

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Pedro Henrique Souza Coelli**

**Sensores em Fibra Óptica Plástica com Geometria em W: Avaliação de**  
**Desempenho em Ensaios de Compressão**

Juiz de Fora

2025

**Pedro Henrique Souza Coelli**

**Sensores em Fibra Óptica Plástica com Geometria em W:** Avaliação de  
Desempenho em Ensaios de Compressão

Dissertação apresentada ao Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Elétrica da Univer-  
sidade Federal de Juiz de Fora como requisito  
parcial à obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Bessa dos Santos

Juiz de Fora

2025

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S. Coelli, Pedro Henrique.

Sensores em Fibra Óptica Plástica com Geometria em W : Avaliação de  
Desempenho em Ensaios de Compressão / Pedro Henrique Souza Coelli.  
– 2025.

79 f. : il.

Orientador: Alexandre Bessa dos Santos

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Facul-  
dade de Engenharia Elétrica. Programa de Pós Graduação em Engenharia  
Elétrica, 2025.

1. Sensores Ópticos. 2. Fibra Óptica Plástica. 3. Instrumentação. I.  
dos Santos, Alexandre B., orient. II. Doutor.

**Pedro Henrique Souza Coelli**

**Sensores em Fibra Óptica Plástica com Geometria em W: Avaliação de Desempenho em Ensaios de Compressão**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Área de concentração: Sistemas Eletrônicos

Aprovada em 25 de novembro de 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr. Alexandre Bessa dos Santos** - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

**Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero**

Universidade Federal Fluminense

**Prof. Dr. André Luis Marques Marcato**

Universidade Federal de Juiz de Fora

**Prof. Marcus Vinicius Pereira de Souza**

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Juiz de Fora, 06/11/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Andre Luis Marques Marcato, Professor(a)**, em 25/11/2025, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Bessa dos Santos, Professor(a)**, em 25/11/2025, às 11:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARCUS VINICIUS PEREIRA DE SOUZA, Usuário Externo**, em 25/11/2025, às 11:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andres Pablo Lopez Barbero, Usuário Externo**, em 25/11/2025, às 11:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf ([www2.ufjf.br/SEI](http://www2.ufjf.br/SEI)) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2727113** e o código CRC **F21AC8B3**.

A meus pais, Carlos Alberto Coelli e Margareth de Souza  
Coelli que dedicam a vida a cuidar de pessoas

## AGRADECIMENTOS

Gostaria, primeiramente, de agradecer à Universidade Federal de Juiz de Fora, por ter aberto as portas para a realização deste programa, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade de adentrar um pouco mais no meio acadêmico e participar de pesquisas inovadoras.

Agradeço, de forma especial, aos meus pais e irmãs, pelo apoio incondicional do início ao fim de todo o processo, e pela evolução pessoal e profissional que tive durante o programa; ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Bessa dos Santos, que se dispôs a me orientar durante toda a pesquisa, disponibilizando não só seu conhecimento, mas também seu tempo, paciência e confiança.

Agradeço ainda aos membros e amigos de trabalho do LITEL — João Vitor, Renato Luiz, Jakson Almeida e Carlos Patiño — pelo conhecimento, auxílio nos testes e medições, bem como pelos momentos de descontração. E, em especial, ao Deivid Delarota, por todo o apoio e suporte durante a pesquisa, desde a confecção de peças e aparatos até a elaboração de artigos, documentos e a redação final deste trabalho. Registro também meu agradecimento ao Dr. Marcus Vinícius, que, durante o período em que estive no laboratório, contribuiu com valiosas recomendações de boas práticas de escrita, conversas inspiradoras e constante otimismo.

Sou igualmente grato a meus amigos da pós-graduação, Thales Curty e Yuri Santos, que proporcionaram boas conversas, momentos de companheirismo e persistência ao longo de todo o programa.

Por fim, mas não menos importante, quero expressar minha profunda gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — Brasil (CAPES) — Código de Financiamento: [M-CAPES-DS-10] — pelo apoio financeiro, bem como à EDP, pelos testes realizados com os sensores nas baterias.

Trecho adaptado do capítulo II, versículo 17: “Querem que vos ensinem o modo de chegar à ciência verdadeira? Aquilo que se sabe, saber que se sabe; aquilo que não se sabe, saber que não se sabe; na verdade é este o saber.” - (CONFÚCIO, 2012, Analectos {7})

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a caracterização de sensores ópticos baseados em fibras ópticas plásticas (POF) para a detecção de esforços mecânicos e variações de meio externo por meio da modulação da intensidade luminosa. A pesquisa fundamenta-se no estudo do confinamento óptico e das perdas por curvatura controlada, explorando diferentes geometrias de fibra e técnicas de fabricação de sensores de baixo custo. O método empregado consistiu no projeto, fabricação e calibração de dispositivos em POF, com geometrias otimizadas e encapsuladas em materiais elastoméricos, permitindo a aplicação de cargas padronizadas e compressões incrementais. Foram realizados ensaios experimentais de calibração e deformação controlada, nos quais se analisaram linearidade, repetibilidade, sensibilidade e correlação estatística entre a intensidade óptica e a força aplicada. Os resultados demonstraram que os sensores propostos apresentam resposta linear estável, com boa repetibilidade e resolução adequada para aplicações práticas. Além disso, verificou-se que a integração de técnicas de encapsulamento e análise estatística contribui para maior robustez, confiabilidade e durabilidade dos dispositivos. Conclui-se que sensores em POF representam uma alternativa promissora para instrumentação de baixo custo, com potencial de aplicação em monitoramento estrutural, sistemas biomédicos, automação e controle de processos.

Palavras-chave: Sensores Ópticos; Fibra Óptica Plástica; Instrumentação.



## ABSTRACT

This work aims to develop and characterize optical sensors based on plastic optical fibers (POF) for the detection of mechanical forces and external medium variations through light intensity modulation. The research focuses on optical confinement and bending-induced losses, exploring different fiber geometries and fabrication techniques to obtain low-cost sensors. The methodology involved the design, fabrication, and calibration of POF-based devices with optimized geometries and elastomeric encapsulation, enabling the application of standardized loads and incremental compressions. Experimental tests of calibration and controlled deformation were carried out, in which linearity, repeatability, sensitivity, and statistical correlation between optical intensity and applied force were analyzed. The results demonstrated that the proposed sensors present a stable linear response, with good repeatability and suitable resolution for practical applications. Furthermore, it was verified that the integration of encapsulation techniques and statistical analysis enhances robustness, reliability, and durability of the devices. It is concluded that POF sensors are a promising alternative for low-cost instrumentation, with potential applications in structural monitoring, biomedical systems, automation, and process control.

Keywords: Optical Sensors; Plastic Optical Fiber; Instrumentation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Goniômetro baseado em POF proposto por Rezende et. al. {24}.	21
Figura 3.2 – Sensor de pressão baseado em POF proposto por {27}.	23
Figura 3.3 – Sensor de temperatura baseado em POF proposto por {14}	24
Figura 3.4 – Smart-luva baseado em POF proposto por {16}	26
Figura 4.1 – Estrutura da Fibra Óptica Plástica	28
Figura 4.2 – Modos de operação da fibra óptica	29
Figura 4.3 – Esquemático da fibra afunilada (Tapered).	33
Figura 4.4 – Diagrama das refrações internas na fibra afunilada	34
Figura 4.5 – Esquemático proposto por {41}	35
Figura 4.6 – Método de fabricação de {42}	36
Figura 4.7 – Esquemático proposto por {42}	36
Figura 4.8 – Esquemático fibra com curvatura controlada U	37
Figura 4.9 – Diagrama de refrações internas na fibra com curvatura controlada U	37
Figura 4.10–Esquemático da fibra óptica dividida no eixo X	38
Figura 4.11–Sensor elaborado por {11}.	40
Figura 4.12–Diagrama do sistema experimental proposto por {9}.	40
Figura 4.13–Esquemático fibra com polimento lateral.	41
Figura 4.14–Diagrama de refrações na fibra com polimento lateral.	42
Figura 4.15–Sensor proposto por {17}.	42
Figura 4.16–Distribuição típica de energia dos modos em fibra com polimento lateral para diferentes RI descritos por {19}.	45
Figura 4.17–Sensor vestível baseado em POF com geometria em D para monitoramento respiratório proposto por {39}.	46
Figura 4.18–Ilustração esquemática do sensor POF em forma de D por {20}.	47
Figura 4.19–Esquema do sensor proposto por {34} e {38}, combinando perfil U e polimento lateral duplo.	48
Figura 4.20–Setup do experimento por {26}.	50
Figura 4.21–Esquemático proposto por {26}.	50
Figura 4.22–Esquemático proposto por {32}.	51
Figura 4.23–Esquema de um sistema de sensoriamento óptico baseado em variações de índice de refração em meio aquoso.	52
Figura 4.24–Esquema de um sistema de sensoriamento óptico baseado em curvatura mecânica da fibra.	52
Figura 4.25–Esquema de um sistema de sensoriamento óptico baseado em acoplamento luminoso.	53
Figura 5.1 – Esquemático proposto por {6}.	54

Figura 5.2 – Aplicação do sensor óptico em geometria "W" para monitoramento da dilatação de baterias. . . . .	55
Figura 5.3 – Fibra Óptica Plástica em PMMA utilizada. . . . .	56
Figura 5.4 – Protótipo inicial em formato cilíndrico com fibra em "U" submersa em silicone. . . . .	56
Figura 5.5 – Combinação de dois perfis U proposto por {9}. . . . .	56
Figura 5.6 – Molde projetado para conformação da fibra em formato "W". . . . .	57
Figura 5.7 – Etapas do processo de fabricação do sensor em "W". . . . .	57
Figura 5.8 – Sensor em sua forma bruta, sem encapsulamento. . . . .	58
Figura 5.9 – Encapsulamento do sensor em borracha de silicone. . . . .	58
Figura 5.10 – Dimensões finais do sensor encapsulado em silicone. . . . .	59
Figura 5.11 – Fonte de luz elaborada no LiTel. . . . .	60
Figura 5.12 – Esquemático do sistema de calibração do sensor. . . . .	60
Figura 5.13 – Curva de calibração do sensor 1 . . . . .	63
Figura 5.14 – Curva de calibração do sensor 2 . . . . .	63
Figura 5.15 – Curva de calibração do sensor 3 . . . . .	64
Figura 5.16 – Ensaio de compressão . . . . .	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Evolução histórica dos marcos mais importantes relacionados à POF nos últimos 30 anos. . . . .	18
Tabela 3.2 – Evolução histórica dos marcos mais relevantes relacionados à POF. . .	19
Tabela 3.3 – Comparação de sensores de glicose fabricados com diferentes tipos de fibras ópticas. . . . .	22
Tabela 3.4 – Tabela Resumo de trabalhos realizados utilizando POF. . . . .	27
Tabela 4.1 – Resumo dos modelos ópticos utilizados em sensores de deformação. . .	33
Tabela 5.1 – Ensaio de Calibração de Sensor 1. . . . .	62
Tabela 5.2 – Ensaio de Calibração de Sensor 2. . . . .	64
Tabela 5.3 – Ensaio de Calibração de Sensor 3. . . . .	65
Tabela 5.4 – Ensaio de Compressão do sensor. . . . .	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Computer-Aided Design (Projeto assistido por computador)
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNC	Computer Numerical Control (Usinagem por controle numérico)
FBG	Fiber Bragg Grating
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada rápida de Fourier)
FO	Fibra Óptica
FWHM	Full Width at Half Maximum (Largura total a meia altura)
GI	Índice Gradual (Graded-Index)
GI-POF	Graded Index Plastic Optical Fiber (Fibra óptica plástica de índice gradual)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
LED	Light Emitting Diode (Diodo emissor de luz)
LITel	Laboratório de Instrumentação e Telemetria
MMF	Multimode Fiber (Fibra multimodo)
MPI	Multipath Interference (Interferência de múltiplos caminhos)
OSA	Optical Spectrum Analyzer (Analisador de espectro óptico)
OTDR	Optical Time-Domain Reflectometer
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry
PMMA	Polimetilmetacrilato
POF	Plastic Optical Fiber (Fibra óptica plástica)
PUC	Pontifícia Universidade Católica
RC	Recombinação de Carga
RMS	Root Mean Square (Erro médio quadrático)
SI	Índice Degrau (Step-Index)
SI-POF	Step Index Plastic Optical Fiber (Fibra óptica plástica de índice degrau)
SMF	Single Mode Fiber (Fibra monomodo)
SMS	Single-Mode-Multimode-Single-Mode (Estrutura óptica de interferência)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (Relação sinal-ruído)
SPR	Surface Plasmon Resonance
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Coefficiente angular da regressão linear (sensibilidade) [a unidade varia conforme o experimento]
$b$	Coefficiente linear da regressão
$d$	Deslocamento linear aplicado ao sensor [mm]
$\delta$	Deslocamento mecânico (mm)
$\Delta(dB)$	Variação relativa de intensidade óptica em decibéis
$\Delta dB$	Atenuação óptica expressa em decibéis
$\Delta\lambda$	Variação do comprimento de onda
$\eta$	Eficiência óptica de acoplamento
$\varepsilon$	Deformação mecânica (strain)
$F$	Força aplicada no sensor (N)
$g$	Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )
$I$	Intensidade óptica / potência medida no fotodetector
$I_0$	Intensidade óptica inicial / potência de referência
$k$	Taxa de deformação (em sensores por curvatura)
$L_0$	Comprimento do afunilamento
$m$	Massa (kg)
$n$	Índice de refração
$n_{cl}$	Índice de refração do revestimento
$n_{co}$	Índice de refração do núcleo
$R$	Raio de curvatura da fibra óptica [mm]
$R^2$	Coefficiente de determinação estatística da regressão linear
$r(z)$	Raio da fibra na posição $z$
$r_0$	Raio do núcleo da fibra
$r_m$	Raio reduzido do afunilamento
$S$	Sensibilidade do sensor $S = \frac{\Delta dB}{F}$
$\sigma$	Desvio padrão de medida
$V$	Número de modos normalizados (V-number)
$W$	Abertura ou largura do elemento sensorial em perfil em W (geometria)
$\forall$	Para todo
$\in$	Pertence
$\lambda$	Comprimento de onda (nm)
$\varphi$	Fase óptica (rad)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>14</b>
1.1	<i>Background</i> de pesquisa . . . . .	14
1.2	Motivação da pesquisa . . . . .	14
1.3	Estrutura da dissertação . . . . .	15
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>	<b>17</b>
3.1	Compilação dos Estudos Relacionados . . . . .	27
<b>4</b>	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO: SENSORES A FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA . . . . .</b>	<b>28</b>
4.0.1	Tipos de perfis de sensores baseados em POF . . . . .	29
4.0.2	Fibras Afuniladas (Tapered) . . . . .	33
4.0.3	Fibras por Curvatura controlada (Macrobending) . . . . .	36
4.0.4	Fibras com Polimento Lateral (Side-polished) . . . . .	41
4.0.5	Estruturas Híbridas . . . . .	48
4.0.6	Demais formas de utilização . . . . .	51
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO SENSOR BASEADO EM MACRO CURVATURA . . . . .</b>	<b>54</b>
5.1	Materiais e Métodos . . . . .	55
5.1.1	Estrutura e fabricação da unidade de detecção . . . . .	55
5.1.2	Sinal da fonte de luz controlada . . . . .	59
5.1.3	Calibração e detecção do sensor . . . . .	60
5.2	Resultados e Discussões . . . . .	61
5.2.1	Calibração e detecção dos sensores . . . . .	61
5.2.1.1	Ensaio de compressão com deslocamentos incrementais . . . . .	66
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE A – Artigo - Desenvolvimento de Sensores POF para Controle Inteligente em Aplicações Robóticas . . . . .</b>	<b>74</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 *Background* de pesquisa

Com os avanços na instrumentação e nos sistemas de monitoramento inteligentes, cresce a demanda por sensores capazes de realizar medições precisas e em tempo real, especialmente em aplicações que envolvem deformações mecânicas. Em muitos contextos, sensores elétricos ou piezoresistivos são utilizados, mas apresentam limitações quanto à imunidade a interferências eletromagnéticas, robustez mecânica e conforto em aplicações embarcadas.

Os sensores ópticos, por sua vez, destacam-se como alternativas promissoras devido à sua elevada sensibilidade, flexibilidade de integração e imunidade a ruídos eletromagnéticos. Entre os diversos tipos de fibras utilizadas, as fibras ópticas plásticas (*Plastic Optical Fiber* — POF) oferecem vantagens como baixo custo, facilidade de manuseio e alta resistência mecânica, favorecendo sua aplicação em ambientes onde sensores mais frágeis ou caros seriam inviáveis. Além disso, a compatibilidade das POFs com técnicas de conformação térmica e moldagem personalizada permite a criação de geometrias sensoriais inovadoras, ampliando o espectro de aplicações práticas [43].

Nos últimos anos, o uso de sensores POF para monitoramento de deformações — como flexão, pressão, tração e compressão — tem se expandido para áreas como automação, estruturas inteligentes, robótica e dispositivos vestíveis. Em especial, a combinação de sensores ópticos com sistemas embarcados de leitura abre caminho para soluções compactas, escaláveis e de baixo custo, particularmente vantajosas em contextos com restrições orçamentárias ou que demandem produção em larga escala. A miniaturização e a possibilidade de interfaceamento direto com microcontroladores e plataformas de prototipagem rápida, como Arduino ou Raspberry Pi, tornam essas soluções ainda mais atrativas.

Apesar de seu potencial, desafios técnicos ainda persistem, como a calibração precisa, a linearidade da resposta em diferentes condições e a estabilidade do sinal óptico em ambientes sujeitos a ruído mecânico. O desenvolvimento de geometrias otimizadas da fibra e técnicas de encapsulamento surgem como soluções para mitigar essas limitações e ampliar o desempenho sensorial. Além disso, o uso de algoritmos de processamento digital, análise espectral e métodos estatísticos de regressão tem se mostrado essencial para extrair informações confiáveis a partir do sinal óptico bruto.

## 1.2 Motivação da pesquisa

A necessidade por sensores de deformação com alta sensibilidade, confiabilidade e custo reduzido tem impulsionado a pesquisa por alternativas aos sensores eletrônicos



convencionais. Em especial, aplicações que exigem integração embarcada, flexibilidade mecânica e imunidade eletromagnética — como robótica, dispositivos de interface homem-máquina, instrumentação portátil e wearables — se beneficiam do uso de sensores ópticos.

Observa-se, no entanto, que muitos dos sensores existentes não são otimizados para medir pequenas forças em condições de atuação direta, como movimentos de pinça ou contato por pressão. Além disso, a fabricação de sensores ópticos de geometria não linear ainda apresenta desafios quanto à padronização e à confiabilidade da resposta.

Dessa forma, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sensor baseado em fibra óptica plástica com geometria em “W”, capaz de detectar pequenas variações de força a partir da modulação da intensidade luminosa.

### 1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos, organizados da seguinte forma:

O Capítulo 1 apresenta o contexto geral da pesquisa, abordando o estado da arte sobre sensores de deformação com fibra óptica plástica e destacando a relevância da abordagem proposta.

O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica que abrange estudos recentes sobre sensores baseados em POF, incluindo diferentes geometrias sensoriais, técnicas de fabricação, métodos de leitura óptica e aplicações práticas em ambientes diversos, como biomecânica, aeroespacial e automação industrial.

O Capítulo 3 apresenta os objetivos geral e específicos da pesquisa, delineando as metas de desenvolvimento e validação do sistema sensorial proposto.

No Capítulo 4 são abordados de forma aprofundada os princípios de funcionamento dos sensores ópticos por modulação de intensidade, discutindo as perdas por curvatura, acoplamento modal e absorção, além das limitações relacionadas à estabilidade da fonte de luz e às variações do índice de refração.

O Capítulo 5 descreve os métodos de fabricação do sensor proposto, os materiais utilizados, os dispositivos auxiliares empregados, a geometria adotada e os procedimentos experimentais aplicados à caracterização funcional e estrutural do protótipo.

O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de calibração e aplicação prática, com análise estatística dos dados, determinação dos coeficientes de sensibilidade e verificação da repetibilidade e reprodutibilidade entre unidades fabricadas.

Por fim, o Capítulo 7 reúne as conclusões da pesquisa, destacando as contribuições do trabalho, as limitações encontradas e propondo direções para investigações futuras, incluindo melhorias geométricas, integração com espectrômetros portáteis e aplicação em sistemas reais de monitoramento.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver, caracterizar e validar sensores ópticos baseados em fibra óptica plástica (POF) para a medição de forças mecânicas por meio de deformação controlada. Busca-se consolidar um método experimental que permita correlacionar diretamente a aplicação de cargas ou deslocamentos com a variação de intensidade óptica, de modo a estabelecer parâmetros quantitativos de desempenho dos sensores propostos.

### Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar experimentalmente um sistema sensor em POF, capaz de detectar e quantificar forças mecânicas aplicadas, por meio da análise da variação de intensidade óptica em decibéis ( $\Delta[\text{dB}]$ ).

### Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e fabricar sensores em POF com geometria adequada à aplicação de esforços de compressão e deslocamento;
- Estabelecer um modelo óptico que correlacione a deformação mecânica com a resposta em intensidade óptica;
- Realizar ensaios de calibração estática com massas padronizadas, determinando sensibilidade, faixa linear efetiva e coeficientes de correlação estatística;
- Conduzir experimentos de compressão incremental, avaliando linearidade, repetibilidade, histerese e resolução mínima detectável;
- Validar a consistência entre os métodos de calibração e compressão, confrontando os resultados experimentais com o modelo teórico;
- Identificar limitações práticas dos sensores, incluindo fontes de erro ópticas e mecânicas, e propor melhorias para trabalhos futuros.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o avanço contínuo da pesquisa em fibras ópticas plásticas (POF), diversas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para aplicações nas mais variadas áreas — desde a detecção de microfissuras em estruturas civis até sistemas sensíveis voltados à área da saúde humana. Esse crescimento reflete o potencial das POFs como plataforma versátil e de baixo custo para sensoriamento óptico em diferentes contextos.

