

Fabricação de sensores com rede de Bragg em fibra ótica: análise experimental e aplicações no ensino

Manufacture of fiber Bragg grating sensors: experimental analysis and educational applications

Gustavo Macioski^{*1}, Marcelo Henrique Farias de Medeiros²

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Curitiba, PR, Brasil.

²Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, PR, Brasil.

Recebido em 08 de maio de 2025. Revisado em 21 de julho de 2025. Aceito em 06 de agosto de 2025.

Este estudo investiga a influência do tipo de fibra ótica (G652 e GF1) e do processo de hidrogenação (presente ou não) na qualidade de sensores óticos baseados em redes de Bragg (FBG). A pesquisa explora a influência dessas variáveis no processo de fabricação e no desempenho dos sensores óticos, considerando aspectos como a refletividade, estabilidade térmica e resposta espectral das FBGs. A hidrogenação reduziu o tempo de gravação de 15 minutos para 30 segundos e aumentou a refletividade em 50%. Os resultados fornecem diretrizes práticas para otimização de sensores óticos FBG, com potencial de aplicação em ambientes industriais e estruturais.

Palavras-chave: Sensores óticos, fibra ótica, redes de Bragg.

This study investigates the influence of the optical fiber type (G652 and GF1) and the hydrogenation process (present or absent) on the quality of optical sensors based on Bragg gratings (FBG). The research explores the effect of these variables on the manufacturing process and performance of optical sensors, considering aspects such as reflectivity, thermal stability, and spectral response of the FBGs. Hydrogenation reduced the inscription time from 15 minutes to 30 seconds and increased reflectivity by 50%. The results provide practical guidelines for optimizing FBG optical sensors with potential applications in industrial and structural environments.

Keywords: Optical sensors, optical fiber, Bragg gratings.

1. Introdução

Diversas áreas se beneficiam com o uso de fibras óticas. Na indústria, elas são utilizadas principalmente em sistemas de telemetria (comunicação para comandar, medir ou rastrear processos). Na área médica há um vasto número de aplicações, possibilitando observar e iluminar o interior do corpo humano, além do uso em aparelhos de imagens, sensores de temperatura, pressão, pH e de vazão sanguínea. Na indústria automobilística, as aplicações das fibras vão desde o controle do motor e da transmissão até os acessórios secundários (controle de janelas, aquecimento e refrigeração) [1].

Além das aplicações em telecomunicações, fibras óticas desempenham um papel essencial na instrumentação e monitoramento de processos industriais, estruturais e biomédicos. Em particular, estes sensores oferecem vantagens como imunidade eletromagnética, alta sensibilidade e possibilidade de multiplexação, permitindo seu uso em ambientes hostis e de difícil acesso [2]. Os sensores em fibra ótica operam através da modulação de uma ou mais características da radiação guiada (intensidade, comprimento de onda ou frequência, polarização

e fase), cada uma das quais potencialmente sensíveis em determinadas grandezas físicas [3].

As medidas podem ser realizadas por meio de variadas técnicas que permitem a fabricação de diferentes sensores óticos. Assim, o termo “sensor em fibra ótica” engloba diferentes tipos de fibras, técnicas de medida e tipos de sensores que possuem faixas de leituras e precisão diferentes. Sensores em fibra ótica baseadas em rede de Bragg (FBG ou *Fiber Bragg Grating*), foco deste estudo, permitem leituras pontuais (não distribuídas) de temperatura e deformação específica, normalmente utilizando fibras monomodo [4, 5].

A fabricação da Redes de Bragg em fibra ótica (FBG) é baseada na alteração do índice de refração do núcleo da fibra de vidro em trechos específicos, de forma periódica, criando um filtro ótico na fibra utilizando o fenômeno da difração. Esta modificação é possível devido à fotossensibilidade da fibra ótica, que permite uma mudança estável do índice de refração no núcleo da fibra quando exposta à luz ultravioleta (UV) [6]. Apesar de não ser totalmente compreendido, este fenômeno ocorre devido à existência de defeitos relacionados à incorporação de átomos de germânio na estrutura vítrea das fibras óticas durante sua fabricação que, quando expostos a radiação UV, quebram suas ligações e geram bandas de absorção de luz [7].

