

**CONEM 2016**  
CONGRESSO NACIONAL DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

**21-25**  
**AGOSTO DE 2016**  
**FORTALEZA - CEARÁ**

## **SENSOR DE FORÇA UTILIZANDO FIBER TAPER**

**Felipe Bueno Hernandez, bueno\_hernandez@hotmail.com**

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Mecânica, Avenida Trabalhador Sancarlenense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590

**Resumo:** Este trabalho teve por objetivo desenvolver e caracterizar um sensor de força utilizando uma fibra óptica modificada pelo processo conhecido como Fiber tapering. A fibra quando modificada deixa exposto o campo evanescente, o que a torna sensível a influências externas, e a luz guiada na fibra pode vir a sofrer reflexão interna total frustrada ao entrar em contato com materiais. Ao envolver a região modificada por um material elastomérico, a área de contato e consequentemente a atenuação torna-se uma função da intensidade da força aplicada, possibilitando então relacionar a força a atenuação da luz. Baseando-se nesse efeito, foi criado um sensor de dimensões reduzidas, de rápida resposta, linear, altamente sensível e de boa repetibilidade. Foi criado também um circuito eletrônico utilizando amplificadores operacionais para a aquisição e processamento do sinal proveniente da fibra e selecionado um sensor comercial comum para a realização de experimentos e comparações. Ambos os sensores foram posicionados sobre uma balança de precisão e submetidos a diversos esforços obtendo-se dados sobre a resposta estática. Em seguida utilizando um shaker eletrodinâmico foram medidos os tempos de resposta a uma entrada degrau, e realizando esforços repetitivos foram analisados os desvios das medidas lidas pelos sensores. Com o sensor criado foi possível medir até 1 grama, o  $R^2$  calculado foi de 0,9978 e o tempo de resposta foi estabelecido como inferior a 2 ms.

**Palavras-chave:** Fiber taper, Sensor de força, Onda evanescente, Reflexão interna total frustrada, Sensor de fibra óptica.

### **1. INTRODUÇÃO**

Em diversas áreas de estudo são necessários sensores que reproduzam um papel semelhante ao dos cinco sentidos nos seres vivos. Com o crescente interesse em sensores que forneçam informações sobre o contato físico, é possível observar sua necessidade em diversas áreas da engenharia, medicina e principalmente no encontro das duas onde se tem a reabilitação robótica, membros próstéticos entre outros.

Pela complexidade do tato, encontram-se inúmeros desafios na implementação de sensores de força, especialmente devido à dificuldade em empregar materiais e configurações que atendam aos requisitos necessários e forneçam as mesmas possibilidades de um sistema criado pela própria natureza. Mesmo havendo diversos tipos hoje em dia, tem-se em sua maioria sensores volumosos, caros e não duráveis.

Estudos recentes por Massaro *et al.* (2010) propõem um modelo de sensor óptico utilizando *Fiber taper* e o efeito de frustração da reflexão interna total causado pelo acoplamento eletromagnético entre a fibra e um material elastomérico composto por nanopartículas. Essa interferência produz então uma perturbação na transmissão da luz acoplada na fibra, o que possibilita estabelecer uma relação entre a intensidade da força exercida no sistema, causando compressão entre os materiais, e a diminuição na transmissão da luz, caracterizando então um método transdutor.

Essa proposta de sensor óptico traz as características relevantes comuns aos sensores de fibra, como imunidade à interferência eletromagnética, alta sensibilidade e resposta rápida, porém seu princípio de funcionamento se destaca quando comparado aos outros tipos de sensores ópticos de força pelo fato de também possuir dimensões reduzidas.

Embora o sensor proposto no artigo base deste trabalho seja uma inovação, dificuldades são encontradas devido à complexidade de se desenvolver um material elastomérico nanocomposto e também ao alto custo de criação dado que as nanopartículas são do material ouro.

O ouro foi escolhido para a criação das nanopartículas pois é inerte e não sofre ação do tempo, porém é possível estudar o emprego de outros metais e também até mesmo a eliminação das nanopartículas modificando o princípio de funcionamento do sensor, mas ainda com base nos mesmos princípios físicos.

Para tanto, baseando-se nessa ideia, surge a oportunidade de uma aprimoração e simplificação do sensor proposto no artigo que mantenha suas qualidades, objetivo principal do desenvolvimento desse trabalho.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fibra óptica é um guia de onda dielétrico feito de materiais vítreos ou poliméricos e seu princípio de funcionamento se baseia no fenômeno da reflexão interna total, causado pela diferença do índice de refração entre o núcleo e casca, fazendo com a que luz seja guiada sofrendo inúmeras reflexões na fronteira entre os dois materiais.

Embora comumente seja dito que a luz é guiada no núcleo, ela não se confina inteiramente no núcleo, quando a luz é guiada ela se acomoda parte no núcleo e parte penetra na casca sendo denominado campo evanescente.

Fibras ópticas são projetadas para terem o mínimo de perdas e consequentemente um melhor desempenho em sistemas de comunicação.

Para que não haja grandes perdas, a casca que envolve o núcleo tem certo diâmetro mínimo para que o campo distribuído fora do núcleo não possa alcançar e entrar em contato com o meio externo, o que causaria a reflexão total interna frustrada e consequentemente a atenuação da luz guiada. Porém para aplicações onde se usa a fibra como sensor é fundamental que haja uma interação entre o campo e o meio externo, por isso é necessária a realização de um processo de modificação do guia de onda conhecido na literatura como *Fiber tapering*.