O presente capítulo tem como objetivo descrever mais sobre a trajetória e evolução da fibra óptica plástica abordando seus materiais de fabricação e dopagem e alguns exemplos de aplicação já realizados, sendo melhor abordados nos capítulos posteriores

No trabalho de Zubia e Arrue (2001){43}, os autores apresentam uma revisão abrangente sobre fibras ópticas plásticas, abordando desde os materiais utilizados na fabricação até os principais processos tecnológicos envolvidos. O estudo destaca as vantagens das POFs em relação às fibras ópticas de sílica, como maior flexibilidade, baixo custo de produção, resistência mecânica e facilidade de manuseio — características que ampliam significativamente seu espectro de aplicações. São também discutidos aspectos estruturais, mecanismos de perda óptica (como atenuação por absorção e dispersão), bem como as possibilidades de aplicação em setores automotivo, industrial e de sensoriamento inteligente. O artigo evidencia o crescimento contínuo do interesse por essa tecnologia, especialmente em sistemas de sensoriamento óptico de baixo custo e em larga escala, evidenciado na Tabela 3.1.

É possível observar na Tabela 3.1, que no fim dos anos 60 (1968) nascia a fibra óptica de núcleo em PMMA e seguindo o mesmo, podemos observar que houve uma evolução considerável desde materiais e métodos de fabricação, sem contar as aplicações implementadas.

Com base nessa pesquisa mais trabalhos foram elaborados, é possível observar em Polishuk P.(2006){22}, apresenta um histórico envolvendo POF assim como uma cronologia descrita por Zubia e Arrue (2001){43}, esta similaridade pode ser observada na Tabela 3.2

Podemos observar que no intervalo de 1968 a 2005 houveram muitos acontecimentos importantes, desde sua criação (1968) ao comércio (2004) com a GI-POF em PMMA, ou seja, a mesma desde sua criação à comercialização levou aproximadamente 36 anos. Podemos reforçar também o conceito de baixo custo pois os sistemas que utilizam POF apresentam segundo Polishuk P. {22}, componentes e equipamentos de teste mais simples e de menor custo.

Observando essa evolução da fibra, com o tempo foram implementadas formas de dopagem do material como visto anteriormente e inseridas no mercado com aplicações diversas.

Tabela 3.1 – Evolução histórica dos marcos mais importantes relacionados à POF nos últimos 30 anos.

Ano	Organização	Marco
1968	Dupont	Primeira POF com núcleo de PMMA
1982	Toray	Primeira POF com núcleo PS
1987	NTT	POF de baixa atenuação: 45 dB/km a 650 nm
1988	Keio University	Primeira GI POF (100/180 $\mu$ m, 670 nm)
1990	NTT	Primeira POF GI com PMMA clorado dopado (20 dB/km a 660 nm)
1991	Mitsubishi Rayon	PMMA “Eska” SI POF (1 mm, 570 nm)
1991	França	Fundação do French POF Club
1991	Keio University	Primeira transmissão gigabit com POF GI com núcleo de PMMA clorado
1991	Hoechst Celanese	POF GI “Infitec” (130 dB/km a 650 nm)
1992	Keio University	GI POF de PMMA dopado (55 dB/km a 685 nm)
1993	Essex University	Transmissão a 311 Mbit/s por 100 m usando POF GI de PMMA-clorado com núcleo em quadrado equivalente
1994	USA/Japão	Criação do Consórcio POF do Japão
1994	IBM	Transmissão de 1 Gbit/s por 30 m com POF GI
1994	NEC	Transmissão de 2.5 Gbit/s por 100 m com POF GI
1994	Asahi Chemical	POF GI com VCSEL de 670 nm
1994	Keio University	GI POF de 650 nm; GI POF multicamada para alta velocidade
1995	Mitsubishi Rayon	Transmissão de 156 Mbit/s por 100 m usando LED vermelho de baixa potência
1996	NEC	Nova POF SI com LED azul
1996	Keio Univ., KAST	Primeira GI POF perfurada (GI POF de 40 dB/km a 1300 nm)
1996	KAST	Estimativa teórica das perdas em GI POF (0.33 dB/mm a 1300 nm)
1997	Keio Univ.	Estimativa teórica da região de transição em GI POF com núcleo PMMA-clorado (4 Gbit/s por 100 m)
1997	Consórcio POF Japão	Padronização na ATM LAN (156 Mbit/s por 50 m de SI POF)
1998	Keio University	Padronização do IEEE 1394 (1,6 Gbit/s) com 50 m de SI POF
1999	Keio Univ., Asahi Glass	Transmissão de 2,5 Gbit/s por 200 m com POF GI de núcleo perfurado
1999	COBRA, Eindhoven Univ.	Transmissão de 1,25 Gbit/s por 300 m com POF GI de núcleo perfurado
1999	Keio Univ., Asahi Glass	GI POF de 645 nm
2000	Keio Univ.	Transmissão de 500 Mbit/s por 50 m com POF GI
2000	Keio Univ.	POF SI com LED RC vermelho (650 nm)
2000	Keio Univ., Asahi Glass	Transmissão de 2,5 Gbit/s por 500 m com GI POF de 830 nm e 1310 nm
2000	Keio Univ., Asahi Glass	Transmissão de 7 Gbit/s por 80 m com GI POF de 650 nm
2000	Keio Univ., Asahi Glass	GI POF multicamada (GI POF de 830 nm e 1310 nm)
2000	Keio Univ., Asahi Glass	GI POF/Cladding com atenuação de 16 dB/km a 1300 nm

Fonte: Adaptado de [43].

Tabela 3.2 – Evolução histórica dos marcos mais relevantes relacionados à POF.

Ano	Desenvolvimento
1968	Dupont desenvolve pela primeira vez o PMMA.
1977	Aproximadamente dez anos depois, vende-se todos os produtos e patentes para a Mitsubishi Rayon.
1990	Professor Koike da Universidade de Keio anuncia o desenvolvimento da GI POF com largura de banda de 3 GHz/km.
1992	Transmissão de 2,5 Gb/s em 100 m de POF GI usando laser de LED relatado por Koike <i>et al.</i>
1993	Professor Koike relata GI-POF com largura de banda superior a 19 GHz.
1993	Sasaki <i>et al.</i> da Universidade de Keio relatam amplificador óptico em POF.
1994	DARPA anuncia premiação para rede POF de alta velocidade (HSPN).
1994	Transmissão de 2,5 Gb/s em 100 m com GI-POF demonstrada com LD de 650 nm de alta velocidade.
1995	Universidade de Keio e KAIST desenvolvem fibra fluoropolimérica.
1996	Fórum ATM aprova POF PMD para 155 Mb/s em 50 m.
1997	Yamazaki da NEC relata link POF de 400 Mb/s para IEEE1394 em 70 m.
1997	Asahi Glass relata GI-POF perfluorada com 1/3 da perda da PMMA POF convencional.
1998	DARPA financia o projeto PAVNET, sucessor da HSPN, com Lucent Technologies integrando o consórcio.
1999	Imai da Fujitsu relata 2,5 Gb/s em 200 m usando laser FP de 1,3 $\mu$ m com GI-POF (InGaAs, InP, etc.).
1999	Lucent relata 11 Gb/s em 100 m da fibra Lucina (GI PF POF).
2000	Comissão Europeia inicia o programa "Optimist" com três frentes: Agatha, I/O e Home Planet. Primeiro Centro de Aplicações POF é fundado em Nuremberg com apoio do Governo da Baviera.
2001	Redfern Optics e KAIST da Coreia anunciam o desenvolvimento da POF Cristal Fotônica.
2002	Padrão IEEE 1394B finalizado, IDB-1394 para automóveis é concluído.
2004	Primeira GI-POF baseada em PMMA comercialmente disponível é anunciada na POF 2004.
2005	Primeira GI-POF PF comercialmente disponível é anunciada pela Chromis Fiberoptics.

Fonte: Adaptado de [22].

Um exemplo dessa evolução, pode ser observado nos estudo de Liehr (2011){18} onde ela apresenta um estudo abrangente sobre o uso de sensores baseados em fibras ópticas poliméricas (POF) aplicados ao monitoramento de integridade estrutural (SHM). A autora destaca as vantagens das POFs, como alta deformabilidade (até 100 % de strain), baixo módulo de Young e robustez mecânica, tornando-as ideais para monitorar estruturas civis sob grandes deformações. Diversas técnicas e tecnologias são discutidas e inseridas, incluindo OTDR, OFDR e interferometria, com foco em medições distribuídas de deformação, deslocamento, trincas e umidade. Aplicações práticas são apresentadas em geotêxteis, estruturas de alvenaria e fundações, demonstrando a eficácia das POFs em ambientes reais e severos. O estudo também aborda desenvolvimentos recentes em fibras de modo único e micro estruturadas, ampliando as possibilidades de sensoramento de alta resolução.

Seguindo com estudos envolvendo POF, temos mais alguns trabalhos que utilizam desta tecnologia. A dissertação de Ariadny da Silva Arcas (2017) {3}, desenvolve um nano biossensor baseado em fibra óptica plástica (POF) em formato “U”, revestido com filme fino de ouro, para a detecção da bactéria *Escherichia coli* (E. coli). Este biossensor propõe uma alternativa portátil, de resposta rápida e baixo custo aos métodos tradicionais de detecção microbiológica, como cultura bacteriológica, ELISA e PCR, os quais são morosos, caros e exigem infraestrutura laboratorial complexa.

O sensor proposto funciona por modulação de intensidade luminosa, explorando dois mecanismos simultâneos:

- Perda de luz por curvatura da fibra;
- Ressonância Plasmônica de Superfície (SPR);

Possibilitada pelo revestimento metálico. A detecção seletiva da E. coli é viabilizada pela imobilização de anticorpos específicos sobre a superfície metálica da fibra óptica. Diferentes espessuras de filme de ouro foram testadas quanto à adesão, transmitância e eficiência na ativação do efeito SPR.

Os resultados demonstram que o sensor possui limite de detecção de até  $1,5 \times 10^3$  UFC/mL, com boa seletividade à E. coli e comportamento reprodutível. Testes adicionais com microscopia óptica e eletrônica confirmaram a adesão das bactérias à superfície funcionalizada. O trabalho concluiu que a tecnologia proposta é promissora para aplicações em análises de potabilidade da água e controle de qualidade de alimentos.

Podemos ver avanços com passar dos anos por exemplo em Rezend et. al (2018){24}, apresenta o desenvolvimento de um goniômetro baseado em fibra óptica plástica (POF) para a medição do ângulo articular (Figura 3.1), com foco na articulação do cotovelo. O sensor proposto é portátil, de baixo custo, leve, imune a interferência eletromagnética e

não requer calibração contínua. O princípio de funcionamento baseia-se na atenuação da intensidade luminosa em função da curvatura da fibra, com uma zona sensível polida mecanicamente para aumentar a sensibilidade.



Figura 3.1 – Goniômetro baseado em POF proposto por Rezende et. al. {24}.

**Fonte:** Extraído de {24}.

O desempenho do sensor foi avaliado por meio de dois ensaios: em bancada (quase-estático e dinâmico, com diferentes velocidades angulares) e com 10 voluntários realizando movimentos de flexão/extensão do cotovelo. Em todos os testes, os dados do sensor de POF foram comparados com um goniômetro resistivo tradicional. Os resultados indicaram alta correlação entre os dois sensores ( $R^2$  0,99), boa repetibilidade entre ciclos e comportamento linear, mesmo em diferentes velocidades de movimento. O sensor demonstrou ser uma alternativa promissora para aplicações em dispositivos vestíveis voltados à análise biomecânica, com vantagens em ergonomia, portabilidade e custo frente a sensores comerciais e outros sensores ópticos.

Como seguem as pesquisas envolvendo POF podemos ver uma grande aplicação e até mesmo comparações dos sensores convencionais. Explorando sobre o tema temos um review realizado por Soge, Ayodele O. (2020) {30}, onde faz uma revisão abrangente sobre sensores de temperatura baseados em fibras ópticas poliméricas (POF), destacando suas vantagens — como tamanho compacto, imunidade a interferências eletromagnéticas, capacidade de multiplexação e sensoriamento remoto — que os tornam alternativas viáveis aos sensores convencionais. Além disso, a revisão inclui sensores duais, capazes de detectar não apenas temperatura, mas também umidade relativa e deformação (strain), ressaltando a sensibilidade intrínseca das POFs a múltiplos parâmetros. Seguem os diferentes tipos de sensores abordados:

- Sensores de fibra com macro-dobra (macro-bend);
- Ressonadores de microfibra;
- Fiber Bragg Gratings (FBG);

- Interferômetros Fabry-Perot;
- Sensores revestido com nanorods de oxido de zinco;

O artigo discute perspectivas de aplicação desses sensores nos setores automotivo, biomédico, químico e de energia elétrica, bem como os desafios atuais relacionados à precisão e à faixa de operação

Destas aplicações, podemos observar que os autores em Cano Perez et. al (2021) {5}, uma revisão abrangente sobre o uso de sensores de fibra óptica (FO) na detecção de glicose, uma área de grande interesse na monitoração de doenças como o diabetes.

A revisão destaca os materiais utilizados na construção dos sensores (como POFs e fibras dopadas) apresentados na Tabela 3.3, além de abordar estratégias de funcionalização da superfície, miniaturização, sensibilidade e estabilidade a longo prazo. Os autores também discutem a tendência atual de integrar sensores ópticos com dispositivos portáteis e vestíveis, enfatizando o potencial para monitoramento contínuo e não invasivo.

Tabela 3.3 – Comparação de sensores de glicose fabricados com diferentes tipos de fibras ópticas.

Tipo de Fibra	Sistema de Detecção	Faixa de Detecção	Faixa Dinâmica	Estrutura de Imobilização	Tempo de Resposta	Sensibilidade
MMF	Extremo	N/A	45–360 mg/dL	Ácido borônico com corante fluorescente	5 min	N/A
	Extremo	542 nm	0–100 mM	Agarose ou poliestireno	1 h	N/A
	Meio	500–750 nm	0–260 mg/dL	Prata e ouro siciliano	60 s	N/A
	Meio	N/A	N/A	Ouro	N/A	3632 nm/RIU
	Meio	625–668 nm	1–300 mg/dL	Polímero de ouro e cromo-borato	N/A	N/A
	N/A	625–700 nm	0–500 mg/dL	Glicose oxidase e poliácridamida	22 s	0,14 nm/(mg/dL)
	Extremo	785 nm	0–1110 mM	N/A	10–20 s	N/A
PCF	N/A	496–624 nm	0–100 mM	Ácido borônico	N/A	N/A
	N/A	1400–1420 nm	30–330 g/L	N/A	N/A	422 nm/RIU
	Extremo	600–750 nm	40–400 mg/dL	N/A	N/A	N/A
	N/A	1663–1665 nm	N/A	Ouro	N/A	200 nm/RIU
	N/A	440–470 nm	10–20 g/L	Substrato de silício	N/A	29267,33 nm/RIU
	N/A	1200–1600 nm	20–60%	N/A	N/A	N/A
	N/A	4950–6930 nm	10–40 g/L	N/A	N/A	6930 nm/RIU
POF	Extremo	450–500 nm	1,5–2 mM	Glicose oxidase	2–30 min	N/A
	Extremo	660 nm	0–0,25 g/dL	Glicose oxidase	N/A	0,072 V/wt
	Meio	620–635 nm	1–40%	Grafeno	N/A	N/A
	Meio	500–800 nm	0–260 mg/dL	Cobre e óxido de estanho	50 s	N/A
	Meio	356–540 nm	4–20 mM	Contas de agarose NTA-Ni	50 s	2888 ± 0.0858
	Meio	581 nm	81,2–235,1	N/A	N/A	N/A
	Meio	500–750 nm	10–80%	Ácido acético	N/A	RIU(μg/L) <sup>-1</sup>
	Extremo	425–625 nm	0–25 mM	Metil metacrilato	N/A	N/A
SMF	Meio	450–500 nm	N/A	Metil metacrilato	N/A	N/A
	Extremo	480–500 nm	N/A	Cloreto de metileno	N/A	13,09 AU/RIU
	Meio	500–550 nm	N/A	Glicose oxidase	1,5 s	14,57 dB
	Meio	1545–1560 nm	6–30%	Ácido fluorídrico	N/A	1467,59
	Extremo	1280–1340 nm	N/A	Ácido fluorídrico	N/A	N/A
	Meio	880–980 nm	10–50%	Ouro	N/A	1252,8 pm/mM
	Meio	1410–1500 nm	0,6–30%	Ouro e glicose oxidase	N/A	1305,7 pm/mM
	Meio	1280–1600 nm	0–1 mM	Óxido de grafeno e ouro	6 min / 3 s	1,06 dB/mM

Fonte: Adaptado de {5}.

Como podemos observar nas pesquisas citadas, utilizaram a POF de diversas formas e aplicações. A tecnologia implementada com o sensor com base em POF não seguiu apenas na linha de sensores de refração, também foram elaborados sensores que utilizam de sistemas mecânicos para atuação. Um exemplo disso pode ser visto e Arcadio e Nunzio (2022) {2}, onde eles apresentam uma nova abordagem para a construção de um sensor de força baseado em fibra óptica plástica (POF) utilizando o fenômeno da ressonância de plasmon de superfície (SPR). A metodologia proposta envolve um patch de



POF multimodo acoplado a um sensor SPR em configuração em formato de “D”. Quando uma força é aplicada ao patch, ocorre uma deformação que altera o perfil modal da luz transmitida, fazendo com que o espectro SPR do sensor conectado se desloque. Esse deslocamento de comprimento de onda permite a detecção da força aplicada. Os principais resultados experimentais mostraram:

- Resolução de detecção em torno de 22 mN;
- Resposta linear excelente no intervalo de força de 0 a 0,5 N;

O trabalho demonstrou que o método é simples assim como de baixo custo e pode ser eficaz com um LED e fotodetector em lugar de um sistema de luz branca e espectrômetro. Deste modo se posicionou como uma solução promissora para diversas aplicações, dentre elas, biomédicas, industriais e/ou robóticas.

Como mencionado anteriormente, há diversas aplicações possíveis para sensores baseados em POF. Uma delas é apresentada por Safarloo et. al (2022) {27}, no qual os autores descrevem o desenvolvimento, a modelagem e a validação experimental de sensores de pressão plantar baseados em fibras ópticas poliméricas (POF), voltados para aplicações biomecânicas e clínicas (Figura 3.2). O principal objetivo é propor uma solução leve, flexível e de baixo custo para medir a distribuição de pressão na sola dos pés durante atividades estáticas e dinâmicas

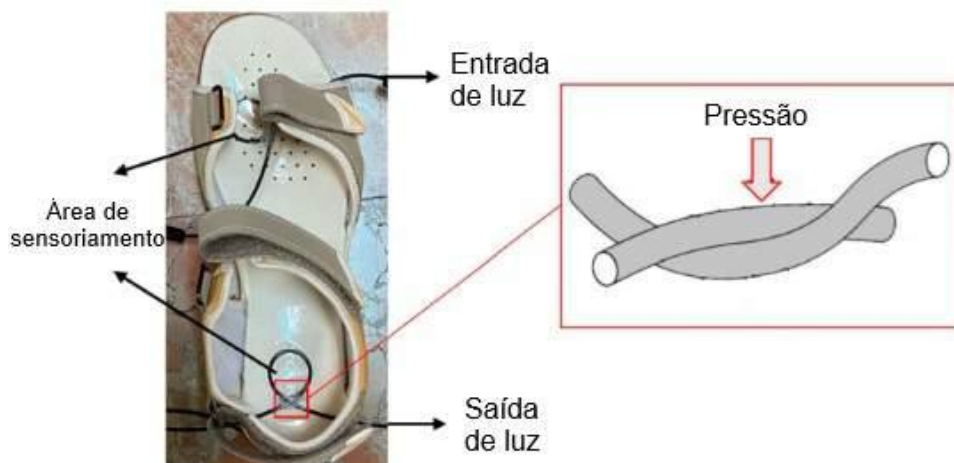


Figura 3.2 – Sensor de pressão baseado em POF proposto por {27}.

**Fonte:** Adaptado de {27}.

O sensor foi construído com fibras poliméricas tipo CYTOP e encapsulado em uma estrutura de silicone, posicionada em pontos estratégicos da palmilha para detectar variações de pressão exercidas durante a caminhada como observado na Figura 3.2. O sensor apresentou bons resultados como:

- Boa repetibilidade e resposta linear na faixa de pressão típica da planta dos pés (0–400 kPa);
- Demonstrou alta sensibilidade mecano-óptica e capacidade de diferenciar fases da marcha (calcanhar, apoio médio e ante pé);

A solução se mostrou promissora para monitoramento da marcha e aplicações em reabilitação, esportes e diagnósticos clínicos.

Entre outras pesquisas que envolvem POF, mas voltadas para análises de temperatura, como as apresentadas por Soge (2020) {30}, destaca-se o trabalho de Leal Junior et. al (2023){14}, no qual é descrito o desenvolvimento de um sensor baseado em fibras ópticas poliméricas (POF) (Figura 3.3), destinado à estimativa do teor de água em emulsões óleo-água, apresentando desempenho insensível à variação de temperatura. A abordagem utiliza fenômenos plasmônicos na fibra, integrando o princípio da ressonância de plásmom de superfície (SPR) com fibras ópticas plásticas para obter medições confiáveis mesmo em condições térmicas variáveis. Os autores destacam as seguintes vantagens:

- Estrutura simples e baixo custo, facilitando produção e aplicação prática;
- Alta precisão e robustez, mantendo desempenho estável independentemente da temperatura;

Com grande potencial para aplicações em sensoriamento industrial ou ambiental devido à durabilidade e simplicidade ótica.

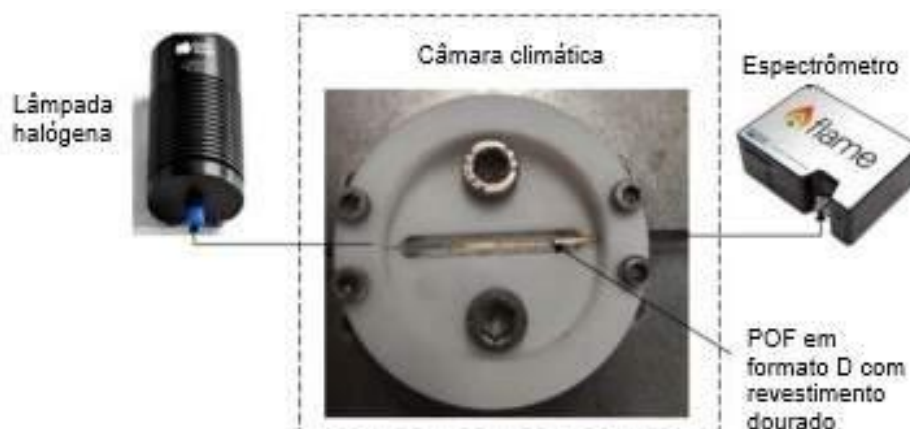


Figura 3.3 – Sensor de temperatura baseado em POF proposto por {14}

**Fonte:** Adaptado de {14}.

Com base nesta vasta aplicação de sensores com base em POF, alguns sistemas envolvendo vestimentas foram elaborados vistas em Pramod (2023){23} e Li et. al (2024){16}. Em Pramod (2023){23}, o autor apresenta um panorama das evoluções recentes no uso de fibras ópticas plásticas (POF) para o desenvolvimento de sensores

vestíveis aplicados ao monitoramento de parâmetros de saúde. Os autores destacam as vantagens da POF — como leveza, flexibilidade, fácil manuseio e imunidade à interferência eletromagnética (EMI) — que a tornam adequada para aplicações médicas, inclusive em ambientes de ressonância magnética (MRI).

