

3

Sistema de Referência para Calibração do Sistema Laser

3.1

Considerações Gerais

A calibração de um sistema laser de medição é relativamente difícil, pois os comprimentos de onda dos lasers e o sistema de medição são influenciados por variações nas condições ambientais e por um grande número de componentes ópticos e eletrônicos, cada qual contribuindo para aumentar os erros de medição do sistema-objeto (sistema laser de medição a calibrar).

O sistema laser de medição deve ser periodicamente calibrado quando é utilizado como referência na calibração de máquinas-ferramenta e de máquinas de medição por coordenadas e como padrão de metrologia dimensional. Quando os erros detectados na calibração do sistema-objeto, pelo método comparativo proposto nesta dissertação, forem inadmissíveis (acima de 3 μm para um comprimento de 2000 mm), os componentes individuais (sensores de monitoramento das condições ambientais e da temperatura do objeto a calibrar e fonte laser) do sistema-objeto devem ser calibrados separadamente. Neste caso é recomendado que se calibre primeiramente os sensores de monitoramento das condições ambientais e da temperatura do objeto a calibrar, pois os erros destes sensores dependem do comprimento, constituindo a maior fonte de erro do sistema-objeto.

O procedimento apresentado na dissertação é aplicado para comparar dois sistemas lasers do tipo He-Ne de mesma classe, ou seja, de potências semelhantes. Os dois sistemas lasers utilizados neste trabalho são da classe II (segundo manual do fabricante), com cerca de 1mW de potência e diâmetro do feixe de aproximadamente 6 mm, que são características típicas de um sistema laser de medição comercial. O sistema de medição de referência foi idealizado a partir dos equipamentos, acessórios e infra-estrutura do laboratório disponíveis.

Um ponto muito importante para realização do procedimento de comparação de lasers é a escolha adequada do arranjo de medição, conforme será discutido a seguir.

3.2

Tipos de Arranjos de Medição

Existem diversos tipos de arranjos de medição que podem ser utilizados para a comparação de lasers, alguns deles recomendados pelas normas VDI Berichte 749 [11] e 750 [12] e outros recomendados em publicações especializadas [17], sendo que os mais comumente utilizados nos institutos de pesquisa de metrologia são apresentados a seguir.

3.2.1

Deslocamento dos Feixes de Laser em Sentidos Opostos

O arranjo proposto por Dutschke [13] como ilustrado na figura 3.1, mostra que os lasers que serão comparados são posicionados de tal forma que os trajetos percorridos por cada um dos feixes incidem nos respectivos prismas triplos de medição 2 e 2', que são montados em um único dispositivo de deslocamento. Quando o dispositivo é deslocado, as indicações dos lasers mudam em sentidos opostos. Se ambos os lasers são configurados para medir deslocamentos positivos quando o prisma de medição se desloca em relação ao divisor de feixe, a soma das duas leituras de deslocamento deveria permanecer constante, se não houvesse erros de medição, e, portanto, o aumento do comprimento medido pelo sistema-referência deveria ser igual à diminuição do comprimento medido pelo sistema-objeto.

Já que as figuras 3.1 a 3.7 utilizam os mesmos componentes, suas legendas são comuns a todas elas, como mostrado a seguir:

Sistema-referência:

- 1 - divisor de feixe;
- 2 - prisma triplo de referência;
- 3 - prisma triplo de medição;
- 4 - dispositivo de deslocamento.

Sistema-objeto:

- 1' - divisor de feixe;
- 2' - prisma triplo de referência;
- 3' - prisma triplo de medição;

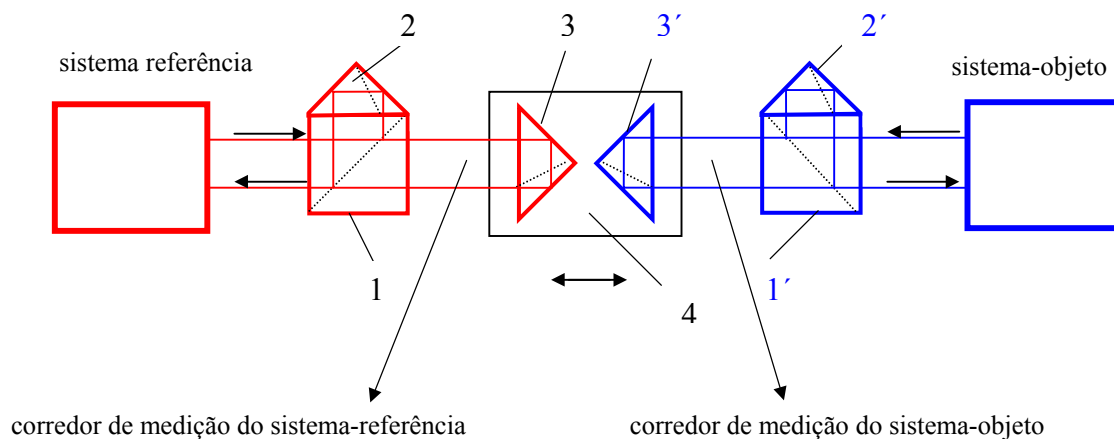


Figura 3.1 – Vista superior do arranjo de acordo com [13].

A vantagem desse arranjo de medição é que todos os acessórios originais são utilizados durante a comparação e os lasers podem ser comparados entre si de um modo mais simples. Segundo Stone [14], a desvantagem é que os trajetos dos feixes de medição a serem comparados não estão no mesmo corredor de medição. Além disso, os erros de abbe (veja figura 3.2) não podem ser eliminados.

