

**Medidor de espessura a laser de baixo custo para o controle de qualidade em tempo real
da fabricação de placas e folhas**

**Low-cost laser measurement gauge for real-time quality control of boards and sheets
production**

**Medidor de espesor laser de bajo costo para el control de calidad en tiempo real de la
fabricación de planchas y hojas**

Recebido: 28/07/2020 | Revisado: 02/08/2020 | Aceito: 05/08/2020 | Publicado: 13/08/2020

Marlene Correa Henrique

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5321-7655>

Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa, CEETEPS, Brazil

E-mail: marlene.c.henrique@gmail.com

Luiz Felipe Gonçalves Dib

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6787-5408>

Faculdade de Tecnologia de São Paulo, Brasil

E-mail: lfgdib@fatecp.br

Eduardo Acedo Barbosa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1107-9933>

Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa, CEETEPS, Brazil

E-mail: ebarbosa@fatecsp.br

Resumo

Este artigo descreve a concepção, o desenvolvimento e testes de um protótipo de dispositivo simples e versátil para a medição de micro-deslocamentos e controle de espessuras de folhas de papel e filmes de materiais plásticos em geral, opacos ou transparentes, durante o processo de produção. O dispositivo baseia-se no fenômeno da triangulação, usando feixes de laser de diodo vermelho de baixa potência para as medições e fotodiodos de Silício de baixo custo para a detecção da luz. Foi avaliada a reprodutibilidade do sistema, bem como realizadas simulações experimentais para a medida de variações de espessuras de fitas adesivas. Os resultados mostram que o medidor é capaz de detectar e medir ou variações na espessura do filme inferiores a 5 µm em tempo real e pode ser facilmente implantado em um sistema de produção.

Palavras-chave: Laser; Triangulação; Sensores de posição; Fotodetectores.

Abstract

This paper describes the conception, the development and the testing of a prototype of a simple and versatile device for micro displacement measurement and thickness monitoring of paper sheets and opaque or transparent plastic films during their fabrication. The device works based on triangulation using low power red diode laser beams for the measurements and low-cost Silicon photodiodes for light detection. The system reproductibility was evaluated as well as experimental simulations for thickness variation detection on adhesive tapes were carried out. The results showed that the gauge is capable to detect and measure thickness variations smaller than 5 μm in real time and can be easily implemented in a production system.

Keywords: Laser; Triangulation; Position sensors; Photodetectors.

Resumen

Este artículo describe el proyecto, desarrollo y pruebas de un protótipo de un dispositivo simple y versátil para medir micro desplazamientos y controlar el espesor de hojas de papel y películas de materiales plásticos en general, opacos o transparentes, durante el proceso de producción. El dispositivo se basa en el fenómeno de triangulación, utilizando hazes láser de diodo rojos de baja potencia para mediciones y fotodiodos de silício de bajo costo para la detección de luz. Se evaluó la reproducibilidad del sistema, así como se hicieron simulaciones experimentales para medir las variaciones de espesor de cintas adhesivas. Los resultados muestran que el medidor es capaz de detectar y medir variaciones en el espesor de la película de menos que 5 μm en tiempo real y puede desplegarse fácilmente en un sistema de producción.

Palabras clave: Láser; Triangulación; Sensores de posición; Fotodetectores.

1. Introdução

Os equipamentos convencionais que medem a espessura de filmes durante sua manufatura usam fontes radioativas como o cobalto, o irídio, o céσιο e o amerício. Eles baseiam-se na medição da atenuação da intensidade da radiação à medida que esta penetra no material a ser medido (Swanson 1997, Kumar et al, 2017). Quanto maior é a espessura, maior é a atenuação.

Os dispositivos que utilizam estas fontes são largamente utilizados na manufatura de plásticos e de papel, para o controle de qualidade da espessura do filme em tempo real.

Apesar de largamente utilizados na indústria, estes equipamentos requerem condições extremamente restritivas e exigentes de operação, no que concerne à legislação de proteção radiológica. Seja no transporte especializado, seja na instalação, no treinamento do pessoal destinado à sua operação, e nas medidas de radioproteção local, a aquisição do equipamento necessariamente exige uma série de medidas para atender às normas impostas pela CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) (CNEN, 2019). A necessidade de enquadramento do usuário à legislação, desta forma, implica em um acréscimo significativo no orçamento total para a operação do medidor.

As técnicas que medem espessuras, deslocamentos e vibrações valendo-se do comportamento geométrico de um feixe de luz que incide sobre a superfície estudada apresentam qualidades em comum aos métodos nucleares convencionais: tratam-se de métodos não invasivos e não destrutivos, de alta reprodutibilidade e confiabilidade (Gasvik, 2002; Donadello *et al.*, 2019).

