

APLICAÇÃO DO LASER NA METROLOGIA

Hans Gerhard Peters *

ABSTRACT

To measure the geometric errors of components or trajectories of machine tools, instruments of high precision and reliability are required. Specific objective results reflect the real performance of the machine.

One of this instruments, wich is highly versatile, is the aligment laser beam. It is composed of a helium - neon laser and an optoeletronic system to measure the transversal movement, when compared to the laser beam, which is the standard line for straightness measuring.

Therefore, the beam produced by the laser is spacially unstable, as a result of various factors which hinder the quality of the results. To create objective means to quantitatively evaluate the extent of the instability and from this, to project solutions, a theoretical experimental study was made of the various causes, developing a method of measuring and a standard of measurement of the instability.

RESUMO

Para a realização da medição dos erros geométricos de componentes ou trajetórias em máquinas-ferramenta, requerem-se instrumentos de alta precisão e confiabilidade, objetivando a obtenção de resultados que espelhem, da melhor forma possível, o real comportamento da máquina.

Um desses instrumentos, de grande versatilidade, é o laser de alinhamento, composto de um laser de gás hélio-neônio e um sistema optoeletrônico para medição de deslocamentos transversais, relativamente ao feixe laser, que é tomado como reta padrão nos ensaios de retilidade.

No entanto, o feixe gerado pelo laser apresenta uma instabilidade espacial, causada por diversos fatores que prejudicam a qualidade dos resultados. Objetivando criar meios de avaliar quantitativamente tal instabilidade, e a partir disto estudar soluções de otimização, fez-se um estudo teórico-experimental das diferentes causas, desenvolvendo-se uma metodologia de medição e um banco de ensaio adequado para medição dessas instabilidades.

(*) Hans Gerhard Peters. Mestre em Físico-Química, opção Física do Laser, pela Universidade Federal de Santa Catarina, 1986; Professor de Física do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.

INTRODUÇÃO

A evolução tecno-científica requer gradativamente equipamentos de teste e ensaio mais sofisticados, para a obtenção de informações cada vez mais confiáveis sobre os sistemas e processos, as quais se revertem em benefício da humanidade, desde que devidamente aplicados.

O laser tem sido um desses instrumentos que vem sendo continuamente aperfeiçoado e aumentado largamente sua gama de aplicações, nas diferentes áreas da Ciência e Tecnologia, devido às suas peculiares características de /1,2/:

- Direcionalidade,
- Monocromaticidade ou cor pura (um só comprimento de onda),
- Coerência espacial e temporal, e
- Luminância energética.

A Metrologia, também acompanhando essa evolução, está se valendo do laser na medição de grandezas físicas e principalmente geométricas, visando a resultados de elevada confiabilidade e abrangência, bem como equipar-se com instrumentos de alta versatilidade e racionalidade.

Dentre as muitas aplicações do laser na Metrologia, podem ser enumeradas algumas, consideradas as mais exploradas:

- verificação de alinhamento na construção de prédios, pontes, túneis, tubulações, levantamentos topográficos, etc., /3/
- medição de grandes distâncias, /3/
- medição de deslocamentos e consequentemente de velocidades e acelerações, utilizando o Laser Interferométrico, /4/
- medição da velocidade de fluidos, /5/
- medição do diâmetro de pequenas partículas e fios, bem como de pequenos orifícios e fendas, através da difração, /6/
- avaliação qualitativa de irregularidades de superfícies, /7/
- avaliação qualitativa da esfericidade de uma superfície, /7/
- análise experimental de tensões, por meio da Holografia Interferométrica, /8/
- ensaios geométricos de movimentos de Máquinas-Ferramenta e de componentes mecânicos, com Laser de Alinhamento, /9/

As características do laser utilizado nesta última aplicação serão estudadas com alguns detalhes no presente trabalho.

zados, é o laser de alinhamento (LA) (fig. 1) /10/ e que é composto das seguintes partes:

a) unidade geradora da reta padrão (UGRP). É a unidade que gera o feixe de laser, que constitui para os ensaios geométricos uma reta padrão (RP) e pode ser utilizado como tal para distâncias de até 30m. Esta unidade, por sua vez, é composta de:

- laser de gás hélio-neônio que emite um feixe visível ($\lambda = 0,6328\mu\text{m}$ — vermelho) de diâmetro em torno de 1mm;
- fonte de alimentação de corrente contínua, que fornece a descarga elétrica no tubo de gás;
- telescópio, para ampliar o diâmetro do feixe;
- diafragma, na saída do telescópio, para reduzir o diâmetro do feixe, quando necessário.

b) transdutor de posição de incidência do feixe, que é a unidade através da qual se pode medir a posição de um ponto da peça sob ensaio, relativamente à reta padrão. É composto de:

- sensor, que está em contato com a peça sob ensaio e que localiza o ponto de medição da mesma;
- filtro de interferência, para permitir somente a incidência da luz do laser, sobre o fotodetector;

— fotodetector de posição, sobre o qual incide a reta padrão (ou feixe de laser), gerando os sinais elétricos que, devidamente processados, fornecem a medida realizada.

c) unidade processadora/indicadora dos sinais elétricos, constituída de:

- sistema de aquisição dos sinais (SAS), composto de chave seletora, conversor analógico/digital de alta precisão;
- microcomputador que, por meio de programação adequada, controle o sistema de aquisição de sinais, executa os cálculos necessários e proporciona a saída dos resultados;
- plotadora e impressora, também controladas pelo microcomputador, para fornecerem relatórios das medidas efetuadas.