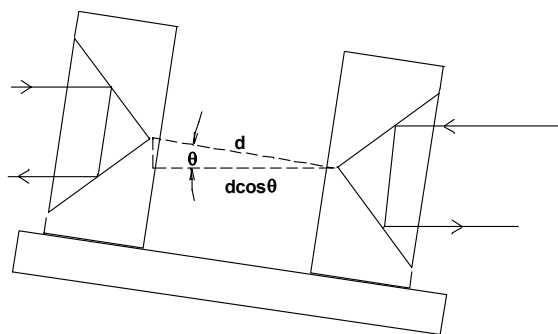


Figura 3.2 – Representação do erro abbe

O erro abbe pode ser compreendido através da figura 3.2, que mostra dois prismas de medição montados para calibração por comparação. Nesta montagem dos prismas existe uma pequena distância d entre as extremidades deles e uma inclinação de um ângulo θ relativo aos feixes dos lasers, supondo-se que estes estejam perfeitamente alinhados. O parâmetro importante para essa medição é a distância $d\cos\theta$ que é a projeção da separação das extremidades ao longo da

direção dos feixes dos lasers. O erro abbe, que influencia na soma das duas leituras dos sistemas laseres, pode ser determinado quando o ângulo θ varia de uma quantidade $\Delta\theta$, assim o resultado da variação em $d\cos\theta$ é $d\sin\theta\Delta\theta$.

3.2.2

Deslocamento dos Feixes do Laser no Mesmo Sentido

No arranjo desenvolvido por Schüssler [15], ambos os feixes de medição dos lasers percorrem o mesmo trajeto no mesmo corredor de medição. Como resultado, ambos os comprimentos de deslocamento estão sujeitos a condições ambientais quase que idênticas.

Em princípio, este tipo de arranjo de medição permite comparar de dois a oito lasers. É uma característica particular deste arranjo que só os acessórios ópticos de um único sistema laser, normalmente os do sistema-referência, são utilizados.

Neste caso, os dois feixes têm um centro em comum com o prisma triplo de medição, fazendo com que o erro de abbe seja eliminado. Outras vantagens são que o circuito de medição (caminho geométrico que os feixes percorrem) é pequeno e o corredor de medição é comum a todos os feixes de medição. Esse método tende a minimizar as influências ambientais externas porque os dois feixes dos lasers percorrem os mesmos elementos ópticos e quase o mesmo caminho geométrico no ar.

Esse arranjo de medição tem a desvantagem de não utilizar todos os acessórios ópticos originais do sistema-objeto. Além disso, segundo Stone [14], o método não se aplica a todos os sistemas laseres do mercado, já que existem alguns sistemas laseres comerciais que possuem o divisor de feixe e o refletor de referência internos.

O arranjo de medição proposto por Schellekens [16], como ilustrado na figura 3.3, também usa um único prisma triplo de medição (item 3 da figura) para ambos os lasers e minimiza o erro de abbe. A diferença para o arranjo descrito anteriormente é que todos os acessórios ópticos do sistema-objeto são utilizados, com a exceção do prisma triplo de medição.

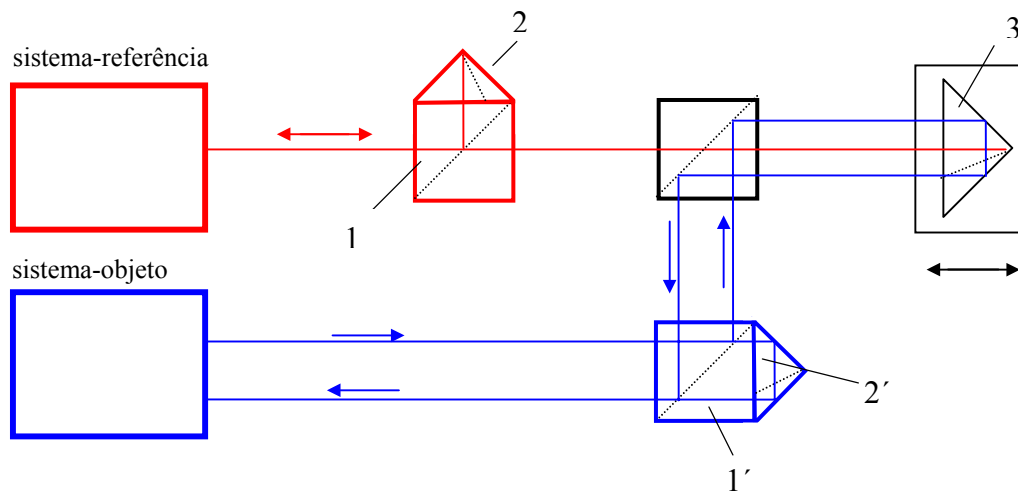


Figura 3.3 - Arranjo medição de acordo com [15].

3.2.3

Simétrico com Prisma Triplo Especial

Neste tipo de arranjo de medição, desenvolvido por Sparrer [17], os feixes de medição 1.1 e 1'.1, conforme a figura 3.5, do sistema-referência e do sistema-objeto seguem paralelos e incidem no prisma triplo de medição especial, localizado no dispositivo de deslocamento. O prisma triplo tem dimensões maiores se comparado aos outros prismas triplos e não faz parte de qualquer dos sistemas lasers de medição. No prisma triplo especial, os feixes 1.1 e 1'.1 são refletidos em direções cruzadas e os feixes 1.2 e 1'.2 são refletidos sobre os respectivos prismas triplos de medição 3 ou 3'. Os feixes resultantes, 1.3 e 1'.3, retornam para prisma triplo de medição especial, nos respectivos divisores de feixe 1 ou 1', como feixe 1.4 ou 1'.4. Esse tipo de arranjo de medição é o utilizado pelo Instituto de Metrologia Alemão PTB.