*Endereço de correspondência: gmacioski@gmail.com

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

Algumas técnicas permitem o aumento da fotossensibilidade das fibras, como o aumento da concentração de germânio em seu núcleo e a utilização de co-dopantes como boro durante sua fabricação. Outra técnica também utilizada é a hidrogenação, que consiste em expor a fibra a uma alta concentração de hidrogênio em uma câmara por um longo período [8, 9].

Portanto, o processo de gravação de redes de Bragg em fibras óticas (FBG) consiste na difração de um feixe colimado de luz UV com comprimento de onda fixo produzido por um LASER sobre a fibra, pois seu comprimento de onda fixo permite a interação entre os feixes difratados por uma rede de difração chamada de máscara de fase. O processo de difração e gravação de redes de Bragg em fibras óticas pode ser realizado por diferentes técnicas, sendo interferometria ou iluminação direta as técnicas mais comuns. Esses processos podem ser observados na Figura 1.

Em ambos os processos, a difração do feixe é obtida com o uso de uma máscara de fase, que consiste em uma série de depressões longitudinais na superfície de um substrato de sílica produzidas por fotolitografia [6].

O método direto consiste na produção de redes de Bragg na fibra ótica pela incidência de apenas um feixe perpendicular na máscara de fase que está posicionada próxima à fibra, criando a modulação no índice de refração e, por consequência, um sensor ótico. Durante o processo de gravação, a fibra ótica irá desenvolver a capacidade de refletir um comprimento de onda específico em função do espaçamento periódico da grade criada no seu núcleo. No processo interferométrico, um feixe UV que parte do LASER é difratado após atingir uma máscara de fase. Os feixes difratados então são refletidos com o auxílio de espelhos simétricos e interferem entre si. Nos pontos de interferência é posicionado o núcleo da fibra ótica, que sofre alterações em seu índice de refração nestes pontos ao longo de seu comprimento de forma periódica – criando-se uma rede de Bragg no interior da fibra. A vantagem deste sistema é a possibilidade de gravação de FBGs com diferentes comprimentos de onda utilizando apenas uma máscara de fase e variando-se o

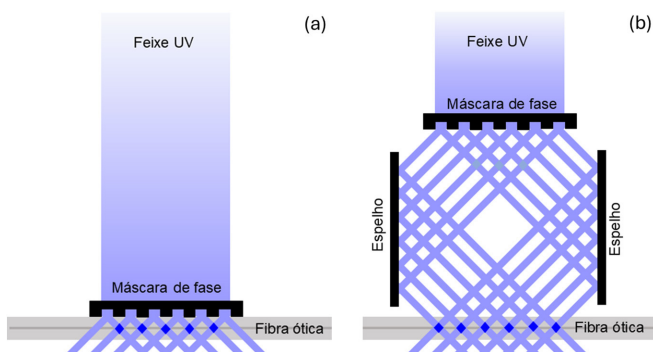


Figura 1: Métodos de gravação de FBG utilizando máscara de fase por (a) iluminação direta e (b) interferometria, baseado em Kashyap [7].

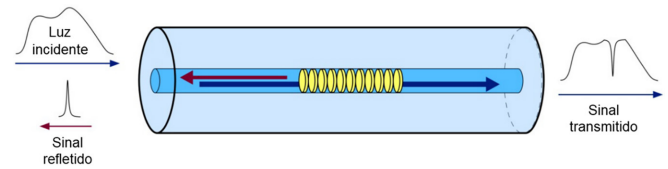


Figura 2: Interrogação de uma FBG a partir de sinais transmitidos e refletidos, traduzido de Gouveia, Batista e Jorge [11].

ângulo dos espelhos. Porém, além deste método reduzir a potência do LASER que chega à fibra ótica devido às reflexões que ocorrem no espelho, também exige um alinhamento ótico preciso para garantir a simetria dos feixes.

Após a produção do sensor ótico, o processo de aquisição de dados ou interrogação de uma FBG consiste em acoplar uma fonte de luz de banda larga na fibra, de forma a monitorar o espectro ótico da luz transmitida ou refletida pela FBG, como pode ser observado na Figura 2 [10].