Fontes de luz laser produzem feixes de geometria extremamente comportada e conservam suas características a longo termo, apresentando, portanto, baixos níveis de ruído. Diferentemente das fontes nucleares, porém, a radiação laser usada nestes ensaios não oferece riscos à saúde nem dos operadores mais próximos, requerendo, se tanto, algumas medidas simples de proteção ocular. Esta característica faz dos equipamentos a laser sistemas muitíssimos mais fáceis de implementar e operar, e com custos muito inferiores. Dois tipos de medição utilizando *spots* laser merecem atenção, o que se vale da variação do tamanho do *spot* com incidência normal sobre o objeto estudado, e o que utiliza o princípio da triangulação, que serão brevemente descritos a seguir.

O método proposto por Remo (1995) na medida de amplitudes de vibração com lasers de diodo vale-se da variação do tamanho do *spot* laser formado quando a superfície estudada é iluminada. Esta variação gera uma alteração da intensidade da luz coletada num detector de estado sólido. Neste caso, a incidência do laser sobre a superfície não é oblíqua, mas normal, e utiliza-se um feixe convergente, focalizado justamente na superfície em estudo. A medida torna-se mais sensível, quanto maior a potência da lente utilizada, de modo a garantir que o feixe focalize-se sobre a superfície em distâncias mais curtas, gerando feixes de maior convergência. O sistema pode ser calibrado de modo que a intensidade a luz detectada responda de forma linear em relação aos deslocamentos da superfície.

A técnica de triangulação a laser proporciona, por sua vez, medidas de deslocamento fora do plano com grande precisão e exatidão (Ji e Leu, 1988; Zhuang et al 1995; Zhang et al, 2008), inclusive em alvos de baixa refletividade. Este método consiste na projeção oblíqua de

um feixe laser sobre a superfície em estudo e a determinação da posição da imagem do *spot* formado sobre um sensor.

No caso da medição de deslocamentos ou de relevos, a luz refletida (ou espalhada) pela superfície é coletada por um arranjo CCD linear ou bi-dimensional e a distância entre a superfície e o detector é computada determinando-se o tamanho do *spot* formado no sensor. Este princípio pode ser também utilizado para o controle e a medição de espessura de folhas opacas, posicionando-se dois cabeçotes de medição um em cada face da folha estudada. Outra configuração possível do método de triangulação consiste em se avaliar o deslocamento sofrido pelo *spot* gerado pelo deslocamento da superfície estudada, ou, equivalentemente, durante a alteração do nível da superfície devido a uma variação de espessura. Um esquema deste arranjo está mostrado na Figura 1: a alteração do nível da superfície causa a mudança da posição do *spot*. A imagem deste é formada, com o auxílio de uma lente, sobre um sensor de posição (*position sensitive device*, ou PSD), de modo a registrar a sua posição no momento inicial. Quando o nível se altera, a imagem do *spot* formada no PSD também se altera, o que permite a determinação do movimento da superfície. O sistema deve ser então calibrado para garantir a linearidade entre o sinal do PSD e o deslocamento da superfície. Sensores tipo PSD unidimensionais são extremamente úteis para medidas por triangulação laser (Wang et al, 2017; Cui et al, 2010; Massari et al, 2002). Entretanto, seu custo é relativamente elevado e os trâmites para sua importação são mais restritivos do que os relacionados à maioria dos itens científicos e tecnológicos.

Diante do exposto acima, o dispositivo desenvolvido neste trabalho visa à utilização de fotodiodos simples, de baixo custo e facilmente disponíveis no mercado para a sua utilização em sistemas de triangulação. Além desta vantagem operacional, os fotodiodos utilizados permitem combinar a um só tempo os efeitos de triangulação e de variação do tamanho do *spot*, aumentando assim a sensibilidade do dispositivo. O funcionamento do dispositivo bem como o seu arranjo óptico foram descritos, e dois experimentos foram realizados e seus resultados analisados no intuito de simular situações de medida em processos produtivos.

2. Materiais e Métodos

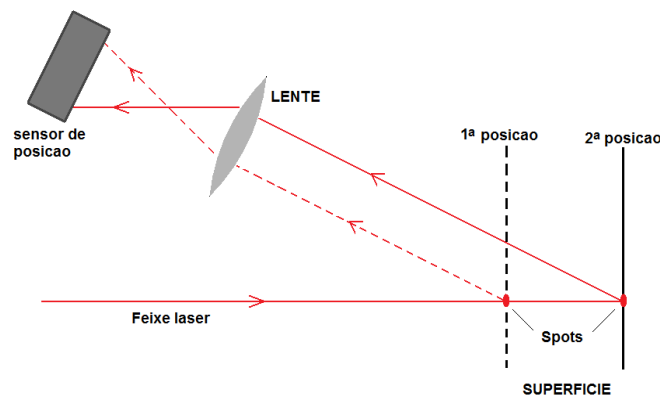
Para a descrição do desenvolvimento do trabalho foi realizada inicialmente uma pesquisa bibliográfica para posterior análise teórico-conceitual dos fenômenos e princípios nos quais se baseia o funcionamento do nosso dispositivo. A seguir, fizemos uma abordagem

