



Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”



Instituto de Química de Araraquara

## RELATÓRIO FINAL DE PÓS-DOCTORADO

**Desenvolvimento de sensores magneto ótico utilizando fibra ótica**

**Pós-doutoranda:** Dra. Adriana Maneira França

**Orientador:** Prof. Dr. Marcelo Nalin

Araraquara

2023

A proposta do projeto era produzir uma fibra magneto-óptica monomodo, porém a proposta se estendeu para a busca por mercado e estudo da viabilidade de comercialização de vidros e/ou fibras magneto-ópticos do tipo rotadores de Faraday.

Durante o estudo pelo mercado para os vidros magneto-ópticos, produto promissor de grupo de pesquisa, foi levantada a possibilidade de aplicação dos materiais MO no sensoriamento de corrente elétrica em transformadores de energia. A partir daí foi feito um estudo detalhado do setor de energia e suas dores para determinar nossa posição diante deste mercado. Encontramos então que a comercialização dos vidros e fibras MO para sensores do mercado de energia elétrica é bastante viável.

Durante o período de 01/12/2022 à 01/12/2023 a pós-doutoranda desempenhou as seguintes atividades:

- Participou do 2<sup>nd</sup> Photonic workshop, parte do Programa LIF Empreende, que aconteceu em Campinas nos dias 30 e 31 de outubro de 2023.
- Apresentou um trabalho na modalidade pôster, intitulado Application of porous silicates impregnated with vanadium in the glycerol acetalization reaction with acetone to obtain Solketal no evento 46<sup>o</sup> Reunião Anual da sociedade Brasileira de Química
- Participou de eventos e oficinas sobre empreendedorismo inovador, de consultorias com o SEBRAE e especialistas da incubadora de empresas de Araraquara e da organização do 1<sup>o</sup> Workshop de Materiais Fotônicos no IQ-UNESP, Araraquara e do NanoAndes.
- Apresentou um trabalho na modalidade pôster, intitulado “Aplicação de sensores magneto ópticos ultrassensíveis” na Reunião Regional do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Fotônica, realizada em Ribeirão Preto-SP nos dias 18 e 19 de maio de 2023.
- Participou do trabalho apresentado em forma de artigo de conferência intitulado *Performance of Tb doped glass based current sensor designed to work at 1550 nm region* publicado na *IEEE Xplore*, ISBN 979-8-3503-2067-1, sob o DOI 10.1109/IMOC57131.2023.

## RESUMO:

Devido à ampla aplicação dos sensores magnéticos em diversas áreas do cotidiano, vêm-se buscando otimizar este tipo de dispositivo e os sensores magneto óticos de fibra ótica se destacam por serem materiais leves, compactos e apresentarem alta segurança e sensibilidade aos campos magnéticos. Este tipo de material funciona com base no efeito de Faraday, onde a luz polarizada linear é rotacionada na presença de um campo magnético. Desta forma, este projeto teve como proposta sintetizar e caracterizar fibras óticas feitas de material magneto-ótico, dopados com  $Tb^{3+}$ , que apresentam alto valor de constante de Verdet, para serem aplicadas como sensores magneto-ótico. Esta proposta se estendeu para a produção e testagem de sensores a base de vidros magneto-óticos para o monitoramento da variação de corrente elétrica e também para o estudo das possibilidades de aplicação dos sensores magneto-óticos e a viabilidade de sua comercialização futuramente. As pré-formas para produzir fibras magneto-óticas foram sintetizadas no formato núcleo-casca no tipo multimodo e estamos tentando evoluir para a produção de uma monomodo. Devido às dificuldades que encontramos para produzir a pré-formas núcleo-casca utilizando as metodologias convencionais que, por sua vez, tiveram que ser adaptadas, as fibras magneto-óticas ainda serão puxadas em uma torre de puxamento de fibra ótica localizada no Laboratório de Vidro Especiais (LaViE). Além das fibras foram testadas a montagem e a funcionalidade de sensores a base de vidros que apresentaram boa performance magneto-ótica, previamente obtidos por nosso grupo de pesquisa. Algumas destas amostras mostraram alta sensibilidade para a variação de corrente, sendo uma delas até mais sensível que o RIG, um cristal amplamente utilizado em dispositivos comerciais. Além da parte experimental, foi feito um levantamento das possibilidades de aplicação dos sensores magneto-óticos e a viabilidade de comercialização deste, onde constatou-se que este tipo de sensor é promissor para a medição de corrente elétrica em sistemas de distribuição de energia.

## 1. INTRODUÇÃO:

Há décadas conseguimos controlar e analisar milhares de funções graças ao uso de sensores magnéticos, sendo utilizados em diversas áreas do cotidiano como na computação, aviação, indústria, monitoramento de segurança de sistemas de energia, monitoramento de durabilidade de construções civis, monitoramento ambiental, detecção de diagnósticos médico, monitoramento rápido e efetivo e alerta precoce de desastres geológicos, comunicação, entre outros [1,2].

Sensores magnéticos são capazes de medir tanto o campo magnético quanto a magnetização de um material [3]. Existe uma ampla variedade de sensores magnéticos, cada tipo de sensor é apropriado para uma aplicação diferente, a escolha do sensor a ser utilizado dependerá da faixa de medição do campo que se deseja medir [1, 3]. Dentre os diversos modelos, neste trabalho será desenvolvido um sensor magnético do tipo magneto-ótico utilizando uma fibra ótica.

Enquanto os sensores tradicionais apresentam limitações por serem grandes, apresentarem alto custo, dificuldade de manutenção e instalação, estrutura de isolamento complexa e alto risco, os sensores de fibras óticas são leves, pequenos, apresentam boa estabilidade, baixa interferência, baixo risco à segurança e facilidade em estabelecer interfaces digitais [2].