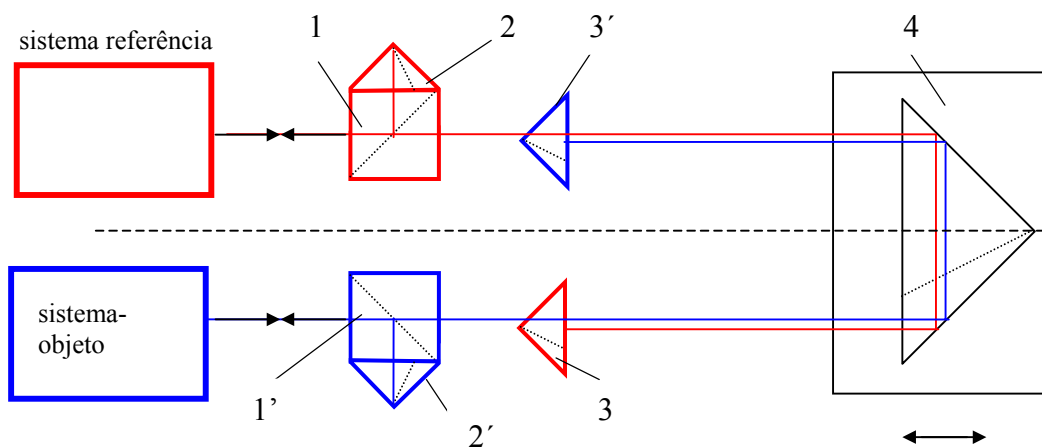


Figura 3.4 – Arranjo simétrico de acordo com [17] vista superior.

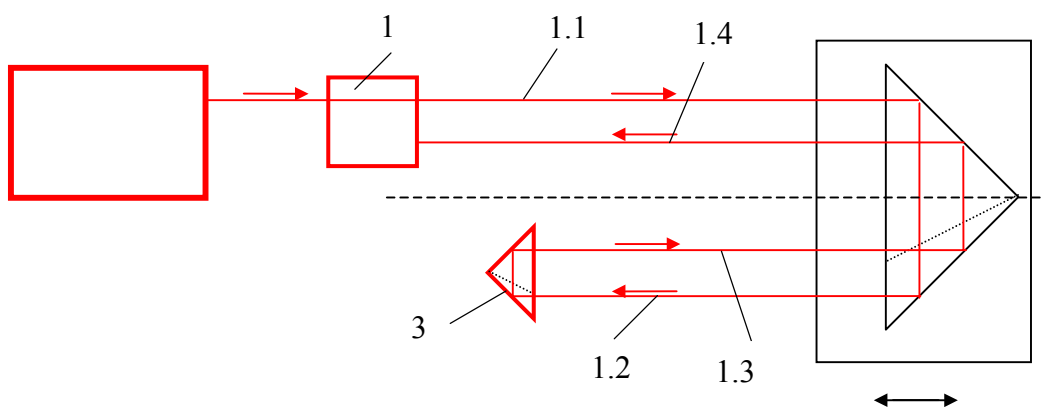


Figura 3.5 – Arranjo simétrico de acordo com [17] vista lateral.

Os deslocamentos são gerados pelo dispositivo de medição e os feixes deslocados pelo prisma especial, comum aos dois sistemas lasers. Nesse arranjo há um centro comum aos eixos de medição dos lasers, o que, a princípio, elimina o erro de abbe.

Outras vantagens nesse tipo de arranjo são que todos os acessórios ópticos originais do sistema-objeto são utilizados e que os feixes de medição dos dois lasers incidem em áreas separadas do mesmo prisma triplo especial, embora no mesmo “corredor de medição”, o que evitaria qualquer interferência entre os feixes incidentes.

Segundo Stone [14], as desvantagens desse arranjo são: o acessório utilizado, que é o prisma triplo especial, não faz parte do sistema original; a

calibração de sistemas lasers baseados em diodo apresenta certa dificuldade; e, ainda, o arranjo não permite calibrar lasers em pequenas faixas de medição.

É importante assegurar que o prisma especial de medição não tenha imperfeições construtivas, pois estas podem prejudicar o desempenho das reflexões causando erros cumulativos, visto que neste processo há seis reflexões das superfícies do prisma especial (conforme figuras 3.6 e 3.7).

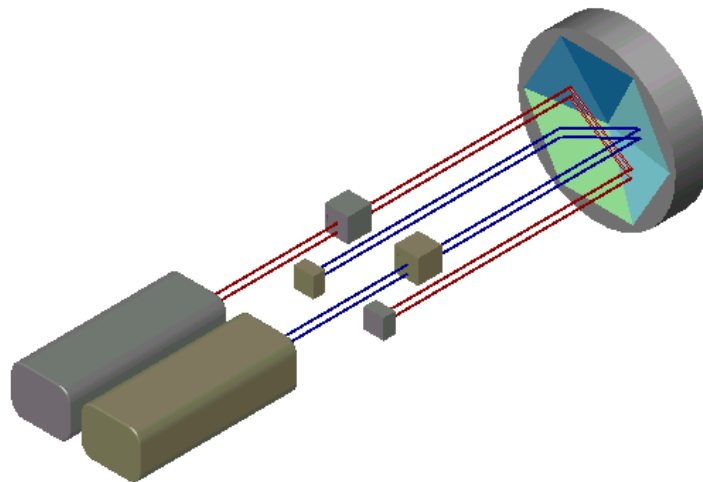


Figura 3.6 – Arranjo simétrico de acordo com [17].