Com base na figura 2/10/, pode-se observar o processo para medição da posição de um ponto da peça sob ensaio, utilizando o LA. A reta padrão é projetada sobre o fotodetector gerando neste uma fotocorrente, assim denominada por causa dos fótons da luz incidente que dão origem à corrente elétrica. Essa fotocorrente, passa pela região de alta resistividade, dirigindo-se aos 4 eletrodos, sendo, em cada caso, inversamente proporcional à distância do ponto de incidência aos eletrodos, posicionados nos 4 extremos da região de alta resistividade. Os sinais elétricos assim gerados, dois numa direção x e dois numa direção y, são, após uma pré-amplificação, somados e subtraídos respectivamente, para cada direção. Para uma normalização, divide-se a diferença pela soma, obtendo-se então um sinal para cada direção que é proporcional

LASER DE ALINHAMENTO

2.1. Princípios e Operação

Para os ensaios geométricos, um dos vários sistemas de medição, atualmente utili-

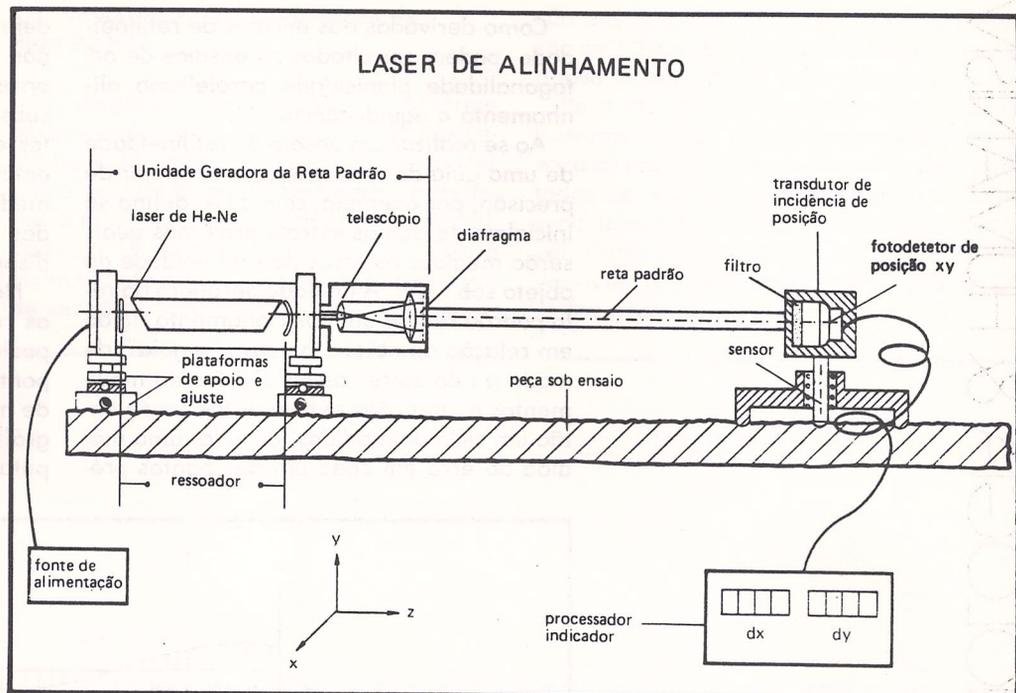


FIG. 1 — Os componentes básicos que compõem o Laser de Alinhamento.

à posição do feixe incidente, relativamente ao centro do fotodetector.

2.2. Aplicações do Laser de Alinhamento

O LA é o instrumento mais versátil para a realização de ensaios geométricos em máquinas-ferramenta /9/, mais especificamente para verificação geométrica de superfícies, linhas, eixos ou trajetórias /11/, com base na medição do erro de retilidade.

Subentende-se por erro de retilidade a distância de cada ponto de um elemento à sua correspondente posição ideal, caracte-

terizada por uma reta (exemplo: trajetória AB — fig. 3). Os erros, para melhor interpretação, são normalmente apresentados nas suas componentes segundo dois planos ortogonais associados ao objeto sob teste.

A figura 4 mostra a montagem do LA para um ensaio de retilidade de uma guia, bem como os módulos de aquisição de sinais, processamento e apresentação dos resultados. Os sinais obtidos também podem ser armazenados em fita ou disco, para posterior processamento e saída dos relatórios. Um filtro passa baixas é utilizado por causa dos ruídos de alta frequência provocados pelo fotodetector de posição.

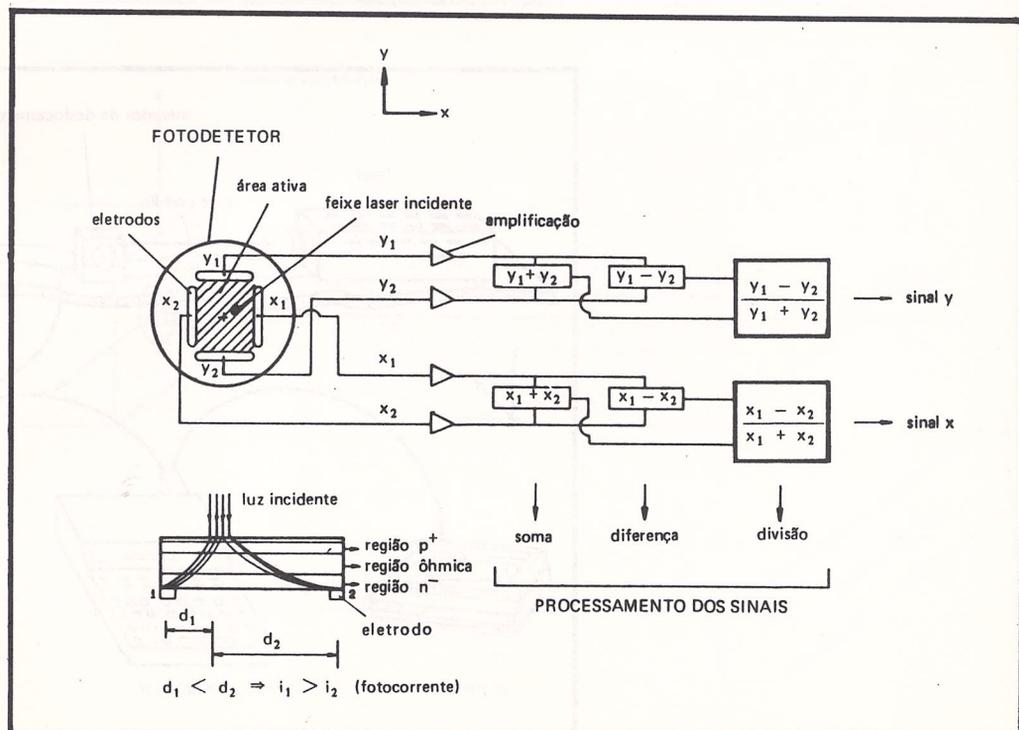


FIG. 2 — Tratamento dos sinais gerados pelo feixe laser ao incidir no fotodetector e obtenção das coordenadas do ponto.

