidas <sup>(23)</sup>. A associação de diferentes materiais nos sistemas mecânicos provoca fenômenos e distorções distintas, dependendo do tipo de material e de seu coeficiente de dilatação.

A exatidão com que se conhece o coeficiente de dilatação, na maioria dos casos, chega a 10% para o aço e até 15% para o alumínio <sup>(7)</sup>. Tal afirmação baseia-se em geometrias simples, lineares e homogêneas, submetidas a condições uniformes de temperatura em todo o corpo <sup>(14)</sup>.

A temperatura e a sua uniformidade são variáveis preponderantes para controle, pois seus efeitos causam deformações lineares e não lineares no objeto a medir e no equipamento de medição <sup>(23)</sup>. Efeitos de variação significativa de temperatura também são responsáveis por variação na eletrônica do equipamento.

Nesse contexto, uma avaliação do gradiente térmico no ambiente de medição, bem como o monitoramento das condições ambientais constituem etapa indispensável quando se buscam resultados confiáveis, pois essas variáveis são de impacto direto na manutenção da geometria do equipamento de medição e do padrão a calibrar.

As variações de temperatura podem ser percebidas como:

- Diferença entre a temperatura média do laboratório e a temperatura de referência (20 °C);
- Gradientes espaciais;
- Gradientes temporais.

As causas das variações de temperatura estão associadas a fatores do tipo:

- Externos (paredes quentes ou frias, janelas, limitações do sistema de condicionamento de ar, luminárias, pessoas etc.);
- Internos (fontes de calor do próprio equipamento de medição ou dos computadores associados).

#### **2.2.4 Correção do índice de refração do ar**

Uma vez que os comprimentos de onda da luz *laser* são determinados para a condição de vácuo, condições ambientais diferentes das condições de referência influenciam o índice de refração do ar, exigindo a correção em tempo real do comprimento de onda da luz *laser*<sup>(4)</sup>.

Os sistemas de interferometria *laser* possuem unidades próprias de monitoramento das condições ambientais. Tais sistemas apresentam correção integrada de coleta e aplicação via *software* e, assim, a respectiva correção do índice de refração é automaticamente associada às leituras do *laser*. Desta forma, a qualidade da correção depende fundamentalmente da exatidão dos meios de medição utilizados no monitoramento das condições ambientais.

O índice de refração do ar é definido pela seguinte relação:

$$\lambda_{vac} = \eta \cdot \lambda_{ar}$$

Onde,

$\eta$	índice de refração do ar
$\lambda_{vac}$	comprimento de onda da luz no vácuo
$\lambda_{ar}$	comprimento de onda da luz no ar

### 2.2.5 Deformação das superfícies de contato

Componentes mecânicos, placas, padrões e partes dos equipamentos de medição estão sujeitos à compressão, torção e flexão pela ação da gravidade ou de outras forças aplicadas.

Particularizando-se a forças de medição, observam-se pequenas magnitudes, entretanto, quando se incrementa consideravelmente a capacidade de medição, os efeitos de flexão, esmagamento, compressão e abaulamento decorrentes do contato são problemas que não podem ser negligenciados <sup>(23)</sup>.

Na medição por contato, os efeitos da deformação decorrente da aplicação de uma força de medição se estendem pelo apalpador e também pela superfície de medição. Na maioria dos casos, a compressão do padrão pelo apalpador pode ser descontada, desde que se conheça o material da superfície de contato e o material do apalpador e que as superfícies sejam suficientemente lisas e homogêneas.

Pela formula de Hertz, é possível aproximar com boa exatidão o valor da deformação:

$$Y = K \cdot \sqrt[3]{\frac{F^2}{D}}$$

Onde:

Y – Deformação (em mm)

F - Força aplicada (em N)

D - Diâmetro da esfera (em mm)

K - Constante dependente do material, geometria dos corpos em contato etc. (adm.)

O NIST fornece, em sua página na *internet*, uma planilha que possibilita o cálculo da deformação para os principais materiais utilizados na fabricação de padrões e apalpadores, o que simplifica bastante a obtenção do fator “K” com segurança. Por exemplo, para o contato de uma esfera de rubi, com 8 mm de diâmetro, contra uma superfície em cerâmica, a deformação decorrente da aplicação de uma força de medição de 0,1 N é da ordem de 42 nm.

## 2.2.6 Erro de apalpação bidirecional

O erro que ocorre em apalpação bidirecional é causado por histerese (por atrito, folga e outras deformações), mas também por erros da definição do apalpador (tensor de flexão e raio do apalpador). Durante a apalpação, a haste do apalpador atua como um braço de alavanca, onde a extremidade da haste (esfera do apalpador) está em contato com a peça e a outra extremidade é fixa no cabeçote de medição do equipamento.

A força de medição é indispensável para estabilizar a captura de dados pelo sistema de medição, evitando a coleta de pontos falsos. Esta força irá produzir tensão sobre a haste do apalpador, fazendo-a fletir<sup>(13)</sup>.

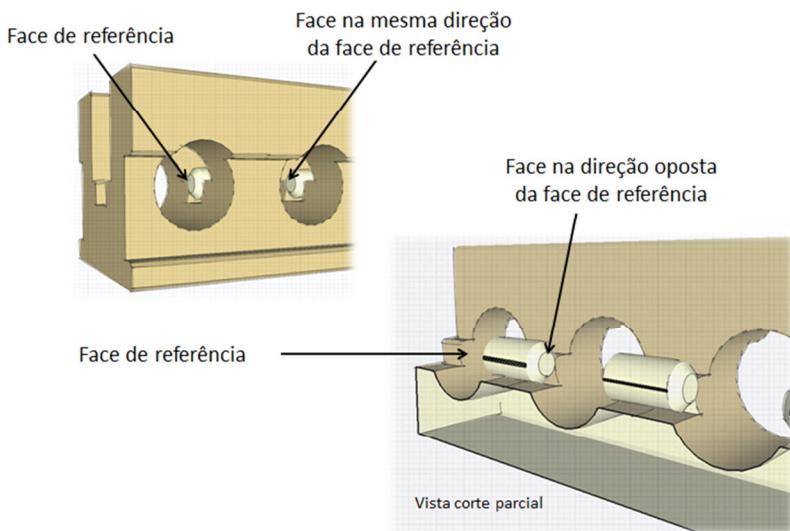
A flexão do apalpador depende da razão inversa da quarta potência do diâmetro do eixo do apalpador <sup>(13)</sup>. Utilizando uma haste com duas vezes o diâmetro, podem-se reduzir os erros de flexão num fator de 16 vezes. Desta forma, recomenda-se a utilização do maior diâmetro de esfera possível mantendo-se o maior diâmetro de haste possível.

Em relação ao comprimento da haste, os erros cinemáticos de cabeçotes de medição de máquinas de medir por coordenadas aumentam de forma quadrática com o comprimento da haste do apalpador <sup>(13)</sup>. Se for possível reduzir o comprimento da haste do apalpador pela metade, os erros decorrentes serão reduzidos por um fator de quatro. Desta forma, o comprimento da haste deve ser mínimo, o suficiente para medir a peça e atingir suas respectivas referências.

Ainda que todas as recomendações e medidas preventivas sejam tomadas, com a elevada capacidade de detecção de equipamentos modernos de medição, os erros decorrentes de flexão não podem ser negligenciados.

O erro de apalpação bidirecional está presente na medição por contato de apalpador, contra superfícies dispostas em sentido oposto à referência (figura 12). Ao tocar a peça com determinada força de medição, ocorre deformação do apalpador, flexão da haste e flexão de todo o conjunto do cabeçote de medição. Este comportamento promove histerese que está associada a folgas e deformações decorrentes do atrito das superfícies <sup>(2)</sup>.

Figura 12 – Faces de medição no padrão escalonado



Fonte: autor

No exemplo do gráfico 1, a manifestação do comportamento típico de erro de apalpação bidirecional ou “dente de serra”<sup>(22)</sup> é bastante pronunciada nos resultados de medição de padrões escalonados. Observa-se que todas as faces opostas à referência apresentam resultados de medição influenciados pelo erro de apalpação bidirecional (no exemplo,  $+0,7 \mu\text{m}$  em média).

Gráfico 1 - Exemplo de erro de apalpação bidirecional na medição por coordenadas



Fonte: autor

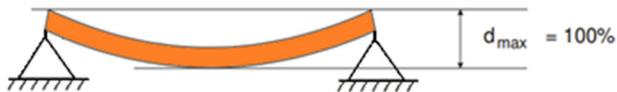
### 2.2.7 Deformação por peso próprio

Pela ação da força da gravidade, o peso próprio produz deformações que se tornam críticas em peças deformáveis ou quando se manipulam padrões de grande comprimento <sup>(23)</sup>. Segundo a condição de apoio utilizada, o padrão pode se deformar, mudando suas dimensões. A ISO 3650 <sup>(18)</sup> recomenda o posicionamento de blocos longos na horizontal, apoiados sobre uma das faces laterais estreitas, sem esforço adicional, por meio de suportes adequados, situados sobre os pontos de Bessel.

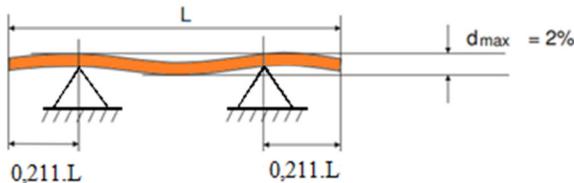
Essa orientação mantém a deformação em nível mínimo e as faces extremas paralelas, conforme demonstrado na figura 13. Desta forma, o erro é neutralizado quando o padrão é usado na mesma condição em que foi calibrado.

Figura 13 - Apoio adequado para blocos padrão

a) Apoio nas extremidades: deflexão máxima



b) Apoio a cada 0,211.L: deformação mínima



Fonte: <sup>(26)</sup>

A fixação também é uma variável bastante crítica na calibração de padrões lineares de grande porte. Recomenda-se que quaisquer tipos

de grampos ou presilhas sejam posicionados sobre os apoios, evitando-se efeitos de sujeição <sup>(11)</sup>.

### **2.3 Calibração de medidas materializadas de grande porte**

A calibração de medidas materializadas de grande porte, com limites aceitáveis de incerteza de medição, é tarefa que geralmente exige infraestrutura, conhecimento e tecnologias bastante caras. Frente a este desafio, há um limitado número de provedores acreditados capazes de prover resultados confiáveis e com baixos níveis de incerteza.

Blocos longos de até 1000 mm de referência (classes 00 e K) podem ser calibrados por interferometria. Boa parte dos Institutos Nacionais de Metrologia ao redor do mundo apresenta capacidade de até 300 mm, que representa a faixa típica de interferômetros comerciais. No entanto, poucos Institutos Nacionais de Metrologia possuem interferômetros de até 1000 mm. Por isso, para comprimentos maiores, é bem mais comum a realização da calibração por comparação, geralmente, utilizando-se máquinas de medir longitudinal, comparadores dedicados e associações entre máquina de medição por coordenadas e *laser* interferométrico.

Em alternativa, pesquisadores aperfeiçoaram, ao longo dos últimos quarenta anos, a calibração pelo método da substituição. Na calibração por substituição é possível determinar de forma direta os erros sistemáticos atuantes na medição, a partir da medição de um artefato padrão calibrado simulando objeto a ser medido. Assim mesmo, é possível reduzir outras fontes de incerteza atuantes na medição. Do ponto de vista da simplicidade, quando utilizada, a técnica de

substituição reduz a MMC a um simples comparador, embora diversas fontes de incerteza continuem influenciando a medição, como a repetitividade e a resolução limitada do sistema, entre outros <sup>(15)</sup>.

Do ponto de vista da rastreabilidade de medição, a técnica de substituição fornece um procedimento ideal, embora várias limitações lhe sejam impostas: necessidade de padrões corporificados (medidas materializadas) com essencialmente a mesma forma, tamanho e material da peça a calibrar; necessidade de realizar a medição virtualmente na mesma posição da MMC; necessidade de empregar estratégia de medição idêntica.

No NIST, as calibrações de padrões escalonados e blocos padrão longos são realizadas utilizando-se o método da substituição <sup>(29)</sup>. Com um ambiente laboratorial que possui uma estabilidade térmica de  $\pm 0,01$  °C, por períodos de 30 dias ou mais, e uma MMC de alta exatidão aliado ao elevado conhecimento a respeito do desempenho metrológico do equipamento, atingem-se baixíssimas incertezas de medição, comparáveis aos mais renomados Institutos Nacionais de Metrologia.

Embora os resultados obtidos com a metodologia descrita anteriormente sejam encorajadores em termos de baixo nível de incerteza, as limitações próprias do método da substituição continuam presentes, acrescentando-se o problema de um maior tempo de medição em relação a uma medição direta.

Frente às limitações do método da substituição e da necessidade da redução da incerteza de medição, foram aprimoradas técnicas de calibração por interferometria a *laser* em associação a máquina de

medição por coordenadas, como meio de incrementar a exatidão de uma das escalas da máquina, sem perder a versatilidade do equipamento <sup>(30)</sup>.

Destarte, do ponto de vista das publicações relevantes associadas ao tema, destacam-se pelo pioneirismo os pesquisadores e as instituições da figura 14.

Em 1982, Schüssler <sup>( 27 )</sup> apresentou uma das primeiras publicações detalhadas a respeito da associação entre sistemas de interferometria a *laser* e máquinas de medição por coordenadas no artigo: “*A Biaxial Laser Interferometer for Absolute Calibration of Bidirecional Step Gauges and Gauge Blocks*”. Diversos pesquisadores se espelharam no conceito da solução reportada para seus próprios desenvolvimentos.

Figura 14 - Pesquisadores e instituições

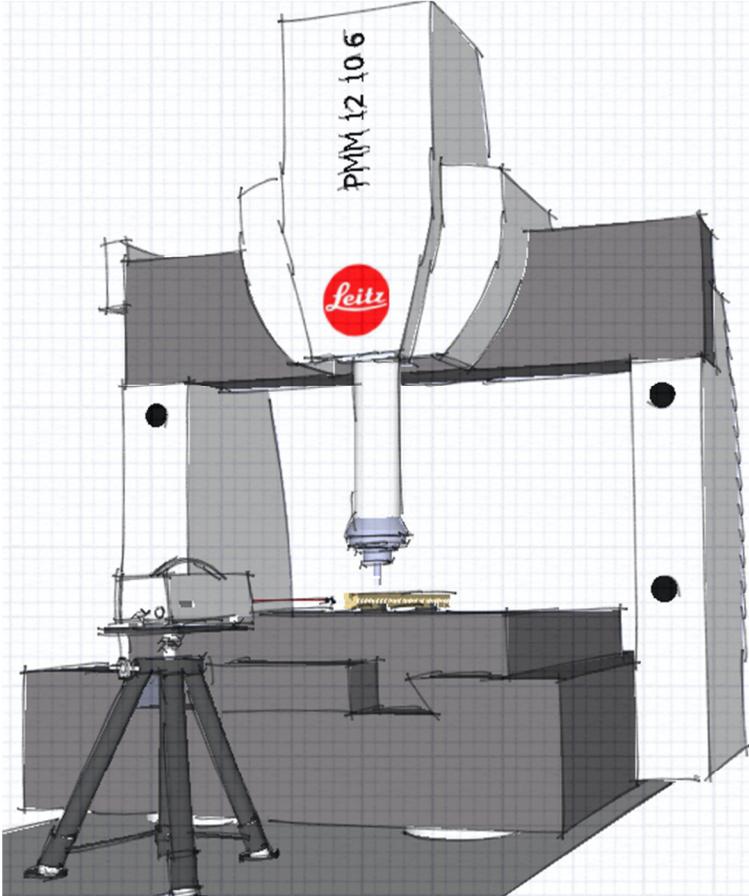


Fonte: autor

A combinação mais usual relaciona um sistema de interferometria *laser* e uma máquina de medição por coordenadas do tipo portal com

mesa móvel, conforme ilustrado na figura 15, onde se observa a calibração de um padrão escalonado.

Figura 15 - MMC tipo portal com mesa móvel e *laser* interferométrico



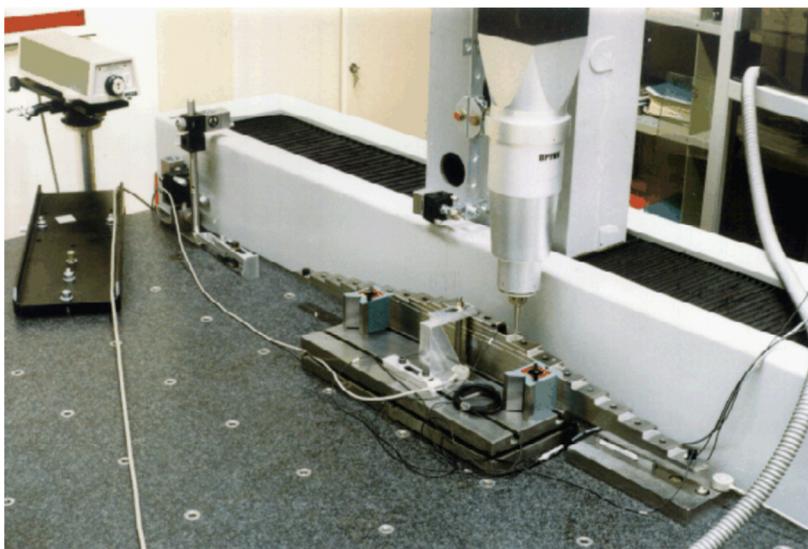
Fonte: autor

No tipo de montagem da figura 15, o sistema de interferometria *laser* é alinhado ao movimento da mesa da MMC, estando o refletor fixado na mesa da máquina. Nessa configuração, o feixe do *laser* não é

interrompido com os movimentos verticais e transversais do cabeçote de medição.

Outra variante, bem menos usual, é a montagem de um sistema *laser* interferométrico em máquinas de medir por coordenadas do tipo portal móvel, conforme ilustrado na figura 16, onde o refletor está fixado no portal da MMC.

Figura 16 - MMC tipo portal móvel e *laser* interferométrico

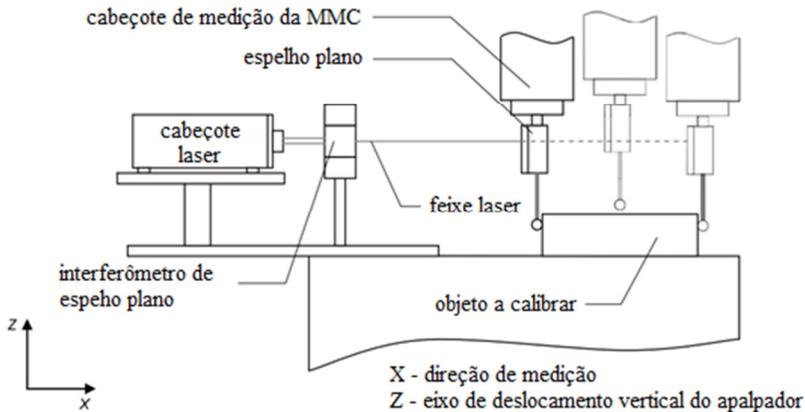


Fonte: <sup>(1)</sup>

É oportuno considerar que essas associações demandam um grande tempo de alinhamento e ajuste, quer seja do sistema óptico do próprio *laser*, quer seja dos acessórios para acoplar o interferômetro à MMC. Além disso, devido à instrumentação envolvida, gera-se uma impossibilidade momentânea para outras aplicações sobre a máquina de medição por coordenadas.

Uma alternativa para associação entre máquina de medição por coordenadas e sistema a *laser* interferométrico é apresentada na figura 17. Neste tipo de configuração, é necessário utilizar um espelho plano especial (mais longo que os convencionais) e um interferômetro de espelho plano, porque não é possível evitar os deslocamentos em diferentes direções <sup>(1)</sup>. Neste exemplo, é necessário subir o apalpador (e o espelho) a fim de deslocá-lo ao outro extremo. As ópticas convencionais não comportam este movimento em trajetória distinta. O espelho plano deve ser muito bem alinhado para que fique perpendicular à direção de medição e deve possuir baixo erro de planeza, a fim de assegurar que o feixe retorne para o interferômetro. Mesmo com a utilização das ópticas especiais, há uma limitação em relação à altura máxima de recuo vertical do apalpador, em função do comprimento do espelho plano, uma vez que o feixe do *laser* não pode ser interrompido, sob pena de perda do sinal.