laboratorial de natureza quantitativa (Pereira et al, 2018). Utilizamos a análise teórica sobre o comportamento da propagação da luz para construir um arranjo óptico que pudesse fornecer dados experimentais que corroborassem a proposta do modelo físico-matemático proposto. Relatamos a montagem e a descrição dos itens que compõem o protótipo do dispositivo controlador de espessuras, desenvolvido no Laboratório de Óptica Aplicada da Faculdade de Tecnologia de São Paulo.

2.1 Descrição teórica do princípio do medidor

O princípio da triangulação está representado na Figura 1, para avaliar o deslocamento sofrido pela imagem de um ponto laser (*spot*) gerado pelo deslocamento da superfície analisada. Inicialmente, a imagem deste é formada por uma lente positiva sobre o fotodetector, de modo a registrar sua 1ª posição no momento inicial. Quando o nível da superfície varia, a imagem formada no sensor também se altera, o que permite a detecção de mudança de posição (2ª posição na Figura 1) da superfície. Calibrando-se o sistema, determina-se o deslocamento da superfície (Gasvik, 2002; Ji e Leu, 1988).

Figura 1. Esquema óptico de medida de deslocamentos por triangulação.

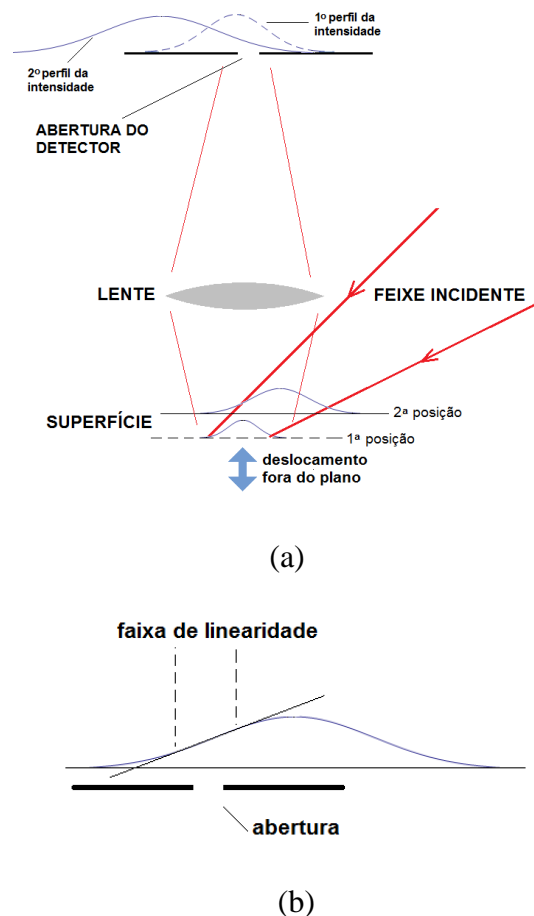


Fonte: Os autores.

Para que a medição de deslocamentos seja também sensível à variação do tamanho do *spot*, é necessário que a imagem deste seja significativamente maior que a área de coleta do fotodetector, como mostra esquematicamente a Figura 2. No dispositivo, o feixe passa antes por uma lente positiva, convergindo, portanto, sobre a superfície. Além disso, o feixe incide de maneira oblíqua sobre a superfície medida. Desta forma, há uma combinação de dois efeitos: quando a superfície se desloca, por movimento do corpo ou por variação da espessura

de um filme, ocorre não somente a variação do tamanho do *spot*, como também o deslocamento deste devido à incidência rasante do feixe. Com esta combinação de efeitos, a intensidade da luz coletada em um fotodetector torna-se mais sensível a variações de nível da superfície medida. Esta sensibilidade pode ser acentuada fazendo-se a imagem do *spot* sobre o fotodetector através de um sistema óptico de alta magnificação (Remo, 1995). A Figura 2a mostra que a imagem do *spot* sobre o detector é feita por uma lente positiva, alinhada de modo que a imagem do *spot* seja significativamente maior do que a área da abertura do detector. Quando a superfície desloca-se da 1ª posição (mostrada pela linha pontilhada), aproximando-se da lente até a 2ª posição (linha cheia), a intensidade sobre o detector varia devido ao deslocamento do feixe (deslocamento do pico gaussiano em relação à abertura do detector da Fig. 2a) e também devido à diminuição da sua intensidade, representada no alargamento da função gaussiana na região de detecção.