Como derivados dos ensaios de retilidade, podem ser citados os ensaios de ortogonalidade, planicidade, paralelismo, alinhamento e equidistância /11/.

Ao se realizar um ensaio de retilidade de uma guia de uma máquina de medir de precisão, por exemplo, com o LA, define-se inicialmente pontos estratégicos, nos quais serão medidos os erros de retilidade do objeto sob teste. A unidade geradora da reta padrão requer um posicionamento rígido em relação ao objeto, no caso "a guia", de modo a não sofrer as influências de movimentos e vibrações externas. Efetua-se então um ciclo de medidas, ou seja, uma medida do erro em cada um dos pontos pré-

definidos. Para um segundo ciclo de medidas, constata-se uma pequena variação dos erros em relação ao primeiro e, para ciclos subsequentes, ocorrerão variações diferentes em relação aos anteriores. Realiza-se, então, um número otimizado de ciclos de medidas, obtendo-se, então, o valor médio das medidas (erros de retilidade) e a dispersão das medidas.

Na figura 5/9/ estão sendo apresentados os resultados de um ensaio conforme exposto, com a UGRP a 200mm do primeiro ponto de medição; foram realizados 4 ciclos de medidas nesse ensaio e os resultados e gráfico, obtidos com auxílio do microcomputador e plotadora.

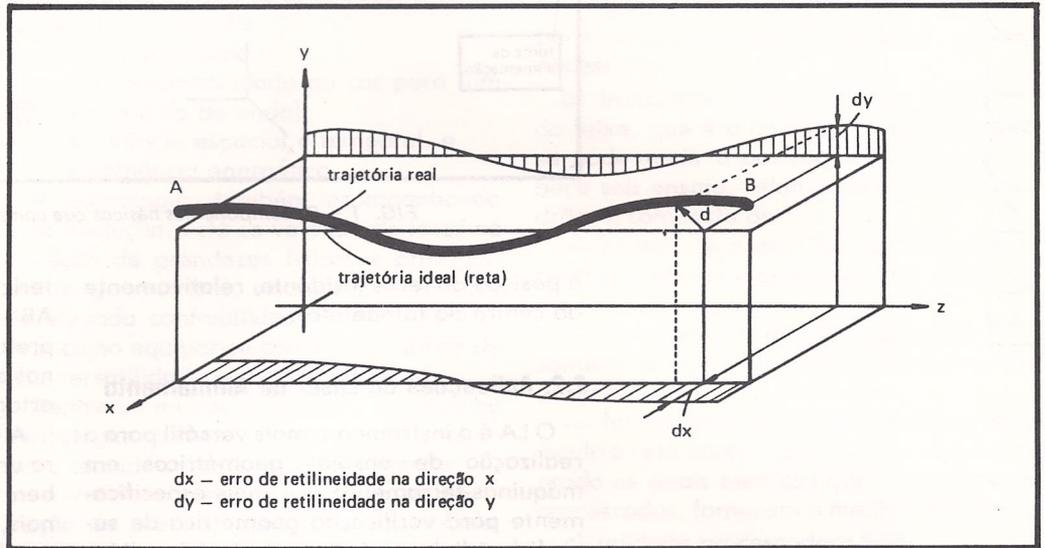


FIG. 3 — Erro de retilidade de uma trajetória (direção z), erro espacial (d) e suas componentes ortogonais (dx, dy).

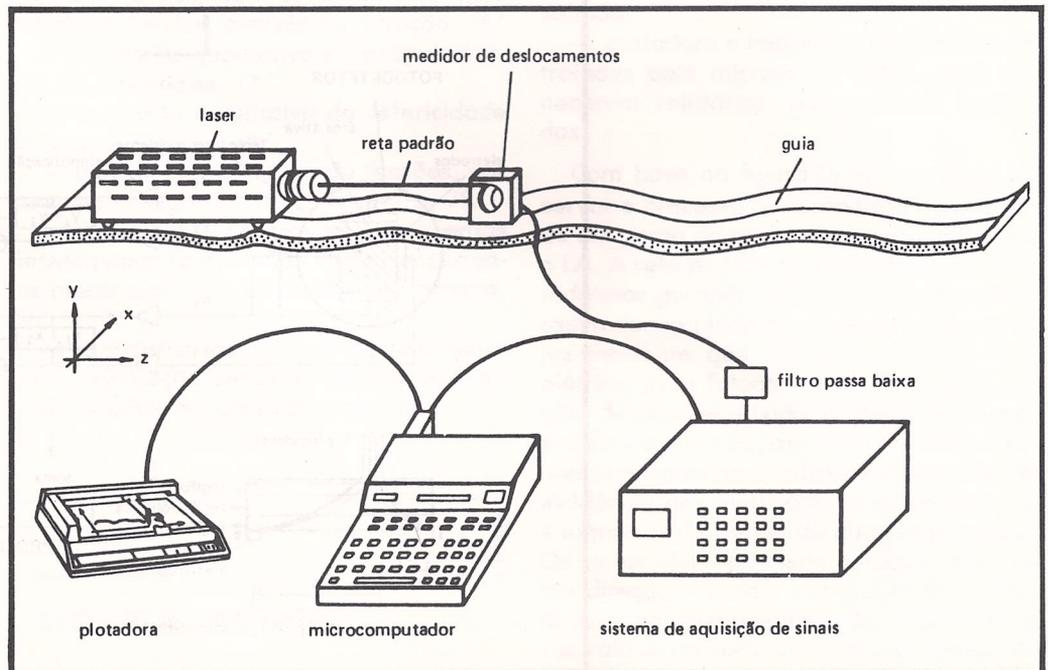


FIG. 4 — LA aplicado ao ensaio de retilidade de uma guia. Aquisição, processamento e documentação automatizado.