O sensor magneto-ótico explora um efeito descoberto por Faraday que envolve a rotação do plano de luz polarizada que ao atravessar um meio magneto-ótico é exposta à um campo magnético, este efeito é conhecido como Efeito Faraday ou efeito magneto ótico linear [4,5]. Geralmente, o efeito de Faraday é medido pelo ângulo no qual o plano de uma luz polarizada gira ( $\Theta$ ) usando a seguinte equação:

$$\Theta = V \cdot B \cdot L \quad \text{Equação 1}$$

Onde V é a magnitude da rotação de Faraday, chamada de constante de Verdet, L é o comprimento da fibra no qual a luz polarizada atravessa e B é o campo magnético aplicado [4].

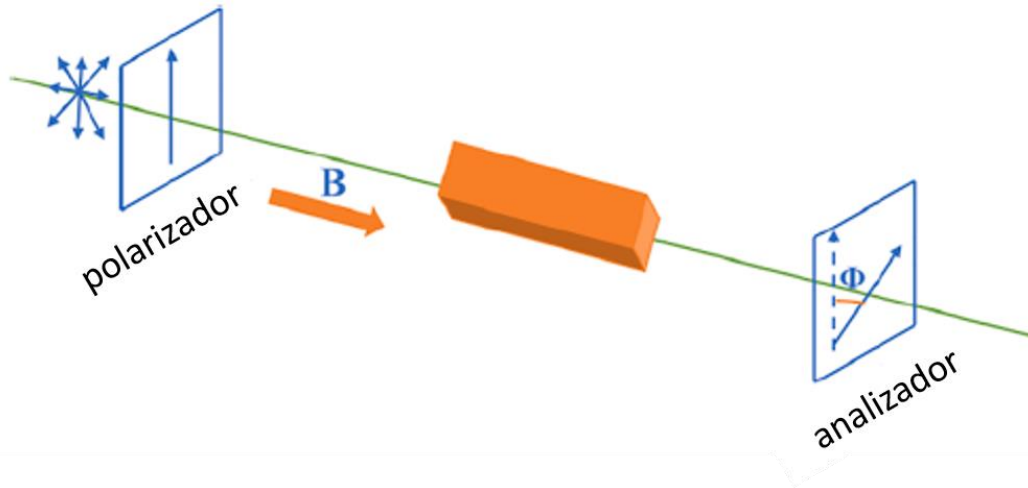


**Figura 1:** Esquema representativo do efeito Faraday

Para este tipo de sensores são utilizados materiais magneto-ótico dopados, tal como fibras de vidros inorgânicos, buscando desenvolver materiais que apresentem alta constante de Verdet, baixa absorção ótica em uma determinada faixa espectral de interesse, boa estabilidade, sensibilidade e integração industrial dos sensores, além de serem independentes da temperatura [4, 5].

Os íons de terras-raras como o  $Tb^{3+}$ ,  $Eu^{3+}$ ,  $Ce^{3+}$ , se destacam como dopantes de materiais magneto-óticos usados como sensores, devido sua alta constante de Verdet, que é causada pela transição  $4f^n \rightarrow 4f^{n-1}5d$  destes íons [4]. Desta forma, quando é utilizado um material dopado com terras raras, a constante de Verdet é uma função do comprimento de onda incidente e da concentração de terras raras [4].

Nos sensores magnéticos de fibra ótica são utilizadas fibras compostas por dois vidros arranados no modelo núcleo-casca [1]. No caso específico do estudo de fibras ópticas de vidro com propriedades magneto-óticas, é imprescindível que os sistemas vítreos precursores contenham as seguintes características: presença de espécies paramagnéticas, valores consideráveis de constante de Verdet e boa estabilidade termodinâmica[5-7]. Vidros teluritos, calcogenetos, fosfatos contendo íons de metais de transição com características paramagnéticas e aluminossilicatos dopados com íons  $Tb^{3+}$ , apresentam propriedades magneto-óticas interessantes [8-13].

## 2. Objetivos gerais:

Desenvolver uma fibra ótica monomodo cujo núcleo é composto por um material magneto-ótico dopado com térbio, envolvido por uma casca de borossilicato que apresente alta constante de Verdet, estabilidade e sensibilidade, para ser aplicada como sensor magneto-ótico.

### **2.1. Objetivos específicos:**

- Sintetizar e caracterizar um vidro que apresente propriedades magneto-óticas, de composição:  $\text{GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-BaO-xTb}_4\text{O}_7$ , onde x varia entre 6 e 9%.
- Definir a composição da casca e do núcleo
- Produzir as fibras óticas de estrutura núcleo-casca (multimodo e monomodo) com propriedades magneto-ótica
- Caracterizar as propriedades térmicas, estruturais e espectroscópicas do material obtido
- Testar a capacidade ótica e magneto-ótica da fibra obtida
- Desenvolver sensor magneto-ótico e testar sua funcionalidade como medidor de variação de campo magnético e/ou corrente elétrica.
- Buscar um mercado onde o sensor magneto-ótico possa ser utilizado.

### **3. Resultados esperados:**

Obter uma fibra ótica de estrutura núcleo-casca (monomodo) com propriedades magneto-ótica, que apresente alta constante de Verdet. Otimizar parâmetros geométricos e de desempenho do material.

Estabelecer colaboração e interação com outros grupos de pesquisa no Brasil e no exterior, que desenvolvam trabalhos na mesma área, para possibilitar a aplicação deste material em diversas áreas da indústria.

Obter sensores magneto-óticos utilizando os vidros já produzidos pelo grupo, de alta performance magneto-ótica, para testar seu desempenho na medição de variação de corrente de alta tensão.

