

Fibras ópticas de núcleo oco de nova geração e suas promissoras oportunidades

Jonas H. Osório e Cristiano M. B. Cordeiro
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Nos anos 1990, o conceito de se utilizar fibras ópticas micro-estruturadas revolucionou o campo de atuação desta família de guias de onda. À época, pôde-se demonstrar que a existência de buracos de ar adequadamente dispostos na seção transversal da fibra oferecia um controle de suas propriedades a nível sem precedentes, motivando a realização de uma ampla gama de aplicações inacessíveis a partir do uso de fibras ópticas convencionais. Tais aplicações abrangeram diversas áreas em fotônica, a exemplo do campo da óptica não-linear e o de sensoriamento.

Nesse contexto, uma das implicações mais importantes deste desenvolvimento consistiu na possibilidade de se guiar luz por fibras de núcleo oco com baixos níveis de perda. A proposição deste novo grupo de fibras, historicamente chamadas de fibras de cristal fotônico de núcleo oco, ou *hollow-core photonic crystal fibers* (HCPCFs), remonta ao ano de 1995 e representa uma quebra de paradigmas para a área de fibras ópticas.

Guiar luz através de um núcleo oco com baixa perda inspirou grande expectativa da comunidade científica no sentido da obtenção de fibras potencialmente capazes de superar as limitações das fibras tradicionais, tais como a transmissão de feixes a níveis de potência não toleráveis por fibras de núcleo sólido. Outra limitação a ser superada pelo uso das fibras de núcleo oco seria a transmissão de feixes com comprimentos de onda tais que os meios sólidos fossem virtualmente opacos. Igualmente, especulou-se sobre a possibilidade de as HCPCFs poderem atingir níveis de perda inferiores àqueles

restringidos pelos fundamentais processos de espalhamento nos materiais sólidos.

A primeira geração das HCPCFs, no entanto, ao terem seu guiamento baseado no efeito de *bandgap* fotônico, não pôde corresponder a tais expectativas devido a fatores como a forte superposição entre o modo óptico guiado no núcleo e a microestrutura da fibra, a existência de modos de superfície e o espalhamento de luz devido à rugosidade das membranas que definem o núcleo. Em 2007, entretanto, um novo mecanismo de guiamento, cunhado de acoplamento inibido [1], foi identificado no contexto das HCPCFs, inicialmente em uma estrutura chamada de Kagomé (Fig. 1a). Tal mecanismo se baseia em uma robusta minimização do acoplamento entre os modos de núcleo e os modos suportados pela microestrutura (casca) da fibra, que é atingida ao se reduzir a sobreposição espacial e ao se obter um forte desacordo de fase entre tais modos. Do ponto de vista prático, o espectro de transmissão de tais fibras intercala intervalos de baixa perda (minimização entre os acoplamentos, conforme apontado acima) e regiões de maior atenuação devidas a ressonâncias na microestrutura (cujas posições espectrais dependem das espessuras dos elementos que a compõem).

A compreensão do mecanismo de transmissão de luz pelas HCPCFs permitiu demonstrar o amplo potencial de redução de perdas das HCPCFs com guiamento por acoplamento inibido ante àquelas com guiamento pelo efeito de *bandgap* fotônico e, por conseguinte, motivou nova esperança sobre as potencialidades das HCPCFs perante as fibras ópticas tradicionais, principalmente

