

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JEAN CARLO BUSATTA

**SENSORES ÓTICOS ENCAPSULADOS EM IMPRESSÃO 3D PARA MEDIÇÃO
SIMULTÂNEA DE TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO**

PATO BRANCO

2024

JEAN CARLO BUSATTA

**SENSORES ÓTICOS ENCAPSULADOS EM IMPRESSÃO 3D PARA MEDIÇÃO
SIMULTÂNEA DE TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO**

**3D-Printed Embedded Optical Sensors for Simultaneous Measurement of
Temperature and Strain**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica do
Curso Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Kleiton de Moraes Sousa

PATO BRANCO

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JEAN CARLO BUSATTA

**SENSORES ÓTICOS ENCAPSULADOS EM IMPRESSÃO 3D PARA MEDIÇÃO
SIMULTÂNEA DE TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica do
Curso Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 06/Setembro/2024

Kleiton de Moraes Sousa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco

Gustavo Gomes Kuhn
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco

Ivo de Lourenço Junior
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco

PATO BRANCO
2024

Dedico este trabalho à minha família, especialmente ao meu pai e à minha mãe, pelo apoio incondicional em todos os obstáculos durante o curso. Também dedico à memória da minha querida avó, que infelizmente não pôde estar conosco até minha formatura, mas de quem tenho certeza que estaria orgulhosa

AGRADECIMENTOS

Ao meu professor orientador, Kleiton de Moraes Sousa, por me aceitar como orientando e por sua constante disponibilidade e apoio ao longo deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa e para meu crescimento acadêmico.

À minha família e amigos, pelo incentivo e compreensão durante toda a minha jornada na graduação. Vocês foram meu alicerce, me motivando a superar os desafios e a persistir em busca dos meus objetivos.

Ao Laboratório Multiusuario de Fotônica (FOTON), UTFPR-CT pela disponibilização dos recursos necessários para a realização deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

RESUMO

O presente trabalho aborda o desenvolvimento de um encapsulamento impresso em 3D para sensores de fibra ótica baseados em redes de Bragg (FBGs), com o intuito de realizar medições simultâneas de temperatura e deformação. A tecnologia de impressão 3D foi empregada para fabricar o encapsulamento, permitindo a incorporação dos sensores FBGs diretamente na estrutura, eliminando o uso de adesivos e proporcionando maior precisão e a manutenção da resposta linear dos sensores. A calibração do sensor, tanto em temperatura quanto em deformação, demonstrou a eficácia do encapsulamento em preservar as características lineares dos sensores FBGs, garantindo medições precisas e confiáveis. A análise dos resultados revelou a influência do design do encapsulamento na sensibilidade dos sensores, evidenciando a importância de considerar a distribuição do material em torno das FBGs para otimizar o desempenho. A capacidade de isolar os efeitos de temperatura e deformação, utilizando dois sensores FBGs, comprovou a viabilidade da medição simultânea dessas grandezas, crucial para diversas aplicações práticas. O trabalho demonstrou o potencial da integração de sensores FBGs em estruturas impressas em 3D para medições simultâneas de temperatura e deformação.

Palavras-chave: sensores FBG; fibra ótica; impressão 3D; temperatura; deformação.

ABSTRACT

The present work addresses the development of a 3D-printed encapsulation for Fiber Bragg Grating (FBG) optical sensors, aiming to enable simultaneous measurements of temperature and strain. 3D printing technology was employed to fabricate the encapsulation, allowing the direct incorporation of FBG sensors into the structure, eliminating the need for adhesives and providing greater precision and maintaining the linear response of the sensors. The sensor calibration, both in temperature and strain, demonstrated the effectiveness of the encapsulation in preserving the linear characteristics of the FBG sensors, ensuring accurate and reliable measurements. The analysis of the results revealed the influence of the encapsulation design on sensor sensitivity, highlighting the importance of considering the distribution of material around the FBGs to optimize performance. The ability to isolate the effects of temperature and strain, using two FBG sensors, proved the feasibility of simultaneously measuring these quantities, which is crucial for various practical applications. The work successfully demonstrated the potential of integrating FBG sensors into 3D-printed structures for simultaneous temperature and strain measurements.

Keywords: FBG sensor; optical fiber; 3D printed; strain; temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Princípio de funcionamento de um sensor FBG	13
Figura 2 – Interface de trabalho do TinkerCad	16
Figura 3 – Impressora 3D Creality Ender 3	17
Figura 4 – Banho termostático Polyscience®	18
Figura 5 – Interrogador ótico HBM DI410	19
Figura 6 – Dimensões do encapsulamento	20
Figura 7 – Design encapsulamento das FBGs	20
Figura 8 – Diagrama esquemático da utilização de FDM para incorporar FBG dentro de um encapsulamento de PLA fundido	21
Figura 9 – Método para calibração em deformação	23
Figura 10 – Método para calibração em deformação em laboratório	23
Figura 11 – Encapsulamento pronto	26
Figura 12 – Variação do comprimento de onda durante a impressão	26
Figura 13 – Calibração em temperatura	27
Figura 14 – Calibração em deformação	29
Figura 15 – Grafico Temperatura x Deformação	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios para calibração em temperatura	27
Tabela 2 – Valores medição de deformação através do sensor nu	28
Tabela 3 – Valores médios para calibração em deformação	28
Tabela 4 – Comparação sensibilidades para diferentes encapsulamentos	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos	10
1.2	Objetivos específicos	11
1.3	Estrutura do trabalho	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Sensores FBG	12
2.2	Sensibilidade Cruzada	14
2.3	Encapsulamento dos sensores	15
3	MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1	Materiais	16
3.1.1	TinkerCad	16
3.1.2	Impressora 3D	16
3.1.3	Plástico PLA	17
3.1.4	Banho termostático Polyscience®	18
3.1.5	Interrogador ótico	19
3.2	Métodos	19
3.2.1	Design do encapsulamento	19
3.2.2	Impressão 3D	21
3.2.3	Calibração em temperatura	22
3.2.4	Calibração em deformação	22
3.2.5	Validação do modelo	22
4	RESULTADOS	25
4.1	Construção do encapsulamento	25
4.2	Calibração em temperatura	26
4.3	Calibração em deformação	28
4.4	Discussões	29
5	CONCLUSÃO	32
	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

Os processos de medições desempenham um papel crucial no avanço da ciência, pois permitem a quantificação precisa e objetiva dos fenômenos naturais. Elas fornecem os dados necessários para testar hipóteses, validar teorias e desenvolver modelos científicos que expliquem o comportamento do universo. Através de medições rigorosas e repetíveis, os cientistas podem identificar padrões, fazer previsões e realizar experimentos controlados que expandem o conhecimento humano. Sem medições precisas, o progresso científico seria limitado, uma vez que a ciência se baseia na capacidade de observar, quantificar e comparar resultados de forma confiável.

Embora a tecnologia de sensores com base eletrônica seja eficaz para a maioria das aplicações, ela apresenta limitações em cenários específicos. Interferências elétricas ou eletromagnéticas, a distância entre o ponto de medição e o sistema de aquisição de dados, o número de pontos a serem monitorados, e as dimensões, volume e peso dos cabos de comunicação podem comprometer a sua aplicabilidade. Nesses casos, os sensores de fibra ótica surgem como uma alternativa real, complementando ou até mesmo substituindo os sensores convencionais.

Os sensores em fibra ótica surgiram a partir da década de 60 e com o aumento da utilização de fibras óticas em telecomunicações, diversos tipos de sensores e diversas aplicações foram desenvolvidas (SANTOS J.L.; FARAHI, 2015). Esses tipos de sensores possuem diversas características que os tornam altamente vantajosos em várias indústrias. Eles são compactos, leves e geralmente minimamente invasivos (CULSHAW, 2004). Além disso, sua capacidade de multiplexação permite que vários sensores sejam integrados em uma única fibra, otimizando a coleta de dados. Outras características desses sensores são a imunidade à interferência eletromagnética, já que não utilizam corrente elétrica, o que os torna ideais para operação em ambientes com alta atividade de campos eletromagnéticos, como na indústria elétrica, são química e biologicamente inertes, uma vez que o material de transdução, a sílica, não é afetada pela maioria dos agentes químicos e biológicos. Ademais, as fibras óticas operam eficientemente em longas distâncias, permitindo que o monitoramento seja realizado a quilômetros de distância com mínima ou nenhuma perda de dados (MOKHTAR; SUN; GRATTAN, 2012).