### **4. Metodologia:**

#### **4.1. Escolha da composição do vidro:**

Várias composições de vidros especiais foram testadas no grupo de pesquisa LaViE nos últimos anos. Dentre os vidros obtidos, os de composição  $\text{GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-}$

$\text{Na}_2\text{O-PbO-xTb}_4\text{O}_7$  [13] e  $\text{GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-BaO-xTb}_4\text{O}_7$  [14] desenvolvidos durante o projeto de pós-doutorado FAPES (nº processo 2016/16900-9) do então pós doutorando Douglas Faza Franco, que ocorreu entre 2017-2021. Ambos apresentam propriedades térmicas e mecânicas que permitem o preparo de preformas e subsequente preparo de fibras óticas além de altos valores da constante de Verdet ( $V_B$ ) em variados comprimentos de onda.

Este projeto focou no preparo de fibras óticas núcleo-casca cuja composição do núcleo foi o vidro MO de composição  $\text{GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-BaO-xTb}_4\text{O}_7$  previamente obtida por membros do grupo. Este apresenta alta estabilidade térmica além de permitir alta solubilização dos íons  $\text{Tb}^{3+}$ .

#### **4.2. Preparo das preformas:**

Nossa equipe de pesquisadores possui experiência no preparo de fibras óticas de diversas composições. Para produzir fibras magneto-ópticas é necessário obter vidros em formato específico (cilíndrico) para então fazer o puxamento da fibra ótica, este formato é denominado pré-forma. E uma maneira de melhorar o confinamento de luz na fibra-óptica, para otimizar sua capacidade de transmissão de sinal é produzir pré-formas com o formato núcleo-casca, no qual o núcleo magneto-óptico é envolvido por uma casca de vidro de índice de refração próximo ao do núcleo.

Os parâmetros ideais de síntese das pré-formas foram definidos experimentalmente para cada composição vítrea analisada, devido às variadas especificações físico-químicas específicas para a composição de cada vidro. Para a obtenção de pré-forma de fibra magneto-óptica núcleo-casca foram testadas duas metodologias:

##### **4.2.1. Método *Sucking* para a obtenção de fibra Multimodo:**

A técnica denominada método *sucking*, utiliza de um processo de sucção, ilustrado abaixo na Figura 2. Este sistema se encontra disponível no laboratório LaViE, adquirido recentemente utilizado recurso da FAPESP (CEPID - 2013/07793-6). Ele é composto por um molde cilíndrico de aproximadamente 10 e 11 mm, provido de um pistão interno que permite movimentos descendente e ascendentes com velocidade controlada. O processo de obtenção das pré-formas ocorre em 3 etapas, tal como está ilustrado na Figura 2 [15]:

- I. Vertimento da composição da casca no cone superior do molde e imediato acionamento do pistão na direção descendente para sugar a composição vítrea para o interior do molde
- II. Antes que toda a composição vítrea seja sugada, verte-se sobre o vidro da casca, já resfriado no molde, a composição do núcleo, que segue o mesmo movimento descendente, proporcionado pelo movimento constante do pistão
- III. O processo termina imediatamente antes da composição do núcleo ser sugada pelo tubo da casca formado previamente.

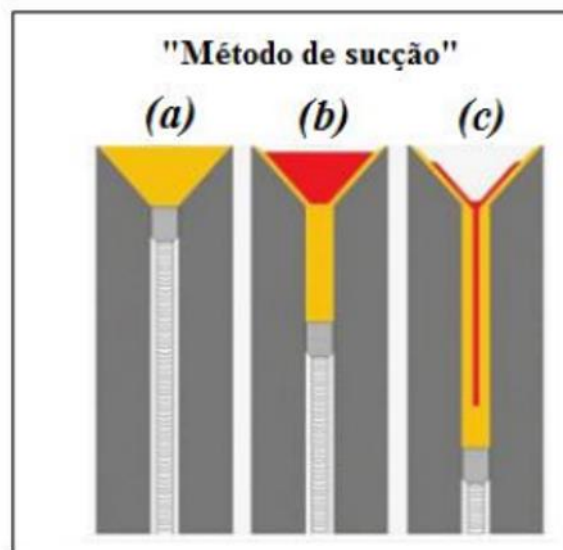


**Figura 2:** esquema representativo do método *sucking* utilizado no preparo da preforma da fibra multimodo núcleo-casca [15].

#### 4.2.2. Método *Rod-in-tube* para a obtenção de fibra Monomodo:

Este método consiste no preparo do núcleo e da casaca da pré-forma separadamente e depois de prontas estas são encaixadas para dar forma a uma pré-forma núcleo-casca monomodo. Essa metodologia, ilustrada na Figura 3 consiste em uma adaptação da já descrita metodologia “*rod-in-tube*”.

