



Avanços recentes sobre sensores baseados em fibras ópticas de núcleo oco no Brasil

Jonas H. Osório¹ e Cristiano M. B. Cordeiro²

¹ Universidade Federal de Lavras (UFLA);

² Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

jonas.osorio@ufla.br e cmbc@ifi.unicamp.br

RESUMO: As fibras de cristal fotônico de núcleo oco (HCPCFs) se consolidam atualmente como tecnologia habilitadora capaz de impulsionar novos avanços desde a pesquisa fundamental até áreas aplicadas. Neste artigo, descrevemos nossas recentes investigações sobre a aplicação de tais fibras como plataformas para o desenvolvimento de novos sensores ópticos. Assim, apresentamos o amplo potencial das HCPCFs para atuarem como dispositivos sensores de parâmetros como curvatura, temperatura e deslocamento. Entendemos que os resultados obtidos por nossas pesquisas recentes representam uma contribuição relevante para a expansão do cenário de aplicações das HCPCFs e sublinham o impacto desta categoria de fibras ópticas como plataforma para os novos desenvolvimentos das tecnologias de sensoriamento, ampliando a relevância da pesquisa brasileira nesta área.

Palavras-chave: Fibras ópticas. Fibras de núcleo oco. Sensores. Fibras de cristal fotônico.

ABSTRACT: Hollow-core photonic crystal fibers (HCPCFs) currently consolidate themselves as an enabling technology capable of driving new advancements from fundamental research to applied areas. In this article, we outline our recent investigations into the application of such fibers as platforms for the development of novel optical sensors. We thus describe the broad potential of HCPCFs to act as sensing devices for parameters such as curvature, temperature, and displacement. We understand that the results obtained from our recent research represent a relevant contribution to expanding the scope of HCPCF applications and underscore the impact of this category of optical fibers as a platform for new advancements in sensing technologies, thus enhancing the relevance of Brazilian research in this field.

Keywords: Optical fibers. Hollow-core fibers. Sensors. Photonic crystal fibers.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.16618049>

As fibras de cristal fotônico de núcleo oco (HCPCFs) consistem em fibras ópticas microestruturadas capazes de guiar luz por um núcleo vazio. Nos últimos anos, em decorrência da realização de esforços significativos dedicados à minimização das perdas de transmissão nesta família de fibras, as HCPCFs consolidaram-se como uma tecnologia habilitadora para uma ampla gama de áreas científicas e tecnológicas, abrangendo desde o desenvolvimento de novas fontes ópticas até aplicações em telecomunicações. Notadamente, as HCPCFs representam atualmente a família de fibras ópticas com as menores perdas de transmissão nas faixas do ultravioleta, visível e infravermelho [1, 2].

De fato, a atividade de pesquisa sobre esta família de fibras ópticas tem se mostrado muito aquecida nos últimos anos. Uma busca por artigos na plataforma *Scopus* utilizando-se o termo “*hollow AND core AND fib**” permite obter o gráfico apresentado na Figura 1, que mostra o número de publicações sobre estas fibras em função dos anos. A análise da Figura 1 permite observar um crescimento notável na última década, com o número de publicações passando de 350 em 2013 para 615 em 2023 e alcançando 759 em 2024. Tal interesse se reflete igualmente sobre a área de sensoriamento, dado que uma busca utilizando o termo “*hollow AND core AND fib* AND sens**” revela que as publicações dedicadas a sensores baseados em HCPCFs cresceram de 98 artigos em 2013 para 255 em 2023, alcançando 290 em 2024. Os dados apresentados na Figura 1