Figura 2. a - Princípio da combinação dos efeitos de focalização e de triangulação para a medida de posição; b - Região de linearidade da intensidade luminosa sobre a área útil do detector.



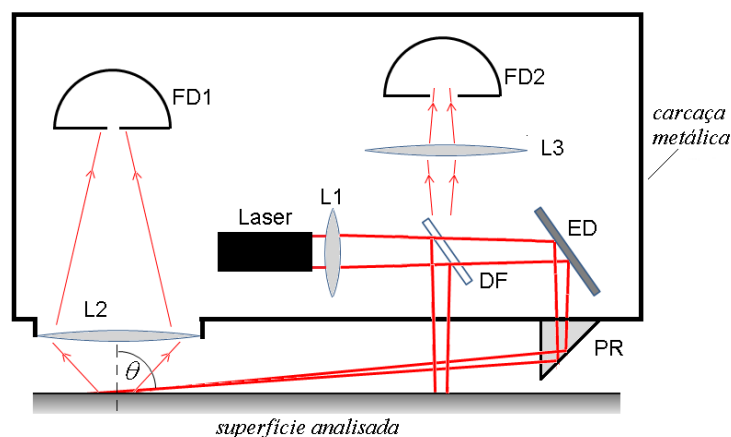
Fonte: Os autores.

O perfil gaussiano típico do feixe laser permite que a área de coleta do detector situe-se numa região da imagem do *spot* de forma a garantir uma relação linear entre a intensidade detectada e a variação de nível da superfície, como mostrado na Figura 2b. Baseado neste princípio, o medidor de espessuras e deslocamentos com feixe referência permite a utilização de detectores de estado sólido mais simples, de custo mais baixo, e fartamente disponíveis no mercado.

2.2 Desenvolvimento experimental – componentes e montagem do dispositivo

O protótipo do dispositivo controlador de espessuras, cujo arranjo óptico é mostrado na Figura 3, tem como fonte de luz um laser de diodo de potência 5 mW emitindo luz vermelha ($\lambda=650\text{nm}$), com feixe de seção transversal circular. Logo após o laser de diodo, utiliza-se a lente convergente L1 para convergir o feixe e iluminar a superfície analisada. Com o auxílio do prisma reto PR, o feixe laser incide obliquamente sobre a superfície e de forma rasante, de maneira a formar um *spot* de geometria aproximadamente elíptica, que gera o sinal de medida, com intensidade I_S . Em decorrência da incidência rasante do feixe, a posição do *spot* elíptico é muito sensível aos movimentos da superfície fora do plano, ou seja, perpendiculares a ela. Como o feixe é convergente, o tamanho do *spot* varia de forma significativa à medida que a superfície avança ou recua ao longo deste eixo. Junto à região iluminada, posiciona-se uma lente objetiva L2, que forma a imagem do *spot* sobre o fotodiodo FD1.

Figura 3. Montagem óptica do medidor. L1 a L3, lentes; FD1 e FD2, fotodiodos; ED, espelho de dobra, DF, divisor de feixes; PR, prisma reto.



Fonte: Os autores.

Antes de atingir o espelho de dobra, o feixe passa pelo divisor de feixes DF, que direciona a parcela refletida do feixe a outra região da superfície analisada. Neste caso, a incidência deste feixe refletido sobre a superfície é normal, e, portanto, este segundo *spot* tem formato circular e posição que é invariante aos deslocamentos da superfície. A lente referência L3 capta a luz espalhada pelo *spot* circular, depois que esta é transmitida através do divisor. A imagem deste spot é então projetada sobre outro fotodiodo, o detector de referência FD2. Este fotodetector é posicionado em relação à lente referência de forma que a intensidade sobre ele não seja sensível aos deslocamentos da superfície iluminada. Para isso, o detector deve ser posicionado próximo ao ponto focal da lente referência. Nesta posição, o feixe concentra-se todo no detector e tem diâmetro mínimo, sendo menor que a área sensível do fotodetector, de modo a ser completamente coletado por este, mesmo quando a posição do *spot* varia; desta maneira, quando a superfície se desloca, o sinal luminoso de intensidade I_R medido pelo detector de referência não se altera. Desta forma, Se porventura a potência do laser flutua, ou se a cor ou a refletividade da superfície analisada se altera, os sinais I_R e I_S variam à mesma razão, de modo que a razão I_R e I_S permanece a mesma. O medidor é abrigado por carcaça metálica e montado sobre um translador de medidas 150 mm x 150 mm movido por um parafuso micrométrico para fins de calibração da medida.