Figura 17 - Arranjo entre MMC e *laser* interferométrico



Fonte: <sup>(1)</sup>

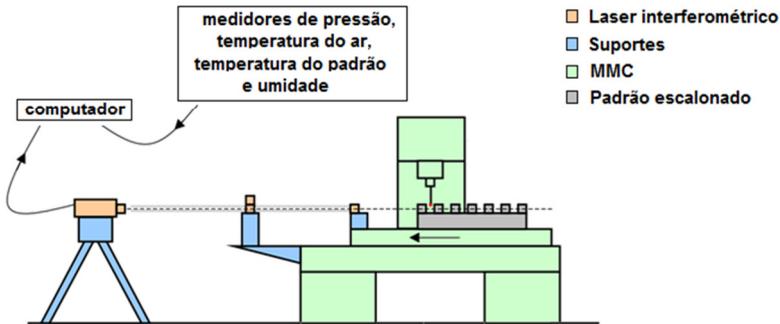
Em algumas das configurações apresentadas, como, por exemplo na figura 16, o erro de Abbé, decorrente do afastamento entre o feixe de *laser* e os comprimentos a serem medidos no padrão, não pode ser evitado <sup>(30)</sup>.

Com o objetivo de minimizar, e até mesmo eliminar o erro de Abbé, pesquisadores aplicaram combinações com divisores de feixes para dois espelhos e, posteriormente, para quatro feixes. O detalhamento dessas soluções é descrito no decorrer deste capítulo.

Nos laboratórios do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), localizado em Xerém / RJ, mais especificamente no Laboratório de Metrologia Dimensional (LAMED), são realizadas calibrações de padrões escalonados utilizando-se a associação entre máquina de medição por coordenadas e sistemas de interferometria *laser* <sup>(24)</sup>. No LAMED, foi desenvolvida uma associação entre uma MMC do fabricante Zeiss, modelo UMM-500 e um *laser* interferométrico para medição linear, do fabricante Hewlett Packard, modelo 5528A. O sistema *laser* interferométrico de medição linear está acoplado à máquina de medição por coordenadas.

O *laser* substitui a escala da própria máquina, registrando seu movimento ao longo do eixo X. São utilizados sensores do próprio sistema *laser* para monitoramento da pressão atmosférica, da umidade relativa do ar, da temperatura do ar no ambiente de medição e temperatura do padrão por meio de um sensor de contato. Um diagrama é apresentado na figura 18.

Figura 18 - Diagrama de montagem no LAMED



Fonte: <sup>(24)</sup>

Observa-se, pelo diagrama, que o feixe do *laser* encontra-se na mesma linha de blocos escalonados do padrão, de forma a evitar o erro de Abbé. Entretanto, a condição de posicionamento do *laser* interferométrico fora da mesa de medição traz consigo alguns inconvenientes, principalmente em relação à estabilidade do sinal, pois, geralmente, máquinas de medir por coordenadas possuem sistemas de amortecimento ativo, o que promove movimento da mesa de medição em relação ao piso do laboratório.

Em função da limitação do intervalo de medição do eixo X da máquina de medição por coordenadas, o comprimento máximo do padrão escalonado a calibrar, desde que sem concatenação, fica em torno de 420 mm. Para esta dimensão, a melhor capacidade de medição fica em:

$$U = \sqrt{0,4^2 + (1,2 \times 10^{-3} \times L)^2} \mu m$$

Onde “L” é o comprimento nominal em milímetros.

Recentemente, o Inmetro obteve êxito na melhoria de sua Capacidade de Medição e Calibração (CMC), a partir da introdução de sua nova máquina de medição por coordenadas, marca Mitutoyo, modelo Legex 9106 e do desenvolvimento de nova metodologia de calibração. Em outubro de 2013, atualizou sua melhor capacidade de medição junto ao *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM).

Desta forma, a CMC passou a:

$$U = (0,32 + 1.10^{-3} \times L)\mu\text{m}^{(6)}$$

Onde “L” é o comprimento nominal em milímetros.

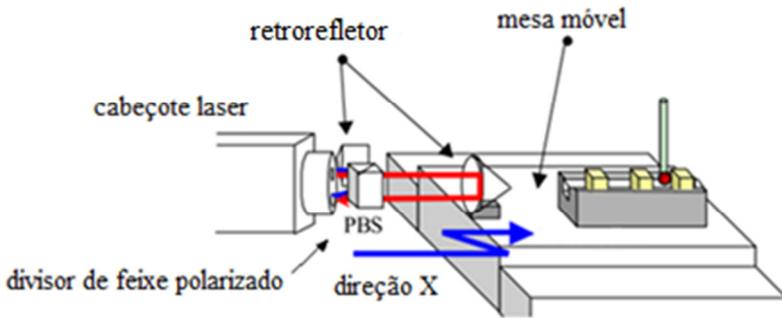
Nos Institutos Nacionais de Metrologia, frequentemente, pesquisadores desenvolvem e melhoram métodos de medição e os publicam no meio acadêmico. Seus avanços convergem na direção da redução da incerteza de medição para calibração de padrões lineares de grande porte. Boa parte faz uso da associação entre sistemas de interferometria *laser* e máquinas de medir por coordenadas. Em alguns casos, são desenvolvidos comparadores dedicados, geralmente em parceria com fabricantes de equipamentos e sistemas de medição.

No *National Metrology Institute of Japan* (NMIJ), os pesquisadores Osawa, Takatsuji e Sato <sup>(25)</sup> fizeram a associação entre um *laser* interferométrico do fabricante Agilent, modelo 5529A e uma máquina de medição por coordenadas do fabricante Brown & Sharpe, modelo PMM 866P.

Em relação ao método desenvolvido pelo Inmetro, no NMIJ foram introduzidas duas mudanças que colaboram bastante para a redução da incerteza de medição. A primeira diz respeito à montagem

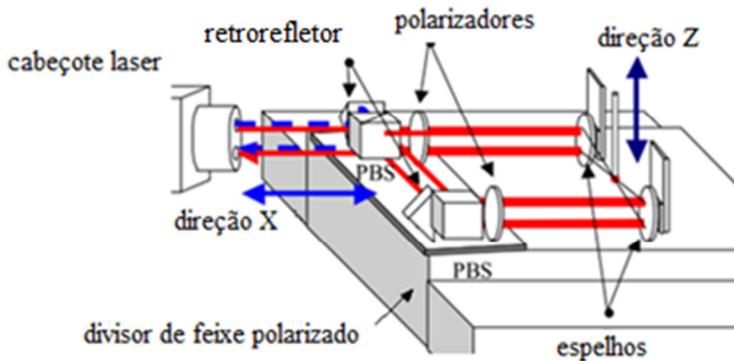
das ópticas do *laser* interferométrico, conforme demonstrado na figura 19, passando para a configuração demonstrada na figura 20. Nesta configuração, foram utilizados dois espelhos planos, com o objetivo de eliminar os erros de rolamento do cabeçote da máquina de medição por coordenadas, pois o centro do apalpador está localizado no centro dos espelhos planos que ficam lado a lado. A resolução do sistema é incrementada em quatro vezes, quando comparada ao arranjo simples.

Figura 19 – Montagem do sistema para configuração simples



Fonte: <sup>(25)</sup>

Figura 20 – Montagem do sistema para configuração de quatro feixes

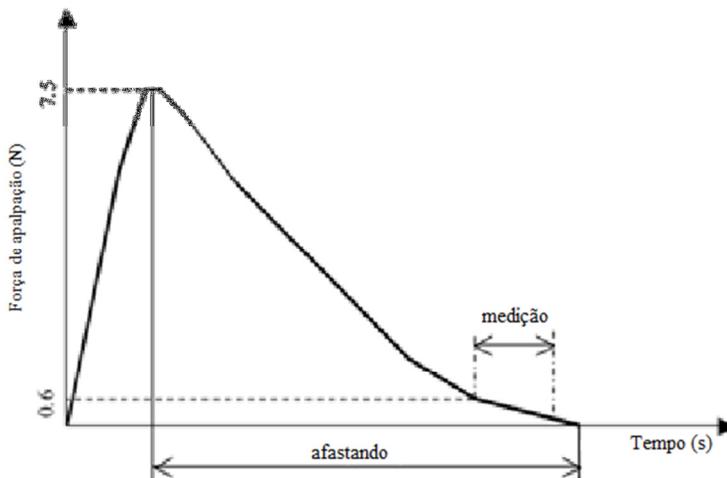


Fonte: <sup>(25)</sup>

A segunda mudança trata da integração eletrônica entre o sistema *laser* interferométrico com o cabeçote de medição da máquina de medição por coordenadas, através de uma sincronização com o sinal de toque do cabeçote de medição.

O sinal analógico é capturado e convertido para servir de gatilho ao sistema a *laser* interferométrico através de um algoritmo que utiliza o método dos mínimos quadrados. Esta solução de integração possibilita a automação completa do ciclo de medição. O gráfico 2 descreve o comportamento da força de medição *versus* o movimento do apalpador, durante a apalpação. Como é possível observar, a captura ocorre nos instantes finais da tomada de medida pelo cabeçote da máquina de medir.

Gráfico 2 - Característica de apalpação da MMC (força x tempo)



Fonte: <sup>(25)</sup>

Na proposta de Osawa, Takatsuji e Sato, o erro por apalpação bidirecional é corrigido utilizando-se um bloco padrão de 10 mm ou 20 mm, dependendo do passo do padrão escalonado a calibrar <sup>(25)</sup>.

Nesta configuração, a melhor capacidade de medição do sistema é de:

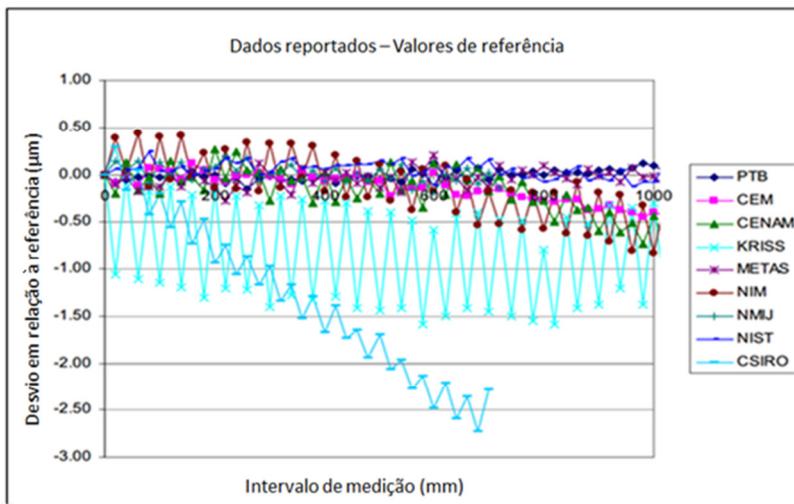
$$u = k \times \sqrt{0,06^2 + (0,22 \times L)^2} \mu\text{m}$$

Onde “L” é o comprimento nominal em milímetros e  $k$  é o fator de abrangência.

Assim como o NMIJ do Japão, destacam-se os Institutos Nacionais de Metrologia da Alemanha, o *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB), da Suíça, o *Federal Institute of Metrology* (METAS) e dos Estados Unidos, o *National Institute of Standards and Technology* (NIST). No âmbito da metrologia dimensional mundial, estes institutos fornecem resultados de referência a várias atividades de ensaio de proficiência.

Um programa de intercomparação laboratorial bastante interessante foi desenvolvido para padrão escalonado, tendo início em 1999 e concluído três anos depois <sup>(8)</sup>. Frente a contestações de resultados, problemas de climatização, necessidades de recalibração, alinhamentos de metodologias, testes etc., a entrega do relatório final foi postergada e publicada somente em 2009. O gráfico 3, apresenta o desempenho dos participantes.

Gráfico 3 - Resultado da intercomparação laboratorial para padrão escalonado



Fonte: <sup>(8)</sup>

Observa-se nos resultados do *Korea Research Institute of Standards and Science* (KRISS) e do *National Institute of Metrology of China* (NIM) a presença de um erro de apalpação bidirecional bastante acentuado, assim como no *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation of Australia* (CSIRO), onde, além do erro de apalpação, observa-se provável problema de alinhamento.

Neste Programa de Ensaio de Proficiência, o valor utilizado como referência foi composto pela média dos resultados do NIST, PTB, METAS e NMIJ.

## **2.4 Disponibilidade de serviços de calibração de padrões lineares de grande porte**

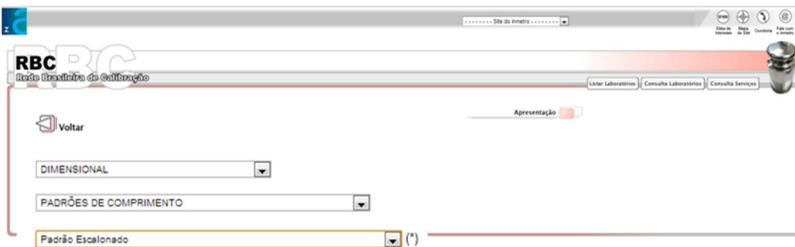
Neste tópico, é detalhada a disponibilidade de provedores de serviços de calibração acreditados para intervalos de medição de padrões lineares de grande porte (acima de 100 mm até 1000 mm). O cenário da rastreabilidade aplicável a padrões longos foi dividido em nacional e internacional.

### **2.4.1 Cenário nacional**

Com base em pesquisa realizada em dezembro de 2013, foi possível identificar na página do Inmetro na *internet*, na seção da Rede Brasileira de Calibração (RBC), os provedores de serviços de calibração de padrões escalonados acreditados e com situação cadastral ativa, os intervalos de medição atendidos e as melhores capacidades de medição disponíveis ao mercado, de acordo com a tabela 2.

Dispõe-se de quinze provedores de serviços acreditados, dos quais somente seis para faixas de até 1000 mm. Acredita-se que boa parte se utilize do método da substituição na calibração de padrões lineares de grande porte. Contudo, observa-se a ausência de uma padronização na avaliação e publicação da CMC dos laboratórios, dificultando sobremaneira a comparabilidade dos provedores de serviços de calibração.

Tabela 2 - Provedores acreditados para calibração de padrões escalonados



Todos os Estados	Faixa	Capacidade de Medição e Calibração (CMC)	Laboratório	UF	Acreditação CAL
<b>Listar Laboratórios</b>	até 670 mm	$(1,0 + L/300) \mu\text{m}$	COMANDO-GERAL DE TECNOLOGIA AEROSPAZIAL - CTA	SP	1
	até 600 mm	$(0,4 + (L/1000)) \mu\text{m}$	LABORATÓRIO DE METROLOGIA MECÂNICA DO IPT	SP	3
	até 600 mm	$[2 + (L/300)] \mu\text{m}$ , sendo L em mm	SENAI CETEMP - LABORATÓRIO DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO	RS	13
	até 600 mm	3 $\mu\text{m}$	LABORATÓRIO DE METROLOGIA - SOCIESC (suspensão)	SC	27
	até 2000 mm	$(0,5 + (L/1000)) \mu\text{m}$	LABORATÓRIO DE METROLOGIA - MITUTOYO	SP	31
	até 500 mm	0,9 $\mu\text{m}$	FUNDAÇÃO CERTI - CMI	SC	34
	>500 mm até 1000 mm	1,3 $\mu\text{m}$	FUNDAÇÃO CERTI - CMI	SC	34
	>1000 mm até 1500 mm	1,6 $\mu\text{m}$	FUNDAÇÃO CERTI - CMI	SC	34
	Até 1000 mm	0,3 $\mu\text{m}$ até 1,7 $\mu\text{m}$	LABORATÓRIO DE METROLOGIA - MEC-Q/BA	BA	79
	até 300mm	0,004mm	CENTRO DE MEDIÇÕES INDUSTRIAIS - CMI - TECPAR	PR	85
	Até 600 mm	$(2 + L/300) \mu\text{m}$ , L em mm	LABORATÓRIO DE METROLOGIA - CALBRATEC	SP	114
	até 600 mm	$(1,0 + L/300) \mu\text{m}$ , L em mm	LABORATÓRIO FERMESS	SP	133
	até 1000 mm	0,3 $\mu\text{m}$ até 1,7 $\mu\text{m}$	LABORATÓRIO MEC-Q - UNIDADE SP	SP	149
	Até 1000 mm	$(7,2 L/1000) \mu\text{m}$ , L em mm	LABORATÓRIO DE METROLOGIA DO SENALMG CPPEL	MG	154
	até 1000 mm	0,002 mm	AFERITEC COMPROVAÇÕES METROLÓGICAS E COMÉRCIO LTDA	SP	157
	Até 500 mm	3,8 $\mu\text{m}$ até 4,7 $\mu\text{m}$	GERO COMÉRCIO E SERVIÇOS LTDA.	SP	171
	Até 300 mm	$(4,0 + L/500) \mu\text{m}$ (L em mm)	LABORATÓRIO EXCELMETRO	MG	225
	> 300 mm até 500 mm	$(6,0 + L/500) \mu\text{m}$ (L em mm)	LABORATÓRIO EXCELMETRO	MG	225
	até 700 mm	$[1,5 + L/500] \mu\text{m}$	VL CORRÊA MEDIÇÃO E CALIBRAÇÃO LTDA	SP	375

Fonte: <<http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc>>

## 2.4.2 Cenário internacional

Para calibração de padrões escalonados com comprimento de até 1200 mm, destacam-se três laboratórios privados, situados na Alemanha. O critério para apresentação de tais laboratórios baseia-se nos mais de vinte anos de experiência do autor, considerando a viabilidade de envio, por questões logísticas e de ordem burocrática.

É oportuno destacar que, para envio de qualquer objeto, seguindo os regulamentos da Receita Federal Brasileira, é necessária a elaboração de um processo de exportação temporária, geralmente bastante burocrático e moroso que, via de regra, dificulta o processo.

Em destaque, pela confiabilidade e pelos baixos níveis de incerteza de medição, na figura 21 são apresentados alguns laboratórios privados acreditados junto à rede alemã de calibração e suas melhores capacidades de medição.

Figura 21 - Incerteza de medição em laboratórios privados



$$0,08 \mu m + 0,15^{-6} \times L$$

$$\text{Em } 1.000\text{mm} = 0,23\mu m$$



$$0,09 \mu m + 0,35^{-6} \times L$$

$$\text{Em } 1.000\text{mm} = 0,44\mu m$$



$$0,10 \mu m + 0,40^{-6} \times L$$

$$\text{Em } 1.000\text{mm} = 0,50\mu m$$

Fonte: <sup>(10)</sup>

A Carl Zeiss AG, acreditada pela *Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH* (DAkS) Rede Alemã de Calibração, desenvolveu um comparador dedicado para calibração de padrões escalonados e blocos padrão utilizando um *laser* interferométrico como referência. Além disso, possui a infraestrutura para calibração do coeficiente de dilatação térmica, que consiste em um tanque com um fluido termicamente controlado, alocado sobre a mesa de uma MMC dedicada para esta função, onde são imersos o padrão escalonado a calibrar e blocos padrão de referência em Zerodur.

A Feinmess e a Eumetron utilizam o método da substituição e possuem instalações consideradas de referência (classe A) de acordo com a norma VDI/VDE 2627 <sup>(31)</sup>. Na Feinmess as calibrações são automatizadas e ocorrem durante a madrugada, em excelentes condições de estabilidade térmica.

### 3 PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVOS

Considerando que, atualmente, os fabricantes de máquinas de medir por coordenadas possuem equipamentos cada vez mais exatos, alguns até mesmo com erros de ordem submicrométrica, a calibração deste tipo de equipamento passa a ser um problema, uma vez que a incerteza de medição herdada do padrão de referência praticamente absorve a parcela fixa da componente do erro máximo admissível da máquina de medir.

Estes mesmos fabricantes, que comercializam seus equipamentos no Brasil, atuam na calibração das máquinas de medir e dependem do envio periódico de seus padrões ao exterior para calibração. Isto demanda tempo e dinheiro consideráveis, sem contar a burocracia envolvida com o envio e a indisponibilidade do padrão.

Ainda que o Inmetro tenha incrementado sua melhor capacidade de medição, é fundamental que a busca pela melhoria de processos de calibração de padrões lineares de grande porte seja liderada por algum laboratório privado de reconhecida competência técnica, capacidade de execução em um tempo razoável e reconhecida confiabilidade em seus resultados.