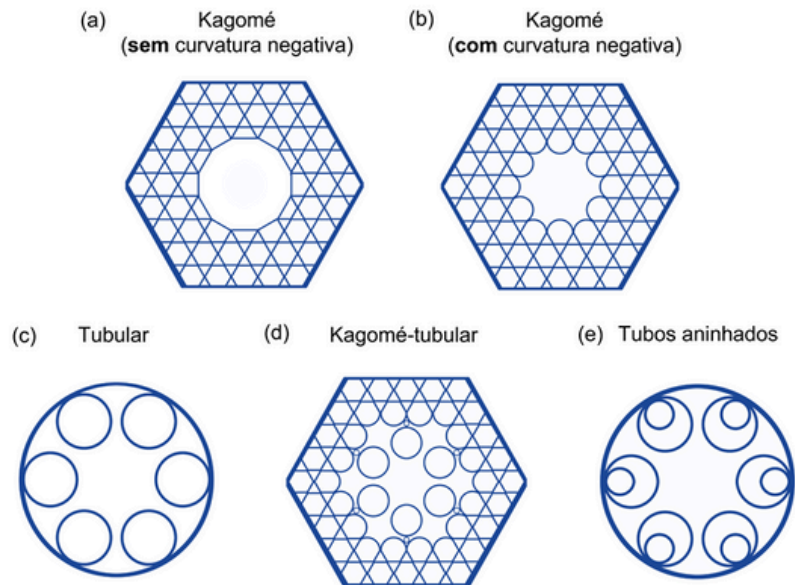


Figura 1. *Designs* de HCPCFs. (a) Fibra Kagomé sem curvatura negativa, (b) fibra Kagomé com curvatura negativa, (c) fibra tubular, (d) fibra híbrida Kagomé-tubular e (e) fibra com tubos aninhados

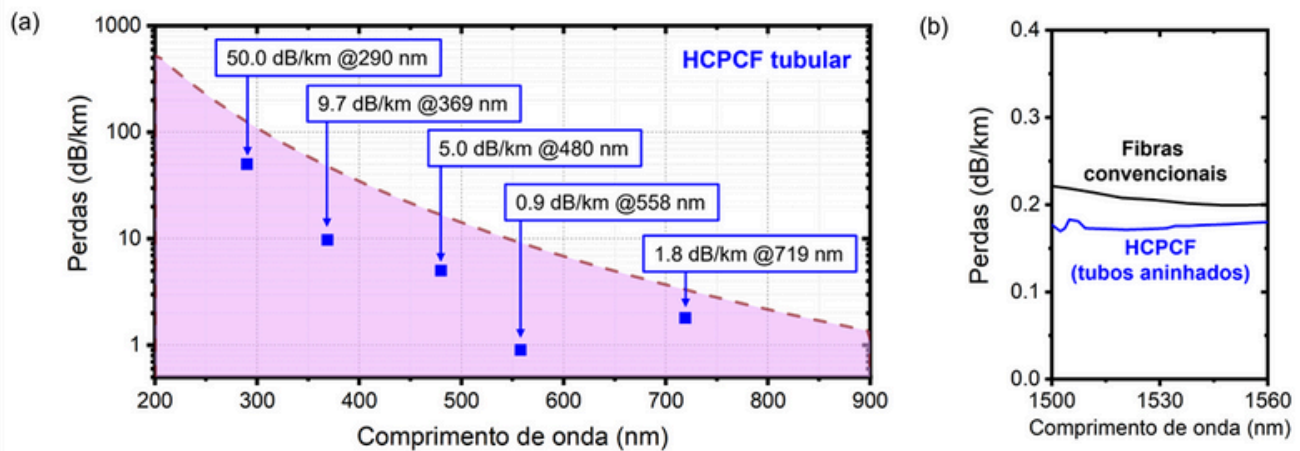
depois da introdução do conceito de curvatura negativa (i.e., a modificação do contorno do núcleo de forma que este apresente protuberâncias projetadas em direção ao centro da fibra – Fig. 1b) que, ao prover uma acentuada redução do recobrimento espacial entre os modos de núcleo e casca (e, logo, do acoplamento entre estes), permitiu obter uma drástica redução de perdas [2].

Em 2011, uma nova arquitetura de fibra com guiamento por acoplamento inibido (por vezes identificada como fibras antir-ressonantes), a fibra tubular (Fig. 1c), foi proposta. Tal estrutura, dotada de notória simplicidade, é formada por uma coleção de tubos que não se tocam e que definem o núcleo da fibra. A simplicidade do design das fibras tubulares faz com que estas sejam muito atrativas do ponto de vista de sua fabricação. Ademais, cálculos atestam seu grande potencial para proverem perdas ultra baixas, especialmente em comprimentos de onda curtos, a saber, no espectro visível e ultravioleta.