Em 1978, surgiram as primeiras redes gravadas internamente em uma fibra ótica, conhecidas como "Grades de Hill". Essas redes foram a base para o desenvolvimento dos sensores FBG (Fiber Bragg Grating). Posteriormente, em 1989, Meltz demonstrou a viabilidade da gravação de redes periódicas no núcleo da fibra ótica, formando as chamadas "Redes de Bragg" (SANTOS J.L.; FARAHI, 2015).

Os sensores FBG que tem adquirido um grande espaço no mercado. As peculiaridades dos FBGs como possuem uma alta sensibilidade, alta resolução, ampla faixa dinâmica assim como sua imunidade a interferência de rádio frequência (*RFI*) e interferência eletromagnética (*EMI*), e sua capacidade de interação com sistemas de comunicação de dados, contribuíram para que essa tecnologia fosse altamente difundida em muitas atividades de sensoria-

mento. Devido à grande sensibilidade a múltiplos parâmetros como físicos, químicos, biomédico e elétricos, eles são usados para o monitoramento da saúde estrutural em infraestruturas civis, aeroespaciais, energética e marítima, onde a informação associada com as medidas são normalmente codificadas pela mudança no comprimento de onda de Bragg dos FBGs (CAMPANELLA *et al.*, 2018).

Embora os sensores FBG apresentem inúmeras vantagens, a sensibilidade cruzada entre deformação e temperatura limita sua aplicação em cenários onde a distinção precisa entre esses parâmetros é crucial. Na engenharia, por exemplo, o monitoramento da integridade estrutural exige a medição independente de temperatura e deformação para avaliar a integridade de diversas estruturas (MCPOLIN *et al.*, 2009).

Para garantir o desempenho ideal e a longevidade dos sensores FBG nos mais diversos ambientes, o encapsulamento desempenha um papel fundamental. Ele protege o sensor contra danos mecânicos, umidade, produtos químicos e outros fatores ambientais que podem afetar sua precisão e confiabilidade. Além disso, o encapsulamento pode ser projetado para melhorar a sensibilidade do sensor a parâmetros específicos, como deformação ou temperatura, e minimizar a sensibilidade cruzada como mostrado em (MOKHTAR; SUN; GRATTAN, 2012) e (DREYER *et al.*, 2013).

A aplicação do método de impressão 3D para o design, fabricação e otimização de sensores FBG é ainda muito pouco explorada. Sensores FBG convencionais normalmente dependem do uso de cola ou resina epóxi para fixar os sensores FBG. O uso de cola ou epóxi pode levar a problemas sérios de adesão, como incompatibilidade com diferentes substratos, excesso de adesivo e falhas na união. Em comparação com a tecnologia tradicional de processamento fino, a técnica de impressão 3D FDM (Fused Deposition Modeling ou Modelagem de Deposição Fundida) é um método simples para fabricar vários protótipos funcionais. As vantagens do uso de FDM para a fabricação de encapsulamentos é a alta precisão, economia de tempo, facilidade de design, entre outros. No entanto, poucos estudos foram encontrados focando nas aplicações da impressão 3D para fabricar diferentes sensores de fibra óptica funcionais. Investigações anteriores mostram que sensores FBG podem ser incorporados com sucesso em protótipos impressos em 3D, uma vez que os FBGs são de tamanho reduzido e flexíveis, mas com várias limitações a curvatura de raios pequenos (HONG; ZHANG; BORANA, 2019).

1.1 Objetivos

O propósito deste trabalho é projetar, desenvolver e implementar um encapsulamento para sensores FBG (Fiber Bragg Grating) que permita a medição simultânea de temperatura e deformação. Utilizando a técnica de impressão 3D, pretende-se criar uma solução que ofereça robustez, eficiência e rapidez na integração desses sensores. O trabalho abordará desde a concepção do design até a fabricação e calibração dos sensores, garantindo que eles possam fornecer dados confiáveis para os parâmetros de medição exigidos.

1.2 Objetivos específicos

- Revisar a literatura e pesquisar sobre o funcionamento dos sensores FBGs e métodos de encapsulamento dos mesmos.
- Determinar a geometria do encapsulamento a ser feito e fabricá-lo através da impressão 3D.
- Calibração do sensor em temperatura
- Calibração do sensor em deformação
- Analisar e comparar os dados obtidos durante o processo de calibração para validar o funcionamento do mesmo
- Comparar os resultados deste trabalho com outros encapsulamentos mais tradicionais

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está apresentado da seguinte forma. O capítulo 1 compreende uma introdução, na qual apresenta-se o problema e as técnicas estudadas assim como o objetivo do trabalho. A seguir, no Capítulo 2 é feita a fundamentação teórica do trabalho, descrevendo sobre os princípios de funcionamento dos sensores FBG, ua explicação do problema de sensibilidade cruzada, assim como o método proposto para a fabricação do encapsulamento para resolver este problema. O Capítulo 3 apresenta os materiais e metodologias utilizados para a construção e calibração dos sensores, seguido do Capítulo 4 no qual os resultados obtidos são dispostos para uma análise comparativa. Ao final, o Capítulo 5 apresenta as principais conclusões retiradas deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo aborda os fundamentos teóricos essenciais para a compreensão e o desenvolvimento do trabalho. Primeiramente, será apresentado um detalhamento sobre o funcionamento dos sensores de Rede de Bragg em Fibra Óptica (FBG). Em seguida, será discutido o desafio da sensibilidade cruzada nesses sensores. Por fim, será explorada a solução proposta para mitigar esse problema: o encapsulamento de dois sensores FBG, permitindo assim a medição simultânea de temperatura e deformação.

2.1 Sensores FBG

Em 1978, Hill revolucionou a área de fibras óticas ao demonstrar a possibilidade de modificar o índice de refração do núcleo de uma fibra fotossensível dopada com germânio. Essa alteração era realizada através da incidência direta de um laser de íon de argônio no núcleo da fibra, criando as chamadas "Grades de Hill". Embora inicialmente considerada uma curiosidade científica, a observação de que um filtro de banda estreita se formava no interior da fibra, refletindo parte da banda do sinal aplicado, abriu caminho para o desenvolvimento de sensores em fibras óticas (OTHONOS; KALLI, 1999).

Aproximadamente uma década depois, Meltz expandiu essa descoberta, demonstrando que a modificação do índice de refração poderia ser feita externamente à fibra ótica. Isso permitiu a criação de um padrão de grades de interferência periódicas, capazes de refletir comprimentos de onda específicos, dependendo do espaçamento entre as grades. Essas estruturas foram então nomeadas "Redes de Bragg" (MOREY; MELTZ; WEISS, 1995).

Os sensores FBG são dispositivos óticos que utilizam redes de Bragg em uma fibra ótica para medir diversas grandezas físicas, como temperatura, pressão, deformação, vibração entre outros. Os FBG são uma modulação do índice de refração no núcleo de uma fibra ótica. O princípio de funcionamento de um FBG é mostrado na Figura 1, onde uma fonte de luz incide no núcleo de uma fibra ótica. Se a condição de Bragg não for satisfeita, a luz refletida por cada uma dessas estruturas subsequentes se tornará progressivamente fora de fase e eventualmente será cancelada. Em adição a isso, a luz que não coincide com a ressonância do comprimento de onda de Bragg irá ser muito pouco refletida pela FBG. Onde a condição de Bragg é satisfeita, esses comprimentos de ondas irão se adicionar construtivamente na direção contrária. Esse fenômeno irá produzir um sinal refletido pela rede de Bragg que tem o espectro ótico com uma faixa centralizada com o comprimento de onda aproximado que satisfaz a condição de Bragg (OTHONOS *et al.*, 2006).

