

4 Fontes de Erros na Medição com Sistema Laser

Em uma comparação de lasers existem diversos fatores que contribuem para a determinação da incerteza de medição. É fundamental que se faça uma análise sobre esses fatores porque as equações de cada uma deles auxiliarão na determinação da incerteza de medição. As fontes de erros conhecidos são apresentadas a seguir, onde são definidas e descritas as formulações de suas correções, quando possível, para assim serem utilizadas como contribuições para a determinação da incerteza de medição.

4.1

Efeitos da condição ambiental e da temperatura do objeto

4.1.1

Compensação do índice de refração no ar

A frequência da luz emitida pelo laser é bastante estável em relação ao tempo e às alterações locais das condições ambientais. O comprimento de onda da luz emitida pelo laser no ar é um pouco menor que o comprimento de onda no vácuo assim como a sua velocidade de propagação no ar é menor que a no vácuo. Além disso, a velocidade da luz no ar não é constante, mas é uma função do índice de refração que, por sua vez, depende da composição do ar, temperatura e pressão atmosférica. Se o ar é menos denso (por exemplo, está em uma pressão baixa e uma temperatura alta), a velocidade da luz é mais alta e, por consequência, o comprimento de onda maior. Como estes parâmetros influenciam a definição do comprimento de onda do laser no ar, então eles devem ser determinados com a máxima exatidão.

Em geral, nas medições de comprimento por interferometria as condições ambientais diferem das condições ideais. Os comprimentos de onda da luz internacionalmente recomendados para realização da unidade de comprimento, são para a condição de vácuo. Portanto a influência do índice de refração do ar no comprimento de onda deve ser corrigida. Para informações sobre as várias linhas de laser recomendadas pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) para realização do metro veja o Apêndice [3].

Com o objetivo de se medir e corrigir corretamente os parâmetros ambientais de influência, os sistemas laser disponíveis no mercado possuem unidades de compensação que medem a pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa do ar e a temperatura do padrão a calibrar. As correções podem ser realizadas manualmente ou automaticamente. Nestas medições é necessário conhecer o índice de refração nas condições de temperatura, pressão e umidade em que são realizadas as calibrações.

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

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

sendo,

η índice de refração do ar;

λ_{vac} comprimento de onda da luz no vácuo;

λ_{ar} comprimento de onda da luz no ar.

Existem duas técnicas para determinação do índice de refração do ar. Ele pode ser medido diretamente por um refratômetro ou o valor pode ser calculado através da equação de Edlén [19], usando-se sensores de monitoramento adequados para medir a pressão atmosférica, temperatura do ar e umidade do ar.

Desde 1939 pesquisadores vêm publicando estudos sobre a equação do índice de refração do ar. A fórmula da refratividade do ar que é aceita como sendo a referência é derivada da publicação de 1951 (Edlén, 1953). Várias pesquisas foram publicadas por Rank (1958), Svesson (1960), Peck (1962), Erickson (dispersão do vapor d'água, 1961), Birch (1993) [20] e finalmente por Bönsch (1996) [21]. A cada publicação as constantes da equação vêm sendo modificadas devido a aprimoramentos tais como medições mais exatas dos parâmetros envolvidos e revisão em relação a ITS 90 (Escala Internacional de Temperatura, recomendada em 1990).

Para determinar o índice de refração nas condições ambientais padronizadas (η_s), tais como: ar seco composto de porcentagem molar de 78,09% de N, 20,95% de O, 0,93% de Ar e 0,03% de CO₂; temperatura de 15 °C; pressão atmosférica de 101325 Pa e 0,0003 de volume de CO₂ [19], é necessário utilizar a seguinte equação da dispersão de Edlén:

$$\eta_s = C_1 + C_2 + \left(\chi - \left(\frac{1}{\lambda_{vac}}\right)^2\right)^{-1} + C_3 \left(\varepsilon - \left(\frac{1}{\lambda_{vac}}\right)^2\right)^{-1} + 1$$

sendo que;

$$C_1 = 8343,05 \times 10^{-8};$$

$$C_2 = 2406294 \times 10^{-8};$$

$$C_3 = 15999 \times 10^{-8};$$

$$\chi = 130;$$

$$\varepsilon = 38,9;$$

Estes valores são constantes da equação da dispersão na revisão segundo Birch [20]. Nota-se que o cálculo de η_s depende apenas de comprimento de onda da luz no vácuo.