Com o avanço tecnológico, foram desenvolvidas novas tecnologias aplicáveis a sistemas de interferometria *laser*. Tais tecnologias proporcionam alternativas como a possibilidade de rastreamento automático do refletor, que permite deslocamentos verticais e transversais sem a interrupção da leitura. Esta possibilidade abre espaço

para utilização de MMC do tipo portal móvel para construção de sistemas de medição de alta exatidão, na associação com sistemas de interferometria *laser*.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um método de calibração que resulte em uma incerteza de medição comparável à do Inmetro e que possa ser aplicada no tipo mais usual de MMC, ou seja, de portal móvel. Visa-se um método que seja mais rápido do que o método proposto por Schüssler<sup>(27)</sup> com espelhos planos posicionados ao lado do apalpador e que não dependa do movimento da mesa, como proposto por Osawa et al.<sup>(25)</sup>, ambos os métodos bastante conhecidos por especialistas de Institutos Nacionais de Metrologia. Além disso, o método proposto deve evitar a conversão da MMC em um equipamento dedicado à calibração exclusiva de medidas materializadas de comprimento.

A proposta de solução para esta demanda baseou-se na associação de um sistema de interferometria *laser* de rastreo automático, que permite deslocamentos em direções distintas às do feixe de medição sem a interrupção do mesmo e uma MMC. Estudos preliminares apontaram a viabilidade da concatenação de movimentos entre o cabeçote de medição da máquina de medição por coordenadas e o espelho móvel do sistema de interferometria *laser* de rastreo automático.

A validação do método proposto será feita através de comparação de resultados obtidos nos experimentos, com os resultados conhecidos e validados, provenientes do certificado de calibração do padrão escalonado (os detalhes sobre o padrão são apresentados em 4.1.5).

## 4 EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

Neste capítulo, são detalhados os equipamentos e métodos envolvidos no processo de calibração de padrões lineares de grande porte, utilizando a associação entre máquinas de medição por coordenadas e de interferometria *laser*. Uma vez que o objetivo é a obtenção de baixas incertezas de medição, utilizou-se um sistema a *laser* interferométrico de elevado grau de exatidão. Como o sistema a *laser* por si só não permite a medição de comprimentos, optou-se pela associação de uma máquina de medição por coordenadas para possibilitar os deslocamentos e contato físico com o padrão.

Há mais de trinta anos, Schüssler desenvolveu o conceito que foi, posteriormente, replicado e otimizado por diversos pesquisadores de Institutos Nacionais de Metrologia. Na proposição deste trabalho, o conceito foi replicado e customizado para uma alternativa que se utilizou de uma MMC do tipo portal móvel e um *laser* interferométrico de rastreo automático.

### 4.1 Componentes do Sistema

A seguir, são descritos os sistemas de medição, infraestrutura e *softwares* envolvidos na proposta para calibração de padrões longos, no intervalo acima de 100 mm a 1000 mm.

#### 4.1.1 *Laser* interferométrico de rastreo automático - LaserTracer

O LaserTracer apresenta uma composição bastante similar a de um *laser* interferométrico convencional, embora existam alguns

componentes distintos relevantes. Além da unidade emissora/receptora possuir seus transdutores angulares de posicionamento e motores de passo para deslocamento, há um *joystick* para controle manual (geralmente utilizado nas etapas prévias de ajuste manual da trajetória).

A imagem do equipamento pode ser observada na figura 22. À esquerda, temos a unidade emissora, ao centro, o controlador e, à direita, o *joystick* para movimentação manual.

Figura 22 – Sistema de interferometria *laser* de rastreamento automático - LaserTracer



Fonte: <sup>(12)</sup>

De modo análogo a um *laser* interferométrico convencional, o sistema tem sensores de temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa que são integrados a uma unidade de monitoramento das condições ambientais. Isto possibilita a compensação automática do comprimento de onda do *laser*, em função da variação do índice de refração do ar.

O LaserTracer é fornecido pelo fabricante com dois *softwares* de trabalho, e ambas as plataformas assumem o controle de trajetórias da MMC, que ficam restritas às posições de rotina dos respectivos ensaios. O *software* Track-Cal é utilizado para determinação dos erros

geométricos de MMC e máquinas-ferramenta. O *software* Track-Check é utilizado na verificação de MMC segundo ISO 10360 <sup>(20)</sup> e máquinas-ferramenta segundo ISO 230 <sup>(21)</sup>.

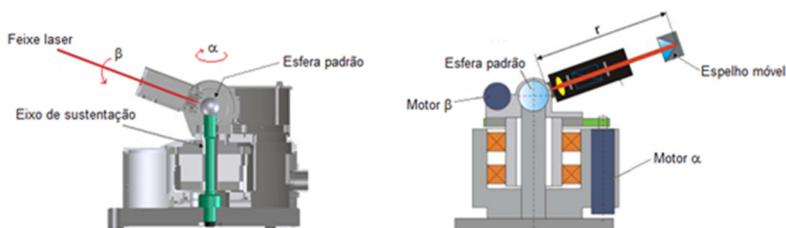
Pelo método de medição do LaserTracer, somente é possível a obtenção de distâncias. Não é possível a determinação da posição do refletor móvel, um SMR (*spherical mounted reflector* ou refletor esférico montado) do tipo retrorrefletor, no espaço.

O equipamento de medição apresenta as seguintes características:

- Erro máximo admissível:  $0,2 \mu\text{m} + 0,3 \mu\text{m/m}$
- Erro máximo em 1000 mm (comparativo):  $0,50 \mu\text{m}$
- Resolução:  $0,001 \mu\text{m}$
- Faixa de medição:  $0,2 \text{ m a } 15 \text{ m}$

A peça chave do sistema é uma esfera de precisão (figura 23) que apresenta um erro de forma da ordem de 50 nm e tem a função do refletor fixo do interferômetro (o sistema gira com uma referência fixa). Com isso, erros de batimento dos movimentos angulares são de influência mínima na medição de comprimentos.

Figura 23 – Diagrama dos componentes do LaserTracer



Fonte: <sup>(28)</sup>

O princípio básico de funcionamento dá-se a partir do movimento do espelho móvel, alterando a trajetória do feixe. Através de um detector de posição fotossensível, a mudança de posição (trajetória) pode ser quantificada. O sistema de controle utiliza a informação do detector de posição fotossensível para controlar o(s) giro(s) do(s) motores de passo, que direcionam o feixe novamente para o centro da esfera.

Em relação ao *laser* interferométrico convencional, a praticidade de alinhamento e a possibilidade do rastreamento automático da posição do espelho móvel promovem grande redução de tempo para alinhamento <sup>(16)</sup>. Isto constitui um fator determinante para a aplicação do equipamento nesta proposta.

#### **4.1.3 Máquina de medir por coordenadas (MMC)**

No contexto desta proposta, a MMC tem a função de servir como mecanismo capaz de gerar os deslocamentos necessários e de possibilitar o contato do apalpador com o padrão a calibrar. Além disso, por meio da solução de integração dos *softwares*, possibilita uma checagem cruzada das dimensões medidas.

Para execução dos experimentos práticos, foi utilizada uma máquina de medição por coordenadas do tipo portal móvel, com mancais aerostáticos, marca ZEISS, modelo Prismo Ultra, com cabeçote de medição modelo Vast Gold.

O equipamento de medição apresenta as seguintes características:

- Intervalo de medição: X= 900 mm, Y= 1300 mm e Z=650 mm;

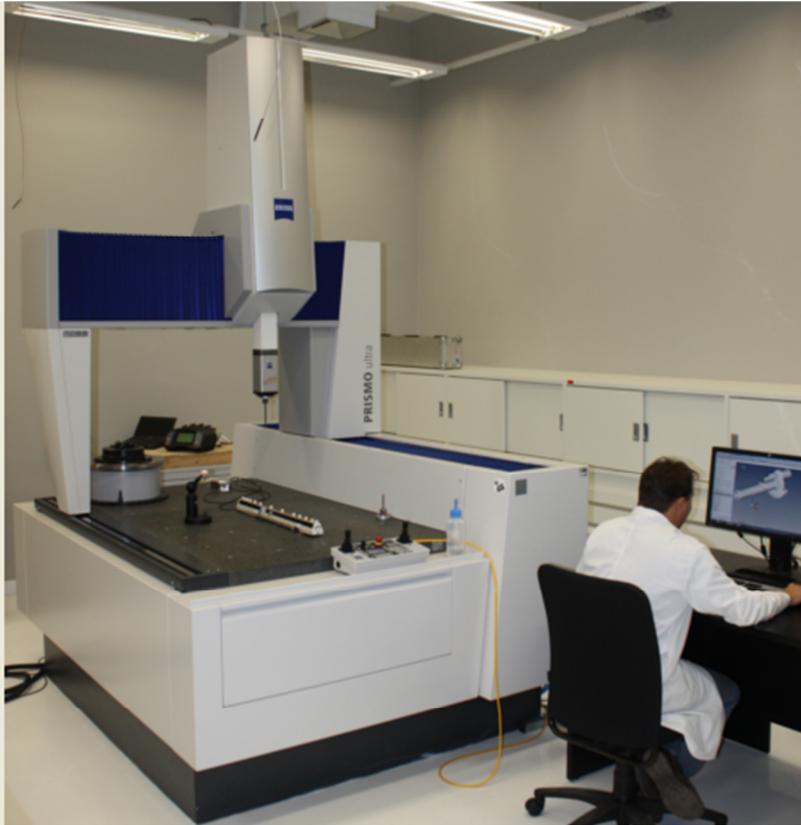
- Erro máximo admissível para a medição de comprimentos (segundo DIN EN ISO 10360-2<sup>(20)</sup>):  $[0,6 + (L / 500)] \mu\text{m}$  sendo L o comprimento em mm;
- Erro máximo admissível de apalpação (segundo DIN EN ISO 10360-2<sup>(20)</sup>):  $0,6 \mu\text{m}$ ;
- Resolução das escalas de medição:  $0,01 \mu\text{m}$ .

Dispositivos auxiliares da MMC:

- Termômetros de contato (dois), com faixa de indicação de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  e resolução de  $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Apalpador termométrico, com faixa de indicação de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  e resolução de  $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Mesa rotativa com faixa de indicação de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  e resolução de  $0,01$  arco de segundo;
- *Rack* para apalpadores com capacidade para até quatro configurações.

A máquina de medição por coordenadas é apresentada na figura 24. O ambiente de medição pertence ao Laboratório de Tomografia e Medição por Coordenadas, situado no andar térreo do prédio compartilhado pela Fundação CERTI e o Labmetro.

Figura 24 – MMC Prismo Ultra

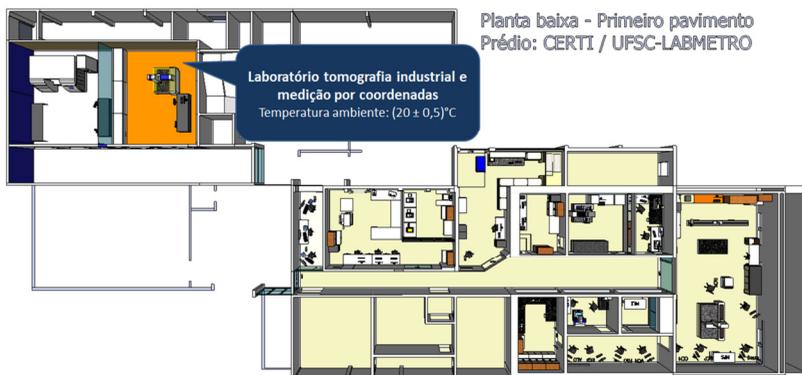


Fonte: autor

#### 4.1.4 Local de instalação

O local de instalação da MMC Prismo ultra (figura 25) é rigorosamente mantido a  $(20,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ . A sala possui uma área de 40 m<sup>2</sup>, com pé-direito de 3,8 m, paredes em condições de isolamento da parede externa do prédio. Para maior estabilidade térmica, a iluminação e o sistema de climatização permanecem ligados em regime contínuo. O controle de temperatura da sala é operacionalizado por dois sensores térmicos situados próximos à máquina de medição por coordenadas.

Figura 25 - Planta baixa esquemática dos laboratórios de metrologia



Fonte: autor

#### 4.1.5 Medidas materializadas de referência

Como medida materializada de referência, foram utilizadas dimensões conhecidas de padrões controlados e estáveis no tempo. Tais padrões são submetidos a calibrações periódicas e estão em uso no Laboratório de Metrologia do Centro de Metrologia e Instrumentação da Fundação CERTI. Os artefatos estão listados a seguir:

- Padrão escalonado, com estrutura em aço e blocos cerâmicos, marca Kolb & Baumann, com comprimento de 1020 mm, e escalonamentos de 20 mm em 20 mm. Calibrado, com certificado de calibração DKD-K-0251/01, emitido pela Carl Zeiss GmbH – Alemanha, com incerteza de medição de  $U = [0,2 + (0,5 \cdot 10^{-6} \cdot L)] \mu\text{m}$ ;
- Coleção de blocos padrão em cerâmica, marca Mitutoyo com dimensões de 0,5 mm a 100 mm, totalizando 112 peças. Calibrada, com certificado de calibração 0908225, emitido por

Mitutoyo - Japão (JCSS 0030), com incerteza de  $U=0,030 \mu\text{m}$  (para a faixa de interesse).

#### **4.1.6 Softwares**

Na máquina de medição por coordenadas, o *software* utilizado na programação das trajetórias de deslocamento da máquina de medir para operação da calibração do padrão escalonado foi o Calypso (próprio da MMC), versão 5.4.0400.

Na aquisição de dados do LaserTracer, foi desenvolvido, no contexto deste trabalho, um *software* dedicado, utilizando-se a linguagem C++. O aplicativo atua a partir do acesso remoto à biblioteca de arquivos do tipo “.dll” (*dynamic-link library*), que permite a leitura de variáveis do LaserTracer.

A integração entre a plataforma Calypso / ZEISS e o LaserTracer / ETALON foi condição indispensável para automação do processo de medição.

## **4.2 Integração dos sistemas**

Nesta seção, é detalhada a forma em que os sistemas foram integrados e quais as condições de contorno que permitiram a automação do processo de medição.

Os equipamentos são de fabricantes diferentes, cada qual com seu respectivo *software*. Pela interface do *software* do LaserTracer, é possível estabelecer uma conexão com o controlador da MMC, via *Local Area Network* (LAN).

Equacionado o desafio de conexão, deparou-se com a problemática dos sistemas coordenados distintos, pois na MMC é usual o sistema cartesiano e o LaserTracer opera com o coordenadas esféricas.

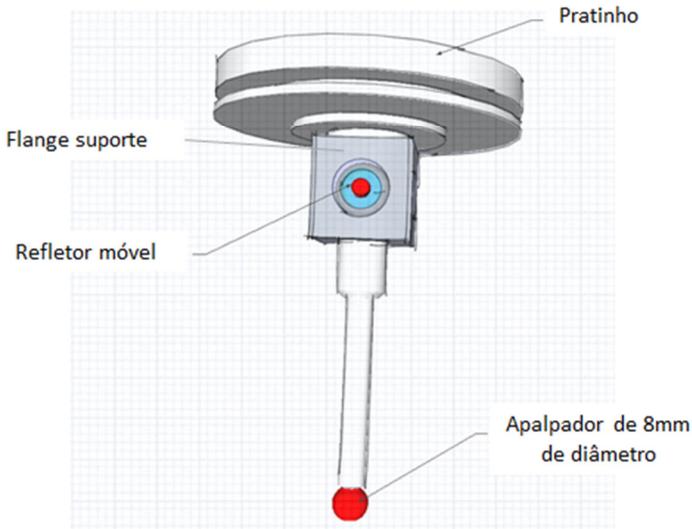
Outra consideração relevante diz respeito à sistemática de captura de pontos que, na MMC, envolve aplicação de uma força de medição exercida entre o apalpador e a peça. Este contato é influenciado por todas as variáveis associadas à dinâmica de toque do apalpador (qualificação na esfera de referência, tensor vetorial de apalpação, flexão da haste, histerese etc.). Por sua vez, o sistema LaserTracer não depende de contato, mas é suscetível a erros quando desalinhado em relação à trajetória a medir. Além disso, requer estabilidade na posição do espelho móvel ao capturar as leituras.

Todas estas questões envolvidas demandaram vários testes preliminares para viabilizar tecnicamente a execução da proposta.

#### **4.2.1 Montagem do espelho do LaserTracer**

Como ponto de partida para a integração entre os sistemas, propôs-se a montagem de um apalpador de medição com refletor móvel integrado, conforme demonstrado na figura 26. Este apalpador integrado foi concebido para ser rígido, não ter partes móveis, para ser leve e o mais simples possível. Desta forma, utilizou-se um flange de acoplamento (acessório da MMC) entre o apalpador e o disco (pratinho).

Figura 26 - Apalpador de medição com refletor integrado



Fonte: autor

O flange foi furado e mandrilado em dimensão adequada para a montagem com o diâmetro externo da esfera do refletor móvel, que foi posteriormente alinhada e fixada na estrutura. A montagem exigiu certo cuidado para que a face plana do espelho permanecesse em plano paralelo à face do flange. Para isto, foram utilizados blocos padrão como suportes e um indexador de posição, conforme pode ser visualizado na figura 27.

Figura 27 - Montagem do apalpador integrado



Fonte: autor

A fixação garantiu o paralelismo do cubo em relação ao refletor móvel e a referência angular de todo o conjunto foi estabelecida a partir do ajuste de giro entre o cubo e o disco. Este, por sua vez, determina a posição angular do conjunto em relação ao cabeçote de medição.

Da análise do certificado de calibração fornecido pelo fabricante<sup>(32)</sup>, concluiu-se que os erros de rotação do cabeçote são insignificantes na região próxima a execução das medições. Desta forma, concluiu-se que o erro de Abbé, decorrente da diferença de posicionamento entre o apalpador e o centro esférico do espelho móvel, não implicaria na propagação de erros significativos para o processo de medição.

Além disso, na configuração proposta, do ponto de vista mecânico, o processo de medição pode ser completamente automatizado, com a execução de um ciclo completo de medição em um curto intervalo de tempo, o que é preferível do ponto de vista da deriva térmica.

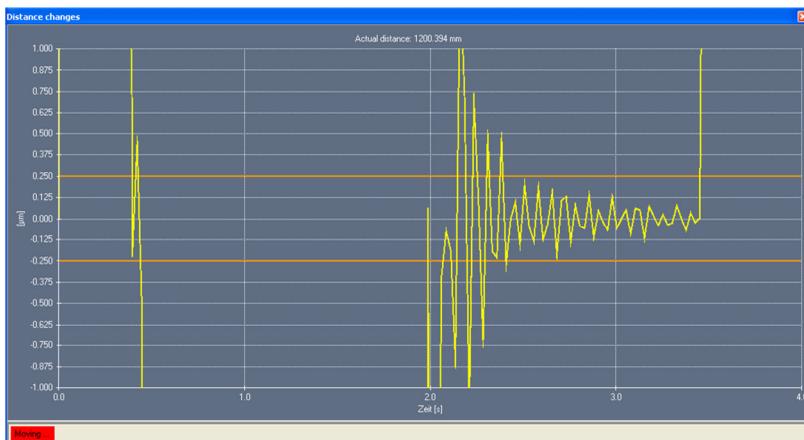
#### **4.2.2 Integração de *software***

O desafio subsequente foi a integração dos *softwares* envolvidos, dada à impossibilidade de manipulação externa de dados do controlador. Em condições normais de operação, a plataforma Calypso é responsável pelo controle de acionamentos necessários às rotinas de operação do equipamento. Como alternativa, identificou-se a possibilidade de implementar um arquivo executável dentro da plataforma Calypso. A partir deste ponto, desenvolveu-se a integração dos sistemas.

A problemática de integração dos sistemas foi estudada a partir da necessidade de coleta automatizada de dados do LaserTracer. Inicialmente, identificou-se que o sinal não apresenta nenhuma estabilidade quando o apalpador está livre, ou seja, não se encontra em contato com alguma superfície. Esta característica tem como base a forma construtiva do cabeçote da MMC, que apresenta um sistema flutuante que corrobora com requisitos de segurança contra colisões.

Dados preliminares de leituras e análise do comportamento do sinal ao longo do tempo identificam que este se estabiliza a partir do contato do apalpador contra uma superfície e consequente aplicação da força de medição. Como exemplo, a figura 28 apresenta, no eixo das abcissas, a escala de tempo e no das ordenadas, a amplitude do sinal em micrometros. A avaliação foi realizada a uma posição de 1200 mm de afastamento, entre o espelho móvel e o centro de giro do LaserTracer.