A condição de Bragg é simplesmente a condição que satisfaz a conservação da energia e do momento. A conservação de energia ($\hbar\omega_f = \hbar\omega_i$), requer que a frequência da radiação incidente e da refletida sejam os mesmos. Já a conservação do momento precisa o vetor de onda incidente, k_i , mais o vetor de onda da rede de Bragg, K , seja igual ao vetor de onda da

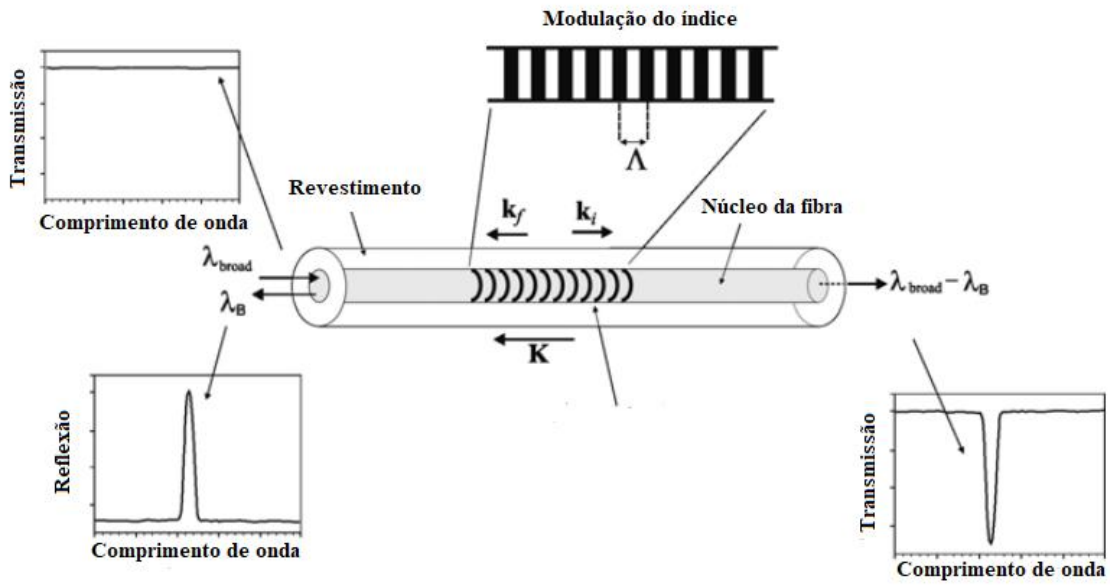


Figura 1 – Princípio de funcionamento de um sensor FBG

Adaptado de (OTHONOS *et al.*, 2006)

radiação espalhada k_f , como mostrado na equação (1):

$$k_i + K = k_f, \quad (1)$$

em que o vetor de onda da rede de Bragg, K , tem uma direção normal para as estruturas do FBG com uma magnitude de $2\pi/\Lambda$ (Λ sendo o período de modulação ao longo do FBG como mostrado na Figura 1). A difração do vetor de onda é igual em magnitude, mas em direção oposta ao vetor de onda incidente, resultando na condição de conservação do momento mostrado na equação (2)

$$2 \left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (2)$$

que é simplificada para a condição de Bragg de primeira ordem

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (3)$$

em que o comprimento de onda de Bragg, ou comprimento de onda de ressonância, λ_B , é o espaço livre no centro do comprimento de onda da luz de entrada da fibra que será refletida de volta da rede de Bragg, e n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra ótica no espaço livre no centro do comprimento de onda (OTHONOS *et al.*, 2006).

2.2 Sensibilidade Cruzada

Qualquer efeito que possa mudar as propriedades de uma fibra ótica, como a variação de temperatura ou alguma deformação mecânica, causam uma mudança no período ou índice de refração efetivo da FBG, fazendo com que o comprimento de onda de ressonância seja alterado também. Essas mudanças são o que permitem as FBGs a serem usadas como sensores para medir tais variações (DREYER *et al.*, 2013).

Para determinar a sensibilidade dessas perturbações, a Equação (3) pode produzir o diferencial que representa o comportamento do comprimento de onda de Bragg com as perturbações em temperatura e na deformação do sensor. A mudança no comprimento de onda de ressonância é dado pela equação (4) depois de desenvolver o diferencial da equação (3) em que l é a deformação mecânica da FBG e T a temperatura, $(\delta n_{eff}/\delta l)$ representa a sensibilidade do índice efetivo para mudanças de comprimentos de Δl , ou a propriedade elasto-óptica da fibra, enquanto $(\delta n_{eff}/\delta T)$ é relacionado a sensibilidade da mudança de índice termal de ΔT , ou as propriedades termo-ópticas. $(\delta \Lambda/\delta T)$ é relacionado a sensibilidade a expansão termal do sensor e $(\delta \Lambda/\delta l)$ é ligada a mudança no período do FBG causada pela deformação.

$$\Delta \lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\delta n_{eff}}{\delta l} + n_{eff} \frac{\delta \Lambda}{\delta l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\delta n_{eff}}{\delta T} + n_{eff} \frac{\delta \Lambda}{\delta T} \right) \Delta T, \quad (4)$$

Na equação (4) a mudança no comprimento de onda de ressonância do sensor ($\Delta \lambda_B$) é causada por distúrbios termais e mecânicos, mudando o índice refrativo ou comprimento de onda do sensor FBG. Logo, o monitoramento do sinal refletido pelo FBG permite determinarmos essa mudança. Porém, dos problemas de lidarmos com os sensores FBG para ser feita a medição de temperatura ou deformação é a sensibilidade cruzada, como mostrado anteriormente, apesar de determinarmos que houve uma mudança no comprimento de onda de ressonância do FBG, não conseguimos determinar o que causa essa mudança exatamente, se ela ocorre devido à mudança de temperatura ou devido a uma deformação mecânica ou de ambos. Essa mudança no comprimento de onda pode ser escrita de maneira mais compacta como uma função de deformação e temperatura através da equação (5):

$$\Delta \lambda_B(\epsilon, T) = K_S \Delta \epsilon + K_T \Delta T, \quad (5)$$

em que $\Delta \lambda_B$ é a variação do comprimento de onda de ressonância, K_S e K_T são a sensibilidade a deformação e a temperatura respectivamente, $\Delta \epsilon$ é a deformação mecânica e ΔT é a mudança de temperatura.

2.3 Encapsulamento dos sensores

Devido ao problema de sensibilidade cruzada, este trabalho tem como proposta um processo de encapsulamento dos sensores FBG através de impressão 3D para tornar possível a medição simultânea de temperatura e deformação, baseado no princípio de que tendo dois FBG expostos aos mesmos arredores, a temperatura e a deformação podem ser distinguidas uma da outra resolvendo a seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{\epsilon 2} & -K_{\epsilon 1} \\ -K_{T2} & K_{T1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

, em que $K_{\epsilon i}$ é o coeficiente de deformação efetivo e K_{Ti} , é o coeficiente de temperatura efetivo para os FBG, $i = 1, 2$ sendo referido aos FBG 1 e 2, $D = K_{T1} K_{\epsilon 2} - K_{T2} K_{\epsilon 1}$, e $\Delta \lambda_{Bi}$ é a mudança no comprimento de onda de ressonância. Esses coeficientes podem ser determinados experimentalmente (FRAZÃO; SANTOS, 2004).

Baseado no trabalho de Mokhtar, Sun e Grattan (2012) onde é dito que a sensibilidade dos valores ΔT e $\Delta \epsilon$ podem ser melhorados quanto maior for o parâmetro D, implícito através da Equação 6. Esses parâmetros são influenciados pelo material usado na fibra ótica e também pelo encapsulamento usado para proteger os FBG. Portanto, é possível controlar os coeficientes de expansão térmica e mecânica mudando as características do encapsulamento dos sensores FBG.

Na maioria dos estudos anteriores, cola e resina epóxi foram usadas para aderir sensores FBG às estruturas monitoradas, como vigas, superfícies de estacas, pêndulos, superfícies de inclinômetros. As propriedades da cola podem não ser estáveis, especialmente em ambientes severos, como altas temperaturas e umidade. (HONG *et al.*, 2019)

Por isso foi decidido pelo uso de um encapsulamento feito através da técnica de FDM que é usada para fabricação rápida, modelagem e prototipagem de diferentes produtos usando materiais plásticos. Nesse processo, o material bruto é extrudado através de um bico que traça a geometria seccional cruzada de um modelo protótipo camada por camada. Uma série de materiais está disponível para FDM, como copolímeros de acrilonitrila butadieno estireno (ABS), ácido polilático (PLA), cloreto de polivinila (PVC) e poliuretanos termoplásticos (TPU) (HONG; ZHANG; BORANA, 2019) com isso FDM pode fundir totalmente o sensor FBG dentro do material usado, protegendo os sensor.

Além das vantagens já citadas do uso desses sensores, temos ainda a fabricação rápida, facilidade de customização, e variedade na sensibilidade das medições de acordo com o que for necessário (HONG; ZHANG; BORANA, 2019). Sendo assim, dependendo finalidade da aplicação em que esse encapsulamento for colocado, ele poderá ser personalizado para atender os requisitos específicos necessários.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

O desenvolvimento deste trabalho necessita da criação de um modelo 3D, assim como uma impressora 3D para a impressão do mesmo. Na etapa de calibração em temperatura será preciso um banho térmostático e na calibração da deformação é utilizado um sensor FBG nú, uma placa de alumínio e alguns pesos. Além disso, durante todos os processos será utilizado um interrogador ótico para realizar a medição da variação do comprimento de onda nos sensores FBG.

