

Plataforma Tátil com Sensores Multiplexados de Macrocurvatura em Fibra Ótica

Vinicius de Carvalho, Marcos Aleksandro Kamizi, Diogo Lugarini, José Luís Fabris, Marcia Muller
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - CPGEI

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Curitiba, Brasil

Resumo— Neste trabalho são apresentadas as etapas de produção e testes de uma plataforma tátil instrumentada com sensores de macrocurvatura em fibra ótica instalados sob uma placa de polimetilmetacrilato. O sensoriamento da magnitude e posição de forças aplicadas em até quatro regiões de sensoriamento da plataforma é realizado por meio do sinal ótico de transmissão de três sensores de macrocurvatura multiplexados conectados em série. A interrogação é realizada por meio da câmera de um smartphone que detecta a luz visível transmitida pelo conjunto de sensores. A capacidade de detecção foi testada aplicando tanto individualmente quanto simultaneamente cargas de 0,5 kgf a 2,0 kgf em quatro regiões distintas da superfície da placa. Os resultados indicam a capacidade de identificação de até quatro cargas aplicadas sobre a superfície da placa para um número de regiões de sensoriamento maior do que o número de sensores.

Palavras chave—sensoriamento tátil; macrocurvatura; sensor ótico; fibra ótica; multiplexação

I. INTRODUÇÃO

As fibras óticas têm sido amplamente utilizadas como componentes no desenvolvimento de novas tecnologias de sensoriamento em aplicações que envolvem a medição de parâmetros físicos variados, como deformação, temperatura, pressão, vibração, aceleração, rotação, curvatura e torção [1].

Além das suas vantajosas características intrínsecas, como imunidade eletromagnética, flexibilidade, dimensões reduzidas, resistência térmica e passividade elétrica, as fibras óticas podem ser facilmente encapsuladas [2], o que tem contribuído para a disseminação da tecnologia de sensoriamento baseada nesta classe de dispositivos. Outra questão a ser considerada é a capacidade de multiplexação, característica importante que possibilita a interrogação simultânea de vários sensores conectados em um único enlace de fibra ótica [3].

Os sensores à fibra ótica têm potencial para aplicação em sistemas robóticos [4], uma vez que permitem o desenvolvimento de sistemas de sensoriamento nos quais matrizes de sensores são utilizadas na monitoração de um ou mais parâmetros. Sistemas capazes de monitorar a magnitude e

a posição de forças atuando sobre superfícies são de interesse na avaliação da integridade de estruturas e máquinas, pois auxiliam na detecção de parâmetros físicos associados ao estresse mecânico [5]-[6].

Dentre os sensores à fibra ótica mais simples encontram-se aqueles baseados em macrocurvatura, cuja operação baseia-se na modulação da intensidade luminosa transmitida resultante de alterações na curvatura da fibra ótica [7]-[9]. Apesar da simplicidade de interrogação, as características da propagação modal têm desestimulado a aplicação destes sensores em sistemas mais complexos [10].

A capacidade de multiplexação de sensores de macrocurvatura, produzidos pela encapsulação em silicone de anéis de fibra ótica, foi relatada recentemente na literatura em sistemas interrogados com luz visível usando um smartphone [11] e um espectrômetro [12]. Nesses trabalhos, os sistemas foram testados quanto à capacidade de detecção da localização e magnitude de forças aplicadas diretamente sobre os sensores.

No presente trabalho, três sensores de macrocurvatura em fibra ótica, encapsulados individualmente em silicone e conectados em série, instrumentam uma placa de polimetilmetacrilato (PMMA) formando uma plataforma tátil. Testes preliminares foram realizados para determinar a capacidade do sistema de identificar a magnitude e posição de forças aplicadas tanto individualmente quanto simultaneamente sobre a placa. Nesta configuração contendo três sensores, as forças são aplicadas em até quatro áreas de sensoriamento. Assim, a resposta acoplada dos mesmos é utilizada na identificação da magnitude e localização da força aplicada.

II. METODOLOGIA

A. Sistema Sensor

Cada elemento sensor foi fabricado a partir de um anel de fibra ótica (SSMF, G-652, Draktel), com raio de curvatura de $(2,50 \pm 0,05)$ mm encapsulado em silicone (Dow Corning, BX3-8001). O encapsulamento protege o anel contra rompimento da fibra e facilita a fixação dos sensores no sistema [9]. Após a encapsulação, os elementos sensores

cilíndricos possuem diâmetro de $(27,00 \pm 0,05)$ mm e altura de $(8,00 \pm 0,05)$ mm.