O trabalho descreve duas principais abordagens para a implementação de sensores vestíveis em POF:

- Sensores baseados em Fiber Bragg Grating (FBG);
- Utilizados para monitorar respiração, frequência cardíaca e sons cardíacos;
- Operam através da reflexão seletiva de um comprimento de onda específico, sensível à deformação da fibra;
- Embora precisos, alguns demandam dispositivos de inscrição e interrogadores de custo elevado;
- Sensores baseados em variação de intensidade;
- Detectam alterações na potência óptica devido à curvatura ou micro dobras na fibra;
- Aplicações incluem monitoramento de flexão lombar, respiração e frequência cardíaca;
- Apresentam menor custo e maior simplicidade de fabricação, podendo utilizar até smartphones como fonte e detector óptico;

O artigo compila exemplos práticos da literatura, incluindo sensores acoplados a faixas elásticas, integrados a roupas ou posicionados em superfícies de apoio, explorando configurações como fibras em formato D, seções laterais decapadas e fibras modificadas por plasma para aumentar sensibilidade.

E também confirma uma aplicabilidade adequada para aplicações médicas contínuas e em ambientes com outros equipamentos eletrônicos sensíveis.

Técnicas baseadas em variação de intensidade se destacam pela simplicidade e custo reduzido, enquanto FBG oferece alta precisão, porém com custo e complexidade maiores.

Agora, em Li et. al (2024){16} os autores apresentam o desenvolvimento de uma luva inteligente vestível (Figura 3.4) que utiliza fibra óptica plástica (POF) em formato D para reconhecimento de gestos, com aplicação de técnicas de aprendizado de máquina. As principais características incluem:

- Um sensor de curvatura D-shape em POF, altamente sensível à flexão das juntas dos dedos;

- Sistema de aquisição de sinal com cinco canais, montado em uma placa de circuito de  $8 \times 4,5$  cm, integrado a uma luva elástica para captura dos movimentos dos dedos;
- Definição e coleta de 13 gestos distintos e 11 ações de preensão;

Aplicação de classificadores SVM com kernel Gaussiano e redes neurais feedforward, com resultados de classificação impressionantes:

- 99,8 % de acurácia para os 13 gestos com SVM;
- 97,7 % para as 11 ações de preensão com SVM;
- 98,9 % de acurácia para os dados combinados (gestos + preensão) com SVM;
- 99,4 % com redes neurais FNN no conjunto combinado.

O sistema demonstrou alta precisão na distinção de gestos e ações, mostrando-se promissor para aplicações em interação humano-computador, realidade virtual, reabilitação e robótica assistiva.



Figura 3.4 – Smart-luva baseado em POF proposto por {16}

**Fonte:** Adaptado de {16}.

Em síntese, observa-se que os estudos envolvendo POF vêm se intensificando ao longo dos anos, impulsionados pela necessidade crescente de sensores mais acessíveis, flexíveis, adaptáveis a diferentes ambientes operacionais e como vimos, de baixo custo. A literatura atual demonstra uma convergência de esforços no sentido de aprimorar a sensibilidade, estabilidade e aplicabilidade dos sensores ópticos com fibra plástica, consolidando esse campo como uma fronteira tecnológica em expansão.

## 3.1 Compilação dos Estudos Relacionados

Tabela 3.4 – Tabela Resumo de trabalhos realizados utilizando POF.

<b>Autores/Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Palavras-chave</b>	<b>Resumo/Inovação</b>	<b>Resultados</b>
Zubia & Arrue (2001)	Plastic Optical Fibers: Tech. Processes & Applications	POF, processos, aplicações	Revisão ampla sobre POF (materiais, fabricação, aplicações).	Destacou flexibilidade, baixo custo e aplicações em sensores.
Yang et al. (2014)	Optimized tapered optical fiber for ethanol sensing	Tapered, POF, etanol	Fibra afunilada para medir concentração de etanol.	Alta sensibilidade para detecção química.
Arcas (2017)	Nanobiossensor POF revestido com ouro p/ *E. coli*	POF, SPR, biossensor	Uso de POF em formato U com filme de ouro para detecção bacteriana.	Limite de detecção $1,5 \times 10^3$ UFC/mL.
Gowri et al. (2019)	U-bent POF probes for fat sensing in milk	POF, U-bent, alimentos	Sensor baseado em POF para monitorar gordura do leite via índice de refração.	Detectou variações de gordura em leite com boa repetibilidade.
Wang et al. (2020)	Refractive index sensor with double side-polished U-shaped POF	POF, U-shape, polimento	Sensor POF polido em U para índice de refração.	Alta sensibilidade a mudanças refrativas.
Cano Perez et al. (2021)	Fiber optic sensors: review for glucose	POF, glicose, biomédico	Revisão sobre sensores ópticos para glicose.	Organizou técnicas e comparou abordagens.
Fegadolli et al. (2021)	Sensor de deformações à fibra óptica	POF, deformação, ITA	Protótipo nacional para detecção de deformações mecânicas.	Funcionamento validado em laboratório.
Arcadio et al. (2022)	Exploiting plasmonic phenomena in POF	POF, plasmônica, força	Uso de SPR em POF para sensores de força.	Mostrou alta sensibilidade para cargas mecânicas.
Ge et al. (2023)	Finger joint angle measurement with double-U POF	POF, articulação, U-tapered	POF com dupla curvatura para medir ângulo de articulações.	Resultados lineares e de alta resolução.
Leal-Junior et al. (2023)	Water content estimation in emulsions with POF	POF, emulsões, óleo-água	Sensor insensível à temperatura p/ análise de emulsões.	Estimou conteúdo de água com boa precisão.
Zhang et al. (2023)	POF tapered sensor for breathing sensing	POF, respiração, taper	Sensor de respiração baseado em POF afunilada.	Aplicação em monitoramento fisiológico.

#### 4 CONTEXTUALIZAÇÃO: SENSORES A FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA

Como vimos anteriormente no capítulo 3 a fibra de PMMA vem sendo estudada e demonstrando uma vasta aplicabilidade nos campos mais variados do conhecimento. Neste atual capítulo, será abordado mais a fundo características e principais equacionamentos na qual regem a fibra óptica.

Conforme apresentado no trabalho de Zubia e Arrue (2001) {43}, os autores descrevem a evolução da fibra óptica plástica (POF) desde sua invenção até sua consolidação comercial. Além disso, esse e outros estudos destacam que a POF é imune a campos eletromagnéticos e apresenta elevada robustez mecânica, sendo também dúctil devido à sua flexibilidade, o que permite deformações significativas sem ocorrência de rompimento.

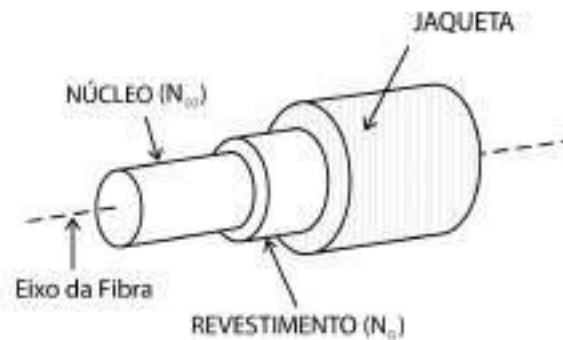


Figura 4.1 – Estrutura da Fibra Óptica Plástica

Fonte: Adaptado de {43}.

Como podemos ver na figura 4.1, a fibra plástica possui três camadas, partindo da camada mais interna para a externa temos:

- Núcleo ou *Core* ( $N_{co}$ ): Por onde percorre o feixe luminoso;
- Casca ou *Cladding* ( $N_{cl}$ ): Por onde ocorrem as refrações da luz conforme o modo de propagação da fibra (mono ou multimodo);
- Jaqueta ou *Jacket*: Revestimento mais externo que atua como proteção da fibra mais interna, garantindo robustez mecânica;

A fibra como citado, possui dois modos de propagação sendo eles: monomodo e multimodo. A fibra óptica plástica que opera em através do monomodo opera com um feixe único em seu núcleo e se propaga de forma retilínea, diferente da fibra óptica multimodo que opera com faixas diferentes de frequências como podemos observar na figura 4.2

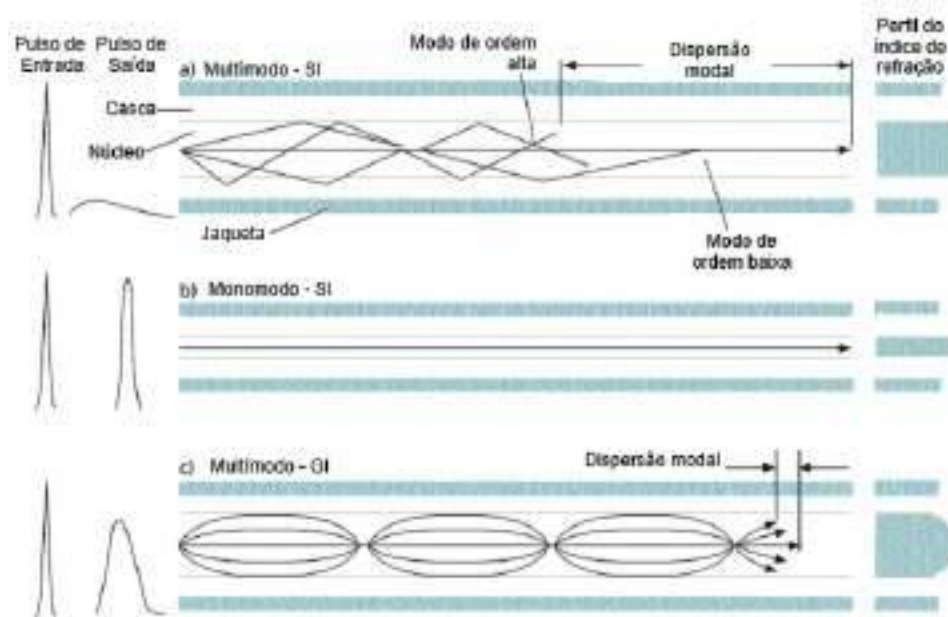


Figura 4.2 – Modos de operação da fibra óptica

Fonte: Adaptado de {22}.

Como pode-se observar os modos de operação tem suas características que melhor se adaptam ao tipo de sistema a ser aplicada. Além das características intrínsecas da fibra, algumas geometrias são aplicadas para atribuir maior sensibilidade para o sensor, melhorando seu funcionamento.

Com isso podemos ver em Teng et al. (2022){33} os autores apresentam um review sobre sensores de índice de refração baseado em fibra óptica polimérica, modulada por intensidade, citando aplicações em diversas áreas dentre elas: biomedicina, indústria de alimentos e monitoramento ambiental, são algumas aplicações citadas, além de reforçar o que vimos anteriormente sobre POF, quanto a robustez e baixo custo e facilidade de implementação.

Além disso citam também alguns perfis de sensores que serão melhor descritos posteriormente.

#### 4.0.1 Tipos de perfis de sensores baseados em POF

Como citado anteriormente, os modos de operação da fibra óptica influenciam em sua aplicação na implementação de sensores. A atual Seção tem como objetivo descrever estas aplicações sejam para sistemas de: refração luminosa ou intensidade luminosa assim como os tipos de sensores e suas geometrias além de apresentar os principais equacionamentos de regem estes sensores

## Principais equacionamentos

Alterações no meio externo modificam a condição de confinamento óptico, permitindo detecção indireta por variação da intensidade.

A resposta óptica de sensores baseados em fibra pode ser modelada por diferentes mecanismos, dependendo do princípio físico explorado — seja pela interação com o meio externo (sensores refrativos), seja pela deformação da fibra (sensores por curvatura ou tração axial). A seguir, são apresentados os principais modelos teóricos utilizados para caracterizar sensores ópticos de deformação com base em Teng et al. (2022){33}.

### (1) Reflexão interna total

A condição de confinamento da luz dentro da fibra óptica é determinada pelo ângulo crítico de reflexão interna total:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_{cl}}{n_{co}} \right) \quad (4.1)$$

Onde:

- $\theta_c$ : ângulo crítico de reflexão;
- $n_{co}$ : índice de refração do núcleo;
- $n_{cl}$ : índice de refração do revestimento (ou meio externo, caso não haja casca).

Quando a curvatura da fibra ou a mudança no índice do meio externo força a luz a incidir com  $\theta < \theta_c$ , ocorre perda óptica por escape dos modos confinados, fundamento comum a sensores por curvatura e por refração.

### (2) Profundidade do campo evanescente

A interação da luz com o meio externo pode ser modelada pela profundidade de penetração do campo evanescente:

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_{co}^2 \sin^2 \theta - n_{cl}^2}} \quad (4.2)$$

Onde:

- $d_p$ : profundidade de penetração da onda evanescente;
- $\lambda$ : comprimento de onda da luz no vácuo;
- $\theta$ : ângulo de incidência interna;



- $n_{co}$ ,  $n_{cl}$ : índices de refração do núcleo e do revestimento, respectivamente.

Em sensores refrativos,  $d_p$  representa a região onde a luz interage com o meio externo. Em sensores por curvatura, representa o aumento da perda por radiação conforme a curvatura altera os modos propagantes.

### (3) Atenuação por curvatura (modulação de intensidade)

Em sensores como o proposto neste trabalho (POF com geometria em “W”), a intensidade da luz transmitida é modulada diretamente pela curvatura imposta à fibra. O modelo empírico mais comum é:

$$I = I_0 \cdot e^{-kr} \quad (4.3)$$

Onde:

- $I$ : intensidade óptica de saída;
- $I_0$ : intensidade de entrada;
- $r$ : raio de curvatura;
- $k$ : constante de atenuação experimental (dependente do material, geometria e  $\lambda$ ).

Esse modelo é útil para caracterizar a resposta em sensores onde o raio de curvatura muda conforme a força aplicada.

### (4) Relação entre curvatura e ângulo de deflexão

Se o sensor assume a forma de um arco circular, com comprimento de arco  $L$  e ângulo de deflexão  $\theta$ , a curvatura pode ser expressa como:

$$r = \frac{L}{\theta} \quad (4.4)$$

Essa relação é importante para sensores projetados com deflexão angular (como goniômetros), pois permite a conversão de ângulo em curvatura e, posteriormente, em atenuação óptica.

### (5) Atenuação por macrocurvatura

Outra modelagem comum relaciona a perda óptica por metro de fibra ao raio de curvatura, segundo uma lei de potência:

$$\alpha_b \propto \left(\frac{1}{r}\right)^n \quad (4.5)$$

Onde:

- $\alpha_b$ : perda por curvatura (em dB/m);
- $r$ : raio de curvatura;
- $n$ : fator empírico (geralmente entre 3 e 5).

Esse modelo é frequentemente usado para prever perdas acumuladas em sensores que operam com múltiplas dobras.

#### (6) Deformação axial (sensores espectrais, como FBG)

Em sensores que medem deformação axial (alongamento ou compressão), como grades de Bragg (FBG), o deslocamento espectral é dado por:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \varepsilon \quad (4.6)$$

Onde:

- $\Delta\lambda_B$ : deslocamento do comprimento de onda de Bragg;
- $\lambda_B$ : comprimento de onda de Bragg original;
- $\varepsilon$ : deformação axial (*strain*);
- $p_e$ : coeficiente de fotoelasticidade (tipicamente 0,22).

Embora este trabalho não utilize sensores espectrais, esse modelo é relevante como base comparativa com outras abordagens ópticas.

#### (7) Sensores interferométricos

Em sensores ópticos que operam por interferometria (como Fabry-Perot ou Mach-Zehnder) ainda vem sendo estudados pois possuem uma menor aplicação em POF, a deformação causa variação de fase, expressa por:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot \Delta L \quad (4.7)$$

Onde:

- $\Delta\phi$ : variação de fase;
- $\Delta L$ : mudança de comprimento óptico da cavidade;
- $n$ : índice de refração da cavidade;

- $\lambda$ : comprimento de onda.

Esses sensores são extremamente sensíveis, mas pouco utilizados em configurações com fibra óptica plástica devido à baixa estabilidade e custo.

Tabela 4.1 – Resumo dos modelos ópticos utilizados em sensores de deformação.

Modelo	Equação	Grandeza Sensível
Reflexão interna total	$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_{cl}}{n_{co}} \right)$	Confinamento óptico
Campo evanescente	$d_p = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_{co}^2 \sin^2 \theta - n_{cl}^2}}$	Índice externo ou curvatura
Modulação por curvatura	$I = I_0 e^{-kr}$	Raio de curvatura
Ângulo-curvatura	$r = \frac{L}{\theta}$	Deslocamento angular
Perda por macrocurvatura	$\alpha_b \propto (1/r)^n$	Curvatura acumulada
Deformação axial (FBG)	$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon$	Alongamento
Interferência óptica	$\Delta\phi = \frac{2\pi n \Delta L}{\lambda}$	Compressão axial

#### 4.0.2 Fibras Afuniladas (Tapered)

Este tipo de estrutura, consiste em um afinilamento em um determinado intervalo/região da fibra que adquire uma característica cônica. Este afinilamento, altera as características de transmissão da luz, diminuindo o acoplamento e a conversão dos modos de propagação luminosa. Na figura 4.3 podemos ver a característica do afinilamento que tem como objetivo aumentar a sensibilidade e captura do mensurando.



Figura 4.3 – Esquemático da fibra afunilada (Tapered).

**Fonte:** Extraído de {33}.

Para a execução deste afinilamento, existem alguns métodos de confecção sendo exemplo, a utilização de fontes térmicas e até mesmo reações químicas quem reduzem o diâmetro da fibra. A modificação no diâmetro da fibra, causa uma mudança no ângulo de propagação podendo interferir na potencia do feixe luminoso.

#### Princípios matemáticos

Para operação e compreensão sobre o afinilamento, podemos ver o diagrama da fibra afunilada na figura 4.4



Como citado anteriormente, alguns trabalhos foram elaborados utilizando fibra optica POF afunilada segue em Hang-Zhou Yang et al. (2014){41} e Zhang et al. (2023){42} que realizaram suas pesquisas utilizando a POF afunilada. Hang-Zhou Yang et. al {41}, realizaram um estudo para a otimização e detecção da concentração de álcool  $C_2H_5OH$  na água. Para confecção utilizaram um método químico de corrosão somado a raspagem da fibra utilizando uma lixa. O sistema proposto pelos autores é representado na figura 4.5

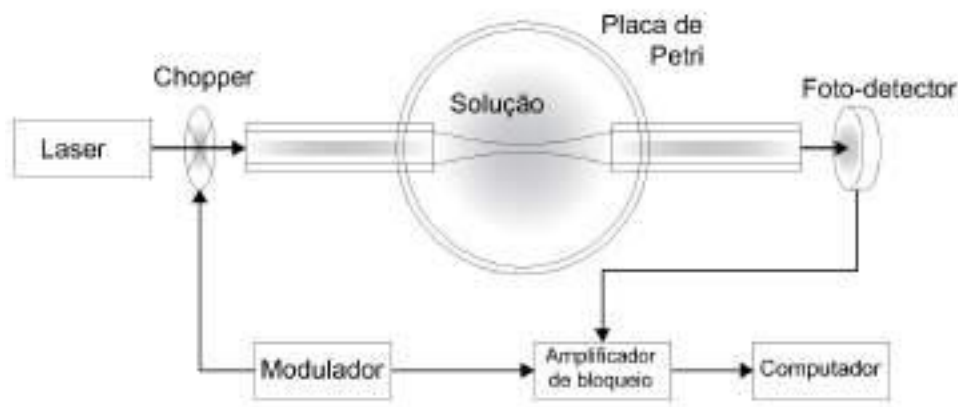


Figura 4.5 – Esquemático proposto por {41}

Fonte: Adaptado de {41}.

Segundo o autor, neste projeto de sensor, a sensibilidade foi aprimorada pela otimização dos parâmetros geométricos:: raio do afilamento, comprimento e temperatura. O ajuste do número de modos guiados  $V$  foi considerado na otimização para obter alta profundidade do campo evanescente ( $EWPD$ ) e, conseqüentemente, maior sensibilidade.

Nesta investigação, a partir de resultados teóricos e experimentais, foi demonstrado que uma maior sensibilidade pode ser alcançada empregando-se uma baixa razão de afunilamento e um comprimento de afunilamento longo da fibra. A maior sensibilidade, ou seja, 1,527 mV/%, pode ser obtida para a concentração de  $C_2H_5OH$ , com base em uma razão de afilamento de 0,27 e comprimento de afunilamento de 8 cm.

O sensor apresenta resolução de detecção de  $6,55 \times 10^{-3}$ . O tempo médio de resposta do sensor foi investigado experimentalmente e obtido como 5 s.

Em contrapartida, na pesquisa realizada por Zhang et al. (2023) {42}, os autores estudam uma POF afunilada aplicada a biossensores, especificamente para monitoramento da respiração humana. Para a fabricação do sensor, foi utilizado um método simples, empregando um ferro de solda para aquecer a fibra óptica plástica até próximo do seu ponto de fusão — valor relativamente baixo — o que facilita a deformação e a criação do afunilamento.

Com base neste artigo, o autor propôs um sensor de POF do tipo *pull-cone* e realizou um estudo por meio de experimentos de respiração. O sistema utiliza a lanterna



Figura 4.6 – Método de fabricação de {42}

Fonte: Extraído de {42}.