3. Resultados - Testes de desempenho do medidor

A sensibilidade da medida pode ser ajustada movendo-se o espelho de dobra que direciona o feixe sobre a superfície. O deslocamento ΔX sofrido pela superfície medida e captado pelo detector converte-se no deslocamento fora do plano ΔZ a partir da expressão

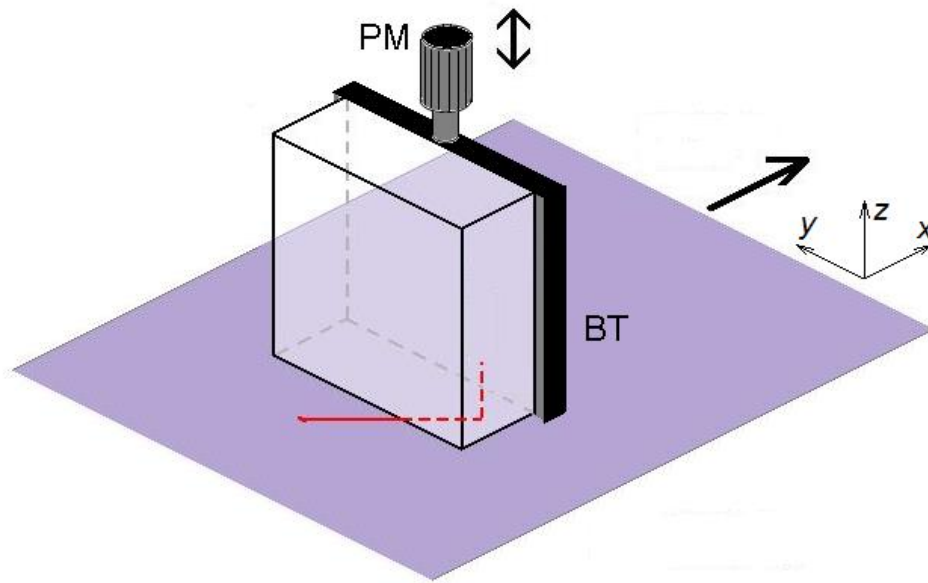
$$\Delta Z = \Delta X \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad (2)$$

onde θ é o ângulo de incidência, formado entre o feixe laser incidente e a reta normal à superfície, mostrado na Figura 3. Pode-se então aumentar a sensibilidade da medida, movendo-se o espelho de dobra para fazer o feixe laser incidir de forma mais rasante sobre a superfície.

Na calibração do medidor de espessuras usa-se o micrômetro da placa base transladora para deslocar o medidor como um todo, enquanto a superfície a ser medida é

mantida estática. Este procedimento emula a situação de medida na qual o medidor mantém-se fixo e o nível da superfície se altera. Isto permite a calibração em ambientes industriais, nos quais a superfície não pode eventualmente ser movimentada de forma controlada. O esquema da base transladora BT com o parafuso micrométrico PM elevando ou abaixando o medidor sobre a esteira rolante está mostrado na Figura 4.

Figura 4. Posição da base transladora BT que eleva ou abaixa o medidor para calibração do sistema por meio do parafuso PM.



Fonte: Os autores.

Os sinais referência I_R e sinal I_S são enviados a um computador por meio de uma interface conversora analógico/digital (PicoLog) e combinados através de um software de processamento. Desta maneira, a medida da posição Z da superfície será dada por

$$Z = \frac{1 I_S}{k I_R}, \quad (3)$$

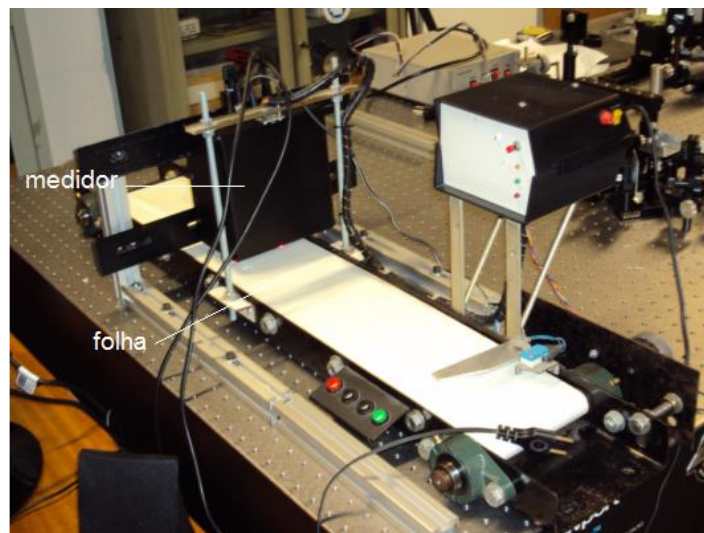
onde k é a constante de calibração, que converte a grandeza relativa e adimensional I_S/I_R em uma medida de posição, no caso, dada em milímetros. Fazendo-se então deslocamentos sucessivos do medidor em relação a uma superfície estática, plana e lisa, obtém-se um gráfico de I_S/I_R em função do deslocamento, de onde se obtém o valor da

constante de calibração $k=217\text{mm}$. Se a razão I_S/I_R varia, por exemplo, de 10 % (algo facilmente mensurável no sistema de aquisição usado), isso corresponde a um deslocamento de $\Delta z = 0,1/2,17 = 0,046\text{ mm}$. Note-se que, uma vez determinado o valor da constante k , a medida do ângulo de incidência torna-se desnecessária.

