

3

Sensores de deformação e vibração com uma cavidade Fabry-Perot intrínseca a fibra.

Neste capítulo é feito uma breve revisão de interferômetros Fabry-Perot (FPI). Apresentaremos uma nova técnica de controle do comprimento dos FPI. Os FPI serão demonstrados como sensores de deformação e vibração.

As primeiras demonstrações dos interferômetros Fabry-Perot (por volta de 1975) foram feitas usando um meio transparente, com duas superfícies paralelas, também chamado de etalon. A luz penetrava em uma das faces do etalon e refletia sucessivamente dentro desse meio, resultando em um sinal de interferência da luz visível.

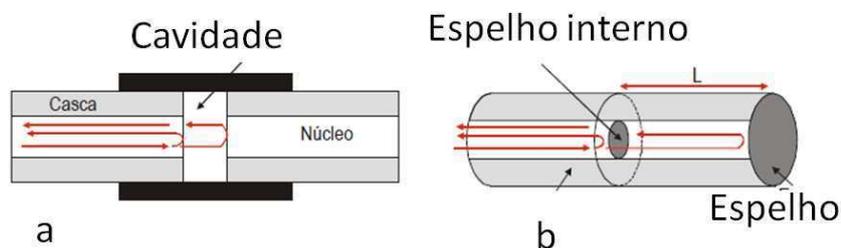


Figura 3.1: Esquema de dois FPI diferentes. a) FPI extrínseco e b) FPI intrínseco.

Esse mesmo conceito de interferências sucessivas foi aplicado em fibras ópticas. Os FPI a fibra são classificados em duas categorias: FPI extrínseco e FPI intrínseco. O FPI extrínseco é quando o FPI localiza-se fora da fibra óptica, como o exemplo da figura 3.1.a e o FPI intrínseco, como o exemplo da figura 3.1.b, é denominado assim pois consiste num FPI dentro da própria fibra óptica. Uma configuração para produzir um FPI consiste em obter uma cavidade entre a face de duas fibras, como mostra um esquema na figura 3.1.a. Esse tipo de interferômetro foi utilizado no ano de 1982, como sensor de temperatura e vibração [42]. Uma outra aplicação em que foi utilizado esse tipo de FPI, foi em medidas de deformação de concreto [43]. A deformação aplicada ao concreto produzia uma separação no FPI, modificando dessa forma

o sinal inicial. Outro tipo de FPI a ser mencionado, consiste em construir um interferômetro entre duas extremidades de uma fibra óptica espelhadas, como mostra a Fig. 3.1.b. Essa montagem foi produzida depositando um filme de prata numa extremidade da fibra e emendando a outra extremidade dessa fibra com um outro pedaço de fibra, no qual também foi realizada uma deposição de prata na extremidade, fazendo dessa forma, uma cavidade entre duas superfícies espelhadas na própria fibra. Essa configuração foi utilizada para medidas de deformação, como demonstrou T.Valis e colaboradores [44]. A deformação aplicada à fibra, produzia uma separação ainda maior entre os espelhos, mudando a fase entre os feixes de interferência, deslocando dessa forma o espectro do sinal refletido. Um outro exemplo de configuração FPI consiste na utilização de duas FBG fazendo, assim uma cavidade ressonante entre duas superfícies semi-espelhadas [45].

Existe ainda uma configuração similar às configurações anteriores, que consiste em emendar um pedaço de fibra multimodo entre duas fibras monomodo. Dessa forma é criada uma cavidade FP, devido à diferença nos diâmetros dos núcleos de ambas as fibras e a reflexão de fresnel entre as superfícies de cada fibra, formando-se assim um interferômetro. Esse dispositivo foi demonstrado como sensor de temperatura e deformação [46]. Outra configuração de FPI consiste na emenda de um pedaço de capilar entre duas fibras monomodo [47], para demonstração de um bio-sensor. Um FPI pode ser construído também, cavando-se uma cavidade numa fibra usando um laser de femtosegundo e fazendo um FPI entre duas superfícies planas de sílica [48]. Medidas de índices de refração para líquidos transparentes (álcool e acetona por exemplo) foram demonstradas com essa técnica, a qual consistia em colocar o líquido dentro da cavidade, e medir o deslocamento do sinal de reflexão do FPI.

O monitoramento de vibrações em grandes máquinas ou dutos de petróleo torna-se necessário devido às regras de segurança, ou até mesmo para diminuir os gastos ou diminuir o risco de acidentes. Um outro lugar onde monitoramento de vibrações se faz necessário acontece em regiões onde abalos sísmicos são frequentes, podendo, dessa forma, avisar com certa antecedência um terremoto ou um tsunami.

Uma maneira simples de construir um sensor de vibração consiste em usar uma lente na ponta de uma fibra separada por uma pequena distância de uma superfície refletora, constituindo dessa forma um FPI extrínseco [49, 50]. O dispositivo foi construído de tal forma que a superfície semi-refletora movia-se devido às perturbações externas (vibrações). Outro FPI usado para medir

vibração, já demonstrado, consiste num FPI intrínseco construído por um pedaço de fibra "hollow core" entre duas fibras SMF28 [51]. Neste caso, uma pequena massa foi colocada na extremidade do dispositivo, fazendo com que ele fosse sensível a pequenas vibrações.

Alguns trabalhos já foram realizados fazendo o uso de FBGs para sensoriamento de vibração [52, 53], entretanto, como já mencionamos, a alta dependência térmica das FBGs limita sua aplicação.

No ano de 2005, M. Kamata e colaboradores [54] apresentaram um sensor de vibração usando um guia de onda escrito com laser de femtosegundo. O guia de onda foi alinhado entre duas fibras ópticas, para que a luz fosse acoplada no guia por uma fibra e acoplada do guia para a outra fibra, posicionada na outra extremidade do guia. Dessa forma, a luz se propagava no guia, que foi montado sobre uma haste que era sensível a vibrações. Dessa maneira, foi possível monitorar a vibração pelo acoplamento e desacoplamento de luz. Recentemente, J. Albert e colaboradores [55] apresentaram um sensor de vibração independente de variações de temperatura usando uma FBG. A FBG foi escrita de tal forma, que a luz propagava-se tanto no núcleo como na casca da fibra.

Entretanto, os dispositivos aqui citados, operam com um FPI extrínseco, ou possuem uma alta sensibilidade térmica. E em alguns casos, necessitam de equipamentos de altos custos para sua produção.

Nesse capítulo, demonstramos uma técnica de construir um FPI intrínseco com um controle do seu comprimento [56]. Os FPI mostrados aqui tem alta extinção nas franjas de interferência (acima de 30,0 dB) e alta sensibilidade a testes de deformação, com repetibilidade na produção de cerca de 75 %. Os dispositivos construídos, foram testados quanto à resposta de deformação, à temperatura e à vibração externa.

Apresentamos um FPI com comprimento de $10,0 \mu\text{m}$, o qual apresentou altíssima sensibilidade aos testes de deformação ($10,3 \text{ pm}/\mu\epsilon$). Com o mesmo dispositivo, demonstramos que é possível fazer sensoriamento de vibrações, e encontramos uma sensibilidade maior quando comparado a um sensor FBG sob as mesmas perturbações externas.

3.1

Sensores com interferômetro Fabry-Perot

Um desafio para este projeto era construir um sensor de deformação com baixa dependência a temperatura e grande sensibilidade para medidas de deformação. O grupo do Prof. Valério Pruneri (ICFO, Espanha), no qual desenvolvi parte desse trabalho, apresentou em 2009 uma técnica para criar

uma bolha de ar dentro de uma fibra óptica [57], usando para isso apenas uma máquina de emenda de fibras. As bolhas produzidas tinham formato esférico, e uma extinção baixa, da ordem de 10,0 dB. A sensibilidade para a resposta de deformação das cavidades apresentadas foi medida como sendo $2,7 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

A idéia inicial do trabalho, consistia em desenvolver algum controle sobre o tamanho das cavidades formadas (bolhas), testar as cavidades de diferentes tamanhos para respostas à deformação e realizar teste quanto à resposta da dependência térmica.

Como pode ser visto na referência[57] as faces do FPI são curvadas, diferente das faces dos FPI apresentados até agora. Esse tipo de curvatura nas faces do FPI pode apresentar uma melhora na extinção das franjas do padrão de interferência devido ao fato de que a curvatura compensa a dispersão do feixe na propagação dentro da cavidade FP, como foi mencionado em [58]. Em 2006, X. Cheng e colaboradores [59] mostraram que era possível construir um FPI intrínseco em fibra com faces curvadas. Eles realizaram ataque químico na extremidade de uma fibra padrão com ácido fluorídrico (HF). A região do núcleo, devido ao germanato em sua composição, sofre desgaste maior que a região da casca, resultando assim numa ponta da fibra com um pequeno buraco no núcleo. A extremidade atacada quimicamente foi emendada com uma fibra padrão, e o resultado foi um FPI com faces curvadas. Dois anos mais tarde, E. Li e colaboradores demonstraram que era possível fazer uma cavidade com as faces curvadas fazendo a emenda entre uma fibra PCF e uma fibra padrão [60]. Entretanto, nenhum dos trabalhos mencionados aqui tinham algum controle sobre o tamanho da cavidade, e todos apresentavam baixa extinção.