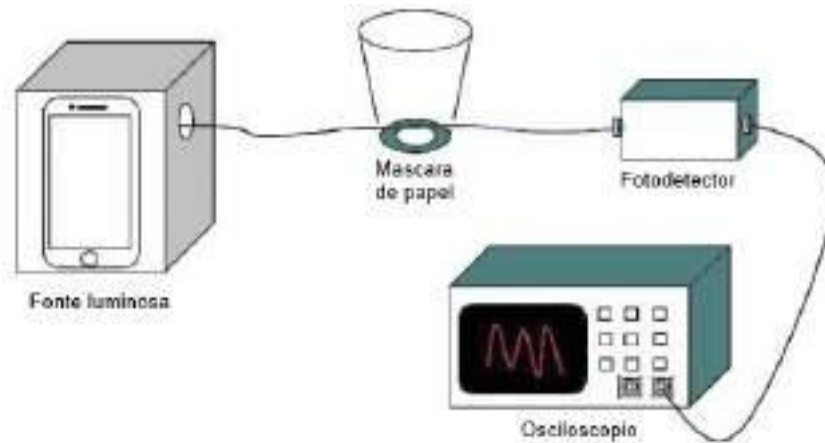


Figura 4.7 – Esquemático proposto por {42}

Fonte: Adaptado de {42}.

do celular como fonte de luz e apresenta as vantagens de estrutura simples, ressalta o baixo custo e fácil operação além da medição precisa da respiração.

No experimento de calibração do sistema, foi realizada uma análise de ajuste linear entre a frequência de pressão e a frequência fundamental correspondente, obtendo-se um coeficiente de 0,999. Durante os experimentos, as formas de onda respiratórias foram obtidas enquanto os participantes respiravam na frequência definida e foram processadas utilizando a transformada de Fourier. Os experimentos mostram que a frequência fundamental de cada forma de onda respiratória corresponde basicamente à curva de ajuste da calibração, o que comprovou a alta precisão do sistema de sensoriamento.

#### 4.0.3 Fibras por Curvatura controlada (Macrobending)

Como vimos anteriormente, a POF afunilada, apresenta algumas vantagens diante a sensibilidade na detecção dos mensurados propostos grande parte em meio aquoso. Outro

método são as POF com macro curvaturas ou curvatura controlada (macrobending).

O modelo mais comum utilizado neste sistema é a geometria que se assemelha a letra "U"(Figura 4.8), que também opera com base em inúmeras refrações com diferenças no modo em que o mesmo opera.



Figura 4.8 – Esquemático fibra com curvatura controlada U

Fonte: Adaptado de {33}.

A fibra em curvatura, obtêm ângulos internos onde a luz guiada se choca contra a casca e/ou jaqueta gerando atenuações no sinal luminoso inserido a fibra.

#### Princípios matemáticos

Para operação e compreensão sobre o afunilamento, podemos ver o diagrama da fibra afunilada na figura 4.9

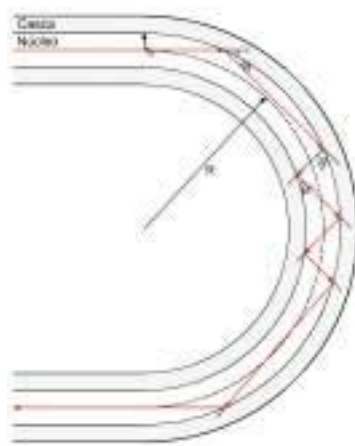


Figura 4.9 – Diagrama de refrações internas na fibra com curvatura controlada U

Fonte: Autor.

Para melhor compreensão do sistema, a fibra será dividida em duas regiões: a região interna, submetida à compressão, e a região externa, submetida ao estiramento.

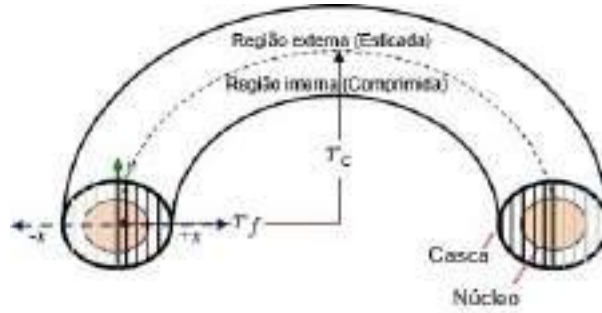


Figura 4.10 – Esquemático da fibra óptica dividida no eixo X

Fonte: Adaptado de {31}.

A curvatura em fibras ópticas provoca variações significativas no perfil do índice de refração, induzindo birrefringência e alterando as condições de propagação modal. A seguir são apresentadas as principais formulações matemáticas baseadas em Sokkar et al. (2014){31}.

Considera-se a fibra dividida em regiões e subcamadas de espessura uniforme (*slabs*). A espessura de cada *slab* da região entre o núcleo e o revestimento é dada por:

(1) Espessura para cada *slabs*

$$a = \frac{r_f - r_c}{k}, \quad (4.10)$$

Onde

- $r_f$  é o raio total da fibra
- $r_c$  o raio do núcleo
- $k$  o número de divisões nessa região

(2) Numero total de *slabs*

$$M = \frac{kr_c}{r_f - r_c}. \quad (4.11)$$

(3) Posição do raio incidente no  $j$ -ésimo *slab*

$$d_j = r_f - \frac{j-1}{2}a, \quad (4.12)$$



(4) Ângulo de incidência

$$\theta_{0j} = \sin^{-1} \left( \frac{d_j}{r_f} \right). \quad (4.13)$$

(5) Ângulo de refração interior do *slab*

$$\theta_{1j} = \sin^{-1} \left( \frac{n_L d_j}{n_{A_j} r_f} \right), \quad (4.14)$$

A coordenada de saída é dada por:

$$x'_j = r_f \sin \varphi_j, \quad \varphi_j = 2\theta_{1j} - \theta_{0j}. \quad (4.15)$$

Com os perfil anteriormente citados, para o perfil em U observa-se alguns trabalhos já elaborados, exemplo é demonstrado por Annasamy et al. (2019) {11}, apresenta o desenvolvimento de um sensor óptico portátil baseado em fibras ópticas plásticas em geometria em U (Figura 4.11), destinado ao monitoramento da qualidade do leite por meio da avaliação de seu teor de gordura. O princípio de funcionamento fundamenta-se na modulação de intensidade da luz devido à absorção da onda evanescente e às perdas por reflexão total atenuada, fenômenos diretamente relacionados ao índice de refração (IR) do meio.

As fibras de PMMA foram preparadas com diâmetro de 0,5 mm e curvatura de 1,5 mm, submetidas a processo de remoção de cladding na região sensora. Amostras comerciais de leite (desnatado, padronizado e integral), assim como leite fresco de vaca e búfalo, foram analisadas. Observou-se uma correlação direta entre o teor de gordura e a resposta óptica do sensor, com sensibilidade de aproximadamente 0,15,  $\Delta A/\Delta\%$  de gordura. Além disso, a resposta frente à adulteração com água foi investigada, sendo possível detectar diluições tão baixas quanto 1% (v/v), desempenho superior a métodos elétricos reportados na literatura.

Os autores também desenvolveram um dispositivo portátil de baixo custo (menor que US\$ 5), integrando LED, fotodetector e circuito de leitura, demonstrando a viabilidade de aplicação em campo. O sistema permite análises rápidas ( $< 10$  s), com volumes reduzidos de amostra ( $< 100, \mu\text{L}$ ) e sem destruição do leite, destacando-se frente a técnicas convencionais como o método de Gerber ou refratômetros comerciais.

Conforme descrito pelo trabalho, os sensores POF com geometria em U apresentaram grande potencial para monitoramento em tempo real da qualidade do leite, tanto em centros de coleta quanto em aplicações industriais e de consumo final. Contudo, ressalta-se a limitação do uso exclusivo do índice de refração para identificar adulterações, sugerindo a combinação com outros parâmetros físico-químicos para maior robustez analítica.

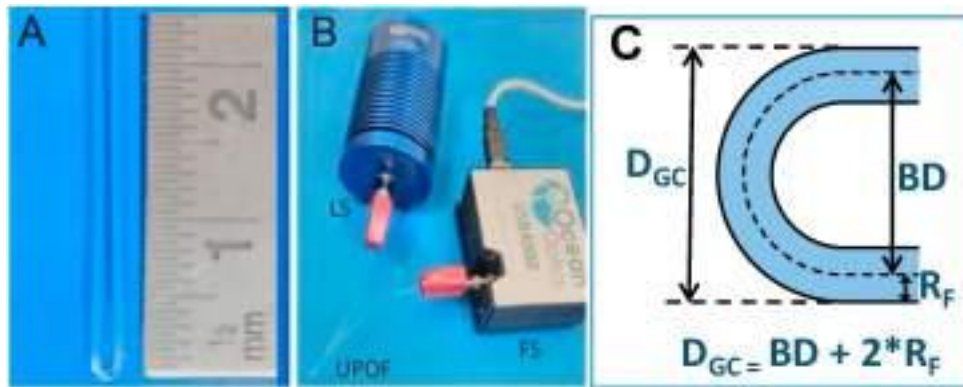


Figura 4.11 – Sensor elaborado por {11}.

Extraído de {11}

Outro trabalho envolvendo geometria em U temos o trabalho de Ge et al. (2023) {9} citado anteriormente que propôs um sensor óptico de alta sensibilidade para monitoramento do ângulo de articulações dos dedos (Figura 4.12), utilizando fibra óptica plástica (POF) afilada em uma configuração de duplo-U encapsulada em filme de polidimetilsiloxano (PDMS). O dispositivo explora a modulação de intensidade luminosa induzida por curvatura, potencializada pela geometria afilada e pela conformação em U duplo, que resulta em perdas óticas adicionais em três regiões simultaneamente.

O processo de fabricação envolveu:

- Preparo da POF afilada por método de aquecimento por resistência;
- Conformação térmica da fibra em estrutura duplo-U ;
- Encapsulamento em PDMS, material biocompatível e de boa flexibilidade. Diferentes comprimentos de afilamento, diâmetros da região afilada e raios de curvatura foram analisados para otimização da sensibilidade;

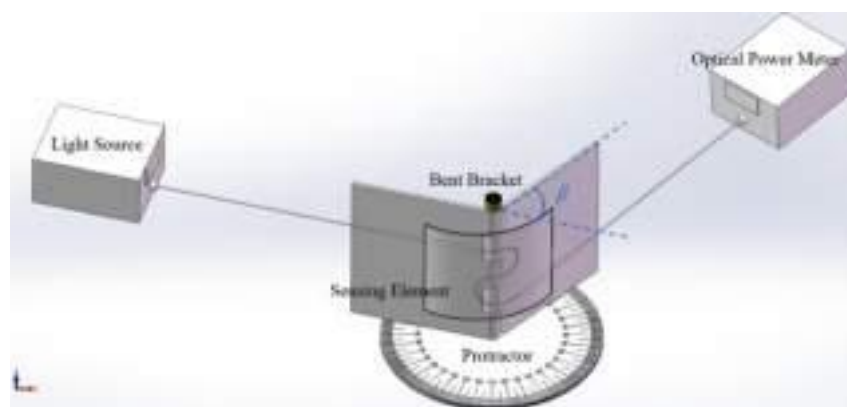


Figura 4.12 – Diagrama do sistema experimental proposto por {9}.

Adaptado de {9}.

Os resultados experimentais indicaram que o sensor atinge uma sensibilidade de até 0,070 dB/°, com excelente linearidade ( $R^2 = 0,995$ ) em uma ampla faixa de ângulos (0–105°). Além disso, o dispositivo apresentou boa repetibilidade (erro de 1,96%) e rápida resposta temporal (84 ms). Testes em articulações humanas demonstraram capacidade de distinguir diferentes ângulos de flexão do dedo e variações de pressão, mantendo estabilidade mesmo sob diferentes frequências de movimento.

A comparação com sensores previamente reportados evidencia que a solução proposta combina alta sensibilidade, ampla faixa de medição, baixo custo e portabilidade, mostrando-se promissora para aplicações em dispositivos vestíveis, reabilitação, monitoramento de saúde e robótica biomimética.

#### 4.0.4 Fibras com Polimento Lateral (Side-polished)

Seguindo o contexto dos diferentes tipos de perfis aplicados à POF para utilização em instrumentação, destaca-se também o polimento lateral, ilustrado na Figura 4.13. Esse tipo de perfil apresenta vantagens específicas dependendo da aplicação, além de operar de forma distinta quando comparado aos outros perfis discutidos anteriormente.



Figura 4.13 – Esquemático fibra com polimento lateral.

**Fonte:** Adaptado de {33}

O polimento lateral (*side-polish*) é uma técnica aplicada em fibras ópticas plásticas (POF) para modificar a geometria da fibra e permitir maior interação do campo óptico com o meio externo. Nesse processo, parte do revestimento (*cladding*) é removida ao longo de um comprimento definido, reduzindo a espessura da camada de confinamento e expondo parcialmente o núcleo da fibra. Como consequência, a fração de campo evanescente que se estende para fora da fibra é aumentada, tornando o guia mais sensível a variações do meio externo.

#### Princípios matemáticos

Para operação e aplicação sobre o polimento lateral, podemos ver o diagrama da fibra polida na Figura 4.14

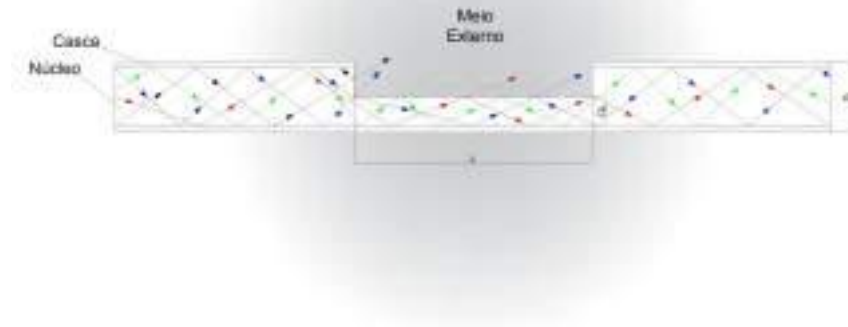


Figura 4.14 – Diagrama de refrações na fibra com polimento lateral.

**Fonte:** Autor.

Com base no trabalho de Li et al.(2023) {17} que propuseram um sensor baseado em configuração SMS (singlemode-multimode-singlemode), em que a seção multimodo (MMF) é dual-polida lateralmente (Figura 4.15) com auxílio de laser de femtossegundo, para aumentar a interação do campo óptico com o meio externo.

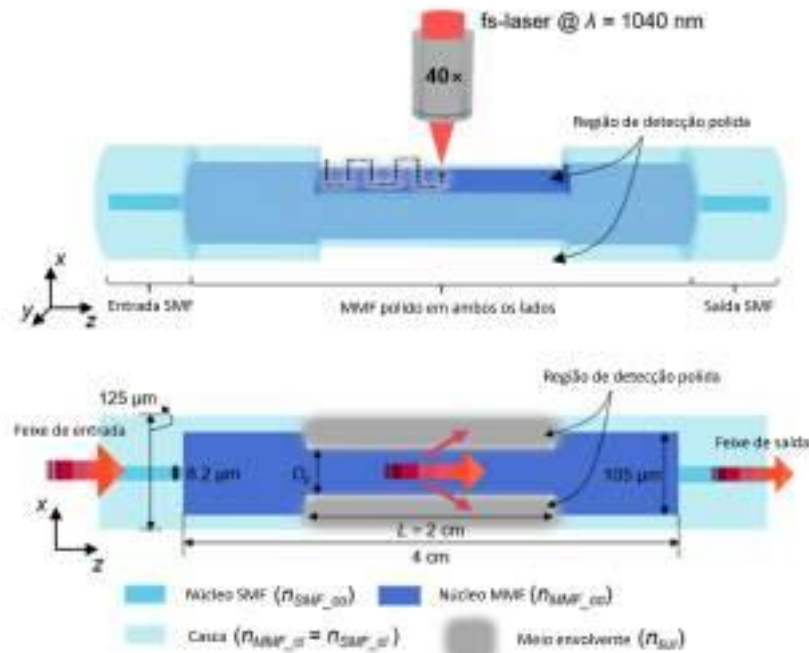


Figura 4.15 – Sensor proposto por {17}.

**Fonte:** Adaptado de {17}

Os principais equacionamentos associados ao polimento lateral nesse contexto são os seguintes:

### (1) Interferência por MMI e condição de pico

A transmissão do dispositivo exibe um pico de mínima transmitância (dip) resultante da interferência destrutiva entre modos do MMF. Para dois modos representativos  $j$  e  $k$ , a condição de interferência que define o comprimento de onda do dip  $\lambda_{dip}$  pode ser escrita como:

$$(n_{eff}^j - n_{eff}^k) \cdot \frac{L}{\lambda_{dip}} = m,$$

ou equivalente:

$$\lambda_{dip} = \frac{(n_{eff}^j - n_{eff}^k) L}{m}$$

Onde:

- $n_{eff}^j$  e  $n_{eff}^k$  são os índices efetivos dos modos  $j$  e  $k$ ,
- $L$  é o comprimento da região polida (interferente),
- $m$  é uma ordem de interferência inteira.

Essa fórmula mostra que pequenas variações nos índices efetivos (por exemplo, devido a mudanças no índice externo) resultam em deslocamento do pico de transmissão.

### (2) Dependência da espessura residual polida ( $D_p$ )

No dispositivo proposto, o parâmetro  $D_p$  (diâmetro residual após polimento) influencia diretamente a diferença entre os índices efetivos  $n_{eff}^j - n_{eff}^k$ . Conforme o polimento avança (menor  $D_p$ ), essa diferença tende a diminuir, deslocando o pico para comprimentos de onda menores (blue shift). Quando o índice externo  $n_{ext}$  aumenta, o efeito oposto ocorre, promovendo red shift.

O artigo mostra que a sensibilidade à variação do RI (em nm/RIU) depende inversamente de  $D_p$ . Por exemplo, com  $D_p = 79 \mu\text{m}$ , alcançou-se sensibilidade máxima de 161,40 nm/RIU para a faixa  $1,3571 \leq n_{ext} \leq 1,3945$ .

### (3) Profundidade de penetração evanescente (implícita) e acoplamento lateral

Embora o artigo foque mais na interferência multimodal, o princípio do polimento lateral envolvido implica que parte do campo evanescente se acopla ao meio externo. A expressão típica para a amplitude do campo evanescente decai exponencialmente:

$$E(z) = E_0 e^{-z/d_p}$$

com

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_{core}^2 \sin^2 \theta - n_{ext}^2}}.$$

Essa expressão não é explicitamente usada no artigo, mas é consubstancial ao efeito de polimento lateral: a penetração do campo evanescente é mais eficaz quando o polimento aproxima o meio externo do núcleo, reduzindo confinamento.

#### (4) Sensibilidade de RI e ajuste linear

A sensibilidade em termos de deslocamento de pico é definida por:

$$S_{RI} = \frac{d\lambda_{dip}}{dn_{ext}}.$$

No experimento, fez-se ajuste linear no intervalo onde a resposta é aproximadamente linear, obtendo-se  $S_{RI} = 161,40 \text{ nm/RIU}$  com  $R^2 = 0,9999$ .

No artigo podemos observar um comportamento não linear em parte da faixa de RI, pois o deslocamento do pico depende de modo mais forte próximo ao valor do índice da fibra multimodo. Em outras palavras, conforme  $n_{ext}$  aproxima-se de  $n_{core}$ , o acoplamento lateral é mais forte, intensificando a sensibilidade localmente — isso resulta em diferentes sensibilidades em subfaixas de RI.

Esta não linearidade pode ser explicada com base no artigo de Liu e Feng (2015){19}, que apresentaram o desenvolvimento de um sensor óptico baseado em fibras multimodo com polimento lateral, explorando a interferência multimodal (MMI) como princípio de funcionamento. A proposta busca ampliar a sensibilidade a variações do índice de refração externo (RI), aproveitando a interação do campo evanescente com o meio circundante.

O fenômeno de *Multimode Interference* (MMI) ocorre quando diferentes modos ópticos propagam-se na fibra multimodo, acumulando fases distintas e gerando padrões de interferência na saída. Pequenas variações no índice de refração externo modificam os índices efetivos desses modos, deslocando os comprimentos de onda associados aos picos e vales de transmissão.

A Figura 4.16 do artigo ilustra esse princípio, mostrando como o espectro de transmissão apresenta mínimos (dips) cuja posição depende da diferença entre os índices efetivos modais. À medida que o índice externo aumenta, observa-se um deslocamento não linear dos dips, indicando que a sensibilidade do sensor não é constante em toda a faixa, mas cresce significativamente quando o índice externo se aproxima do índice do núcleo multimodo. Esse comportamento resulta de maior acoplamento do campo evanescente ao meio externo, intensificado pela redução da espessura residual da fibra após polimento.

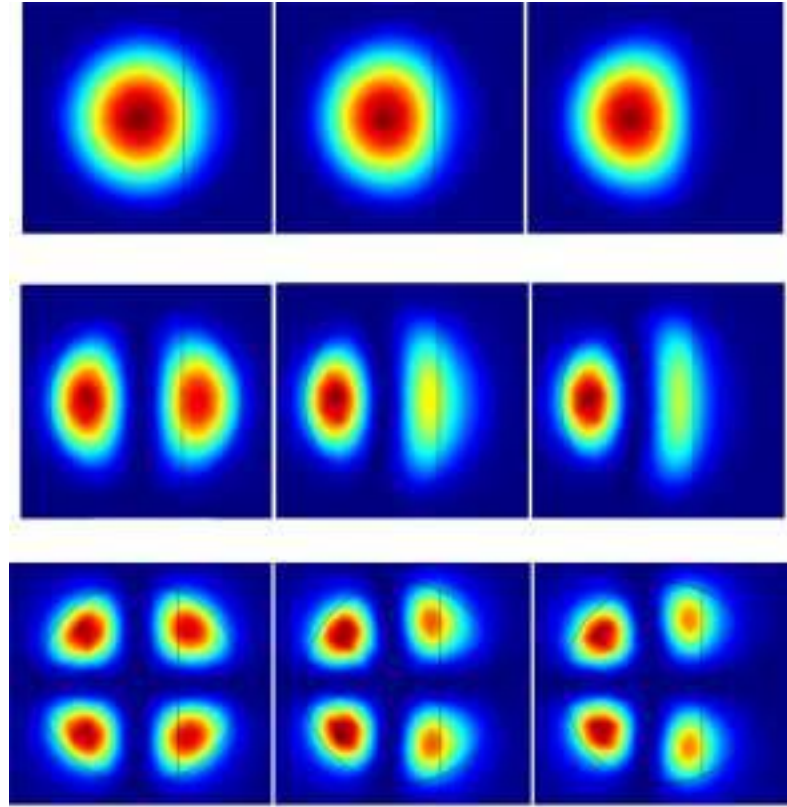


Figura 4.16 – Distribuição típica de energia dos modos em fibra com polimento lateral para diferentes RI descritos por {19}.