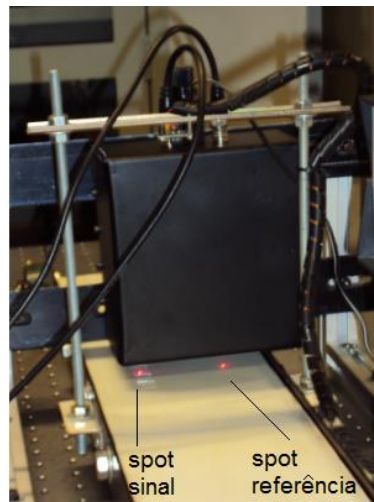
3.1 Controle da espessura de uma folha de couro sintético em movimento

Esta seção visa reproduzir a situação de campo na qual a espessura de uma folha opaca é controlada ou monitorada durante a sua manufatura. No sistema mostrado na Figura 5, uma esteira rolante feita de uma folha de couro sintético movida por um motor DC corre sob o medidor a uma velocidade de 4,5 cm/s, num movimento cíclico com período de 38 s. O medidor é posicionado a uma distância de 19 mm da folha, e foi ajustado de modo a fornecer medidas de moderada sensibilidade. A folha de couro sintético, no ponto de incidência do feixe sinal, passou esticada sobre uma placa lisa de aço, não mostrada na Figura 5, de modo a garantir que as eventuais variações da posição medida devem-se exclusivamente às características de relevo e espessura da folha, e não a eventuais oscilações mecânicas desta.

Figura 5. a - Posicionamento do medidor sobre uma esteira rolante; b – *spots* formados pelo feixe sinal (à esquerda) e pelo feixe referência.



(a)

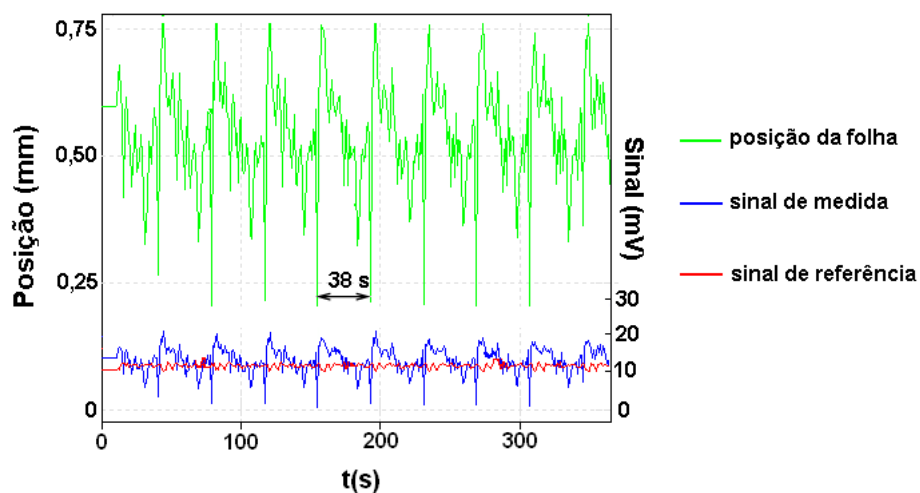


(b)

Fonte: Os autores.

O gráfico da Figura 6 mostra a evolução da posição da região da folha iluminada pelo *spot* em função do tempo, com os valores do sinal I_S (curva azul), da referência I_R (curva vermelha) e da posição $K^{-1}I_S/I_R$ (curva verde), em milímetros. Observa-se nitidamente que o processo é um fenômeno cíclico, por repetir-se a cada 38 s. Os picos marcantes da curva verde, tanto máximos quanto mínimos, referem-se aos pontos da emenda da folha, em que ocorrem desníveis acentuados, da ordem de 0,5 mm. Pela linha vermelha nota-se também que o valor da referência manteve-se constante ao longo de todo o tempo, apesar da variação do sinal I_S .

Figura 6. Sinais de medida (linha azul, em mV), de referência (linha vermelha, em mV) e de posição, (linha verde, em mm) da superfície de couro sintético passando sob o medidor.