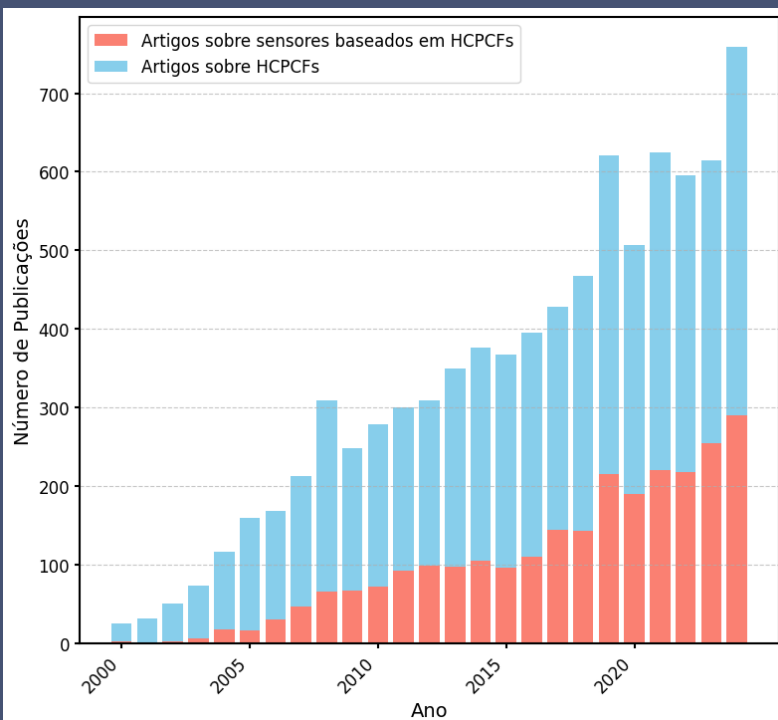


Figura 1. Número de publicações anuais sobre HCPCFs e publicações sobre sensores baseados em HCPCFs segundo a base *Scopus*. A porção inferior de cada barra representa as publicações relacionadas a sensores baseados em HCPCFs enquanto a porção superior indica as demais publicações sobre HCPCFs.

revelam, portanto, o crescente interesse da comunidade científica sobre o campo das HCPCFs e, especialmente, sobre as aplicações na área de sensoriamento.

Neste cenário, o presente artigo visa apresentar os avanços recentes em sensores ópticos baseados em HCPCFs obtidos por nossos grupos de pesquisa no Brasil. Descreveremos, assim, exemplos de plataformas desenvolvidas para a realização de medidas de sensoriamento de parâmetros como curvatura, temperatura e deslocamento. Pretende-se, dessa forma, destacar a relevância de tais contribuições neste campo e fornecer uma base para futuras investigações e aplicações de HCPCFs em tecnologias de sensoriamento.

Nesse contexto, nos últimos sensores demonstrados em nossas investigações, temos trabalhado com uma estrutura de HCPCF denominada tubular (também conhecida como fibras antirressonantes; uma estrutura representativa é apresentada como *inset* na Figura 2). Tal arquitetura de HCPCF apresenta um conjunto de tubos que define o núcleo oco da fibra e confere o correspondente confinamento dos modos ópticos. Além dos modos de núcleo, esta microestrutura pode suportar modos de casca com distribuição de campo nos anéis de sílica ou em sua região vazia. Ao se trabalhar com o acoplamento entre tais modos e explorar a sensibilidade de tais acoplamentos com relação a parâmetros externos, torna-se possível construir sensores baseados nesta família de fibras. Esta tem sido a proposta de nossos últimos trabalhos, como descreveremos a seguir.

O primeiro tipo de acoplamento que temos explorado consiste naquele observado entre modos de núcleo e modos dos anéis nos comprimentos de onda de ressonância correspondentes. Tais acoplamentos resultam, quando da medida do espectro de transmissão de tais fibras, em regiões de maior atenuação, uma vez que os modos com distribuição de campo nos anéis apresentam maiores níveis de perda. Os comprimentos de onda de alta perda (mínima transmissão), λ_m , são dados pela Equação 1, em que t é a espessura dos tubos, n_{core} e n_{clad} são os índices de refração dos materiais que compõem o núcleo e a microestrutura, respectivamente. Por sua vez, m é um número inteiro que identifica a ordem da ressonância [3].

$$\lambda_m = \frac{2t}{m} \sqrt{n_{clad}^2 - n_{core}^2} \quad (1)$$

Ao se observar a Equação 1, podemos perceber que a posição espectral dos mínimos de transmissão deste tipo de HCPCFs é dependente da variação de parâmetros físicos que impactem nos valores de t , n_{core} ou n_{clad} . Dessa forma, exploramos recentemente tal dependência ao submeter uma HCPCF tubular a variações de temperatura desde a ambiente até 1085 °C. Devido ao efeito termo-óptico, variações de temperatura induzem alterações correspondentes em n_{clad} , implicando no deslocamento espectral das bandas de transmissão (Figura 2) e permitindo caracterizar esta plataforma como um sensor de altas temperaturas. Mais detalhes sobre esta aplicação podem ser encontrados em [3].