3.1.1 Sensor de Deformação

No dispositivo aqui apresentado, a interferência ocorre entre a luz refletida da interface sílica-ar com a luz refletida da interferência ar-sílica. A refletividade de cada reflexão é em torno de 4,0 %, que é o valor da Reflexão de Fresnel sílica-ar e vice-versa para incidência normal. A função transferência do FPI pode ser escrita como [61]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi), \quad (3.1)$$

onde I_1 é a intensidade de reflexão da interface sílica-ar e I_2 é a intensidade da reflexão da interface ar-sílica, e ϕ é a diferença de fase entre os dois feixes, que pode ser aproximada como:

$$\phi = \frac{8\pi nd}{\lambda}, \quad (3.2)$$

onde n é o índice de refração do meio entre as faces do FPI, que para as cavidades apresentadas aqui o meio é ar ($n = 1$), d é o comprimento da cavidade e λ é comprimento de onda. A dependência do período de reflexão do padrão de interferência com o comprimento de um FPI pode ser escrito como:

$$S = \frac{\lambda^2}{4nd}, \quad (3.3)$$

onde o índice de refração dentro da cavidade é $n = 1$. A fase do FPI pode mudar com perturbações do meio externo, como por exemplo uma deformação aplicada na fibra. Desta forma, o FPI pode ser usado em sensoriamento às deformações externas.

Escrevendo que a variação de fase é devido à variação no comprimento da fibra, temos que:

$$\Delta\phi = \frac{8\pi\Delta d}{\lambda} \quad (3.4)$$

A deformação aplicada a uma fibra de comprimento d , é a razão entre a variação do comprimento da fibra pelo seu tamanho inicial, ou seja:

$$\epsilon = \frac{\Delta d}{d} \quad (3.5)$$

Substituindo Δd por $\Delta d = \epsilon d$ na expressão 3.4, encontramos que a variação da fase depende do valor da deformação aplicada na fibra.

$$\Delta\phi = \frac{8\pi\epsilon d}{\lambda} \quad (3.6)$$

3.2 Efeito Poisson

Nesta seção apresentamos uma aproximação do comportamento da bolha de ar (cavidade Fabry Perot) quando sujeita a uma força axial. Consideramos somente fatores de primeira ordem para os cálculos. Essa seção teve grande contribuição do aluno de mestrado do Laboratório de Optoeletrônica do Departamento de Física da PUC-Rio, Leonardo Araújo.

Quando uma cavidade é sujeita a uma deformação axial, seja ela causada por força ou pressão, a cavidade irá experimentar o chamado Efeito Poisson. Isto é, quando a cavidade sofrer uma variação em seu comprimento (figura 3.2) de d para $d + \delta d$, o raio r sofrerá uma mudança para $r - \delta r$. Então uma deformação axial ($\epsilon_a = \delta d/d$) aplicada na cavidade vai induzir uma deformação transversal ($\epsilon_t = \delta r/r$).

A relação da deformação transversal pela deformação axial é o chamado raio de Poisson ($\nu = -\epsilon_t/\epsilon_a$). Assim o deslocamento do padrão de interferência vai depender do raio de Poisson ν , que é proporcional a $\delta r/\delta d$.

Vamos considerar que o volume do vidro que sofre variação depende da pressão e temperatura ($V = V(P, T)$). Então, consideramos que a variação do volume do vidro ao redor da cavidade depende da variação da pressão e da temperatura. Podemos escrever que:

$$\frac{dV}{V} = \frac{\partial V}{\partial P} \frac{dP}{V} + \frac{\partial V}{\partial T} \frac{dT}{V}. \quad (3.7)$$

A variação do volume com a temperatura, considerando a pressão constante, é escrita como:

$$\frac{\partial V}{\partial T} = \gamma V, \quad (3.8)$$

onde γ é o coeficiente de expansão térmica. Da mesma forma, a variação do volume com a pressão, para temperatura constante, é escrita como:

$$\frac{\partial V}{\partial P} = -\frac{V}{K}, \quad (3.9)$$

onde K é o módulo volumétrico. Para encontrar uma expressão analítica de como a forma elíptica das cavidades de ar se altera ao aplicar uma deformação, vamos considerar que variação no volume V de um material (no nosso caso o vidro ao redor da cavidade) é devido às variações na pressão (dP) e na temperatura (dT) aplicadas à fibra. Obtém-se desta forma uma expressão geral para a variação do volume de um material que (para o nosso caso é o vidro) é dada por:

$$\frac{dV}{V} = -\frac{1}{K}dP + \gamma dT, \quad (3.10)$$

Vamos considerar que a mudança na pressão é devido à deformação aplicada, de modo que pode ser obtida através do módulo de Young ($E =$

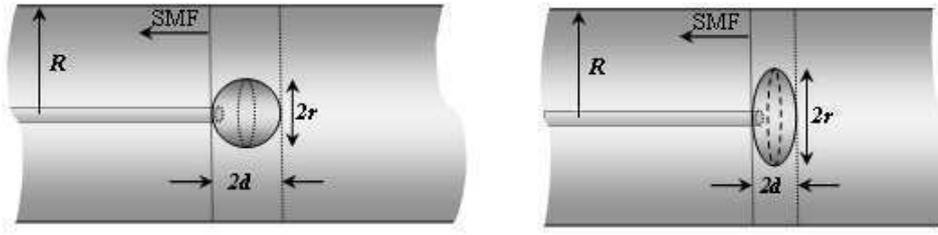


Figura 3.2: Figuras de duas cavidades Fabry-Perot. Na esquerda temos uma cavidade quase esférica, onde $d \approx r$ e na direita uma cavidade com forma de um elipsóide onde $d < r$.

$\sigma/\epsilon = dP/\epsilon$ [62], onde σ é a tração e ϵ a deformação relativa e que o termo de variação da temperatura é desprezível (próximo de $5.5 \times 10^{-7}/^\circ C$). Dessa forma, podemos reescrever a equação 3.10:

$$\frac{dV}{V} \approx -\frac{E}{K}\epsilon. \quad (3.11)$$

Vamos aplicar a equação acima para o vidro na parte da fibra que contém a cavidade. O volume de vidro (V), que está em volta da cavidade, é dado pelo volume de um cilindro de raio R (raio da fibra) e comprimento $2d$, que é o comprimento da cavidade, menos o volume da cavidade que tem forma de um esferóide de raio r e comprimento $2d$. Escrevemos o volume como:

$$V = 2\pi R^2 d - \frac{8}{3}\pi r^2 d. \quad (3.12)$$

A variação infinitesimal do volume do vidro onde está contida a cavidade pode ser expressa como:

$$dV = \pi(R^2 - \frac{2}{3}r^2)dd - \frac{4}{3}\pi drdr, \quad (3.13)$$

considerando que o raio da fibra não varia apreciavelmente com a aplicação da deformação. Manipulando as expressões acima e tomando $\epsilon = \delta d/d$ obtemos:

$$\frac{\delta r}{\delta d} = \frac{3}{4}\left(\frac{E}{K} + 1\right)\left(\frac{R^2}{r^2} - \frac{2}{3}\right)\frac{r}{d}. \quad (3.14)$$

Com esse último resultado (equação 3.14) plotamos o gráfico da variação da cavidade $\delta r/\delta d$, que está relacionada com a variação excentricidade do

elipsóide, pelo valor do comprimento inicial para diferentes cavidades com comprimento $2d$. Consideramos o módulo de Young $E = 71,7GPa$ e o módulo volumétrico (módulo de bulk) $K = 36,5GPa$, [62] e consideramos também uma mesma deformação (ϵ) aplicada à fibra.

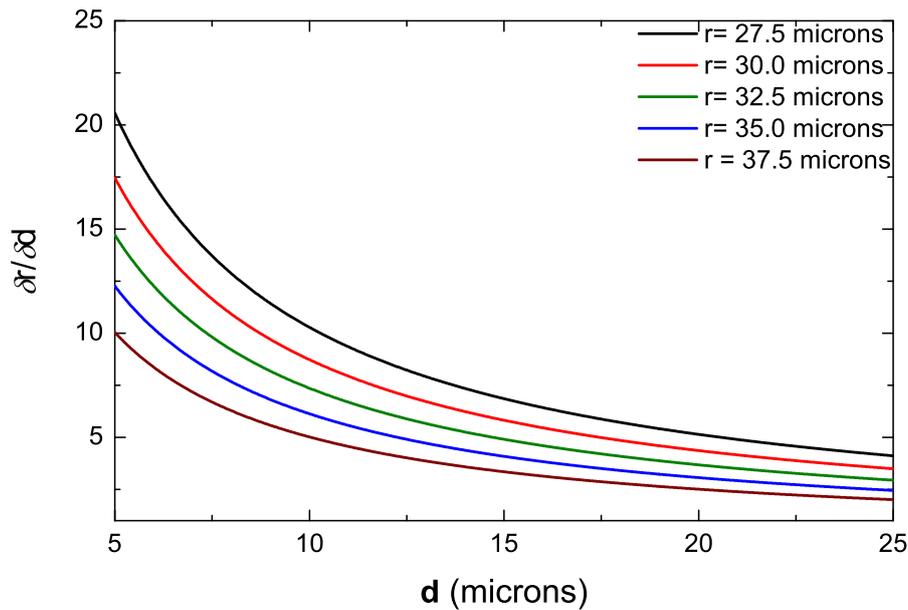


Figura 3.3: Simulação da variação de $\delta r/\delta d$ pelo raio inicial das cavidades FP.

Pelo gráfico da figura 3.3 percebemos que para cavidades com comprimentos $2d$ menores, a deformação da cavidade será maior. Ou em outras palavras, para um mesmo valor de uma deformação aplicada à fibra, cavidades menores irão deformar mais do que cavidades com comprimentos maiores. Podemos dizer dessa forma, que cavidades menores serão mais sensíveis aos testes de deformação.

3.2.1 Montagem Experimental

O sistema para a interrogação do nosso experimento consiste em uma fonte de banda larga centrada em $\lambda = 1550,0 nm$ (SLED Safibra OFLS B15), um circulador óptico (FOC), e um analisador de espectro óptico (OSA), como mostra a figura 3.4. Para a fabricação das cavidades que compõem o FPI, foi usada uma máquina de emenda comercial Ericsson FSU 955. Os parâmetros foram ajustados para criar uma cavidade pequena, porém com faces curvadas.