Figura 28 - Sinal do LaserTracer representado no tempo



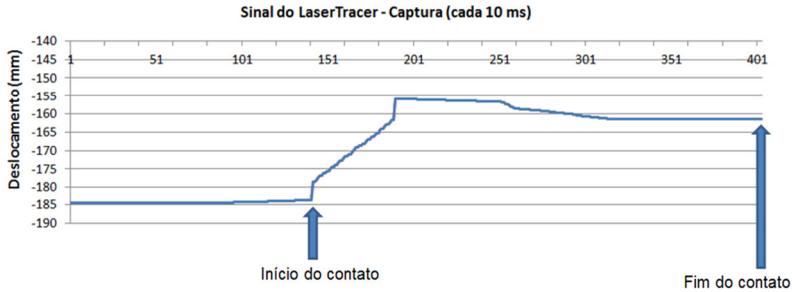
Fonte: *Software* do equipamento (Track-check)

Com base na análise de uma série de experimentos, como os detalhados na figura 28, foi possível identificar que, embora o tempo de estabilização apresente certa variação, há um intervalo onde a flutuação se reduz de forma significativa, no exemplo da figura a partir de três segundos.

A partir desta análise, concluiu-se que viabilidade técnica para integração dos sistemas é suficiente e não compromete os resultados por instabilidades de sinal de leitura do LaserTracer.

Dada a importância desta variável no processo, incluiu-se no *software* de aquisição uma etapa para cálculo da amplitude da variação entre as leituras, como indicativo da qualidade de aquisição do sinal. De posse desta conclusão, passou-se à automação da aquisição de pontos, via programação na plataforma Calypso. O comportamento dos pontos coletados pode ser visualizado no gráfico 4.

Gráfico 4 - Mapeamento do comportamento do sinal do LaserTracer

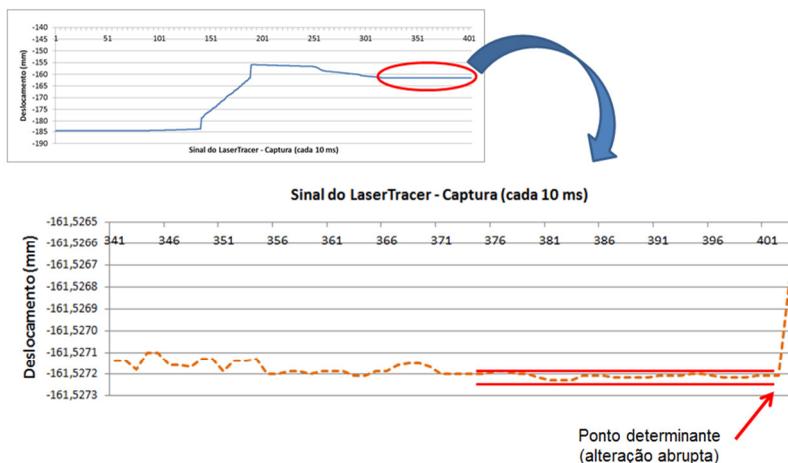


Fonte: autor

Na imagem, estão identificados os pontos de início do contato do apalpador com a superfície do bloco escalonado e do fim do contato. A partir deste ponto, o apalpador afasta-se para um plano superior (plano de segurança).

Ampliando-se a zona de interesse, onde o sinal apresenta nível de estabilidade satisfatório, percebe-se que a variação se reduz bastante, conforme observado no gráfico 5.

Gráfico 5 - Sinal do LaserTracer na faixa de interesse



Fonte: autor

O programa identifica o último ponto capturado (ponto determinante na figura, correspondente ao afastamento do apalpador) e armazena os quarenta últimos pontos em um *script* preliminar. Como não há plena garantia da sincronização entre a captura do sistema LaserTracer e o cabeçote da MMC, embora os experimentos apontem que os instantes de tempo sejam muito próximos, optou-se pelo descarte dos dez últimos pontos desta listagem e, de forma análoga, dos dez primeiros pontos capturados. Chegou-se a este critério por intermédio da observação do desvio padrão.

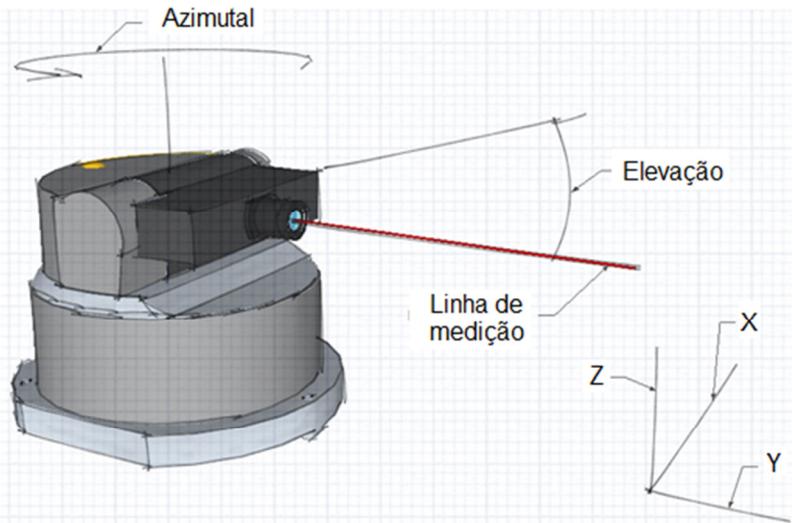
Dos quarenta pontos capturados, a sequência do 11° ao 30° encontra-se no intervalo de três desvios padrão. Com os vinte pontos restantes são calculados a média aritmética e a amplitude da variação dos pontos. Este procedimento é análogo para as demais variáveis de interesse, obtidas via interface externa ao LaserTracer:

- A distância medida;

- O ângulo de posicionamento do *encoder* vertical (ângulo de elevação);
- O ângulo de posicionamento do *encoder* horizontal (ângulo azimutal);
- A temperatura medida pelo sensor de ambiente.

Com o programa de interface desenvolvido, é possível obter a leitura dos *encoders* horizontal e vertical e, desta forma, avaliar a posição angular de elevação (Y/Z) e azimutal (X/Y) sobre a linha de medição, vide figura 29.

Figura 29 - Ângulos de elevação e azimutal



Fonte: autor

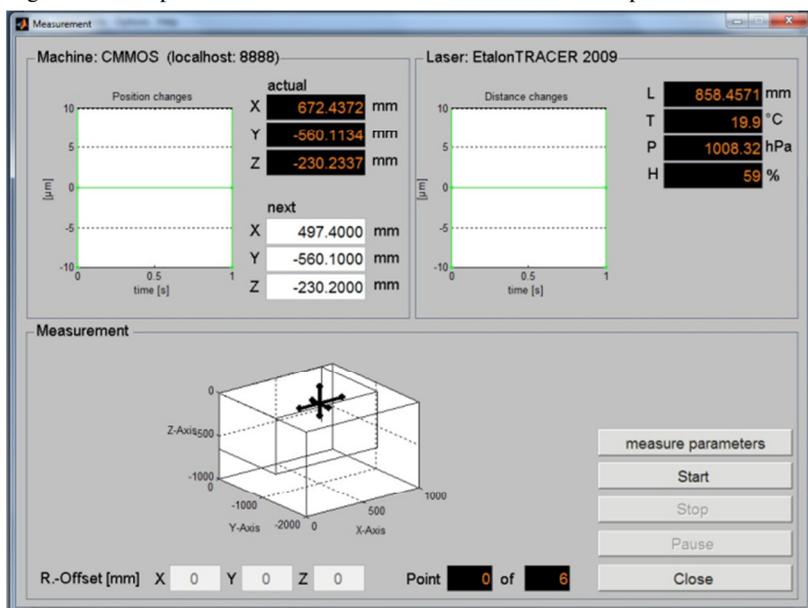
#### 4.2.3 Alinhamento relativo

A localização do centro de giro do LaserTracer no sistema coordenado cartesiano da máquina de medição por coordenadas foi operacionalizada a partir dos recursos do *software* Track-Check. O

sistema de interferometria *laser* de rastreamento automático foi posicionado sobre a mesa de medição da MMC.

Estabelecida a conexão entre o *software* Track-Check e o controlador da máquina de medição por coordenadas, os movimentos da MMC passam a serem controlados pelo aplicativo Track-Check. A figura 30 demonstra a janela onde é estabelecida a conexão.

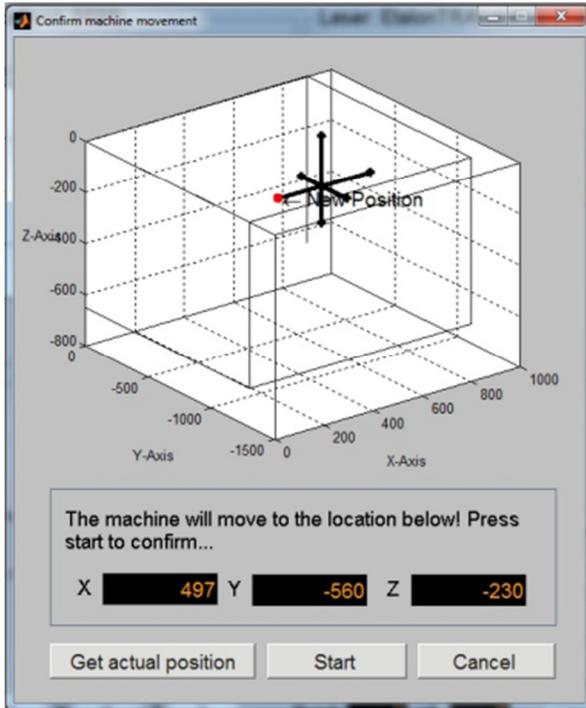
Figura 30 - Acoplamento dos sistemas coordenados cartesiano e polar



Fonte: *Software* do equipamento (Track-Check)

Para integração dos sistemas coordenados, o *software* Track-Check executa uma rotina de deslocamentos na MMC, movendo-a nos eixos X, Y e Z a pontos predefinidos, conforme ilustrado na figura 31. O sistema retorna a informação das coordenadas do centro de giro do LaserTracer em relação ao sistema coordenado cartesiano da MMC.

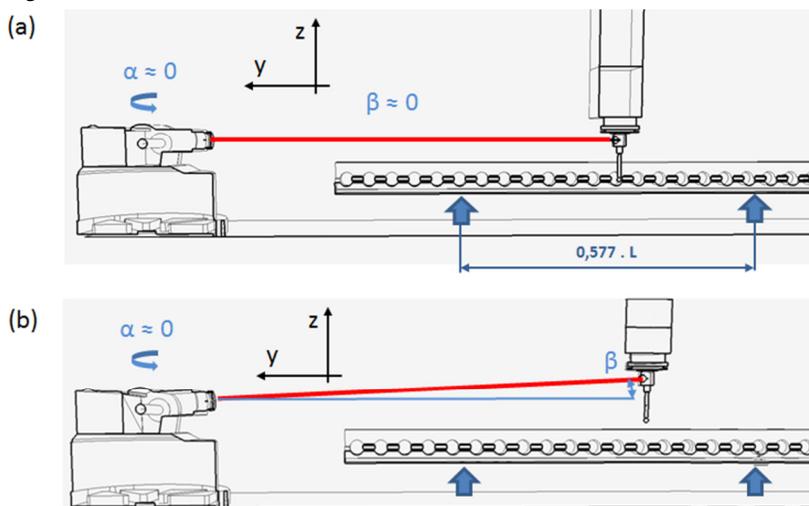
Figura 31 - Trajetória do apalpador no plano cartesiano



Fonte: *Software* do equipamento (Track-Check)

Visando à minimização do erro de cosseno, busca-se com o alinhamento mecânico, a menor movimentação angular possível no ângulo azimutal. O mesmo ocorre para o ângulo de elevação ( $\beta$ ), o qual terá movimentação significativa apenas no recuo e reposicionamento do apalpador (na execução das trajetórias aplicáveis a calibração de um padrão escalonado, no exemplo da figura 32 apresentada em corte).

Figura 32 - Deslocamento do LaserTracer



Fonte: autor

Na figura 32(a) o apalpador está em posição de contato com a face do bloco escalonado. Nesta posição, o feixe do LaserTracer está paralelo ao plano da mesa da MMC e alinhado ao eixo de medição. Na figura 32(b), o cabeçote está a uma altura segura para mover-se ao próximo bloco escalonado, e o feixe do sistema LaserTracer executa o rastreamento da posição, sem perda de sinal. De forma análoga, o apalpador desloca-se ao próximo bloco escalonado em posição de medição e o LaserTracer acompanha sua trajetória.

Em relação ao alinhamento, o sistema LaserTracer necessita estar alinhado ao eixo geométrico da MMC, assim como o padrão a calibrar precisa ser apoiado e alinhado mecanicamente à linha de medição definida pelo LaserTracer. O detalhamento a respeito é apresentado no capítulo seguinte.



## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos experimentos realizados, os testes envolvidos no processo de validação, as condições que delimitaram a disposição dos elementos e a estimativa da incerteza de medição.

### 5.1 Caracterização da temperatura

A caracterização da temperatura baseou-se em dois experimentos: no primeiro, avaliou-se o gradiente térmico do ambiente de acordo com o guia VDI/VDE 2627 <sup>(31)</sup>; no segundo, realizou-se a validação dos dados coletados por sensores de temperatura de contato e da máquina de medição por coordenadas, uma vez que os sensores da MMC não estavam calibrados.

#### 5.1.1 Estabilidade térmica e gradientes térmicos do laboratório

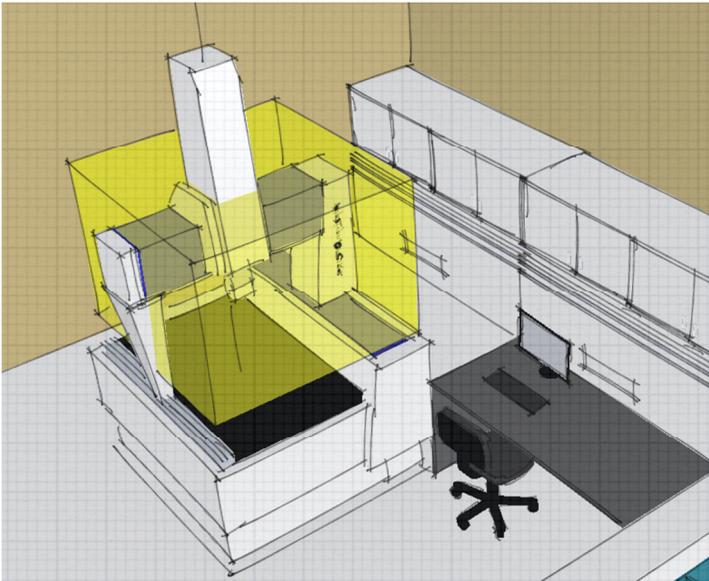
O monitoramento das condições ambientais foi operacionalizado antes, durante e depois dos experimentos de medição, utilizando-se os seguintes recursos:

- Máquina de medição por coordenadas: termômetros de contato. Foi utilizada correção automática de temperatura nas leituras com a MMC;
- LaserTracer: Sensor de temperatura do ar, medidor de umidade e barômetro do próprio equipamento;
- Ambiente (sala): registrador de temperatura, marca FLUKE, modelo *Black Stack* n°1560, com oito sensores de temperatura

do tipo Pt 100, com faixa de indicação de 0 a 100 °C e resolução de 0,0001 °C, calibrados em conjunto e com  $U = 0,06$  °C ( $k=2$ ).

As condições ambientais foram monitoradas no entorno do equipamento, formando um paralelepípedo, de acordo com a figura 33. Observa-se o volume de controle destacado na cor amarela. Em cada vértice deste paralelepípedo, está posicionado um sensor de temperatura que se encontra conectado a uma unidade de leitura e armazenamento (*Black Stack*) ligado ao computador.

Figura 33 - Diagrama do volume de avaliação dos gradientes térmicos

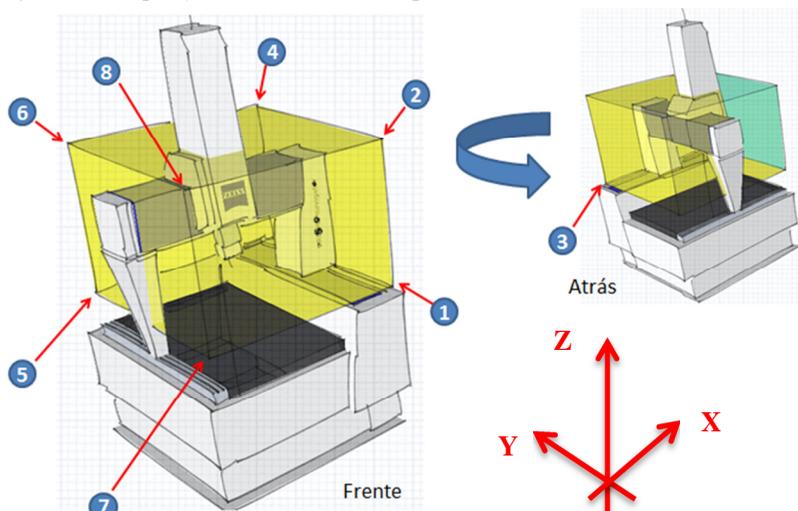


Fonte: autor

A figura 34 detalha a posição de cada sensor em relação ao equipamento de medição, os sensores 1-3-5-7 estão posicionados no plano inferior, que corresponde ao plano onde foram efetuadas as

medições. Os sensores 2-4-6-8 estão posicionados de forma tal a incluir a guia do eixo X no volume monitorado, assim como boa parte do eixo Z.

Figura 34 - Disposição dos sensores de temperatura



Fonte: autor

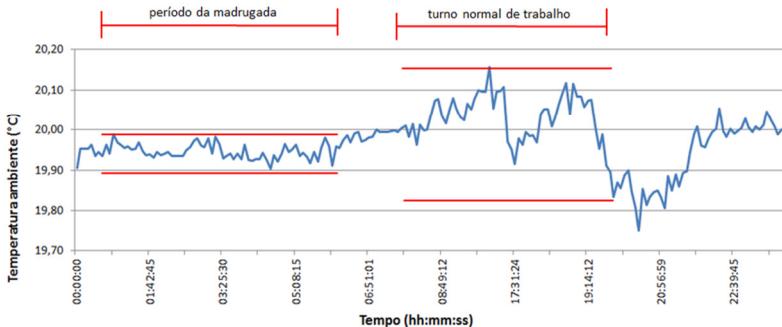
No experimento de avaliação do gradiente térmico, as condições foram monitoradas durante um período de aproximadamente duas semanas, de modo a contemplar diferentes perturbações, tais como: circulação de pessoas, abertura de portas, e também durante o período da madrugada, na ausência de qualquer perturbação ao ambiente laboratorial.

Estão presentes na avaliação (conservadora) as influências das perturbações climáticas externas. O ambiente de medição foi classificado na classe B, segundo critérios para o gradiente temporal de acordo com o guia VDI/VDE 2627 <sup>(31)</sup>.

Em relação aos gradientes espaciais, o ambiente de medição é classificado como classe C, baseando-se no limite da classe de 0,5 K/m. Desta forma, a classificação do ambiente de medição pelos critérios temporal e espacial, assume a pior classificação, estabelecendo-se em C, de acordo com o guia VDI/VDE 2627 <sup>(31)</sup>.

Gradientes de temperatura espaciais e temporais podem produzir dilatações diferenciais na MMC e mesmo no objeto medido, induzindo a erros de difícil correção <sup>(7)</sup>. Por isso, buscou-se identificar o período de melhor condição ambiental, analisando-se o comportamento da temperatura em intervalos de 24 horas. Um exemplo é demonstrado no gráfico 6.

Gráfico 6 - Variação da temperatura ambiente



Fonte: autor

Observa-se que a estabilidade da temperatura ambiente é maior no período da madrugada, após um período de estabilização térmica, quando não há circulação de pessoas e quando são minimizadas as influências externas. Desta forma, recomenda-se que as medições de alta exatidão em padrões de grande porte sejam realizadas de modo automatizado, no período da madrugada.

