

## 5

# Cavidades Fabry-Pérot no Interior de Fibras Ópticas

Sensores interferométricos utilizam-se de dois ou mais raios de luz viajando com diferentes caminhos ópticos, que interferem construtivamente ou destrutivamente. Ao alterar o caminho óptico de um feixe em relação ao outro, altera-se também as condições de interferência construtiva e destrutiva no sistema, o que é então utilizado para o sensoriamento.

O interferômetro de interesse neste trabalho é o interferômetro Fabry-Pérot, que é conhecido por permitir a passagem apenas de luz com comprimentos de onda específicos. Este interferômetro é formado por um material de faces planas e paralelas, disposto de forma transversal ao feixe luminoso, de forma que a luz é armadilhada no seu interior devido às reflexões nas suas faces. A luz armadilhada no material sofre múltiplas interferências, causando a eliminação de todos os comprimentos de onda que não interferem construtivamente.

O interferômetro Fabry-Pérot pode ser aplicado no desenvolvimento de sensores, uma vez que os comprimentos de onda correspondentes às interferências múltiplas mudam de acordo com o tamanho da região que define o interferômetro [16]. O conceito do interferômetro pode também ser aplicado em fibras ópticas através de criação de algum sistema que gere interferência na fibra, como, por exemplo, o uso de uma cavidade no interior da fibra.

Em 2012, Fernando Fávero e colaboradores (Tese de Doutorado [3]), no intuito de melhorar a sensibilidade dos sensores Fabry-Pérot a fibra, desenvolveram um método para a criação de cavidades de ar elipsoidais no interior de fibras ópticas. Estas fibras com cavidades elípticas foram testadas quanto a sua sensibilidade a deformações, mostrando-se mais sensíveis que outros sensores a fibra baseados em cavidades Fabry-Pérot. Além do mais, estas cavidades FP apresentam uma baixa sensibilidade térmica ( $\sim 1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ).

Para compreender melhor o funcionamento do sensor, foi desenvolvida uma simulação da deformação da cavidade ao se aplicar uma deformação na fibra que a contém. Este capítulo é dedicado ao entendimento dos interferômetros Fabry-

Pérot e à apresentação dos conceitos contidos na simulação da deformação da cavidade no interior das fibras.

### 5.1. O interferômetro Fabry-Pérot em fibra

O interferômetro Fabry-Pérot é constituído de um material de faces planas e paralelas com índice de refração  $n$  disposto transversalmente ao feixe luminoso (Figura 18). A luz que consegue penetrar no material é parcialmente refletida na segunda face do material. Esta luz refletida é parcialmente refletida na primeira face e retorna à segunda face, onde é novamente parcialmente refletida, e este processo continua indefinidamente.

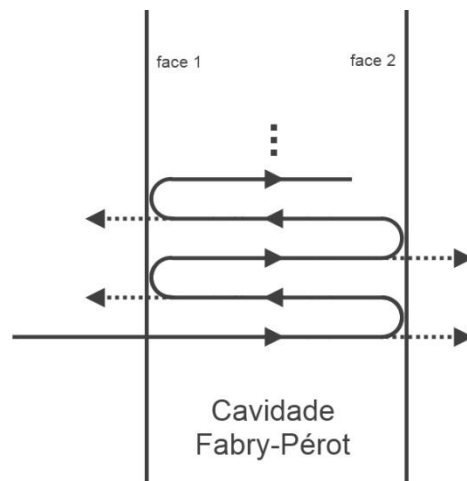


Figura 18 - Reflexões múltiplas no interior de uma cavidade Fabry-Pérot.

A luz que atravessa sem refletir atravessa um caminho óptico de comprimento  $nd$ , sendo  $n$  o índice de refração do material e  $d$  o comprimento da cavidade. A luz da segunda transmissão, que reflete uma vez na face 2 e uma na face 1, percorre um caminho óptico de comprimento  $3nd$ , a próxima transmissão percorre  $5nd$ , e a  $N$ -ésima transmissão percorre um caminho óptico de  $(2N - 1)nd$ . A diferença de caminho óptico entre duas transmissões consecutivas é sempre igual a  $2nd$  [17].