A realização de medidas de sensoriamento de temperatura baseados no deslocamento espectral das bandas de transmissão pode também ser realizado quando utilizamos fibras preenchidas com líquidos [4]. Nesse caso, ao se submeter a fibra a variações de temperatura, dado o maior coeficiente termo-óptico dos líquidos em comparação com o do ar, maximiza-se as variações de n_{core} , possibilitando medições de temperatura na faixa ambiente e com sensibilidade aprimorada. Ademais, estudamos o *design* do sensor quando a fibra está parcialmente preenchida [5]. Nesse caso, pode-se obter uma otimização na resolução do sensor ao se diminuir a largura espectral do

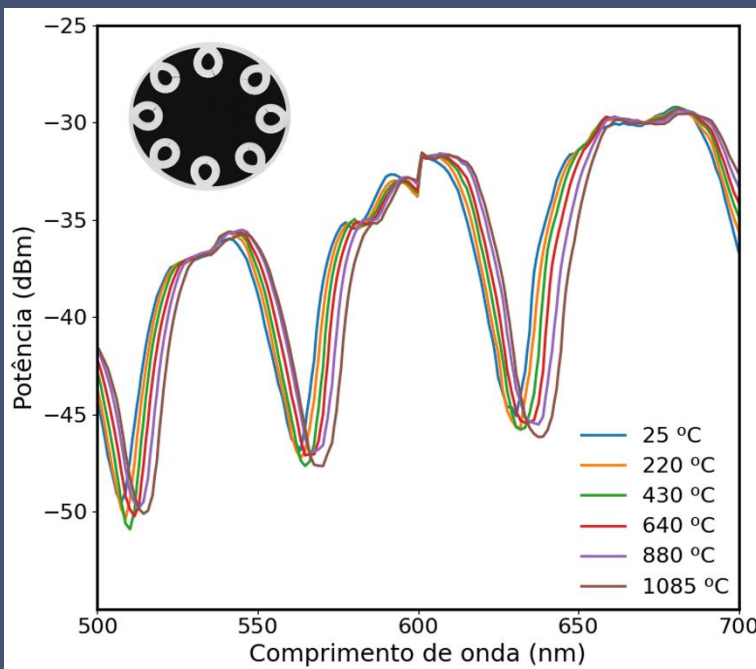


Figura 2. Espectros de transmissão de uma HCPCF tubular medidos durante a aplicação de sensoriamento de alta temperatura. Nota-se que a variação de temperatura faz com que as bandas de transmissão se desloquem espectralmente. A imagem da microestrutura da fibra é apresentada como *inset* [3].

mínimo de atenuação da fibra cujo deslocamento é monitorado durante o estudo das variações de temperatura.

Igualmente, o acoplamento entre modos de núcleo e modos de casca com distribuição de campo na parte oca dos tubos representa uma via promissora para o desenvolvimento de sensores. Tal acoplamento pode ser induzido pela aplicação de curvaturas à fibra. Nesta situação, a curvatura causa variações nos índices de refração efetivos dos modos, permitindo atingir uma situação de acordo de fase entre o modo fundamental guiado pelo núcleo e o modo fundamental da parte oca dos tubos. Tal acoplamento acontece para um raio de curvatura específico, denominado raio crítico [6]. Ademais, este acoplamento ocorre em torno de um comprimento de onda específico, gerando uma banda de alta perda (mínimo de transmissão) no espectro da fibra. Assim, ao se monitorar o deslocamento da posição espectral deste mínimo em função de variações do raio de curvatura, é possível demonstrar novos sensores de curvatura.

Nesse sentido, realizamos dois trabalhos, sendo um primeiro utilizando uma fibra com microestrutura híbrida Kagomé-tubular [7] e outro empregando uma fibra tubular com tubos ultrafinos [8]. Especificamente, a pesquisa reportada em [8], que utilizou uma fibra com banda de transmissão ultralarga, permitiu obter um sensor com um amplo