O comprimento de onda do pico que surge após o processo de gravação é descrito pela Equação 1, na qual λ_b é o comprimento de onda de Bragg, n_{ef} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra, e Λ é a metade do espaçamento entre as grades da máscara de fase, conhecido como o período [7, 12].

$$\lambda_b = 2 \cdot n_{ef} \cdot \Lambda \quad (1)$$

A partir da propriedade de reflexão da luz, o sinal refletido pode ser calibrado em função de alterações causadas no sensor. Quando a fibra sofre deformações axiais ou mudanças de temperatura, ocorre alteração no espaçamento da microestrutura e, consequentemente, do comprimento de onda de Bragg. Também há alguma variação no índice de refração, proveniente do efeito fotoelástico. Estes efeitos são independentes para cada rede de Bragg existente em um trecho de fibra ótica [7, 9].

Durante a gravação, as grades formadas podem ser classificadas como tipo I ou tipo II. Geralmente as redes do tipo I são gravadas em laser de emissão contínua em fibras padrão, podem operar na faixa de -40°C e 80°C e são apagadas em temperaturas próximas à 200°C . Estas redes poderiam ser aplicadas no monitoramento externo de estruturas, uma vez que podem operar em temperaturas ambiente.

Já as redes do tipo II costumam ser gravadas em LASER pulsado de alta intensidade, que podem causar, além da alteração do índice de refração, mudanças estruturais e defeitos no vidro. Este segundo tipo possui estabilidade térmica de até 800°C [6, 13, 14]. Portanto, redes do tipo II seriam indicadas para aplicação no monitoramento da temperatura de fornos e do calor de hidratação do concreto [15].

A ausência de normativas nacionais sobre a fabricação e calibração de sensores óticos evidencia uma lacuna técnica significativa no desenvolvimento e padronização

desse dispositivos no Brasil. Este estudo busca contribuir para essa área, fornecendo dados experimentais sobre a influência do tipo de fibra e da hidrogenação na fabricação de sensores FBG, permitindo a otimização de sua produção e desempenho. A única normativa internacional existente sobre o tema é a IEC 61757 [16], que traz uma especificação genérica que abrange as fibras óticas independentemente do tipo de aplicação ou instalação.

Existem outras instituições que trabalham na normalização deste tipo de sensor como: o grupo de trabalho da *Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure* (ISHMII), o comitê “*Fiber Optics and Applied Photonics*” da *Society of Automotive Engineers* (SAE), o comitê técnico F36 “*Technology and Underground Utilities*” da ASTM e o grupo de trabalho da *Global Optical Fiber Sensing System* (OFSS) [17]. Este panorama reforça a necessidade de requisitos normativos para a correta fabricação, calibração e aplicação de sensores em fibra ótica.

Além de seu potencial tecnológico, os sensores FBG também se destacam como recurso didático para o ensino de Física em contextos experimentais. Sua fabricação e operação envolvem conceitos fundamentais como interferência, difração, índice de refração e espectroscopia, permitindo que sejam utilizados em atividades práticas em disciplinas de ótica, instrumentação e física moderna. Assim, o desenvolvimento de sensores FBG pode ser incorporado ao ambiente educacional como ferramenta de ensino-aprendizagem ativa e interdisciplinar.

Na UTFPR, pesquisas desenvolvidas com apoio do Laboratório Multiusuário de Fotônica (FOTON) por alunos da graduação e pós-graduação utilizando sensores FBG visaram a aplicação em: robôs inteligentes [18], detecção de movimentos da mão [19], imuno sensores [20], quantificação da salinidade [21], monitoramento de locomotivas [22], falhas em sistemas de potência [23], deformações em peças produzidas por impressão 3D [24], monitoramento da saúde de estruturas [25, 26], sísmica de barragens [22] e desempenho de bombas submersas [27].

Esses trabalhos evidenciam o caráter multidisciplinar da tecnologia, destacando, assim, a vasta gama de aplicações em projetos de pesquisa, ensino e extensão com envolvimento de alunos da graduação (IC e TCC) e pós-graduação (especialização, mestrado e doutorado).