Como temos interferência entre diversos raios de luz que percorrem caminhos ópticos diferentes, somente os comprimentos de onda para os quais a interferência é construtiva irão sobreviver, ou seja,

$$\lambda_m = \frac{2nd}{m} \quad (14)$$

sendo  $m$  um número inteiro positivo.

Se houver uma variação  $\Delta d$  no tamanho da cavidade, haverá uma variação  $\Delta\lambda_m$  na posição dos comprimentos de onda que sobrevivem dada por

$$\Delta\lambda_m = \lambda_m \frac{\Delta d}{d} \quad (15)$$

No sensor interferométrico desenvolvido por Fernando e colaboradores [3], a cavidade Fabry-Pérot é formada por uma bolha de ar elíptica no interior da fibra, mostrada na Figura 19. Ao deformar a superfície sobre a qual a fibra está afixada, a cavidade de ar no interior da fibra também sofre uma deformação, alterando assim o comprimento da cavidade e, conseqüentemente, a posição dos comprimentos de onda de interferência construtiva.



Figura 19 - Imagens de microscópio óptico de três fibras com cavidades de ar usadas como sensor de deformação [3].

Para otimizar este sensor é necessário compreender como a bolha no interior da fibra se deforma ao aplicarmos uma deformação longitudinal na fibra, e é este o objetivo da simulação realizada.

## 5.2. Simulação da deformação da cavidade

Uma simulação da deformação da cavidade em função tração aplicada à fibra é importante no sentido de determinar os parâmetros iniciais do sistema (comprimento e tamanho da bolha) para os quais temos a otimização do sensor.

Para determinar a deformação da bolha supomos inicialmente que a pressão do ar dentro da bolha não contribui significativamente para sua deformação, somente as propriedades do vidro contribuem. Assim consideramos que o volume do  $V$  do vidro, na seção da fibra que contem a bolha, seja uma função da pressão e da temperatura da fibra ( $V = V(P, T)$ ), logo, uma variação infinitesimal deste volume ( $\delta V$ ) pode ser obtida como:

$$\delta V = \frac{\partial V}{\partial P} \delta P + \frac{\partial V}{\partial T} \delta T \quad (16)$$

Sabendo que o Módulo Volumétrico (também conhecido como Módulo de Bulk) é dado pela expressão  $K = -V \frac{\partial P}{\partial V}$ , e que a dilatação térmica (à pressão constante) é dada por  $\delta V = \gamma V \delta T$ , tem-se que a variação relativa do volume,  $\frac{\delta V}{V}$ , fica:

$$\frac{\delta V}{V} = -\frac{1}{K} \delta P + \gamma \delta T \quad (17)$$

Como a deformação é aplicada em temperatura ambiente sem qualquer proteção para evitar trocas de calor, a variação da temperatura no processo é muito pequena, além disso o coeficiente de dilatação térmica da sílica é muito pequeno ( $\gamma \approx 5,5 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), logo o produto  $\gamma dT$  se torna desprezível em comparação com  $\frac{1}{K} dP$ . Utilizando o Módulo de Young  $E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\Delta P}{\epsilon}$  (onde  $\sigma$  é a tração aplicada e  $\epsilon$  a deformação relativa), tem-se:

$$\frac{\delta V}{V} \approx -\frac{E}{K} \epsilon \quad (18)$$

Para efeito de cálculo vamos considerar que as cavidades de ar no interior das fibras possuem forma de um esferoide com comprimento total de  $2d$  e raio  $r$ . Desta maneira, o volume total de vidro da seção da fibra que contem a cavidade corresponde ao volume de um cilindro circular reto de raio  $R$  e comprimento  $2d$  menos o volume de um esferoide oblato (a cavidade) de raio  $r$  e comprimento  $2d$ , ou seja,

$$V = 2\pi d \left( R^2 - \frac{2}{3} r^2 \right) \quad (19)$$

A Figura 20 mostra um diagrama da cavidade na fibra óptica e seus tamanhos característicos.

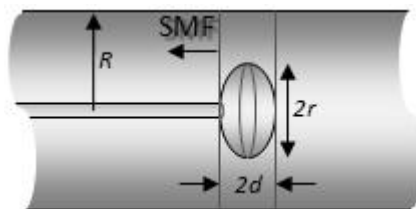


Figura 20 - Diagrama de um interferômetro Fabry-Pérot com cavidade esferoide posicionada numa extremidade de uma fibra monomodo (Single Mode Fiber – SMF).