*Fiber tapers* podem ser criados a partir de fibras ópticas, com o intuito de modificar as características de propagação da fibra e o acoplamento eletromagnético da luz. Entre diversos métodos, o mais utilizado para se produzir um *Fiber taper*, baseia-se em esticar a fibra óptica longitudinalmente por ambos os lados, e utilizando uma chama como visto em diversos trabalhos (Birks and Li, 1992; Ogawa, 2011 e Harun *et al*, 2013) produz-se um aquecimento da ordem do ponto de fusão da fibra. Com a alta temperatura e a diminuição da viscosidade a fibra pode então ser esticada formando um pequeno afunilamento do núcleo e da casca, dando origem ao *Fiber taper*.

Ao realizar a modificação de uma fibra óptica fica exposto o campo evanescente, e ao acoplar um feixe de luz e guiá-lo na fibra, caso a região modificada entre em contato com materiais absorvedores ou de índices de refração da ordem de grandeza próxima a da fibra, haverá uma atenuação perceptível da luz guiada como demonstrado na Fig. 1.

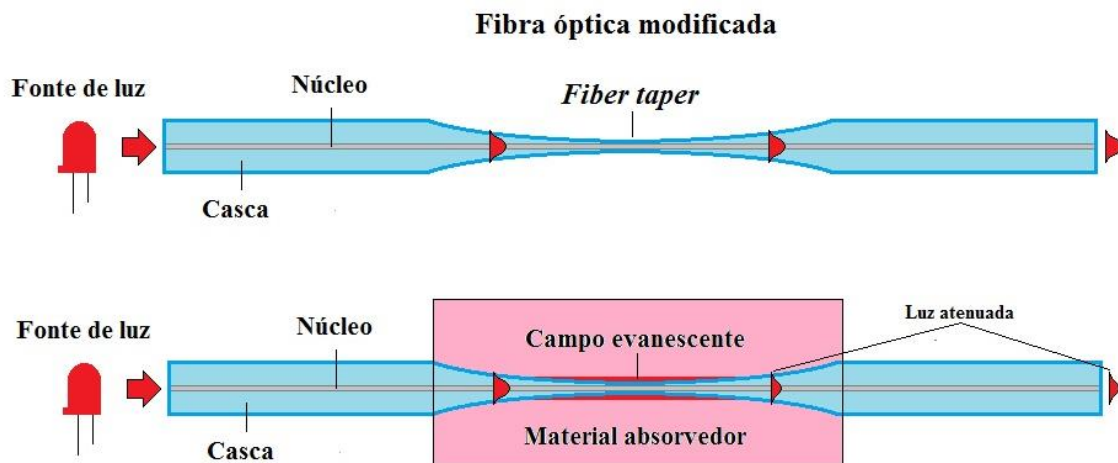


Figura 1. Atenuação da luz ao envolver o *Fiber taper* por um material absorvedor

É possível então desenvolver diversos tipos de sensores para realizar a análise de características do meio que envolve a região da fibra modificada como é possível ver em diversos trabalhos (Gupta, Dodeja, and Tomar, 1996; Kieu and Marsupipur, 2006 e Tian *et al*, 2011).

Utilizando uma modificação da teoria de Beer-Lambert apresentada por (Gupta, Dodeja, and Tomar, 1996) aplicada a sensores de concentração utilizando fibras ópticas, é possível saber que a intensidade da luz guiada na fibra após sua passagem pela região do sensor é dada pela Eq. (1).

$$P = P_o e^{-(\gamma.L)} \quad (1)$$

Sendo:

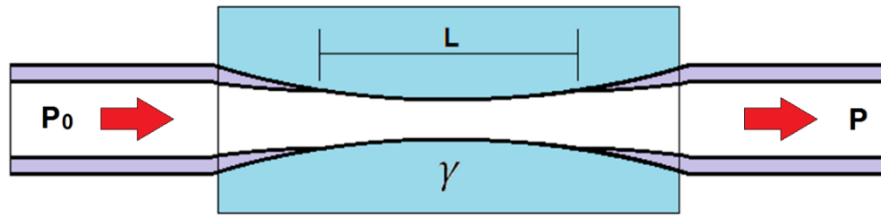
$P$  a potência da luz após atravessar a região absorvedora

$P_o$  a potência antes de atravessar a região

$\gamma$  o coeficiente de absorção evanescente

$L$  o comprimento da região exposta à absorção

Na Fig. 2 é demonstrado visualmente cada termo da equação.



**Figura 2. Representação do modelo da teoria de Beer-Lambert modificada.**

O coeficiente de absorção evanescente tem dependência tanto do formato do *Fiber taper* como dos índices de refração reais e imaginários da fibra e do material que envolve o sensor. O índice de refração se divide em duas componentes como pode ser visto na Eq. (2).

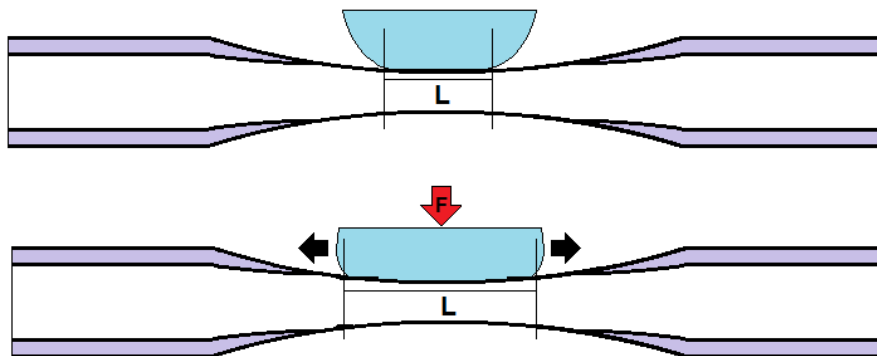
$$n^* = n + ik \quad (2)$$

Onde:

$n$  é o índice real, a mudança da velocidade de propagação em relação à velocidade no vácuo

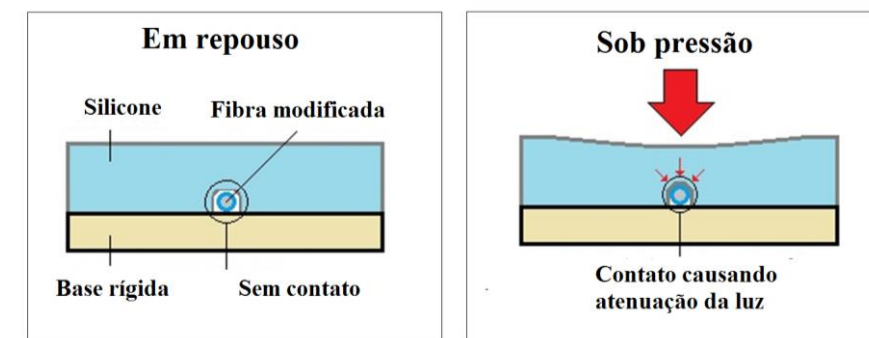
$k$  é o coeficiente de extinção, composto pela absorção e o espalhamento

No sensor proposto neste trabalho utilizou-se silicone industrial comum (sem modificações físico-químicas), onde pode-se afirmar que após a cura o coeficiente de absorção evanescente (formato, índice de refração e coeficiente de extinção) é constante. No entanto, é possível variar a atenuação da intensidade da potência alterando o comprimento da região exposta à absorção como demonstrado na Fig. 3.



**Figura 3. Representação da variação da área de contato do silicone com o *Fiber taper*.**

É possível criar esta condição, depositando levemente silicone sobre o *Fiber taper*, de modo que fiquem no limiar de contato, e caso seja rompido causará reflexão total interna frustrada como demonstrado na Fig. 4.



**Figura 4. Representação da pressão causando contato e atenuação da luz.**

Com a aproximação do silicone à região do *Fiber taper* o campo evanescente entra em contato com o silicone e tem-se uma atenuação que aumenta gradativamente até o contato com a própria fibra, causando a frustração da reflexão interna total, e à medida que há o aumento da deformação tem-se uma área superficial cada vez maior em contato com o

silicone. Diferentes níveis de força exercida resultam em diferentes níveis de atenuação na transmissão da luz acoplada na fibra e essa atenuação pode ser medida e relacionada então com a força agindo sobre o sensor, criando assim o sensor desenvolvido neste trabalho.

### 3. MONTAGEM DO SENSOR PROPOSTO

A fibra utilizada para se criar o sensor é uma fibra comum de PMMA, de 0,5mm (SZ-500 – Syzfiber), este tipo de fibra foi escolhido devido à robustez e a facilidade de alcançar a temperatura para a diminuição da viscosidade.

Para realizar o processo, a fibra foi fixada em um suporte móvel acoplado a um paquímetro e foi dado início ao aquecimento. Primeiro mantém-se o soprador térmico estático a uma pequena distância aquecendo a região principal do *taper* e após uma diminuição visível da cintura, desloca-se de maneira oscilatória o fluxo de ar com o intuito de criar uma região maior de aquecimento e mantendo o diâmetro da cintura criada anteriormente. Para se criar forças longitudinais que causem estiramento da fibra translada-se continuamente o suporte móvel. Seguindo este passo a passo, foi obtida uma amostra com cintura de 0,15 e um acréscimo de  $L=10\text{mm}$  na amostra.

Na Fig. (5) é possível ver uma comparação vista por microscópio da cintura e a região não modificada com magnificação de 4x.

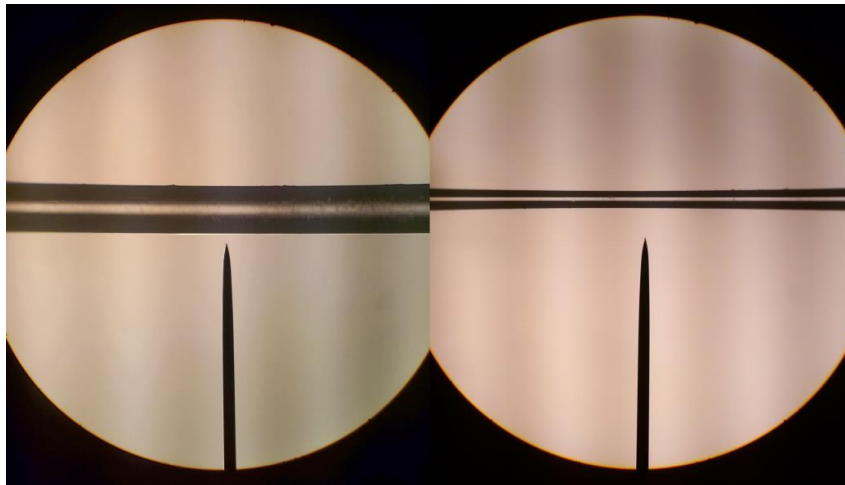


Figura 5. Comparação da fibra comum com o Fiber taper pelo microscópio com magnificação de 4x.

(Gupta, Dodeja, and Tomar, 1996) demonstram que um *Fiber taper* quando empregado a sensores, ao ser curvado adquire um aumento considerável de sua sensibilidade, isso é causado pelo fato de que com a curvatura há uma mudança da angulação de incidência da luz fazendo com que haja rompimento do ângulo crítico para certos modos. Com a curvatura da fibra há aumento da angulação da incidência e consequentemente um aumento da profundidade de penetração do campo evanescente, o que resulta em um aumento significativo da sensibilidade a interferências do campo evanescente.