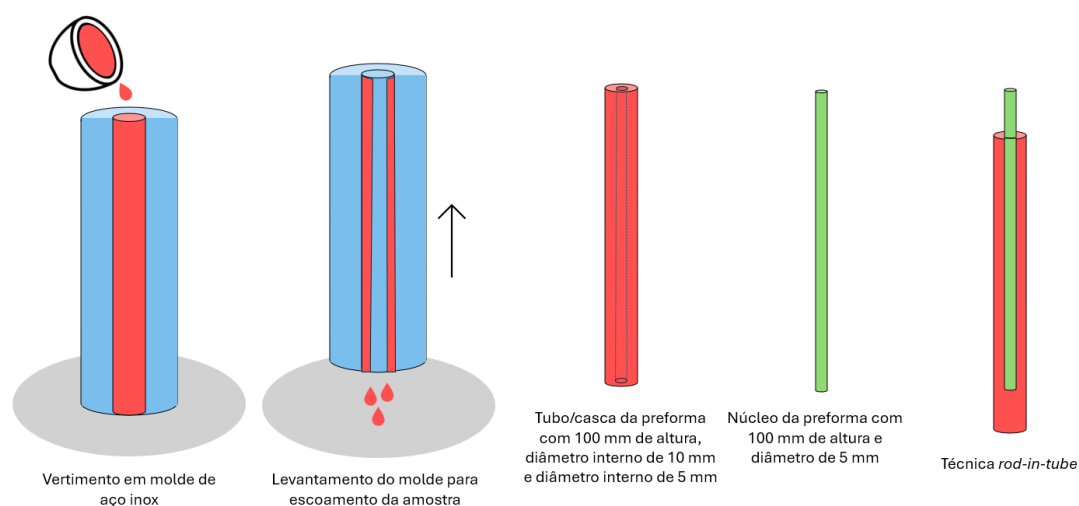


**Figura 3:** Esquema representativo do método *rod-in-tube* de obtenção de pré-forma de fibra óptica núcleo-casca

Para a fabricação do tubo que foi utilizado como casca da pré-forma, o vidro casca foi vertido em um molde de aço inox 310 com 16 mm de diâmetro e 140 mm de altura, até atingir seu limite de comprimento. No interior desse molde, uma haste metálica de tungstênio foi centralizada e fixada de modo a não se movimentar durante o vertimento do vidro fundido. Na sequência, o molde foi levantado e o excesso de vidro ainda líquido no interior do molde escoou pela extremidade inferior do mesmo, formando uma casca uniforme

O conjunto molde + haste metálica foi aquecido até a temperatura de 550 °C (50 °C abaixo da  $T_g$  do vidro), enquanto os componentes que formam o vidro estudado foram aquecidos até a temperatura de 1400 °C em um cadinho de platina utilizando um forno elétrico como fonte de aquecimento. Na sequência, o vidro fundido foi vertido no molde pré-aquecido. Na Figura 4 está demonstrado o esquema utilizado para obtenção do tubo com um furo central.

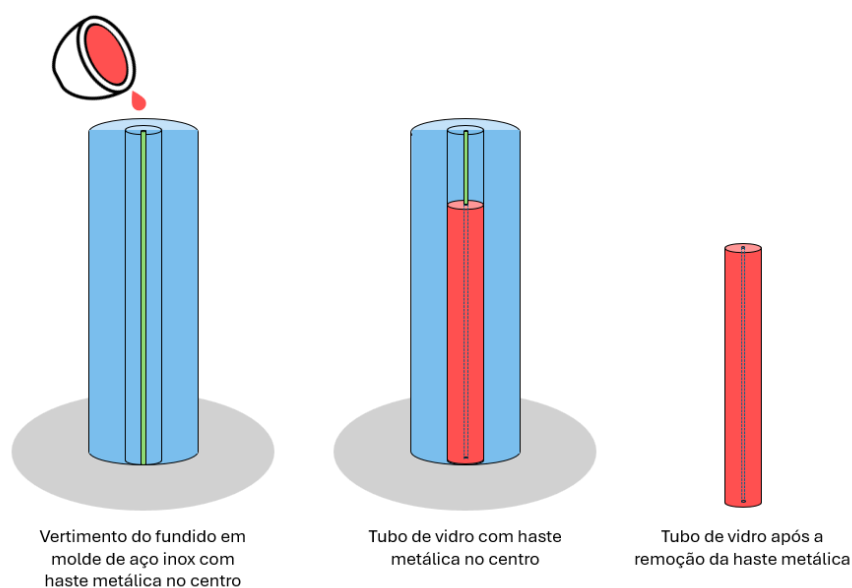


**Figura 4:** Esquema representativo da obtenção da pré-forma núcleo-casca utilizando o método rod-in-tube

#### 4.3. Construção e teste de um protótipo de sensor magneto-óptico:

Como mencionado anteriormente, nosso grupo de pesquisa apresenta diversas amostras de vidros magneto-ópticos com composição química exclusiva. Neste projeto focamos na utilização das amostras de melhor performance magneto-óptica para a produção de pré-formas para o puxamento de fibras ópticas e para a produção de sensores contendo vidro magneto-óptico para a medição de variação de corrente elétrica de alta tensão. As composições escolhidas foram denominadas BGB-16Tb-0.25Ce, BAG13Tb e GBANPb-4Tb (5mm).

Esta etapa do projeto teve como objetivo montar um sensor baseado em trabalhos científicos e patentes, que já desenvolveram e validaram sensores similares. Cujos componentes que formam o circuito óptico ficam encapsulados e a luz que entra e sai do dispositivo é transmitida por fibras ópticas multimodo. Para a montagem do sensor MO foi considerado que um sinal óptico emitido por uma fonte de luz, deve percorrer uma fibra óptica multimodo até a entrada da capsula do sensor, onde este sinal é linearmente polarizado ao passar por um polarizador (PBS- Polarizer Beam Splitter) que insere 45° de deslocamento de fase. O sinal polarizado, é transmitido passando pelo vidro MO, e chega a um segundo PBS, que fornece dois sinais ópticos com 90° de polarização entre si e que

devem ser acoplados a dois colimadores que inserem os sinais em fibras ópticas multimodo, e transfere estes sinais até o fotodetector.