O grande interesse sobre as fibras tubulares produziu, portanto, acentuada dedicação por parte da comunidade internacional no

sentido da otimização de suas performances. Notoriamente, em 2019, pôde-se demonstrar fibras tubulares com, virtualmente, o mesmo nível de perdas do que fibras convencionais no espectro visível [3] e, em 2022, pôde-se estabelecer, também a partir do uso de fibras tubulares, novos valores de atenuação recordes para toda a área de fibras ópticas com guiamento no espectro visível e ultravioleta [4]. A Fig. 2a reproduz os resultados reportados em [4], que são notadamente inferiores ao limite definido pelo espalhamento Rayleigh na sílica (linha tracejada), uma restrição fundamental à diminuição de perdas em fibras sólidas.

As fibras tubulares (Fig. 1c), no entanto, apesar de se consolidarem atualmente como as fibras ópticas com menor perda no espectro visível e ultravioleta, apresentam perdas relativamente altas na região do infravermelho (dezenas de decibéis por quilômetro, dB/km, tipicamente). Assim, para se obter melhores níveis de perdas no infravermelho, outras arquiteturas de HCPCFs podem ser utilizadas, ao passo que são capazes de prover maior confinamento de luz nesta região do espectro. Exemplos de tais arquiteturas são apresentadas na Fig. 1d e 1e, a saber, a fibra hí-



FFigura 2. (a) Novos valores recordes para atenuação de fibras ópticas com guiamento no espectro visível e ultravioleta obtidos a partir da utilização de fibras tubulares [4]. Linha tracejada: limite de espalhamento Rayleigh da sílica. (b) Resultados de atenuação recordes para HCPCFs com tubos aninhados e perdas de fibras tradicionais no infravermelho (gráfico adaptado de [6]).

brida Kagomé-tubular [5], que tem a capacidade de fornecer uma operação efetivamente monomodal associada a baixos níveis de perda (um binômio deveras desafiador no âmbito das HCPCFs), e a fibra com tubos aninhados [6], que atualmente rivaliza os níveis de atenuação de fibras convencionais na região do infravermelho, como se observa na Fig. 2b.

Assim, constata-se que os expressivos avanços da tecnologia das HCPCFs hoje consolidam esta família de fibras como tecnologia habilitadora para os novos desenvolvimentos em fotônica.

Tais fibras tornam-se, portanto, elementos constituintes e/ou atuam como plataforma para uma ampla gama de aplicações que abrangem desde a obtenção de fontes ópticas e sensores até a construção de dispositivos para entrega de feixes de alta potência e novas demonstrações em telecomunicações. A Fig. 3 ilustra as oportunidades de aplicações das HCPCFs a serem comentadas nos parágrafos que sequegem.

Conforme ilustrado na Fig. 3, a realização de fontes ópticas consiste em uma importante área de aplicação das HCPCFs, tendo sido, de fato, uma das primeiras vertentes de sua utilização. A oportunidade de se utilizar