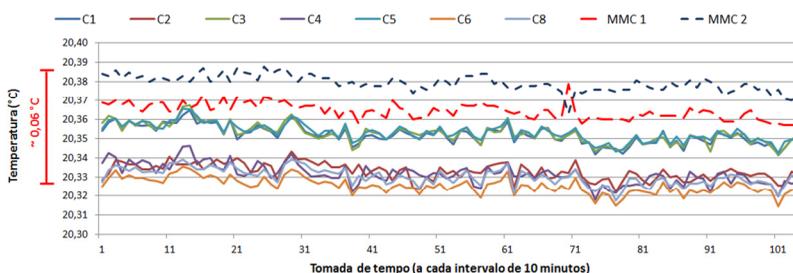
### 5.1.2 Capacidade de medição de temperatura por contato

De forma a validar os dados de temperatura, adquiridos com os sensores de contato da MMC (não calibrados), foi realizado o estudo demonstrado no gráfico 7, utilizando um medidor de temperatura de oito canais, calibrado, marca Fluke, modelo Black Stack.

Neste experimento, foram montados os sensores de temperatura do equipamento Black Stack sobre um bloco metálico fixo. Sobre esta mesma estrutura foram posicionados os dois sensores de temperatura da máquina de medição por coordenadas.

O bloco de aço foi posicionado sobre a mesa da MMC e permaneceu em estabilidade térmica, no período da madrugada, sem influências externas que promovessem variação significativa de temperatura. Na amostragem exibida no gráfico 7, foram coletados dados pelo período aproximado de quatro horas.

Gráfico 7 - Validação dos sensores de temperatura



Fonte: autor

Não foram identificadas diferenças sistemáticas significativas entre as leituras dos oito canais do Black Stack e dos dois canais da MMC. Considerou-se na análise a incerteza de medição do certificado de calibração do Black Stack. Deste modo, avaliou-se adequada a

comparação entre os resultados obtidos com o mapeamento volumétrico do gradiente térmico e com a coleta de dados de temperatura da peça.

Durante a execução do programa de medição, foi possível medir a temperatura de cada sensor, de forma individual, no ato do contato do apalpador e registrá-la junto aos resultados de medição. Recomenda-se, para aplicações futuras de elevada exatidão, que os sensores da MMC sejam calibrados em conjunto com os sensores do Black Stack.

## **5.2 Caracterização do desempenho metrológico da máquina de medição por coordenadas**

Neste tópico, são detalhados os resultados obtidos com experimentos específicos que tiveram por objetivo a elaboração de uma base de conhecimento a respeito do desempenho metrológico da MMC para determinadas tarefas. Desta forma, buscou-se a sintetização de métodos para estudo em particular de determinadas características.

Tais resultados são utilizados na composição do balanço de incerteza, estruturado para tarefas de calibração de padrões lineares de grande porte, utilizando como referência uma associação entre uma MMC e um sistema LaserTracer.

### **5.2.1 Estudo do erro de apalpação bidirecional**

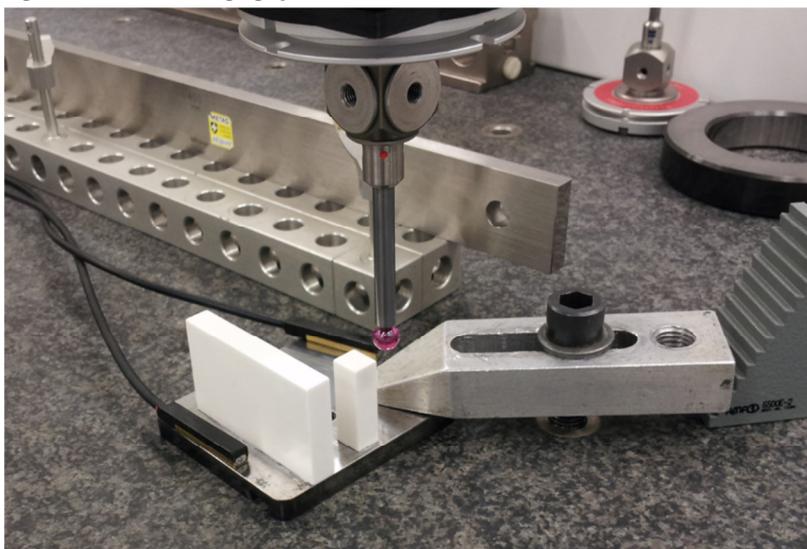
Este experimento foi realizado para avaliação do erro de apalpação bidirecional, para quantificar esta característica na composição do balanço de incertezas. Para tanto, montou-se o arranjo da figura 35. Em uma base plana foram colados (de modo não permanente)

dois blocos padrão calibrados, um com dimensão de 60 mm e outro com dimensão de 10 mm.

Partiu-se de uma qualificação convencional de apalpador, com força de medição 0,2 N, utilizando-se a esfera de referência do equipamento. As condições ambientais foram monitoradas durante o experimento e se apresentaram bastantes próximas das ideais.

O apalpador tem esfera em rubi, com 8 mm de diâmetro e haste em metal duro, com diâmetro de 6 mm. Esta montagem é similar à do apalpador de referência da máquina (configuração utilizada pelo fabricante para qualificação geométrica e calibração da MMC). A mesma montagem foi utilizada em todos os experimentos.

Figura 35 - Estudo de apalpação com MMC

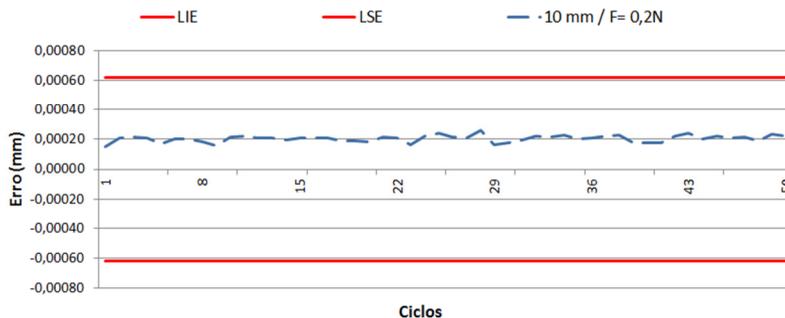


Fonte: autor

Sobre a face do bloco padrão de 10 mm e suas laterais, estabeleceu-se o alinhamento matemático do sistema coordenado. Com

programa CNC de medição, tomou-se um ponto ao centro do bloco e deslocou-se o apalpador à face oposta, tomando outro ponto, no centro da face e, desta forma, obteve-se o desvio do comprimento central. Foram realizadas cinquenta medições, com tempo total inferior a cinco minutos. Os resultados são apresentados no gráfico 8. A título de comparação, podem ser visualizadas também as linhas contínuas, superior e inferior, que delimitam a parcela do erro máximo admissível do equipamento.

Gráfico 8 - Resultados do erro de apalpação bidirecional sobre bloco padrão de 10 mm



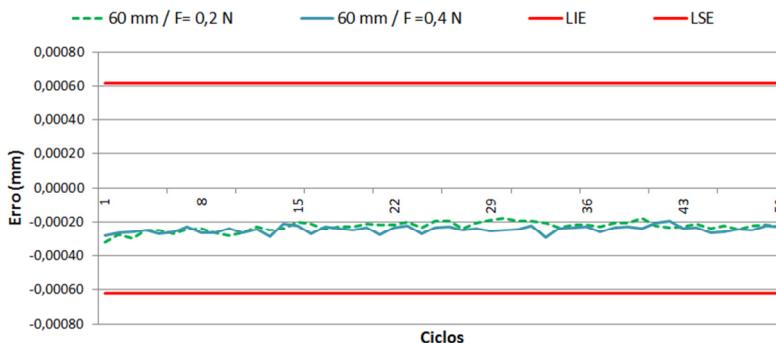
Fonte: autor

Foi observado um desvio padrão de  $0,02 \mu\text{m}$  e um afastamento médio do valor verdadeiro de  $+0,2 \mu\text{m}$ . Este afastamento é referência para correção do diâmetro do apalpador, para eliminação do erro de apalpação bidirecional.

Para validar a correção do diâmetro do apalpador, foi efetuada a mesma rotina de medição sobre um bloco padrão de 60 mm. Os resultados são apresentados no gráfico 9. À exceção da força de medição, que foi duplicada em uma das análises, as condições de

execução deste experimento foram idênticas às do experimento com o bloco de 10 mm.

Gráfico 9 - Resultados das medições realizadas sobre o bloco de 60 mm



Fonte: autor

Inseriu-se neste experimento a variação da força de medição, incluindo-se uma medição com 0,4 N. Neste experimento, foram repetidos os ciclos de medição sobre o bloco padrão de 10 mm, e atualizado o respectivo valor de correção do diâmetro do apalpador e então repetidos os cinquenta ciclos de medição sobre o bloco padrão de 60 mm.

Observa-se, no gráfico 9, que os valores medidos para 0,2 N e 0,4 N são bastante próximos, sem a presença de tendência associada à variação da força de medição. Desta forma, conclui-se que a rigidez do apalpador é adequada para a tarefa de medição.

Faz-se importante a observação à diferença entre os resultados do ensaio de apalpação no bloco padrão de 10 mm e no bloco padrão de 60 mm, os valores são insignificantes quando comparados à especificação do erro máximo de apalpação, declarado pelo fabricante. Desta forma, a

variação de  $0,2 \mu\text{m}$  encontra-se compreendida em um intervalo esperado de repetitividade.

As condições de repetibilidade do cabeçote são fundamentais para obtenção de resultados confiáveis, uma vez que o sistema LaserTracer depende dos deslocamentos, da operacionalização do contato e, por conseguinte, da estabilização da força de medição realizada pela máquina de medição por coordenadas.

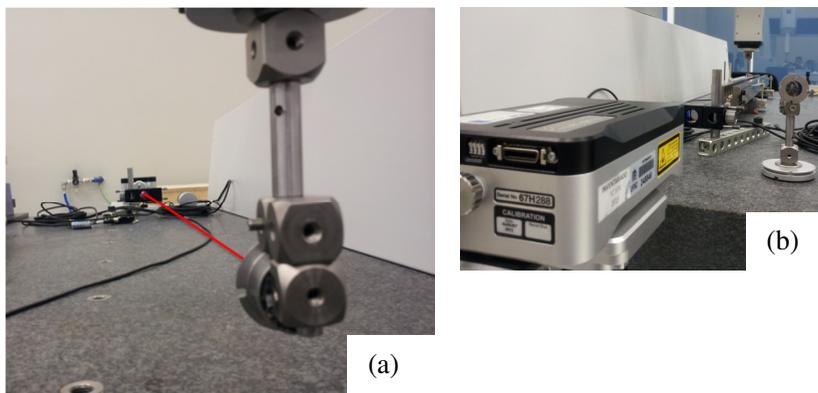
### **5.2.2 Estudo do erro de posicionamento**

O estudo foi realizado para melhorar o conhecimento da capacidade de medição da MMC no eixo Y, mesmo que as leituras da escala da máquina não sejam utilizadas na calibração dos padrões de comprimento (usadas apenas para checagem cruzada).

No experimento, foi utilizado um *laser* interferométrico convencional, do fabricante Renishaw, modelo XL-80, que, diferentemente do sistema LaserTracer de rastreamento automático, requer o alinhamento mecânico do feixe *laser* em relação à trajetória da máquina.

Foi montado o refletor no cabeçote da máquina de medição por coordenadas, simulando a mesma altura do apalpador de medição, conforme demonstrado na figura 36 (b). Foi necessário remover o padrão escalonado para execução do ensaio apresentado na figura 36 (a). O *laser* interferométrico foi fixado na mesa da MMC, e o ensaio de posicionamento efetuado exatamente na linha de medição onde ocorreu a calibração do padrão escalonado.

Figura 36 - Ensaio de posicionamento

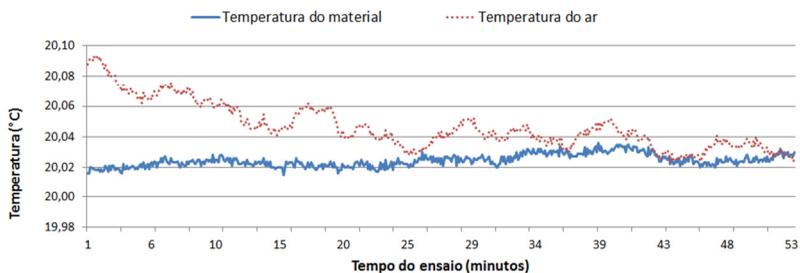


Fonte: autor

Durante a execução do ensaio de posicionamento, a temperatura foi monitorada com os sensores de material dispostos sobre o desempenho da máquina, e de ambiente posicionado próximo ao feixe do *laser*.

A temperatura média do sensor de material ficou em 20,02 °C, e o sensor de ambiente apresentou uma temperatura média de 20,04 °C, conforme pode ser visualizado no gráfico 10.

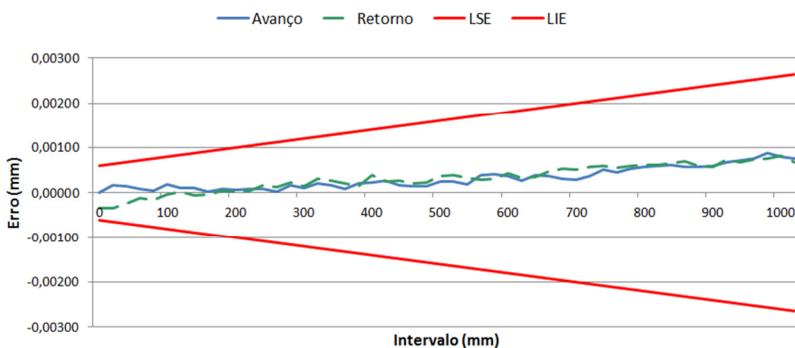
Gráfico 10 - Monitoramento da temperatura no ensaio de posicionamento



Fonte: autor

Os resultados do mapeamento do erro de posicionamento linear, realizado para o eixo Y da MMC, estão apresentados no gráfico 11 que apresenta a média das indicações e os limites inferior e superior de especificação da MMC. Foram realizados cinco ciclos de medição, no avanço e retorno, em seqüência. O maior desvio padrão identificado entre os cinco ciclos é da ordem de 0,6  $\mu\text{m}$ .

Gráfico 11 - Erro de posicionamento – Ao longo do eixo Y



Fonte: autor

O erro de posicionamento é definido a partir da subtração da indicação da máquina de medir por coordenadas do sinal de referência do laser interferométrico.

Com o interferômetro montado na posição do apalpador de medição, não é possível direcionar a força de medição no cabeçote durante o posicionamento. Sem a atuação da força de medição, o sistema permanece desbloqueado. Nesta condição, é observada histerese nos resultados de avanço e retorno.

Para uma quantificação adequada dos erros de posicionamento do eixo Y, optou-se por remover dos resultados a parcela referente à

histerese média. Desta forma, procura-se alinhar os objetivos do experimento, limitando-os aos erros de posicionamento linear ao longo do eixo avaliado.

## **5.3 Experimentos integrados**

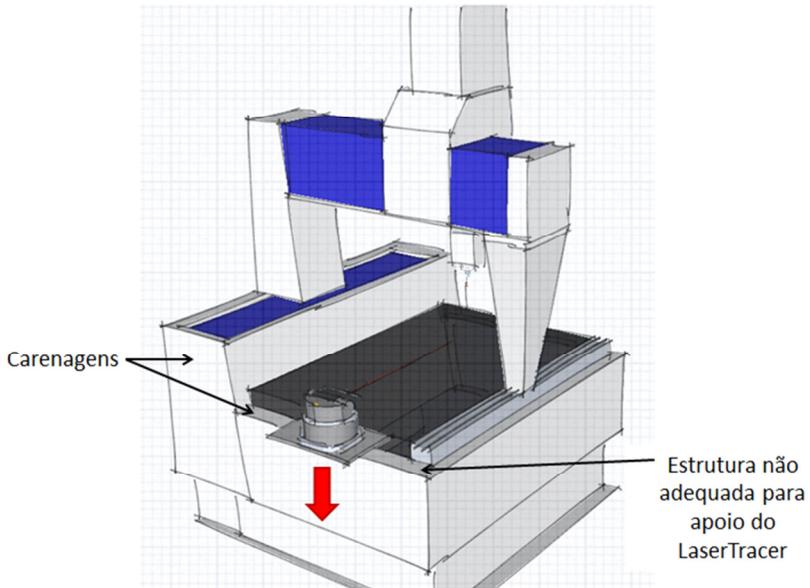
### **5.3.1 Primeiro experimento**

A proposta inicial considerou um dispositivo auxiliar para facilitar o alinhamento mecânico do LaserTracer com o eixo geométrico (Y) da máquina de medir. As dimensões e peso desta estrutura foram condicionantes para a disposição dos elementos utilizados no experimento.

O objetivo da escolha da posição do LaserTracer baseou-se na proposta de manter a MMC disponível também para outras demandas. Como o equipamento foi alocado ao fundo da mesa de medição da MMC, basta devolver o apalpador de medição integrado ao magazine, que a máquina de medição por coordenadas está apta a receber outras demandas.

A configuração mais simples (figura 37) é realizada com uma plataforma para o sistema LaserTracer, alocando sua base em posição nivelada à mesa da MMC. Entretanto, o peso do conjunto, de aproximadamente 20 kg, inviabilizou a opção por limitações à condição segura de fixação do equipamento.

Figura 37 – Montagem simples, inviabilizada pelo peso da estrutura



Fonte: autor

Depois de avaliadas as limitações em relação à disposição do LaserTracer, prosseguiu-se com as etapas de alinhamento descritas de modo simplificado na figura 38.

Figura 38 – Etapas de alinhamento do primeiro experimento



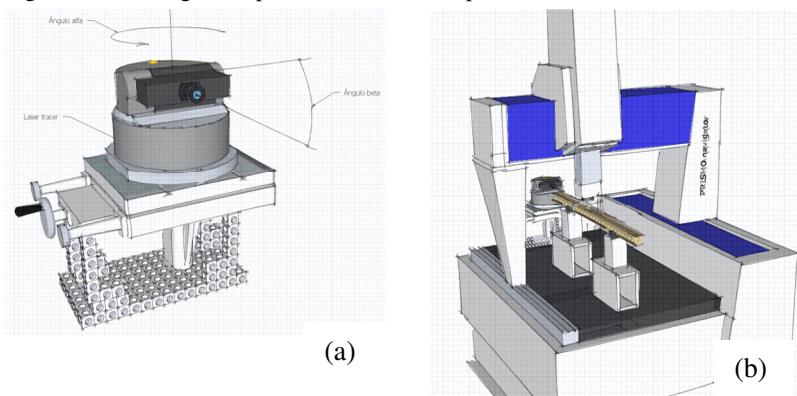
Fonte: autor

Como a configuração ideal não foi possível por questões associadas à disponibilidade de fixação, o LaserTracer foi apoiado sobre o dispositivo auxiliar de alinhamento, e este conjunto sobre a mesa da MMC. A posição do equipamento em relação aos seus eixos de rotação é demonstrada na figura 39 (a).

Observa-se a unidade emissora do LaserTracer montada sobre um dispositivo de ajuste que permite deslocamentos linear e angular no plano X/Y e também ajuste de altura. Este dispositivo foi montado a partir de uma mesa de medição de uma máquina de medir longitudinal e de acessórios modulares de fixação (kit Alufix®).

Na figura 39 (b), observa-se o conjunto montado sobre a mesa de medição da máquina de medir (ao fundo) e os calços paralelos (ao centro da MMC) que foram necessários para elevar o padrão escalonado à linha de medição.

Figura 39 - Montagem da primeira rodada de experimentos

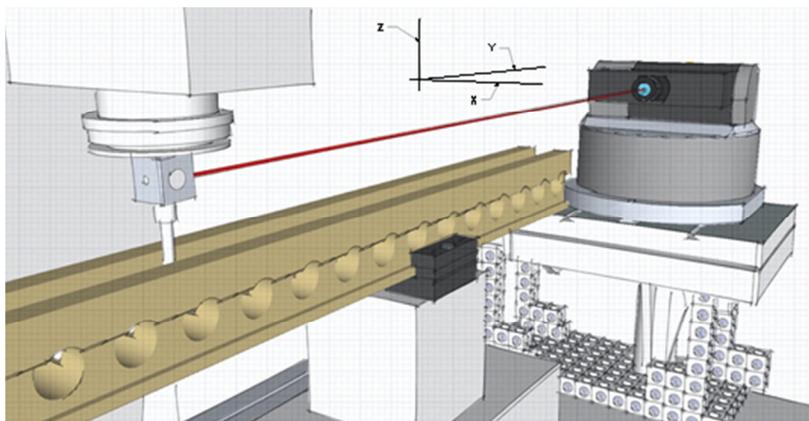


Fonte: autor

O padrão escalonado foi alinhado mecanicamente ao eixo geométrico da MMC (eixo Y), nos planos X/Y e Y/Z, de acordo com a figura 40. Em relação à qualificação da esfera do apalpador, foi realizada a calibração convencional, sem correção do erro de apalpação bidirecional.