A expressão da variação do volume do vidro pode ser encontrada tomando a diferencial do volume da região cilíndrica que contem a bolha menos o volume da bolha, ficando então

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{\delta d}{d} - \frac{4}{3} \frac{r \delta r}{\left(R^2 - \frac{2}{3}r^2\right)} \approx -\frac{E}{K} \varepsilon \quad (20)$$

Considerando que a bolha é pequena demais em relação ao comprimento da fibra para gerar uma alteração significativa em suas características, pode-se considerar que  $\varepsilon = \frac{\delta(2d)}{2d} = \frac{\delta d}{d}$  e, portanto, a expressão (20) pode ser manipulada de forma a obter:

$$\frac{\delta r}{\delta d} = \frac{3}{4} \left(\frac{E}{K} + 1\right) \left(\frac{R^2}{r^2} - \frac{2}{3}\right) \frac{r}{d} \quad (21)$$

A quantidade  $\frac{\delta r}{\delta d}$  está associada a uma mudança na excentricidade da elipse, ou seja, não se trata simplesmente de um aumento ou uma diminuição da bolha como um todo, mas de uma deformação da bolha.

A Figura 21 mostra dois gráficos referentes aos valores teóricos de  $\frac{\delta r}{\delta d}$  (equação (21)), um em função do parâmetro  $d$  para valores fixos de  $r$  e o outro como função do parâmetro  $r$  para valores fixos de  $d$ . As faixas de valores escolhidas estão de acordo com as fibras fabricadas e investigadas por Fávero [3] e os valores utilizados para as constantes foram  $E = 71,7$  GPa ,  $K = 36,5$  GPa e  $R = 62,5 \mu\text{m}$  , que são os valores correspondentes a uma fibra óptica monomodo padrão. Em ambos os gráficos notamos que cavidades menores, tanto em comprimento quanto em raio, apresentam uma deformação maior que cavidades maiores, o que indica que cavidades menores, de acordo com (15), devem possuir uma sensibilidade maior às deformações da fibra.

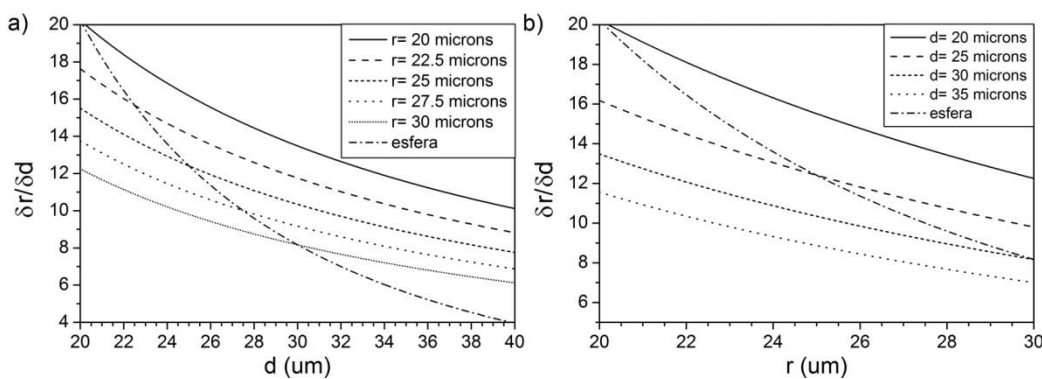


Figura 21 - Simulação da deformação de bolhas esferoidais e esféricas em fibra óptica (a) em função de seu comprimento para diferentes raios e (b) em função do raio para diferentes comprimentos.

A expressão (21) pode facilmente ser alterada para determinar a deformação de cavidades inicialmente esféricas, bastando fazer  $d = r$ , ficando então

$$\frac{\delta r}{\delta d} = \frac{3}{4} \left(\frac{E}{K} + 1\right) \left(\frac{R^2}{d^2} - \frac{2}{3}\right) \quad (22)$$

O gráfico de (22) também está apresentado na Figura 21 para facilitar a comparação com (21). Vemos que, nestas faixas de tamanho, bolhas esféricas apresentam uma deformação menor que as esferoides pequenas, implicando também em uma sensibilidade menor que as bolhas esferoides pequenas.