2.3. Importância da Estabilidade da Reta Padrão

A dispersão das medidas, conforme apresentado na figura 5, é causada basicamente pela instabilidade do LA, uma vez que a guia da máquina apresenta uma rigidez e estabilidade excepcional. A instabilidade do LA tem, como causa principal, a instabilidade espacial do feixe, fato que pode ser observado pelo aumento da disper-

são das medidas com a posição, numa razão de $\pm 3 \mu\text{m}/\text{m}$, o que caracteriza uma variação angular da RP relativamente à guia.

Para atender os requisitos da moderna instrumentação, que propõe elementos a ensaiar mais e mais precisos e exige resultados de mínima indeterminação, o ideal seria uma reta padrão perfeitamente estável. Como tal condição é praticamente impossível, uma constante otimização do LA se faz necessário.

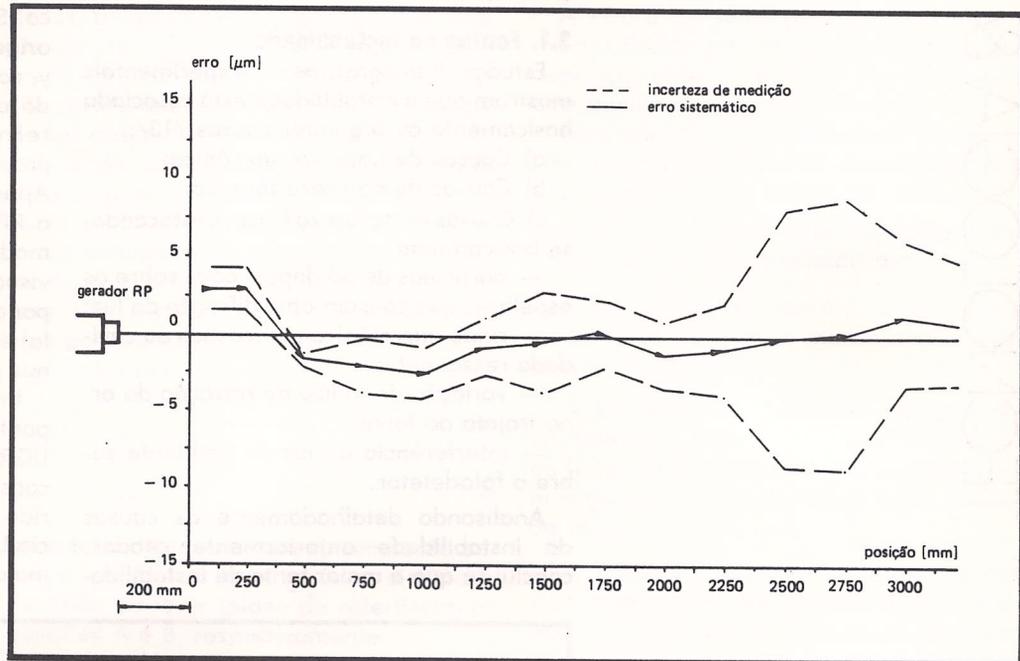


FIG. 5 – Representação gráfica dos resultados de um ensaio de retilidade.

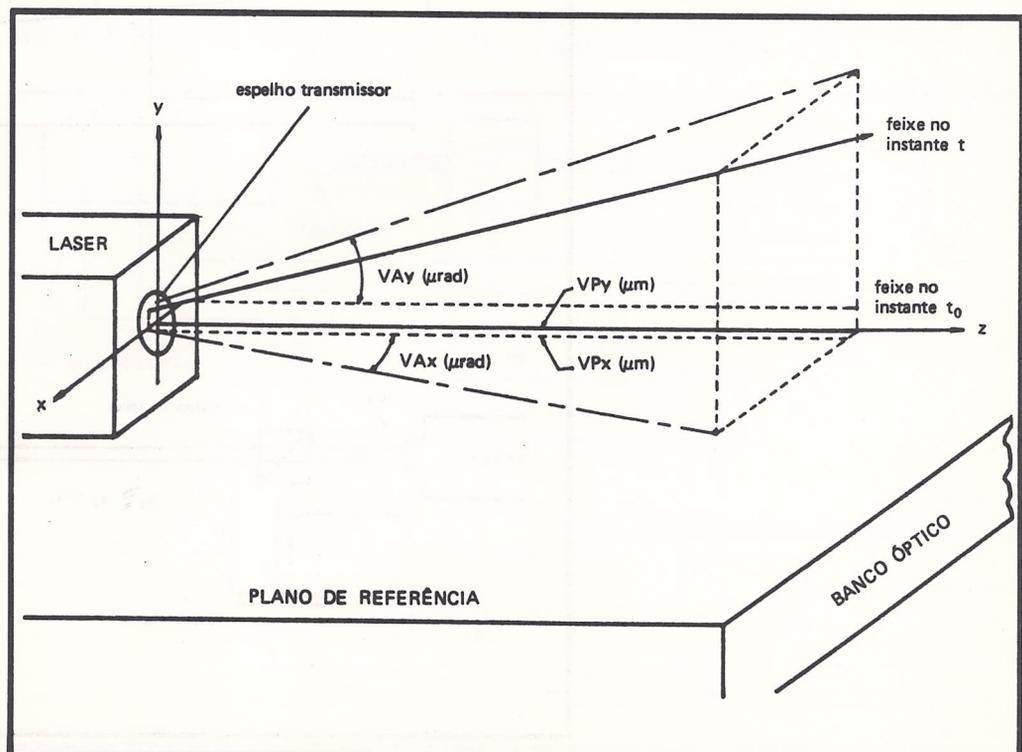


FIG. 6 – Caracterização das variações paralela (VP) e angular (VA) da RP.