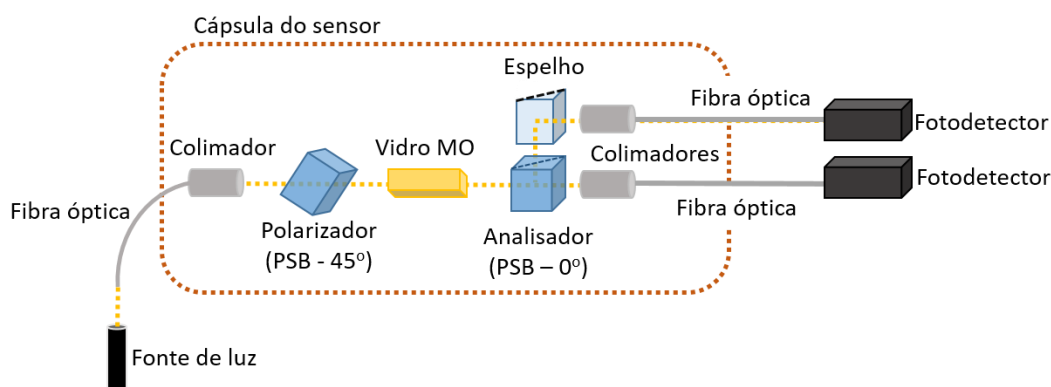


**Figura 5:** Esquema representativo do sensor MO, um destaque especial (em amarelo) para o vidro MO produzido com tecnologia exclusiva da nossa equipe

#### 4.4. Avaliação do funcionamento do sensor usando um vidro da Glass Glass Technologies:

Esta etapa foi executada pela equipe especializada do CPQD. Assim que o sensor estava montado este foi submetido à validação de seu funcionamento como um sensor MO, por meio de testes laboratoriais da sua sensibilidade à corrente elétrica alternada de 60 Hz em comprimentos de onda entre 500 e 1550 nm.

Para estas medidas foram testadas diferentes fontes de luz conectadas, uma de cada vez, na entrada do sensor e na saída do sensor foi acoplado um sistema de fotodetecção adequado para medir o sinal emitido pelo sensor. Como fonte de luz foram utilizados lasers em 535 nm 654 nm, 830 nm e 1150 nm. Os testes foram feitos aplicando-se corrente elétrica variando de 10 a 110 A e coletando os valores de voltagem em mV captados pelo sensor, gerando resultados em mV/A.

O sistema de fotodetecção usado para fazer estas medidas foi uma placa de interrogação desenvolvida pelo CPQD.

## 5. RESULTADOS:

### 5.1. Obtenção de fibra Multimodo pelo método *Sucking*:

A Figura 6 (a) mostra a fotografia da pré-forma obtida pela metodologia “*sucking*”. Na Figura 6 (b) é mostrado o diâmetro aproximado da casca da pré-forma (10,71 mm), enquanto na (c) é mostrado o diâmetro do núcleo. A relação entre os diâmetros do núcleo e casca da pré-forma é muito próxima da relação comumente adotada para fibras ópticas do tipo multimodo, 62,5  $\mu\text{m}$  para o núcleo e 125  $\mu\text{m}$  para a casca.

Entretanto, apesar dos diâmetros da casca e do núcleo observados na seção da pré-forma obtida satisfazerem a condição para uma pré-forma do tipo multimodo, a relação entre esses diâmetros não se manteve em todo o comprimento da pré-forma, impossibilitando a adoção dessa técnica para a síntese de pré-formas dos vidros em estudo.

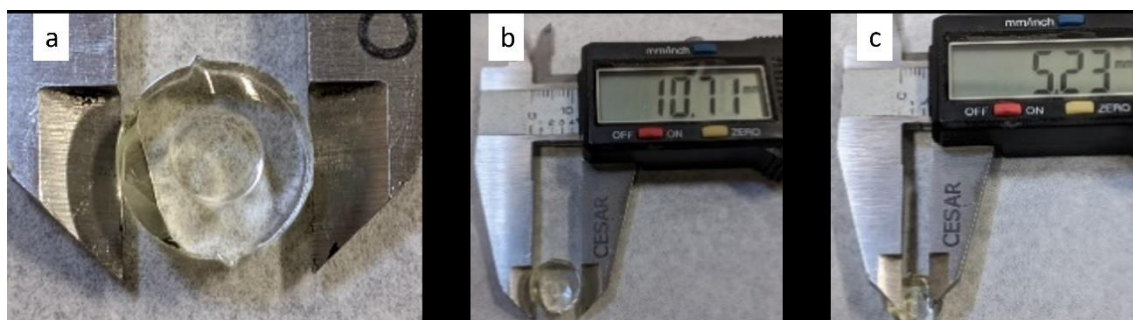


**Figura 6:** fotografia da pré-forma núcleo casca obtida pelo método *sucking*, (a) com as medidas do diâmetro da casca (b) e do núcleo (c)

Diante da falta de sucesso do resultado anterior, decidiu-se testar a metodologia “*sucking*” vertendo apenas o vidro da casca no molde. Obtivemos uma série de tubos com diferentes diâmetros em função da velocidade de descida do pistão, como podem ser observados na fotografia mostrada na Figura 7(a). Entretanto, como pode ser observado na Figura 7(b), o diâmetro interno do tubo não se manteve o mesmo ao longo do comprimento da pré-forma. A explicação para essa não-uniformidade do diâmetro interno do tubo pode ser explicada pela viscosidade do vidro bem como pela baixa velocidade de descida do pistão

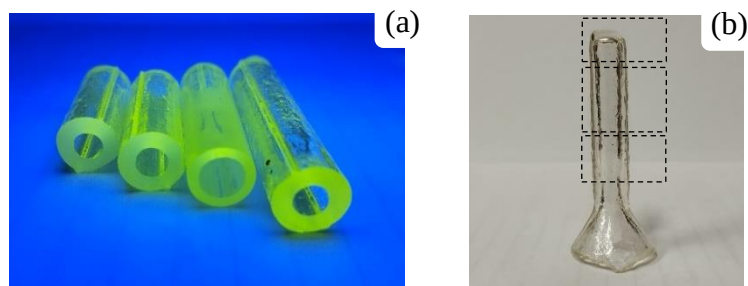


**Figura 7:** Tubos de vidro obtidos pelo método “*sucking*” (a) e detalhe na não-uniformidade do diâmetro interno do tubo ao longo do seu comprimento (b).