Uma outra influência na determinação do índice de refração do ar é a quantidade de dióxido de carbono contido no ar, que deve ser objeto de correção. A equação de Edlén fornece a seguinte expressão para a correção do índice de refração do ar contendo x partes do volume de dióxido de carbono.

$$\eta_x - 1 = [1 + 0,540(x - 0,0003)](\eta_s - 1)$$

Segundo Edlén, deve-se considerar a condição padronizada de volume de CO_2 como 0,0003, obtendo-se então :

$$\eta_x - 1 = (\eta_s - 1)$$

Para obtenção do índice de refração do ar para as diversas condições ambientais de pressão, temperatura e umidade, a equação de Edlén foi generalizada, resultando na seguinte expressão:

$$\eta = \left[p \times \frac{(\eta_s - 1)}{K_1} \right] \times \frac{(1 + 10^{-8} \times (K_2 + K_3 T) \times p)}{(1 + K_4 T)} - f \times \left[K_5 + K_6 \times \left(\frac{1}{\lambda_{vac}} \right)^2 \right] \times 10^{-10} + 1$$

onde :

p pressão atmosférica em Pa;

f umidade relativa do ar em Pa;

T temperatura de medição °C;

E os demais símbolos são constantes da equação na revisão segundo Birch:

$$K_1 = 96095,43;$$

$$K_2 = 0,601;$$

$$K_3 = -0,00972;$$

$$K_4 = 0,003661,$$

$$K_5 = 3,7345,$$

$$K_6 = 0,00401;$$

A correção do índice de refração, conforme a equação, depende da pressão atmosférica, temperatura do ar, pressão parcial do vapor de água (umidade do ar) e ainda do comprimento de onda da luz no vácuo. O sistema laser de medição utilizado corrige estes parâmetros ambientais através de software específico do fabricante para condições ambientais locais de medição, a partir das indicações de sensores próprios de monitoramento das condições ambientais.

A equação de Edlén utilizada nesta dissertação é a revisada por Birch [20], pois os sistemas lasers utilizados nesta dissertação têm data de aquisição posterior à data daquela publicação, porém anterior à publicação por Bönsch [21]. Com isso, o software de correção do sistema-objeto elaborado pelo fabricante foi baseado na revisão da equação de Edlén realizada por Birch.

Para manter a coerência nos cálculos das correções realizadas para o sistema-referência devidas às condições ambientais, utilizou-se também a equação de Edlén revisada por Birch. Para informação, a última revisão da equação de Edlén, feita por Bönsch [21], é apresentada no apêndice [4].

4.1.2

Compensação da Temperatura do Objeto

A fonte mais importante de erro em medições por interferometria, ou em qualquer outro procedimento de calibração na área dimensional, é o efeito da dilatação térmica dos materiais.

É bem conhecido que o comprimento da maioria dos objetos físicos varia com a temperatura. Por isso é recomendado, através da norma ISO 1 [22], que os

padrões de comprimento físicos devem ser medidos ou comparados na temperatura de referência de 20 °C.

Tomando-se como exemplo uma máquina-ferramenta, que possui parafusos sem fim (mecanismo de deslocamento da mesa), se o ambiente térmico em que esta opera não estiver estável, o efeito de dilatação térmica nos parafusos irá inserir um erro sistemático na fabricação de uma peça. Durante esta operação de usinagem, os parafusos sofrem influências térmicas oriundas de fontes de calor tais como o motor e o movimento dos rolamentos.

O erro devido à dilatação térmica está relacionado às características do objeto em calibração (por exemplo, máquinas-ferramenta ou MMCs) e às condições de temperatura em que esses objetos são medidos. Portanto, o processo óptico de medição utilizado para calibrar essas máquinas não tem nenhuma relação com o objeto sob medição em questão. Entretanto, para os usuários de máquinas-ferramenta e MMCs, a determinação do erro sistemático relativo à dilatação térmica, e sua conseqüente correção, é muito importante para se obter um desempenho ideal dessas máquinas.