**Fonte:** Extraído de {19}.

Matematicamente, a condição de interferência entre dois modos pode ser expressa como:

$$\lambda_{dip} = \frac{(n_{eff}^j - n_{eff}^k) L}{m},$$

Onde,  $n_{eff}^j$  e  $n_{eff}^k$  são os índices efetivos dos modos  $j$  e  $k$ ,  $L$  é o comprimento da região polida e  $m$  a ordem de interferência. Essa relação demonstra que pequenas alterações no índice externo  $n_{ext}$  provocam deslocamentos espectrais significativos, especialmente em regiões próximas ao índice do núcleo.

Os resultados experimentais confirmam que a resposta do sensor não é linear em toda a faixa de  $n_{ext}$ , mas pode ser linearizada por intervalos menores, permitindo ajustes adequados para aplicações práticas. Essa característica amplia a aplicabilidade da técnica em sistemas de monitoramento químico e biológico, nos quais variações sutis do índice de refração precisam ser detectadas.

Como vimos anteriormente, os perfil tem aplicações diferentes assim como modos de operação variados. Mas ainda com sua particularidades, são realizadas pesquisas no ramo de POF exemplo destes trabalhos pode ser visto em Wang et al.(2021) {39}

que desenvolveram um sensor vestível de baixo custo para monitoramento da respiração, baseado em fibra óptica plástica (POF) com geometria em D. O dispositivo foi projetado para aplicações em saúde, visando conforto, portabilidade e simplicidade de fabricação, tornando-se uma alternativa promissora a sensores elétricos convencionais.

O princípio de funcionamento do sensor baseia-se na modulação da intensidade luminosa causada pela variação do acoplamento do campo evanescente com o ar exalado durante o processo respiratório. A superfície em D, obtida por polimento lateral da POF, expõe parcialmente o núcleo, permitindo maior interação óptica com o meio externo. Assim, a mudança de índice de refração local, associada ao ciclo respiratório, resulta em variações detectáveis na potência transmitida.

A Figura 4.17 ilustra a configuração do sensor: a região polida da POF é recoberta por um filme sensível, que intensifica a interação com o ar exalado. O sensor é integrado a uma estrutura flexível que pode ser adaptada a vestíveis (como máscaras ou faixas peitorais), mantendo baixo custo e fácil utilização.



Figura 4.17 – Sensor vestível baseado em POF com geometria em D para monitoramento respiratório proposto por {39}.

**Fonte:** Adaptado de {39}.

Os resultados experimentais demonstraram que o sensor responde de forma clara aos ciclos respiratórios, apresentando excelente repetibilidade e estabilidade. Além disso, o sinal obtido mostrou-se robusto frente a variações de movimento, confirmando a adequação do dispositivo para uso em monitoramento contínuo da respiração em ambientes clínicos ou domiciliares.

A simplicidade de fabricação (polimento lateral e aplicação do filme sensível), aliada à portabilidade e ao baixo custo da fibra polimérica, torna essa solução altamente competitiva. O artigo conclui que sensores D-shaped em POF oferecem grande potencial para aplicações biomédicas, especialmente em dispositivos vestíveis para monitoramento não invasivo.

Assim como apresenta Nabila et al.(2024) {20} que realizaram um estudo preliminar sobre o desenvolvimento de sensores de ressonância de plásmom de superfície (SPR) baseados



em fibras ópticas poliméricas (POF) com geometria em D. O objetivo foi criar dispositivos compactos, de baixo custo e portáteis para aplicações bioquímicas em *point-of-care*.

O princípio do sensor baseia-se no acoplamento do campo evanescente, gerado pela reflexão interna total (TIR) na fibra, com ondas de plásmon de superfície em uma fina camada metálica depositada na região sensora (Figura 4.18). Nesse trabalho, optou-se pelo ouro devido à sua estabilidade química e compatibilidade com modificações bioquímicas.

A geometria em D foi escolhida porque permite uma maior exposição do núcleo da fibra ao meio externo, facilitando a interação com o analito. A Figura 4.18 destaca dois pontos fundamentais:

- Geometria em D: a remoção parcial do revestimento da fibra expõe o núcleo em uma superfície plana, melhorando o acoplamento do campo evanescente com o meio externo e simplificando a deposição de filmes metálicos.
- Espessura do filme de ouro: a deposição controlada do filme fino influencia diretamente a intensidade e a posição do dip de SPR. Um filme muito fino compromete a formação da ressonância, enquanto um filme excessivamente espesso reduz a eficiência de acoplamento.

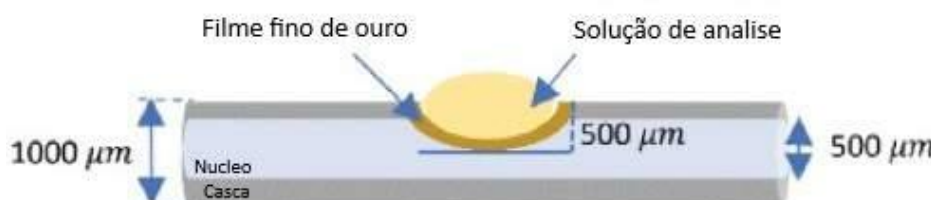


Figura 4.18 – Ilustração esquemática do sensor POF em forma de D por {20}.

**Fonte:** Adaptado de {20}..

Foram comparadas diferentes técnicas de polimento lateral (F1 e F2) e diferentes tempos de deposição do ouro (10 s, 15 s e 20 s), resultando em espessuras entre 20 e 42 nm. A caracterização demonstrou que a espessura de aproximadamente 20 nm, associada à técnica F1, apresentou os melhores resultados.

O sensor otimizado (variação F1D1) exibiu sensibilidade de  $4,585 \pm 0,489 \text{ \% mM}^{-1}$ , limite de detecção (LoD) de 0,31 mM, estabilidade de 63,5% e profundidade de penetração de 77,7 nm. Esses parâmetros confirmam a viabilidade do sensor D-shaped POF para aplicações em biossensoriamento, principalmente pela sua simplicidade de fabricação, robustez e potencial de miniaturização para diagnósticos rápidos.

#### 4.0.5 Estruturas Híbridas

Como discutido anteriormente, alguns perfis de fibra já são amplamente empregados tanto em pesquisas quanto no mercado, visando reduzir custos e ampliar as possibilidades de aplicação. O presente subtópico destaca diferentes formas de implementação desses perfis, que, quando combinados, contribuem para o aumento da sensibilidade, da aplicabilidade e da robustez estrutural dos sensores.

Nos tópicos anteriores foram apresentados três perfis já bem difundidos, que se complementam para aprimorar a detecção de diferentes mensurandos. Um exemplo relevante é o trabalho de Teng et al. (2022) {32}, que explorou a combinação de perfis distintos. Nesse estudo, foi utilizada a associação entre o perfil em U e o taper, juntamente com a deposição de um filme de ouro, com o objetivo de modificar as propriedades ópticas da fibra. A implementação proposta pode ser observada na Figura 4.22

Outro exemplo de combinação de perfis é apresentado em Wang et al.(2020) {38} e Teng et al.(2022) {34}, onde foi adotada uma fibra em perfil U associada a dois polimentos laterais, conforme ilustrado na Figura 4.19.

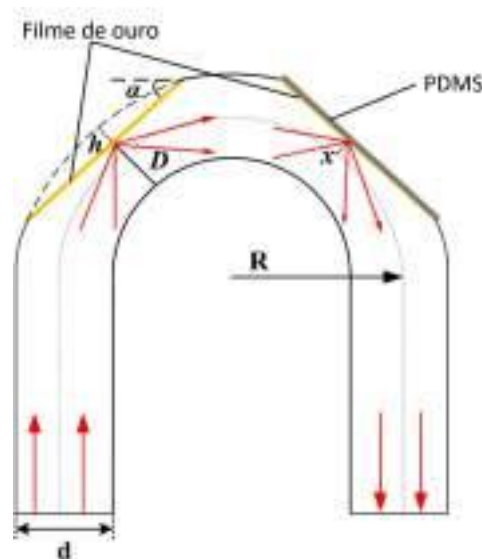


Figura 4.19 – Esquema do sensor proposto por {34} e {38}, combinando perfil U e polimento lateral duplo.

**Fonte:** Adaptado de {34}.

Wang et al.(2020) {38} desenvolveram um sensor em fibra óptica plástica (POF) com perfil U e polimento lateral duplo, denominado *double side-polished U-shaped POF sensor*. O polimento expõe parcialmente o núcleo, permitindo que o campo evanescente interaja com o meio externo e, conseqüentemente, que variações no índice de refração (RI) resultem em perdas ópticas detectáveis.

O sensor apresentou sensibilidade de aproximadamente 1541 %/RIU na faixa  $1,33 \leq n \leq 1,39$ , com resolução de  $5,35 \times 10^{-4}$  RIU e estabilidade térmica entre 20 e

50 °C. A análise estrutural mostrou que o raio de curvatura, a profundidade e o ângulo de polimento influenciam diretamente a resposta, sendo a configuração otimizada obtida para raio de 3 mm, profundidade de 400  $\mu\text{m}$  e ângulo de 60°. O estudo evidencia a simplicidade construtiva e a elevada sensibilidade desse arranjo para medições de RI.

De forma complementar, Teng et al. {34} propuseram um sensor também baseado em POF em perfil U com polimento lateral duplo, mas integrado a uma camada metálica para excitação de ressonância plasmônica (SPR). Nesse arranjo, a interação entre campo evanescente e interface metal-meio externo gera um pico de ressonância cuja posição espectral e intensidade variam com o RI e a temperatura do meio.

Os autores analisaram o efeito da profundidade de polimento e do raio de curvatura sobre a sensibilidade. Os resultados mostraram que deslocamentos do pico SPR permitem medir o índice de refração, enquanto variações de intensidade possibilitam compensar interferências térmicas. A sensibilidade obtida foi de cerca de 2008,58 nm/RIU para  $n_{ext} \approx 1,39$ . O trabalho destaca ainda a simplicidade do projeto, o baixo custo e o potencial em aplicações químicas e bioquímicas.

Ambos os estudos confirmam a viabilidade de fibras em perfil U com polimento lateral duplo como plataformas sensoriais de alta sensibilidade, ressaltando a importância do controle geométrico (raio de curvatura e profundidade de polimento) no desempenho do dispositivo.

Com base em sensores a fibra óptica que utilizam do perfil U temos, o artigo de Saad et al.(2015) {26} apresenta o desenvolvimento de um sensor óptico baseado em POF para detecção de baixas concentrações de etanol em água, variando entre 0,02% e 1,00% (v/v). Foram analisadas três configurações distintas: Taper com perfil U, perfil U com polimento lateral e perfil de bobina polida, apresentados na Figura 4.20, confeccionadas por aquecimento indireto da fibra a 80°C seguido de modelagem e polimento.

A caracterização experimental utilizou um laser he-ne como fonte de luz e um espectrômetro da Ocean Optics para análise da intensidade transmitida. Os resultados mostraram comportamento não linear da resposta do sensor, com maior sensibilidade entre 0,02% e 0,10% v/v. O sensor perfil U com polimento apresentou a melhor responsividade, atingindo 285 unidades/% de etanol. Em concentrações acima de 1,00% v/v, a resposta tendeu à saturação devido à redução do inchaço polimérico e menor absorção de água.

Conclui-se que o sensor é capaz de detectar concentrações mínimas de etanol da ordem de 200 ppm, sendo promissor para aplicações de monitoramento químico em baixas concentrações.

Assim como é possível observar em podemos ver Teng et al. (2022) {32}, citado anteriormente, os autores investigam sensores ópticos baseados em fibras plásticas ópticas (POF) modeladas em formato de U e afinadas acoplados à ressonância de plasmon de superfície (SPR), para monitoramento do índice de refração de líquidos, com aplicações



(a) POF em perfil U com taper.

(b) Perfil U com polimento lateral.

(c) Bobina com polimento lateral.

Figura 4.20 – Setup do experimento por {26}.

Fonte: Extraído de {26}

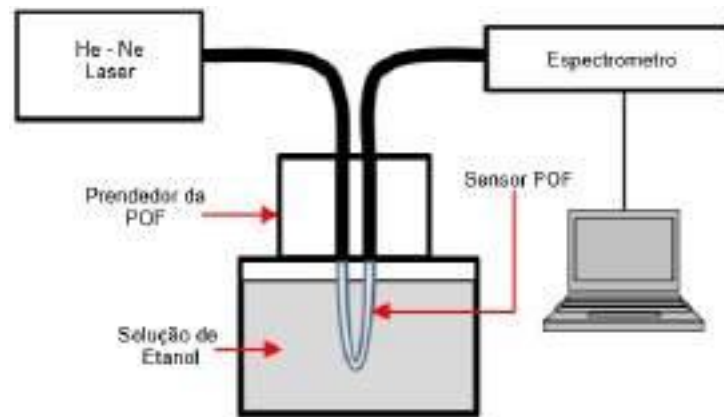


Figura 4.21 – Esquemático proposto por {26}.

Fonte: Adaptado de {26}

potenciais na detecção de concentrações químicas em meios aquosos.

A metodologia envolve a fabricação de fibras POF em forma de U afinadas (tapered), utilizadas como superfície sensível. A técnica SPR aproveita a forte sensibilidade do acoplamento de ondas plasmônicas em superfícies metalizadas à variação do índice de refração do meio adjacente, possibilitando detecção precisa de alterações na composição da solução.

Os resultados demonstram que esses sensores POF em formato U polido apresentam alta sensibilidade à mudança do índice de refração, indicando potencial para aplicações em sensores químicos compactos e de baixo custo.

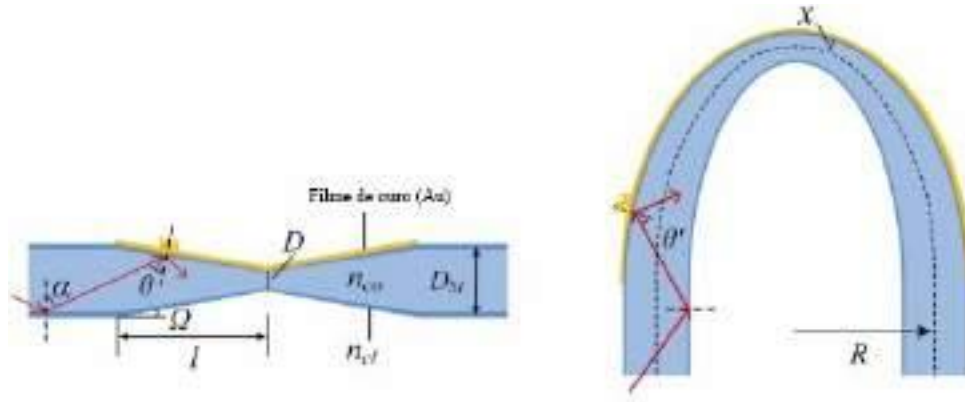


Figura 4.22 – Esquemático proposto por {32}.

**Fonte:** Adaptado de {32}

#### 4.0.6 Demais formas de utilização

Como discutido anteriormente, as fibras ópticas plásticas (POF) têm se consolidado como uma alternativa promissora em pesquisas acadêmicas e em soluções industriais, não apenas pela sua versatilidade, mas também pelo potencial de redução de custos em comparação com tecnologias ópticas convencionais. Esse fator, aliado à facilidade de manuseio e à robustez mecânica, confere às POF um atrativo econômico para empresas que buscam inovação no setor de sensoriamento óptico.

Sensores ópticos baseados em POF operam, em sua maioria, por modulação de intensidade. Nesse princípio, a luz guiada sofre atenuação em função da interação da fibra com o meio externo, seja por deformação mecânica ou por contato direto com fluidos. A magnitude da atenuação depende de fatores como o raio de curvatura imposto, o índice de refração dos materiais envolvidos e o comprimento de onda da radiação utilizada. Assim, é possível projetar sensores capazes de responder de forma linear, ou calibrada, a diferentes estímulos, tais como força, deslocamento mecânico ou variações no meio em que a fibra está inserida.

#### Sensores em meios aquosos

Sensores ópticos em meios aquosos são amplamente empregados em aplicações químicas e ambientais. Nesses sistemas, a fibra óptica é exposta a líquidos, de modo que a intensidade da luz propagada é modulada conforme o índice de refração do meio externo varia. Esse fenômeno decorre da interação do campo evanescente com o ambiente aquoso, modificando as condições de confinamento dos modos ópticos e, conseqüentemente, deslocando o espectro transmitido.

A representação esquemática do princípio de operação desses sensores é mostrada na Figura 4.23, onde se observa a interação entre a região polida da fibra e o meio externo.

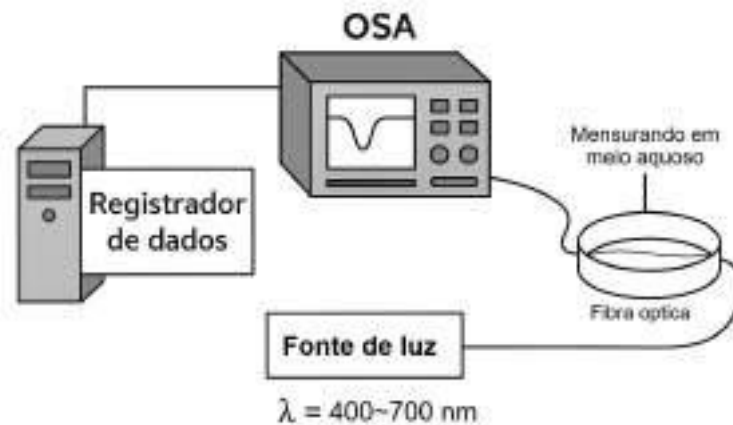


Figura 4.23 – Esquema de um sistema de sensoriamento óptico baseado em variações de índice de refração em meio aquoso.

**Fonte:** Autor

#### Sensores de deformação mecânica

Diferentemente dos sensores em meios aquosos, os sensores de deformação mecânica exploram as perdas ópticas induzidas por curvatura. Quando a POF é submetida a flexões acentuadas, há modificação nos ângulos de incidência dos modos guiados, o que resulta em perdas por radiação e consequente redução da intensidade luminosa transmitida.

Esse princípio está ilustrado na Figura 4.24, onde o esquema mostra a relação entre a deformação imposta à fibra e a modulação da intensidade óptica.

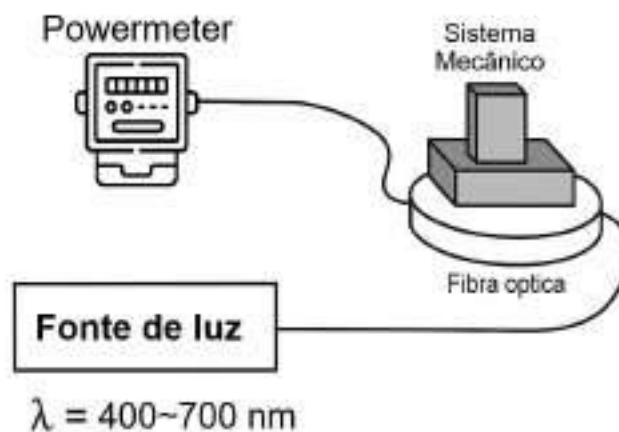


Figura 4.24 – Esquema de um sistema de sensoriamento óptico baseado em curvatura mecânica da fibra.

**Fonte:** Autor

### Sensores por acoplamento luminoso

Outra forma de utilização envolve o princípio de acoplamento luminoso. Nesse caso, a potência óptica propagada é modulada pela transferência de energia entre fibras ou entre regiões distintas de uma mesma fibra, em função da proximidade geométrica ou da alteração de suas propriedades estruturais. Esse mecanismo possibilita a implementação de sensores sensíveis a variações de alinhamento, posicionamento e deformações locais.

Na Figura 4.25 é apresentado um esquema representativo do processo de acoplamento, evidenciando a interação óptica que possibilita o monitoramento de parâmetros físicos em diferentes configurações experimentais.

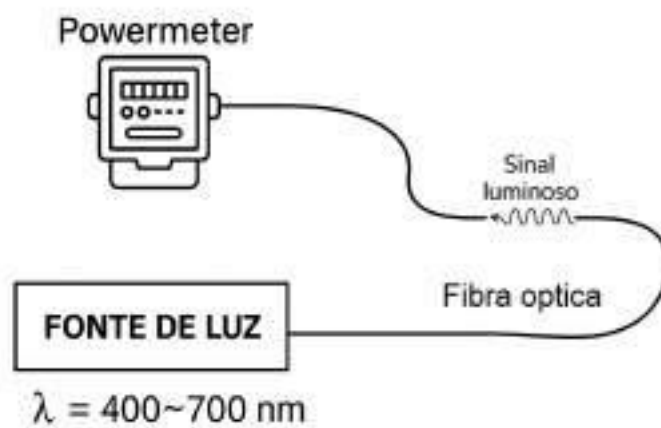


Figura 4.25 – Esquema de um sistema de sensoriamento óptico baseado em acoplamento luminoso.

**Fonte:** Autor

## 5 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO SENSOR BASEADO EM MACRO CURVATURA

Com base em estudos realizados sobre sensores em POF com perfil em U (macro-bending), o autor deste documento propôs, em trabalho recente Coelli et al.(2025) {6}, o desenvolvimento de um dispositivo com três macrocurvaturas de mesmo raio, configuradas de forma a compor uma geometria semelhante à letra W. Este sensor, fruto direto da presente pesquisa, é descrito no artigo intitulado “*Desenvolvimento de Sensores POF para Controle Inteligente em Aplicações Robóticas*”, incluído no Apêndice deste trabalho.

No referido artigo, são discutidos a fabricação, o encapsulamento em silicone e o princípio de funcionamento baseado em perdas ópticas por curvatura, além da caracterização experimental do dispositivo. Como aplicação prática, foi demonstrada uma célula de carga óptica capaz de detectar variações de força no intervalo de 0 a 5 N, com elevada sensibilidade, boa repetibilidade e potencial de uso em sistemas robóticos.



Figura 5.1 – Esquemático proposto por {6}.

**Fonte:** Extraído de {6}

Outra aplicação do sensor desenvolvido foi voltada para o monitoramento da dilatação de baterias, conforme ilustrado na Figura 5.2. Nesse caso, a deformação mecânica associada ao processo de expansão da bateria foi convertida em variação de força detectável pelo sensor. O objetivo desse ensaio foi avaliar a integridade estrutural do hardware da bateria, fornecendo um parâmetro adicional para o monitoramento do seu estado de saúde (*State of Health* – SoH) e contribuindo para a prevenção de falhas no equipamento.