3.1.1 TinkerCad

Para o desenvolvimento do encapsulamento utilizado foi empregado o Autodesk® TinkerCad, uma ferramenta de design e modelagem 3D intuitiva e acessível. O TinkerCad permite criar um modelo detalhado e adequado para impressão 3D, garantindo que todas as especificações e dimensões sejam respeitadas. Utiliza-se suas funcionalidades de desenho e simulação para ajustar o design conforme necessário, resultando em um encapsulamento que atende aos requisitos do projeto.

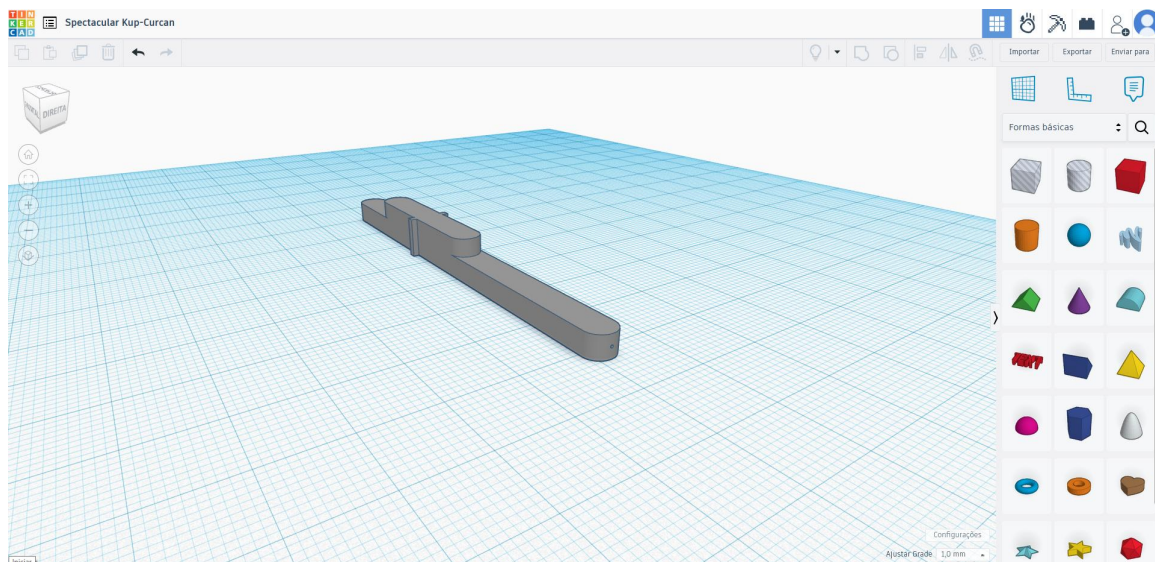


Figura 2 – Interface de trabalho do TinkerCad

Fonte: Autoria própria

3.1.2 Impressora 3D

A impressão do encapsulamento do sensor será feita através de uma impressora 3D Ender 3 da marca Creality. Com ela, foi possível transformar o modelo digital criado no Tinker-

Cad em um protótipo físico funcional. A impressora foi configurada para otimizar a resolução e a qualidade do material, resultando em um encapsulamento que atende às especificações técnicas do projeto.



Figura 3 – Impressora 3D Creality Ender 3

Disponível em: <<https://cdn.shoppub.io/cdn-cgi/image/w=1000,h=1000,q=80,f=auto/oficinasdosbits/media/uploads/produtos/foto/rmwykmed/file.png>>
acesso em Julho de 2024

3.1.3 Plástico PLA

Dentre os materiais usados para impressão 3D foi escolhido o PLA (*Polylactic acid*) ou Ácido Polilático devido as suas propriedades condizentes com as necessidades do projeto, e também por causa da fácil disponibilidade do material. É um tipo de filamento termoplástico. O PLA caracteriza-se por ser um dos materiais mais populares, disponibilizado em várias cores e pela maioria dos fornecedores de suprimentos para a tecnologia, além de apresentar maior facilidade para imprimir quando comparado, por exemplo, ao ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno). O PLA dispõe de melhores características termomecânicas que o ABS, apresentando maior resistência mecânica e menor coeficiente de expansão térmica, o que melhora sua capacidade de impressão, reduzindo efeitos como o empenamento durante o processo de fabricação (SANTANA *et al.*, 2018).

O ácido polilático consiste em um poliéster alifático linear, termoplástico. Trata-se de um polímero sintetizado a partir de fontes renováveis como o açúcar de milho, batata, e cana de açúcar, através de biconversão e polimerização. O PLA dispõe de características interessantes, tais como biocompatibilidade, biodegradabilidade, e absorção biológica, além de boas propriedades mecânicas e de processabilidade, estabilidade térmica e baixo impacto ambiental. A resistência à tração do PLA encontra-se em aproximadamente (50 a 70) MPa e o módulo de elasticidade entre (3,0 e 4,0) GPa, dependendo da massa molar e da composição estereoquímica. Termicamente o PLA apresenta uma temperatura de transição vítrea próxima a (55 a 65) °C, e quando semicristalino um ponto de fusão no intervalo de (170 a 180) °C. O material é

utilizado em muitas indústrias, sobretudo em setores como a fabricação de implantes médicos biodegradáveis e embalagens para alimentos. Entretanto, algumas deficiências do PLA, como a fragilidade inerente, um limitado alongamento até a ruptura, e uma baixa resistência ao impacto, constituem alguns desafios para a ampla aplicação do material (WANG *et al.*, 2017).

Todas essas características térmicas e mecânicas tornam o PLA uma boa opção para a construção de encapsulamento, mesmo com o limitado alongamento até a ruptura, em um sensor que irá ser usado para deformação, a resistência a tração excede em muito ao esforço mecânico que o encapsulamento será submetido.

3.1.4 Banho termostático Polyscience®

O banho termostático é um equipamento essencial neste trabalho, que permite a termorregulação de uma amostra, por meio do controle da temperatura de um fluido térmico, neste caso, água destilada. O banho termostático assegura que a temperatura do sistema seja controlada com alta precisão, sendo necessário para a calibração em temperatura do encapsulamento, pois para isso é exigido uma condição térmica constante. A estabilidade térmica proporcionada por este equipamento é fundamental para validar a performance e a precisão do sensor ao longo da faixa de temperatura necessária.



Figura 4 – Banho termostático Polyscience®

Fonte: Autoria própria

3.1.5 Interrogador ótico

O interrogador ótico HBM DI410 é um dispositivo utilizado para a medição e análise de sinais de sensores FBG. O DI410 utiliza uma fonte de luz de banda larga para iluminar a fibra óptica contendo os sensores. Cada sensor FBG reflete uma parte específica do espectro de luz de acordo com o λ_B gravado de cada sensor e a condição medida (como deformação ou temperatura). O interrogador capta essas reflexões e mudanças no comprimento de onda refletido, que são diretamente proporcionais às variações físicas nos sensores.



Figura 5 – Interrogador ótico HBM DI410

Disponível em: <<https://svc-zip.ru/image/cache/data/HBM/opticheskie/DI410-1-800x800.jpg>>
Acesso em Julho de 2024

3.2 Métodos

Com o objetivo de otimizar o desempenho dos sensores em todos os parâmetros medidos, foram desenvolvidos métodos abrangentes para a construção, calibração e validação do encapsulamento. As seções subsequentes detalharão o processo, desde a concepção do design até a fabricação, passando pela calibração em temperatura e deformação, e culminando na validação dos resultados obtidos. Essa abordagem integrada visa garantir a eficácia do encapsulamento na medição simultânea de temperatura e deformação, explorando todo o potencial dos sensores FBG em aplicações práticas.

