

## 6

# Multiplexação de sensores a rede de Bragg em fibra ópticas de alta birrefringência baseada em TDM/WDM

### 6.1.

#### Introdução

Recentemente, trabalhos baseados em multiplexação de sensores vêm sendo desenvolvidos na PUC-Rio [35,38,39], como um exemplo pode ser citado o desenvolvimento de um sistema óptico que tem como finalidade inferir as posições de um conjunto de sensores a rede de Bragg utilizando redes de Bragg como filtros fixos reflexivos [39]. Esse sistema apresenta certa vantagem no tempo de resposta, podendo ser usado em aplicações dinâmicas, porém o número de sensores é limitado pela largura espectral da fonte. Hoje em dia o mercado está oferecendo dispositivos que podem ser de grande interesse na área de multiplexação de sensores com base em filtros fixos. A *MetroPhotonics* está lançando no mercado um dispositivo, constituído à base de óptica integrada, que serve para monitorar potência óptica em sistemas WDM. Suas principais vantagens são o baixo custo, 43 canais, faixa de comprimento de onda de 1528.77 a 1562.23 nm e tempo de resposta de 5 ns [*Datasheet SureParh Monitor-MetroPhotonics Inc. 2003*].

Nesse capítulo será apresentado o trabalho fruto da cooperação entre o laboratório de sensores a fibra óptica (PUC-Rio) e o instituto IPHT (*Institut für Physikalische Hochtechnologie*). O objetivo do trabalho foi construir um sistema de multiplexação combinando TDM/WDM capaz de interrogar dezenas de sensores a rede de Bragg gravadas em fibras ópticas de alta birrefringência. O sistema de multiplexação consiste em uma chave óptica integrada, baseada em um interferômetro de Mach-Zehnder com configuração X-Y [40,41], e em um espectrômetro que emprega um CCD como elemento de detecção [42-44]. Neste caso a chave óptica é responsável pela multiplexação temporal enquanto o espectrômetro pela multiplexação no comprimento de onda. Será demonstrado que a capacidade de sensores aumentará de um fator  $\geq 10$ , dependendo da

refletividade dos sensores e da incerteza desejada. As limitações da técnica de multiplexação temporal mencionada no capítulo 5 podem ser empregadas para avaliar os limites deste sistema.

## 6.2. Sistema de Multiplexação TDM/WDM

O sistema de multiplexação de sensores baseado na combinação das técnicas TDM/WDM é esquematicamente ilustrado na figura 6.1. Ele é composto por uma fonte de luz de banda larga (SLED) com faixa espectral de 820 a 860 nm, sendo pulsada com largura de pulso de 60ns; uma chave óptica integrada responsável pela multiplexação temporal; um espectrômetro (desenvolvido no IPHT, chamado de *Polychromator*) e um conjunto de sensores a rede de Bragg escritos em fibras de alta birrefringência (HiBi – *High Birefringence*). Todas as conexões são feitas usando fibras de alta birrefringência, mantendo o sistema linearmente polarizado. A luz pulsada é transmitida pela chave óptica incidindo sobre os sensores, e sua reflexão volta passando novamente pela chave óptica até o espectrômetro. Por fim, os sinais coletados no espectrômetro são analisados via software. A seguir será discutido com detalhes cada parte que compõe o sistema de multiplexação.