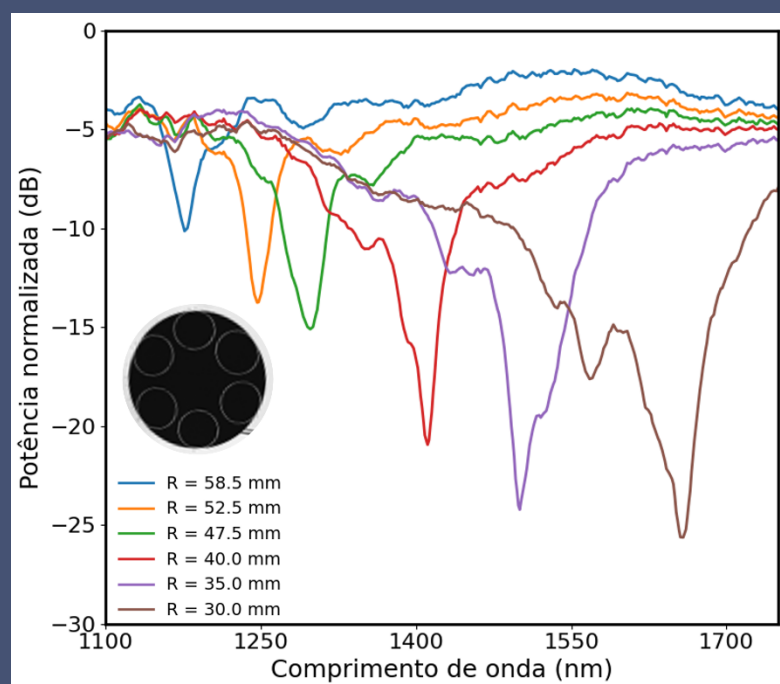


Figura 3. Espectros de transmissão de uma HCPCF de estrutura tubular (*inset*) curvada segundo diferentes raios de curvatura. O vale de transmissão decorre do acoplamento entre o modo fundamental do núcleo e o modo fundamental dos tubos. A variação da curvatura faz com que o mínimo de transmissão se desloque espectralmente [8].

intervalo dinâmico. Espectros representativos obtidos na aplicação reportada em [8] são apresentados na Figura 3. A estrutura da HCPCF utilizada é ilustrada no *inset*.

Ademais, o sensoriamento de curvatura pode ser realizado por meio do monitoramento dos vales de transmissão resultantes dos acoplamentos entre os modos de núcleo e dos tubos de maneira análoga aos sensores de temperatura previamente descritos. Esta proposta permite a realização de sensoriamento de curvatura de forma direcional, ou seja, com a capacidade de identificar a direção da curvatura aplicada. Nesse sentido, uma estratégia promissora envolve o uso de fibras tubulares que possuam tubos de diferentes espessuras dispostos em direções ortogonais na estrutura da fibra [9]. Nessa configuração, o espectro de transmissão é caracterizado pela presença de ressonâncias distintas, cada uma correspondendo a uma espessura de tubo específica. A localização estratégica dos tubos e a correspondente resposta seletiva das ressonâncias em função de variações de curvatura permitem, assim, determinar a magnitude e o ângulo da curvatura aplicada [10].

Por fim, pode-se mencionar a possibilidade da realização de medidas de sensoriamento ao se utilizar HCPCFs com comportamento multimodal. Nesse sentido, desenvolvemos um sensor de deslocamento baseado em uma fibra com microestrutura tubular dotada de um núcleo oco de 140 μm de diâmetro. Neste exemplo, pudemos

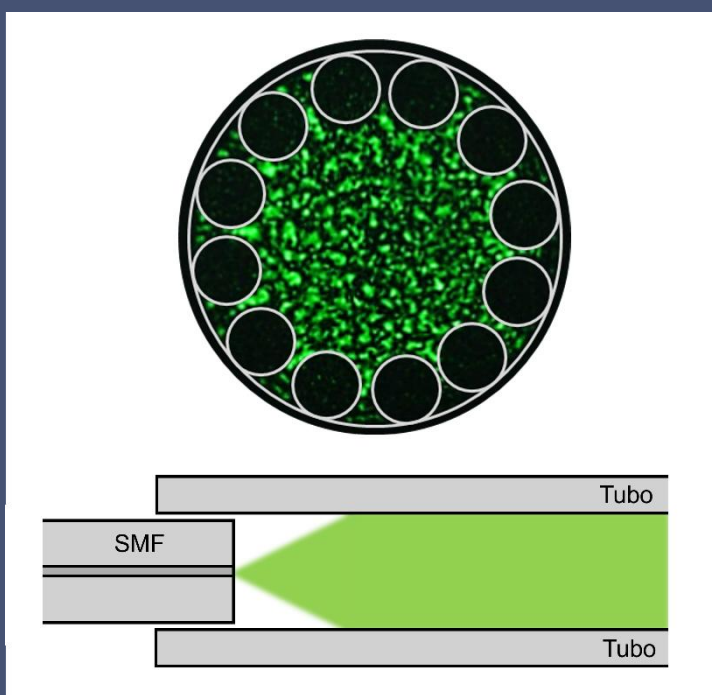


Figura 4. Padrão de *speckle* medido na saída da HCPCF com comportamento multimodal. Para a configuração do sensor de deslocamento, uma SMF foi inserida no interior da HCPCF e o padrão de *speckle* foi avaliado ao passo que a SMF era deslocada no interior da HCPCF [11].