3.2.1 Design do encapsulamento

Baseado no trabalho de Mokhtar, Sun e Grattan (2012), a sensibilidade nas mudanças no comprimento de onda nos ensaios de deformação e temperatura podem ser melhorados

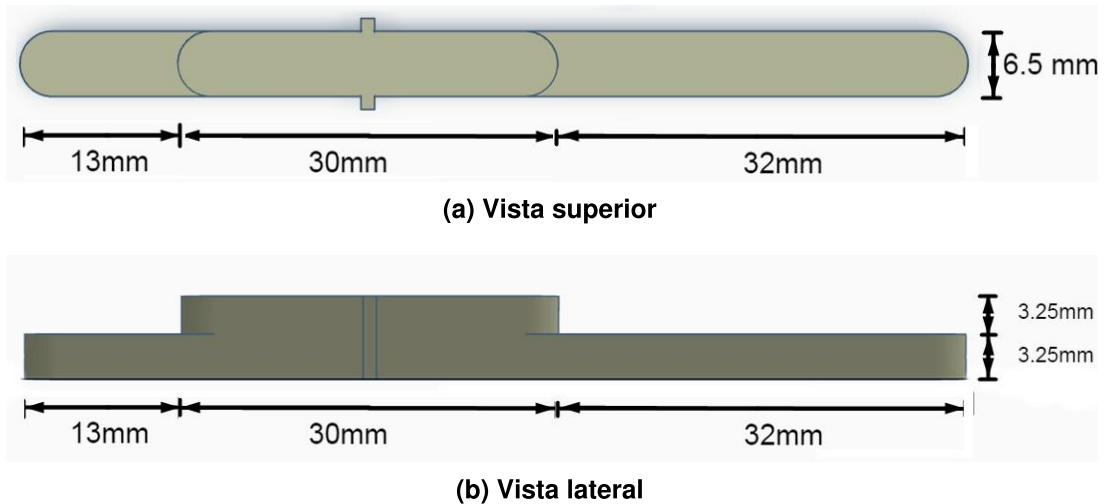


Figura 6 – Dimensões do encapsulamento

Fonte: Autoria própria

se o encapsulamento ao redor dos sensores FBG forem de dimensões não uniformes, dessa maneira, foi feito um encapsulamento da maneira mais simples possível para que ele atingisse esse objetivo. Com um volume maior de material em volta de um dos sensores como mostrado na Figura 7.

As dimensões usadas para o design do encapsulamento estão contidas nas Figuras 6a e 6b

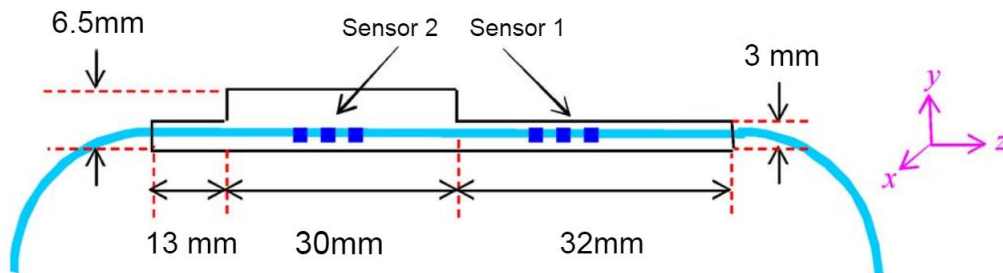


Figura 7 – Design encapsulamento das FBGs

Adaptado de (HONG; ZHANG; BORANA, 2019)

Ainda na Figura 7 temos identificados os dois sensores que serão encapsulados, sendo o Sensor 2 o que tem uma camada mais espessa de material em volta dele, e o Sensor 1 o que fica localizado na camada mais fina, essas serão as posições de referência para ambos os sensores toda vez que eles forem citados nesse trabalho

3.2.2 Impressão 3D

A impressora 3D utilizada neste trabalho usa a técnica FDM, que é um dos métodos mais comuns na impressão 3D, e se baseia na deposição de material fundido em camadas sucessivas para construir um objeto tridimensional. O princípio de funcionamento dessa técnica é mostrado na figura 8.

Como o processo de impressão é feito por camadas, a impressão foi programada para interromper automaticamente ao atingir 1.62 mm de altura, permitindo a inserção dos sensores FBG. Neste estágio, a máquina de impressão pausa temporariamente, proporcionando uma janela para que os sensores sejam colocados cuidadosamente na posição designada dentro da peça em construção. Para garantir a estabilidade da fibra ótica durante a impressão, uma das pontas é colada e a fibra é tensionada até que haja uma variação próxima a 100 picômetros (pm) no comprimento de onda. Essa variação mínima ajuda a assegurar que a fibra esteja devidamente tensionada e estável, para evitar deslocamentos ou movimentos indesejados durante o processo de impressão. A tensão controlada é fundamental para manter a integridade e o desempenho da fibra durante sua aplicação. Após a inserção, a impressão é retomada, completando o processo ao encapsular os sensores de forma segura dentro do material plástico. Este método garante que os sensores FBG fiquem firmemente fixados na peça impressa, resultando em um encapsulamento eficiente e funcional para futuras medições.

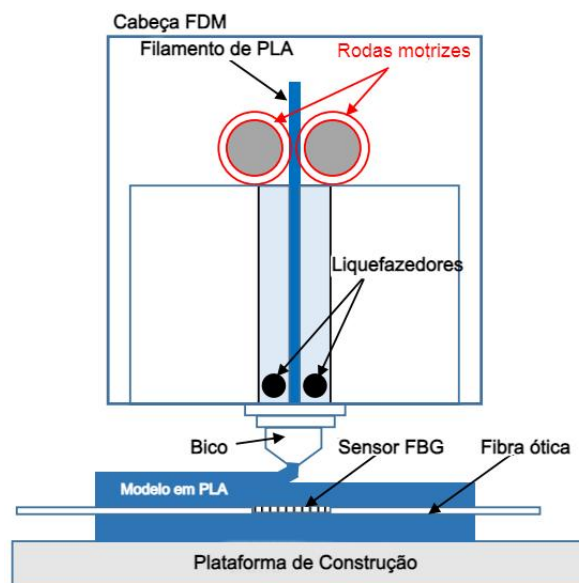


Figura 8 – Diagrama esquemático da utilização de FDM para incorporar FBG dentro de um encapsulamento de PLA fundido

Adaptado de (HONG; ZHANG; BORANA, 2019)

3.2.3 Calibração em temperatura

Para a calibração dos sensores FBG em relação à temperatura, foi adotado um processo de controle térmico utilizando um banho termostático. Este sistema permitiu uma variação exata da temperatura, abrangendo um intervalo de 10 °C a 30 °C. A calibração foi realizada em incrementos de 5 °C, com cada temperatura mantida constante por um período de 15 minutos para garantir a estabilidade térmica necessária para medições exatas. Durante esses períodos, foram registradas as medições do comprimento de onda refletido pelos sensores FBG em cinco pontos específicos: 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C e 30 °C. Cada ponto de temperatura fornecerá dados do comportamento espectral dos sensores sob diferentes condições térmicas. Este procedimento de calibração detalhado irá permitir mapear a relação entre a temperatura ambiente e a variação do comprimento de onda dos sensores FBG. Através dessas medições, será possível estabelecer uma correlação direta entre a temperatura e as mudanças no comprimento de onda, essencial para a aplicação precisa dos sensores em contextos onde a medição térmica é crítica.

3.2.4 Calibração em deformação

Neste estudo, será adotada uma metodologia específica para a calibração do sensor em deformação. Primeiramente, o sensor FBG encapsulado será colado em uma placa de alumínio como mostrado na Figura 9a. Paralelamente, um segundo sensor FBG, sem encapsulamento, será fixado diretamente na parte de trás da mesma placa como mostrado na Figura 9b. Para induzir a deformação, um peso será aplicado à placa de alumínio, gerando tensão mecânica, que irá deformar a placa de alumínio, e consequentemente o encapsulamento com os sensores e também o sensor FBG nú. Como a relação entre deformação e a mudança do comprimento de onda do sensor sem encapsulamento é conhecida, será possível determinar a deformação aproximada da placa de alumínio. Esses dados permitirão estabelecer a relação entre deformação e variação do comprimento de onda, que será então utilizada para calibrar o sensor encapsulado. Com essa calibração será possível fornecer medições de deformação em futuras aplicações.

3.2.5 Validação do modelo

O desempenho do encapsulamento apresentado foi avaliado a partir do coeficiente de determinação (R^2) demonstrado na equação (7).em que $\bar{y}$ e $\hat{y}_i$ referem a média dos valores medidos e preditos respectivamente.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (7)$$



Figura 9 – Método para calibração em deformação

Fonte: Autoria própria



Figura 10 – Método para calibração em deformação em laboratório

Fonte: Autoria própria

O coeficiente de determinação é descrito como a proporção da informação de interesse que é explicada pelo modelo. Esse fator não é aplicado para medir a acurácia do sistema, mas sim para medir a correlação das variáveis no modelo construído.

Dessa forma, o capítulo que se encerra cumpriu seu objetivo de apresentar os materiais e métodos empregados na construção e calibração do encapsulamento para sensores FBG. A metodologia detalhada, abrangendo desde a impressão 3D até os procedimentos de calibração em temperatura e deformação, e também a validação do modelo, fornece o embasamento ne-

cessário para a análise dos resultados que serão apresentados no próximo capítulo. Através da comparação dos dados obtidos, será possível avaliar a eficácia do encapsulamento na medição simultânea de temperatura e deformação, validando a proposta de aprimorar a sensibilidade e o desempenho dos sensores FBG em aplicações práticas.