Dois tipos diferentes de fibras PCF feitas no grupo de fotônica da Université Lille, na França, foram utilizadas neste trabalho. As fibras foram doadas ao nosso grupo, para que assim pudéssemos fazer este trabalho. Uma das fibras, que chamaremos de fibra A, tem diâmetro dos buracos de $d = 4,8 \mu m$, "pitch" igual a $\Lambda = 7,77 \mu m$ e a razão entre o diâmetro dos buracos e o pitch, f , é igual a $f = 0,62 \mu m$. A outra fibra, que chamaremos de fibra B, possui diâmetro dos buracos $d = 5,6 \mu m$, "pitch" igual a $\Lambda = 7,5 \mu m$ e $f = 0,75 \mu m$. Ambas as fibras possuem o mesmo número de buracos em sua estrutura, diferenciando-se no diâmetro dos buracos e na distância entre eles. A imagem do microscópio óptico das faces das duas fibras é mostrada na Fig.3.4.

A "bolha de ar" é formada no momento da emenda entre a fibra PCF e a fibra SMF. Como um pedaço das microestruturas é deformado, o ar contido nessas microestruturas, fica aprisionado entre a fibra PCF e a fibra SMF, originando assim a bolha de ar. Acreditamos que um dos motivos para a formação da bolha, deve-se ao fato de que o alinhamento das fibras (no momento da realização da emenda) é realizado alinhando a casca das fibras e não o seu núcleo, como é feito em emendas de fibras SMF-SMF. Outro motivo da origem das cavidades, pode ser o fato de que no momento da emenda aplicamos uma potência de arco maior (em torno de 20%), com um tempo de duração menor (em torno de 50%), quando comparado a um programa comercial para fibras padrões (SMF).

Quando não se injeta ar na fibra PCF, as cavidades formadas possuem tamanhos aproximadamente iguais entre si. Pode ocorrer uma pequena variação, devido ao fato que a potência do arco de descarga da máquina de emenda pode alterar para cada emenda realizada, e/ou os buracos da PCF não possuem exatamente o mesmo tamanho em todo comprimento da fibra. Aplicamos ar pressurizado numa das extremidades de uma PCF de 1,0 m de comprimento, sendo que a outra extremidade foi utilizada para fabricar as cavidades. Controlamos a pressão do ar que entra nos buracos da PCF para dessa forma termos um controle no comprimento das cavidades fabricadas. A montagem experimental da fabricação das bolhas é mostrada na figura 3.4.

3.3

Fabricação dos interferômetros Fabry-Perot.

Nesta seção mostraremos os resultados da fabricação dos FPI com pressão aplicada nas microestruturas da PCF. Os FPI por apresentarem forma de um elipsóide, possuem um alto valor no contraste das franjas do padrão de

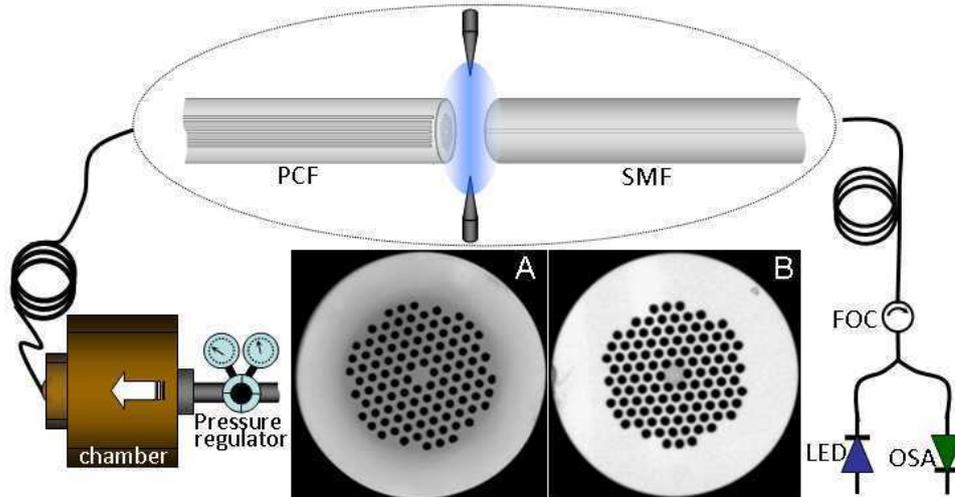


Figura 3.4: Sistema de interrogação do sensor baseado no interferômetro FP. Montagem experimental para fabricação das cavidades, onde LED é a fonte de luz, OSA o analisador de espectro óptico, FOC circulator óptico em fibra. Fig.A imagem no microscópio óptico da fibra A, e Fig. B imagem no microscópio óptico da fibra B.

interferência do espectro de reflexão. Estes resultados são comparados com os contrastes das franjas de outros dois diferentes tipos de FPI, um deles tem a forma esférica, e o outro foi construído com duas fibras de faces planas.

Apresentamos também resultados da resposta dos FPI de forma de elipsóide quanto à resposta à deformação. FPI com diferentes comprimentos foram submetidos aos testes, e os resultados comparados entre si.

O estudo da dependência térmica dos FPI construídos foi realizado submetendo os FPI a temperaturas até 1000 °C.

3.3.1 Resultados

As cavidades são produzidas no momento de fusão da fibra padrão com a fibra PCF. Quando as micro-estruturas são colapsadas, o ar existente dentro delas, é expelido para a extremidade da fibra. O resultado é uma cavidade formada exatamente na junção das duas fibras. Esse trabalho se propôs a apresentar uma forma de controlar o comprimento da cavidade, para realizar o estudo da dependência do comprimento do FPI com a sensibilidade quanto ao teste de deformação. A outra extremidade da fibra PCF, foi conectada a uma câmara pressurizada de nitrogênio. Tomamos o devido cuidado para o ar comprimido sair somente pelas microestruturas da fibra, para assim termos certeza de que a pressão indicada no controle de pressão da câmara de gás era a mesma que a pressão na extremidade da fibra PCF.

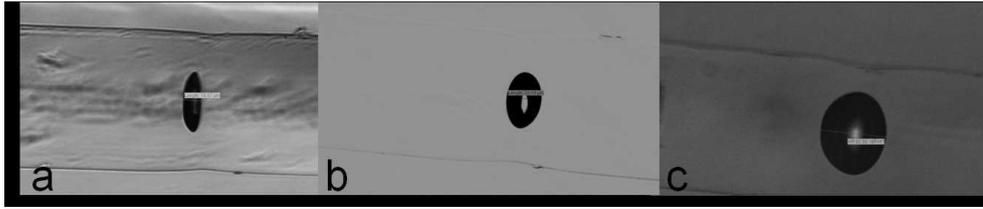


Figura 3.5: Imagem de três cavidades FP. a) cavidade formada com nenhuma pressão aplicada. b) cavidade formada com 1,5 bar de pressão e c) cavidade formada com 4,0 bar de pressão aplicada.

As cavidades foram produzidas aplicando-se diferentes valores de pressão na fibra PCF. Observou-se que quanto maior a pressão aplicada, maior era o comprimento $2d$ da cavidade formada, o que era esperado, pois quanto maior a pressão maior será a quantidade de ar dentro das microestruturas da fibra, e assim, uma maior quantidade de ar dentro da "bolha de ar".

Com este procedimento, possuíamos um controle aproximado do comprimento da cavidade com a pressão de ar aplicada na fibra. Cavidades para diferentes valores de pressão aplicada variando de 0 a 4,0 bar foram fabricadas. Na figura 3.5 mostramos a imagem para três diferentes cavidades, formadas com a) nenhuma pressão aplicada, b) 1,5 bar de pressão aplicada e c) 4,0 bar de pressão aplicada. Quando tentávamos construir cavidades com valores de pressão superiores a 4,0 bar observamos que as cavidades explodiam. O comprimento $2d$ para a cavidade foi medido usando um microscópio óptico. Mostramos na Fig 3.6, um gráfico do comprimento da cavidade formada em função da pressão aplicada, onde percebemos um comportamento linear da variação do comprimento $2d$ pela pressão, para ambas as fibras (fibras A e B). A fibra A, só formou cavidade a partir de 0,5 bar de pressão aplicada. Ao tentarmos construir uma cavidade sem nenhuma pressão, a cavidade não era formada. Estudamos a repetibilidade desse processo quando aplicados uma pressão de 2,0 bar nas microestruturas. Para isso, realizamos em sequência a fabricação de 20 cavidades com essa pressão, encontrando uma repetibilidade de 100 %.

Pelo gráfico, podemos notar que a fibra que possui o valor de f maior, (fibra B) formou cavidades com comprimento maiores. Isso deve-se ao fato que uma quantidade maior de ar está na fibra no momento da emenda da fibra, ou no momento de fabricação da cavidade.