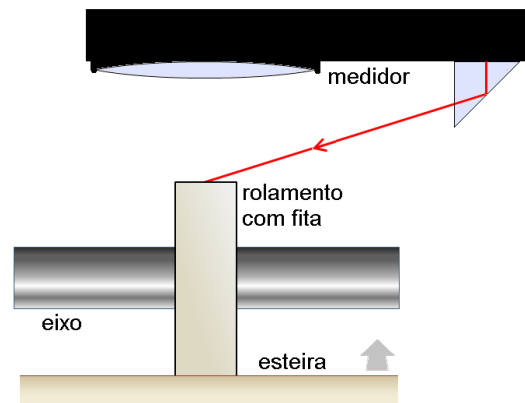


Fonte: Os autores.

3.2 Simulação do controle da espessura de uma fita adesiva

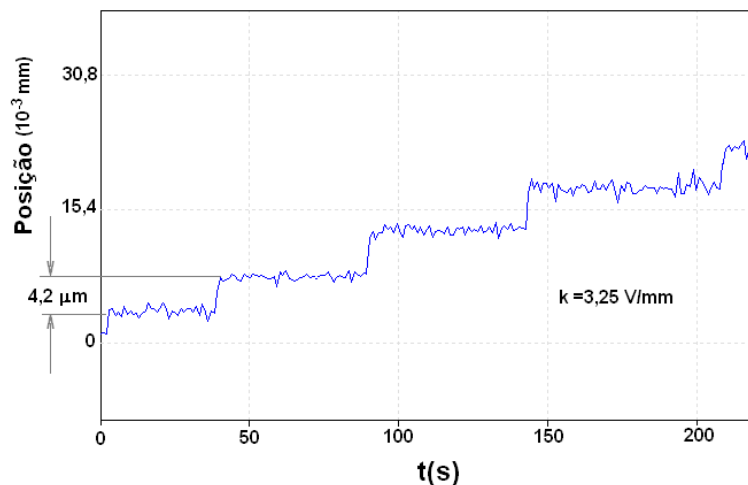
Para uma avaliação quantitativa da sensibilidade do medidor de espessuras, este foi ajustado de forma a trabalhar numa configuração de maior sensibilidade para simular a detecção da variação da espessura de uma fita adesiva tipo dupla face. Neste caso, devido à pequena largura da fita, não foi possível utilizar o feixe referência, o que não foi prejudicial à medida, já que a fita adesiva era de coloração e refletividade uniformes em todo seu comprimento. Utilizou-se uma incidência mais rasante para tornar o medidor mais sensível, de forma que a constante de calibração obtida foi $k = 3,25 \text{ mm}^{-1}$. Para a medida, um rolamento de diâmetro $\sim 35 \text{ mm}$ foi coberto com uma volta completa de fita dupla face, tomando-se o cuidado de evitar qualquer desnível no encontro das duas extremidades da fita. Pelo diâmetro interno do rolamento encaixou-se um eixo cilíndrico que foi posicionado sob o medidor. O rolamento foi posto em contato sobre a esteira, de modo poder rolar sobre ela. O conjunto está mostrado esquematicamente na Figura 7. Quando a esteira foi posta em movimento, o rolamento passou a girar com velocidade angular constante de 30 rpm, o que conferiu à fita uma velocidade tangencial de 11 cm/s. O aumento da espessura da fita adesiva foi simulado aplicando-se pequenos e sucessivos avanços de 4 μm ao conjunto medidor através do parafuso micrométrico, em períodos de aproximadamente 55 s. O gráfico da Figura 8 mostra os diferentes patamares do nível da fita adesiva a cada avanço do parafuso micrométrico, durante a rotação do rolamento. Esta simulação experimental mostra que a sensibilidade do sistema permite a medida da variação de espessuras da fita da ordem de 4,2 μm , segundo a calibração do sistema. Nota-se também que no período em que o sistema permaneceu estático, o sinal de posição manteve valores constantes, conforme o esperado. O ruído optoeletrônico notado nestes patamares de valor constante sugere que saltos de menores valores também podem ser medidos, o que não foi realizado devido às limitações da base transladora.

Figura 7. Posicionamento do rolamento com fita adesiva sob o medidor e incidência do feixe laser sobre a fita.



Fonte: Os autores.

Figura 8. Níveis da fita adesiva em relação ao medidor.



Fonte: Os autores.

4. Considerações Finais

O princípio, o desenvolvimento e o desempenho de um protótipo de medidor de deslocamentos e espessuras de filmes em processos dinâmicos foram descritos e analisados. Este sistema apresenta uma solução original para tornar a medida universal quanto à coloração e refletividade da superfície medida, com o uso de um feixe de medida de incidência rasante, de alta sensibilidade à posição da amostra, e de um feixe referência de incidência normal, de baixa sensibilidade posicional. Isso confere ao conjunto a possibilidade de trabalhar com dois fotodiodos simples e de baixo custo atuando como detectores

luminosos, dispensando os detectores tipo PSD, mais custosos e menos disponíveis comercialmente. O feixe referência garante que o sistema forneça a mesma medida da posição, mesmo com eventuais flutuações da potência do laser, ou com mudanças ocorridas na superfície analisada.