Os sistemas lasers de medição compensam, através de software, a temperatura devido ao padrão a calibrar utilizando-se a seguinte equação:

$$L_0 = L_f \times (1 - \alpha \Delta T)$$

onde;

α coeficiente de dilatação térmica do objeto a calibrar °C⁻¹;

L_0 comprimento do objeto a calibrar na temperatura de 20 °C;

L_f comprimento do objeto a calibrar na temperatura de medição (T);

ΔT Desvio da temperatura de medição em relação a 20 °C.

4.2

Erro devido ao Comprimento “Morto”

Entende-se por comprimento “morto” aquele comprimento entre o divisor de feixe e o prisma de medição na sua posição inicial. O sistema laser não interpreta esse comprimento como passível de correção quanto às condições ambientais, o que pode vir a acarretar erros quando as mesmas não forem idênticas àquelas padronizadas. Veja por exemplo, a figura 4.1. O comprimento “morto” do feixe do laser é a distância do divisor de feixe ao ponto inicial “zero” (ponto onde ocorre a inicialização do mostrador digital ou “reset” do laser).

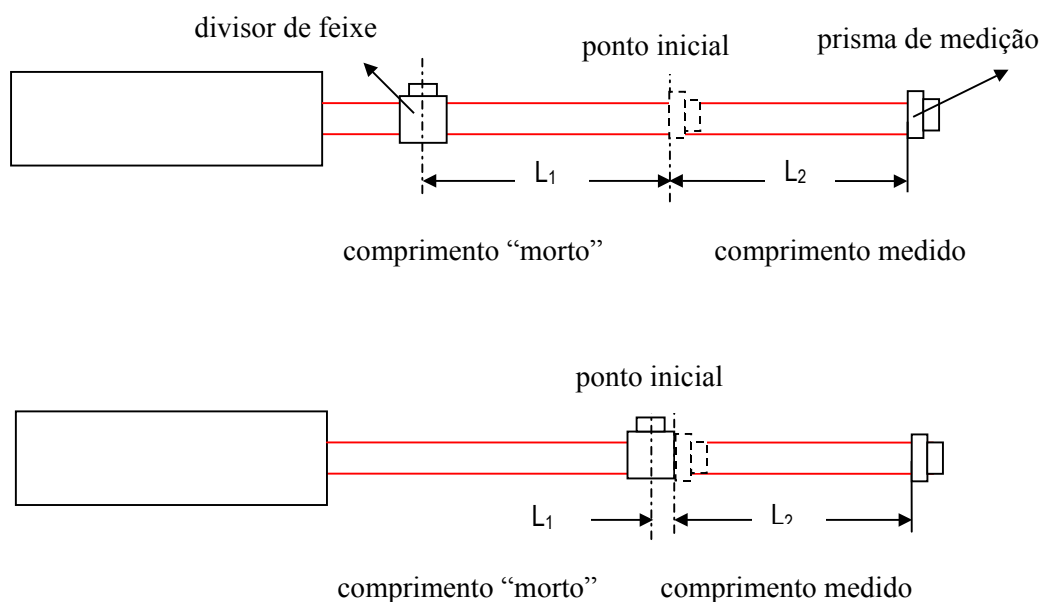


Figura 4.1 – Exemplos de comprimento “morto”

De outra maneira, pode-se dizer que o erro de comprimento “morto” é um erro devido à não compensação do comprimento de onda no caminho geométrico do feixe do laser, devido às alterações nas condições ambientais próximas ao mesmo e ainda devido à dilatação térmica do objeto a calibrar, onde estão montados os componentes óticos.

Supondo que haja variações nas condições ambientais (pressão atmosférica, temperatura do ar e umidade do ar) próximas ao feixe do laser e que o divisor de feixe e o prisma de medição não se movam relativamente, então o comprimento

de onda irá variar em função do comprimento total (L_1+L_2). Neste caso, o sistema de compensação do laser corrigirá o comprimento de onda em relação ao comprimento medido L_2 , e não fará correção para o comprimento L_1 .

Se, simultaneamente ocorrer variação na temperatura de medição, haverá mudança na relação física entre o divisor de feixe e o prisma de medição, devido à dilatação do objeto a calibrar. Então a compensação do sistema laser, devido à variação da temperatura do objeto a calibrar, só corrigirá o comprimento L_2 .