Posicionou-se o feixe do LaserTracer em um plano superior, paralelo a linha dos blocos escalonados (linha de medição definida pelo centros dos canais de alinhamento do padrão), utilizando os recursos do dispositivo de ajuste. Realizou-se o alinhamento do feixe *laser* pela leitura dos ângulos de elevação ( $\beta$ ) e azimutal ( $\alpha$ ).

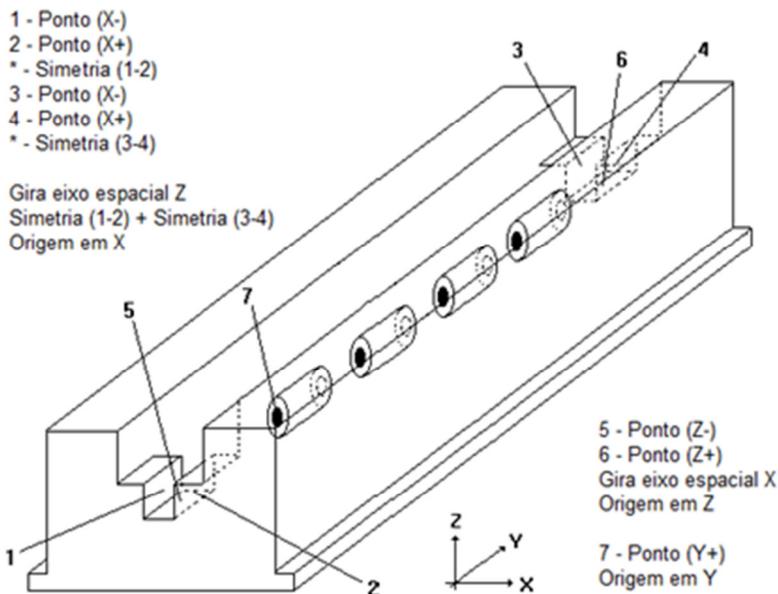
Figura 40 - Plano Cartesiano - Sistema de Eixos



Fonte: autor

Em relação ao alinhamento matemático, foram apalpados pontos sobre os canais de alinhamento do padrão, a simetria entre as faces esquerda e direita dos canais definiram o eixo X. Ao fundo do canal foi estabelecida a referência no eixo Z e na primeira face de medição definiu-se a origem no eixo Y (figura 41).

Figura 41 - Alinhamento matemático do sistema coordenado



Fonte: autor

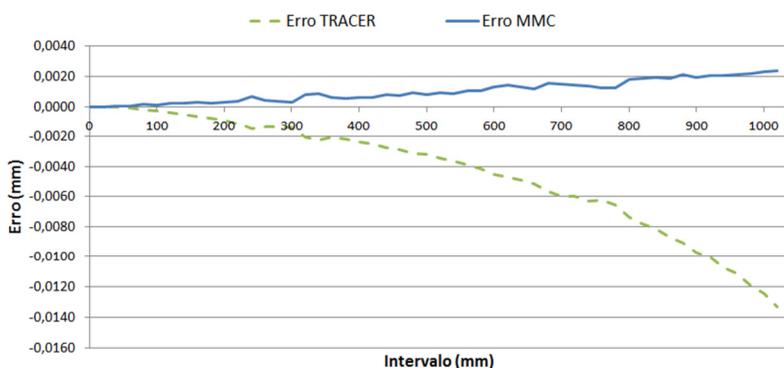
A estratégia de alinhamento matemático do padrão escalonado seguiu o modelo proposto por Stoup <sup>(29)</sup>, que descreve o princípio que um padrão escalonado com os blocos dispostos sobre a linha neutra do corpo é considerado como uma linha no espaço.

Em relação à qualificação da esfera do apalpador, foi realizada a calibração convencional, sem correção do erro de apalpação bidirecional.

Após configurações e testes preliminares, foram realizados seis ciclos completos de medição. Um ciclo completo de medição é realizado em aproximadamente oito minutos.

Os resultados médios são apresentados no gráfico 12, onde o eixo das ordenadas corresponde ao intervalo no padrão escalonado e o eixo das abcissas corresponde ao erro, calculado pela diferença entre os resultados do LaserTracer e da MMC, em relação ao certificado de calibração do padrão escalonado, que forneceu os valores de referência para validação de todos os experimentos.

Gráfico 12 - Resultados médios do primeiro experimento



Fonte: autor

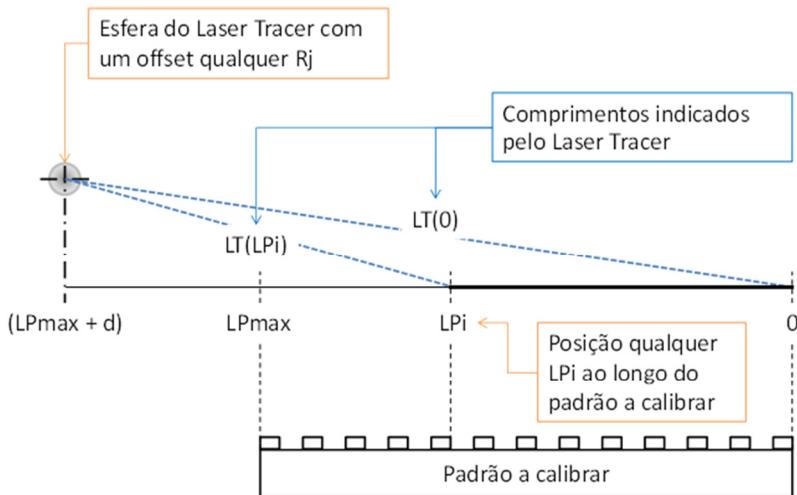
O primeiro experimento apresentou divergências significativas de resultados entre a máquina de medição por coordenadas (resultado em linha contínua no gráfico) em relação ao sistema LaserTracer (resultado em linha tracejada no gráfico), este, com resultados caracterizados fortemente por uma tendência negativa.

A temperatura média do ambiente durante a execução dos ciclos de medição foi de 19,91 °C, a variação térmica observada durante a medição ( $\Delta T = 0,22$  °C). Assim, atribui-se à hipótese de que maior parcela da tendência deve-se ao alinhamento do feixe em relação ao alinhamento do padrão escalonado, na forma de erro de cosseno<sup>(14)</sup>.

Pode-se assumir que o erro de cosseno é gerado a partir de uma condição não ideal de alinhamento entre o centro de giro (ou centro da esfera) do LaserTracer e o eixo do padrão a calibrar. Em princípio, o centro da esfera do LaserTracer pode-se considerar contido em um plano perpendicular ao eixo do padrão a calibrar, afastando-se deste em qualquer direção radial.

Independentemente de qual seja a direção desse afastamento, o valor do erro irá depender apenas da distância euclidiana entre o centro da esfera e o ponto em que o eixo do padrão atravessa o plano perpendicular (denominado aqui de *offset*). Isso pode ser usado para analisar o problema de forma simplificada em duas dimensões, conforme pode ser visualizado na figura 42.

Figura 42 – Análise do erro de cosseno



Fonte: autor

O comprimento medido na direção do eixo do padrão é obtido pela subtração de duas leituras do LaserTracer: a leitura  $LT(0)$ ,

correspondente ao extremo do padrão mais distante do LaserTracer; e a leitura  $LT(LP_i)$ , correspondente ao elemento que define o comprimento a calibrar.

Para o cálculo do erro de cosseno podem se utilizar os valores nominais do comprimento máximo do padrão,  $LP_{max}$ , e sua posição com referência ao LaserTracer,  $d$ . As equações que descrevem o fenômeno na configuração LaserTracer *versus* sistema coordenado encontram-se na tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Equações que descrevem o erro de cosseno no LaserTracer

$LT_{(0)} = \sqrt{(LP_{max} + d)^2 + r^2}$	<p>Leitura do LaserTracer para a origem do padrão (considerada zero na calibração), quando o valor do <i>offset</i> é <math>r</math>.</p>
$LT(LP_{max}) = \sqrt{d^2 + r^2}$	<p>Leitura do LaserTracer para o extremo do padrão mais próximo do Tracer, quando o valor do <i>offset</i> é <math>r</math>.</p>
$LT(LP_i) = \sqrt{(LP_{max} + d - LP_i)^2 + r^2}$	<p>Leitura do LaserTracer para uma posição qualquer <math>LP_i</math> ao longo do padrão, quando o valor do <i>offset</i> é <math>r</math>.</p>
$E_{cos(LP_i)} = LT_{(0)} - LT(LP_i) - LP_i$	<p>Erro de cosseno para uma posição qualquer <math>LP_i</math> ao longo do padrão, quando o</p>

valor do *offset* é  $r$ .

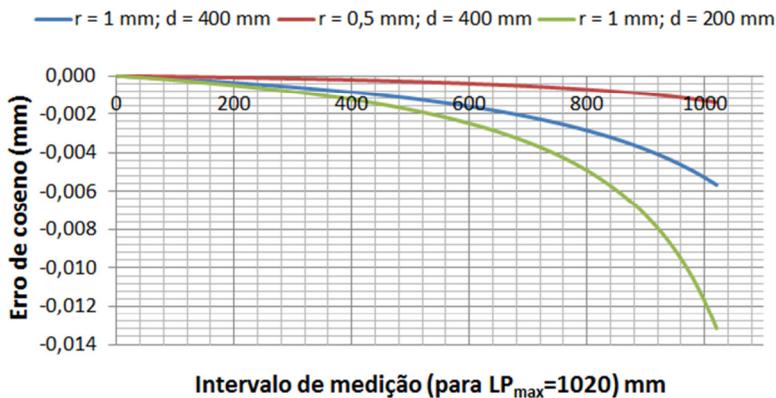
$$E_{\cos(LP_{max})} = LT_{(0)} - LT(LP_{max}) - LP_{max}$$

Erro de cosseno para o extremo do padrão mais próximo do LaserTracer, quando o valor do *offset* é  $r$ .

Fonte: autor

Representando-se o comportamento do erro de cosseno de forma gráfica, ao considerar-se um padrão escalonado de 1020 mm de comprimento, com diferentes valores de *offset* ( $r = 1 \text{ mm}$  e  $r = 0,5 \text{ mm}$ ) e diferentes distâncias entre o extremo do padrão e o LaserTracer (200 mm e 400 mm), apresenta-se o gráfico 13:

Gráfico 13 - Comportamento do erro de cosseno



Fonte: autor

Pode-se observar que:

- O erro de cosseno é sempre negativo e seu módulo aumenta na medida em que o elemento medido está mais próximo da esfera do LaserTracer.

- O comportamento do erro de cosseno não é linear com respeito à posição medida ao longo do padrão.
- O comportamento do erro de cosseno não é linear com referência ao valor do *offset* (a duplicação do *offset* mais do que duplica o valor do erro de cosseno).
- Para um padrão escalonado de um comprimento determinado, o erro de cosseno máximo aumenta na medida em que o padrão é posicionado mais perto do LaserTracer.

O erro de cosseno é de caráter sistemático e poderia ser corrigido se o valor do *offset* da esfera do LaserTracer,  $r$ , fosse conhecido com exatidão. Como esse não é o caso, deve-se adicionar uma contribuição à incerteza que considere os possíveis desalinhamentos do LaserTracer com referência ao eixo do padrão a calibrar.

A contribuição de incerteza de medição referente ao erro de cosseno é apresentada na respectiva seção 5.4.

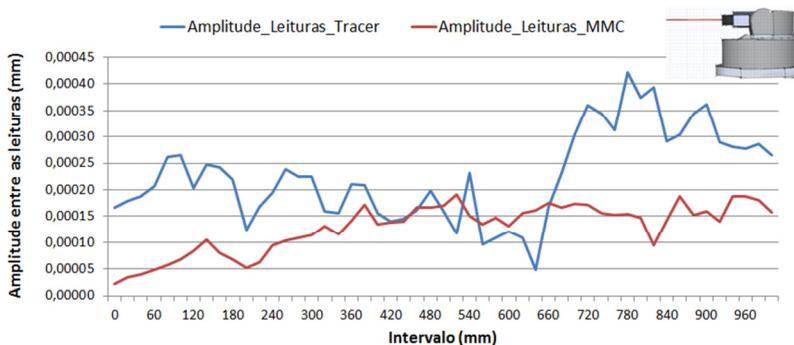
Matematicamente, o valor da tendência identificado com o primeiro experimento pode ser validado de modo satisfatório pelo equacionamento proposto.

No contexto do primeiro experimento, além do erro de cosseno, foi estudada a repetibilidade das leituras do LaserTracer e seu comportamento, considerando-se diferentes posições.

O programa de medição desenvolvido para calibração de padrão escalonado realiza a captura de ambos os sinais (MMC e LaserTracer), o resultado avaliado é o obtido pelo LaserTracer. O resultado da máquina de medição por coordenadas é utilizado como redundância. A qualidade

de captura dos pontos medidos foi avaliada pela amplitude das leituras do LaserTracer e da MMC, cujos os resultados são apresentados no gráfico 14.

Gráfico 14 - Amplitude de leituras e posição do LaserTracer



Fonte: autor

Nota-se que a amplitude das leituras do LaserTracer é consideravelmente maior quando comparada às obtidas com a máquina de medição por coordenadas. Como causa provável, concluiu-se que o sistema apresentou estabilidade mecânica insuficiente na montagem do LaserTracer.

Ao investigarem-se as causas da tendência, observa-se que a limitada estabilidade mecânica é afetada pelas características do próprio sistema LaserTracer. Uma vez que seus motores de passo, utilizados na movimentação dos eixos, estão constantemente sob atuação para manutenção da posição, e, mesmo sob condições normais de apoio, vibrações não relevantes são produzidas.

Observou-se, de modo empírico, que, quando o espelho móvel está distante da unidade emissora, a atuação do motor de passo do eixo de elevação é menos frequente e provoca nível de vibração menor.

Quando o mesmo atinge valores próximos ao comprimento mínimo, a vibração é incrementada pela maior atuação do motor de passo para manutenção da posição. Este fenômeno pode descrever em parte o comportamento da amplitude, uma vez que a origem do padrão escalonado está posicionado no extremo oposto ao LaserTracer, onde se tem a maior distância e se observa amplitude menor entre as leituras (gráfico 14).

Ao optar-se pela adoção do dispositivo auxiliar de alinhamento, incrementou-se a altura da base do LaserTracer em relação à superfície do desempenho da MMC, esta ação produz uma alavanca que amplia bastante o efeito da vibração, prejudicando a repetibilidade nas leituras.

### **5.3.2 Segundo experimento**

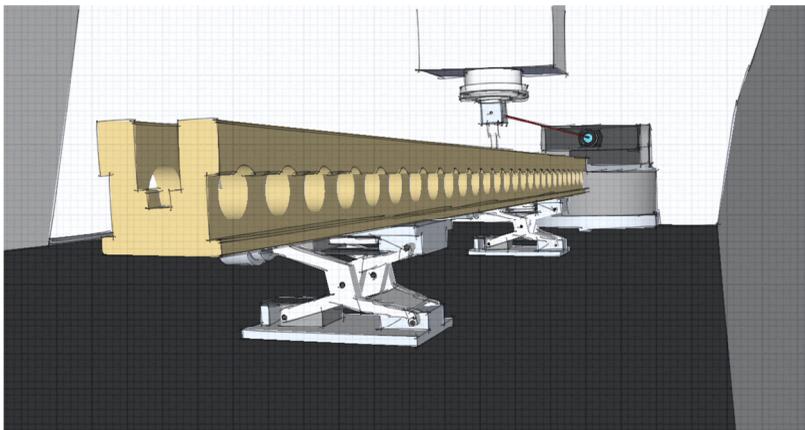
Para a segunda rodada de experimentos, revisou-se completamente a estratégia de fixação do sistema de medição e do padrão a medir. O conceito proposto é mais demorado e inverte a condição de ajuste da posição do LaserTracer para o padrão escalonado a calibrar.

Em aplicações de alta exatidão, como a proposta nesse trabalho, a condição de apoio estável do LaserTracer é fundamental para redução da variabilidade em sua utilização. Isto restringe a possibilidade de qualquer suporte de elevação que não tenha a rigidez adequada e que provoque efeito de alavanca na fixação.

A nova concepção adotou o apoio direto do LaserTracer sobre o desempenho da MMC a fim de melhorar a estabilidade decorrente da vibração e repassou a necessidade de alinhamento ao padrão a calibrar.

Desta forma, foi necessário ajustar mecanicamente o padrão escalonado às coordenadas do centro esférico do LaserTracer. A figura 43 detalha o posicionamento dos elementos sobre o desempenho da MMC.

Figura 43 - Reconfiguração da fixação utilizando calços niveladores

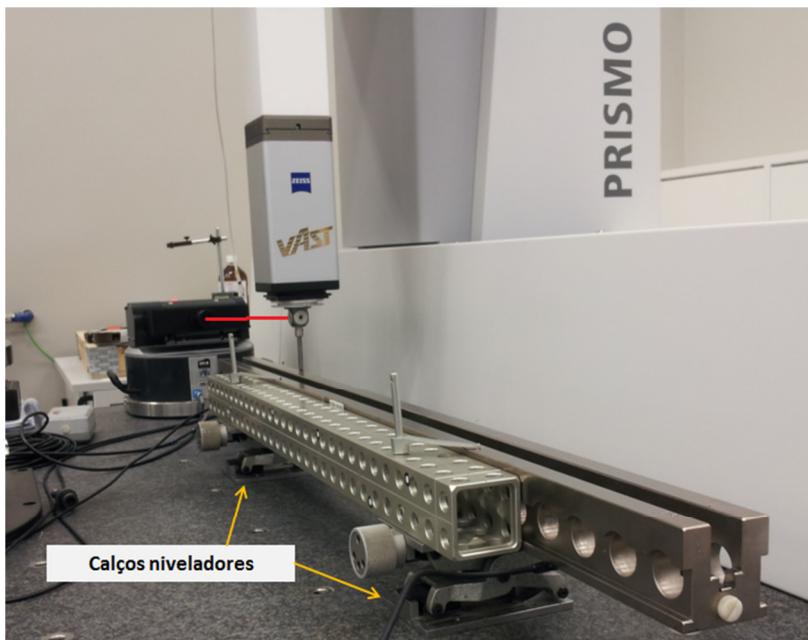


Fonte: autor

Observou-se que o alinhamento mecânico do padrão escalonado ao eixo da MMC é bastante crítico. Este alinhamento também melhora a repetibilidade do cabeçote, pela limitação do sensor de movimento ao deslocamento em apenas uma direção <sup>(29)</sup>.

Utilizaram-se calços niveladores para ajuste do padrão escalonado. Os calços foram posicionados sobre os pontos de Bessel e, sobre estes, foram aplicados dois grampos de fixação, conforme pode ser visualizado na figura 44. Uma barra lateral foi utilizada para auxiliar o alinhamento no plano X/Y do equipamento.