4 RESULTADOS

O capítulo apresenta os principais resultados obtidos com a construção do encapsulamento e a calibração do mesmo em temperatura e deformação.

4.1 Construção do encapsulamento

Durante a fabricação do encapsulamento através da impressão 3D, foi monitorado em tempo real as alterações no comprimento de onda da luz refletida pelas FBGs incorporadas à estrutura. Para isso, foi utilizado o interrogador ótico com uma alta frequência de amostragem de 50 Hz, capturando assim até as menores variações. Os gráficos mostrados na Figura 12a e 12b apresentam a evolução do comprimento de onda desses sensores ao longo de todo o processo, revelando três fases distintas:

A fase inicial, que acontece antes do início da impressão 3D, o comprimento de onda refletido pelas FBGs permanece estável em aproximadamente 1532.075 nm para o sensor 1 e 1552.712 nm para o sensor 2. Isso indica que as fibras estão em um estado de equilíbrio, sem sofrer deformações ou tensões mecânicas externas.

A segunda fase, que é a fase onde é iniciado o processo de impressão 3D. Com o início da extrusão do plástico PLA fundido, o comprimento de onda sofre um aumento abrupto, atingindo um pico acima de 1554 nm para o sensor 2 e acima de 1533.5 nm para o sensor 1, mesmo que por muito pouco tempo. Essa variação é resultado da interação entre a fibra óptica e o material em processo de solidificação e também o calor vindo do PLA em temperatura elevada causando a expansão térmica na fibra, alterando seu período de grade e, consequentemente, o comprimento de onda refletido. Além disso, o movimento da impressora e a própria deposição do material podem gerar tensões mecânicas na fibra, contribuindo para as flutuações observadas no gráfico.

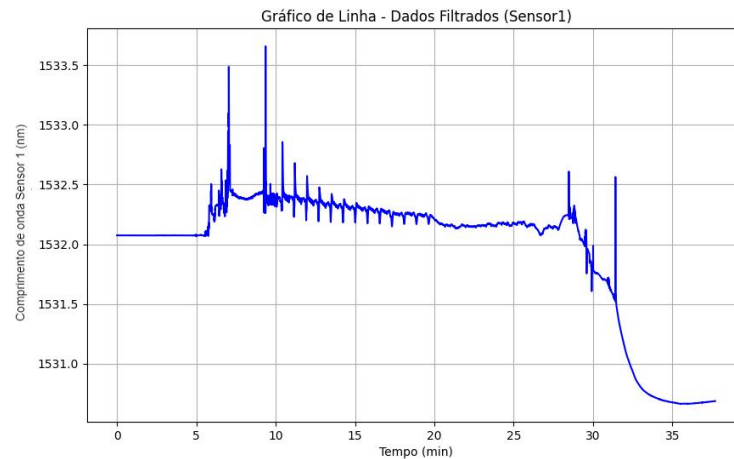
E a terceira e última fase que se dá após a conclusão da impressão e o resfriamento do PLA, o comprimento de onda se estabiliza em um novo valor, próximo a 1530.687 nm para o sensor 1 e 1550.995 nm para o sensor 2, valores inferiores aos iniciais. Essa redução é explicada pela contração térmica do PLA durante sua solidificação. Ao esfriar, o plástico se contrai, comprimindo a fibra óptica e diminuindo a periodicidade. Essa compressão resulta em uma redução no comprimento de onda refletido, como observado nos gráficos. Na Figura 11 temos uma foto do protótipo do encapsulamento pronto.

O monitoramento em tempo real do comprimento de onda refletido pelas FBGs permite-se acompanhar as diferentes etapas da fabricação do encapsulamento e compreender a influência dos parâmetros do processo (temperatura, tensões mecânicas) sobre a estrutura da fibra óptica. Essa análise detalhada é fundamental para otimizar o processo de fabricação e garantir a integridade e o desempenho do encapsulamento final.

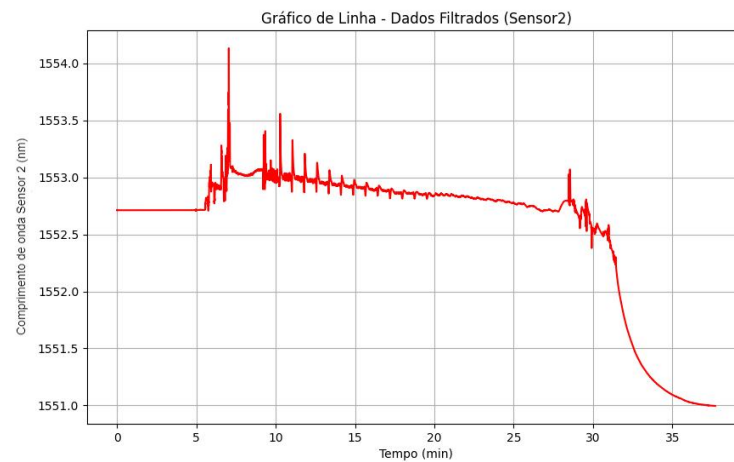


Figura 11 – Encapsulamento pronto

Fonte: Autoria Própria



(a) Variação do comprimento de onda do sensor 1



(b) Variação do comprimento de onda do sensor 2

Figura 12 – Variação do comprimento de onda durante a impressão

Fonte: Autoria própria

4.2 Calibração em temperatura

As curvas de calibração por temperatura, visualizadas no gráfico da Figura 13 foram obtidas a partir dos pontos médios de cinco calibrações realizadas para cada um dos sensores FBG distintos. Os valores do comprimento de onda de Bragg usados para o desenho dos gráficos podem ser encontrados na Tabela 1. A notável linearidade dessas curvas, evidenciada

pela aderência dos pontos experimentais às suas respectivas linhas de tendência, comprova a manutenção das características lineares das FBGs mesmo após o processo de encapsulamento. O elevado coeficiente de determinação R^2 de ambas as curvas, superior a 0,99, reforça a forte correlação linear entre a variação de temperatura e a mudança no comprimento de onda refletido pelas fibras.

Tabela 1 – Valores médios para calibração em temperatura

	Temp (°C) Média	Lambda (nm) Médio
Sensor 1	10.0742	1530.1484
	14.9294	1530.7056
	19.9222	1531.2338
	24.9286	1531.6564
	29.9236	1532.0178
Sensor 2	10.0742	1551.8072
	14.9294	1552.2318
	19.9222	1552.5672
	24.9286	1552.8608
	29.9236	1553.1752

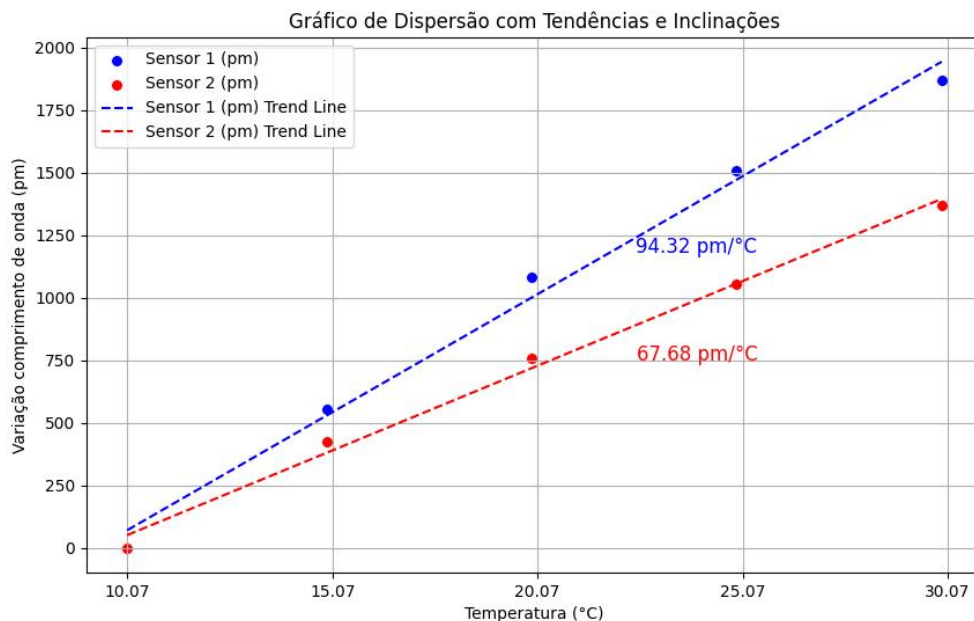


Figura 13 – Calibração em temperatura

Um aspecto crucial revelado pelo gráfico na figura é a distinção na sensibilidade dos dois sensores, posicionados em diferentes regiões do encapsulamento. A inclinação mais acentuada da curva do Sensor 1 em relação ao Sensor 2 indica sua maior sensibilidade à temperatura, traduzida em uma variação de comprimento de onda mais pronunciada para a mesma mudança de temperatura. Quantitativamente, essa diferença se expressa nos valores de sensibilidade: $K_{T1} = 94,32 \text{ pm/}^{\circ}\text{C}$ para o Sensor 1, situado na seção mais fina do encapsulamento, e $K_{T2} = 67,68 \text{ pm/}^{\circ}\text{C}$ para o Sensor 2, localizado na parte mais espessa.