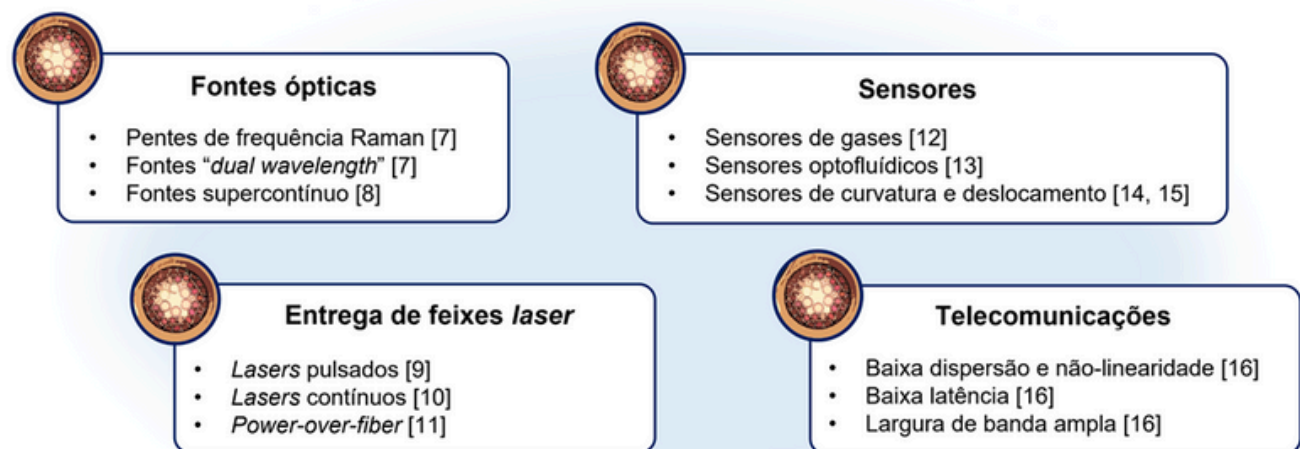


Figura 3. Oportunidades de aplicações utilizando HCPCFs e relacionadas aos campos de fontes ópticas, entrega de feixes laser, sensores e telecomunicações.

HCPCFs para a obtenção de fontes ópticas é beneficiada pelo fato de a microestrutura das HCPCFs ser capaz de abrigar moléculas de gases que permitem que, via interação com feixes laser, efeitos não-lineares sejam explorados. Assim, pode-se obter fontes ópticas baseadas em pentes de frequência Raman [7], fontes do tipo *dual wavelength* (emissão em dois comprimentos de onda pré-selecionados) [7] e fontes super-contínuo [8].

Ademais, como as HCPCFs com guiamento por acoplamento inibido são capazes de transportar luz com mínima interação com a microestrutura da fibra, tal classe de fibras emerge como uma plataforma muito interessante para atividades de entrega de feixes de alta potência. Assim, pôde-se demonstrar excelentes performances das HCPCFs para o transporte e entrega de feixes lasers tanto no regime pulsado (a níveis de potência de pico da ordem de dezenas de gigawatts [9]) quanto contínuo (com potências da ordem de quilowatts [10]).

Muito recentemente, nosso laboratório no Instituto de Física da UNICAMP (Laboratório de Fibras Especiais & Sensores Ópticos, LaFE, que tem estudado fibras ópticas não convencionais desde 2008 e que possui interesse na fabricação e pós-processamento destes guias de onda, além do estudo e desenvolvimento de sensores e dispositivos ópticos), juntamente com colegas do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicações, CPQD, e da Universidade de Limoges, propôs a utilização das HCPCFs como plataforma para *Power-over-Fiber* [11], tecnologia que faz uso da potência óptica transmitida pela fibra para ativar circuitos eletrônicos. Esta nova vertente de aplicação das HCPCFs se apresenta como proposta interessante para os próximos desenvolvimentos na área de *Power-over-Fiber*, visto que as HCPCFs poderão, poten-

cialmente, permitir obter novos sistemas capazes de superar as restrições de potências ópticas utilizáveis em arranjos tradicionais.

Outrossim, as HCPCFs despontam como promissora plataforma para a construção de sensores. Dada a estrutura alveolar de sua microestrutura e, portanto, a possibilidade preenchê-la com gases e líquidos, o estudo de sensores de gases e optofluídicos se mostra deveras atrativo, haja vista que a fibra, ao atuar simultaneamente como guia de onda e microrreservatório, pode prover uma efetiva sobreposição entre a luz guiada e o gás/líquido por ela abrigado por comprimentos de interação significativamente superiores aos acessíveis em configurações em espaço livre. Sensores de gases baseados em HCPCFs permitem, por exemplo, a detecção de moléculas ao nível de partes-por-trilhão [12]. No âmbito da optofluídica, as HCPCFs permitem a realização de medidas a partir de técnicas de espectroscopia de absorção e Raman, por exemplo [13].

Para além das oportunidades em sensoriamento de gases e líquidos, as possibilidades da utilização de HCPCFs na área de sensoriamento são vastas e relativamente ainda pouco exploradas. Nesse sentido, recentemente nossa equipe na UNICAMP, juntamente com colegas no Instituto de Estudos Avançados (IEAv) e Universidade de Limoges, propôs e demonstrou novas rotas de aplicação das HCPCFs para o monitoramento de variações de curvatura e deslocamento [14, 15]. Tais novas demonstrações sinalizam um campo com forte potencial de expansão e de geração de resultados de interesse.