2. Programa Experimental

Para a fabricação dos sensores óticos FBG foram avaliadas fibras óticas monomodo padrão (Fibracem, G652) e fotossensível (Nufer, GF1), antes e após o processo de hidrogenação. Fibras fotossensíveis possuem maior teor de dopantes no núcleo e facilitam o processo de alteração do índice de refração durante a exposição à radiação UV. O processo de hidrogenação também facilita a quebra das ligações do silício e alteração do índice de refração

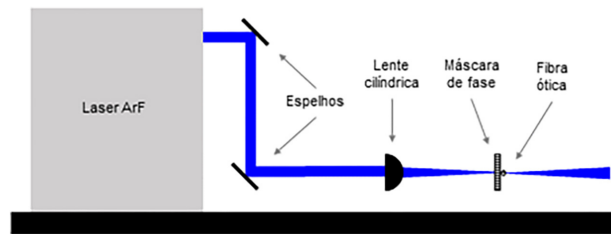


Figura 3: Ilustração do posicionamento dos elementos óticos.

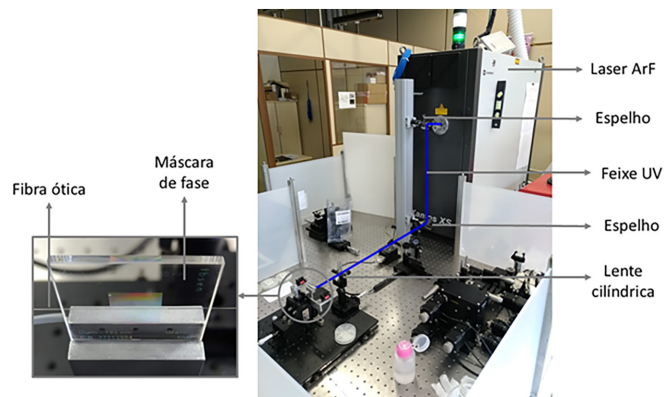


Figura 4: Arranjo experimental utilizado na gravação da FBG.

durante a gravação. Para a hidrogenação das fibras óticas, trechos de 1 m foram inseridos no interior de uma câmara com gás hidrogênio (H_2) 5.0 pressurizado a 100 kgf/cm² pelo período de 3 meses, garantindo, assim, a saturação da difusão do gás na fibra ótica – considerando que a saturação é normalmente atingida após 15 dias [6].

A gravação da rede foi realizada no comprimento de onda de Bragg de 1540,9 nm utilizando máscara de fase IBSEN com iluminação direta em laser exímero ArF (Coherent, modelo Xantos XS) operando a 193 nm com frequência de 250 Hz, 1,5 mJ de energia/pulso e íris com abertura de 4 mm sobre uma mesa ótica antivibração. O arranjo experimental para gravação das redes de Bragg é apresentado na Figura 3 e na Figura 4.

Nota-se, na Figura 3, que a lente cilíndrica é posicionada de forma com que o ponto focal esteja alguns micrômetros após a máscara de fase, onde a fibra ótica será posicionada. Isto se faz necessário para otimizar a interação do feixe UV com o núcleo da fibra ótica. Qualquer desalinhamento neste arranjo pode impedir a correta inscrição da rede de Bragg no interior da fibra ótica. Durante o alinhamento ótico é necessário garantir a perpendicularidade do feixe, o alinhamento das reflexões das lentes com o feixe incidente e o ponto focal da lente cilíndrica sobre o núcleo da fibra.

Durante a gravação, o trecho da fibra ótica que foi exposta ao laser teve sua camada de acrilato removida (cerca de 10 mm de extensão) para permitir a penetração do UV na fibra, e evitar o contato do acrilato com o trecho holográfico da máscara de fase (Figura 4).

Antes de realizar a gravação, o trecho de fibra ótica foi previamente conectorizado por meio da clivagem (corte perpendicular ao eixo da fibra) com clivador (HOEA, modelo 1300) e fusão em sua extremidade com um cabo com conector FC/PC. Para as fibras hidrogenadas foi necessário realizar o aquecimento da extremidade da fibra para remoção do gás, evitando, assim, a formação de bolhas durante o processo de emenda por arco de fusão utilizando máquina de emendas (Splicer Fujikura, FSM-50S).

Durante o processo de gravação, o espectro de reflexão foi monitorado com o uso de interrogador ótico (Microoptics, modelo SM-125). Os resultados experimentais indicam que a hidrogenação da fibra padrão G652 reduz significativamente o tempo de gravação da FBG, além de aumentar sua intensidade de reflexão. Essa descoberta tem impacto direto na viabilidade econômica da produção de sensores óticos, permitindo a fabricação de dispositivos de alto desempenho a um custo reduzido, o que pode favorecer sua adoção em larga escala para aplicações industriais e estruturais. Para comparar o espectro da FBG obtido após a gravação com o modelo teórico que descreve a reflexão de uma FBG, foi utilizado o aplicativo *Grating Design Software* (da empresa SOL Photonics) para simular espectros com os mesmos parâmetros utilizados na gravação. São aplicadas as equações de Maxwell, a teoria de propagação em guias de onda e o método da matriz de transferência para solucionar as equações diferenciais [28].