3. UNIDADE GERADORA DA RETA PADRÃO (UGRP)

A UGRP é a unidade responsável pela formação da RP e é composta de um tubo de laser a gás (He-Ne) com seus respectivos acessórios, cuja potência, apropriada para as finalidades mencionadas, pode variar entre 0,5 e 5mW.

3.1. Fontes de Instabilidade

Estudos bibliográficos e experimentais mostram que a instabilidade está associada basicamente às seguintes causas /13/:

- a) Causas de natureza mecânica;
- b) Causas de natureza térmica;
- c) Causas de natureza física, destacando-se basicamente:
 - partículas de pó depositadas sobre os espelhos, que causam uma difração da luz;
 - ruído microfônico ou acústico da cavidade ressonante;
 - variação do índice de refração do ar, no trajeto do feixe;
 - interferência de luz do ambiente sobre o fotodetector.

Analisando detalhadamente as causas de instabilidade anteriormente citadas, conclui-se que a maior fonte de instabilidade

de é a variação de temperatura, que, por sua vez, causa dilatações na estrutura do laser, e na impossibilidade de manter um sistema com temperatura totalmente estável.

3.2. Caracterização da Instabilidade

A variação espacial da RP relativamente a um referencial, está esquematizada na figura 6. Adota-se um plano de referência, que na aplicação do LA é o objeto sob teste, mas no presente trabalho é um banco óptico. Supõe-se uma posição inicial da RP, na origem do sistema de eixos coordenados x, y , com o plano de referência ($x - y$) adotado arbitrariamente sobre a superfície externa do espelho transmissor, e propagando-se na direção z nesse instante. Após um determinado intervalo de tempo, a RP se encontra na posição indicada, de modo desproporcional, para uma melhor visualização. Essa variação é caracterizada por dois parâmetros: a VP (variação paralela) e a VA (variação angular), que ocorrem nos planos xz e yz , respectivamente.

Uma instabilidade na forma de VP num ponto que se encontra a uma distância L da UGRP, é a mesma para qualquer distância; considerando no entanto a VA, o erro ocorrido é o produto desta variação pela distância L . O que permite concluir que a VA tem maior influência na instabilidade do LA.

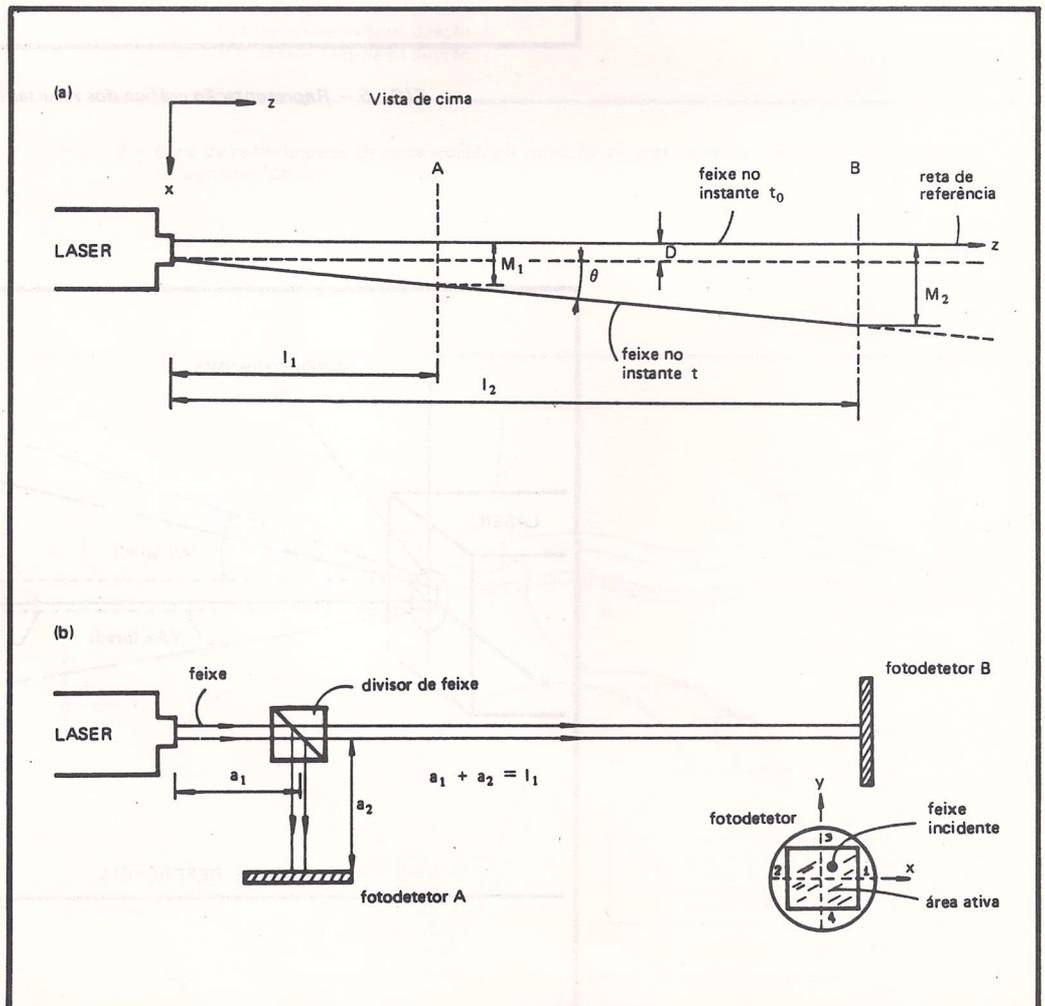


FIG. 7 — Método para medição da variação de posição do feixe (M_1 e M_2) sobre os fotodetectores (A e B).