Finalmente, pode-se também mencionar o também recente aquecimento das atividades relacionadas às HCPCFs em telecomunicações que, de fato, muito se deve à expressiva redução dos níveis de perda obtida nos últimos anos. Alia-se aos níveis de perda ultrabaixos recentemente reportados,

o fato de as HCPCFs possuírem vantagens no sentido de permitirem, naturalmente pelo guiamento acontecer em espaço vazio, o desenvolvimento de novos sistemas de telecomunicações com menores níveis de latência, dispersão e não-linearidade, bem como arranjos com, potencialmente, maior largura de banda [16].

Enfim, pode-se hoje reconhecer as HCPCFs como verdadeira tecnologia habilitadora para os novos avanços em óptica e fotônica, haja vista o avançado grau de maturidade atingido pelas ferramentas de design das microestruturas, pelos processos de fabricação e pelas atividades visando aplicações. Tendo-se em vista tal cenário, é possível vislumbrar um futuro muito promissor para as HCPCFs, tanto do ponto de vista de ciência básica quanto aplicada, que certamente impactará as novas realizações em áreas que vão desde o campo de fontes ópticas e sensores até oportunidades em telecomunicações.

Contato:

cmbc@ifi.unicamp.br
jhosorio29@gmail.com

J. H. O. agradece à FAPESP (processo 2021/13097-9) e C. M. B. C. agradece ao CNPq (processo 309989/2021-3) pelo apoio financeiro.

Referências

- [1] F. Couny, F. Benabid, P. J. Roberts, P. S. Light, M. G. Raymer, "Generation and photonic guidance of multi-octave optical frequency combs," *Science* 318, 5853, 1118-1121 (2007).
- [2] Y. Y. Wang et al., "Low loss broadband transmission in hypocycloid-core kagome hollow-core photonic crystal fiber," *Optics Letters* 36, 669-671 (2011).
- [3] M. Chafer et al., "1-km hollow-core fiber with loss at the silica Rayleigh limit in the green spectral region," *IEEE Photonics Technology Letters* 31, 9 (2019).
- [4] 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).
- [5] F. Amrani et al., "Low-loss single-mode hybrid-lattice hollow-core photonic-crystal fibre," *Light: Science and Applications* 10, 7 (2021).
- [6] G. T. Jasion et al., "0.174 dB/km hollow core double nested antiresonant nodeless fiber (DNANF)," *Optical Fiber Communication Conference 2022*, paper Th4C.7.
- [7] M. Chafer et al., "Near- and middle-ultraviolet reconfigurable Raman source using a record-low UV/visible transmission loss inhibited-coupling hollow-core fiber," *Optics & Laser Technology* 147, 107678 (2022).
- [8] A. I. Adamu et al., "Deep-UV to mid-IR supercontinuum generation driven by mid-IR ultrashort pulses in a gas-filled hollow-core fiber," *Scientific Reports* 9, 4446 (2019).
- [9] B. Debord et al., "2.6 mJ energy and 81 GW peak power femtosecond laser-pulse delivery and spectral broadening in inhibited coupling Kagome fiber," *CLEO:2015*, paper STh4L.7.
- [10] H. C. H. Mulvad et al., "Kilowatt-average-power single-mode laser light transmission over kilometre-scale hollow-core fibre," *Nature Photonics* 16, 448-453 (2022).
- [11] J. H. Osório et al., "Hollow-core photonic crystal fibers for Power-over-Fiber systems," *Optical Fiber Technology* 73, 103041 (2022).
- [12] P. Zhao et al., "Mode-phase-difference photothermal spectroscopy for gas detection with an anti-resonant hollow-core optical fiber," *Nature Communications* 11, 847 (2020).
- [13] E. Miele et al., "Hollow-core optical fibre sensors for operando Raman spectroscopy investigation of Li-ion battery liquid electrolytes," *Nature Communications* 13, 1651 (2022).
- [14] W. M. Guimarães, C. M. B. Cordeiro, M. A. R. Franco, J. H. Osório, "Angle-resolved hollow-core fiber curvature sensing approach," *Fibers* 9, 11, 72 (2021).
- [15] J. H. Osório et al. "Hollow-core fiber-based speckle displacement sensor," *arXiv:2211.10217* (2022).
- [16] P. Poggiolini, F. Poletti, "Opportunities and challenges for long-distance transmission in hollow-core fibers," *J. Light. Technol.*, 40, 6, 1605-1616 (2022).