3. Resultados e Discussões

Para a fabricação de sensores com rede de Bragg em fibras óticas (FBGs), foram avaliadas duas possibilidades: a primeira foi a utilização de fibras óticas padrão (G652), que tipicamente possuem aproximadamente 3% de GeO_2 na composição do núcleo para gerar variação no índice de refração; a segunda foi a utilização de fibras fotossensíveis (GF1), que possuem dopagem mais elevada de germânio em sua composição ou uso de co-dopantes como o Boro [6], facilitando as alterações geradas pela exposição à radiação UV.

Também foi avaliada a influência do processo de hidrogenação das fibras no tempo de gravação e intensidade das redes de Bragg geradas durante o processo. Este processo permite a gravação de redes de Bragg com maior potência ótica e menor tempo de exposição luminosa; e as fibras permanecem fotossensíveis enquanto o hidrogênio estiver presente. A variação das intensidades das FBGs durante o processo de gravação pode ser observada na Figura 5.

A partir dos dados, é possível verificar que a fibra padrão (G652) levou mais de 15 minutos para atingir intensidades próximas de -15 dBm, sem indicação de estabilização. A fibra fotossensível (GF1) apresentou tempo de gravação reduzida quando comparada à fibra padrão, gerando uma rede de Bragg com intensidade

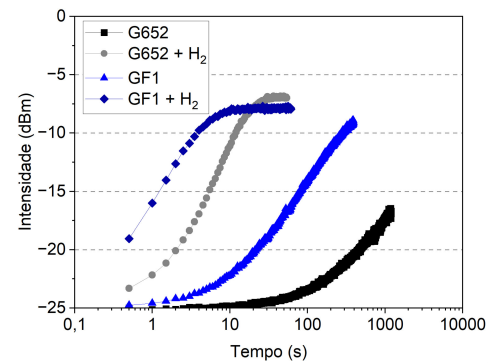


Figura 5: Variação da intensidade da rede de Bragg durante o processo de gravação em diferentes fibras.

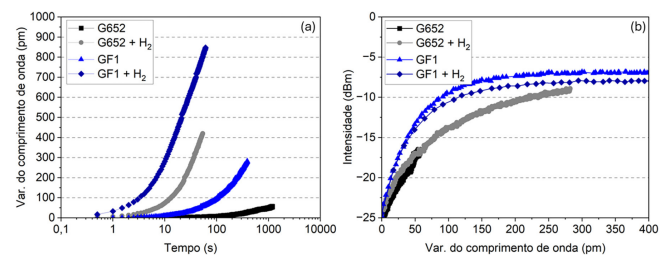


Figura 6: Variação do comprimento de onda em função do (a) tempo de gravação e (b) da intensidade da rede de Bragg.

acima de -10 dBm, demonstrando maior capacidade de alteração do índice de refração. Após o processo de hidrogenação ($+H_2$) ambas passaram a apresentar um tempo de gravação inferior a 30 segundos, com estabilização da intensidade do pico refletido pela rede e saturação (alargamento do pico sem aumento da intensidade).

Durante o processo de gravação nas fibras, também foi observada a variação do comprimento de onda, conforme ilustrado na Figura 6a. A variação no comprimento de onda está relacionada ao aumento do índice de refração efetivo devido à incidência da radiação UV de alta potência, somada à entalpia da reação de quebras dos dopantes com as ligações de silício, indicando que o processo de gravação sofreu influência do tipo de fibra e do processo de hidrogenação. Enquanto o aumento da intensidade, como pode ser confirmado na Figura 6b, indica uma maior capacidade de alteração microestrutural nas fibras GF1. A Tabela 1 apresenta um resumo dos tempos de gravação e intensidade dos sensores óticos produzidos para cada tipo de fibra, com e sem hidrogenação.