Assim, erros significativos podem ocorrer quando o arranjo de medição não permitir que o divisor de feixe e o ponto inicial de medição, fiquem próximos um do outro. Nos sistemas mais modernos, o software interno de correção permite que se informe o valor do comprimento “morto”, que o utiliza também para cálculo da correção.

Nesta dissertação, entretanto, isso não estava disponível. Além disso, os componentes ópticos no arranjo de medição não puderam ser dispostos de forma a eliminar o erro devido ao comprimento “morto”, por conta de limitações físicas do dispositivo de deslocamento. O comprimento “morto” para o arranjo de medição desta dissertação foi de 100 mm. A seguir são apresentados os cálculos para correção dos erros de comprimento “morto”.

4.2.1

Comprimento “morto” devido ao comprimento de onda

Para o cálculo do erro de comprimento “morto”, foi levada em consideração a condição extrema, que ocorreu quando o desvio de temperatura nas proximidades do caminho do feixe do laser em relação a 20 °C, foi de 3,0 °C, o que, por sua vez, provoca uma variação no comprimento de onda do laser ($\Delta\lambda$) de aproximadamente $0,158 \times 10^{-6}$ μm , conforme o exemplo citado no manual da Hewlett Packard (HP) [5]. Calculou-se esta correção pela seguinte equação:

$$\varpi_c = L_{lc} \times \Delta\lambda$$

onde,

ϖ_c erro de comprimento “morto” devido ao comprimento de onda (μm),

L_{lc} comprimento “morto” em quantidade de comprimentos de onda;

$\Delta\lambda$ desvio do comprimento de onda (μm).

Considerando-se que o comprimento de onda nominal do laser He-Ne do exemplo é $\lambda_n = 0,632 \mu\text{m}$ e $L_{lc} = 100000$, tem-se:

$L_{lc} = 100000 \mu\text{m} / 0,632 \mu\text{m} = 158228$ de comprimentos de onda (antes da variação das condições ambientais).

Aplicando-se a equação, tem-se que:

$$\varpi_c = L_{lc} \times \Delta\lambda = 158228 \times 0,158 \times 10^{-6} = 0,0250 \mu\text{m}$$

ou seja, o comprimento medido L_1 deve ser corrigido de $0,0250 \mu\text{m}$.

4.2.2

Comprimento “morto” devido à dilatação térmica

Considerando a condição extrema, que ocorreu quando o desvio da temperatura do objeto em relação a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, foi de $3,0 \text{ }^\circ\text{C}$, conforme o mesmo exemplo citado acima, calculou-se esta correção pela seguinte equação:

$$\varpi_o = L_{lo} \times \alpha \times \Delta T$$

ϖ_o = erro de “comprimento morto” devido a dilatação térmica do objeto a calibrar;

α = coeficiente de dilatação térmica do objeto a calibrar (bloco de aço)

$$11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C};$$

ΔT = desvio da temperatura do objeto em relação $20 \text{ }^\circ\text{C}$;

$L_{lo} = 100000 \mu\text{m}$ (antes da variação de temperatura do objeto)

Então,

$$\varpi_o = L_{lo} \times \alpha \times \Delta T$$

$$\varpi_o = 100000 \mu\text{m} \times 11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 3,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\varpi_o = 3,45 \mu\text{m}$$

ou seja, o comprimento medido L_1 deve ser corrigido de $3,45 \mu\text{m}$.

Portanto a correção total do comprimento medido L_1 para cada laser é a soma dos erros devido à dilatação térmica e ao comprimento de onda do laser:

$$\varpi_T = \varpi_c + \varpi_o = 3,475 \mu\text{m}.$$

Como se trata de um processo de medição comparativo, as correções dos erros de comprimento “morto” devido ao comprimento de onda, são consideradas iguais para o sistema-referência e para o sistema-objeto, pois os comprimentos “mortos” são os mesmos para os dois lasers, para o arranjo desta dissertação. É muito provável que os desvios em relação à temperatura de referência de 20 °C, sejam também iguais, devido ao isolamento térmico. Pode-se supor então, que esses erros sejam de mesma ordem e que na comparação dos lasers sejam eliminados.