## 5.2. Obtenção de fibra Multimodo pelo método *rod-in-tube*:

Nas primeiras tentativas, 12 gramas de vidro foram vertidos no molde de aço inox conforme esquematizado na metodologia (Figura 4). Sendo obtido uma amostra com pouco mais de 15 mm de altura. Apesar da fácil remoção da haste após resfriamento, a superfície do furo que ficou em contato com ela apresentou rugosidades que na tentativa de inserir um bastão de vidro como núcleo no seu interior e posterior puxamento, levaria a defeitos que por sua vez causariam elevada perda de sinal ao longo da extensão da fibra óptica. Outras tentativas foram realizadas modificando as condições de temperatura de fusão do vidro e temperatura do conjunto molde + haste visando melhorar a superfície do furo após remoção da haste metálica, porém todas sem sucesso.

Na Figura 8 é mostrado uma fotografia do tubo casca obtido pela técnica *rod-in-tube*, após as etapas de corte das extremidades e polimento da superfície externa. Uma vez obtido o tubo/casca, utilizamos um molde de aço inox cilíndrico bipartido com aproximadamente 6 mm de diâmetro para obtenção do vidro utilizado como núcleo da pré-forma, para posteriormente (após etapas de polimento) inseri-lo no interior do tubo, conforme demonstrado na Figura 8. Ainda na Figura 8 é mostrada uma fotografia da pré-forma NC do tipo multimodo em sua fase que precede o puxamento em torre de fibra óptica.



**Figura 8.** Tubo de vidro casca obtido pelo método “*lifting*” e fotografia da preforma NC pronta para puxamento na torre de fibra óptica.

Para obtenção de preformas do tipo monomodo, uma etapa será adicionada ao processo anteriormente descrito, resultando em um tubo com dimensões semelhantes as adotadas para fibras monomodo. Esta etapa foi desenvolvida pelos membros da equipe e está protegida para a deposição de patente.

### 5.3. Construção e teste de um protótipo de sensor magneto-óptico:

Com ajuda de parceiros como o centro de pesquisa em telecomunicações (CPQD) e uma empresa chinesa conseguimos obter protótipos de sensor medidor de corrente elétricas. Estes foram desenvolvidos usando composições diferentes de vidros magneto-ópticos (BAG13Tb e BGB-16Tb-0.25Ce) na forma de *bulk* de 21 mm e um outro usando 5 mm do vidro de composição GBANPb-4Tb. Os dispositivos foram construídos utilizando uma arquitetura contendo uma entrada e duas saídas conforme representado na Figura 9. Esta arquitetura é amplamente adotada na construção de sensores ópticos baseados no Efeito Faraday (ou magneto-óptico) para medição de corrente

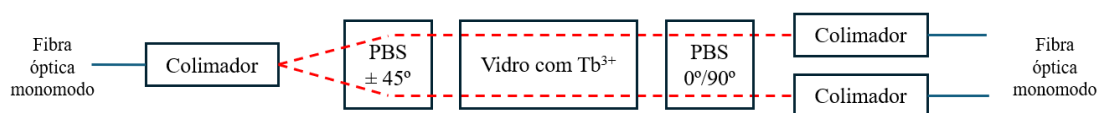


**Figura 9.** Arquitetura de uma entrada e duas saídas utilizadas na construção do protótipo de sensor de corrente.

Na Figura 10(a) é mostrado o protótipo construído com base no vidro BGB-16Tb-0.25Ce, na Figura 10(b) o protótipo mostrado foi construído com base no vidro BAG13Tb ao lado de uma moeda de 1 Real para efeito de comparação de tamanho. E na Figura 10(c) o protótipo do sensor, produzido por parceiros chineses, usando uma amostra de vidro de

5 mm de composição  $GBANPb-4Tb$ . Todas as composições vítreas podem ser transformadas em fibras ópticas para a construção de um sensor constituído por fibra magneto-óptica e comercialmente denominado all-fiber.



**Figura 10.** (a) Fotografia do protótipo a base do vidro BGB-16Tb-0.25Ce, (b) do protótipo BAG13Tb e (c) do protótipo GBANPb-4Tb (5mm) construído utilizando o vidro como material sensível.

A configuração experimental para realização de teste laboratorial de validação da funcionalidade dos sensores como um medidor de corrente, representada na Figura 11(a) e 11(b), utilizou de um aparato mecânico, previamente desenvolvido pelo nosso parceiro CPQD, no qual o sensor composto por vidro magneto-óptico desenvolvido pela GlassGlass, foi submetido a diferentes valores de voltagem que variaram de 0 a 350 mV e a resposta do sensor foi coletada e transformada em valores de corrente elétrica. Na Figura 11(c) é mostrado desempenho, em termos de sensibilidade, dos sensores contendo vidros recém-sintetizados e de composição otimizadas (BAG13Tb e BGB-16Tb-0.25Ce). Também são mostrados os resultados para um sensor usando um material comercial como referência, o cristal RIG (do inglês *Rare-earth Iron Garnet*), reconhecido por ser amplamente utilizado no sensoreamento de campo magnético e corrente elétrica. E além disso, foi testado um dispositivo (A60310695-5mm) utilizando uma amostra de 5 mm do vidro de composição GBANPb-4Tb, anteriormente desenvolvida pela nossa equipe [14 e 16].