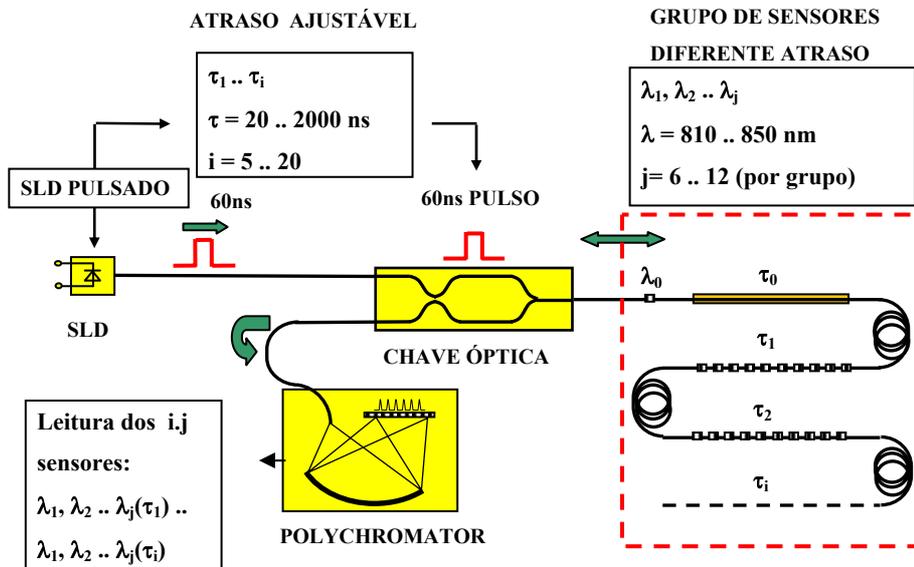


Figura 6.1 - Esquema do sistema de multiplexação TDM/WDM

### 6.2.1. Chave óptica integrada

A chave óptica integrada (modulador externo) esquematicamente ilustrada na figura 6.2 (a), usada para realizar a multiplexação temporal (TDM) é baseada em um interferômetro de Mach-Zehnder com configuração X-Y, feita de niobato de lítio ( $\text{LiNbO}_3$ ). Para a seleção do intervalo de tempo na multiplexação temporal é necessário aplicar uma voltagem na chave óptica cuja forma do sinal é mostrada na figura 6.2 (b). Sendo assim, o sistema funciona da seguinte forma: no nível  $V_1$ , o sinal pulsado do SLED é transmitido através da chave óptica para o conjunto de grupo de sensores. No nível  $V_2$ , a luz refletida do conjunto de sensores retorna à chave óptica, onde é possível selecionar um intervalo de tempo  $\tau$  associado à posição de um determinado grupo de sensores, bloqueando os demais. Após passar pela chave óptica a luz contendo informação de um único grupo de sensores chega ao espectrômetro. Dependendo da largura do pulso e do intervalo de tempo (ou atraso) selecionados, podem ser analisados todos os grupos de sensores distribuídos ao longo da fibra independentemente, desde que os níveis de voltagem aplicados na chave óptica não sofram variações ao longo do tempo.

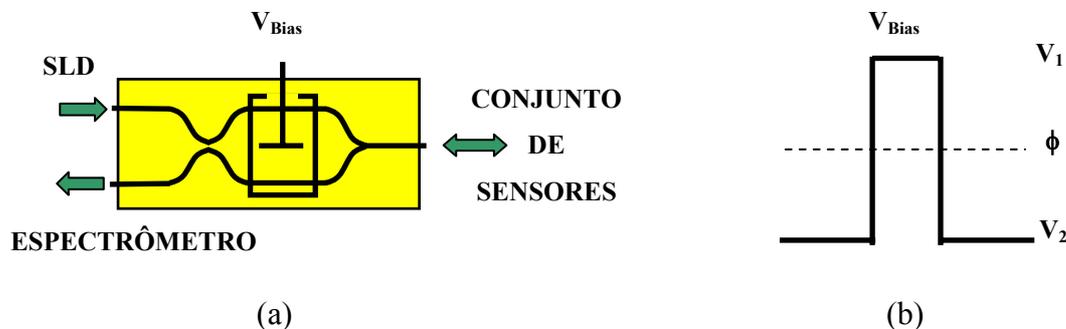


Figura 6.2 - (a) Chave óptica integrada, (b) Perfil da voltagem aplicada na chave óptica