Figura 5.2 – Aplicação do sensor óptico em geometria "W" para monitoramento da dilatação de baterias.

**Fonte:** Autor.

## 5.1 Materiais e Métodos

O desenvolvimento do sensor proposto fundamenta-se nos princípios de propagação da luz em fibras ópticas plásticas (POF), explorando a modulação da intensidade como principal mecanismo de detecção. Para aplicações voltadas ao monitoramento de deformações mecânicas, optou-se pela configuração em formato "U" (*macrobending*), uma vez que a curvatura acentuada da fibra induz perdas ópticas controladas, diretamente relacionadas ao grau de deformação aplicado. Estudos prévios demonstram que essa abordagem apresenta desempenho superior em termos de sensibilidade e reprodutibilidade na atenuação luminosa, consolidando-se como uma estratégia adequada para o sensoriamento proposto neste trabalho.

### 5.1.1 Estrutura e fabricação da unidade de detecção

Inicialmente, foi adquirida uma fibra óptica plástica (POF) sem casca, composta apenas de núcleo e jaqueta, conforme ilustrado na Figura 5.3. Esse tipo de configuração foi escolhido por favorecer a interação direta entre a curvatura da fibra e o campo evanescente, característica essencial para o aumento da sensibilidade.

Em testes preliminares, a fibra foi conformada em um perfil em "U" e encapsulada em silicone, resultando em um cilindro sensor (Figura 5.4). Embora funcional, esse arranjo apresentou elevada rigidez mecânica e dificuldade de deformação, o que limitou a sensibilidade óptica obtida.

Buscando superar essas limitações, tomou-se como referência o estudo de [9], que propôs uma configuração com duas curvaturas em "U" de raios distintos (Figura 5.5), resultando em ganhos significativos de sensibilidade.



(a) Detalhe da POF utilizada.



(b) Outro detalhe da POF utilizada.

Figura 5.3 – Fibra Óptica Plástica em PMMA utilizada.

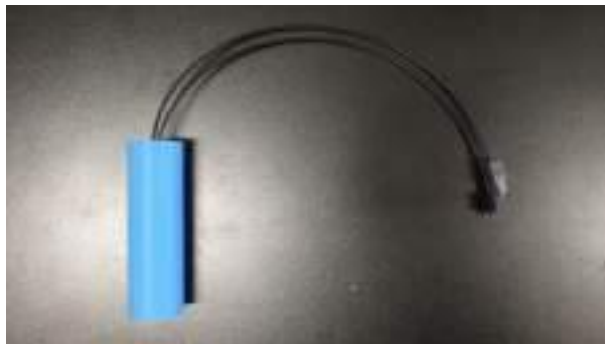
**Fonte:** Autor

Figura 5.4 – Protótipo inicial em formato cilíndrico com fibra em "U" submersa em silicone.

**Fonte:** Autor

Essa geometria potencializou as perdas por *macrobending*, amplificando a variação da intensidade óptica transmitida em função do grau de deformação aplicado.

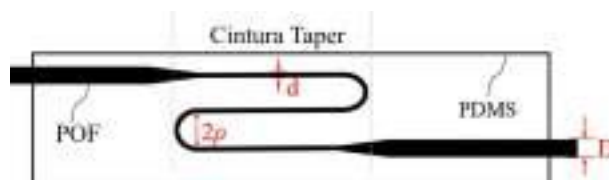


Figura 5.5 – Combinação de dois perfis U proposto por {9}.

**Fonte:** Adaptado de {9}

Inspirado por essa abordagem, o sensor desenvolvido neste trabalho adota uma geometria composta por três curvaturas idênticas em formato de "U", dispostas sequencialmente de modo a formar uma estrutura em "W". A configuração foi escolhida por favorecer a simetria do arranjo, garantir maior estabilidade mecânica e ampliar a região

ativa de sensoriamento. Cada segmento curvado possui raio de  $r = 1.5 \text{ mm}$ , como ilustrado na Figura 5.6.

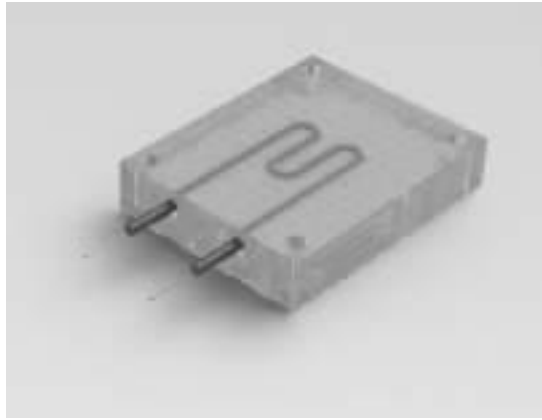


Figura 5.6 – Molde projetado para conformação da fibra em formato "W".

**Fonte:** Autor

Para a fabricação, desenvolveu-se um molde em resina fotopolimerizável (Figuras 5.6 e 5.7a), no qual a fibra foi cuidadosamente posicionada (Figura 5.7b). O processo de conformação foi realizado por aquecimento controlado com soprador térmico (Figura 5.7c), mantendo a fibra em temperatura suficiente para torná-la maleável, mas sem comprometer suas propriedades ópticas. Após o resfriamento natural, a fibra permaneceu rigidamente fixada na geometria em "W" (Figura 5.8), assegurando reprodutibilidade e estabilidade estrutural necessária para a aplicação em sensoriamento.



(a) Molde em resina fotopolimerizável.



(b) Fibra posicionada no molde.



(c) Aquecimento e conformação da fibra.

Figura 5.7 – Etapas do processo de fabricação do sensor em "W".

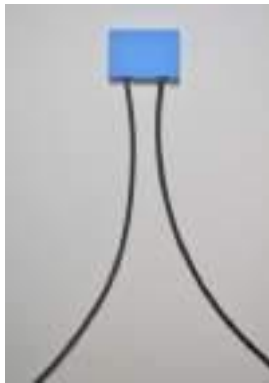
**Fonte:** Autor



Figura 5.8 – Sensor em sua forma bruta, sem encapsulamento.

**Fonte:** Autor

Durante testes preliminares, verificou-se que a fibra, em sua forma crua, apresentava baixa resistência mecânica e instabilidade sob deformação. Para superar essa limitação, o sensor foi encapsulado em uma camada de borracha de silicone (Figura 5.9), escolhida por sua elasticidade, estabilidade dimensional e capacidade de proteção mecânica. O encapsulamento também aumentou a área de contato do sensor com o meio externo, ampliando a superfície de detecção e a sensibilidade a pequenas variações de carga.



(a) Sensor encapsulado em silicone.



(b) Visão interna do sensor.

Figura 5.9 – Encapsulamento do sensor em borracha de silicone.

**Fonte:** Autor

As dimensões finais do sensor encapsulado foram caracterizadas e estão representadas na Figura 5.10, que apresenta seu comprimento, altura e largura. Essa geometria foi projetada para operar próxima ao regime de curvatura crítica da fibra, de modo a maximizar a variação da intensidade luminosa transmitida em função da força mecânica aplicada, assegurando resposta linear e estável em aplicações de sensoriamento de força ou deslocamento.



(a) Comprimento.

(b) Espessura.

(c) Largura.

Figura 5.10 – Dimensões finais do sensor encapsulado em silicone.

Fonte: Autor

### 5.1.2 Sinal da fonte de luz controlada

Como em qualquer sistema óptico, a implementação de uma fonte de luz estável é essencial para a operação adequada do sensor. No Laboratório de Instrumentação e Telemetria (LITEL) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), foi desenvolvida uma fonte de luz de baixo custo, composta por LEDs comutáveis cobrindo o espectro da luz visível, conforme ilustrado na Figura 5.11. Essa configuração foi escolhida por permitir flexibilidade experimental e fácil integração com fibras ópticas plásticas, além de manter simplicidade construtiva e baixo consumo de energia.

Para caracterização e teste do sensor, foi selecionado o LED vermelho, operando na faixa de 620–750 nm, que apresentou um bom desempenho quando acoplado ao sensor. Essa escolha está associada à menor atenuação da POF de PMMA nessa região espectral, favorecendo maior intensidade óptica transmitida e, consequentemente, maior sensibilidade do sistema. O LED foi operado com ciclo de trabalho (*duty cycle*) de 30%, valor que se mostrou ideal para equilibrar a intensidade luminosa emitida e a resposta do sensor. Ciclos de trabalho excessivamente elevados resultaram em saturação do sistema, enquanto valores muito baixos reduziram a relação sinal-ruído, dificultando a detecção de pequenas variações.

A resposta do sensor foi avaliada em termos de variação relativa de intensidade óptica, expressa em  $\Delta(\text{dB})$ . Esse parâmetro representa a diferença, em decibéis, entre os níveis ópticos medidos nos estados de repouso e de compressão da fibra, constituindo-se na principal métrica para quantificação do desempenho sensorial.



Figura 5.11 – Fonte de luz elaborada no LiTel.

**Fonte:** Autor

### 5.1.3 Calibração e detecção do sensor

A calibração do sensor proposto foi conduzida por meio de dois sistemas experimentais distintos, ambos baseados na aplicação controlada de compressão mecânica. No primeiro sistema, utilizaram-se massas padrão previamente conhecidas, convertidas em valores de força a partir da relação  $F = m \cdot g$ , onde  $g$  representa a aceleração da gravidade local.

Já o segundo sistema consistiu na aplicação de deslocamentos lineares incrementais, obtidos com passo fixo mediante dispositivo de avanço micrométrico, garantindo elevada precisão na imposição da deformação.

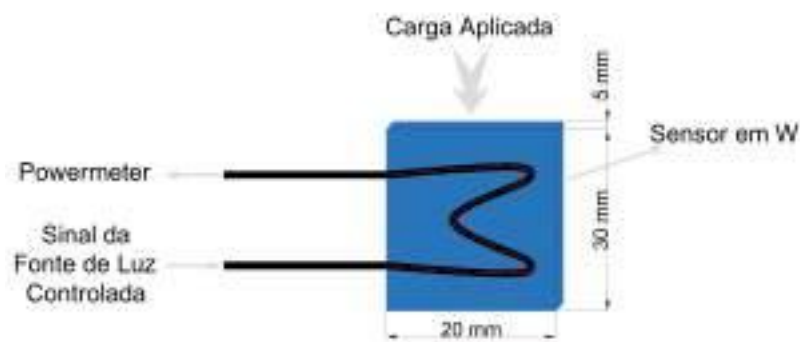


Figura 5.12 – Esquemático do sistema de calibração do sensor.

**Fonte:** Autor

Foram confeccionadas três unidades sensoras idênticas, seguindo o mesmo processo de fabricação e geometria em "W", com o intuito de avaliar dois parâmetros fundamentais:

- **Repetibilidade**, associada à consistência da resposta óptica obtida em ensaios sucessivos de uma mesma unidade;
- **Reprodutibilidade**, relacionada à uniformidade do comportamento entre sensores distintos;

Cada sensor foi submetido ao mesmo protocolo de calibração, registrando-se a variação óptica em decibéis ( $\Delta[\text{dB}]$ ) em função da carga ou do deslocamento aplicado. A análise comparativa das curvas obtidas permitiu verificar a estabilidade do desempenho sensorial, assegurando que a resposta se mantivesse uniforme entre diferentes dispositivos. Essa característica é essencial para viabilizar o uso prático do sensor em aplicações de monitoramento de força e deslocamento em sistemas reais.

## 5.2 Resultados e Discussões

Após a fabricação dos sensores e a definição detalhada de seus princípios de funcionamento e da modelagem óptica, foram conduzidos experimentos sistemáticos para validar a resposta dos dispositivos à aplicação de forças mecânicas. Esta etapa experimental teve como objetivos principais avaliar a linearidade, a sensibilidade e a repetibilidade dos sensores, bem como estabelecer os parâmetros necessários para sua calibração precisa.

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos, incluindo a coleta de dados experimentais, as análises quantitativas realizadas e a discussão dos principais parâmetros obtidos. O enfoque está na calibração dos sensores, nos ensaios de compressão com deslocamentos incrementais e na avaliação espectral das respostas, permitindo uma compreensão aprofundada do comportamento dos sensores sob diferentes condições de carga. Além disso, os dados obtidos servem como base para a interpretação de respostas dinâmicas e para a validação do modelo óptico previamente desenvolvido.

### 5.2.1 Calibração e detecção dos sensores

O primeiro conjunto de experimentos concentrou-se na calibração dos sensores, realizada por meio da aplicação de cargas conhecidas convertidas em força, variando de 0 até aproximadamente 5 N. Para cada nível de carga, registraram-se múltiplas leituras de variação de intensidade óptica em decibéis ( $\Delta[\text{dB}]$ ), permitindo o cálculo de valores médios e desvios-padrão. O objetivo principal desta etapa foi determinar a relação entre a carga aplicada e a variação da intensidade óptica medida em decibéis ( $\Delta[\text{dB}]$ ), fornecendo os parâmetros necessários para a caracterização quantitativa dos sensores.

As Tabelas 5.1 a 5.3 apresentam os valores de referência das cargas aplicadas, os dados experimentais coletados e as correspondentes variações de intensidade óptica observadas nos três sensores desenvolvidos. Já as Figuras 5.13 a 5.15 ilustram as curvas de calibração, permitindo a visualização da resposta dos sensores em função da força aplicada.

A análise dessas curvas possibilita avaliar a linearidade do sensor, identificar faixas de operação com maior sensibilidade e estimar a repetibilidade das medições. Além disso, os dados servem como referência para ajustes futuros nos modelos ópticos e para a comparação com simulações teóricas, consolidando a confiabilidade dos sensores para aplicações em medições de força mecânica.

Tabela 5.1 – Ensaio de Calibração de Sensor 1.

Ref.[dB]	Amostra	Carga [N]	$\Delta$ [dB]		
-28,70	1	0,000	-	0,00	-
	2	0,998	-	0,02	-
	3	1,996	-	0,04	-
	4	2,994	-	0,06	-
	5	3,992	-	0,09	-
	6	4,991	-	0,12	-
-32,23	1	0,000	0,00	0,00	0,00
	2	0,998	0,03	0,03	0,02
	3	1,996	0,07	0,07	0,07
	4	2,996	0,11	0,12	0,08
	5	3,992	0,16	0,18	0,11
	6	4,991	0,17	0,20	0,20
-32,05	1	0,000	0,00	0,00	-
	2	0,998	0,02	0,02	-
	3	1,996	0,07	0,06	-
	4	2,994	0,10	0,08	-
	5	3,992	0,14	0,15	-
	6	4,991	0,19	0,18	-
-32,05	1	0,000	0,00	0,00	-
	2	0,998	0,04	0,03	-
	3	1,996	0,06	0,08	-
	4	2,994	0,08	0,16	-
	5	3,992	0,12	0,19	-
	6	4,991	0,14	0,27	-

**Fonte:** Autor



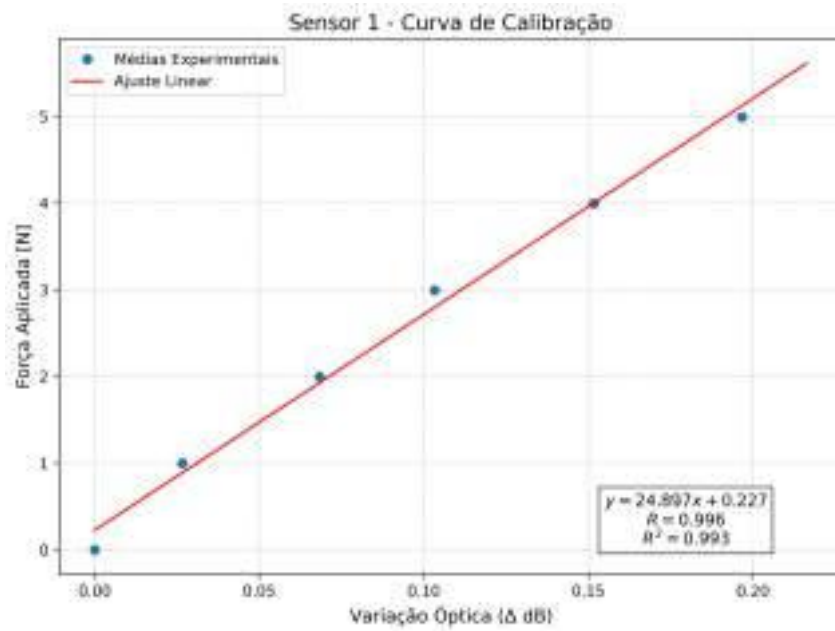


Figura 5.13 – Curva de calibração do sensor 1

Fonte: Autor

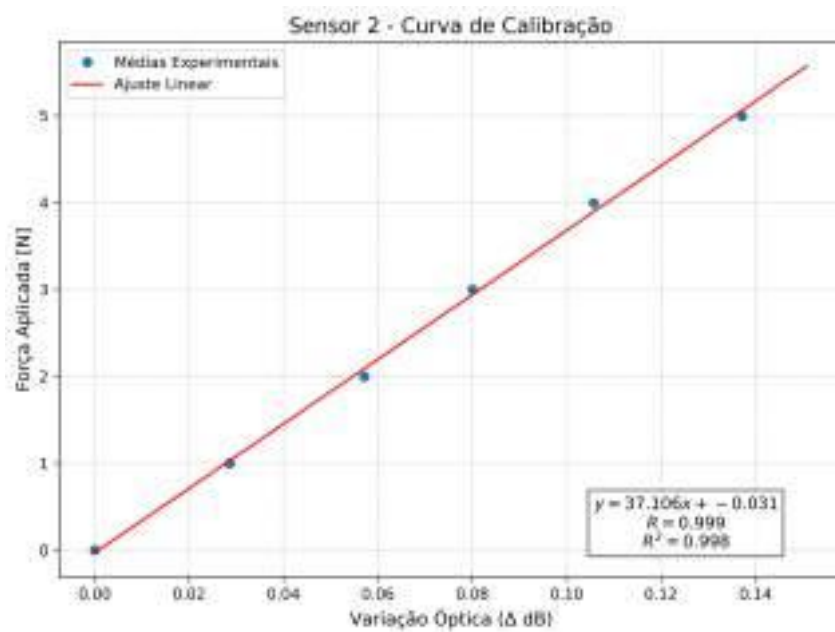


Figura 5.14 – Curva de calibração do sensor 2

Fonte: Autor

Tabela 5.2 – Ensaio de Calibração de Sensor 2.

Ref.[dB]	Amostra	Carga [N]	$\Delta$ [dB]		
-41,64	1	0,000	0,00	0,00	-
	2	0,998	0,03	0,03	-
	3	1,996	0,07	0,05	-
	4	2,994	0,10	0,07	-
	5	3,992	0,13	0,09	-
	6	4,991	0,15	0,12	-
-40,27	1	0,000	-	0,00	-
	2	0,998	-	0,03	-
	3	1,996	-	0,05	-
	4	2,994	-	0,07	-
	5	3,992	-	0,12	-
	6	4,991	-	0,16	-
-40,24	1	0,000	-	0,00	-
	2	0,998	-	0,02	-
	3	1,996	-	0,06	-
	4	2,994	-	0,08	-
	5	3,992	-	0,12	-
	6	4,991	-	0,18	-
-40,28	1	0,000	0,00	0,00	0,00
	2	0,998	0,02	0,04	0,03
	3	1,996	0,04	0,05	0,06
	4	2,994	0,05	0,08	0,08
	5	3,992	0,07	0,10	0,11
	6	4,991	0,10	0,12	0,13

Fonte: Autor

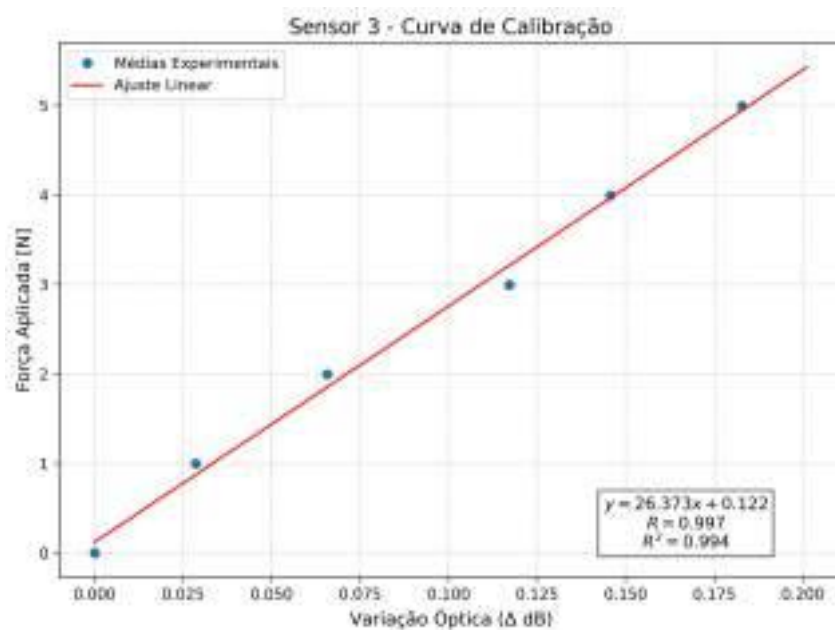


Figura 5.15 – Curva de calibração do sensor 3

Fonte: Autor

Tabela 5.3 – Ensaio de Calibração de Sensor 3.

Ref.[dB]	Amostra	Carga [N]	$\Delta$ [dB]		
-48,63	1	0,000	0,00	0,00	-
	2	0,998	0,02	0,05	-
	3	1,996	0,06	0,07	-
	4	2,994	0,10	0,12	-
	5	3,992	0,13	0,14	-
	6	4,991	0,19	0,16	-
-40,37	1	0,000	-	0,00	-
	2	0,998	-	0,03	-
	3	1,996	-	0,06	-
	4	2,994	-	0,12	-
	5	3,992	-	0,16	-
	6	4,991	-	0,20	-
-48,63	1	0,000	-	0,00	-
	2	0,998	-	0,02	-
	3	1,996	-	0,05	-
	4	2,994	-	0,10	-
	5	3,992	-	0,12	-
	6	4,991	-	0,16	-
-48,59	1	0,000	0,00	0,00	-
	2	0,998	0,03	0,03	-
	3	1,996	0,08	0,06	-
	4	2,994	0,15	0,10	-
	5	3,992	0,17	0,12	-
	6	4,991	0,20	0,15	-
-48,52	1	0,000	-	0,00	-
	2	0,998	-	0,02	-
	3	1,996	-	0,08	-
	4	2,994	-	0,13	-
	5	3,992	-	0,18	-
	6	4,991	-	0,22	-

Fonte: Autor

A análise das curvas de calibração revela um comportamento linear bem definido para os três sensores, sem desvios abruptos ou respostas anômalas, o que indica estabilidade operacional e boa reprodutibilidade do processo de fabricação. A consistência entre os dispositivos, tanto na forma das curvas quanto na magnitude das variações de intensidade óptica, reforça a confiabilidade dos sensores para medições precisas de força.