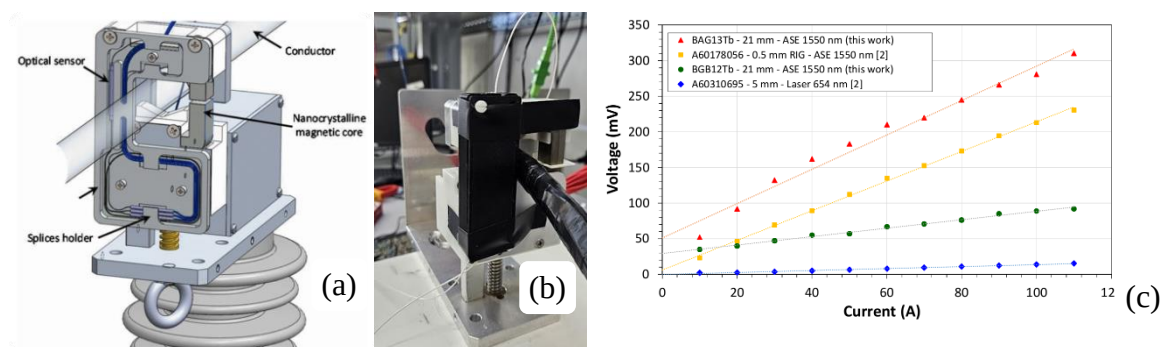


**Figura 11.** (a) Configuração experimental para realização do teste de performance, (b) fotografia do protótipo em teste e comparação das sensibilidades dos sensores baseados nos vidros dopados com térbio e do sensor RIG.

O protótipo construído com base no vidro BAG13Tb apresentou uma sensibilidade 1,31 vezes maior do que o sensor baseado em RIG; 3,15 vezes superior ao BGB-16Tb-0.25Ce e 20,21 vezes maior que a amostra GBANPb-4Tb. Indicando que as amostras de composição química otimizada apresentaram melhor performance quando instaladas nos sensores. Os resultados de sensibilidades apresentados acima podem ser explicados com base na largura e valores de constante de Verdet das amostras de vidro e cristal RIG usadas.

**Tabela 1:** parâmetros magneto-ópticos das amostras usadas nos sensores.

| Amostra magneto-óptica | Constante de Verdet (rad/ T*m) | Largura (cm) |
|------------------------|--------------------------------|--------------|
| RIG                    | 22300                          | 0,5          |
| GBANPb-4Tb             | 109,5                          | 5            |
| BAG-13Tb               | Não divulgado                  | 21           |
| BGB-16Tb-0.25Ce        | Aproximadamente 110            | 21           |

É possível explicar a baixa sensibilidade do GBANPb-4Tb em relação às amostras RIG e BGB16Tb-0.25Ce com base na diferença de valor de constante de Verdet e largura entre eles, respectivamente. Esses dados comprovam o que é mostrado na equação de Faraday e como a constante de Verdet (influenciada pela matriz vítrea) e seu comprimento

afetam na sensibilidade de um material ao campo magnético e/ou corrente elétrica [4 e 17].

### **Busca por aplicações relevantes do sensor magneto-óptico:**

Durante a execução deste projeto foram feitas buscas por patentes que trouxessem possibilidades de aplicação relevantes de sensores magneto-ópticos. Além das aplicações já conhecidas e mais exploradas dos materiais magneto-ópticos, como isoladores e circuladores ópticos, amplificadores de sinais de telecomunicação, resolvemos explorar neste projeto o uso deste tipo de material nos sensores magneto-ópticos para medição de corrente elétrica.

Diante do levantamento de dados em patentes, chegou-se à conclusão de que os sensores contendo vidros magneto-ópticos trazem grandes impactos para a sociedade e o setor de energia. Pois com a criação de um sensor capaz de monitorar, em tempo real, corrente elétrica de alta tensão, este pode ser aplicado para o monitoramento do funcionamento de transformador de corrente. Sendo assim, colaboraremos para a economia e segurança das companhias de energia por meio de um método de manutenção preventiva seguro, robusto, preciso e confiável. E a sociedade como um todo poderá desfrutar de um serviço de energia mais confiável.

### **6. Conclusões:**

Durante a execução deste projeto notamos que os métodos tradicionais de obtenção de pré-forma para fibras magneto-ópticas monomodo não foram eficazes para as composições vítreas nas quais queremos obter fibra MO. No entanto, foi desenvolvido um novo método de preparo destas pré-formas adaptando metodologias já reportadas.

Já os sensores contendo vidros MO de composições inéditas obtidas pelo nosso grupo de pesquisa, apresentaram sensibilidade à variação de corrente elétrica comparável à sensibilidade do RIG, cristal comumente usado para este sistema. Sendo a amostra BAG-13Tb, a de maior performance, se mostrando até mais sensível que o próprio RIG.

Sendo assim, pode-se concluir que durante este período houve uma evolução no preparo de fibras magneto-ópticas do tipo monomodo e no desenvolvimento e testagem de sensores usando amostras de vidro obtidas por nosso grupo de pesquisa.

## **7. Próximas atividades:**

### **7.1. Puxamento da Fibra ótica:**

Para se obter as fibras é feito o puxamento da pré-forma, que depende de fatores externos, tais como temperatura do forno, velocidade do puxamento e tipo de recobrimento. Tais parâmetros devem ser estabelecidos previamente à execução do experimento, e devem ser ajustados ao longo do projeto, de acordo com as características intrínsecas de cada matriz vítrea.

Nesta etapa será usado um forno localizado na parte superior à uma torre de puxamento, localizada no laboratório LaViE, com uma zona de aquecimento de aproximadamente 5 mm e com capacidade de atingir 1700 °C. O puxamento ocorrerá em temperaturas acima às de amolecimento dos vidros. Durante o processo de fabricação os vidros receberão um recobrimento polimérico a fim de aumentar a resistência mecânica da fibra ótica. Normalmente, estes são a base de acrilatos, no entanto podem ser substituídos por outros polímeros.