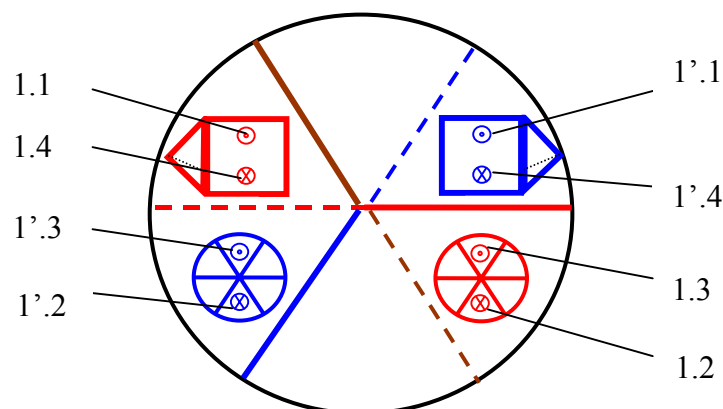


Figura 3.7 - Vista frontal do prisma triplo de medição especial.

3.2.4

Critério para a Escolha do Arranjo de Medição

Para cada um dos arranjos de medição na comparação de lasers existem diferentes vantagens e desvantagens. Nenhum dos arranjos possíveis contém todas as condições favoráveis à eliminação de erros: ou o princípio da comparação não é obedecido (erro abbe), ou o sistema-objeto a ser comparado é disposto de forma que o trajeto de medição seja muito grande, ou os feixes de medição não percorrem o mesmo corredor de medição, ou a comparação é feita sem todos os acessórios ópticos originais dos lasers, ou os caminhos dos feixes dos lasers são sujeitos às imperfeições dos componentes ópticos.

Em 1993, Sparrer [18] formulou critérios metrológicos e de construção que devem ser satisfeitos para obter arranjos ideais de medição para a calibração de lasers por comparação, pois o próprio arranjo de medição não deve dar lugar a erros de medição consideráveis. As principais recomendações são:

1. utilizar os acessórios ópticos originais dos lasers envolvidos na comparação;
2. fazer coincidir os eixos de medição dos lasers em relação ao sistema óptico, para assim evitar o erro de abbe;
3. reduzir o circuito de medição, para que as influências da temperatura do objeto a calibrar sejam iguais;
4. utilizar o mesmo “corredor de medição”, para que a influência dos parâmetros ambientais nos feixes de medição dos sistemas lasers envolvidos na comparação sejam iguais;
5. fazer com que os feixes de medição fiquem próximos ao eixo de deslocamento;
6. fazer com que o comprimento "morto" do trajeto do feixe do laser seja o menor possível;
7. fazer com que a influência devida aos trajetos dos feixes dos lasers, como resultado da mútua superposição dos feixes ou devido a componentes ópticos, seja mínima;
8. fazer com que o arranjo permita calibrar pequenas faixa de medição.

A Tabela 1 ilustra uma comparação dos arranjos de medição citados neste trabalho com base nestas recomendações.

Tabela 1 – Critérios para escolha do arranjo de medição

Arranjo de acordo com	Condições Recomendadas							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Dutschke [13] figura 3.1	x						x	x
Schüssler [15] figura 3.8		x	x	x	x	x		(x)
Schellekens [16] figura 3.3	(x)	x	(x)	(x)	(x)	(x)		
Sparrer [17] figura 3.4	x	x	x	x	x	x	x	

x – *atende plenamente*

(x) – *atende parcialmente*

Segundo esses critérios, o arranjo simétrico de acordo com Sparrer [17] é o que mais se aproxima do arranjo ideal atendendo 7 dos 8 critérios estabelecidos. Contudo, o Lamin não possui o prisma especial mencionado, o que faz com que o arranjo do PTB não possa ser reproduzido. O segundo arranjo que mais se aproxima do recomendado proposto por Schüssler [15], pois, apesar das desvantagens, elas são minimizadas quando da comparação de sistemas laser de medição semelhantes, que supostamente possuem partes ópticas de alta qualidade. Segundo Stone [14], com este método podem ser obtidos resultados de medição muito exatos. Portanto, o arranjo desenvolvido por Schüssler foi o selecionado para implantação da calibração de sistemas lasers por comparação, objeto do presente trabalho, cujo processo é descrito a seguir.

3.3

Descrição do Processo de Calibração

Neste procedimento a comparação entre os lasers é realizada variando-se os comprimentos de medição simultaneamente no mesmo sentido, usando-se uma bancada de medição com deslocamento retilíneo. Os eixos de medição do sistema-objeto e do sistema-referência (sistema laser de referência) devem ser suficientemente coincidentes e paralelos ao sentido do movimento do dispositivo de deslocamento, para assim eliminar o erro conhecido como erro abbe e erro coseno, que são devidos ao não alinhamento do eixo de medição do padrão ao eixo de medição do objeto a medir. A faixa de medição avaliada foi de 2000 mm,

devido a limitações da bancada de medição, porém esta é suficiente para a maioria das aplicações dos lasers. As medições foram realizadas com incrementos de 200 mm.

Os incrementos (frações de comprimentos de onda) medidos pelos sistemas lasers são indicações dos comprimentos calculados e corrigidos que são registradas simultaneamente em um intervalo de tempo. No caso do sistema-referência os cálculos das correções para todas as fontes de erro são realizados através de software desenvolvido pelo próprio Laboratório de Metrologia Dimensional.

Foram realizadas quatro séries de medição, contendo cada uma três ciclos, totalizando 12 medições, tendo sido estas realizadas em dias diferentes com o objetivo de se avaliar as condições de reprodutibilidade e repetitividade.

Os caminhos geométricos percorridos por cada feixe dos lasers, de referência e sistema-objeto, são mostrados na figura 3.8, que ilustra o arranjo de medição escolhido nesta dissertação, segundo critérios de recomendação descritos em 3.2.4.