Para cada cavidade formada, adquirimos o espectro do padrão de interferência formado, usando a montagem experimental mostrada na figura 3.4. Pela equação 3.3, vemos que o período do padrão de interferência dos FPI é inversamente proporcional ao comprimento da cavidade. Como aqui estamos

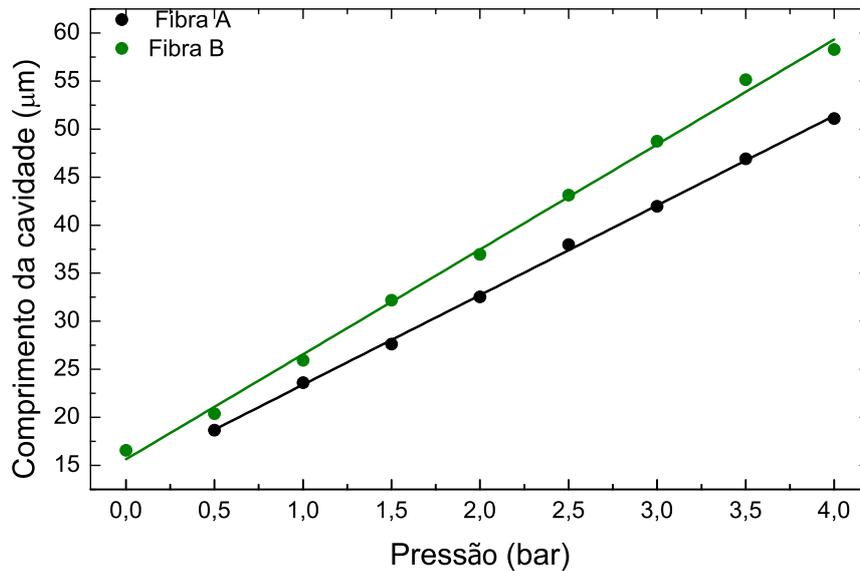


Figura 3.6: Gráfico do comprimento $2d$ da cavidade em função da pressão aplicada. Onde os círculos pretos são valores para a fibra A e os círculos verdes os valores para a fibra B. As linhas são ajustes lineares.

variando o comprimento da cavidade com a pressão aplicada, podemos dizer que o período do padrão de interferência é inversamente proporcional a pressão aplicada na fibra. Podemos perceber isso na figura 3.7, onde mostramos o sinal da reflexão para três cavidades FP construídas com diferentes pressões: 0 bar (curva preta), 1,5 bar (curva verde) e 4,0 bar (curva azul). Percebemos que quanto maior a pressão aplicada na PCF, no momento de sua fabricação, menor será seu período.

Construímos um gráfico do período das franjas de interferência, pela pressão aplicada na PCF na construção da cavidade, o resultado é mostrado na Fig. 3.8. O espectro foi obtido usando um analisador de espectro óptico (OSA), conforme mostrado na figura 3.4 e o período é o intervalo entre dois mínimos de interferência consecutivos.

Pelo gráfico, notamos o comportamento esperado do período do padrão de interferência para valores correspondentes das pressões aplicadas. A fibra B possui uma quantidade maior de ar na sua geometria e gerou cavidades com comprimentos maiores, e conseqüentemente, a fibra B apresenta um período do padrão de interferência menor que o período do padrão de interferência da fibra A, que possui buracos menores em sua geometria gerando assim cavidades menores.

Foram realizados testes de temperatura para um dos FPI, para medir a

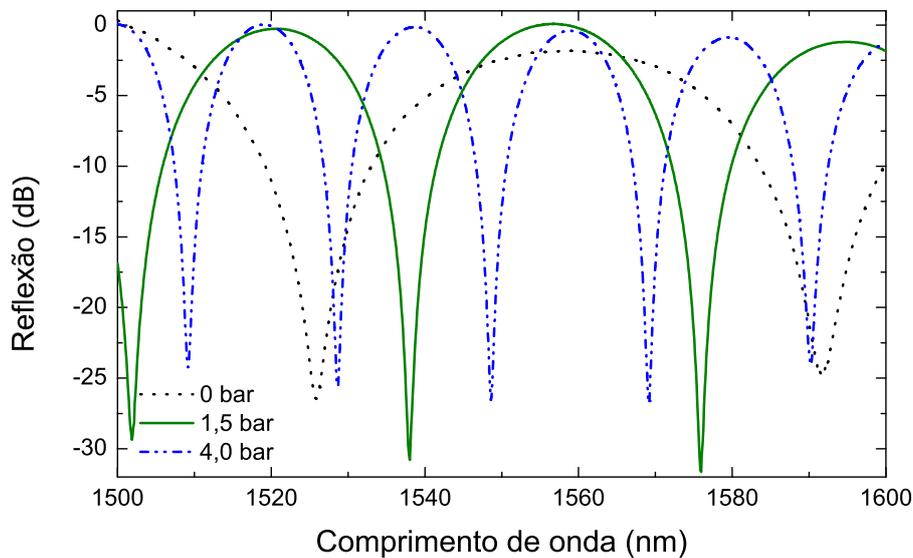


Figura 3.7: Gráfico do sinal de reflexão para três diferentes cavidades FP construídas com diferentes pressões. Curva preta apresenta o gráfico para a cavidade com 0 bar, curva verde o gráfico para cavidade de 1,5 bar, curva azul apresenta o gráfico para cavidade de 4,0 bar.

dependência térmica dos FPI. O teste foi realizado para o FPI feito com 2,0 bar de pressão aplicada nas microestruturas, elevamos a temperatura de 23 °C até 1000 °C. A sensibilidade à variação de temperatura encontrada foi de $0,96 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, um valor bem abaixo do valor da sensibilidade de $13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ medido nas FBGs [28]. Quando comparamos com a dependência térmica da PCF HiBi 1550-01, usada no capítulo 2, percebemos que a PCF tem uma dependência térmica 3 vezes mais baixa ($-0,29 \text{ pm}/^\circ\text{C}$) do que o FPI demonstrado nesta seção. O resultado do teste da variação do comprimento de onda com a variação de temperatura é mostrado na figura 3.9 apresentando um comportamento linear.

3.3.2 FPI como sensor de deformação

As cavidades construídas com a fibra B, foram testadas quanto à resposta de deformação. A montagem experimental foi a mesma usada no cap.2 (Fig. 2.3). Cada FPI foi colada sobre dois blocos de tração. A máxima deformação aplicada em cada FPI foi de aproximadamente $1000 \mu\epsilon$ e o sinal foi monitorado através do OSA. Na figura 3.10 o resultado para o teste de deformação para três FPI com diferentes comprimentos é apresentado ($2d = 16,87 \mu\text{m}$,

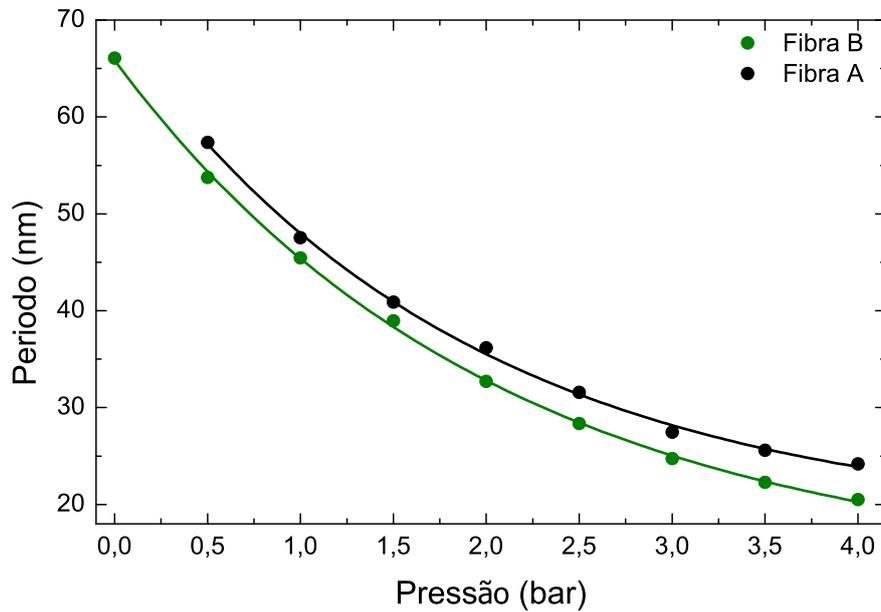


Figura 3.8: Gráfico do período do padrão de interferência dos FPI pela pressão aplicada, durante a fabricação das cavidades. Os círculos pretos (verdes) são pontos experimentais para a fibra A e B respectivamente. E as linhas são o guia para os olhos.

$2d = 32,18 \mu m$, $2d = 55,13 \mu m$), mostrando o deslocamento do sinal de reflexão de interferência com a deformação.

Com o FPI com comprimento de $2d = 16,87 \mu m$, a sensibilidade medida foi de $6,28 pm/\mu\epsilon$, para a cavidade com $2d = 32,18 \mu m$, e a sensibilidade medida foi de $4,85 pm/\mu\epsilon$. Para o FPI com $2d = 55,13 \mu m$ a sensibilidade medida foi de $4,16 pm/\mu\epsilon$. Percebemos que os resultados para os testes de deformação usando os FPI podem ser 5 vezes mais sensível a sensibilidade apresentada por uma FBG ($1,2 pm/\mu\epsilon$). Quando comparamos os FPI com o sensor de deformação apresentado no capítulo 2 (sensor de deformação com fibra HiBi), notamos que os resultados desta seção também podem ser 5 vezes mais sensíveis do que resultado anterior ($1,17 pm/\mu\epsilon$).

Com esses resultados da sensibilidade para os FPI, e com os outros resultados, não mostrados na figura 3.9 para outras cavidades com comprimentos $2d$ diferentes, plotamos um gráfico da sensibilidade pelo comprimento do FPI, (figura 3.11).

Observamos que para FPI com comprimentos menores, a sensibilidade quanto à resposta a deformação é maior. Pelo estudos realizados na seção 3.2, vimos que cavidades maiores sofrem uma deformação menor ao serem

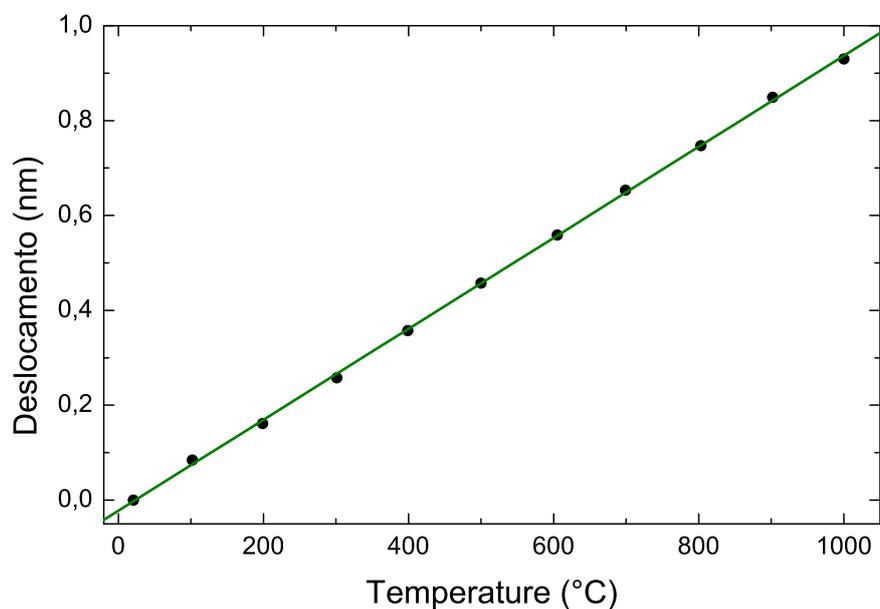


Figura 3.9: Gráfico do deslocamento do comprimento de onda pela variação de temperatura, ara o FPI construído com 2,0 bar de pressão aplicada.