3.3. Método para Medição da Instabilidade

Visto que a instabilidade espacial do feixe pode ser caracterizada pelas suas variações paralela e angular de posição, faz-se necessário ter um sistema que possibilite a medição simultânea desses parâmetros. Na figura 7(a) estão esquematizadas essas variações (D e θ) no plano xz e duas posições de medição, A e B, de forma que é possível equacionar esses parâmetros. Como é impossível posicionar um fotodetector na posição A sem interromper a trajetória do feixe de luz, utilizou-se um divisor de feixe, desviando assim parte da luz ortogonalmente, sobre um fotodetector localizado numa posição correspondente à posição A, como pode ser observado pela figura 7(b).

Quando ocorre uma variação paralela (D) e angular (θ) simultaneamente, no plano xz por exemplo, a partir de uma posição inicial tomada como referência, o fotodetector A acusará uma variação de medida M_1 (com sinal inverso devido ao divisor de feixe e posição lateral), e em B uma variação M_2 , dadas pelas equações:

$$M_1 = -(\theta \cdot l_1 + D) \quad (1)$$

$$M_2 = \theta \cdot l_2 + D \quad (2)$$

onde foi considerada uma aproximação paraxial ($\sin \theta \approx \theta$) e l_1 e l_2 são as distâncias da saída do laser (plano de referência) às posições A e B, respectivamente.

Resolvendo as equações 1 e 2, obtemos para D e θ :

$$D = -(M_1 \cdot l_2 + M_2 \cdot l_1) / (l_2 - l_1) \quad (3)$$

$$\theta = (M_2 + M_1) / (l_2 - l_1) \quad (4)$$

sendo M_1 e M_2 , dados pela equação geral

$$M(x) = K (V_1 - V_2) / (V_1 + V_2) \quad (5)$$

para a medida na direção x , onde V_1 e V_2 são os sinais elétricos gerados nos eletrodos 1 e 2 de cada fotodetector e K é a constante de calibração do mesmo.

Analogamente, a medida M no plano yz , é dada por:

$$M(y) = K (V_3 - V_4) / (V_3 + V_4) \quad (6)$$

para ambos os fotodetectores. As variações D_y e θ_y no plano yz , ocorrem no mesmo sentido para ambos os fotodetectores.

A leitura dos sinais gerados (V_i) bem como os cálculos para obtenção das variações de posição (D e θ) do feixe, são realizadas com auxílio do microcomputador.

Para medição da instabilidade do feixe, são necessários uma série de componentes e uma metodologia adequada, tais como:

- Banco óptico de granito, apoiado sobre amortecedores pneumáticos;

- Componentes mecânicos de apoio isoestáticos do laser, e mecanismos estáticos de ajuste fino;

- Componentes Ópticos compostos de um telescópio astronômico para colimação do feixe, redução da variação angular e da divergência natural do feixe, e um divisor de feixe;

- Componentes eletrônicos constituídos de fotodetector de posição, filtros passa baixas, termoelementos, sistema de aquisição de sinais, interface, microcomputador, impressora e traçador de gráficos (plotadora).

Na figura 8 está esquematizado o método de medição com os respectivos componentes eletrônicos. A posição do feixe, relativamente a uma posição inicial de referência, é calculada a partir dos 8 valores das tensões geradas nos dois fotodetectores e de suas constantes de calibração, previamente determinadas.

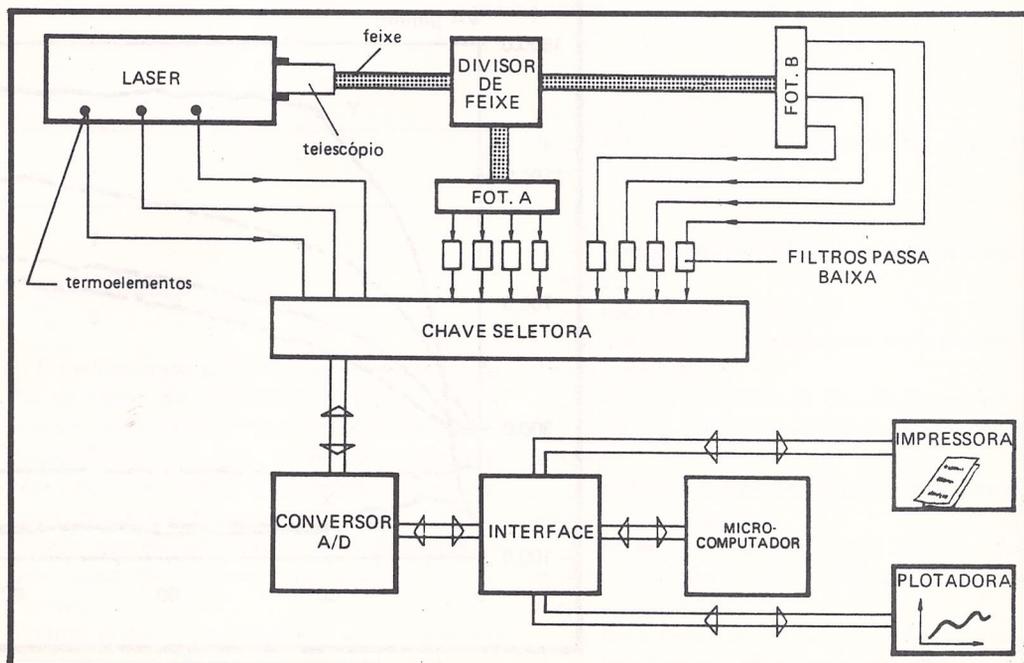


FIG. 8 — Módulos básicos para aquisição automática dos sinais e saída dos resultados.