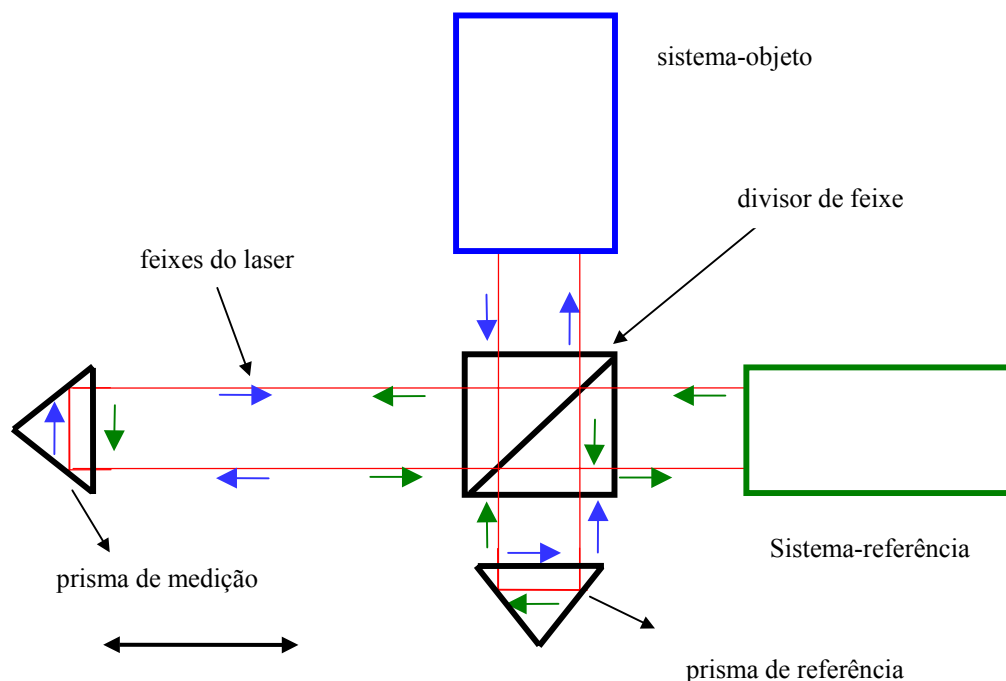


Figura 3.8 – Caminho geométrico percorrido pelos feixes dos lasers

3.3.1

Condições Ambientais da Calibração

Para garantir que as condições ambientais para os comprimentos dos sistemas lasers fossem as mesmas, o corredor de medição, ou seja, onde os feixes dos lasers são comparados, foi isolado através de uma cobertura, em forma da caixa, que teve o objetivo de amortecer as variações de temperatura do ambiente e minimizar os efeitos de turbulência do ar.

Os parâmetros ambientais como temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade relativa do ar e a temperatura do objeto a calibrar, para o caso do sistema-objeto, foram registradas pelos seus próprios sensores de monitoramento. Para o sistema-referência foram utilizados sensores externos ao sistema, como os descritos em 3.3.3, com exatidão superior aos do próprio sistema.

A condição para que a calibração seja possível é que as influências ambientais e a temperatura do objeto a calibrar sejam suficientemente estáveis em função do tempo, ou seja, as variações devem ser tão pequenas quanto possível durante a série de medições, para que assim possam ser determinadas e compensadas com exatidão suficiente.

As medições foram realizadas no intervalo de 20 °C a 23 °C, com objetivo de reproduzir as condições ambientais em que os sistemas lasers são submetidos normalmente e avaliar o comportamento do sistema de compensação das condições ambientais e da temperatura do objeto a calibrar em temperaturas diferentes da temperatura de referência de 20 °C, ISO 1 [22].

Uma vez que os sistemas lasers possuem sensores de temperatura para colocação na superfície do objeto a ser calibrado ou a ter seu comprimento determinado, esses sensores devem, forçosamente, estar acoplados à superfície de algum material durante a comparação dos dois sistemas mesmo que, a rigor, nenhum objeto esteja sob medição.

Como material para contato dos sensores foi utilizado um único bloco-padrão, que simulou um objeto sendo calibrado pelos dois sistemas lasers. O objetivo foi comparar a leitura dos sensores, submetidos a condições idênticas de temperatura, durante o procedimento de comparação dos sistemas lasers em si.

3.3.2

Posição dos Sensores Ambientais e do Material

A localização dos vários sensores do sistema laser é muito importante. Os sensores de temperatura do ar e o sensor de umidade devem ser posicionados tão próximos quanto possíveis do percurso de medição, de forma que eles monitorem as condições ambientais às quais os feixes de laser estão submetidos. Considerando que a pressão atmosférica varia lentamente e que seu valor no volume de calibração seja uniforme, o sensor de pressão atmosférica pode ser localizado onde for mais conveniente. No caso do sistema-objeto desta dissertação, o sensor de pressão é parte de um sistema de sensores que inclui sensores de umidade e temperatura do ar.

Na utilização rotineira de um sistema laser de medição, a posição do sensor de temperatura do objeto a calibrar ou medir é mais crítica, uma vez que o coeficiente de dilatação do material é um dos parâmetros utilizados na correção dos resultados. Em objetos que tenham comprimentos acima de 1000 mm é necessário assegurar que a temperatura monitorada seja representativa do comprimento total percorrido pelo feixe de luz, demandando muitas vezes a utilização de mais de um sensor para, assim, se poder calcular a temperatura média do objeto. No caso desta dissertação, o sistema-objeto tem somente um sensor de temperatura do objeto a calibrar.

Os sensores do sistema-referência foram colocados bem próximos aos sensores do sistema-objeto para que as condições ambientais de temperatura do ar e temperatura do objeto (material), captadas pelos sensores, fossem as mais próximas possível.