Para quantificar a precisão da calibração, foram aplicados métodos estatísticos utilizando as bibliotecas *scikit-learn*, *pylab* e *NumPy*.

O ajuste linear realizado para cada sensor teve a forma:

$$\Delta[\text{dB}] = S \cdot F + b \quad (5.1)$$

Onde:

- $S$  representa a sensibilidade em dB/N;
- $b$  o intercepto óptico;

Os coeficientes de correlação e de determinação obtidos,  $R \approx 0,98$  e  $R^2 \approx 0,96$ , respectivamente, evidenciam uma forte relação linear entre a força aplicada e a resposta óptica, confirmando a adequação do modelo linear adotado.

A faixa linear efetiva dos sensores, correspondente à região em que a resposta óptica varia proporcionalmente à força aplicada, foi determinada a partir das curvas de calibração. Dentro desta faixa, a sensibilidade média dos sensores foi estimada, permitindo avaliar a resolução mínima de detecção de força.

Embora os resultados sejam bastante consistentes, pequenas variações observadas podem ser atribuídas a fatores experimentais, como posicionamento das massas, alinhamento da fibra óptica, interferências externas na intensidade óptica ou limitações do sistema de aquisição de dados. A compreensão desses possíveis fatores de erro é essencial para a interpretação adequada dos resultados e para o aprimoramento de futuras implementações dos sensores.

#### 5.2.1.1 Ensaio de compressão com deslocamentos incrementais

Além da calibração por massas, realizou-se um ensaio de compressão com deslocamentos controlados. O deslocamento  $\delta$  foi aplicado em passos milimétricos, registrando-se  $\Delta[\text{dB}]$  em cada incremento. Essa metodologia permitiu avaliar:

- **Linearidade** da resposta óptica em função da deformação mecânica;
- **Repetibilidade**, por meio de ciclos sucessivos de carga e descarga;

A Tabela 5.4, demonstra os valores obtidos com o passo incremental e a Figura 5.16 ilustra o resultado típico de um ensaio, com deslocamento progressivo até o limite mecânico do dispositivo. Nota-se boa estabilidade, baixa dispersão e histerese mínima. A sensibilidade obtida neste ensaio foi consistente com os valores extraídos das curvas de calibração, reforçando a confiabilidade do processo de fabricação.

Tabela 5.4 – Ensaio de Compressão do sensor.

Ref.[dB]	Amostra	Deslocamento [mm]	$\Delta$ [dB]	Carga [N]
-35,98	1	0	0,00	0,00
	2	1	0,02	4,87
	3	2	0,08	103,60
	4	3	0,11	132,45
	5	4	0,22	166,97
	6	5	0,26	177,53

**Fonte:** Autor

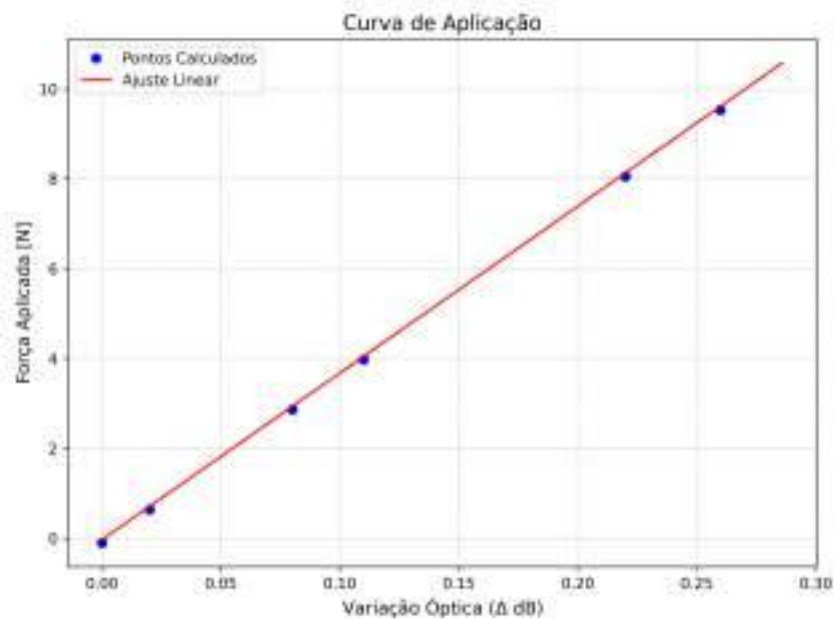


Figura 5.16 – Ensaio de compressão

**Fonte:** Autor

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento, a caracterização experimental e a análise de desempenho de sensores ópticos baseados em fibra óptica plástica (POF) destinados à medição de força mecânica. Inicialmente, foram delineados os procedimentos de fabricação do sensor, incluindo o processo de corte, conformação geométrica e técnicas de acoplamento óptico entre a fonte de luz e a fibra. Em seguida, foram conduzidos dois grupos de experimentos: (i) calibração estática, fundamentada na aplicação controlada de massas padronizadas, e (ii) ensaios de compressão incremental, nos quais a força aplicada é aumentada de forma contínua e controlada. Esses ensaios permitiram avaliar o comportamento óptico do sensor diante de diferentes condições de carregamento, fornecendo indicadores quantitativos de desempenho, tais como linearidade, sensibilidade e repetibilidade.

Os sensores desenvolvidos demonstraram desempenho compatível com o esperado para dispositivos de instrumentação baseados em fibra óptica, apresentando:

- Comportamento linear na faixa de aplicação de força entre 0–5 N;
- Sensibilidade adequada à detecção de pequenas variações de carga, mesmo em baixos níveis de deformação;
- Reprodutibilidade entre diferentes dispositivos fabricados, evidenciando consistência do processo de manufatura;
- Fontes de erro residuais associadas principalmente ao alinhamento da fibra, à estabilidade da fonte luminosa e à dispersão das medidas.

A análise quantitativa mostrou que a resposta óptica do sensor segue uma clara relação linear entre a força aplicada e a variação da intensidade óptica medida em decibéis ( $\Delta$  [dB]). O coeficiente de correlação médio obtido foi da ordem de  $R \approx 0,98$ , enquanto o coeficiente de determinação apresentou valores próximos a  $R^2 \approx 0,96$ . Esses resultados comprovam a forte dependência entre a variável de interesse (força aplicada) e o parâmetro óptico monitorado. A sensibilidade média do sistema confirmou a capacidade de detectar pequenas variações de carga, sendo limitada essencialmente pelo nível de ruído intrínseco do sistema óptico e por pequenas variações geométricas decorrentes do processo experimental.

Além da calibração estática, os ensaios de compressão incremental permitiram avaliar parâmetros associados à robustez do sensor, tais como histerese, repetibilidade e estabilidade em ciclos de carga e descarga. Os resultados demonstraram baixa histerese e boa concordância entre os ciclos experimentais, reforçando a confiabilidade operacional do dispositivo. A comparação entre diferentes sensores produzidos evidenciou variação

reduzida entre as respostas individuais, indicando boa reprodutibilidade e viabilidade de fabricação em série.

As principais contribuições deste trabalho podem ser sintetizadas da seguinte forma:

- Validação experimental do uso de sensores baseados em POF para medição de força mecânica, demonstrando potencial de aplicação em instrumentação;
- Desenvolvimento e consolidação de um protocolo de calibração combinando testes estáticos e compressão incremental, permitindo obtenção de parâmetros quantitativos de sensibilidade e linearidade;
- Identificação e análise dos fatores que influenciam a exatidão das medições, especialmente alinhamento da fibra, estabilidade da fonte luminosa e condições de acoplamento óptico.

Como trabalhos futuros, recomenda-se:

- Aperfeiçoar o encapsulamento mecânico e a geometria da fibra, com o objetivo de aumentar a sensibilidade e minimizar ruídos externos;
- Investigar o comportamento dinâmico do sensor em situações de carregamento rápido ou em regimes oscilatórios;
- Integrar o sensor a sistemas de aquisição em tempo real, possibilitando sua aplicação em robótica, monitoramento estrutural e instrumentação.
- Investigar aplicações do sensor para outras áreas.

Em síntese, conclui-se que o sensor óptico desenvolvido com fibra óptica plástica representa uma solução promissora para medições de força mecânica. A combinação de baixo custo, simplicidade construtiva, facilidade de integração e desempenho satisfatório justifica sua aplicação em sistemas de instrumentação óptica e abre caminho para novas pesquisas envolvendo aprimoramento geométrico, otimização de acoplamento óptico e automação dos processos de medição.

## REFERÊNCIAS

- 1 Alberto Alonso Romero, Koffi Novignon Amouzou, Dipankar Sengupta, Camila Aparecida Zimmermann, Andréane Richard-Denis, Jean-Marc Mac-Thiong, Yvan Petit, Jean-Marc Lina, and Bora Ung. Optoelectronic pressure sensor based on the bending loss of plastic optical fibers embedded in stretchable polydimethylsiloxane. *Sensors*, 23(6):3322, 2023. doi: 10.3390/s23063322. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/6/3322>.
- 2 Francesco Arcadio, Luigi Zeni, and Nunzio Cennamo. Exploiting plasmonic phenomena in polymer optical fibers to realize a force sensor. *Sensors*, 22(6):2391, 2022. doi: 10.3390/s22062391.
- 3 Ariadny da Silva Arcas. Nanobiossensor a fibra óptica revestido com filme fino de ouro para detecção da bactéria escherichia coli. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE – Programa de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2017. URL <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/3274>.
- 4 Lúcia Bilro, Nélia Alberto, João L. Pinto, and Rogério Nogueira. Optical sensors based on plastic fibers. *Sensors*, 12(9):12184–12207, 2012. doi: 10.3390/s120912184. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/12/9/12184>.
- 5 José Luis Cano Perez, Jaime Gutiérrez-Gutiérrez, Christian Perezcampos Mayoral, Eduardo L. Pérez-Campos, Maria del Socorro Pina Canseco, Lorenzo Tepech Carrillo, Laura Pérez-Campos Mayoral, Marciano Vargas Treviño, Edmundo López Apreza, and Roberto Rojas Laguna. Fiber optic sensors: A review for glucose measurement. *Biosensors*, 11(3):61, 2021. doi: 10.3390/bios11030061.
- 6 Pedro Henrique Souza Coelli, João Vitor de Castro Nascimento, Thales Alves Curty, Deivid Edson Delarota Campos, and Alexandre Bessa dos Santos. Development of pof sensors for intelligent control in robotic applications. 2025.
- 7 Confúcio. *Os Analectos*. Editora Unesp, São Paulo, 2012. ISBN 9788539302277. Tradução bilíngue chinês-português. Capítulo II, versículo 17. “Saber aquilo que se sabe e saber aquilo que não se sabe — isto é a sabedoria.”
- 8 William dos Santos Fegadolli, José Edimar Barbosa Oliveira, and Vilson Rosa d Almeida. Sensor de deformações à fibra Óptica. *Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA*, 2021. URL <https://www.ita.br>.
- 9 Qian-Qian Ge, Ting Zhou, Tian-Yi Gong, Ying Liang, Looh Augustine Ngiejungbwen, and Ming-Yang Chen. Highly sensitive measurement of finger joint angle based on a double-u tapered pof embedded in pdms film. *Optical Fiber Technology*, 76:103236, 2023. doi: 10.1016/j.yofte.2023.103236.
- 10 A. K. Ghatak and K. Thyagarajan. *Introduction to Fiber Optics*. Cambridge University Press, 2013. ISBN 9788175960626.
- 11 Annasamy Gowri, Allwyn S. Rajamani, Bandaru Ramakrishna, and V.V.R. Sai. U-bent plastic optical fiber probes as refractive index based fat sensor for milk quality monitoring. *Optical Fiber Technology*, 47:15–20, 2019. doi: 10.1016/j.yofte.2018.11.019.



- 12 K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt. Optical Fiber Sensor Technology: Fundamentals. Springer, 2010. ISBN 9781441949837.
- 13 Eugene Hecht. Optics. Pearson Education, 2017. ISBN 9780133977226.
- 14 Arnaldo Leal-Junior, Guilherme Lopes, Leandro Munhoz Avellar, Anselmo Frizera, and C. Marques. Temperature-insensitive water content estimation in oil-water emulsion using pof sensors. Optical Fiber Technology, 76:103240, 2023. doi: 10.1016/j.yofte.2023.103240.
- 15 Hyun-Woo Lee, Dae-Hyun Kim, and Sangwoo Shin. Low-cost angle sensor for robotics applications using plastic optical fiber based on optical loss mechanism. Biomimetics, 8(8):567, 2023. doi: 10.3390/biomimetics8080567. URL <https://www.mdpi.com/2313-7673/8/8/567>.
- 16 Jie Li, Bin Liu, Yingying Hu, Juan Liu, Xing-Dao He, Jinhui Yuan, and Qiang Wu. Plastic optical fiber enabled smart glove for machine learning-based gesture recognition. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 71(4):4252–4261, 2024. doi: 10.1109/TIE.2023.3277119.
- 17 Jinke Li, Shiru Jiang, Stuart Aberdeen, and Sang-Shin Lee. Highly efficient refractive index sensor based on a dual-side polished sms fiber enabled by femtosecond laser writing. Sensors, 23(7):3651, 2023. doi: 10.3390/s23073651.
- 18 Sascha Liehr. Polymer optical fiber sensors in structural health monitoring. In New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring, volume 96 of Lecture Notes in Electrical Engineering, pages 297–333. Springer, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-21099-0\_13.
- 19 Guanxiu Liu and Dejun Feng. Evanescent wave analysis and experimental realization of refractive index sensor based on d-shaped plastic optical fiber. Optik, 127(2): 690–693, 2016. doi: 10.1016/j.ijleo.2015.10.129.
- 20 Finna Alivia Nabila, Isa Anshori, Gilang Gumilar, and Robeth Viktoria Manurung. Preliminary study on development of d-shape polymer optical fiber-based spr sensor for biochemical applications. In 2024 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET), pages 7–13, 2024. doi: 10.1109/ICRAMET62801.2024.10809179.
- 21 Andreas Othonos and Kyriacos Kalli. Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications. Artech House, 1999. ISBN 9780890063446.
- 22 P. Polishuk. Plastic optical fibers branch out. IEEE Communications Magazine, 44(2):140–148, 2006. doi: 10.1109/MCOM.2006.1705991.
- 23 P. P. Pramod and R. Pradeep. Recent developments in plastic optical fiber based wearable sensors. In 2023 International Conference on Control, Communication and Computing (ICCC), pages 1–6, 2023. doi: 10.1109/ICCC57789.2023.10164940.
- 24 Andressa Rezende, Camille Alves, Isabela Marques, Marco Aurélio Silva, and Eduardo Naves. Polymer optical fiber goniometer: A new portable, low cost and reliable sensor for joint analysis. Sensors, 18(12):4293, 2018. doi: 10.3390/s18124293.

- 25 Amanda Romeiro, Victor Cardoso, Marcos Souza, Paulo Caldas, Maria Giraldi, Orlando Frazão, José Santos, and João Costa. Coil-shaped optical fiber sensor for compression measurements. EPJ Web of Conferences, 305, 2024. doi: 10.1051/epjconf/202430500003.
- 26 Hasnida Saad, Mohd Tarmizi Ali, and M. Kamil Abd Rahman. High sensitivity optical pof sensor for detecting low ethanol concentration in water. Advanced Materials Research, 1107:693–698, 2015. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1107.693.
- 27 Sahar Safarloo, Arántzazu Núñez-Cascajero, Ruben Sanchez-Gomez, and Carmen Vázquez. Polymer optical fiber plantar pressure sensors: Design and validation. Sensors, 22(10):3883, 2022. doi: 10.3390/s22103883.
- 28 Bahaa E. A. Saleh and Malvin C. Teich. Fundamentals of Photonics. Wiley, 2019. ISBN 9781119506874.
- 29 John M. Senior and M. Y. Jamro. Optical Fiber Communications: Principles and Practice. Pearson Education, 2009. ISBN 9780130326812.
- 30 Ayodele O. Soge. Polymer optical fibre temperature sensors – a review. Asian Journal of Research and Reviews in Physics, 3(3):19–37, 2020. doi: 10.9734/ajr2p/2020/v3i330121.
- 31 T.Z.N. Sokkar, W.A. Ramadan, M.A. Shams El-Din, H.H. Wahba, and S.S. Aboleneen. Bent induced refractive index profile variation and mode field distribution of step-index multimode optical fiber. Optics and Lasers in Engineering, 53:133–141, 2014. doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.09.002.
- 32 Chuanxin Teng, Maosen Li, Yu Cheng, Hao Peng, Shijie Deng, Hongchang Deng, Libo Yuan, and Ming Chen. Investigation of u-shape tapered plastic optical fibers based surface plasmon resonance sensor for ri sensing. Optik, 251:168461, 2022. doi: 10.1016/j.ijleo.2021.168461.
- 33 Chuanxin Teng, Rui Min, Jie Zheng, Shijie Deng, Maosen Li, Li Hou, and Libo Yuan. Intensity-modulated polymer optical fiber-based refractive index sensor: A review. Sensors, 22(1):81, 2022. doi: 10.3390/s22010081.
- 34 Chuanxin Teng, Peng Shao, Shiwei Li, Shu Li, Houquan Liu, Hongchang Deng, Ming Chen, Libo Yuan, and Shijie Deng. Double-side polished u-shape plastic optical fiber based spr sensor for the simultaneous measurement of refractive index and temperature. Optics Communications, 525:128844, 2022. doi: 10.1016/j.optcom.2022.128844.
- 35 Chuanxin Teng, Shiyuan Ying, Rui Min, Shijie Deng, Hongchang Deng, Ming Chen, Xiaoxue Chu, Libo Yuan, Yu Cheng, and Minmin Xue. Side-polish plastic optical fiber based spr sensor for refractive index and liquid-level sensing. Sensors, 22(16):6241, 2022. doi: 10.3390/s22166241.
- 36 Eric Udd. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. Wiley-Interscience, 2006. ISBN 9780470068106.
- 37 Eric Udd and William B. Spillman Jr. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. Wiley, 2024. ISBN 9781119678892.

- 38 Shumin Wang, Daming Zhang, Yan Xu, Siwen Sun, and Xiaoqiang Sun. Refractive index sensor based on double side-polished u-shaped plastic optical fiber. Sensors, 20(18):5253, 2020. doi: 10.3390/s20185253.
- 39 Yu-Lin Wang, Bin Liu, Yi-Neng Pang, Juan Liu, Jiu-Lin Shi, Sheng-Peng Wan, Xing-Dao He, Jinhui Yuan, and Qiang Wu. Low-cost wearable sensor based on a d-shaped plastic optical fiber for respiration monitoring. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70:1–8, 2021. doi: 10.1109/TIM.2021.3075033.
- 40 Marcelo M. Werneck and R. C. S. B. Allil. Plastic Optical Fiber Sensors. CRC Press, 2019. ISBN 9781138298538. doi: 10.1201/b22357.
- 41 Hang-Zhou Yang, Xue-Guang Qiao, M. Mahmood Ali, Md. Rajibul Islam, and Kok-Sing Lim. Optimized tapered optical fiber for ethanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) concentration sensing. Journal of Lightwave Technology, 32(9):1777–1783, 2014. doi: 10.1109/JLT.2014.2311175.
- 42 Youkui Zhang, Mingda Zhao, Haiwei Zhang, Zhihong Chen, and Lifang Xue. Plastic optical fiber tapered sensor for breathing sensing. In 2023 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), pages 95–99, 2023. doi: 10.1109/ICMA57826.2023.10215944.
- 43 Joseba Zubia and Jon Arrue. Plastic optical fibers: An introduction to their technological processes and applications. Optical Fiber Technology, 7(2):101–140, 2001. doi: 10.1006/ofte.2000.0355.

## APÊNDICE A – Artigo - Desenvolvimento de Sensores POF para Controle Inteligente em Aplicações Robóticas

### Desenvolvimento de Sensores POF para Controle Inteligente em Aplicações Robóticas<sup>\*</sup>

Pedro Henrique Souza Coelli<sup>\*,\*\*</sup> João Vitor de Castro Nascimento<sup>\*\*</sup>  
Thales Alves Curty<sup>\*,\*\*</sup> Delvíd Edson Delarota Campos<sup>\*\*\*,\*\*</sup>  
Alexandre Bessa dos Santos<sup>\*,\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPEE),  
Universidade Federal de Juiz de Fora, MG.

<sup>\*\*</sup> Laboratório de Instrumentação e Telemetria (LITel), Universidade  
Federal de Juiz de Fora, MG.

<sup>\*\*\*</sup> Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional,  
Universidade Federal de Juiz de Fora, MG.

(e-mails: pedro.coelli@estudante.ufjf.br,  
joaocastro.nascimento@estudante.ufjf.br,  
thales.curty@estudante.ufjf.br, delarota.denad@gmail.com,  
alexandre.bessa@ufjf.br).

**Abstract:** This article addresses the application of plastic optical fiber (POF) sensors in industrial processes, specifically for measuring force in robotic arms. The study proposes the development of a "W"-shaped sensor capable of detecting small force variations, focusing on its use in pinch movements while considering the material's force limit. The methodology covers sensor manufacturing, principles of reflection-based detection, and calibration systems, with experimental tests demonstrating the device's repeatability and reproducibility. The results showed high sensitivity to minor variations, emphasizing the sensor's precision and efficiency in industrial applications and its potential in fields such as physiotherapy and traumatology.