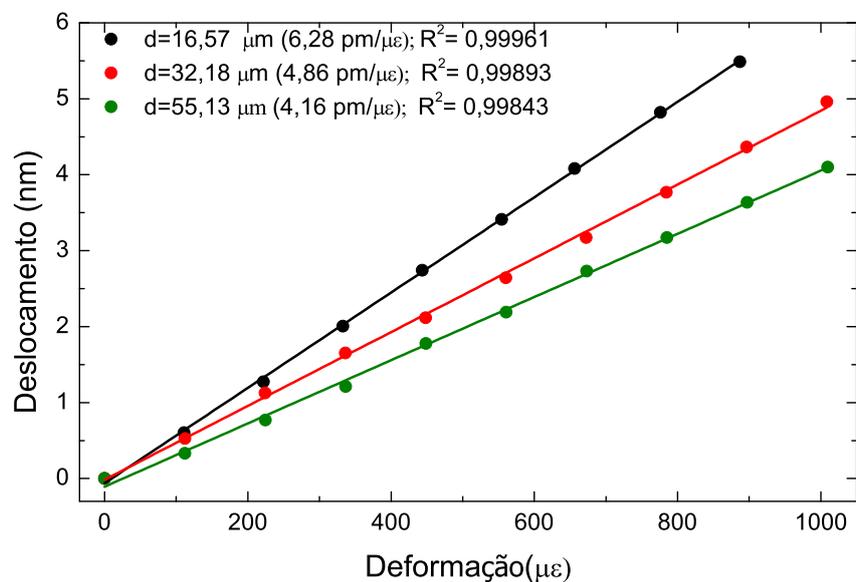


Figura 3.10: Curva do deslocamento do comprimento de onda dos FPI com a deformação aplicada para cavidades com diferentes comprimentos. Círculos pretos $2d = 16,57 \mu\text{m}$, vermelhos $2d = 32,18 \mu\text{m}$ e verdes $2d = 55,13 \mu\text{m}$. As retas são ajustes lineares.

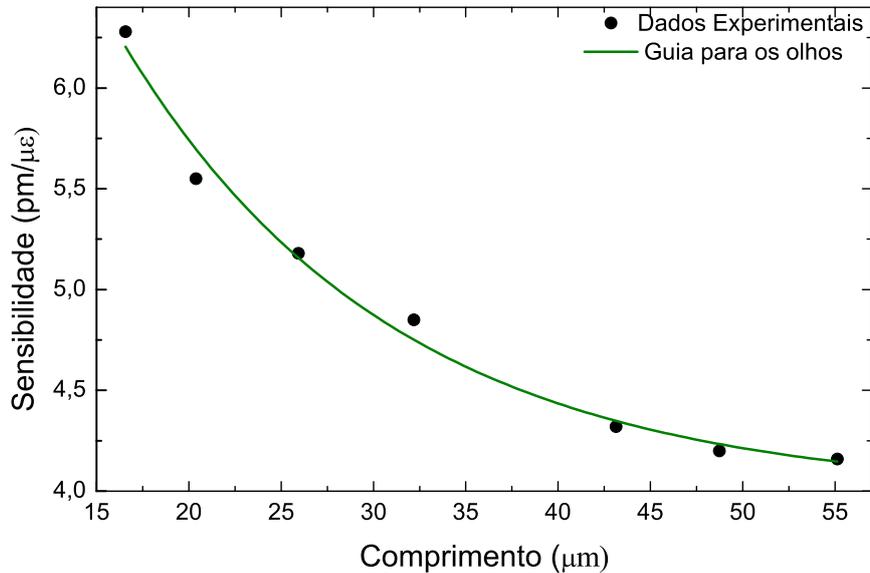


Figura 3.11: Sensibilidade dos FPI em função dos comprimentos das cavidade. Os círculos pretos são os pontos experimentais.

submetidas a uma força axial. Ou seja, cavidades menores ao sofrerem deformação, irão variar mais seu comprimento, resultando numa resposta maior quanto ao teste de deformação.

3.4 Interferômetro Fabry-Perot como sensor de Vibração

Nesta seção da tese, demonstramos o uso de um FPI como sensor de vibração. O FPI foi construído da mesma forma como já foi apresentado na seção 3.2.1. Porém, o FPI que apresentaremos aqui, não fez uso de ar pressurizado nas micro-estruturas da fibra PCF na formação da cavidade. Os FPI foram construídos apenas clivando e emendando uma fibra PCF, fibra B, mostrada na Fig. 3.12, com um fibra monomodo padrão (SMF28). Para criar a bolha de ar dentro da fibra, modificamos os parâmetros de uma máquina de emenda de fibra comercial (Ericsson FSU 955) de tal forma que a cavidade formada tinha aproximadamente comprimento de $2d = 10,0 \mu\text{m}$. O programa para fazer emenda antes usado, sofreu mudanças na potência do arco, deixamos uma potência mais baixa para fabricar cavidades menores, pois como já foi discutido anteriormente, a sensibilidade à resposta a deformação para esse tipo de FPI com formato de um elipsóide é inversamente proporcional ao seu comprimento.

3.5 Montagem Experimental

Fabricamos dois FPI, para efeitos de comparação quanto ao tamanho à resposta a testes de deformação. O primeiro FPI tinha comprimento de aproximadamente $2d = 30,0 \mu m$ e raio de aproximadamente $2r = 40,0 \mu m$. O segundo FPI possuía comprimento de $2d = 10,0 \mu m$ e raio de aproximadamente $2r = 28,3 \mu m$, ambos são mostrados na Fig.3.12.

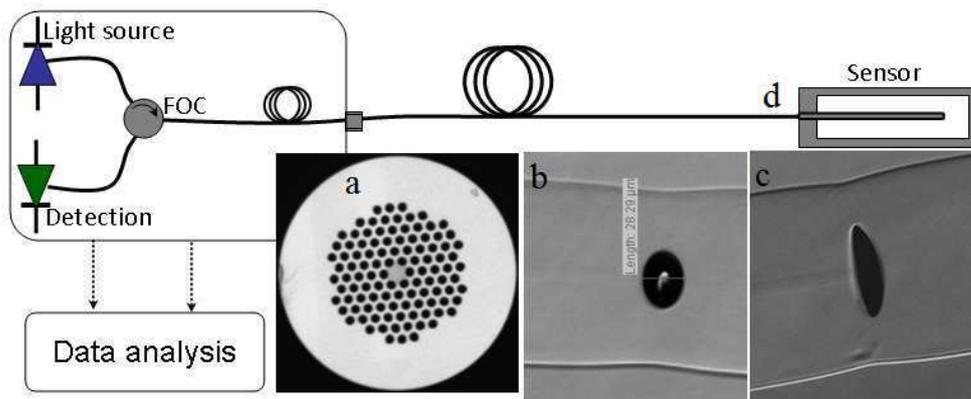


Figura 3.12: Montagem experimental do sensor de vibração. Onde em a) imagem da seção reta da fibra PCF, b) imagem da cavidade com comprimento de $2d = 28,3 \mu m$, em c) imagem da cavidade com comprimento de $2d = 10,0 \mu m$, e d) elemento sensor.

O sistema de análise consiste numa fonte de banda larga centrada em $1550,0 \text{ nm}$ (SLED Safibra OFLS B15), um circulator óptico (FOC), um analisador de espectro óptico e um interrogador de redes de Bragg comercial (I-MON 512E, Ibsen Photonics). O esquema da montagem experimental é mostrado na figura 3.12.

3.6 Resultados

Os primeiros testes usando os FPI consistiram em testar a resposta do dispositivo quanto à deformação. Usamos para isso a montagem experimental mostrada na figura 2.3, na qual usamos dois blocos de tração para aplicar deformação nos FPI. Na figura 3.13, mostramos o deslocamento do sinal de reflexão do FPI com o comprimento de onda para uma cavidade de comprimento $2d = 10,0 \mu m$, para três valores diferentes de deformação ($0 \mu\epsilon$, $555,8 \mu\epsilon$, $1111,6 \mu\epsilon$)

Pelo gráfico, notamos que o valor do contraste das franjas é $38,0 \text{ dB}$, que equivale a uma visibilidade $V = 0,99984$, que acreditamos ser o maior valor citado até o momento, como esta reportado em [63]. A visibilidade V pode ser definida pela relação entre os dois feixes da cavidade [64]:

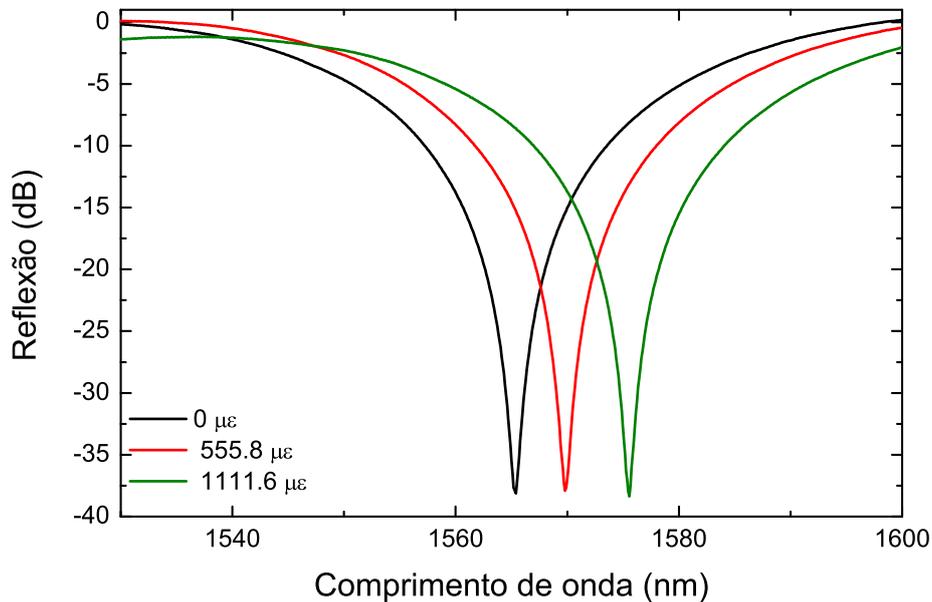


Figura 3.13: Deslocamento do sinal de reflexão do FPI ($2d = 10,0 \mu m$) em função do comprimento de onda para três diferentes valores de deformação, $0 \mu\epsilon$, $555,8 \mu\epsilon$, e $1111,6 \mu\epsilon$.

$$V = \frac{2\sqrt{k}}{1+k}, \quad (3.15)$$

onde $k = I_2/I_1$, onde I_1 é a intensidade do feixe de reflexão da interface sílica-ar e I_2 é a intensidade do feixe de reflexão da face ar-sílica.

Isso deve-se ao fato da pequena distância percorrida pelo feixe dentro da cavidade, e do fato das faces da cavidade serem curvadas, diminuindo assim a difração do feixe. Realizamos também testes de deformação para a cavidade de $2d = 30,0 \mu m$ para comparar a sensibilidade para medidas de deformação de duas cavidades com comprimentos diferentes. O deslocamento do sinal padrão de interferência para os dois FPI são mostrados na figura 3.14. Os valores da sensibilidade medidos foram de $10,3 pm/\mu\epsilon$ para o FPI com $2d = 10,0 \mu m$ e $3,5 pm/\mu\epsilon$ para o FPI com $2d = 30,0 \mu m$.

Quando comparamos o resultado encontrado nesta seção da tese com o valor da sensibilidade de uma FBG, que é em torno de $1,2 pm/\mu\epsilon$, notamos uma melhora na sensibilidade de uma ordem de grandeza. Os FPI já demonstraram terem dependência térmica baixa, da ordem de $0,96 pm/^\circ C$, que corresponde a uma dependência de mais de uma ordem de grandeza

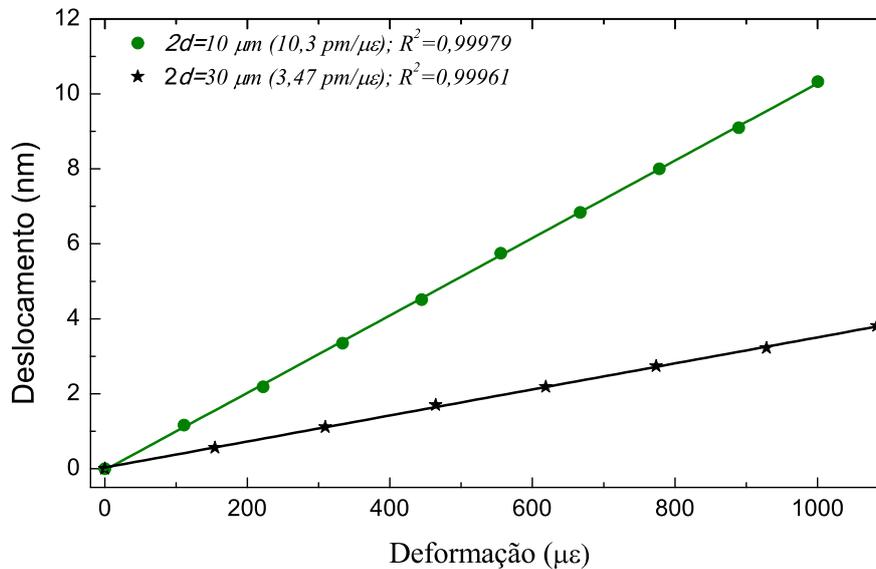


Figura 3.14: Gráfico do deslocamento do sinal de reflexão para dois FPI distintos, para dois tamanhos de cavidade ($2d$). Os círculos verdes mostram o deslocamento do comprimento com a deformação aplicada para o FPI com $2d = 10,0 \mu m$, as estrelas pretas mostram o deslocamento do comprimento de onda com a deformação para o FPI com $2d = 30,0 \mu m$. As retas são os ajustes lineares.

menor que a sensibilidade térmica de uma FBG, que é de aproximadamente $13 pm/^\circ C$. A dependência térmica dos dispositivos pode afetar erroneamente os resultados do sensoriamento, devido ao erro induzido na medida de deformação pela influência da temperatura. Calculamos o erro induzido nas medidas, pela relação da dependência térmica com a sensibilidade à deformação, e encontramos para o FPI um valor, de $0,09 \mu\epsilon/^\circ C$, ou seja, se a temperatura no dispositivo variar em $100^\circ C$, temos um erro induzido na medida de $9 \mu\epsilon$. Um valor aproximadamente duas ordens de grandeza menor que o valor calculado para o erro induzido para uma FBG, que é aproximadamente $8,4 \mu\epsilon/^\circ C$. Concluimos então que nenhum compensador de temperatura se faz necessário nesse tipo de dispositivo, pois o erro induzido pela temperatura pode ser desprezado.

O pequeno tamanho, a facilidade na fabricação, a alta sensibilidade e a baixa dependência térmica tornam o FPI aqui apresentado um bom candidato para sensoriamento em ambientes extremos de deformação.

Demonstramos também nesta seção o uso do FPI de alta sensibilidade, como sensor de vibração. O FPI foi pré-tensionado manualmente e colocado dentro de um tubo metálico de $10,0$ cm de comprimento, com $250 \mu m$ de

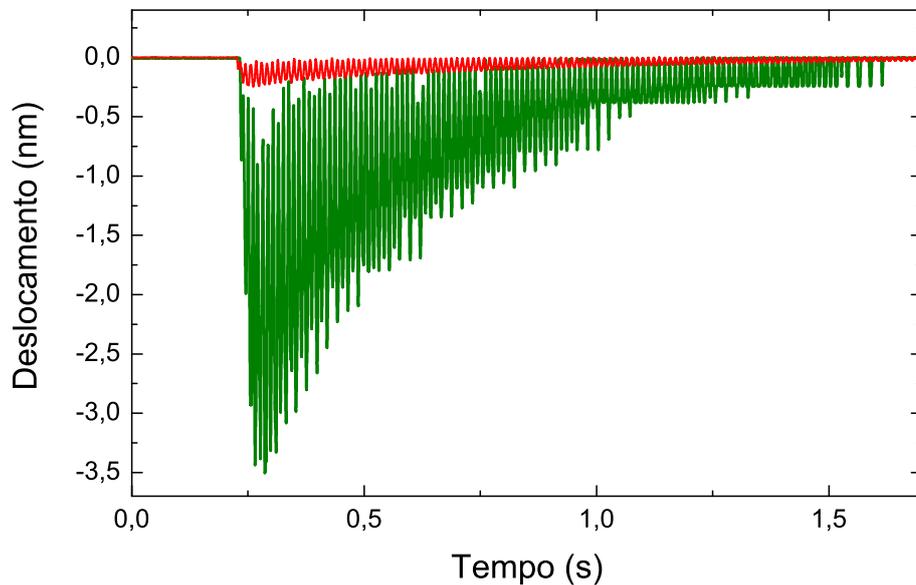


Figura 3.15: Deslocamento espectral de vibração com o tempo para o teste de vibração com um golpe de martelo. Curva em vermelho mostra o resultado de uma FBG e a curva em preto mostra o resultado para o FPI de comprimento $2d = 10,0 \mu m$.

diâmetro interno por $1000 \mu m$ de diâmetro externo e preso com super cola. O tubo metálico foi preso num suporte. Como a tensão dinâmica causada por vibrações podem induzir um deslocamento no padrão de interferência, um golpe com martelo foi aplicado na extremidade do suporte metálico, e o sinal foi adquirido por um interrogador de redes de Bragg comercial (I-MON E-USB, Ibsen Photonics) que trabalha com uma frequência máxima de 970 Hz e resolução de 0,5 pm.

A mesma montagem foi usada para testar a resposta de uma FBG quanto à vibração. O FBG tinha comprimento de onda central em $\lambda = 1547,6 nm$, e largura na escrita da rede de 1,0 cm, colocamos a FBG dentro de um tubo metálico similar ao descrito anteriormente. Colamos sobre o suporte metálico. Aplicamos um golpe de martelo similar ao golpe quando o elemento sensor era um FPI, isso foi feito deixando o martelo cair de aproximadamente uma mesma altura para ambos os testes. O resultado para os testes de vibração com apenas um golpe são mostrados na figura 3.15. Concluimos pelas medidas realizadas que o FPI tem uma resposta 120 vezes maior quando comparado a uma FBG para esse tipo de teste de deformação, o que era de se esperar, pois o FPI demonstrou uma maior sensibilidade aos testes de deformação.

Fizemos a transformada de Fourier para os resultados obtidos para ambos os dispositivos, o FPI e a FBG e nos dois casos a frequência encontrada foi a mesma, 94,4 Hz. Os dois resultados são mostrados na figura 3.16, onde na parte superior temos o resultado para o FPI e na parte inferior o resultado para a FBG.