3.3.3

Equipamentos e Acessórios Utilizados

Para a realização da comparação dos lasers foram utilizados equipamentos e acessórios diversos, sendo alguns especialmente construídos pela oficina mecânica (Ofmec) do Inmetro. A seguir são apresentados todos os equipamentos e acessórios utilizados nesta dissertação para montagem do sistema de referência, alguns deles ilustrados nas figuras 3.9 e 3.10. Os padrões de referência utilizados são mais bem descritos no Apêndice 2.

1. Sistema-referência;
2. Componentes óticos do laser de referência (divisor de feixe e prismas);
3. Sistema-objeto com seus sensores ambientais e da temperatura do padrão;
4. 3 mesas elevatórias;
5. 3 mesas ajustáveis;
6. Suporte para os lasers;
7. Bancada de medição;
8. Cobertura de madeira;
9. Mesa de deslocamento;
10. Termômetro de referência para o material;
11. Termohigrômetro de referência para a temperatura do ar e umidade;
12. Barômetro digital;
13. Nível de bolha com valor de uma divisão de 0,01 mm/m;
14. Esquadro ótico;
15. Mesa rotativa;
16. Prismas magnéticos.

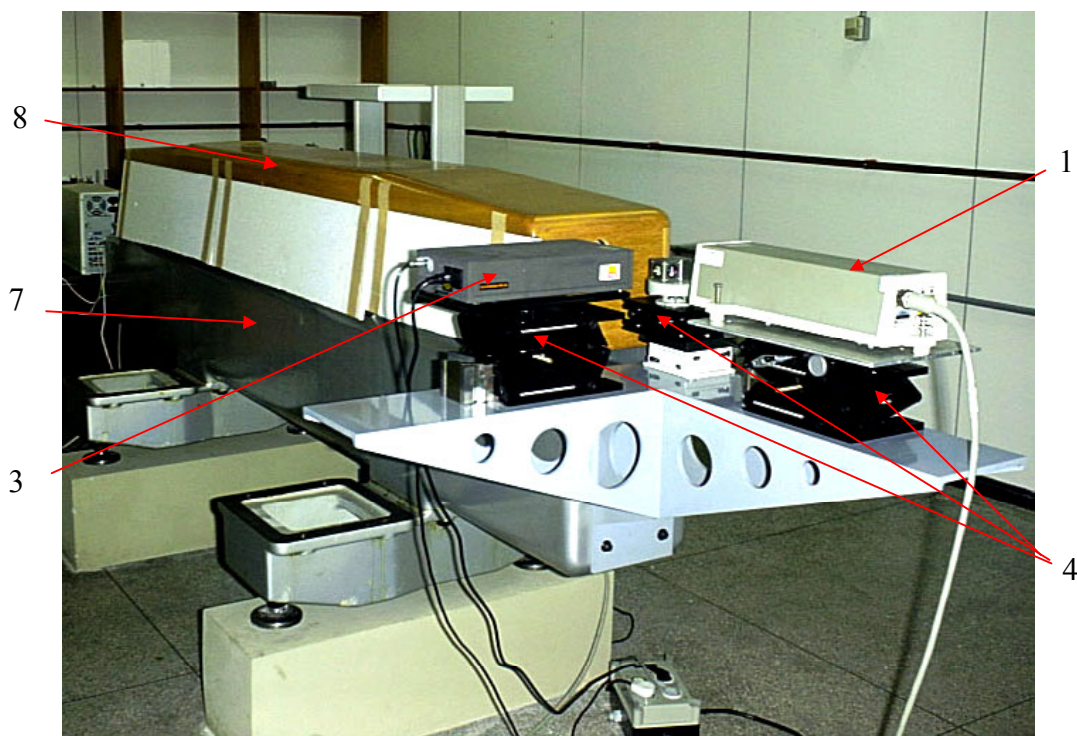


Figura 3.9 – Sistema de medição vista 1

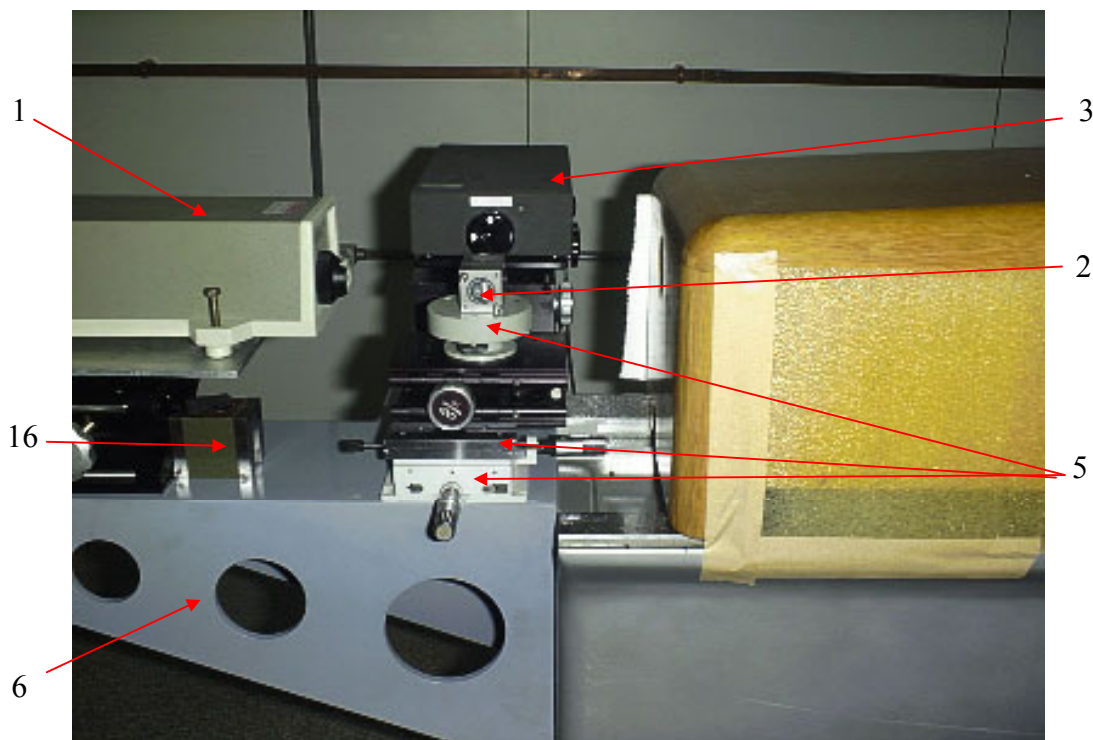


Figura 3.10 – Sistema de medição vista 2.