### 6.2.2. Espectrômetro com um CCD linear como elemento de detecção

O espectrômetro desenvolvido no instituto IPHT, responsável pela multiplexação espectral, foi utilizado para inferir o comprimento de onda de Bragg dos sensores. Ele é ilustrado em detalhes na figura 6.3. O sinal luminoso vindo da fibra que contém as informações do grupo de sensores é lançado na rede de difração holográfica, que por sua vez faz gerar uma dispersão no espectro da luz, conseqüentemente, após ser refletida pela rede de difração a luz incide no

fotodetector (CCD linear com 2084 pixel ). Através da placa controladora o sinal é coletado e analisado via software. O espectrômetro pode ser usado para medir uma distribuição espectral com uma faixa de medida de 720 a 890 nm com uma resolução menor que 0.1 nm. Na realidade esse aparato funciona como um demodulador óptico baseado em filtros, selecionando os comprimentos de onda e associando com a intensidade luminosa para cada pixel do CCD linear. Os comprimentos de onda de Bragg são obtidos dos espectros refletidos dos sensores e a posição de pico é determinada usando ajuste polinomial ou cálculo do centróide via software.

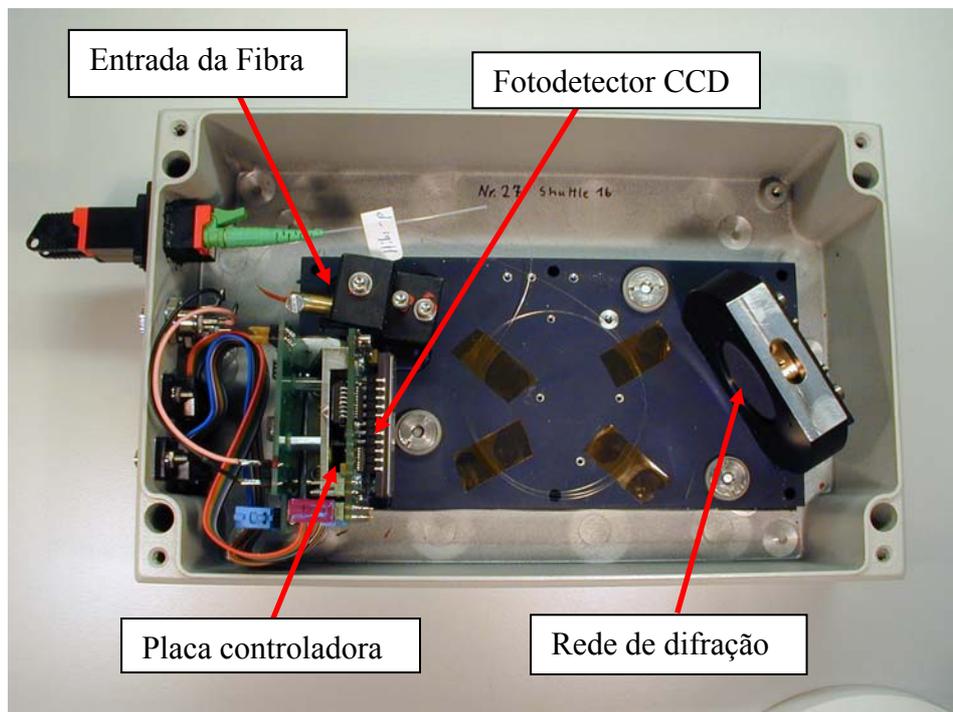


Figura 6.3 – Espectrômetro utilizado para realização da multiplexação do comprimento de onda

A construção desse espectrômetro busca reduzir a interferência eletromagnética e as vibrações mecânicas. Devido à dispersão da luz, a intensidade de potência óptica que chega no fotodetector é muito baixa, e para ter um sinal suficiente na leitura dos espectros são necessárias várias varreduras, tornando o sistema lento, limitando a casos semi-estáticos.

### 6.2.3. Conjunto de sensores a rede de Bragg

O conjunto de sensores usado para teste experimental consistiu em 3 grupos (máximo de 8 grupos, mantendo o erro na leitura do comprimento de onda da

ordem de 3 pm), cada um composto por 5 sensores FBG (máximo 12) com os comprimentos de onda de Bragg compreendidos na faixa de 825 a 845 nm, figura 6.5. Os grupos de sensores eram distribuídos ao longo da fibra separados entre si de 25 m, sendo que os sensores de cada grupo eram distanciados de 2m. As redes dos sensores foram escritas com uma refletividade de aproximadamente 1.5 %, com comprimento de 6mm, em fibras ópticas HiBi (fibras com primeira camada elíptica, que mantém a polarização). Com a utilização de fibras HiBi não existe acoplamentos entre os modos de polarização, e se for lançado uma luz polarizada linearmente em um dos seus eixos o estado será mantido. A chave óptica usada, por sua vez, polariza a luz linearmente em uma direção e ela é conectada a fibra de tal forma que seus eixos são alinhados, mantendo o estado de polarização linear ao longo da fibra.