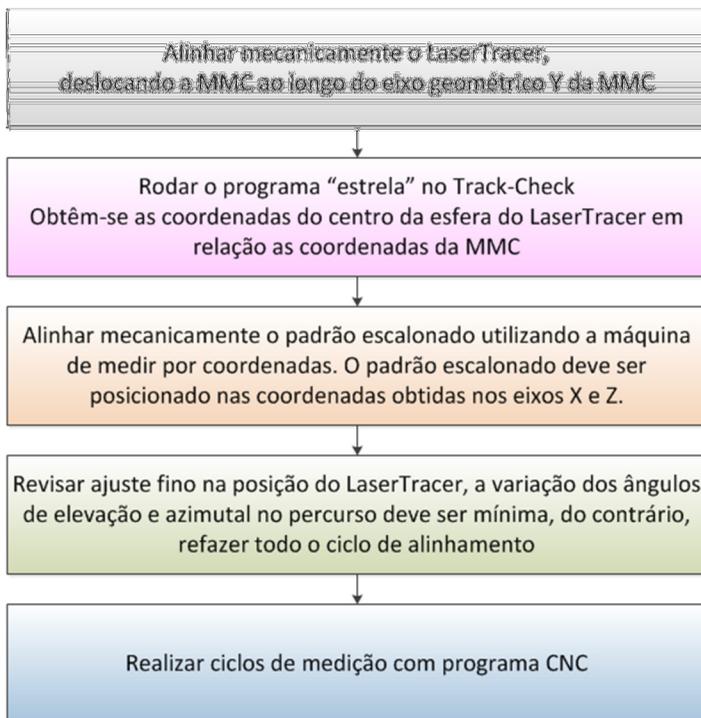
Figura 44 - Calços niveladores e fixação



Fonte: autor

Para o segundo experimento, foram realizadas as etapas de alinhamento descritas de modo simplificado na figura 45, sendo que estas diferem de modo significativo na estratégia de fixação e alinhamento, quando comparadas às do primeiro experimento.

Figura 45 - Etapas de alinhamento do segundo experimento



Fonte: autor

O padrão escalonado foi alinhado mecanicamente ao eixo geométrico da máquina de medição por coordenadas, dentro de um limite de 0,05 mm / 1000 mm, nos planos X/Y e Y/Z. Nesta configuração, o tempo de alinhamento foi superior ao do primeiro experimento. Utilizou-se um relógio apalpador na tentativa de reduzir o tempo necessário para o alinhamento mecânico.

A temperatura no sensor do LaserTracer, durante a execução dos ciclos de medição, foi de 19,77 °C, a variação térmica observada durante a medição foi de 0,22 °C. A temperatura média dos sensores de

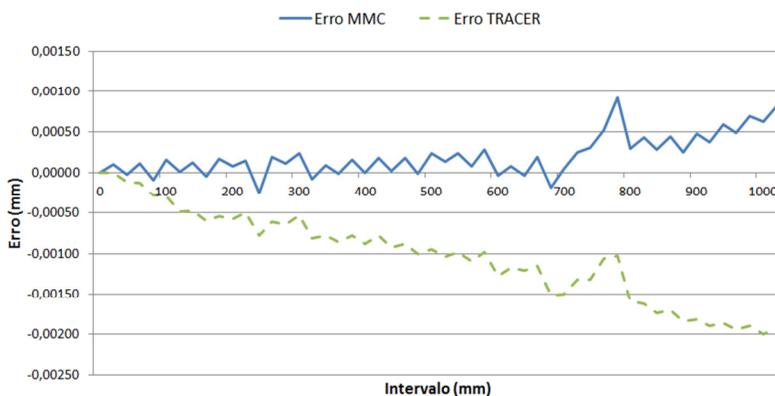
contato da máquina de medição por coordenadas foi de 20,08 °C. Este valor é aplicado aos resultados pela correção automática de temperatura.

Foram realizados dez ciclos em sequência, com um tempo de ciclo de aproximadamente oito minutos.

Em relação ao primeiro experimento, os resultados do segundo foram praticamente dez vezes mais próximos ao da referência de validação. A partir deste novo cenário, incrementou-se bastante a capacidade de observação de outras fontes de erro, até então desconhecidas. Dessa forma, o erro de apalpação tornou-se perceptível nos resultados.

Com base nos dados medidos pelo sistema LaserTracer, realizou-se uma correção no diâmetro do apalpador, na dimensão de referência 20 mm. O erro foi minimizado, mas não completamente eliminado, conforme pode se observar, no gráfico 15, a presença do “dente de serra”<sup>(22)</sup>.

Gráfico 15 - Resultados do segundo experimento



Fonte: autor

Como a correção do erro de apalpação bidirecional foi aplicada às medições do LaserTracer, a presença do dente de serra fica mais evidente nos resultados com a MMC (linha contínua do gráfico). Uma estratégia inversa ressaltaria o dente de serra nos resultados do LaserTracer.

A hipótese é que, em relação ao primeiro experimento, os resultados obtidos foram substancialmente melhores. Entretanto, sob influência do erro de cosseno residual do LaserTracer, associado à condição de alinhamento mecânico do padrão escalonado, observou-se tendência negativa nos valores medidos pelo LaserTracer. Também foi observado que a amplitude da leitura do LaserTracer foi reduzida em parte, confirmando a suspeita em relação à fixação com o dispositivo auxiliar.

### **5.3.3 Terceiro experimento**

Na terceira rodada de experimentos, foi mantida a estratégia de fixação do sistema de medição e do padrão escalonado, e foi otimizado o alinhamento mecânico.

De forma a obter a melhor condição climática do ambiente, inseriu-se no programa CNC de medição um temporizador que permite à máquina um início programado após determinado período de tempo e, só então, inicie seus ciclos de medição. Desta forma, as medições foram iniciadas quatro horas após o fechamento das portas do laboratório, no período da madrugada. O experimento foi conduzido de modo completamente automatizado.

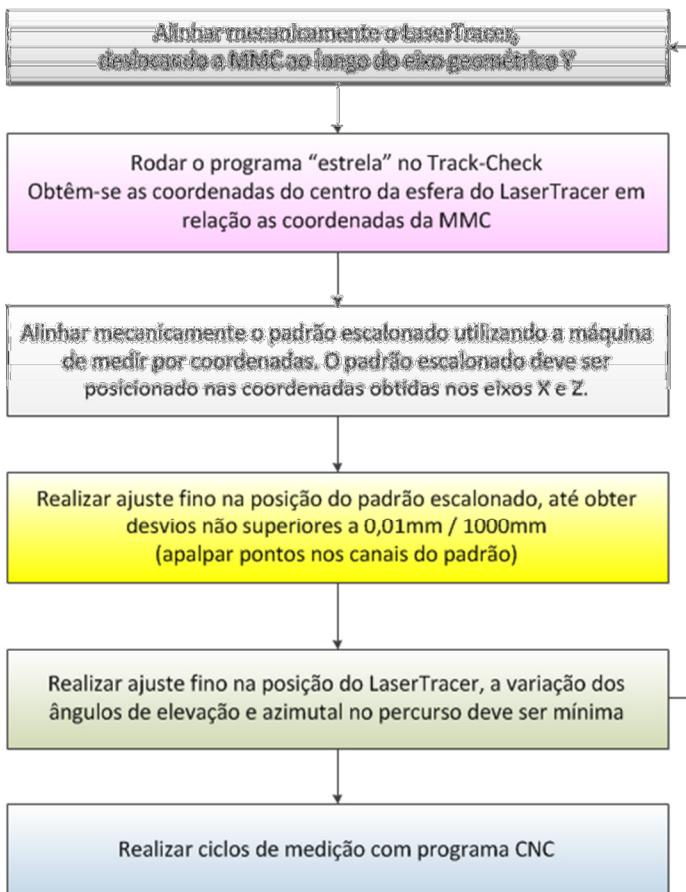
Foi incluída no programa CNC de medição uma captura automática de temperatura dos sensores de contato, fixados nas extremidades do padrão escalonado. Desta forma, ao final de cada tomada de medida, foi registrada a temperatura.

A temperatura média no sensor do LaserTracer durante a execução dos ciclos de medição foi de 19,91 °C, a deriva térmica observada durante a medição foi de 0,04 °C, a cada ponto medido, sendo inserida uma correção de temperatura. Observou-se que a temperatura média nos sensores de material foi de 20,10 °C. Não ocorreram diferenças significativas entre os sensores de material.

Foram realizados vinte e cinco ciclos em sequência, com um tempo de ciclo de aproximadamente oito minutos.

Para o terceiro experimento integrado, foram realizadas as etapas de alinhamento descritas na figura 46.

Figura 46 - Etapas de alinhamento no terceiro experimento

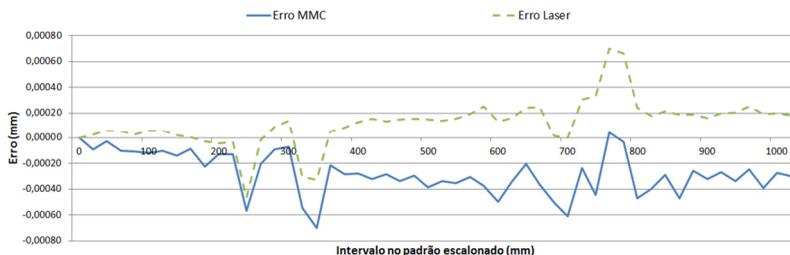


Fonte: autor

Em relação ao segundo experimento, foi melhorado o alinhamento mecânico do padrão escalonado em relação ao eixo geométrico da MMC (eixo Y) e ao desempenho do equipamento, ao limite mecânico de 0,008 mm / 1000 mm, nos planos X/Y e Y/Z. Foi realizada uma correção no diâmetro do apalpador, na dimensão de referência 20 mm. O erro de apalpação bidirecional está presente nos

resultados da MMC, conforme é possível visualizar no gráfico 16, uma vez que a correção foi aplicada às leituras do LaserTracer.

Gráfico 16 - Resultados terceiro experimento - Padrão Escalonado



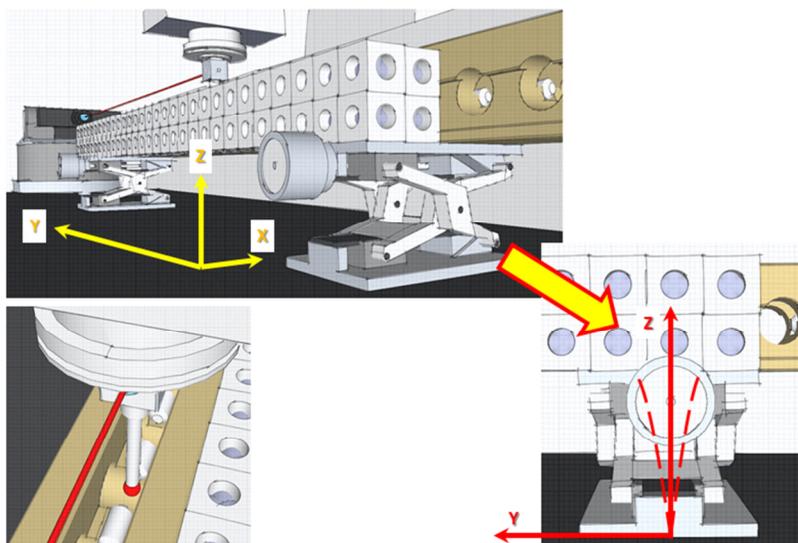
Fonte: autor

Investigando-se as causas do resíduo do erro de apalpação bidirecional, concluiu-se que a causa provável é a rigidez da fixação do padrão escalonado.

Por ação da força de medição, o apalpador toca na superfície de medição e provoca deslocamento do conjunto. A rigidez insuficiente é atribuída aos calços niveladores, uma vez que seu mecanismo apresenta muitas partes móveis, conforme pode ser visualizado na figura 47 (superior).

Embora o peso da estrutura apoiada seja considerável e colabore com a fixação, ao nível submicrométrico, em que se observam os resultados, pequenas influências tais como as decorrentes da flexão da base de apoio podem tornar-se significativas.

Figura 47 - Detalhe dos calços niveladores e da influência da força de medição



Fonte: autor

O efeito de flexão é percebido de forma errônea como flexão da haste do apalpador, quando, na realidade, o erro é uma histerese causada pela flexão do dispositivo de apoio. Realizando-se a correção do diâmetro do apalpador em um bloco de referência, associado a uma fixação independente da utilizada para o padrão escalonado, é possível validar esta hipótese.

A flexão ocorre de forma mais significativa no plano Y/Z (figura 47, inferior direito), que, por sua vez, impacta de forma direta nos resultados.

No gráfico 16, observam-se três resultados bastante atípicos, nos intervalos de 240 mm, 320 mm, 340 mm, 760 mm e 780 mm, possivelmente remoção de material das faces de contato ou deslocamento do bloco em relação ao corpo do padrão escalonado.

A calibração vigente data de fevereiro de 2009. Nesse sentido, recomenda-se fortemente a recalibração do padrão.

## **5.4 Estimativa de incerteza de medição**

Neste tópico, são detalhadas as fontes de incerteza de medição e suas contribuições ao sistema de medição. É apresentado o modelo matemático do processo de medição, restrito a condições técnicas envolvidas no processo de calibração de padrões lineares de grande porte.

### **5.4.1 Modelo matemático do processo de medição**

A incerteza de medição é o mais robusto indicador da qualidade das medições, pois se propõe a considerar todas as potenciais fontes significativas de erro de medição, incluindo a incerteza de calibração dos padrões e/ou instrumentos e os efeitos de longo prazo, difíceis de quantificar em experimentos breves <sup>(3)</sup>. O Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM) <sup>(17)</sup> fornece orientações para a avaliação da incerteza de medição pelo método dos coeficientes de sensibilidade.

O modelo matemático da medição, que transforma o conjunto de observações repetidas no resultado de medição, é de importância crítica porque, além das observações, ele geralmente inclui várias grandezas de influência que são conhecidas de forma inexata. Essa falta de conhecimento contribui para a incerteza do resultado da medição, assim como também contribuem as variações das observações repetidas e qualquer incerteza associada ao próprio modelo matemático <sup>(17)</sup>.

O resultado da medição de uma medida linear de comprimento, utilizando-se um *laser* interferométrico de rastreamento automático em

associação a uma máquina de medição por coordenadas, pode ser adaptado a partir do modelo proposto por Oliveira, 2003 <sup>(24)</sup> para a seguinte expressão:

$$L_f = \left( \frac{n_r}{n} \times L_i \times \frac{1}{1 + \alpha_p \cdot (T_p - T_r)} \right) + E_{cos} + E_{dap} + R_{LT} + E_a + E_{Tp} + E_{LT}$$

Onde:

$L_f$	comprimento final
$L_i$	comprimento indicado no LaserTracer
$n_r$	índice de refração do ar, nas condições de referência
$n$	índice de refração do ar, nas condições de medição
$\alpha_p$	coeficiente de expansão térmica linear do padrão a calibrar
$T_p$	temperatura do padrão a calibrar
$T_r$	temperatura de referência
$E_{cos}$	erro de alinhamento
$E_{dap}$	erro da correção do diâmetro do apalpador
$R_{LT}$	erro da resolução do LaserTracer
$E_a$	repetibilidade das leituras
$E_{Tp}$	erro do termômetro utilizado
$E_{LT}$	erro instrumental do LaserTracer

#### 5.4.2 Descrição das fontes de incerteza e quantificação

As contribuições da incerteza de medição são atribuídas aos fatores que influenciam na medição. A descrição das influências consideradas estão listadas a seguir:

- Correção inexata do índice de refração do ar (relacionado à  $L_i, n_r, n$ ).

Com base no artigo “Método Comparativo de Calibração de Sistema por Interferometria a *Laser* para Medição Linear” <sup>(4)</sup>, para a determinação da parcela de incerteza decorrente da correção inexata do índice de refração do ar foi elaborado um balanço de incertezas parcial, considerando-se a indisponibilidade de leitura direta das variáveis do sistema de monitoramento das condições ambientais.

O balanço parcial apresentado na tabela 5 foi elaborado considerando-se as incertezas de medição apresentadas nos certificados de calibração do termômetro, do barômetro e do medidor de umidade relativa do ar.

- Correção do comprimento do padrão a calibrar por influência de variação de temperatura (relacionado a  $\alpha_p, T_p, T_r, E_{Tp}$ ).

Considerou-se a incerteza de calibração dos termômetros de contato, a distribuição é normal, tipo B, com número de graus de liberdade significativamente grande. Esta componente foi considerada somente na parcela variável, na composição do balanço de incertezas.

De modo similar, foi considerada a incerteza do coeficiente de expansão térmica do padrão a calibrar, que de acordo com o fabricante é da ordem de 10% do valor do coeficiente, no caso, aço com  $\alpha = 11,5 \times$

$10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Aqui, a distribuição é uniforme, com divisor igual a raiz de 3 e número de graus de liberdade significativamente grande.

- Erro de cosseno ( $E_{cos}$ ).

Para estimar a contribuição da incerteza referente ao erro de cosseno, pode-se assumir que o valor do *offset* está entre 0 e certo valor  $R_{max}$ , limite da região de incerteza de posicionamento do centro da esfera.

O maior valor possível do erro de cosseno acontece na posição  $LP_{max}$ , quando  $r = R_{max}$ :

$$E_{cos}(LP_{max}, R_{max}) = \sqrt{(LP_{max} + d)^2 + R_{max}^2} - \sqrt{d^2 + R_{max}^2} - LP_{max}$$

Onde,

$LP_{max}$  valor nominal do comprimento do padrão

$R_{max}$  limite da região de incerteza de posicionamento do centro da esfera

$d$  posição com referência ao LaserTracer

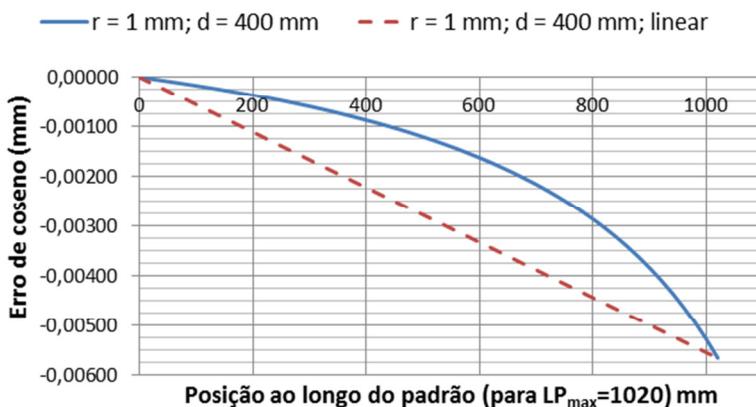
$r$  valor do *offset*

Assume-se uma aproximação linear conservadora do valor máximo do erro de cosseno ao longo do comprimento do padrão, para cada comprimento  $LP_i$ :

$$E_{cos}(LP_i, R_{max}) = E_{cos}(LP_{max}, R_{max}) \cdot \frac{LP_i}{LP_{max}}$$

De forma gráfica, é possível acompanhar o comportamento do erro de cosseno, de acordo com o gráfico 17.

Gráfico 17 - Contribuição do erro de cosseno



Fonte: autor

A distribuição dos valores possíveis do erro de cosseno pode ser assumida uniforme ou retangular, com limite inferior definido pela equação acima e limite superior igual a zero.

A contribuição à incerteza do erro de alinhamento do LaserTracer está composta apenas por uma parcela variável:

$$u_{\text{alinhamento}}(LP_i) = \frac{\left| \sqrt{(LP_{\max} + d)^2 + R_{\max}^2} - \sqrt{d^2 + R_{\max}^2} - LP_{\max} \right|}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{LP_i}{LP_{\max}}$$

Como a distribuição dos valores possíveis do erro de cosseno é apenas negativa, torna-se necessário acrescentar uma correção (positiva) ao valor calibrado de cada comprimento do padrão:

$$Corr(LP_i) = -\frac{E_{cos}(LP_i, R_{max})}{2}$$

Se considerado o limite do alinhamento mecânico no terceiro experimento, de  $R_{max} = 0,008$  mm no plano X/Y, a parcela correspondente ao erro de cosseno é desprezível.

- Erro da correção do diâmetro do apalpador ( $E_{dap}$ ).

Foi utilizado um bloco padrão de referência, calibrado, para correção do erro de apalpação bidirecional. Desta forma, considerou-se o valor calibrado como componente do tipo B, de distribuição normal, com divisor igual a dois e número de graus de liberdade significativamente grande.

Considerou-se também a repetibilidade do sistema de medição sobre o bloco padrão de referência e, neste caso, a distribuição é normal, tipo A, com divisor igual a dois e número de graus de liberdade igual a nove.

- Erro da resolução do LaserTracer ( $R_{LT}$ ).

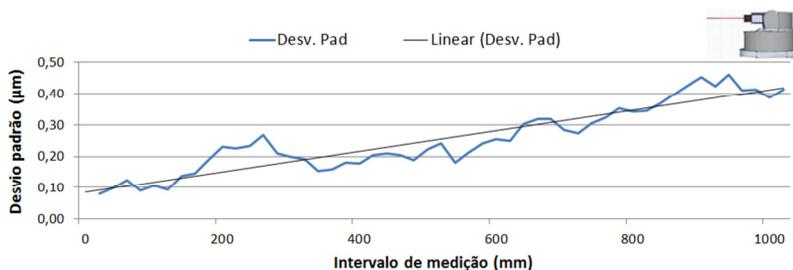
A distribuição é uniforme e a parcela referente à resolução do LaserTracer foi considerada do tipo B, com divisor igual à raiz de doze. Os graus de liberdade são significativamente grandes. Embora esta contribuição seja praticamente desprezível, ela foi considerada na parcela fixa do balanço de incertezas.