Ao realizar um simples experimento na Fig. 6 comparando as variações de potência luminosa transmitida pela fibra com o *Fiber taper* curvado e o não curvado ao serem envoltos por água, pode se ver claramente que o *Fiber taper* quando curvado se torna mais sensível, como é possível ver por medições na Tab. 1. Por esse motivo foi empregada essa característica no sensor proposto.

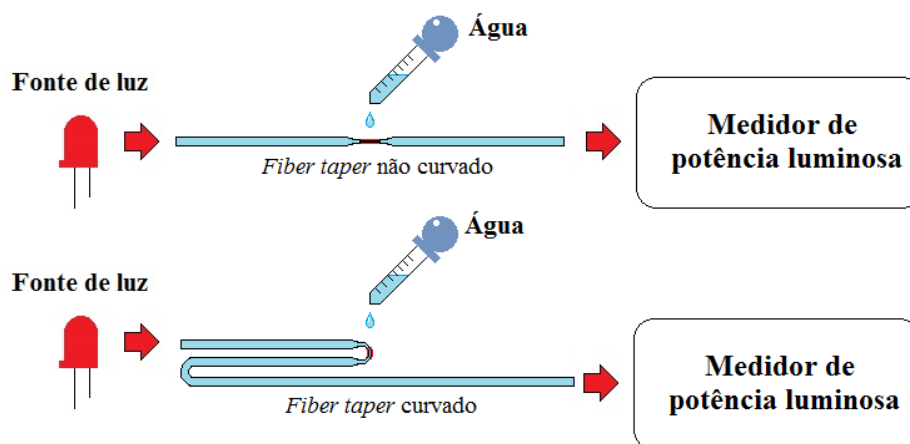


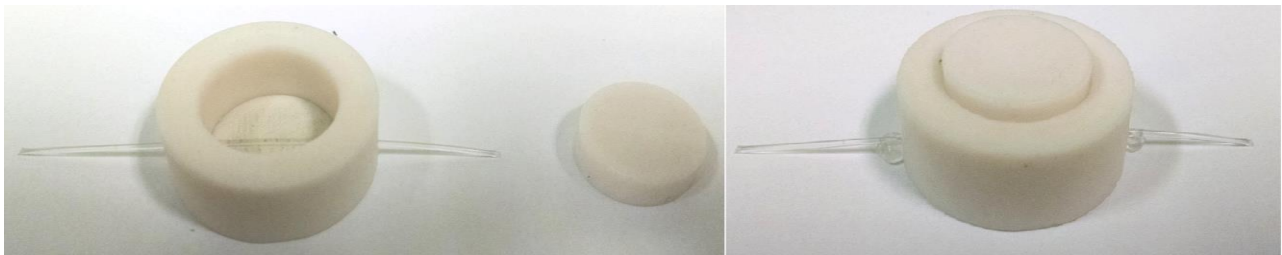
Figura 6. Representação do experimento da sensibilidade do *Fiber taper* à curvatura

**Tabela 1. Comparação das atenuações entre a configuração comum e curvada.**

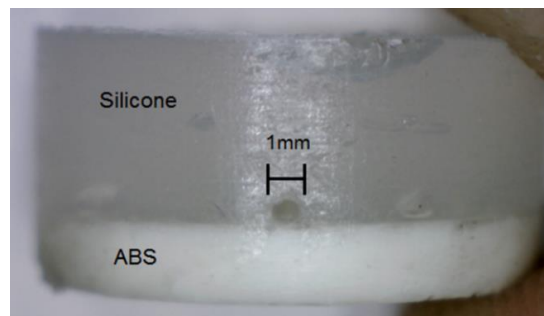
| Configuração               | Medida sem interferências | Medida com água | Variação |
|----------------------------|---------------------------|-----------------|----------|
| <i>Fiber taper</i> comum   | 5,395 mW                  | 4,679 mW        | 86,70%   |
| <i>Fiber taper</i> curvado | 4,123 mW                  | 1,7924 mW       | 43,40%   |

#### 4. MONTAGEM DO SENSOR PROPOSTO

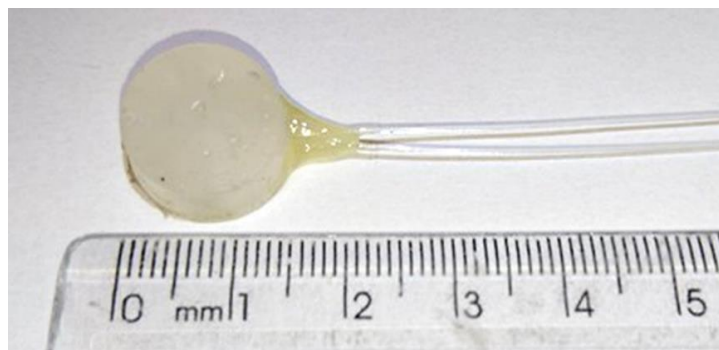
Foi projetado e usinado na oficina mecânica do Instituto de física de São Carlos (IFSC) um molde externo e um disco feitos de PTFE (politetrafluoretileno, conhecido comercialmente como teflon), este material foi escolhido pois é antiaderente e isso facilita a remoção do sensor. O disco base do sensor, onde a fibra e o silicone foram fixados foi feito de plástico ABS (acrilonitrila butadieno estireno) comum e foi prototipado a impressora 3D disponível no LAT. Para a criação da tampa que cobre o *Fiber taper* foi escolhido um silicone acético comum, de baixo custo e dureza Shore A (15). No processo foi fixado um pedaço de fibra óptica comum de 1mm de diâmetro no molde, encaixando o nos canais como é possível ver na Fig. 7. Em seguida após o silicone ter sido depositado no molde foi feita pressão com o disco de PTFE para acomodação do material e dado um período de 2 dias para a secagem como é possível ver na Fig. 7.