Embora a fibra fotossensível GF1 hidrogenada tenha apresentado a melhor performance ótica em termos de intensidade refletida e menor tempo de gravação, sua viabilidade econômica é limitada devido ao elevado custo unitário (R\$ 42,50/m em 2025). Em contrapartida, a fibra padrão G652 hidrogenada, mesmo com desempenho ligeiramente inferior (diferença de $\sim 0,8$ dBm), mostrou-se tecnicamente adequada para a produção de sensores com elevada refletividade e boa estabilidade espectral,

Tabela 1: Tempos e intensidades dos sensores produzidos.

Tipo de Fibra	Hidrogenação	Tempo (s)	Intensidade (dBm)
G652	Não	>900	-15,3
	Sim	~25	-8,7
GF1	Não	~120	-9,8
	Sim	~20	-7,9

além de apresentar um custo significativamente reduzido (R\$ 0,50/m em 2025), representando uma redução de mais de 98% no custo por metro. Essa combinação de desempenho satisfatório e custo acessível torna a fibra padrão hidrogenada a escolha mais indicada para aplicações em escala industrial, pesquisa aplicada e monitoramento estrutural, especialmente em projetos com restrições orçamentárias. Apesar da economia no custo das fibras padrão G652, a necessidade de uma câmara de hidrogenação pressurizada, controle de segurança e tempo prolongado de exposição (3 meses) introduzem custos operacionais e barreiras logísticas que devem ser consideradas.

Os sensores FBG produzidos com fibras padrão hidrogenadas apresentam desempenho adequado e custo reduzido, sendo aplicáveis ao monitoramento de estruturas civis (pontes, barragens, túneis), controle térmico em processos industriais, instrumentação embarcada em componentes automotivos e ambientes agressivos como plantas petroquímicas. Sua estabilidade térmica, imunidade eletromagnética e facilidade de fabricação favorecem o uso em aplicações experimentais, ampliando seu potencial de adoção em sistemas de monitoramento em larga escala. O espectro refletido da fibra padrão, com e sem hidrogênio, durante o processo de gravação pode ser observado na Figura 7.

Foi necessária atenção durante o processo de gravação das redes hidrogenadas, uma vez que as fibras apresentavam saturação após atingirem a intensidade máxima, passando a gerar lóbulos laterais e alargamento do topo do espectro do sinal refletido, como pode ser observado na Figura 7b. Redes em fibra não hidrogenadas levariam horas para passar a apresentar este comportamento já conhecido [14].

Este efeito de saturação dificulta a detecção do comprimento de onda de pico do espectro refletido pela

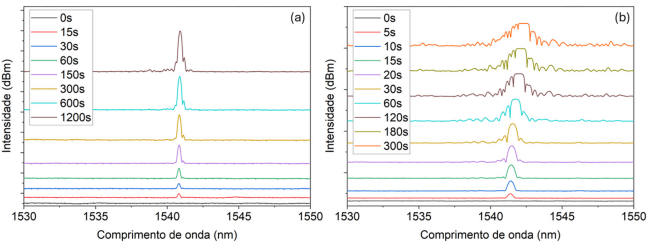


Figura 7: Espectro refletido da rede de Bragg durante gravação com fibras (a) padrão e (b) padrão hidrogenadas.

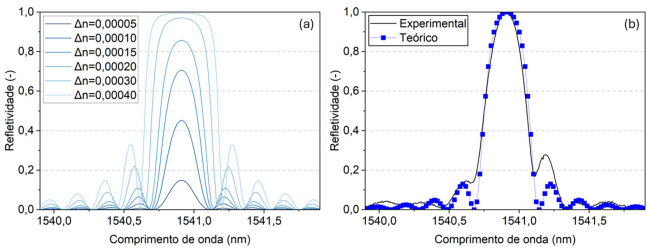


Figura 8: Simulação de FBG no *Grating Design Software* (a) *Variação do índice* e (b) *comparação entre espectro teórico e experimental*.

rede de Bragg, uma vez que os lóbulos laterais podem ser confundidos com o pico principal pelo sistema de aquisição de sinais, e o alargamento do pico aumenta a incerteza do sensor que tem a informação da grandeza medida através da detecção do valor de pico. Assim, padronizou-se o tempo de gravação em 20s, de forma a garantir alta intensidade da rede de Bragg e a presença de pico estreito e bem definido no espectro refletido.