- Repetibilidade das leituras ( $E_a$ ).

A parcela referente à repetibilidade das leituras foi caracterizada por uma componente fixa e uma variável, em função do comprimento. A distribuição é normal, do tipo A, com divisor igual a dois.

Pela análise dos resultados de medição, observou-se que o desvio padrão é variável em função do comprimento medido, apresentando comportamento linear, conforme visualizado no gráfico 18.

Gráfico 18 - Desvio padrão do LaserTracer em função do comprimento



Fonte: autor

Na medida em que a posição do espelho móvel está mais distante da unidade emissora, observa-se menor desvio padrão nas leituras. Atribui-se a este comportamento a contribuição mais significativa do *encoder* vertical na manutenção da posição. Desta forma, a parcela fixa considerada foi de  $0,1 \mu\text{m}$  e a parcela variável de  $(0,4 \times L) \mu\text{m}$ .

O número total de medições do terceiro experimento foi de 25, entretanto, simulando a condição futura de calibração de padrões de grande porte, foram utilizados os dados de apenas 10 ciclos de medição.

Para composição do balanço de incerteza, o número de graus de liberdade foi combinado, considerando-se que foi utilizada a média dos desvios padrão.

- Erro instrumental do LaserTracer ( $E_{LT}$ ).

A especificação de catálogo fornecida pelo fabricante para o erro máximo de indicação ( $U_{3D}$ ) é determinada pela equação:

$$U_{3D(L)} = 0,2 \mu\text{m} + 0,3 \mu\text{m/m}$$

A informação para a condição de operação do sistema LaserTracer em 1D não está disponível, uma vez que a condição de aplicação adotada nessa proposta não é usual. Com base no artigo *“Accuracy Enhancement of a Co-Ordinate Measuring Machine By Flexible Integration of a Precision Tracking”*<sup>(16)</sup>, foi assumida a incerteza:

$$U_{1D(L)} = (0,1 + 3 \cdot 10^{-7} \times L) \mu\text{m} \text{ sendo } L \text{ em } \mu\text{m}$$

Desta forma, para composição do balanço de incertezas, a parcela fixa considerada foi de  $0,1 \mu\text{m}$  e a parcela variável de  $(3 \cdot 10^{-7} \times L) \mu\text{m}$ .

A distribuição é normal e a parcela referente à incerteza instrumental do LaserTracer foi considerada do tipo B, com divisor igual a dois. O número de graus de liberdade é significativamente grande.

#### **5.4.3 Balanço de incertezas**

A partir do modelo matemático, elaboraram-se os balanços de incertezas para o processo de calibração de padrão escalonado (tabela 4) e para o índice de refração do ar (tabela 5).



Tabela 5 - Balanço de incertezas para o índice de refração do ar

incerteza do índice de refração do ar	tipo	leitura	estimativa	unid.	distribuição	divisor	incerteza	deriv. (cte)	deriv. (linear)	incerteza	n	n (linear)	v
temperatura do ar (U do certificado)	B	20	0,05	°C	normal	2,00	2,50E-02		1,86E-01	4,65E-03		4,65E-03	1,00E+09
pressão atmosférica (U do certificado)	B	101325	50	Pa	normal	2,00	2,50E+01		-5,37E-04	-1,34E-02		-1,34E-02	1,00E+09
umidade relativa do ar (U do certificado)	B	1150	0,8	% ur	normal	2,00	4,00E-01		1,67E-03	6,68E-04		6,68E-04	1,00E+09
comprimento de onda (do certificado)	B	633E-09	1,20E-11	mm	normal	2,00	6,00E-12		1,00E-06	6,00E-06		6,00E-06	1,00E+09
Formula de Edlen	B		1,00E-08	mm	normal	2,00	5,00E-09		1,00E+00	5,00E-09		5,00E-09	1,00E+09
incerteza combinada							k	u <sub>c</sub>	1,42E-02	v <sub>eff</sub>			
incerteza expandida							2,00	U	2,85E-02	1,24E+09			
													valores em µm

Fonte: autor

De acordo com a equação, a estimativa para a incerteza de medição fica:

$$U = 0,3 + (0,7 \times L) \mu m \quad \text{sendo } L \text{ o comprimento em metros}$$

É importante salientar que os valores de incerteza de medição final são válidos para um alcance restrito em termos de condições e técnica.

## 5.5 Comparação entre métodos por substituição e proposto

No contexto do Laboratório de Metrologia Dimensional da Fundação CERTI, em relação ao método atualmente acreditado junto a CGCRE, destaca-se, com a aplicação da nova metodologia, a melhoria significativa da CMC para padrões escalonados e blocos padrão, no intervalo acima de 100 mm até 1000 mm.

As capacidades de medição e calibração atuais, restritas ao foco deste trabalho, são apresentadas na figura 48.

Figura 48 – Consulta ao escopo acreditado Fundação CERTI em Janeiro/2014

Descrição do serviço	Faixa	Capacidade de Medição e Calibração (CMC)
PADRÕES DE COMPRIMENTO		
Blocos Padrão	...	
	>100 mm até 500 mm	0,6 $\mu m$
Padrão Escalonado	Até 500 mm	0,9 $\mu m$
	>500 mm até 1000 mm	1,3 $\mu m$

Fonte: <<http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc/consulta.asp>>

Encontra-se em elaboração a proposta para alteração de escopo acreditado junto a CGCRE, a qual apresentará as novas CMC para

blocos padrão e padrões escalonados. A atualização do escopo estará sujeita a validação pelo avaliador técnico da CGCRE.

Para blocos padrão acima de 100 mm, propõe-se a ampliação de escopo da faixa atual, de até 500 mm de comprimento, para até 1000 mm de comprimento. No contexto da RBC, a nova CMC de padrões escalonados posiciona o laboratório de metrologia dimensional da Fundação CERTI como o laboratório de melhor CMC no mercado industrial e laboratorial brasileiro.

O critério adotado para comparação dos resultados da proposta de associação entre a MMC e o LaserTracer *versus* método acreditado (por substituição) foi o do erro normalizado ( $E_n$ ), descrito na equação a seguir:

$$E_n = \frac{R_{ref} - R_{pro}}{\sqrt{(U_{ref}^2 + U_{pro}^2)}}$$

Onde:

$R_{ref}$  resultado da referência

$R_{pro}$  resultado da proposta

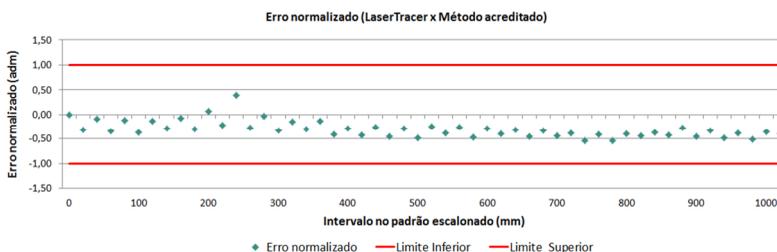
$U_{ref}$  incerteza da referência

$U_{pro}$  incerteza da proposta

Para caracterização de compatibilidade entre resultados, o valor do erro normalizado, calculado pela equação deve ser menor ou igual a um.

Desta forma, o gráfico 19 apresenta os resultados da calibração de um padrão escalonado de 1020 mm. Nesta avaliação, os resultados obtidos são comparados aos resultados de uma calibração pelo método da substituição, utilizando como referência um bloco padrão de 1000 mm de comprimento.

Gráfico 19 - Erro normalizado em relação ao método acreditado



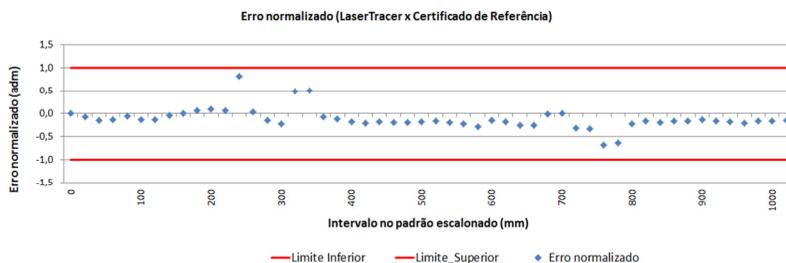
Fonte: autor

Os valores encontrados para o erro normalizado indicam que todos os resultados foram compatíveis, evidenciando que o método proposto é adequado.

## 5.6 Comparação dos resultados do método proposto com calibração de referência

Pelo critério do erro normalizado (gráfico 20) foi testada a compatibilidade de resultados entre o método proposto e a calibração de referência.

Gráfico 20 - Erro normalizado em relação ao certificado de referência



Fonte: autor

Apesar de evidenciados alguns pontos atípicos, os valores encontrados para o erro normalizado indicam que o método é adequado. Tais resultados atípicos já haviam sido reportados na seção 5.3.3. A estes valores atribuem-se prováveis danos ao padrão escalonado utilizado na validação dos resultados. Neste sentido, reforça-se a recomendação para a recalibração do padrão.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados experimentais apontam para a viabilidade na associação entre o sistema LaserTracer e a máquina de medição por coordenadas na tarefa de calibração de padrões de grande porte, com baixa incerteza de medição.

A integração de sistemas tecnicamente mais adequada é a que permite a possibilidade de executar um aplicativo externo de captura, dentro do *software* convencional de medição da máquina de medição por coordenadas, possibilitando a automação do processo.

A estabilidade térmica do ambiente de medição, bem como a proximidade com a temperatura de referência, é uma condição decisiva na busca por resultados confiáveis associadas a baixos níveis de incerteza de medição. Neste sentido, recomenda-se que as condições ambientais sejam monitoradas e que as medições sejam realizadas no período da madrugada, sem a presença do operador ou de quaisquer outras fontes de perturbação ao sistema.

É fundamental ao operador da máquina de medição por coordenadas conhecer os limites da compensação automática de temperatura, bem como as implicações sobre os resultados de medição.

Pelo fato de não ser possível a correção da deformação das superfícies de contato de modo satisfatório, é recomendada a declaração da força de medição no certificado de calibração de padrões de comprimento. Neste sentido, recomenda-se também que o bloco padrão, utilizado como referência à compensação do erro de apalpação

bidirecional, seja do mesmo material do padrão a calibrar (entenda-se da superfície de medição deste).

Em padrões escalonados, a declaração no certificado de calibração a respeito da estratégia de alinhamento tridimensional é uma condição fundamental para reprodução adequada dos resultados. Para blocos padrão de grande porte deve ser seguida a ISO 3650<sup>(18)</sup>.

Para a continuidade da pesquisa no tema, é necessário projetar e construir dois dispositivos mecânicos dedicados: um para facilitar o alinhamento do LaserTracer mantendo sua base apoiada sobre a mesa da MMC, de forma que seja possível girar todo o conjunto e deslocá-lo transversalmente; e o outro, aplicável ao padrão escalonado, que possibilite melhor ajuste de elevação e controle de giro (planos Z/Y e X/Y). Este dispositivo deve contemplar o apoio sobre os pontos de Bessel, com indexadores de posição para diferentes tipos de padrões escalonados.

Do ponto de vista prático, foi atingido o êxito na proposta de arranjo entre a MMC e o LaserTracer, inclusive em evitar a dedicação exclusiva da MMC à calibração de padrões de grande porte.

Contudo, o valor do investimento em um sistema de *laser* de rastreamento automático, bem como o custo de sua manutenção, é considerável e pode representar uma barreira para a adoção do método por instituições de pesquisa e laboratórios privados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (<sup>1</sup>) ACKO, B. **Calibration of Measuring Instruments on a Coordinate Measuring Machine**, APEM Journal, v. 2, p. 127–134, 2007.
- (<sup>2</sup>) ALBERTAZZI, A.1.; SOUSA, A.2; PEZZOTA, C.3. **Apostila Metrologia - Parte I**, UFSC, Florianópolis - SC ,2004.
- (<sup>3</sup>) ARENHART, F. A. **Planejamento e Melhoria de Processos de Medição de Forma por Scanning em Máquinas de Medir por Coordenadas**, Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis - SC, 2010.
- (<sup>4</sup>) BARROS, W. S.; MUNÔZ, G. S. **Método Comparativo de Calibração de Sistema por Interferometria a Laser para Medição Linear**, Metrologia, Recife - PE, 2003.
- (<sup>5</sup>) BIPM. **JCGM 200 : 2008 International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms ( VIM )** **Vocabulaire international de métrologie — Concepts fondamentaux et généraux et termes associés ( VIM )**, [2008]. Disponível em: < [http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_200\\_2008.pdf](http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2008.pdf)> acesso em 05 de julho de 2013.
- (<sup>6</sup>) BIPM. **BIPM - Calibration and Measurement Capabilities - CMCs - INMETRO**, [2013]. Disponível em: < [http://kcdb.bipm.org/appendixC/L/BR/L\\_BR.pdf](http://kcdb.bipm.org/appendixC/L/BR/L_BR.pdf)> acesso em 08 de novembro de 2013.
- (<sup>7</sup>) BOSCH, J. A. **Coordinate Measuring Machines and Systems**, CRC Press, New York - NY, First ed. 1995.

- (<sup>8</sup>) BUNDESANSTALT, P. **CCL-K5 CMM 1D : Step Gauge and Ball Bars Final Report**, [2009], Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/0026-1394/43/1A/04006>> acesso em 14 de junho de 2013.
- (<sup>9</sup>) CGCRE/INMETRO. **DOQ-CGCRE-004 - Orientação para a Realização de Calibrações no Grupo de Serviços de Calibração em Metrologia Dimensional**. [2010], Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/organismos/doc\\_organismos.asp?tOrganismo=CalibEnsaio](http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/organismos/doc_organismos.asp?tOrganismo=CalibEnsaio)> acesso em 14 de junho de 2013.
- (<sup>10</sup>) DAKKS - DEUTSCHE AKKREDITIERUNGSSTELLE GMBH, Disponível em: <[www.dakks.de](http://www.dakks.de)> acesso em 04 de julho de 2013.
- (<sup>11</sup>) DONATELLI, G. D. **Fundamentos da Metrologia Geométrica - Notas de Aula**, UFSC, Florianópolis - SC ,2013.
- (<sup>12</sup>) ETALON. **Volumetric Compensation of machine tools with HEIDENHAIN iTNC 530**, [2011], Disponível em: <[http://www.heidenhain.de/de\\_EN/php/documentation-information/documentation/brochures/popup/media/media/file/view/file-0467/file.pdf](http://www.heidenhain.de/de_EN/php/documentation-information/documentation/brochures/popup/media/media/file/view/file-0467/file.pdf)> acesso em 04 de julho de 2013.
- (<sup>13</sup>) FLACK, D. / N. **Measurement Good Practice Guide - No. 43 - CMM Probing**, p. 71, [2001], Disponível em: <[http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/mgpg43.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/mgpg43.pdf)> acesso em 02 de maio de 2013.
- (<sup>14</sup>) FLACK, D. / N.; JOHN, H. / N. **Fundamental Good Practice in Dimensional Metrology - No. 80**. [2005], Disponível em: <[http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/mgpg80.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/mgpg80.pdf)> acesso em 02 de maio de 2013.
- (<sup>15</sup>) HAMBURG-PIEKAR, D. S. **Calibração de Peças Padrão em Máquinas de Medir por Coordenadas**, Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis - SC, 2006.

(<sup>16</sup>) HÄRTIG, F.; KECK, C.; KNIEL, K.; et al. **Accuracy Enhancement of a Co-Ordinate Measuring Machine By Flexible Integration of a Precision Tracking**, [2011]. Disponível em: < [http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\\_5/5.3\\_koordinatenmesstechnik/texte/PTBAccuracyEnhancement.pdf](http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_5/5.3_koordinatenmesstechnik/texte/PTBAccuracyEnhancement.pdf) > acesso em 04 de julho de 2013.

(<sup>17</sup>) INMETRO. **GUM 2008 - Guia para a expressão de incerteza de medição**. [2008], Disponível em: < [http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/gum\\_final.pdf](http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/gum_final.pdf) > acesso em 19 de fevereiro de 2013.

(<sup>18</sup>) ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3650:1998 - Geometrical Product Specifications (GPS) - Length Standards - Gauge Blocks**, norma técnica, 1998.

(<sup>19</sup>) ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1:2002 - Geometrical Product Specifications (GPS) - Standard reference temperature for geometrical product specification and verification**, norma técnica, 2002.

(<sup>20</sup>) ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10360-2:2009 - Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions**, norma técnica, 2009.

(<sup>21</sup>) ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 230-1:2012 - Test code for machine tools -- Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions**, norma técnica, 2012.

(<sup>22</sup>) LINGARD, P. S.; PURSS, M. E.; SONA, C. M.; THWAITE, E. G. **Length-Bar and Step-Gauge Calibration Using a Laser Measurement System With a Coordinate Measuring Machine. CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 40, n. 1, p. 515–517, [1991]. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607620435>> acesso em 28 de março de 2013.

(<sup>23</sup>) MOORE, W. R. **Foundations of Mechanical Accuracy**. Bridgeport - Connecticut, 1970.

(<sup>24</sup>) OLIVEIRA, J. C. V. DE / I.; ALVES, J. A. P. / I.; QUELHAS, O. L. G. / L. **Controle da Qualidade de Padrões Escalonados Utilizados na Verificação de Máquinas de Medir por Coordenadas**. , p. 8, [2003]. Disponível em: <

<http://www.inmetro.gov.br/inovacao/artigos/docs/104.pdf>> acesso em 28 de março de 2013.

(<sup>25</sup>) OSAWA, S.; TAKATSUJI, T.; KUROSAWA, T. **Step-Gauge Calibration Using an Interferometric Coordinate Measuring Machine and the Uncertainty**. , p. 1911–1914, [2003]. Disponível em: < [http://www.researchgate.net/publication/228412048\\_STEP-GAUGE\\_CALIBRATION\\_USING\\_AN\\_INTERFEROMETRIC\\_COORDINATE\\_MEASURING\\_MACHINE\\_AND\\_THE\\_UNCERTAINTY/file/79e4150d8fae80e8da.pdf](http://www.researchgate.net/publication/228412048_STEP-GAUGE_CALIBRATION_USING_AN_INTERFEROMETRIC_COORDINATE_MEASURING_MACHINE_AND_THE_UNCERTAINTY/file/79e4150d8fae80e8da.pdf)> acesso em 20 de fevereiro de 2013.

(<sup>26</sup>) PFEIFER, T. **Production Metrology**, Oldenbourg, 2002.

(<sup>27</sup>) SCHÜSSLER, H. H. **A Biaxial Laser Interferometer for Absolute Calibration of Bidirection Step Gauges and Gauge Blocks**, PTB, Braunschweig - Germany, 1982.

(<sup>28</sup>) SCHWENKE, H.; KNAPP, W.; WECKENMANN, A. **LaserTRACER – Highest Measuring Accuracy for Machine Tool Error Compensation. CIRP Annals - Manufacturing Technology**, p. 1–7, 2008.

(<sup>29</sup>) STOUP, J. **Measuring Step Gauges Using the NIST M48 CMM.**, p. 5, [2010]. Disponível em: <[http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub\\_id=907992](http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub_id=907992)> acesso em 04 de junho de 2013.

(<sup>30</sup>) THALMANN, R. **A New High Precision Length Measuring Machine.**, p. 4, [1997]. Disponível em: <<http://www.metas.ch/metasweb/Fachbereiche/Laenge/Dokumente/1997%20LMM5%20Congr%C3%A8s%20M%C3%A9trologie.pdf>> acesso em 04 de junho de 2013.

(<sup>31</sup>) VDI/VDE. **VDI-VDE 2627 - Blatt 1 - Measuring rooms - Classification and characteristics**, norma técnica, 1998.

(<sup>32</sup>) ZEISS, C. **Calibration Certificate no° CZ1/462727**, Oberkochen - Germany, 2013

(<sup>33</sup>) ZHANG, G. X. **A Study The Abbe Principle and Abbe Error**, [1989]. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607627607>> acesso em 28 de março de 2013.