**Resumo:** O artigo aborda a aplicação de sensores de fibra óptica plástica (do inglês *Plastic Optical Fiber*) (POF) em processos industriais, especificamente para medição de força em braços robóticos. A proposta inclui o desenvolvimento de um sensor em formato de "W", capaz de detectar pequenas variações de força, com aplicação em movimentos de pinça, levando em consideração o limite de força suportado pelo material. A metodologia explora a fabricação do sensor, princípios de detecção por reflexão e sistemas de calibração, com testes experimentais que comprovaram a repetibilidade e reprodutibilidade do dispositivo. Os resultados demonstraram alta sensibilidade a pequenas variações, destacando a precisão e eficiência do sensor em aplicações industriais e potencial em áreas como fisioterapia e traumatologia.

**Keywords:** Optical sensors; plastic optical fiber; industrial robotics; sensor calibration; compression force.

**Palavras-chaves:** Sensores ópticos; fibra óptica plástica; robótica industrial; calibração de sensores; força de compressão.

#### 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço das tecnologias, a implementação de empresas 4.0 e a automatização de processos industriais, diversos equipamentos têm se tornado cada vez mais precisos e monitorados, com o objetivo de reduzir falhas Oliveira et al. (2024). Nesse contexto, uma das tecnologias mais aplicadas nos processos industriais são os braços robóticos. Esses sensores têm como finalidade garantir a integridade estrutural e fornecer os controles necessários para que os

braços robóticos realizem adequadamente as atividades a eles atribuídas Tan et al. (2024).

A maioria dos braços robóticos, além de serem controlados por CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) e/ou sistemas de controle, apresenta limitações associadas à abertura da garrã/mão, à extensão máxima dos componentes e à força máxima aplicada no movimento de pinça para manipular objetos. Tais restrições físicas são consideradas desde a fase de projeto até a implementação desses sistemas em linhas de produção Heimann and Guhl (2020). Como resposta a essas limitações, muitos desses equipamentos utilizam diferentes estratégias de calibração, como mencionado em Dehghani et al. (2023); Endröse et al. (2022), as quais envolvem sistemas de controle operando em malha aberta e/ou fechada.

<sup>\*</sup> Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação e Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), e Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE) pelo seu apoio técnico/financeiro.

Aqui,  $\lambda$  representa o comprimento de onda no vácuo, e  $\theta$  é o ângulo incidente na interface entre o núcleo e o revestimento externo. Em configurações com curvaturas acentuadas (macro-dobras), há perdas significativas nos modos de propagação, o que torna o sistema mais sensível a variações externas. Essa abordagem é amplamente utilizada para detecção de índices de refração em ambientes químicos e ambientais, bem como para medição de deformações mecânicas. No presente sensor, a compressão da fibra leva a uma aproximação do ângulo de incidência ao ângulo crítico, promovendo a atenuação do sinal luminoso transmitido, caracterizando o princípio de operação do dispositivo.

### 2.3 Método para detecção de compressão

Para detectar a compressão do sensor e medir o movimento de pinça em braços ou garras robóticas, foi implementado o sistema calibração do sensor, ilustrado na Figura 3.

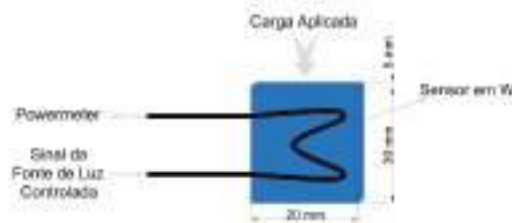


Figura 3. Esquemático do sistema de calibração do sensor em W.

Três sensores com estrutura idêntica à da Figura 1 foram fabricados, visando avaliar a repetibilidade e reprodutibilidade do sistema. Cada sensor foi submetido ao mesmo protocolo de calibração, utilizando uma massa conhecida como carga aplicada. A variação de sinal óptico foi registrada para verificar se o comportamento da resposta permanecia semelhante entre as unidades.

### 2.4 Sinal da fonte de luz controlada

Como em qualquer sistema óptico, a implementação de uma fonte de luz estável é essencial para a operação adequada. Foi desenvolvida, no Laboratório de Instrumentação e Telemetria (LITEL) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), uma fonte de luz de baixo custo, com LEDs selecionáveis cobrindo o espectro da luz visível, conforme ilustrado na Figura 4.

Foi utilizado um LED vermelho, operando na faixa de 620-750 nm, com ciclo de trabalho (*duty cycle*) de 30%, o qual apresentou melhora desempenho no sensor. Valores muito altos de ciclo de trabalho saturam o sistema, enquanto valores muito baixos reduzem a sensibilidade,



Figura 4. Low-cost light source developed at LITEL.

difficultando a identificação de pequenas variações de sinal, expressas em  $\Delta(dB)$  — que representa a diferença de intensidade óptica medida em decibéis entre os estados de compressão e repouso da fibra.

### 2.5 Ensaio aplicado a mão robótica

Após a calibração, foi conduzido o ensaio experimental utilizando uma mão robótica para a execução do movimento de pinça. O deslocamento foi aplicado de forma incremental, com um passo de 1 mm, garantindo a precisão do movimento e permitindo a aquisição de dados consistentes ao longo do experimento. A progressão do deslocamento foi rigorosamente controlada para assegurar a repetibilidade das medições, proporcionando uma base confiável para a análise da força exercida durante o movimento de pinça.



Figura 5. Ensaio aplicado a mão robótica.

O sensor selecionado para esse ensaio foi o Sensor 2, cuja escolha baseou-se nos resultados da calibração (Seção 3). Este apresentou um elevado coeficiente de correlação e resposta linear estável à carga aplicada, além de demonstrar boa robustez estrutural e alta sensibilidade a pequenas variações de força. Tais características são cruciais para medições precisas no contexto do movimento de pinça, que exige alto grau de controle e detecção.

Por meio de sensores baseados em fibra óptica, é possível definir limites mínimos e máximos de operação, garantindo a integridade do equipamento. Um exemplo disso é o sensor desenvolvido para medir o ângulo de articulação dos dedos, apresentado em Ge et al. (2023), assim como o sensor goníométrico utilizado para medir o ângulo de articulações, descrito em Rezende et al. (2018).

Neste artigo, é proposto um sensor baseado em fibra óptica plástica (POF), capaz de detectar pequenas variações de força utilizando uma geometria com três curvas em formato de "U", formando uma estrutura semelhante à letra "W". A proposta visa sua aplicação na medição da força do movimento de pinça executado por braços robóticos, considerando os limites máximos de força que as peças podem suportar. Este estudo pode contribuir não apenas para sistemas robóticos e mecânicos, mas também para áreas como traumatologia e fisioterapia, oferecendo uma alternativa de baixo custo para a análise de pequenas variações.

Este documento está organizado da seguinte forma: na Seção 2, são apresentadas a metodologia empregada na elaboração do sensor e os modelos de calibração utilizados. Na Seção 3, são discutidos os resultados obtidos com o sistema de calibração e os dados registrados nos ensaios. Por fim, a Seção 4 apresenta as conclusões baseadas nos resultados da pesquisa.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Como discutido em Teng et al. (2022), o autor apresenta diversos métodos de processamento da fibra óptica plástica (POF) para aumentar sua sensibilidade. A POF opera de forma semelhante às fibras ópticas de sílica (para ou dopada) e às de vidro composto, mantendo comportamento análogo em relação à curvatura, reflexão e modos de operação (monomodo e multimodo).

### 2.1 Estrutura e fabricação da unidade de detecção

Estudos apresentados em Ge et al. (2023) demonstraram um aumento significativo na sensibilidade do sensor ao se implementar duas curvaturas em "U", com raios distintos, em sua estrutura. Essa modificação permitiu uma melhor detecção da angulação dos dedos. Com base nessa abordagem, o sensor proposto neste trabalho adota uma geometria com três curvaturas em "U", formando uma estrutura semelhante à letra "W", com raios de curvatura iguais ( $r = 1,5 \text{ mm}$ ), conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2.

Durante a fabricação, foi desenvolvido um molde em resina transparente (Figura 1), no qual a POF foi inserida. Para a definição da geometria, aplicou-se calor sobre o molde com o auxílio de um soprador térmico, seguido do resfriamento e da remoção da fibra. Em testes preliminares, observou-se que a fibra, em seu estado bruto, não apresentava resistência mecânica e superfície adequadas para detectar deformações com precisão. Por esse motivo, foi utilizada uma camada de borracha de silicone ao redor da POF, devido às suas propriedades de resistência mecânica, elasticidade e estabilidade estrutural. Essa modificação aumentou a área de detecção e, consequentemente, a sensibilidade do sensor a pequenas variações, como ilustrado na Figura 2.

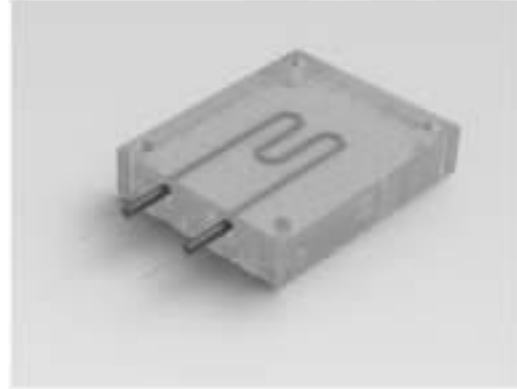


Figura 1. Ilustração do molde para fabricação do sensor em W.

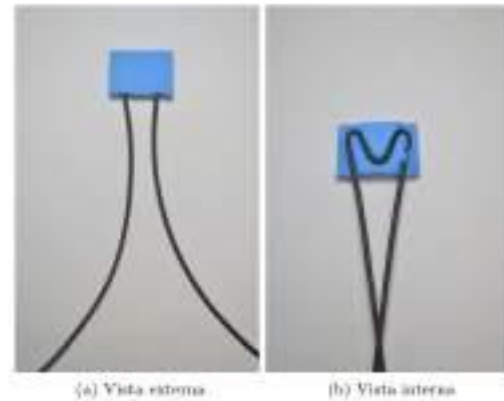


Figura 2. Sensor em W confeccionado.

### 2.2 Princípio da unidade de detecção por reflexão

Sensores baseados em POF com estrutura de curvatura utilizam a modulação da intensidade luminosa causada pela dobra da fibra como princípio de detecção. Neste contexto, considera-se o ângulo crítico de reflexão da luz, representado por  $\theta_c$ :

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_{cl}}{n_{co}} \right) \quad (1)$$

Onde  $n_{co}$  e  $n_{cl}$  representam os índices de refração do núcleo e do revestimento externo da fibra, respectivamente. O processo de dobra altera o perfil do índice de refração e a distribuição luminosa interna da fibra, aumentando sua sensibilidade, conforme expresso por  $d_p$ :

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_{co}^2 \sin^2 \theta - n_{cl}^2}} \quad (2)$$



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma vez descritos todos os aparatos, desde a fabricação até os princípios matemáticos, foram realizados experimentos para caracterizar o comportamento do sensor sob aplicação de força. Na sequência, são apresentados os dados coletados e as respectivas curvas de calibração.

#### 3.1. Calibração dos sensores

Para cada sensor, foram analisadas as variações de referência  $\Delta$ [dB], armazenadas em tabelas e utilizadas para a geração das curvas de calibração correspondentes.

Tabela 1. Ensaio de Calibração de Sensor 1.

Ref.[dB]	Amostra	Carga [N]	$\Delta$ [dB]		
-25,70	1	0,000	-	0,00	-
	2	0,998	-	0,03	-
	3	1,990	-	0,04	-
	4	2,994	-	0,06	-
	5	3,992	-	0,10	-
	6	4,991	-	0,12	-
-31,33	1	0,000	0,00	0,00	0,00
	2	0,998	0,03	0,03	0,02
	3	1,990	0,07	0,07	0,07
	4	2,990	0,11	0,12	0,08
	5	3,992	0,10	0,18	0,11
	6	4,991	0,17	0,20	0,20
-32,05	1	0,000	0,00	0,00	-
	2	0,998	0,02	0,02	-
	3	1,990	0,07	0,06	-
	4	2,994	0,10	0,08	-
	5	3,992	0,14	0,15	-
	6	4,991	0,19	0,18	-
-32,05	1	0,000	0,00	0,00	-
	2	0,998	0,04	0,03	-
	3	1,990	0,00	0,08	-
	4	2,994	0,08	0,18	-
	5	3,992	0,12	0,19	-
	6	4,991	0,14	0,27	-

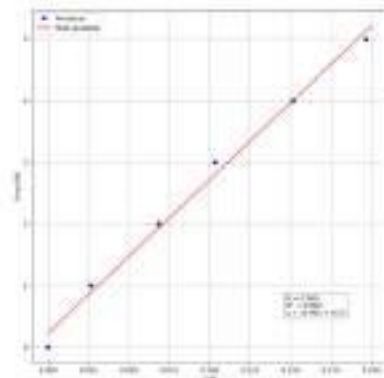


Figura 6. Curva de calibração do sensor 1.

Os sensores desenvolvidos foram submetidos a um processo de calibração para verificar sua resposta à aplicação de

Tabela 2. Ensaio de Calibração de Sensor 2.

Ref.[dB]	Amostra	Carga [N]	$\Delta$ [dB]		
-41,64	1	0,000	0,00	0,00	-
	2	0,998	0,03	0,03	-
	3	1,990	0,07	0,05	-
	4	2,994	0,10	0,07	-
	5	3,992	0,13	0,09	-
	6	4,991	0,15	0,12	-
-40,27	1	0,000	-	0,00	-
	2	0,998	-	0,03	-
	3	1,990	-	0,05	-
	4	2,994	-	0,07	-
	5	3,992	-	0,12	-
	6	4,991	-	0,16	-
-40,24	1	0,000	-	0,00	-
	2	0,998	-	0,02	-
	3	1,990	-	0,06	-
	4	2,994	-	0,08	-
	5	3,992	-	0,12	-
	6	4,991	-	0,18	-
-40,28	1	0,000	0,00	0,00	0,00
	2	0,998	0,02	0,04	0,03
	3	1,990	0,04	0,05	0,05
	4	2,994	0,05	0,08	0,08
	5	3,992	0,07	0,10	0,11
	6	4,991	0,10	0,12	0,13

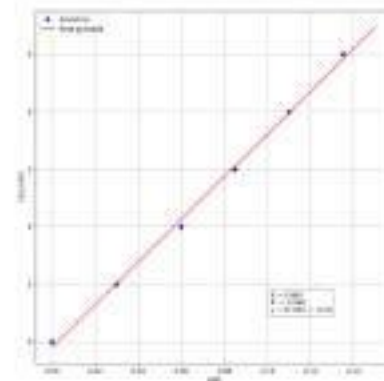


Figura 7. Curva de calibração do sensor 2.

carga. Primeiramente, os valores de variação  $\Delta$ [dB] foram registrados (Tabelas 1-3) e, posteriormente, as curvas de calibração foram geradas (Figuras 6-8). A análise dessas curvas evidenciou um comportamento linear, sem discrepâncias significativas.

Para quantificar a precisão da calibração, foram aplicados métodos estatísticos, incluindo regressão linear e o cálculo dos coeficientes de correlação  $R$  e de determinação  $R^2$ . Essas análises foram conduzidas utilizando as bibliotecas *scikit-learn*, *stats* e *Numpy* na linguagem Python, permitindo obter curvas de calibração bem ajustadas para cada sensor.

A partir dessas análises, constatou-se que os sensores apresentam boa repetibilidade e reprodutibilidade, evidencian-

Tabela 3. Ensaio de Calibração do Sensor 3.

Ref. [dB]	Amostra	Carga [N]	$\Delta$ [dB]
-48,63	1	0,000	0,00
	2	0,998	0,02
	3	1,996	0,06
	4	2,994	0,10
	5	3,992	0,14
	6	4,990	0,18
-40,17	1	0,000	-
	2	0,998	-
	3	1,996	-
	4	2,994	-
	5	3,992	-
	6	4,990	-
-48,63	1	0,000	-
	2	0,998	-
	3	1,996	-
	4	2,994	-
	5	3,992	-
	6	4,990	-
-48,59	1	0,000	0,00
	2	0,998	0,03
	3	1,996	0,08
	4	2,994	0,15
	5	3,992	0,17
	6	4,990	0,20
-48,52	1	0,000	-
	2	0,998	-
	3	1,996	-
	4	2,994	-
	5	3,992	-
	6	4,990	-

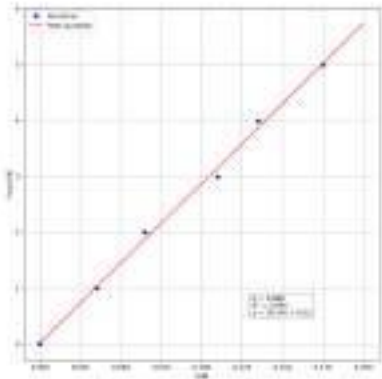


Figura 8. Curva de calibração do sensor 3

das pelos valores consistentes de  $\Delta$ [dB] ao longo dos ensaios. A resposta linear observada reforça a confiabilidade dos sensores para aplicações que demandam alta precisão na medição de força.

O tratamento estatístico dos dados resultou em um coeficiente de correlação  $R = 0,98$  e um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,96$ , comprovando a eficácia do processo de calibração e a precisão das medições obtidas.

3.2 Testes experimentais

Conforme descrito na Seção 3.1, após a calibração, o Sensor 2 foi aplicado a uma mão robótica. Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Ensaio experimental.

Ref. [dB]	Amostra	Deslocamento [mm]	$\Delta$ [dB]	Carga [N]
-42,90	1	0	0,00	0,000
	2	1	0,02	0,643
	3	2	0,08	2,864
	4	3	0,11	3,976
	5	4	0,22	8,053
	6	5	0,26	9,535

O desempenho do sensor permitiu uma avaliação detalhada da distribuição de força ao longo do deslocamento, validando a eficácia do sistema de medição. Os resultados obtidos não apenas confirmam a confiabilidade do sensor na detecção de forças sutis, como também demonstram seu potencial para aplicações em sistemas robóticos avançados. Essa abordagem é especialmente relevante em contextos que requerem controle preciso da força aplicada, como manipulação de objetos frágeis, reabilitação assistida por robôs e processos industriais de alta precisão.

Os resultados experimentais demonstraram que o sensor desenvolvido é altamente sensível a pequenas variações de força, sendo capaz de captar deformações mínimas na estrutura óptica. A metodologia de encapsulamento em borracha de silicone garantiu maior estabilidade mecânica e aprimorou o desempenho na calibração. Esses fatores tornam o sensor uma alternativa confiável para medições de força, apresentando viabilidade prática em diferentes aplicações.

4. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo o desenvolvimento e a validação de um sensor baseado em fibra óptica plástica (POF) para medição de força em braços robóticos, explorando sua aplicabilidade em sistemas de controle industrial e demais áreas. A proposta incluiu a concepção de um sensor com geometria em "W", a caracterização de seu funcionamento por meio da modulação da intensidade luminosa e, por meio da calibração, a avaliação de sua precisão, reprodutibilidade e repetibilidade.

- **Desempenho e Precisão:** Os testes experimentais demonstraram alta sensibilidade a pequenas variações de força, garantindo um coeficiente de correlação  $R$  médio de 0,98 e um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,96, validando a precisão das medições realizadas e reforçando a confiabilidade do sensor.
- **Estabilidade Mecânica e Construção:** A encapsulação em borracha de silicone contribuiu significativamente para a estabilidade mecânica, reduzindo interferências externas e garantindo medições consistentes ao longo dos testes.
- **Aplicabilidade e Impacto:** O sensor desenvolvido se mostrou uma alternativa promissora para aplicações em robótica industrial, permitindo um controle mais preciso e seguro de forças aplicadas por sistemas automatizados. Além disso, sua versatilidade sugere



aplicações potenciais onde medições de força precisam ser feitas com elevada precisão.

Para trabalhos futuros, pretende-se avançar na integração do sensor em aplicações reais, incorporando-o diretamente à estrutura interna de manipuladores robóticos. Essa abordagem permitirá que a força aplicada pela pínça sejam monitoradas em tempo real pelo sensor acoplado internamente, fornecendo dados precisos sobre a força exercida em diferentes condições operacionais. Além disso, para viabilizar essa aplicação, os sensores serão miniaturizados, garantindo compatibilidade com o design estrutural dos robôs e possibilitando sua utilização em sistemas robóticos industriais e assistivos que demandam controle preciso das forças aplicadas.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação e Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), e Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE) pelo seu apoio técnico/financeiro.

#### REFERÊNCIAS

- Dehghani, M., McKenzie, R.A., Irani, R.A., and Ahmadi, M. (2023). Robot-mounted sensing and local calibration for high-accuracy manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 79, 102429. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102429>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736594522001144>.
- Enofuse, I., Ibrahim, B.K.S.M.K., Foo, M., Mathara, R.S., and Ahmed, H. (2022). Accuracy evaluation of hand-eye calibration techniques for vision-guided robots. *PLOS ONE*, 17(10), 1–26. doi:10.1371/journal.pone.0273261. URL <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273261>.
- Ge, Q.Q., Zhou, T., Gong, T.Y., Liang, Y., Ng-jungbuen, L.A., and Chen, M.Y. (2023). Highly sensitive measurement of finger joint angle based on a double-u tapered pof embedded in pdsn film. *Optical Fiber Technology*, 76, 103236. doi:10.1016/j.yofte.2023.103236. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520023000159>.
- Heimann, O. and Gahl, J. (2020). Industrial robot programming methods: A scoping review. In *Proceedings of the 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 696–703. IEEE. doi:10.1109/ETFA46521.2020.9211997. URL <https://doi.org/10.1109/ETFA46521.2020.9211997>.
- Oliveira, E.S.D., Bacci, S.C.C., Menegassi, W.J.C., Paris, L.R.P., and Neto, J.M.F.A. (2024). Automação nos processos industriais: Processo de implementação e o papel do gestor de tecnologia da informação. *Prospetus*, 6(1). doi:10.5281/zenodo.12719343. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.12719343>.
- Rezende, A., Alves, C., Marques, I., Silva, M.A., and Neves, E. (2018). Polymer optical fiber goniometer: A new portable, low cost and reliable sensor for joint analysis. *Sensors*, 18(12), 4293. doi:10.3390/s18124293. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/12/4293>.
- Tan, K., Shi, H., Yang, J., Mei, X., and Zhao, F. (2024). Force compensation control for tendon-sheath system by measuring cumulative bending angle with fiber sensor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(5), 5166–5175. doi:10.1109/TIE.2024.1234567. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/24-TIE-3000>.
- Teng, C., Mu, R., Zheng, J., Deng, S., Li, M., Hou, L., and Yuan, L. (2022). Intensity-modulated polymer optical fiber-based refractive index sensor: A review. *Sensors*, 22(1), 81. doi:10.3390/s22010081. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/1/81>.