As correções dos erros de comprimento “morto” devido à dilatação térmica são consideradas iguais para os dois lasers pois, como mencionado em 3.3.1, foi utilizado um bloco-padrão de aço para simular um objeto em calibração. Portanto o coeficiente de dilatação utilizado para realizar a correção é o mesmo para os dois lasers. Pode-se supor que os desvios de temperatura em relação a 20 °C, captado pelos sensores de monitoramento da temperatura dos lasers no bloco-padrão, sejam iguais, e é muito provável que os erros tenham magnitudes iguais e que na comparação sejam minimizados.

4.3

Turbulência do Ar

Um dos fatores mais importantes a ser considerado durante a montagem ou instalação de um sistema laser de medição é a turbulência do ar, também chamada heterogeneidade do ar, que, em um caminho geométrico, é causada pela variação da temperatura do ar. Seu maior efeito é a redução do sinal de medição no fotodetector. Esta redução é devido ao espalhamento do feixe do laser ou uma degradação da coerência do feixe. Se a turbulência do ar é excessiva, isto pode resultar em perda completa do sinal de medição, o que é detectado pela interface eletrônica.

A turbulência é causada por uma não uniformidade da temperatura do ar, resultado da mistura do ar novo, insuflado pelo sistema de refrigeração de ar, com o ar existente. Como o ar é um péssimo condutor de calor, qualquer tentativa de mudança da temperatura do ambiente por aquecimento ou resfriamento do ar, causa uma não-uniformidade da temperatura. Portanto pequenas flutuações

podem causar degradação do sinal de medição e, conseqüentemente, a instabilidade do sistema laser.

Em condições ambientais não controladas, os efeitos da turbulência do ar podem ser minimizados através de uma proteção ao feixe de medição, o que pode ser feito por uma cobertura do tipo caixa, como a utilizada neste trabalho.

4.4

Erro devido ao Alinhamento “Erro Co-seno”

A ausência de alinhamento no trajeto do feixe do laser em relação ao eixo do dispositivo de deslocamento resulta em um erro entre o comprimento medido e o comprimento deslocado. Este erro é chamado erro co-seno, pois a dimensão deste é proporcional ao co-seno do ângulo do desalinhamento.

Quando o feixe do laser está desalinhado em relação ao eixo do deslocamento do dispositivo, o erro co-seno causará uma diferença entre o comprimento deslocado M e comprimento verdadeiro convencional L .

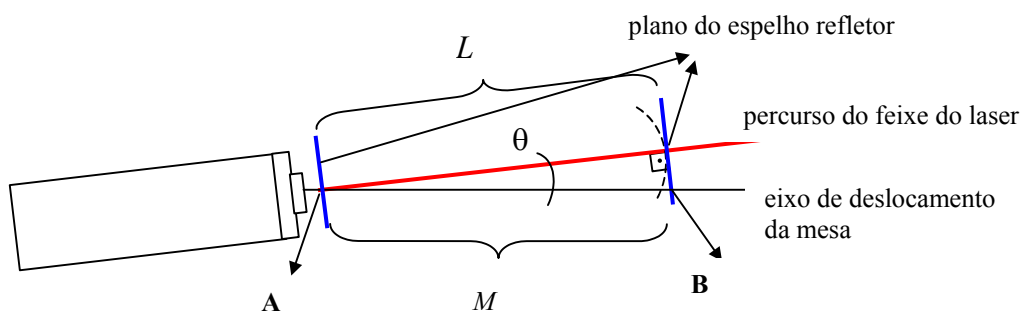


Figura 4.2 - Representação do erro co-seno com espelho plano

Se o plano do espelho é usado como um refletor, então o trajeto do feixe do laser deve ser perpendicular ao plano deste espelho quando é realizado um alinhamento.

Quando o dispositivo se move da posição A para B, o feixe do laser permanece perpendicular ao plano do espelho, mas haverá uma translação transversal da superfície do espelho, conforme mostrado na figura 4.2. Nota-se que L é menor que M .

O mesmo erro acontece quando é introduzido um prisma de medição ao invés do espelho plano (veja figura 4.3).