Para a montagem da plataforma tátil foram utilizadas duas placas quadradas de PMMA com 10 cm de lado e 0,5 cm de espessura. Os três elementos sensores foram dispostos entre as duas placas formando um triângulo equilátero com aproximadamente 6 cm de lado. No diagrama esquemático da Fig. 1 é indicado o posicionamento dos sensores na plataforma tátil, assim como o arranjo de interrogação do sistema. O sinal ótico transmitido pelos sensores de macrocurvatura conectados em série e captado pelo smartphone.

Com o intuito de aumentar a transferência das forças aplicadas sobre a placa para os sensores, foi inserido um cilindro metálico entre a placa e cada sensor, diminuindo assim a área de contato. Os cilindros metálicos foram posicionados no centro da base de cada cilindro de silicone, portanto sobre o anel de fibra. Os elementos metálicos com diâmetro de $(7,00 \pm 0,05)$ mm e altura de $(3,00 \pm 0,05)$ mm foram fixados ao silicone com cola à base de cianoacrilato.

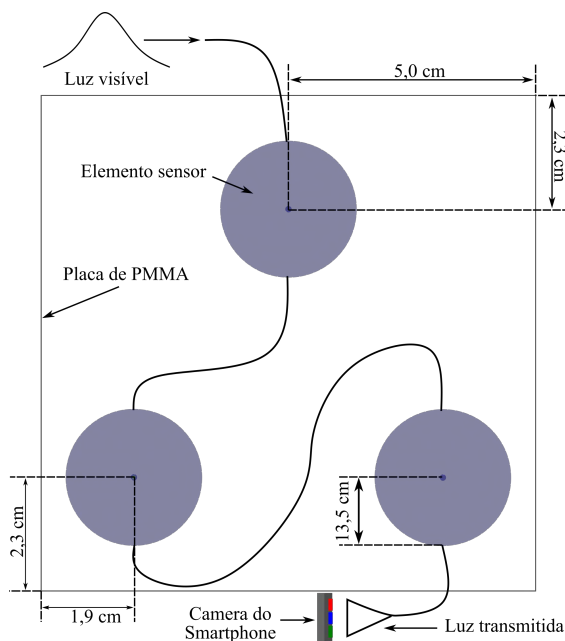


Fig.1. Diagrama esquemático do sistema indicando o posicionamento dos sensores na plataforma tátil, o sinal ótico acoplado a fibra e o smartphone usado para interrogar o conjunto.

As duas placas de PMMA que constituem a base (placa inferior) e a plataforma tátil (placa superior), foram fixadas formando uma estrutura na qual os elementos sensores estão levemente pressionados entre as placas. A Fig. 2 mostra um diagrama esquemático e a foto da plataforma tátil.

B. Metodologia de Testes

A plataforma tátil foi testada para as 4 áreas de sensoriamento indicadas na Fig.2. Sobre estas áreas foram aplicadas tanto individualmente quanto simultaneamente forças de 0,5 kgf, 1,0 kgf, 1,5 kgf e 2,0 kgf. É importante salientar que como são 3 elementos sensores e 4 áreas de sensoriamento, as localizações das cargas aplicadas não coincidem necessariamente com as posições dos sensores.

Do espaço amostral total de 1024 configurações de carga possíveis, 87 combinações foram escolhidas aleatoriamente e 17 foram definidas previamente. Entre estas 17 configurações pré-definidas, está a configuração inicial que corresponde à plataforma livre de carga.

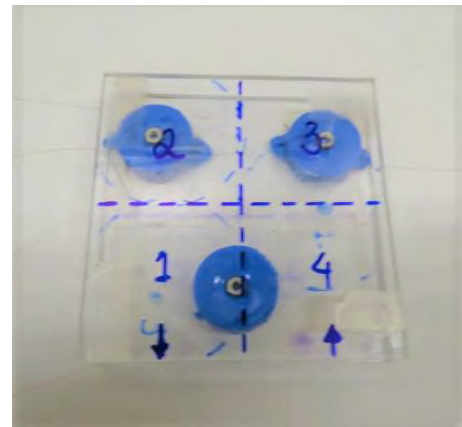
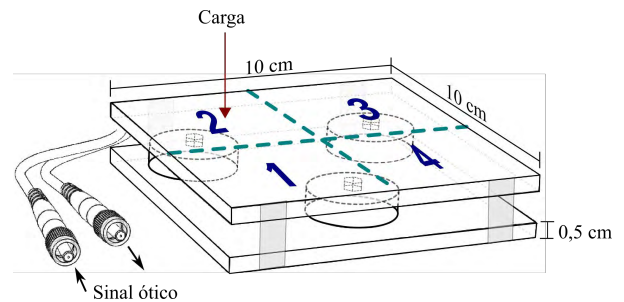


Fig.2. Diagrama esquemático e foto da plataforma tátil instrumentada com os sensores de macrocurvatura.