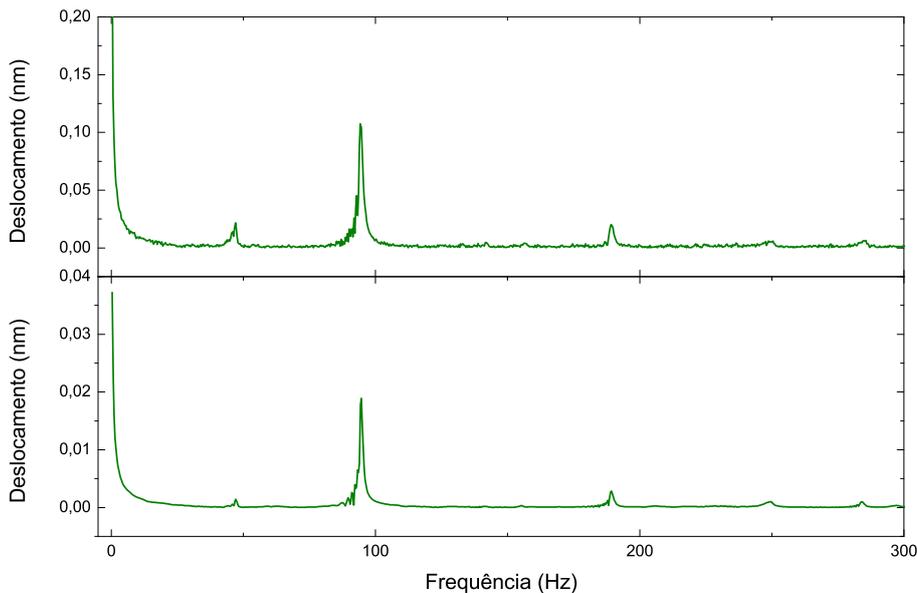


Figura 3.16: Transformada de Fourier para teste de vibração com um golpe. Na parte superior o resultado para o FPI, e na parte inferior o resultado para a FBG.

Um outro teste de vibração consistiu em colocar o suporte metálico sobre um motor, que vibrava constantemente, infelizmente não tínhamos nenhum valor para a frequência de vibração do motor. Ambos, FPI e FBG foram testados, e os resultados são mostrados na figura 3.17, onde podemos ver uma vez mais que o FPI apresenta uma maior sensibilidade que uma FBG, quando submetido as mesmas perturbações externas.

Da mesma forma que feito anteriormente, adquirimos a transformada de Fourier para os dois dispositivos, o FPI e a FBG quando submetidos a uma vibração constante, ambos os resultados são mostrados na Fig. 3.18. Encontramos que o motor que produzia uma vibração constante estava vibrando com uma frequência de aproximadamente 50 Hz, resultado obtido com a ajuda dos gráficos das transformadas de Fourier. Ambos os resultados são mostrados na figura 3.18, onde na parte superior temos o resultado para o FPI e na parte inferior o resultado para o FBG.

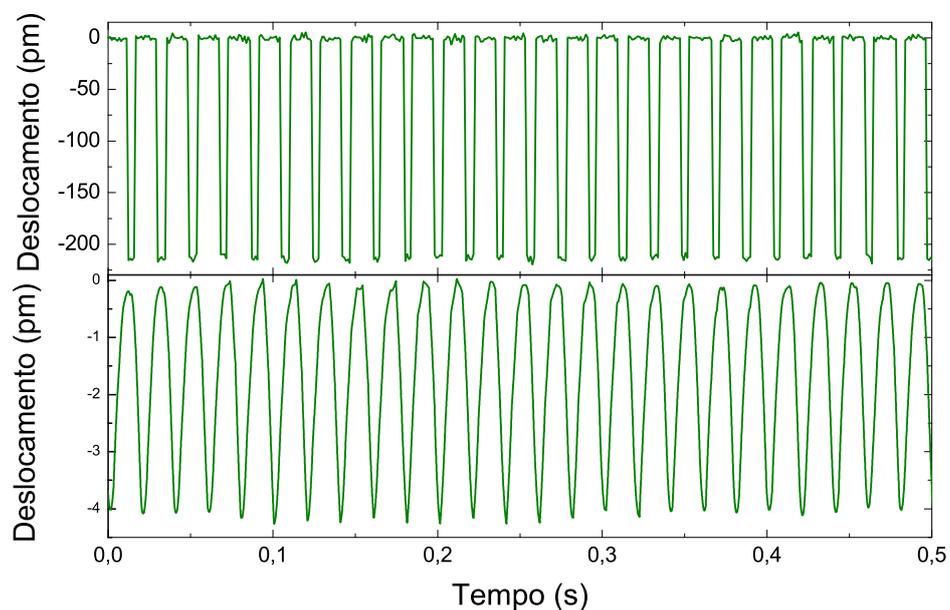


Figura 3.17: Gráfico do teste de vibração com uma perturbação constante. No gráfico superior temos o resultado para o FPI com comprimento $2d = 10,0 \mu m$ e no gráfico inferior o resultado para uma FBG com comprimento de onda $\lambda = 1547,6 nm$ e largura de escrita de 1,0 cm de comprimento.

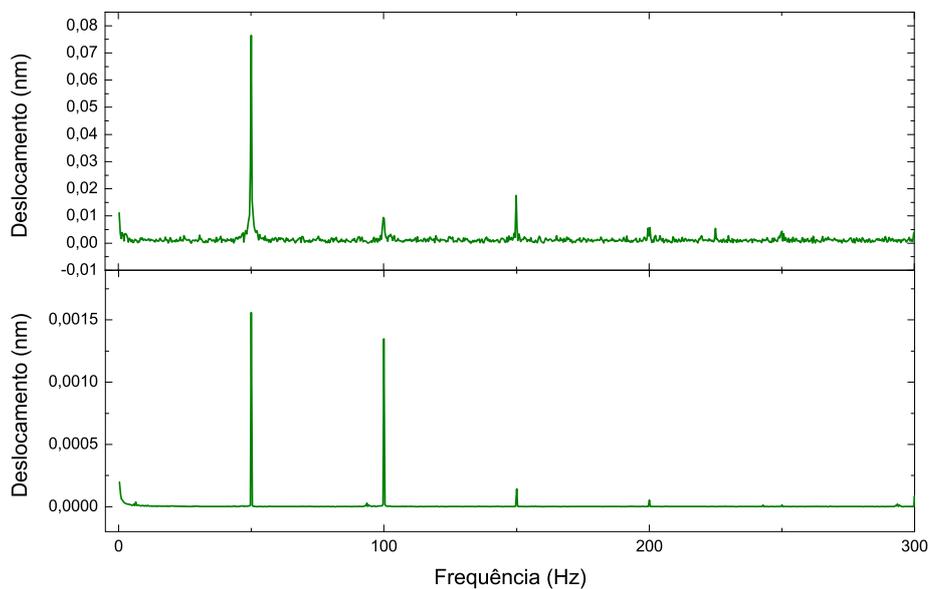


Figura 3.18: Gráfico da transformada de Fourier para uma vibração constante. Na parte superior transformada de Fourier para o FPI e na parte inferior transformada de Fourier para a FBG.

3.6.1

Comparação para diferentes FPI a fibra

Em 1988 A. S. Gerses e colaboradores [58] demonstraram um aumento no contraste das franjas de um FPI, quando comparado aos FPI de faces planas, criando uma cavidade extrínseca entre uma fibra e uma superfície com uma curvatura. Tratando-se de uma cavidade extrínseca, ela torna-se mais frágil quando comparada a uma cavidade intrínseca.

Quando se faz uso de um FPI para sensoriamento, um alto valor no contraste das franjas (FC) do padrão de interferência traz benefícios ao dispositivo, tais como a relação sinal ruído e até um aumento na sensibilidade, para o caso da medida ser feita na variação da potência de um exato comprimento de onda do sinal refletido.

A visibilidade (parâmetro V) pode ser calculada pela relação entre dois feixes [64], pela expressão:

$$V = \frac{2\sqrt{k}}{1+k}, \quad (3.16)$$

onde $k = I_2/I_1$, I_1 é a intensidade do feixe de reflexão da interface sílica-ar e I_2 é a intensidade do feixe de reflexão da face ar-sílica. Outros grupos calculam a visibilidade a partir dos contrastes das franjas do padrão de interferência, como sendo $FC = -10\log(1 - V)$. A visibilidade máxima ($V = 1$) ocorre quando $k=1$, ou seja, quando I_1 e I_2 são iguais. Porém, em FPI com superfícies planas (Fig.3.19.a), I_2 sempre será menor que I_1 devido às perdas no reacoplamento do feixe [58]. A perda no reacoplamento é consequência da perda de propagação, que também ocorre nos FPI com forma esférica. Quando a cavidade possui as faces com forma elíptica, ou seja, um raio de curvatura grande (mas não infinito como as faces planas), a curvatura compensa um pouco a divergência do raio refletido, dessa forma, o parâmetro V pode ser aumentado.

Uma outra parte do trabalho, envolveu a comparação do sinal do FPI fabricado com pressão aplicada nas microestruturas da PCF, com dois outros tipos de FPI: FPI com formato esférico e FPI de faces planas. Construímos os três FPI distintos, ajustando-os para ter um comprimento ($2d$) de aproximadamente $29,0 \mu m$. A imagem dos três FPI é mostrada na figura 3.19, onde temos um FPI formado pela face de duas fibras clivadas, um FPI com cavidade em forma esférica, e um terceiro FPI, onde a cavidade possui forma elíptica. O FPI feito entre as faces planas de duas fibras, foi construído apenas clivando duas fibras e aproximando-as com uma máquina de emenda a fibra, (Vytran GPX-3000), a qual nos fornecia a distância entre as fibras e

adquiria as imagens das fibras. O FPI de forma esférica foi construído usando a fibra B. Usamos para a fabricação dessa cavidade um programa comercial para fibras multimodos na máquina de emenda Ericsson FSU 955, esse tipo de cavidade já foi demonstrada por J. Villatoro e colaboradores [57]. E por último, o FPI com forma de um elipsóide foi construído aplicando ar pressurizado nas microestruturas da PCF, como já foi apresentado.