Essa disparidade na sensibilidade pode ser atribuída à influência do encapsulamento na resposta térmica das FBGs. A presença de uma maior quantidade de material encapsulante em torno do Sensor 2 cria uma barreira térmica, dificultando a troca de calor entre a fibra e o ambiente externo. Consequentemente, a variação de temperatura na fibra é atenuada, resultando em uma menor mudança no comprimento de onda refletido e, portanto, em uma sensibilidade reduzida.

4.3 Calibração em deformação

A Tabela 2 apresenta a variação do comprimento de onda de um sensor FBG nu, fixado diretamente sobre uma placa de alumínio. Essa variação será utilizada como referência para determinar a deformação sofrida pela placa, considerando a sensibilidade de $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ para uma FBG nua (ZHOU, 2013).

Tabela 2 – Valores medição de deformação através do sensor nu

Peso (g)	Comprimento de onda (nm)	Deformação ($\mu\epsilon$)
0g	1552.889397	0
500g	1552.895737	5.2832518194
1000g	1552.902418	10.850721972
1500g	1552.909773	16.979909305
2000g	1552.916745	22.7900923819

A partir dos valores de deformação da placa de alumínio, foram calculados os pontos médios de deformação para cada um dos cinco ensaios realizados, onde seguindo a mesma metodologia empregada na calibração de temperatura. Os valores do comprimento de onda de Bragg usados para o desenho dos gráficos podem ser encontrados na Tabela 3. A variação no comprimento de onda médios são representados pelas curvas correspondentes no gráfico da Figura 14.

Tabela 3 – Valores médios para calibração em deformação

	Deformação (pm) Média	Lambda (nm) Médio
Sensor 1	0	1531.221276
	5.2832518194	1531.226592
	10.850721972	1531.232876
	16.979909305	1531.237779
	22.7900923819	1531.245366
Sensor 2	0	1552.566771
	5.2832518194	1552.571786
	10.850721972	1552.57807
	16.979909305	1552.582465
	22.79009238196	1552.588703

Assim como na calibração de temperatura, os resultados experimentais de deformação também exibem uma resposta linear na faixa de deformação a qual o encapsulamento foi submetido. Essa linearidade é comprovada tanto pela distribuição dos pontos experimentais, que se

alinham às suas respectivas linhas de tendência, quanto pelos elevados valores do coeficiente de determinação R^2 , superiores a 0.99. Essa observação reforça a conclusão de que as características lineares das FBGs são preservadas mesmo após o encapsulamento e sob condições de deformação.

O gráfico também revela uma diferença na sensibilidade dos dois sensores FBG, posicionados em diferentes regiões do encapsulamento. O Sensor 1, situado na parte mais fina, apresenta uma sensibilidade de $K_{\epsilon 1} = 1.04 \text{ pm}/\mu\epsilon$, enquanto o Sensor 2, localizado na seção mais espessa, possui uma sensibilidade de $K_{\epsilon 2} = 0.94 \text{ pm}/\mu\epsilon$. Essa discrepância, como esperado, é atribuída à diferença na quantidade de material em torno de cada FBG. A maior quantidade de material na região do Sensor 2 restringe sua deformação em resposta à deformação da placa de alumínio, resultando em uma menor variação no comprimento de onda refletido e, conseqüentemente, em uma sensibilidade reduzida.

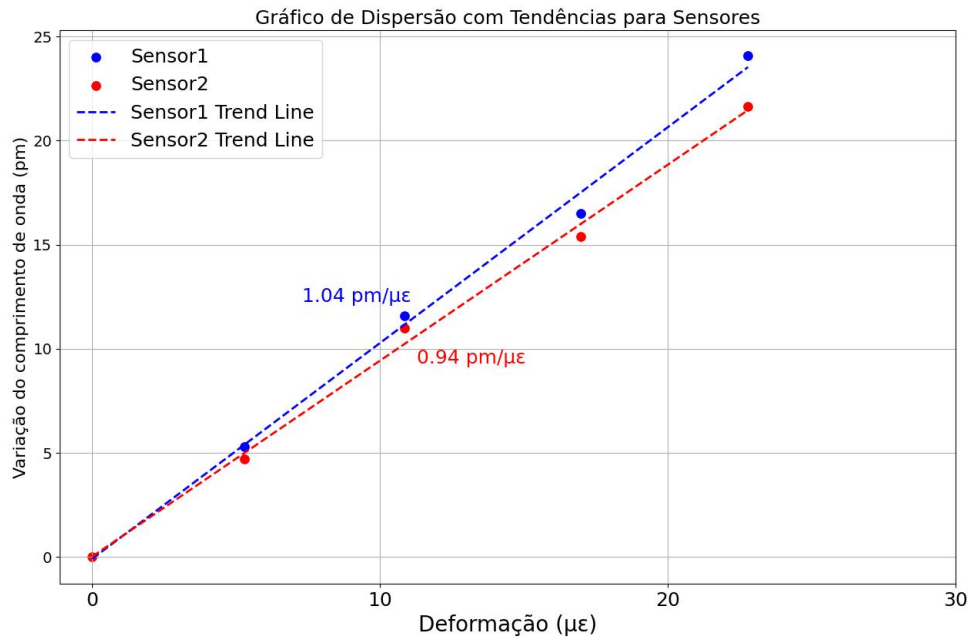


Figura 14 – Calibração em deformação

4.4 Discussões

A análise dos gráficos nas figuras 13 e 14 apresentados anteriormente demonstra não apenas a resposta linear dos sensores FBG encapsulados, tanto em relação à temperatura quanto à deformação, mas também evidencia a influência do design do encapsulamento, particularmente a quantidade de material em torno das FBGs, na sensibilidade dos sensores. O monitoramento em tempo real do comprimento de onda, aliado à capacidade de isolar os efeitos de temperatura e deformação por meio da equação 6, reforça o potencial das FBGs como sensores embutidos em estruturas impressas em 3D. Estes resultados fornecem informações

cruciais para otimizar o processo de fabricação e garantir a funcionalidade do encapsulamento, além de destacar a importância de considerar o design do encapsulamento para maximizar a sensibilidade e o desempenho dos sensores FBG em suas possíveis aplicações.

Ao substituir os coeficientes de deformação ($K_{\epsilon 1}$ e $K_{\epsilon 2}$) e os coeficientes de temperatura (K_{T1} e K_{T2}) obtidos experimentalmente na equação 6, podemos isolar e calcular os valores de deformação e temperatura a partir dos comprimentos de onda medidos pelos dois sensores FBG encapsulados. A Figura 15 apresenta os resultados dessa conversão, exibindo um gráfico onde os valores do eixo x apresentam os valores medidos em unidades de temperatura e no eixo y os valores em unidades de deformação.

A análise do gráfico revela que o encapsulamento projetado permite uma medição de deformação consistente, com os valores de saída dos sensores FBG sendo praticamente independentes da temperatura. Essa característica é crucial para garantir a confiabilidade das medições de deformação em ambientes com variações térmicas.