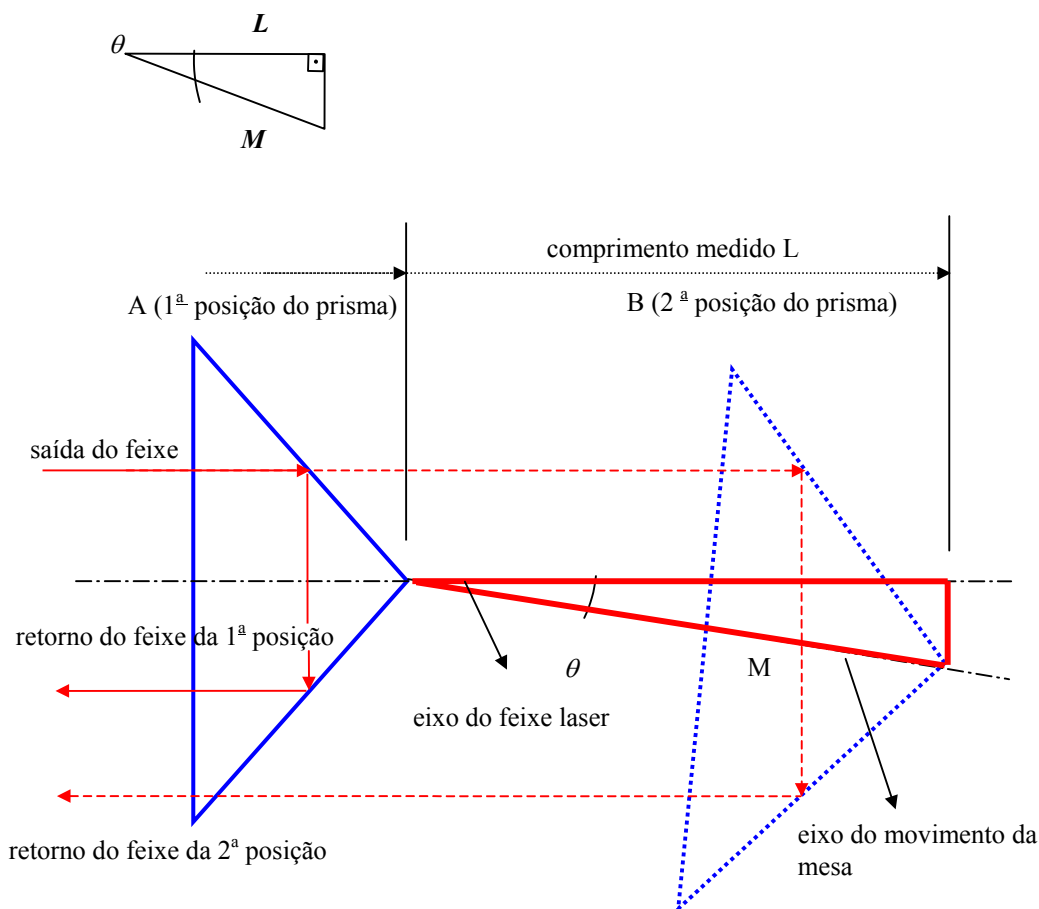


Figura 4.3 – Representação do erro co-seno com prisma de medição

O feixe do laser refletido no prisma de medição retorna deslocado em relação ao eixo movimento da mesa. Desde que o caminho geométrico dentro do prisma de medição seja o mesmo, independente do ponto de entrada, o laser medirá o deslocamento do ponto A na direção do feixe do laser. Então o erro co-seno resulta em um comprimento medido pelo laser L menor que o comprimento deslocado M .

Sendo θ o ângulo de inclinação do alinhamento entre os comprimentos L e M a equação que calcula o erro co-seno é a apresentada a seguir:

$$\cos \theta = \frac{L}{M}$$

Sendo ξ o erro "cosseno", então tem - se :

$$\xi = \frac{M - L}{M} = 1 - \cos \theta = \frac{\theta^2}{2}$$

Sendo θ em radianos

Tabela 2 - Erro co-seno versus ângulo de inclinação do alinhamento

θ		ξ
grau	radianos	
0,001	$1,7 \times 10^{-5}$	$1,52 \times 10^{-10}$
0,01	$1,7 \times 10^{-4}$	$1,52 \times 10^{-8}$
0,08	$1,7 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-6}$
0,1	$1,7 \times 10^{-3}$	$1,52 \times 10^{-6}$
1	$1,7 \times 10^{-2}$	$1,52 \times 10^{-4}$

Uma outra forma de se calcular o erro co-seno é a apresentada no manual do fabricante [4], baseando-se na seguinte relação :

$$\xi = \frac{S^2}{8L^2}$$

onde ,

S distância entre os feixes de referência e de medição no alvo do cabeçote (veja figura 4.4);

L comprimento medido.