Para cada FPI, adquirimos o espectro da reflexão, monitorando o sinal do OSA, e os resultados são mostrados na figura 3.20, evidenciando que quando as faces possuem um raio de curvatura grande, sua visibilidade é maior (V), que é o caso da cavidade com formato elipsóide.

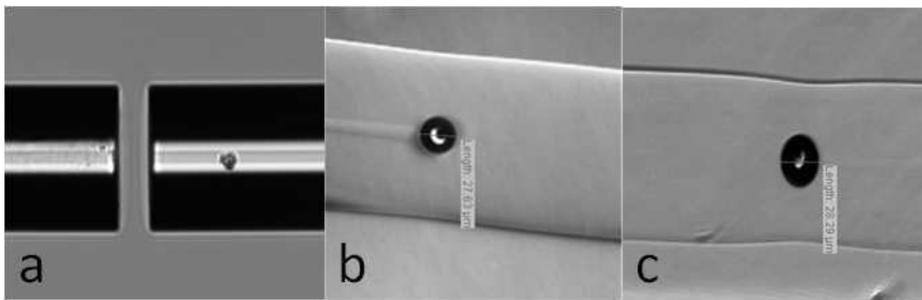


Figura 3.19: Imagens de três FPI diferentes, onde em a) temos o FPI formado por faces planas, em b) é o FPI com forma de uma esfera, e em c) o FPI com forma de um elipsóide.

Para cada FPI analisado, o valor do contraste das franjas, e o valor do parâmetro V obtido são mostrados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valor da extinção das franjas do padrão de interferência para 3 FPI distintos e do parâmetro V .

	FPI esférico	FPI com faces planas	FPI elíptico
FC (dB)	10,0	20,0	31,0
Parâmetro V	0,900	0,990	0,999

As cavidades construídas com ar pressurizado, as quais tem um formato de um elipsóide, apresentaram um valor do contraste das franjas maior que as duas outras cavidades (faces planas e esféricas). O FPI atingiu o valor de 31,0 dB no contraste das franjas, que resulta numa visibilidade de 0,999. Este valor ultrapassou o valor de 28,0 dB e visibilidade de 0,998, no contraste das franjas de interferência demonstrado por N. V. Wheeler e colaboradores [65] num FPI construído com uma fibra hollow-core e duas microfibras, que até o presente momento, era tido como o recorde para o valor do contraste das franjas em cavidades FP sílica-ar.

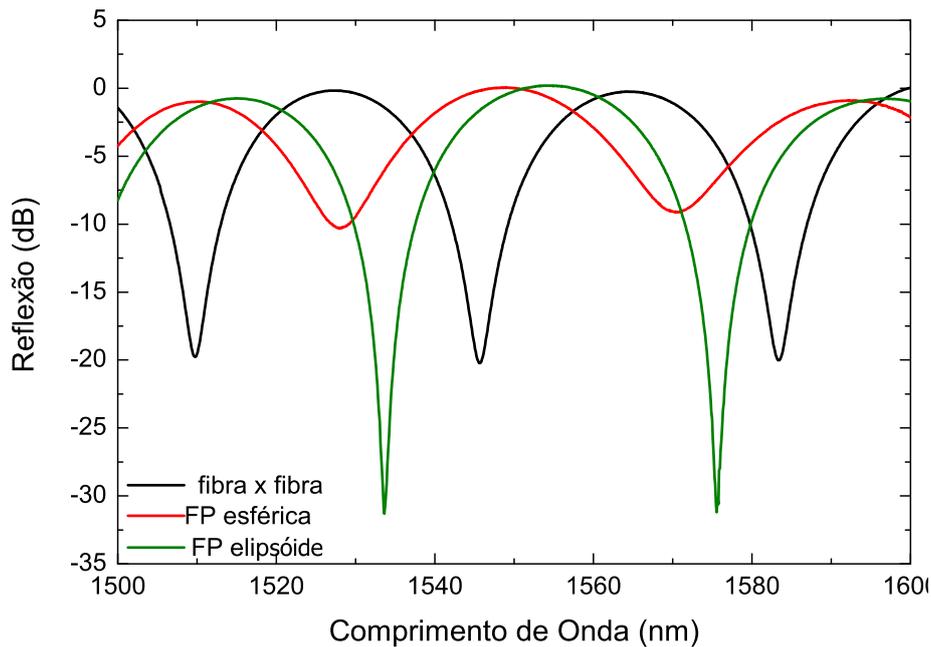


Figura 3.20: Sinal da reflexão em função do comprimento de onda para três FPI distintos. Curva vermelha apresenta o sinal da cavidade com forma esférica, curva preta, representa o sinal da cavidade com duas faces planas e a curva verde representa o sinal da cavidade em forma de um elipsóide.

Na figura 3.21, plotamos a variação do contraste das franjas (FC) pelo valor de k , calculado através da equação 3.15. Vemos que quando k tem valor próximo de $k = 0,999$ o valor de FC se aproxima de 31,0 dB, confirmando nosso resultado experimental, e evidenciando o fato de que o FC aumenta quando k se aproxima de 1.

Dessa forma, podemos dizer que a técnica por nós apresentada neste capítulo, na qual aplica-se pressão nas microestruturas da PCF para a formação de cavidades, mostrou-se vantajosa para a construção dos FPI, pois o valor do contraste das franjas é superior ao demonstrado pelos dois outros tipos de cavidade, diminuindo dessa forma a relação sinal ruído. Também mostramos que nossa técnica permite um controle quanto ao tamanho do comprimento das cavidades. Cabe ressaltar que, pela primeira vez um FPI sílica-ar ultrapassa o valor de 30,0 dB no contraste das franjas do padrão de interferência.

Fizemos um estudo da repetibilidade desse tipo de cavidade FP, as quais não faziam uso de pressão nas microestruturas no momento da fabricação. Construímos um total de 20 cavidades, e concluímos que a repetibilidade dessas cavidades é da ordem 75 %.

Outro ponto, onde um alto valor dos FC em cavidades Fabry-Perot se faz

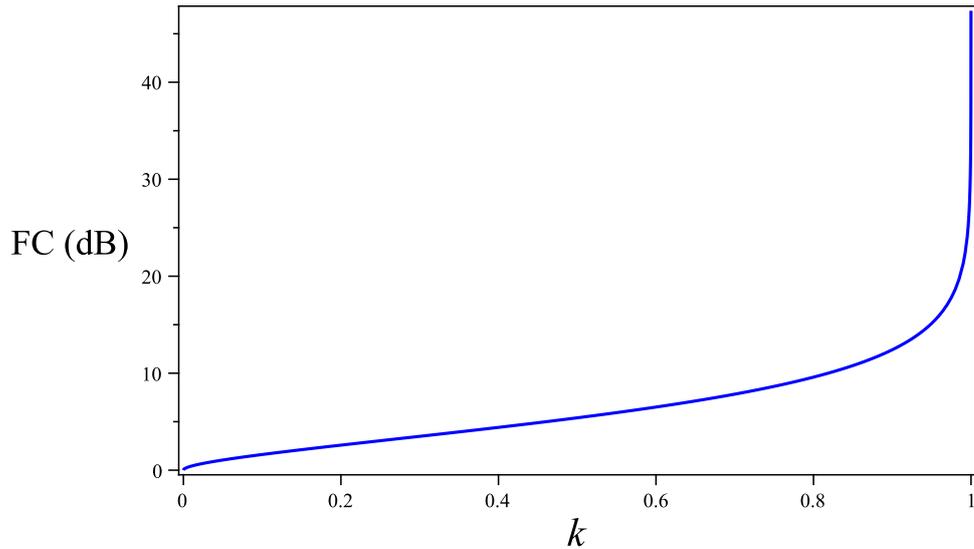


Figura 3.21: Curva teórica da variação do contraste das franjas (FC), com o valor k obtido a partir da Eq. 3.15.

necessário, é para construção de cavidades eletrodinâmica quântica [66]. Sendo necessário cavidade com alta visibilidade para aprisionamento de átomos.

3.7

Conclusão

Demonstramos nesse capítulo uma nova técnica de fabricar e controlar cavidades Fabry-Perot. As cavidades têm uma repetibilidade de 100 % quando são fabricadas com pressão nas microestruturas e 75 % quando não aplicamos nenhuma pressão, o que é um número razoavelmente alto. A técnica utilizada é rápida, necessitando poucos passos para a construção das cavidades de baixo custo, pois cada cavidade precisa somente poucos centímetros de fibra para sua fabricação (contando inclusive o pedaço da clivagem). Os dispositivos apresentados, possuem uma alta sensibilidade a testes de deformação, e uma baixa dependência térmica, não sendo necessário o uso de compensador de temperatura para uma possível aplicação em campo.

Tabela 3.2: Comparação dos resultados para testes de deformação e temperatura entres três FPI intrínsecos.

Parâmetros	FBG *	FPI**	FPI***	FPI****
Deformação ($pm/\mu\epsilon$)	1,2	3,36	2,3	10,3
Temperatura ($pm/^\circ C$)	13	1,35	0,6	0,96
Erro cruzado ($\mu\epsilon/^\circ C$)	10,8	0,4	0,26	0,09

Na tabela 3.2, comparamos os resultados obtidos nesse capítulo, com o

resultado de um FBG *[11] e com dois outros trabalhos já mencionados na literatura, E. Li et. al **[59] e M. Deng et. al ***[60] e ****[62]

Apresentamos também um estudo da influência do tamanho da cavidade (comprimento) com a sensibilidade para os testes de deformação. Os FPI foram devidamente encapsulados e testados como sensores de vibração, mostrando que são ótimos candidatos para esse tipo de sensoriamento.