### 6.3.

#### **Problemas com deriva nos níveis de voltagens aplicadas à chave óptica e sua correção**

Geralmente, os níveis de voltagem aplicados na chave óptica,  $V_1$  e  $V_2$  ilustrados na figura 6.2 (b), apresentam certos deriva ao longo do tempo, em função disso é impossível numa multiplexação temporal selecionar uma certa região ao longo da fibra contendo um determinado grupo de sensores, bloqueando as demais. Por exemplo, quando é inferido um grupo de sensores com a chave óptica com os níveis de voltagem apresentando deriva no tempo, observa-se que no espectro do grupo de sensores selecionado são adicionados sinais de erros, relativos aos espectros dos outros grupos de sensores, isto pode ser visto nas figuras 6.4 (a) e (b). Com o intuito de corrigir essas imperfeições, pode-se medir o espectro do sinal de erros isoladamente, figura 6.4 (c), e subtrai-lo do espectro do grupo de sensores desejado. Para realização desta correção, no sistema proposto, é escolhida uma região ao longo da fibra sem sensores, no intervalo de tempo  $\tau_0$ , figura 6.1, que corresponde a uma referência para o sinal de erro gerado na presença da deriva.

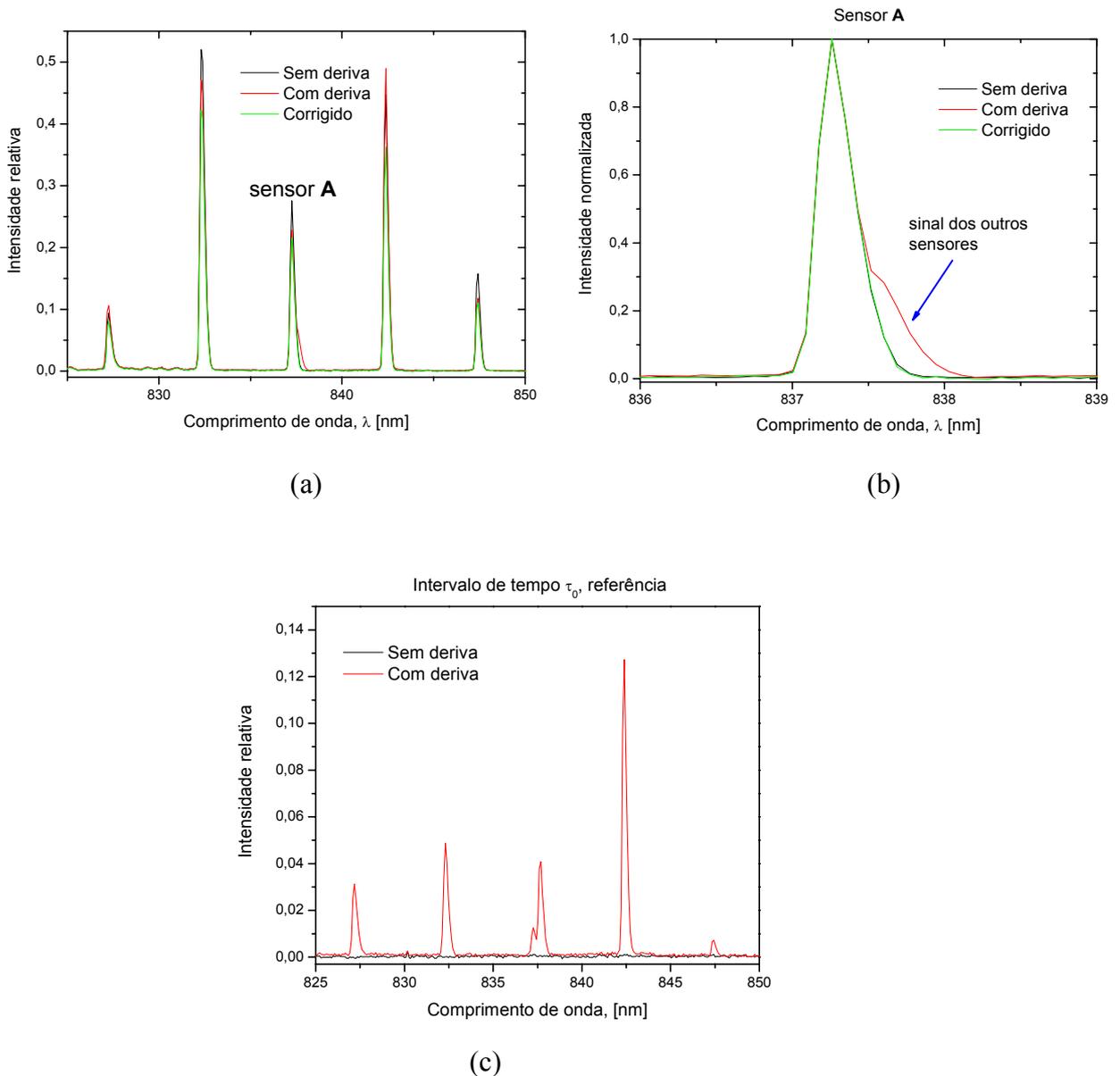


Figura 6.4 - (a) Espectros de um grupo de sensores obtidos com os níveis de voltagens aplicados na chave óptica: sendo ele sem deriva, completamente bloqueado; com deriva, não bloqueado e corrigido, subtração do sinal de erro; (b) Sensor A, com o espectro normalizado; (c) Sinal referente ao erro espectral gerado com os níveis de voltagem com e sem deriva.