inserir uma fibra monomodo de núcleo sólido tradicional (SMF) no interior da HCPCF, como representado na Figura 4. Conforme demonstrado em [11], ao se fazer uso desta configuração, pudemos obter, na saída da HCPCF, uma distribuição de intensidade com características de um padrão *speckle* (Figura 4). Ao se monitorar este padrão de *speckle* à medida que a fibra de núcleo sólido era deslocada no interior da HCPCF, pudemos demonstrar um sensor de deslocamento com resolução estimada de 0,7 μm .

Em conclusão, neste artigo, pudemos apresentar um panorama dos avanços recentes em sensores ópticos baseados em HCPCFs, com especial ênfase nas contribuições de nossos grupos de pesquisa no Brasil. Detalhamos as características das HCPCFs tubulares e o princípio de sensoriamento baseado no acoplamento entre modos de núcleo e modos de casca. Demonstramos, assim, a versatilidade dessas plataformas ao descrever o desenvolvimento de sensores de temperatura, explorando o efeito termo-óptico em fibras preenchidas com ar e líquidos, e sensores de curvatura, incluindo a capacidade de detecção direcional. Adicionalmente, abordamos a aplicação de HCPCFs multimodais para o sensoriamento de deslocamento, utilizando a análise de padrões de *speckle*. Consideramos, portanto, que os resultados aqui reportados expandem o escopo das aplicações das HCPCFs e reforçam a relevância da pesquisa brasileira no campo da tecnologia de sensores ópticos baseados em fibras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos colaboradores que contribuíram para a realização dos trabalhos aqui descritos, bem como à FAPEMIG (RED-00046-23 e APQ-00197-24), CNPq (309989/2021-3, 305024/2023-0, 402723/2024-4 e 409174/2024-6) e FAPESP (21/13097-9 e 2024/02995-4) pelo apoio financeiro.



REFERÊNCIAS

- [1] J. H. Osório et al., "Hollow-core fibers with reduced surface roughness and ultralow loss in the short-wavelength range", *Nature Communications*, 14, 1146, 2023, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36785-6>
- [2] M. Petrovich et al., "First broadband optical fibre with an attenuation lower than 0.1 decibel per kilometre", *arXiv:2503.21467*, 2025, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.21467>
- [3] G. L. Rodrigues et al., "High-temperature sensing using a hollow-core fiber with thick cladding tubes", *IEEE Sensors Journal*, 24, 16, 2024, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3421896>
- [4] G. L. Rodrigues et al., "Temperature sensing with a liquid-filled hollow-core photonic crystal fiber", 2023 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN) and SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC), 1-2, 2023 <http://doi.org/10.1109/OMN/SBFotonIOPC58971.2023.10230983>
- [5] S. F. G. Júnior et al., "Design of a temperature sensor based on partially filled hollow-core optical fibers", 2024 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC), 1-3, 2024, <https://doi.org/10.1109/SBFotonIOPC62248.2024.10813524>
- [6] M. H. Frosz et al., "Analytical formulation for the bend loss in single-ring hollow-core photonic crystal fibers", *Photonics Research*, 5, 2, 88-91, 2017, <https://doi.org/10.1364/PRJ.5.000088>
- [7] A. D. P. Souza et al., "Curvature sensing with a hybrid-lattice hollow-core photonic crystal fiber", 2023 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN) and SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC), 1-2, 2023, <https://doi.org/10.1109/OMN/SBFotonIOPC58971.2023.10230935>
- [8] J. H. Osório et al., "Hollow-core fiber-based curvature sensor with high sensitivity and large dynamic range", 2024 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC), 1-3, 2024, <https://doi.org/10.1109/SBFotonIOPC62248.2024.10813494>
- [9] C. M. B. Cordeiro et al., "Azimuthally asymmetric tubular lattice hollow-core optical fiber", *Journal of the Optical Society of America B*, 38, 12, F23-F28, 2021, <https://doi.org/10.1364/JOSAB.435630>
- [10] W. M. Guimarães et al., "Angle-resolved hollow-core fiber-based curvature sensing approach", *Fibers*, 9, 11, 72, 2021, <https://doi.org/10.3390/fib9110072>
- [11] J. H. Osório et al., "Displacement sensor based on a large-core hollow fiber and specklegram analysis", *Optical Fiber Technology*, 78, 103335, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103335>