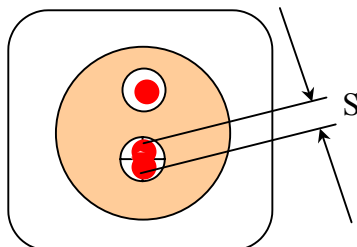


Figura 4.4 – Distância S entre os feixes de referência e de medição

O resultado de ξ é dado em ppm e para calcular o erro co-seno absoluto deve-se multiplicar o valor ξ pelo valor de L . Nesta forma de cálculo do erro co-seno, o operador tem que ter muita experiência para se estimar corretamente a distância S . Esta forma é muito usada em medições de comprimentos maiores, pois à distância S torna-se mais perceptível ao olho humano.

O laser dispõe de um dispositivo indicador para medir o sinal de medição, e este dispositivo tem o objetivo de avaliar a condição de alinhamento dos feixes. O sinal de medição é máximo, quando o divisor de feixe e o prisma estão alinhados lateralmente de forma que o feixe de referência do divisor de feixe e o feixe de medição do prisma retornam recombinados exatamente sobre o mesmo ponto no centro do alvo localizado na abertura do fotodetector. Se a recombinação dos feixes dos lasers não estiver centrada no fotodetector, então o sinal de medição torna-se mais fraco.

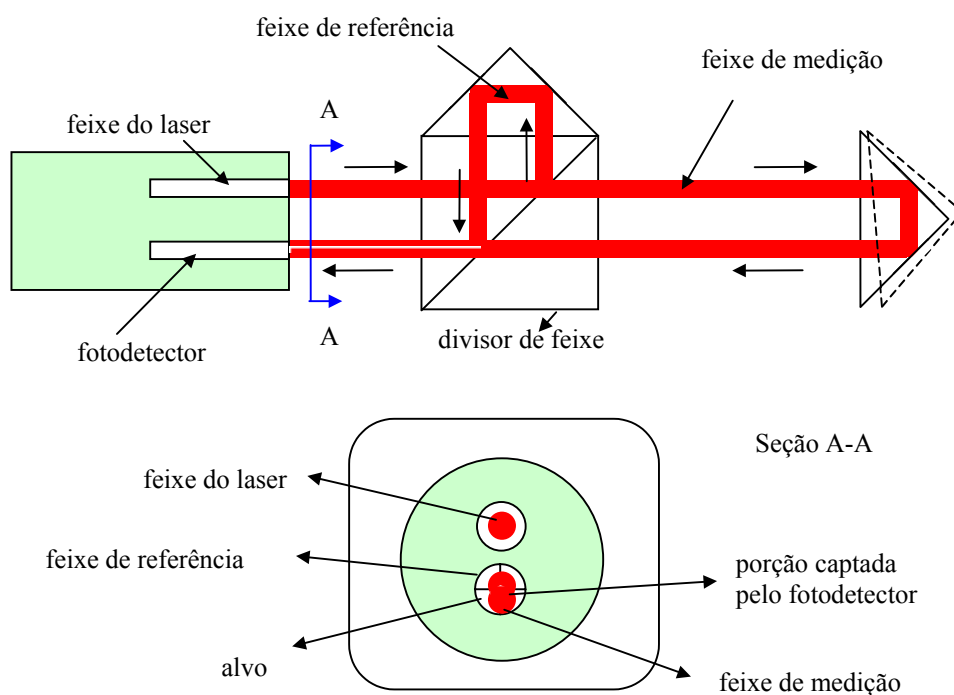


Figura 4.5 - Efeito óptico do desalinhamento do feixe do laser

Para o comprimento máximo do curso de medição, um sinal de medição no máximo não garante que o eixo de medição esteja alinhado, portanto o erro co-seno pode não ser mínimo.