A combinação de dois efeitos sensíveis à posição da amostra medida, a saber, a variação de intensidade luminosa sobre o detector devido à abertura numérica do feixe incidente, e a iluminação da amostra sob incidência rasante, permite ao sistema apresentar alta sensibilidade, precisão e reprodutibilidade.

A focalização do feixe laser exatamente sobre o ponto a ser medido na superfície permite que o sistema meça a espessura de qualquer material, seja opaco, seja transparente, uma vez que, ainda que o laser tenha baixa potência, a intensidade da luz sobre a superfície é relativamente alta. Desta forma, o espalhamento gerado por um material, mesmo que transparente, é capaz de gerar intensidades luminosas para a detecção de um sinal de valor suficiente para a medição. O medidor também pode monitorar a espessura de materiais lisos e de rugosidade moderada, como tecidos e folhas de papelão.

Os resultados apresentados neste trabalho apontam para outras prováveis aplicações do sistema desenvolvido neste trabalho. Como o dispositivo medidor presta-se basicamente a detectar e medir deslocamentos, ele pode ser também utilizado para a medida em tempo real de vibrações de máquinas e equipamentos, além de permitir a análise de desbalanceamento de rotores. Para tanto, seriam necessários alguns ajustes de sensibilidade da medida através de mudanças no ângulo de incidência e na velocidade de aquisição dos dados.

Referências

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear, ver, por exemplo, <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/transporte/documentos/MANUAL-EXPLICATIVO-Anexo-I-PGT.pdf>, acessado em 27/07/2020.

Cui, S. & Soh Y. C. (2010). Linearity Indices and Linearity Improvement of 2-D Tetra-Lateral Position Sensitive Detector. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 57 (9) 2310-2316, 2010. <https://doi:10.1109/LENS.2018.2835669>

Donadello, S., Motta, M., Memir, A. G. & Previtali, B. (2019). Monitoring of Laser Metal Deposition Height by Means of Coaxial Laser Triangulation, *Optics and Lasers In Engineering* 112. 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.09.012>

Gasvik, K. (2002). *Optical Metrology*, Wiley, New York.

Ji, Z., & Leu, M. C. (1989). Design Of Optical Triangulation Devices. *Optics And Laser Technology*, 21(5), 335-8. [https://doi.org/10.1016/0030-3992\(89\)90068-6](https://doi.org/10.1016/0030-3992(89)90068-6)

Kumar, M., Udhayakumar, J., Nuwad, J., Shukla, R., Pillai, C. G. S., Dash A. & Venkatesh M. (2011) Development of a ^{147}Pm Source for Beta-Backscatter Thickness Gauge Applications. *Applied Radiation and Isotopes*, 69 (3), 580-7. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2010.11.026>

Nicola Massari, N., Gonzo, L., Gottardi, M., & Simoni, A. (2002). High Speed Digital CMOS 2D Optical Position Sensitive Detector. *Proceedings of the 28th European Solid-State Circuits Conference*, Florence, Italy, 2002, pp. 723-726.

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da Pesquisa Científica*. [e-book]. Santa Maria. UAB/NTE/UFSM.

Remo, J. L. (1996). Solid State Optic Vibration/Displacement Sensors. *Optical Engineering*, 35, 2798-2803. <https://doi.org/10.1117/1.600963>

Swanson, F. R. Thickness measurement gauge. US Patent 5.666.394 (1997).

Wang, W.-H., Du, R.-X, Guo, X.-T., Jiang, J., Zhao, W.-W., Ni, Z.-W., Wang, X.-R., You, Y. M., & Ni, Z.-H. (2017). Interfacial Amplification for Graphene-Based Position-Sensitive-Detectors, *Light: Science & Applications*, 6, E17113; <https://doi:10.1038/Lsa.2017.113>

Zhang, Z., Feng, Q., Gao, Z., Kuang, C., Fei, C., Li, Z. & Ding, J. (2008). A New Laser Displacement Sensor Based on Triangulation for Gauge Real-Time Measurement, *Optics & Laser Technology*, 40 252. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2007.04.009>

Zhuan, B. H., Zhang, J.-H., Jiang, C., Li, Z. & Zhang, W. (1995). Precision Laser Triangulation Range Sensor with Double Detectors for Measurement on CMMs. *Proceedings of SPIE 2349, Industrial Optical Sensors for Metrology and Inspection*. <https://doi.org/10.1117/12.198697>

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Marlene Correa Henrique – 35 %

Luiz Felipe Gonçalves Dib – 35 %

Eduardo Acedo Barbosa – 30 %