A partir das simulações realizadas no aplicativo *Grating Design Software*; considerando o índice de refração efetivo (n_{ef}) de 1,447, comprimento da FBG de 4 mm e espaçamento da máscara de fase (Λ) de 1064,9 nm, variou-se a modulação do índice de refração (Δn) de 0,00005 a 0,00040. Os resultados da simulação podem ser observados na Figura 8a.

Assim, pode-se comprovar que o aumento da intensidade da rede de Bragg e efeito de saturação (alargamento do pico) ocorrem devido à alteração do índice de refração efetivo causado pela interação do núcleo da fibra ótica com o LASER (Δn). A partir das simulações realizadas, é possível observar também que o espectro refletido teórico apresenta comportamento semelhante ao espectro experimental obtido durante a fabricação dos sensores FBG (Figura 8b). Esses achados reforçam o potencial dos sensores FBG como plataforma de medição física em diversas áreas do conhecimento.

Apesar dos benefícios na fabricação, a presença de hidrogênio na fibra ótica também acarreta efeitos maléficos a longo prazo, contribuindo para o envelhecimento (*aging*) com aumento da perda de sinal e escurecimento (*darkening*) com aumento da atenuação da fibra [29].

As perdas induzidas por hidrogênio podem ser reversíveis (com presença de hidrogênio molecular dissolvido) ou irreversíveis quando levam à formação de grupos hidroxila nos sítios de defeitos). Fibras dopadas com germânio e especialmente as fibras dopadas com érbio são suscetíveis a esses efeitos [30–32]. Um ponto crítico é a redução da resistência mecânica das fibras. Assim, indica-se a remoção do hidrogênio por aquecimento após o processo de gravação da rede de Bragg.

4. Considerações Finais

Este estudo demonstrou que a escolha do tipo de fibra e o processo de hidrogenação influenciam diretamente

a eficiência da fabricação de sensores FBG. A fibra hidrogenada G652 apresentou um tempo de gravação reduzido e alta intensidade da rede de Bragg, tornando-se uma alternativa viável e econômica em relação às fibras fotossensíveis. A adoção de fibras padrão hidrogenadas representa uma alternativa robusta e economicamente viável para a fabricação em larga escala de sensores FBG, ampliando sua aplicabilidade em infraestrutura crítica.

Do ponto de vista educacional, o processo de fabricação e caracterização de FBGs oferece uma oportunidade valiosa para a abordagem prática de conteúdos didáticos, promovendo o desenvolvimento de competências experimentais em estudantes de graduação. A viabilidade de utilizar fibras padrão hidrogenadas, com baixo custo e desempenho satisfatório, amplia o potencial de inserção desses dispositivos em laboratórios didáticos e projetos de iniciação científica na área de Física e Engenharia.

Esses achados são relevantes para a otimização da produção de sensores óticos, podendo contribuir para sua aplicação em diversas áreas da engenharia e da indústria. Além disso, a falta de normatização específica sobre a fabricação e calibração desses sensores reforça a necessidade de desenvolvimento de diretrizes para garantir maior confiabilidade e padronização na sua utilização. Estudos futuros podem explorar a estabilidade a longo prazo desses sensores, bem como sua resposta em condições ambientais adversas, ampliando ainda mais suas aplicações.

Disponibilidade de Dados

O conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo não está disponível publicamente.