As outras 16 configurações pré-definidas correspondem às situações nas quais apenas uma das áreas de sensoriamento está sujeita a uma determinada carga externa.

Durante o experimento, cada configuração de cargas foi mantida sobre a plataforma por 10 s resultando em 300 imagens gravadas com uma taxa de 30 Hz. Após este intervalo de tempo, as cargas eram removidas e outra configuração era aplicada sobre a plataforma. A capacidade do sistema de detectar a carga e a sua localização foi testada em temperatura controlada de $(21,0 \pm 0,5)$ °C.

C. Coleta e Processamento do Sinal Ótico

No arranjo experimental da Fig.2, o conector FC/PC de entrada do sistema de sensoriamento tátil é conectado a uma fonte ótica visível de banda larga (LS-1, Ocean Optics, 360 a 2000 nm), enquanto que o conector de saída é instalado em um posicionador que permite direcionar a luz transmitida para a câmera de um smartphone.

O tempo de exposição e a focalização da imagem foram determinados em experimentos prévios, para evitar a saturação da intensidade ao longo dos testes com diferentes configurações de cargas.

As imagens captadas pela câmera durante os ensaios são transferidas para um computador e por meio de um algoritmo de detecção de borda executado no Matlab® extraem-se

valores médios de intensidade dos pixels para cada um dos canais *RGB*. Estes valores são utilizados como sinal de saída da plataforma tátil. A Fig. 3 exibe dois exemplos de imagens captadas e decompostas nas componentes *RGB*.

Por fim, as intensidades médias para os canais *RGB* são tratadas como coordenadas espaciais *x*, *y* e *z* e associadas às combinações discretas de cargas utilizadas.

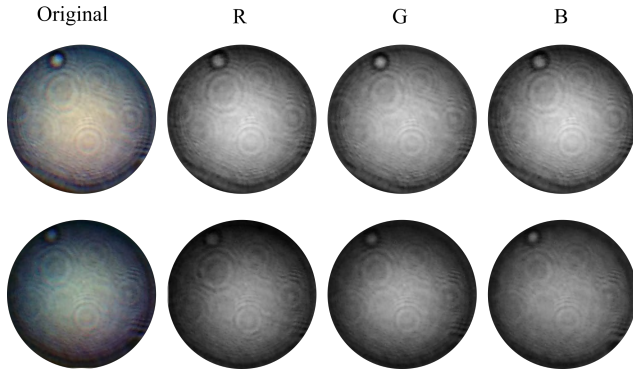


Fig.3. Amostra de imagens captadas pela câmera do smartphone. As imagens monocromáticas são referentes aos canais vermelho, verde e azul respectivamente.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 4 apresenta a resposta do sistema quando cargas de 0,5 kgf, 1,0 kgf, 1,5 kgf e 2,0 kgf são aplicadas individualmente sobre a plataforma tátil. Os eixos *x*, *y* e *z* correspondem às intensidades médias dos pixels captadas nos canais *RGB* para as 16 configurações de cargas pré-definidas. Os números ao lado dos pontos experimentais indicam a área, de acordo com a Fig.2, na qual a carga é aplicada. Verifica-se que com a alteração da carga sobre uma dada área de sensoriamento a distribuição da intensidade do sinal entre os canais varia. Portanto, a decomposição do sinal ótico transmitido, que é resultante da resposta dos 3 elementos sensores à perturbação externa, possibilita a identificação da carga que é aplicada em uma dada região previamente conhecida. Observa-se também que o sistema fornece respostas distintas quando uma mesma carga é aplicada em diferentes regiões. Portanto, conhecendo-se a carga, é possível identificar a posição em que ela é aplicada. O mapeamento de intensidades fornecidas pelo gráfico da Fig. 4 mostra que, para as 16 configurações que correspondem a aplicação de uma única carga na plataforma, não ocorre superposição para configurações distintas. Ou seja, o conjunto formado pelas intensidades médias dos pixels nos canais *RGB*, tratados como coordenadas espaciais *x*, *y* e *z*, são diferentes para cada configuração de carga.