**Figura 7. Foto do molde usinado aberto, e preenchido com silicone e fechado.**

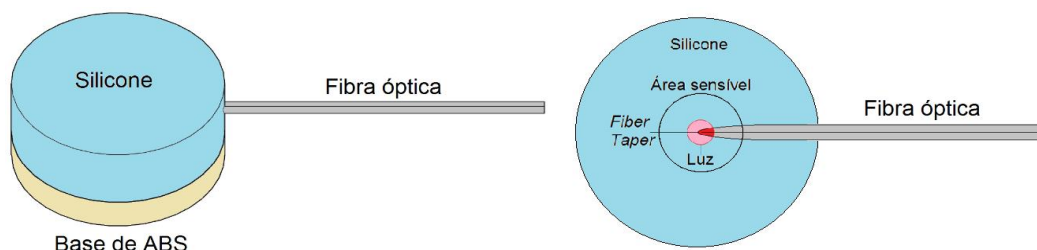
Após o enrijecimento do silicone e a retirada das peças de dentro do molde foi obtida a base do sensor. Ao remover a fibra óptica há a criação de um canal de 1mm na qual será inserida a fibra como demonstrado na Fig. 8.

**Figura 8. Base do sensor vista por microscópio**

Após a inserção do *Fiber taper* curvado e a fixação da fibra na base está pronto o sensor para testes como demonstrado na Fig. 9.

**Figura 9. Sensor de força utilizando *Fiber taper*.**

Na Fig. 10 é possível entender melhor o sensor obtido como resultado.



**Figura 10. Representação do sensor obtido e representação da vista superior.**

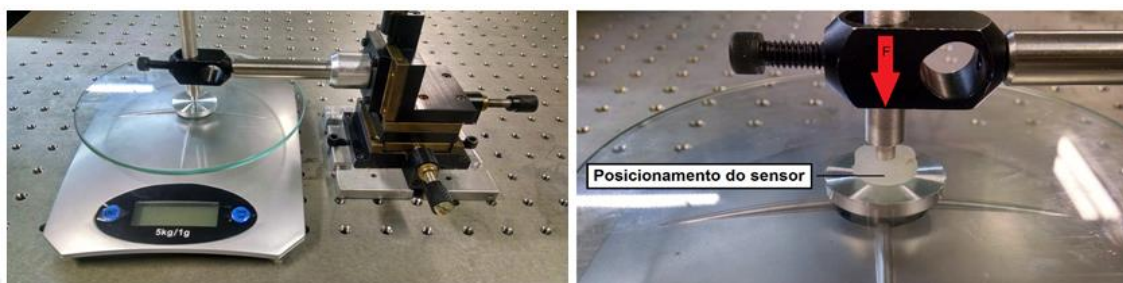
## 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Quando atuando com sistemas de medição é necessário ter prévio conhecimento das características de trabalho dos sensores para que seja feita uma coleta de dados confiável para a aplicação. Essas características são geralmente disponibilizadas nas folhas de dados (*datasheets*), documento que possui as características técnicas de funcionamento do sensor. Com o intuito de realizar uma comparação qualitativa entre o sensor desenvolvido e sistemas comuns utilizados nos dias de hoje, foi escolhido um *Force sensing resistor comum* (FSR 402) e três características definidas em documentos de metrologia; sensibilidade, faixa de operação e tempo de resposta.

### 5.1. Sensibilidade

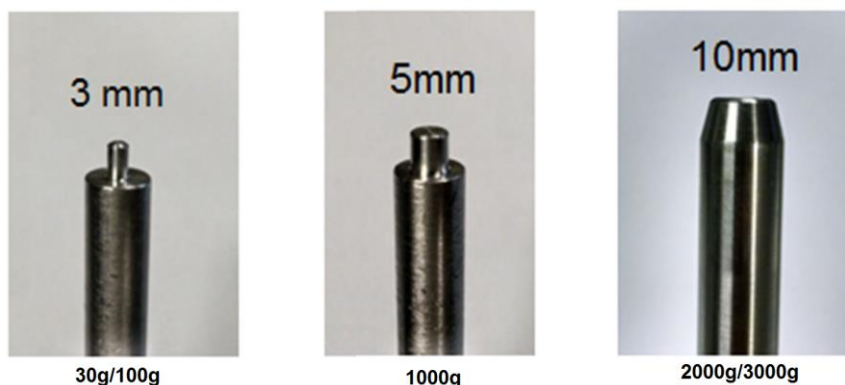
Para que fosse feita uma análise precisa foi utilizado um sistema composto por um estágio de translação XYZ e uma balança de precisão de até um grama. O estágio de translação XYZ é um equipamento dotado de 3 parafusos que fazem a movimentação nos três eixos com precisão micrométrica. Utilizando sua movimentação no eixo vertical disposta a modo que a movimentação force uma ponteira contra a amostra posicionada em cima da balança é possível então exercer diversos níveis de força sobre a amostra e ter o valor de peso lido na balança como referência.

Foi fixado o estágio de translação na mesa óptica como pode ser visto na Fig. 11, as amostras foram posicionadas na bandeja da balança e foram utilizados 3 tipos ponteiros (Fig. 12) de diâmetros diferentes para realizar as aquisições exercendo um esforço vertical nos sensores sobre a balança.