3.4. Resultados Experimentais da Instabilidade

Os resultados da instabilidade de um laser são apresentados sob a forma dos dois parâmetros anteriormente expostos (VP e VA). Diferentes lasers (quanto à estrutura e potência) e sob diversas condições operacionais foram analisados. A seguir, estão alguns dos resultados de um deles.

Na figura 9 está caracterizada a instabili-

dade durante a fase denominada de estabilização, ou seja, o tempo para o laser entrar em regime de temperatura estabilizada. Neste ensaio, o intervalo de tempo entre as medições foi de 2 minutos. Observa-se uma maior variação da posição do feixe nos primeiros 60min, decorrente da variação de temperatura neste intervalo. Estão destacadas as posições de 4 termoelementos, para medição das temperaturas.

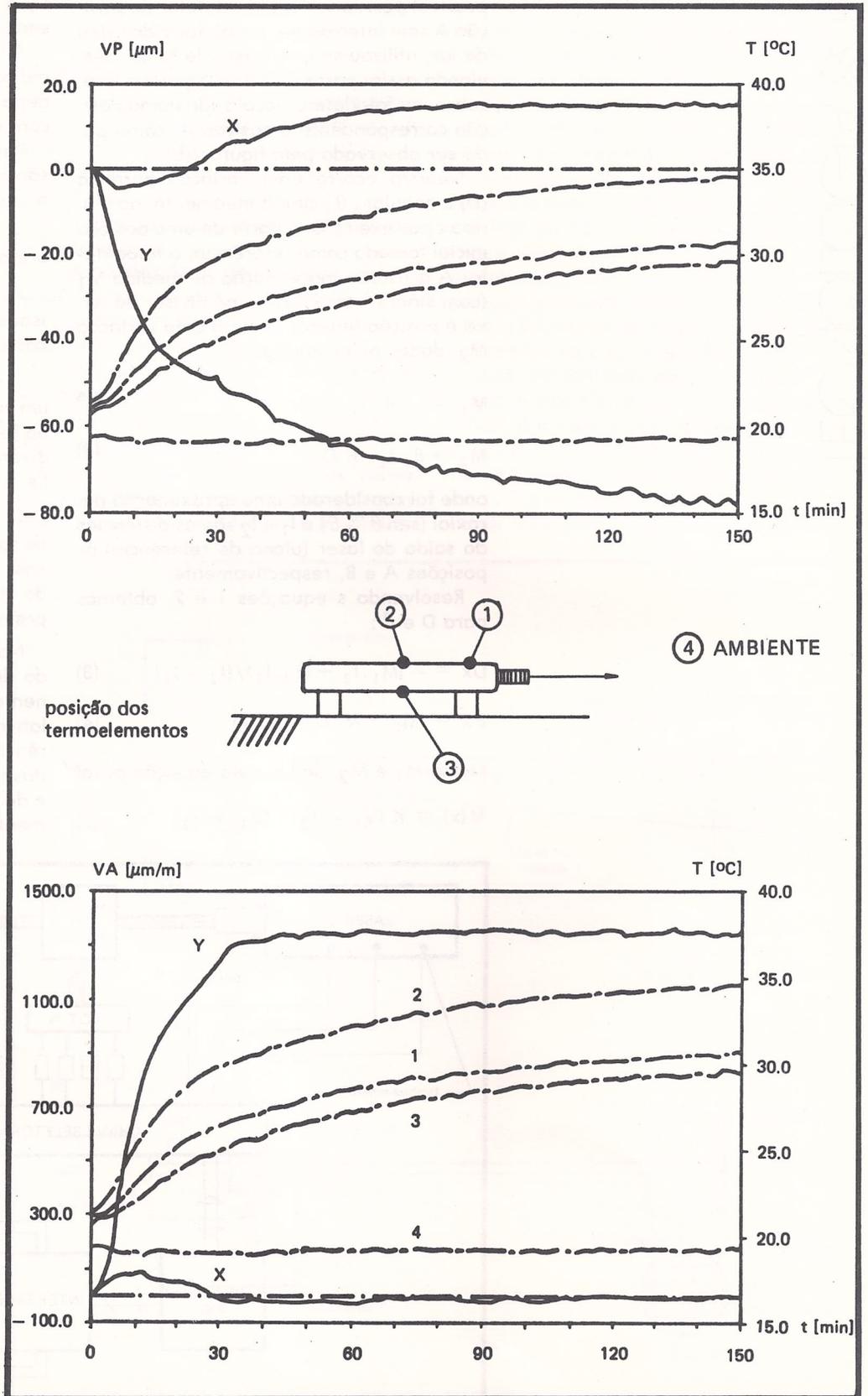


FIG. 9 - Instabilidade do laser durante o período de estabilização.

Uma prática adotada para minimizar o gradiente de temperatura em volta do laser, foi a de ligar um ventilador na parte posterior do mesmo, impondo um fluxo de ar constante e homogêneo, causando maior dissipação de calor próximo do laser, diminuindo, assim, as dilatações e também diminuindo a influência de fluxos aleatórios de ar causados por exemplo pelo abrir e fechar de uma porta ou o simples caminhar de uma pessoa no ambiente de ensaio. Observa-se, na figura 10, a influência de uma simples lufada de ar (causada por uma

prancha de mão) sobre o laser, após este se encontrar estabilizado, mas sem o uso do ventilador. Com uso de um ventilador, tal irregularidade foi praticamente desprezível.

Outra experiência realizada foi a de retirar as proteções laterais da estrutura, para diminuir as dilatações e aumentar a dissipação de calor. Assim, o tempo de estabilização foi bem menor e as variações do feixe também foram menores (a VA ficou reduzida para 10%).