A fim de verificar a resposta do sistema para configurações que implicam na aplicação simultânea de cargas em 2, 3 ou 4 áreas de sensoriamento, foram realizados testes com as 87 configurações geradas aleatoriamente.

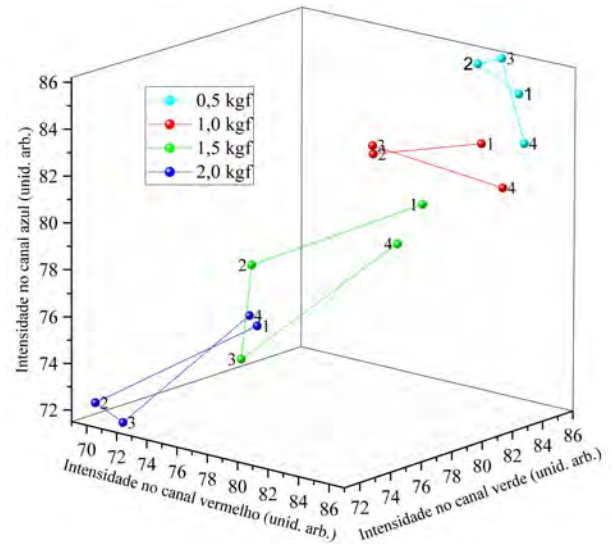


Fig.4. Gráfico 3D das intensidades médias dos pixels nos canais *RGB* das imagens obtidas com as 16 configurações em quais cargas são aplicadas individualmente em cada área de sensoriamento.

A Fig. 5 mostra o mapeamento de intensidades para todas as 104 configurações testadas. A Tabela 1 lista as intensidades médias dos pixels detectadas nos canais *RGB* para 15 configurações de carga distintas. Novamente os resultados apontam para a capacidade do sistema de responder de forma diferenciada para cada configuração. Observa-se que, para as 104 configurações testadas, não há superposição significativa dos pontos. Este comportamento aponta para a possibilidade de extrair informações relacionadas à posição e ao valor de cargas atuantes sobre a plataforma tátil, desde que o processo seja acompanhado por um método adequado de tratamento de dados. No entanto, a escolha adequada dos parâmetros construtivos do sistema como, as dimensões da plataforma, o número de sensores e sua sensibilidade e o número de áreas de sensoriamento são determinantes para a aplicação desejada.

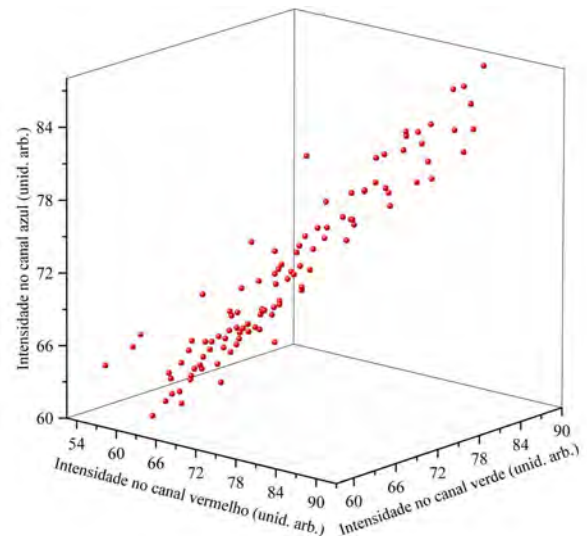


Fig.5. Gráfico 3D das intensidades médias dos pixels nos canais *RGB* das imagens obtidas com todas as 104 configurações de cargas testadas.

TABELA I. ALGUMAS CONFIGURAÇÕES DE CARGA APLICADAS SOBRE A PLATAFORMA TÁTIL.

Cargas nas áreas (kgf)				Intensidade nos canais (unid. arb.)		
1	2	3	4	R	G	B
1,5	0,0	0,0	1,5	66,97008	68,71940	70,53038
0,0	0,0	1,0	0,5	73,40184	74,63685	77,38828
0,0	0,5	2,0	0,5	66,23580	66,50702	63,06156
0,0	0,5	0,0	1,0	79,62023	81,86537	82,59824
0,0	1,0	0,5	0,5	70,39017	70,74556	72,15546
0,0	1,0	0,0	1,5	72,95130	71,39796	72,62850
0,5	1,5	0,0	2,0	62,97596	65,79054	63,88381
0,0	1,5	2,0	0,0	63,35347	63,34116	62,52948
0,0	2,0	0,5	1,0	66,32156	67,91971	68,31984
0,5	0,0	0,0	1,5	75,71268	77,96033	77,93059
0,5	0,0	2,0	1,5	61,11661	61,60398	60,55605
0,5	1,5	1,0	0,0	67,16523	68,31871	66,96656
1,0	0,0	0,5	1,0	72,83651	75,34652	75,04831
1,0	0,5	1,5	0,0	68,37007	69,98622	67,05619
1,5	0,0	0,5	0,5	74,48512	76,03686	76,00309