3.3.4

Montagem do Sistema de Medição

A bancada de medição foi apoiada em uma estrutura de concreto isolada do piso, com o objetivo de evitar vibração. Esta bancada apresenta estabilidade dimensional suficiente devido à sua robustez e peso.

A mesa de deslocamento e o suporte dos lasers originalmente não faziam parte desta bancada de medição e tiveram que ser projetadas pelo Lamin e fabricadas pela oficina mecânica. A mesa foi fabricada em ferro fundido cinzento, com as superfícies de referência e de apoio retificadas.

Foi montado o suporte dos lasers na bancada de medição, primeiramente nivelando-se o suporte e depois o conjunto, com a utilização de um nível de bolha.

As mesas elevatórias foram fixadas no suporte por meio de prismas magnéticos. Por sua vez, os cabeçotes dos lasers foram fixados às mesas

ajustáveis por meio de parafusos. O conjunto formado pela mesa ajustável e pelo cabeçote do laser foi, então, fixado às mesas elevatórias de cada sistema laser (sistema-objeto e sistema-referência). Para que os feixes emitidos por cada laser possam incidir no prisma de medição montado na mesa de deslocamento, os dois cabeçotes foram colocados aproximadamente na mesma altura, por inspeção visual, por meio do deslocamento vertical das mesas ajustáveis (figura 3.11).

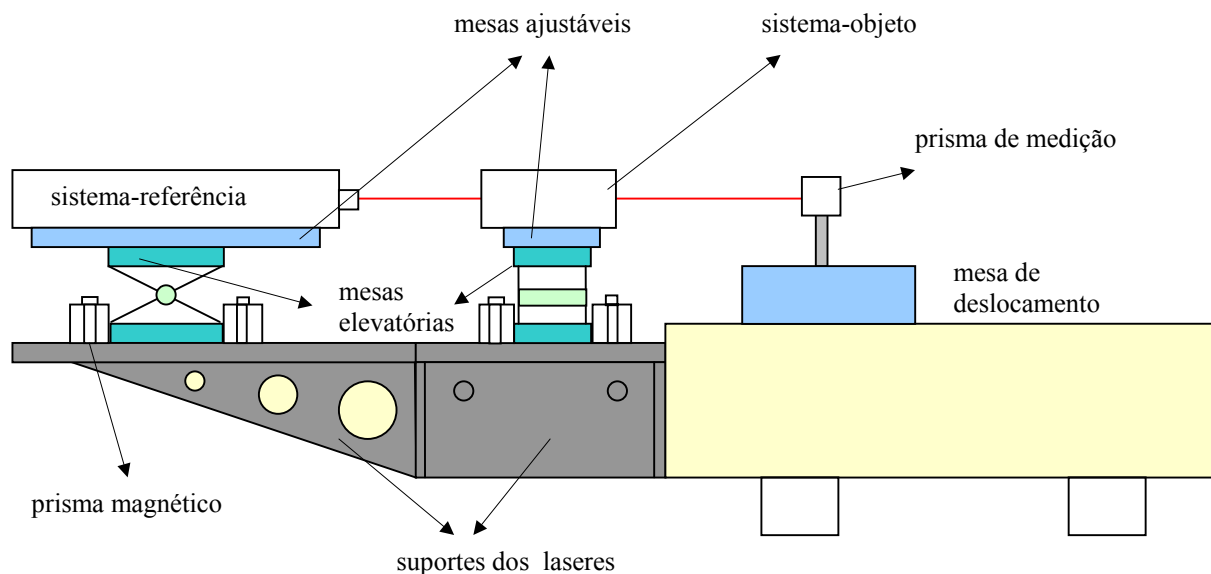


Figura 3.11 - Esquema de montagem do sistema de medição

3.3.5

Alinhamento do Sistema de Medição

Os dois principais objetivos de se realizar um alinhamento adequado dos feixes emitidos pelos lasers em relação ao deslocamento da mesa são maximizar o sinal de medição e minimizar o erro co-seno.

Foi utilizada neste trabalho a metodologia para alinhamento baseada no alinhamento visual, que é aplicada para arranjos de medição com deslocamentos da mesa acima de 500 mm [5]. As etapas para alinhar os feixes de cada laser foram as seguintes:

- a. escolheu-se o sistema-referência para ser alinhado primeiramente, pois o mesmo foi montado na mesma direção do eixo do deslocamento da mesa, o

que facilitava o procedimento; nesta primeira etapa o alinhamento foi realizado utilizando-se apenas o prisma de medição;

- b. o prisma de medição foi montado sobre a mesa do dispositivo de deslocamento e ajustado visualmente em relação ao feixe do laser nas proximidades (início do curso) do cabeçote laser; o retorno do feixe de medição deveria incidir no centro do fotodetector, que possui um alvo para facilitar o alinhamento visual do laser de referência;
- c. deslocou-se a mesa até o final do curso, observando-se se o feixe de medição continuava a incidir no centro do alvo; em caso negativo, o cabeçote do laser deveria ser movimentado angularmente até que o feixe voltasse a incidir no centro do alvo;
- d. retornando a mesa para o início do curso, próximo ao cabeçote, o feixe de medição deveria continuar centralizado no alvo; em caso negativo, o cabeçote deveria ser ajustado novamente, movendo-o apenas em altura e transversalmente, repetindo-se o procedimento até que o feixe esteja no centro do alvo, tanto para o início quanto para o fim do curso da mesa de deslocamento.