## **8. Caracterização óptica das pré-formas obtidas e das fibras magneto-ópticas:**

### **8.1. Espectroscopia de espalhamento Raman:**

Esta técnica irá auxiliar na investigação estrutural dos materiais obtidos, por meio da obtenção de espectros na região entre 100 e 4000  $\text{cm}^{-1}$ . A análise será feita em um espectrômetro Horiba Jobin Yvon operando com um laser de He-Ne em 632,8 nm, e os espectros Raman dos materiais preparados neste projeto serão obtidos na região entre 150 e 2500  $\text{cm}^{-1}$ .

### **8.2. Propriedades ópticas lineares:**

As propriedades ópticas lineares serão investigadas basicamente por:

- **Espectroscopia UV-Vis-NIR:**

Será usado um espectrofotômetro Varian Cary 5000 com varredura espectral entre 200 até 3300 nm, a fim de investigar absorções relativas às transições eletrônicas.

- **Espectroscopia na região do infravermelho:**

Esta técnica possibilitará a avaliação quanto à transparência na região, e atribuições dos principais modos vibracionais dos vidros e pré-formas. Este estudo será realizado usando um espectrômetro FTIR (Perkin Elmer), disponível em nosso laboratório.

- **Espectroscopia M-Lines,**

Esta técnica permitirá a determinação do índice de refração linear das pré-formas nos seguintes comprimentos de onda: 534, 632,8 e 1550 nm.

### **8.3. Microscopia:**

As fibras ópticas obtidas serão inicialmente caracterizadas através de um microscópio óptico ou microscopia eletrônica de varredura (MEV), para determinação da qualidade, tamanho do núcleo, diâmetro total da fibra e disposição.

### **8.4. Caracterizações das propriedades Magneto-ópticas:**

#### **8.4.1. Rotação Faraday:**

O objetivo do experimento de rotação Faraday é determinar o ângulo de rotação ( $\theta$ ) da luz plano polarizada que atravessa uma amostra (vidros ou fibras ópticas), sob a influência de um campo magnético externo aplicado ao sistema. O conhecimento do ângulo de Rotação Faraday ( $\theta$ ) e o cálculo do valor da constante de Verdet ( $V_B$ ) são extremamente importantes, pois será possível determinar o efeito magneto ótico dos vidros e fibras preparados no presente projeto. Resumidamente, o sistema é formado por um solenoide conectado a um sistema de variação de corrente elétrica e voltagem que induz um campo magnético com valor máximo de 0,130 T. A calibração do setup de rotação Faraday é feita a partir das medidas dos ângulos ( $\theta$ ) do padrão comercial TGG ( $V_B = -134 \text{ rad T}^{-1} \text{ m}^{-1}$ )

## **7. Referências:**

[1] J., E. Lenz, IEEE, 78, 1990, 973–989,

[2] C. Liu; T. Shen; H. B. Wu; Y. Feng; J. J. Chen, Opt. Fiber Technology 65, 2021,1-19

- [3] J. Ascorbe; J. M. Corres. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 269–299.
- [4] K. Linganna, S. Ju; Y. Lee; W. Han, J. Mat. Sci.: Mat.Elect., 30, 2019, 12790–12795
- [5] Q. Guo, J. Wen, Y. Huang, W. Wang, F. Pang, Z. Chen, Y. Luo, G-D. Peng, T. Wang, Measurement, 2018.
- [6] M. A. Schmidt, L. Wondraczek, H. W. Lee, N. Granzow, N. Da, P. S. J. Russel, Adv. Mater., 23, 2011, 2681 – 2688.
- [7] J. C. Suits, IEEE Trans. Magn., 8, 1972, 95.
- [8] C. B. Pedroso, E. Munin, A. B. Villaverde, J. A. M. Neto, N. Aranha, L. C. Barbosa, Opt. Eng., 38, 1999, 214 – 219.
- [9] Q. Chen, H. Wang, Q. Wang, Q. Chen, Appl. Phys. A, 120, 2015, 1001-1010.
- [10] Y. Ruan, R. A. Jarvis, A. V. Rode, S. Madden, B. Luther-Davies, Opt. Commun., 252, 2005, 39 – 45.
- [11] H. Akamatsu, K. Fujita, S. Murai, K. Tanaka, Appl. Phys. Lett., 92, 2008, 1 - 4.
- [12] Z. Chunxiang, Y. Hairong, L. Liying, T. Baojun, Mater. Rev., 11, 2008
- [13] Franco, D. F.; Manzan, R. S.; Orives, J. R.; Nalin, M.; Agência Unesp de Inovação (AUIN), Patente código INPI: BR 10 2019 027220 1, (depósito 19/12/2020).
- [14] Franco, D. F.; Ledemi, Y.; Correr, W.; Morency, S.; Afonso, C. R. M.; Messaddeq, S. H.; Messaddeq, Y.; Nalin, M.; Sci. Rep, 11(1), 1–16 (2021).
- [15] D. Manzani, Y. Ledemi, I. Skripachev, Y. Messaddeq, S. J. L. Ribeiro, R. E. P. de Oliveira, C. J. S. de Matos, Opt. Mater. Express, 1, 2011, 1515-1526.
- [16] Rosolem, J. B.; Chilloce, E. F.; Froridia, C.; Ghezzi, E. O.; Franco, D. F.; Bassan, F. R.; Lodi, T. A.; Nalin, M.; Júnior, J. R. N.; França, M. F., SBMO/IEEE (IMOC) Sens. J., pp. 40–42, 2023.
- [17] Gao, G. Winterstein-Beckmann, A. Surzhenko, O. Dubs, C. Dellith, J. Schmidt, M.A. Wondraczek, L., Sci Rep 5 (2015).