**Figura 11. Posicionamento do sensor sobre a balança de precisão.**

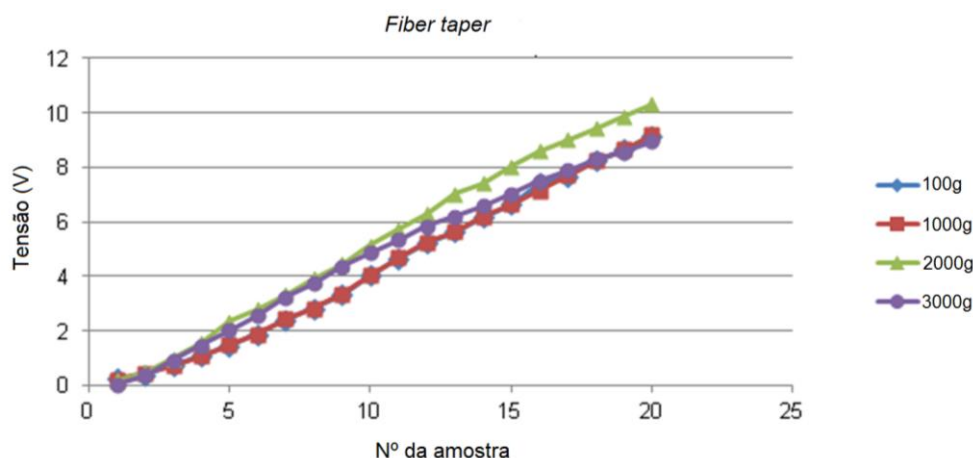
Para a escala de força de 30g e 100g foi utilizada a ponta de 3mm, para a escala de 1000g foi utilizada uma ponta de 5mm e para escalas maiores foi utilizada a ponta de 10mm.



**Figura 12. Foto das pontas utilizadas no experimento.**

Com o intuito de analisar a sensibilidade dos sensores, além de diferentes escalas também houve o interesse em analisar os limites de resposta dos sensores, para isso foi ajustado o ganho do circuito de medição para que o limite superior de cada escala ficasse próximo do valor máximo possível de ser medido pela placa de aquisição, obtendo-se assim uma melhor precisão nas medidas.

Unindo todas as retas obtidas nos experimentos ajustando o valor máximo da escala é possível notar que o sensor de *Fiber taper* responde de maneira aproximadamente linear como mostra a Fig. 13.



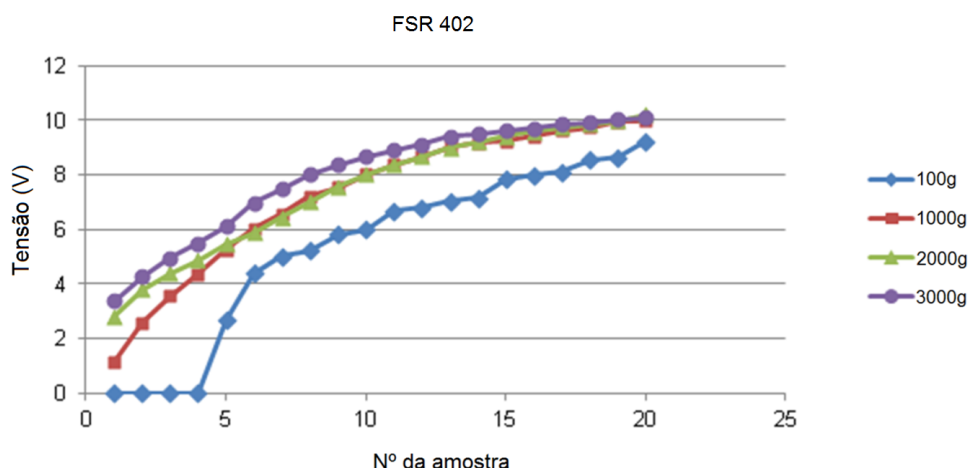
**Figura 13. Junção de todas as retas obtidas do sensor *Fiber taper*.**

A partir das medições foi possível determinar aproximadamente a seguinte sensibilidade do sensor para cada reta, que pode ser vistas na Tab. 2.

**Tabela 2. Comparação das atenuações entre a configuração comum e curvada.**

|       | Sensibilidade |
|-------|---------------|
| 100g  | 99,7mV / g    |
| 1000g | 9,9mV / g     |
| 2000g | 5,6mV / g     |
| 3000g | 3,2mV / g     |

Unindo todas as retas obtidas nos experimentos ajustando o valor máximo da escala é possível notar que o *Force sensing resistor* responde de maneira aproximadamente logarítmica como mostra a Fig. 14.



**Figura 14. Junção de todas as curvas obtidas do *Force Sensing Resistor*.**

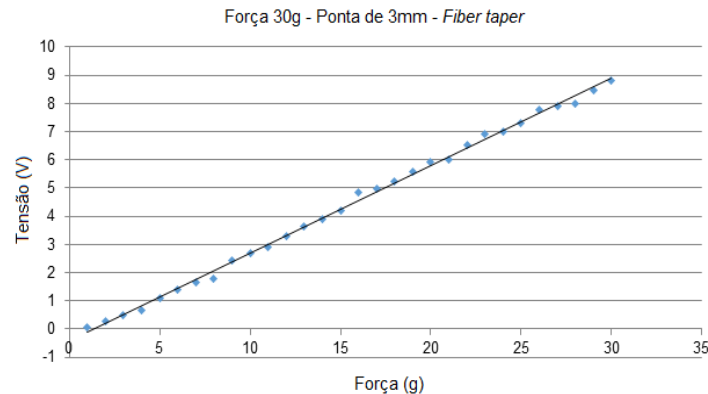
Para identificar a sensibilidade do *Force sensing resistor* foram calculadas diversas sensibilidades entre as medidas vizinhas devido à sua resposta não linear, as medidas foram divididas entre quatro grupos iguais como pode ser visto na Tab. 3.