Para o sistema-objeto foi desenvolvida uma metodologia própria de alinhamento, baseando-se nas já existentes. Nesta etapa foi utilizado o divisor de feixe apenas como um objeto metálico para auxiliar no alinhamento, cujas etapas foram as seguintes:

- a. um alvo magnético foi fixado em um dos lados do divisor de feixe, ambos montados em uma mesa rotativa, conforme figura 3.12;
- b. como o objetivo desta montagem foi posicionar o cabeçote do sistema-objeto na mesma altura do cabeçote do sistema-referência, alinhou-se o divisor de feixe para coincidir com o feixe do sistema-referência, de forma a permitir que este incidisse no centro do alvo;
- c. girou-se a mesa rotativa de 90° , de forma que o feixe do sistema-objeto agora incidisse no alvo, e alinhou-se o cabeçote do sistema-objeto para que assim o feixe incidisse no centro do alvo.

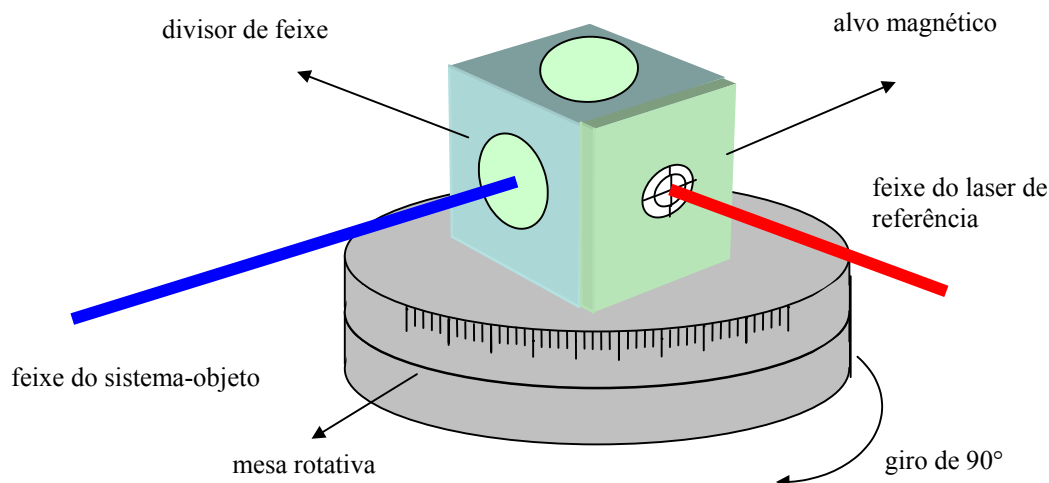


Figura 3.12 - Montagem para auxiliar o alinhamento do sistema-objeto

- d. feito este alinhamento inicial, o divisor de feixe foi retirado da mesa rotativa, e procedeu-se a fixar ao prisma de medição o mesmo alvo magnético, sendo que o centro deste deveria ser posicionado em relação ao feixe do sistema-referência; esta etapa deve ser realizada com muito cuidado, pois o prisma de medição não pode ser movido, uma vez que já está alinhado em relação ao sistema-referência;
- e. com o objetivo de desviar o feixe do sistema-objeto de 90° , para que incidisse no prisma de medição, foi montado um esquadro ótico sobre a mesa rotativa, cuja altura foi referenciada através do feixe do sistema-objeto, ou seja, a altura era a mesma em que se encontrava o divisor de feixe;
- f. o feixe do sistema-objeto, desviado de 90° , deveria incidir no alvo localizado no prisma de medição; em caso negativo, o cabeçote laser deveria ser ajustado, utilizando-se a mesma metodologia usada para o sistema-referência, ou seja, no início e no fim do curso;
- g. feito isto, retirou-se o alvo magnético do prisma de medição e introduziu-se o divisor de feixe do sistema-referência no caminho geométrico dos dois lasers, ajustando-o sem mexer mais nos cabeçotes e no prisma de medição; os feixes de medição e de referência dos lasers deveriam incidir no prisma e retornar recombinando-se, ocorrendo sua visualização no centro de cada do alvo dos

cabeçotes, tanto para o início quanto para o fim do curso da mesa de deslocamento.

3.4

Observações sobre o Procedimento Experimental

Com o objetivo de alertar para possíveis dificuldades de implantação do procedimento experimental apresentado, são descritos alguns dos problemas enfrentados durante a fase inicial de preparação do experimento, principalmente com relação à condição ambiental do experimento e à montagem das partes ópticas, a saber:

- a. o alinhamento do sistema-objeto foi muito difícil de realizar, pois nos manuais consultados não foram encontradas informações sobre a técnica de alinhamento escolhida. A solução foi desenvolver uma técnica de alinhamento, baseada nas já existentes, como descrito em 3.3.5., o que acarretou muito tempo na preparação.
- b. a mesa responsável pelo deslocamento do prisma de medição foi movimentada manualmente, demandando que o operador levantasse a cobertura a cada trecho calibrado, o que, por sua vez, afetava o equilíbrio térmico em que se encontravam os feixes dos lasers e os sensores térmicos. Com objetivo de restabelecer o equilíbrio térmico, a aquisição dos dados de medição foi realizada após um período de 20 minutos a partir da manipulação da cobertura, o que acarretou uma demora excessiva para realização do ciclo de medição.