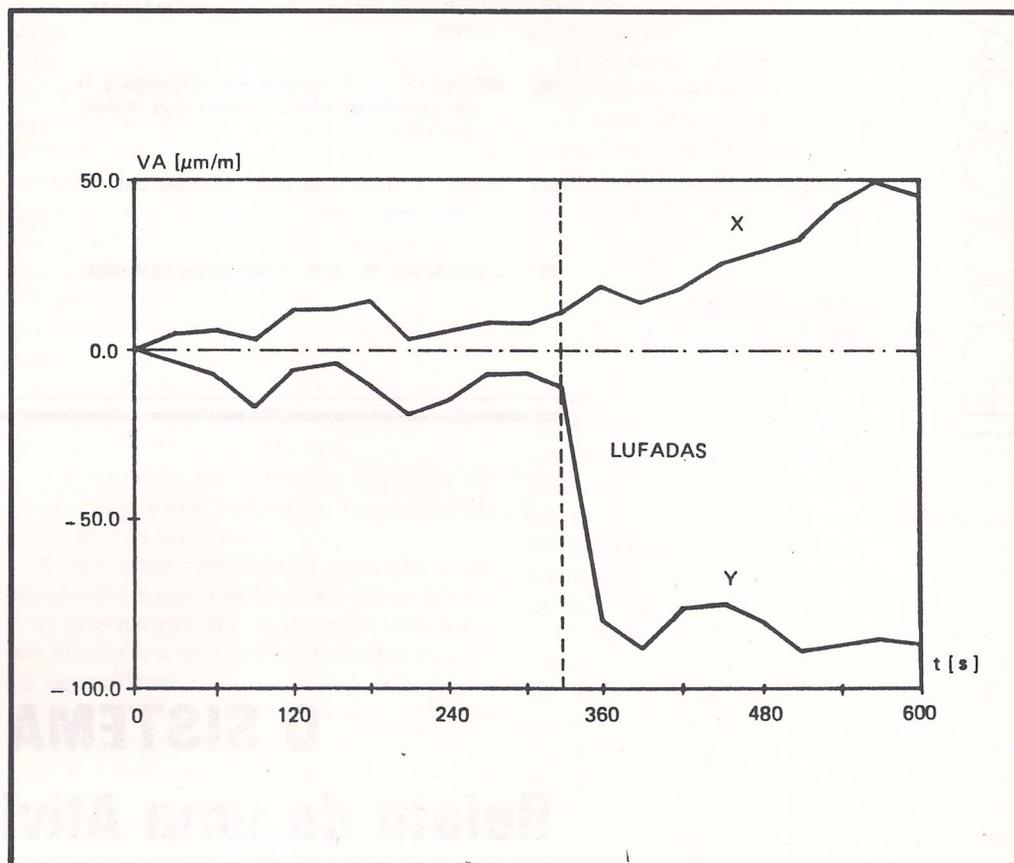


FIG. 10 — Influência de uma lufada de ar sobre o laser.

4

CONCLUSÕES

Considerando a excepcional versatilidade do laser de alinhamento como instrumento para ensaios de retilidade, é imprescindível que este também apresente resultados de alta confiabilidade, o que requer, em primeiro plano, uma ótima estabilidade espacial do feixe, a qual depende de uma série de fatores construtivos e operacionais.

Uma análise comparativa, entre diferentes lasers e métodos operacionais, mostrou que, para se obter um laser operando com uma melhor estabilidade, alguns fatores

importantes devem ser observados, tais como:

- tempo de estabilização de no mínimo 1 hora;
- uso de um ventilador;
- ambientes climatizados com temperatura estável;
- ausência de fluxos aleatórios de ar;
- banco óptico ou sistema sob ensaio estável;
- sistema mecânico de fixação do laser, estável e ajustável;
- laser com estrutura que oferece pequena dilatação e grande dissipação de calor;
- ambientes livres de vibrações;
- laser com potência adequada;
- sistema automatizado de aquisição e tratamento de sinais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /01/ SVELTO, O. *Principles of Lasers*. New York: Plenum Press, 1976.
- /02/ KALLARD, T. *Exploring Laser Light*. Optosonic Press, 1977.
- /03/ KOCK, W.E. *Engineering Applications of Laser and Holography*.
- /04/ HEWLETT PACKARD. *Laser Transducer System*. Catálogo de fabricante, 1977.
- /05/ TSI INCORPORATED. *Laser Velocimetry Systems*. 1979.
- /06/ BREITMEIER, U. *Anwendung der Lichtbeugung in der Längenmesstechnik*. Messen und Prüfen, jun/1983.
- /07/ TRAPET, E. *Curso sobre Laser*. Apostila, LABMETRO - UFSC, 1982.
- /08/ GONÇALVES JR., A.A. *Automatização da Medição de Deslocamentos pela Holografia Interferométrica*. Diss. Mestrado - UFSC, maio/1984.
- /09/ VALENTINA, L.D. *Ensaio Geométrico de Máquinas-Ferramenta com Laser de Alinhamento*. Diss. Mestrado - UFSC, abr/1986.
- /10/ SCHNEIDER, C.A. *Entwicklung eines Laser-Geradheits-Messsystems zur Durchführung Geometrischer Prüfungen in Maschinenbau*. Doktor - Ingeieurs genehmige Dissertation, nov/1978.
- /11/ SILVA, A.D. *Ensaio Geométrico de Peças e Máquinas — uma Metodologia Automatizada*. Diss. Mestrado - UFSC, 1984.
- /12/ HERZIGER, G. e WEBER, H. *Laser — Grundlagen und Anwendungen*. Weinheim: Physik Verlag, 1978.
- /13/ PETERS, H.G. *Otimização da Estabilidade Espacial do Raio Gerado pelo Laser de Hélio Neônio*. Diss. Mestrado — UFSC, jun/1986.