Da mesma forma, o gráfico demonstra que a medição de temperatura também é robusta, permanecendo inalterada mesmo sob diferentes níveis de deformação. Essa independência entre as medições de temperatura e deformação valida a eficácia do encapsulamento em isolar os efeitos de cada parâmetro, possibilitando a utilização dos sensores FBG para monitorar ambas as grandezas de forma simultânea e confiável.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram as descobertas de (DREYER *et al.*, 2013) e (MOKHTAR; SUN; GRATTAN, 2012) que também desenvolveram encapsulamentos de dimensões similares. Contudo, os métodos e materiais apresentados neste trabalho diferem dos utilizados por esses autores. A Tabela 4 apresenta uma comparação entre os coeficientes de deformação ($K_{\epsilon 1}$ e $K_{\epsilon 2}$) e temperatura (K_{T1} e K_{T2}) obtidos em cada um dos três trabalhos, sendo a Coluna 1, os valores dos coeficientes de deformação de (DREYER *et al.*, 2013), a Coluna 2 os coeficientes de (MOKHTAR; SUN; GRATTAN, 2012) e na Coluna 3 os obtidos neste trabalho

Tabela 4 – Comparação sensibilidades para diferentes encapsulamentos

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3
K_{T1}	141.5 pm/°C	150.2 pm/°C	94.32 pm/°C
K_{T2}	108.9 pm/°C	148.8 pm/°C	67.68 pm/°C
$K_{\epsilon 1}$	3.98 pm/ $\mu\epsilon$	1.34 pm/ $\mu\epsilon$	1.04 pm/ $\mu\epsilon$
$K_{\epsilon 2}$	1.92 pm/ $\mu\epsilon$	0.93 pm/ $\mu\epsilon$	0.94 pm/ $\mu\epsilon$

Embora todos os estudos tenham solucionado o problema da sensibilidade cruzada, as diferenças nos valores dos coeficientes evidenciam a influência dos materiais e das dimensões do encapsulamento. Enquanto (DREYER *et al.*, 2013) utilizou um encapsulamento de PP (Polipropileno) e (MOKHTAR; SUN; GRATTAN, 2012) empregou uma combinação de adesivo cianoacrilato e PP. No presente trabalho, foi optado pelo PLA.

A principal contribuição deste estudo reside na facilidade e rapidez de construção do encapsulamento, proporcionadas pela impressão 3D. Essa tecnologia também oferece grande

flexibilidade para customização, o que representa uma vantagem adicional em relação aos métodos tradicionais.

Em suma, o encapsulamento desenvolvido, juntamente com a aplicação da equação 6, viabiliza a utilização de sensores FBG para medições exatas e independentes de deformação e temperatura. Essa capacidade de discriminar os efeitos de cada parâmetro é essencial para as diversas aplicações que esse sensor pode ser usado.

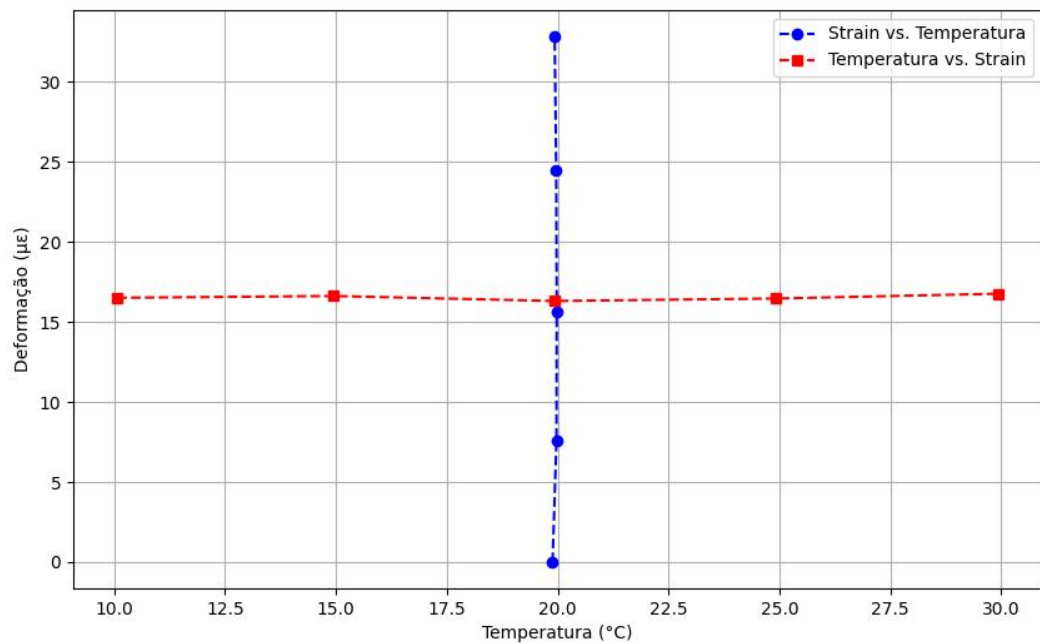


Figura 15 – Grafico Temperatura x Deformação

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho explorou o desenvolvimento de um encapsulamento construído através da impressão 3D para sensores de fibra ótica baseados em redes de Bragg (FBGs), com o objetivo de realizar medições simultâneas de temperatura e deformação. A utilização da tecnologia de impressão 3D proporcionou flexibilidade no design e na fácil fabricação do encapsulamento, além da possibilidade da fácil personalização do encapsulamento, permitindo a incorporação dos sensores FBGs diretamente na estrutura durante o processo de impressão.

A calibração do sensor, tanto em temperatura quanto em deformação, demonstrou a eficácia do encapsulamento em preservar as características lineares dos sensores FBGs. Além disso, a análise dos resultados revelou a influência do design do encapsulamento na sensibilidade dos sensores, destacando a importância de considerar a distribuição do material em torno das FBGs para otimizar seu desempenho.

A capacidade de isolar os efeitos de temperatura e deformação, possibilitada pela utilização de dois sensores FBGs, comprovou a viabilidade da medição simultânea dessas grandezas. Essa característica é fundamental para diversas aplicações práticas.

Em suma, este trabalho demonstrou com sucesso o potencial da integração de sensores FBGs em estruturas impressas em 3D para a realização de medições simultâneas de temperatura e deformação. A metodologia empregada, desde o design e a fabricação do encapsulamento até a calibração e a análise dos resultados, oferece um guia prático para o desenvolvimento de sistemas de sensoriamento versáteis e eficientes, com aplicações em diversos setores da indústria e da pesquisa.

As perspectivas futuras incluem a exploração de diferentes materiais e designs de encapsulamento, visando aprimorar ainda mais a sensibilidade e a robustez dos sensores. Além disso, a aplicação dessa tecnologia em contextos reais, como o monitoramento da saúde estrutural de edifícios, pontes e outros componentes críticos, poderá trazer benefícios significativos em termos de segurança, manutenção preditiva e otimização de recursos.

REFERÊNCIAS

- CAMPANELLA, C. E. *et al.* **Fibre Bragg Grating based strain sensors: Review of technology and applications**. 2018.
- CULSHAW, B. Optical Fiber Sensor Technologies: Opportunities and - Perhaps - Pitfalls. *In: Journal of Lightwave Technology*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 22, n. 1, p. 39–50. ISSN 07338724.
- DREYER, U. *et al.* A technique to package fiber bragg grating sensors for strain and temperature measurements. *In: Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. [S.l.: s.n.], 2013. v. 12, n. 2, p. 638–646. ISSN 21791074.
- FRAZÃO, O.; SANTOS, J. L. Simultaneous measurement of strain and temperature using a Bragg grating structure written in germanosilicate fibres. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 6, n. 6, p. 553–556, 6 2004. ISSN 14644258.
- HONG, C.; ZHANG, Y.; BORANA, L. Design, fabrication and testing of a 3D printed FBG pressure sensor. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 7, p. 38577–38583, 2019. ISSN 21693536.
- HONG, C. *et al.* A fbg tilt sensor fabricated using 3d printing technique for monitoring ground movement. **IEEE Sensors Journal**, v. 19, n. 15, p. 6392–6399, 2019.
- MCPOLIN, D. O. *et al.* Development and longer term in situ evaluation of fiber-optic sensors for monitoring of structural concrete. **IEEE Sensors Journal**, v. 9, n. 11, p. 1537–1545, 2009.
- MOKHTAR, M. R.; SUN, T.; GRATAN, K. T. Bragg grating packages with nonuniform dimensions for strain and temperature sensing. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 1, p. 139–144, 2012. ISSN 1530437X.
- MOREY, W. W.; MELTZ, G.; WEISS, J. M. Recent advances in fiber grating sensors for utility industrial application. *In: Calibrated Intelligent Optical Sensors and Systems*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 2594, p. 90–98.
- OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. Boston/London: Artech House, 1999.
- OTHONOS, A. *et al.* Fibre Bragg gratings. **Springer Series in Optical Sciences**, v. 123, p. 189–269, 2006. ISSN 03424111.
- SANTANA, L. *et al.* Estudo comparativo entre petg e pla para impressão 3d através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, 12 2018.
- SANTOS J.L.; FARAHI, F. Handbook of Optical Sensors. **Boca Raton: CRC Press**, 2015.
- WANG, M. *et al.* Progress in toughening poly(lactic acid) with renewable polymers. **Polymer Reviews**, v. 57, p. 00–00, 02 2017.
- ZHOU, Z. Actualities and development on dynamic monitoring and diagnosis with distributed fiber bragg grating in mechanical systems. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 49, p. 55, 01 2013.