**Tabela 3. Comparação das atenuações entre a configuração comum e curvada.**

|       | $\Delta s1$ | $\Delta s2$ | $\Delta s3$ | $\Delta s4$ |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 100g  | 169mV / g   | 10,2mV / g  | 6,58mV / g  | 4,57mV / g  |
| 1000g | 66,4mV/g    | 4,93mV / g  | 5,29mV / g  | 2,85mV / g  |
| 2000g | 63,5mV / g  | 2,15mV / g  | 2,56mV / g  | 1,19mV / g  |
| 3000g | 75mV / g    | 1,47mV / g  | 1,52mV / g  | 678uV / g   |

### 5.2. Limite mínimo e máximo da faixa de operação

Utilizando o sensor com o *Fiber taper*, foi possível medir até 1 grama, como é possível ver na Fig. 15.

**Figura 15. Junção de todas as curvas obtidas do Force Sensing Resistor.**

Na Tab. 4 é possível ver o modelo linear, o  $R^2$  calculado e a sensibilidade da reta.

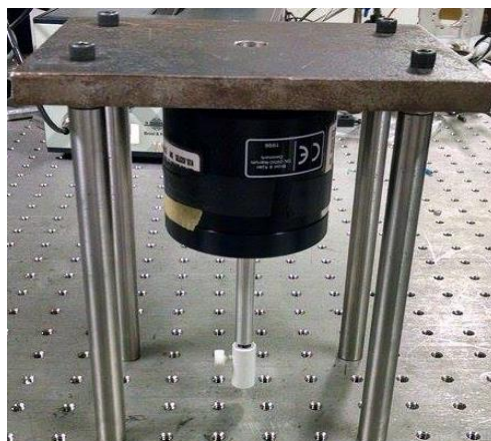
**Tabela 4. Modelo linear,  $R^2$  calculado e sensibilidade da reta.**

| Modelo linear                 | $R^2$  | Sensibilidade |
|-------------------------------|--------|---------------|
| $V = 0,3098 \cdot g - 0,4121$ | 0,9978 | 300 mV/g      |

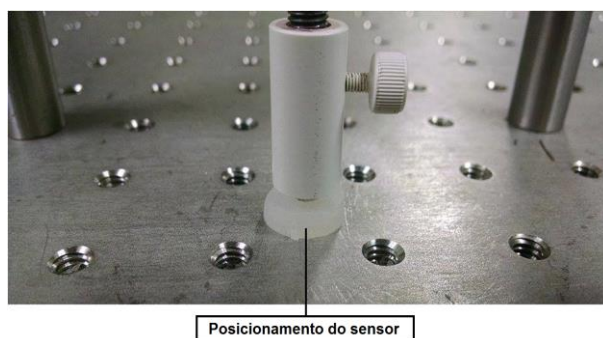
Utilizando o *Force sensing resistor*, não foi possível obter medições de níveis tão baixos devido à instabilidade.

### 5.3. Tempo de resposta

Para que a caracterização do tempo de resposta dos sensores, foi utilizado um *mini shaker* modelo 4810 fabricado pela empresa Brüel & Kjær cedido pelo Laboratório de Dinâmica (LabDin) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). O *mini shaker* foi posicionado invertido preso em um suporte feito por uma placa de ferro de 2Kg, essa placa foi sustentada por 4 colunas de alumínio e a base das colunas foram fixadas na mesa óptica como demonstrado na Fig. 16.

**Figura 16. Mini shaker fixado invertido.**

O suporte vibratório foi dotado de um parafuso com uma ponteira feita de PVC de 3mm com rosca para que possam ser utilizadas diversas alturas. Os sensores foram fixados então logo abaixo em contato com a ponteira como pode ser visto na Fig. 17.



**Figura 17. Posicionamento do sensor sob o Mini shaker.**

Para ser determinada a resposta, foi definido o tempo inicial da medição como partindo de 10% e o tempo final como 90% do valor final de acomodação e vice-versa, caracterizando então um tempo de subida e descida. Adquirindo simultaneamente a saída do gerador de sinais gerando uma onda quadrada de 10 Hz com 2,4 Volts de amplitude e desconectando os capacitores que realizam a filtragem dos sensores foram obtidas as respostas vistas na Tab. 5.

**Tabela 5. Medições do tempo de subida e descida do *Fiber taper* e do *Force sensing resistor*.**

| Tempo de reposta do <i>Fiber taper</i>             |            |           |                  |            |           |
|----------------------------------------------------|------------|-----------|------------------|------------|-----------|
|                                                    | Tensão (V) | Tempo (s) |                  | Tensão (V) | Tempo (s) |
| 10%                                                | 0,24       | 3,539     | 10%              | 0,24       | 3,59      |
| 90%                                                | 2,16       | 3,557     | 90%              | 2,16       | 3,606     |
| Tempo de subida                                    |            | 0,018     | Tempo de descida |            | 0,016     |
| Tempo de resposta do <i>Force sensing resistor</i> |            |           |                  |            |           |
|                                                    | Tensão (V) | Tempo (s) |                  | Tensão (V) | Tempo (s) |
| 10%                                                | 0,24       | 3,573     | 10%              | 0,24       | 3,622     |
| 90%                                                | 2,16       | 3,592     | 90%              | 2,16       | 3,64      |
| Tempo de subida                                    |            | 0,019     | Tempo de descida |            | 0,018     |

Para realizar o primeiro experimento foi desconsiderado o tempo de resposta do próprio *mini shaker*, porém é possível notar-se que ele não é desprezível pelo alto valor (visto na Tab. 6) medido do tempo de resposta e necessita a devida atenção.