Referências

- [1] NATO Advanced Study Institute on Optical Fiber Sensors, *Optical fiber sensors*, editado por A.N. Chester, S. Martellucci e A.M.V. Scheggi (Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1987), 1 ed.
- [2] R.C. Paiva, *Produção e caracterização de redes de Bragg gravadas em fibra multimodo e aplicadas ao setor de biocombustíveis*. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba (2015).
- [3] M. Buras, *Aplicação de sensores distribuídos de fibra ótica em um modelo experimental para monitoramento de movimentos de massa*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (2013).
- [4] K.J. Peters e D. Inaudi, Sensing Hardware and Data Collection Methods for Performance Assessment **1**, 121 (2014).
- [5] G. Macioski, V. Oliveira e M.H.F. Medeiros, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais **14**, e14312 (2021).
- [6] J.C.C. Silva, *Monitoração de vibrações de estruturas com o emprego de sensores em fibra óptica*. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba (2005).
- [7] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings* (Academic Press, Oxford, 2009), 2 ed.
- [8] K.O. Hill, Y. Fujii, D.C. Johnson e B.S. Kawasak, Appl Phys Lett **32**, 647 (1978).
- [9] A. Othonos, Review of Scientific Instruments **68**, 4309 (1998).
- [10] S. Yin, P.B. Ruffin e F.T.S. Yu, *Fiber Optic Sensors* (CRC Press, Boca Raton, 2008), 2 ed.
- [11] C.A.J. Gouveia, J.M. Batista e A.S.P. Jorge, em: *Current Developments in Optical Fiber Technology* (IntechOpen, Londres, 2013), 1 ed.
- [12] S. Daud e J. Ali, *Fibre Bragg Grating and No-Core Fibre Sensors* (Springer, Cham, 2018), 1 ed.
- [13] A. Othonos e K. Kalli, *Fiber Bragg gratings: Fundamentals and applications in telecommunications and sensing* (Artech House, Boston, 1999), 1 ed.
- [14] V. Oliveira, *Redes de Bragg para medições em altas temperaturas*. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba (2012).
- [15] D. Couto, P. Helene e L.C. Almeida, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais **9**, 953 (2016).
- [16] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61757:2018 – Fibre optic sensors – Generic specification* (International Electrotechnical Commission, Genebra, 2018).
- [17] W.R. Habel, K. Krebber e W. Daum, SPIE Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration **9436**, 94360S (2015).
- [18] M.D. Lavarda, *Robô humanoide de membros inferiores proprioceptivos com controle adaptativo em inteligência artificial*. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba (2024).
- [19] P.V. Rialto Júnior, *Reconhecimento de padrões em movimentos de extensão dos dedos da mão utilizando dados coletados por redes de bragg em fibras óticas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba (2024).
- [20] N.C. Prediger, *Desenvolvimento de imunossensores baseados em redes de Bragg*. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba (2024).
- [21] F.M. Zanella, *Desenvolvimento de um sensor óptico de salinidade baseados em fibras ópticas plásticas em formato U*. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba (2024).
- [22] G. Martelli, *Ferramenta para análise de dados de temperatura de mancais de motores diesel ferroviários*. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba (2024).
- [23] D. Benetti, *Sistema óptico para detecção de anomalias em dispositivos eletromecânicos de comutação*. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba (2024).
- [24] J.C. Busatta, *Sensores óticos encapsulados em impressão 3D para medição simultânea de temperatura e deformação*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba (2024).
- [25] G. Macioski, V. Oliveira e M.H.F. Medeiros, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais **14**, e14312 (2021).
- [26] G. Macioski, L.F.M. Sanchez e M.H.F. Medeiros, em: *Proceedings of the 17th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* (Ottawa, 2024). Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-59349-9_6.

- [27] P.H.R. Mazzo, G.A. Torelli, U.J. Dreyer, J. Pelegrin, L.P. Siqueira, J.M.C. Cubas, M.A. Marcelino Neto, L.C.T. Silva, G.A. Romero, J.A.G. Silva et al., em: *Advanced Photonics Congress 2024* (Toronto, 2024). Disponível em: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=BGPP-2024-BTh2A.5>.
- [28] D.P. Nacaratti, R.E. Samad e C.C. Motta, em: *2021 SBFoton International Optics and Photonics Conference* (São Carlos, 2021). Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SBFotonIOPC50774.2021.9461968>.
- [29] K.T.V. Grattan e B.T. Meggitt, *Optical Fiber Sensor Technology* (Springer, New York, 1998), v. 2.
- [30] V. Grubsky, D.S. Starodubov e J. Feinberg, em: *Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Fibers and Waveguides: Applications and Fundamentals*, Optical Society of America (Williamsburg, 1997). Disponível em: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=BGPPF-1997-JMA.3>.
- [31] F. Bakhti, J. Larrey e P. Sansonetti, em: *Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Fibers and Waveguides: Applications and Fundamentals* (Williamsburg, 1997). Disponível em: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=bgppf-1997-BSuD.2>.
- [32] Y. Zhang, G. Keiser, C. Marzinsky, A.M. Schilowitz, L. Song e A.B. Herhold, em: *IEEE SENSORS* (Limerick, 2011). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6127094>.