IV. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho apontam para a possibilidade da realização de sensoriamento tátil com a plataforma desenvolvida. O fato do sistema conter um número de sensores menor do que o número de áreas de sensoriamento indica a capacidade do sistema em realizar um sensoriamento *quasi*-distribuído utilizando um número reduzido de sensores.

A natureza dos sensores torna o conjunto experimental de baixo custo e de fácil fabricação. Além dos sensores de macrocurvatura, apenas uma fonte de luz na região do visível e um smartphone são necessários.

A faixa dinâmica de operação pode ser ajustada de acordo com as demandas da aplicação, por meio da alteração das características físicas dos sensores como raio de curvatura ou escala de dureza do polímero de silicone, e da escolha do número de sensores e dimensões da plataforma.

Estudos estão em andamento buscando a modelagem do sistema a fim de tornar possível a identificação da magnitude e posição das cargas em sistemas mais complexos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido das agências de financiamento: Conselho Nacional de Desenvolvimento

Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] H. K. Hisham, "Optical Fiber Sensing Technology: Basics, classification and Applications," *American Journal of Remote Sensing*, vol. 6, no. 1, pp. 1-5, 2018.
- [2] M. Ramakrishnan, G. Rajan, Y. Semenova, and G. Farrell, "Overview of Fiber Optic Sensor Technologies for Strain/Temperature Sensing Applications in Composite Materials," *Sensors*, vol. 16, no. 1, p. 99, Jan. 2016.
- [3] P. Lu, N. Lalam, M. Badar, B. Liu, B. T. Chorpene, M. P. Buric, P. R. Ohodnicki, "Distributed optical fiber sensing: review and perspective," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 6, 041302, 2019.
- [4] K. C. Galloway, Y. Chen, E. Templeton, B. Rife, I. S. Godage, and E. J. Barth, "Fiber Optic Shape Sensing for Soft Robotics," *Soft Robotics*, vol. 6, no. 5, pp. 671-684, 2019.
- [5] P. Nazarko, L. Ziemianski, "Force identification in bolts of flange connections for structural health monitoring and failure prevention," *Procedia Structural Integrity*, v. 5, p. 460-467, 2017..
- [6] W. Lu, J. Teng, Q. Zhou and Q. Peng, "Stress prediction for distributed structural health monitoring using existing measurements and pattern recognition," *Sensors*, v. 18, n. 2, p. 419, 2018.
- [7] A. T. Moraleta, C. V. Garcia, J. Z. Zaballa, and J. Arrue, "A temperature sensor based on a polymer optical fiber macro-bend," *Sensors*, vol. 13, no. 10, pp. 13076-13089, 2013.
- [8] K. V. Madhav, Y. Semenova, and G. Farrell, "Macro-bend optical fiber linear displacement sensor," *Proc. SPIE*, vol. 7726, 2010, Art. no. 772608.
- [9] K. Alemdar, S. Likoglu, K. Fidanboyulu, and O. Toker, "A novel periodic macrobending hetero-core fiber optic sensor embedded in textiles," in *Proc. 8th Int. Conf. Elect. Electron. Eng. (ELECO)*, Bursa, Turkey, 2013, pp. 467-471, doi: 10.1109/ELECO.2013.6713886.
- [10] S. H. Nam and S. Yin, "High-temperature sensing using whispering gallery mode resonance in bent optical fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 11, pp. 2391-2393, Nov. 2005.
- [11] M. A. Kamizi, M. A. Pedroso, J. L. Fabris, and M. Muller, "Smartphone technology applied in an approach for multiplexing of fibre optic intensity-modulated macro-bend based sensors," in *Proc. 26th Int. Conf. Opt. Fiber Sens.*, 2018, paper TuE8.
- [12] M. A. Kamizi, D. Lugarini, R. Fuser, L. H. Negri, J. L. Fabris, M. Muller, "Multiplexing Optical Fiber Macro-Bend Load Sensors," *Journal of Lightwave Technol.*, vol. 37, no. 18, pp. 4858-4863, 2019.