**Tabela 6. Medições do tempo de subida e descida do *Mini shaker*.**

| Tempo de resposta do <i>Mini Shaker</i> |            |           |                  |            |           |
|-----------------------------------------|------------|-----------|------------------|------------|-----------|
|                                         | Tensão (V) | Tempo (s) |                  | Tensão (V) | Tempo (s) |
| 10%                                     | 0,24       | 3,602     | 10%              | 0,24       | 3,655     |
| 90%                                     | 2,16       | 3,621     | 90%              | 2,16       | 3,671     |
| Tempo de subida                         | 0,019      |           | Tempo de descida | 0,016      |           |

Embora não tenha sido possível determinar com precisão os tempos de resposta pelas limitações da configuração e equipamentos escolhidos, é possível observar que ambos os sensores são extremamente rápidos em relação à resposta do *mini shaker*, fazendo com que a medição obtida seja a do próprio tempo de resposta do equipamento. É possível, no entanto delimitar que o tempo de resposta dos sensores é inferior a 2ms como estabelecido no manual do sensor comercial.

## 6. CONCLUSÃO

Verificou-se que o sensor com *Fiber taper* possui uma resposta quase linear e o FSR 402 responde de maneira aproximadamente logarítmica. Foi concluído que o sensor com *Fiber taper* responde a valores de força de até 1 grama enquanto o FSR 402 não pôde ser medido, embora esteja definido no manual como aproximadamente 15g. Embora o

valor máximo de força utilizado em experimentos foi 3Kg, o valor máximo de força suportado pelo FSR 402 está definido na no manual como 10Kg. O máximo valor medido utilizando o sensor de *Fiber taper* foi de também 3Kg, porém esse valor foi delimitado com o intuito de evitar danos ao sensor.

Observou-se que os sensores possuem tempo de resposta relativamente próximos e pela limitação causada pela escolha dos materiais e métodos não foi possível determinar com precisão, no entanto foi definido como inferior a 2ms, valor pré-estabelecido no *datasheet* do FSR 402.

## 7. AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Frederico Dias Nunes, ao Prof. Dr. Daniel Varela Magalhães, ao Prof. Dr. Glauco Augusto de Paula Caurin, ao Prof. Dr. Vanderlei Salvador Bagnato, ao Centro de Pesquisas de Ótica e Fotônica do Instituto de Física de São Carlos e à Escola de Engenharia de São Carlos.

## 8. REFERÊNCIAS

- Massaro, A., Spano, F., Cazzato, P., Cingolani, R. and Athanassiou, A., 2011, "Real time optical pressure sensing for tactile detection using gold nanocomposite material", *Microelectronic Engineering*. Vol. 88, No. 8, pp. 2767-2770.
- Gupta, B. D., Dodeja, H. and Tomar, A. K., 1996, "Fibre-optic evanescent field absorption sensor based on a U-shaped probe", *Optical and Quantum Electronics*. No. 28, pp. 1629-1639.
- Birks, T. A. and Li, Y. W., 1992, "The shape of Fiber tapers", *Journal of Lightwave Technology*. Vol. 10, No. 4, pp. 432-438.
- Ogawa, Y., 2011, "Method of fabricating high transmission optical tapered fiber", *Annual report on research activities in Tanabe Photonic Structure Group, Keio University*. Vol. 1, pp. 6-8.
- Harun, S. W., Lim, K. S., Tio, C. K., Dimyati, K. and Ahmad, H., 2013, "Theoretical analysis and fabrication of tapered fiber", *Optik. International Journal for Light and Electron Optics*. Vol. 124, No. 6, pp. 538-543.
- Kieu, K. Q. and Mansuripur, M., 2006, "Biconical Fiber taper sensors", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 18, No. 21/24, pp. 2239-2241.
- Tian, Y., Wang, W., Wu, N., Zou, X. and Wang, X., 2011, "Tapered optical fiber sensor for label-free detection of biomolecules", *Sensors*, Vol. 11, No. 4, pp. 3780-3790.

## 9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O autor é o único responsável pelo conteúdo deste trabalho.

# FIBER TAPER BASED FORCE SENSOR

Felipe Bueno Hernandez, [bueno\\_hernandez@hotmail.com](mailto:bueno_hernandez@hotmail.com)

São Carlos School of Engineering – University of São Paulo – Department of Mechanical Engineering, Avenida Trabalhador Sancarlenso, 400 - Parque Arnold Schimidt, São Carlos - SP, 13566-590

**Abstract.** The aim of this research was to develop and characterize a force sensor using a modified optical fiber by a process known as Fiber tapering. The modified fiber leaves the evanescent field exposed and prone to external influences and the guided light may suffer frustration of total internal reflection upon contact with materials. When covering the modified fiber section with an elastomeric material, the contact area and therefore the attenuation becomes a function of the applied pressure, making it possible to relate force to attenuation in light intensity. Based on this effect, a small sensor was created, having a quick response time, with high linearity, high sensitivity and good repeatability. Along with the sensor, an electronic circuit using operational amplifiers was designed for acquisition and processing of the signal obtained from the optical fiber. In addition, in order to perform experiments and comparisons, a standard force sensor was chosen. Both sensors were placed over a precision weighing scale and had different intensities of force applied on them, and after that, data regarding static measurements was gathered. The response time was obtained using an electrodynamic shaker and applying a step input. Furthermore, data was gathered about the deviations on the measurements by performing a repetitive set of compressions. The sensor was capable of measuring as low as 1 gram, the  $R^2$  calculated was 0,9978 and the response time was established as below 2 ms.

**Keywords:** Fiber taper, Force sensor, Evanescent wave, Frustrated total internal reflection, Optical fiber sensor.