Nas figuras 6.4 (a) e (b), são ilustrados os espectros de um grupo de sensores (de um conjunto de 3 grupos de sensores) em três diferentes casos, sendo que na figura 6.4 (b) é ilustrado o espectro do sensor A separadamente. No primeiro caso, o espectro é obtido com os níveis de voltagem aplicados na chave óptica *não apresentando deriva*, levando a uma seleção perfeita de um grupo de sensores. No segundo caso o espectro é obtido com os níveis de voltagem *com deriva*, neste caso observa-se a presença de sinais dos outros grupos de sensores. O espectro corrigido, que é obtido a partir da subtração do sinal de erro do

espectro obtido com os níveis de voltagem com deriva, é apresentado na figura 6.4 (c).

Pode ser observado pelos resultados apresentados nas figuras 6.4 (a), (b) e (c) que o método de correção mostra-se eficaz. Eliminado os possíveis sinais de erro espectrais gerados numa multiplexação temporal, quando os níveis de voltagem aplicados na chave óptica apresentam certos deriva ao longo do tempo.

#### **6.4. Resultados**

Considerando o sistema com as características apresentadas anteriormente, foram medidos os espectros dos grupos de sensores nos específicos intervalos de tempo ou atraso  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  e  $\tau_3$  iguais a 280, 480 e 720 ns, figura 6.5, correspondendo às distâncias de 28, 48 e 72 m, respectivamente e, adicionalmente em  $\tau_0 = 120$  ns, 12 m, é localizada a região sem sensor usada como referência para possíveis imperfeições.

O espectro observado na figura 6.5 (a) é devido às imperfeições na seleção dos grupos de sensores gerado pela deriva nos níveis de voltagem aplicado na chave óptica. No caso, o espectro observado contém informações dos três grupos de sensores. É interessante ressaltar que nesta região, relativa ao intervalo de tempo 120 ns, não existe sensores. Outro ponto importante que deve ser comentado é que o espectro só é observado porque o tempo de leitura considerado foi longo. Isto foi feito com o intuito de enfatizar o efeito.

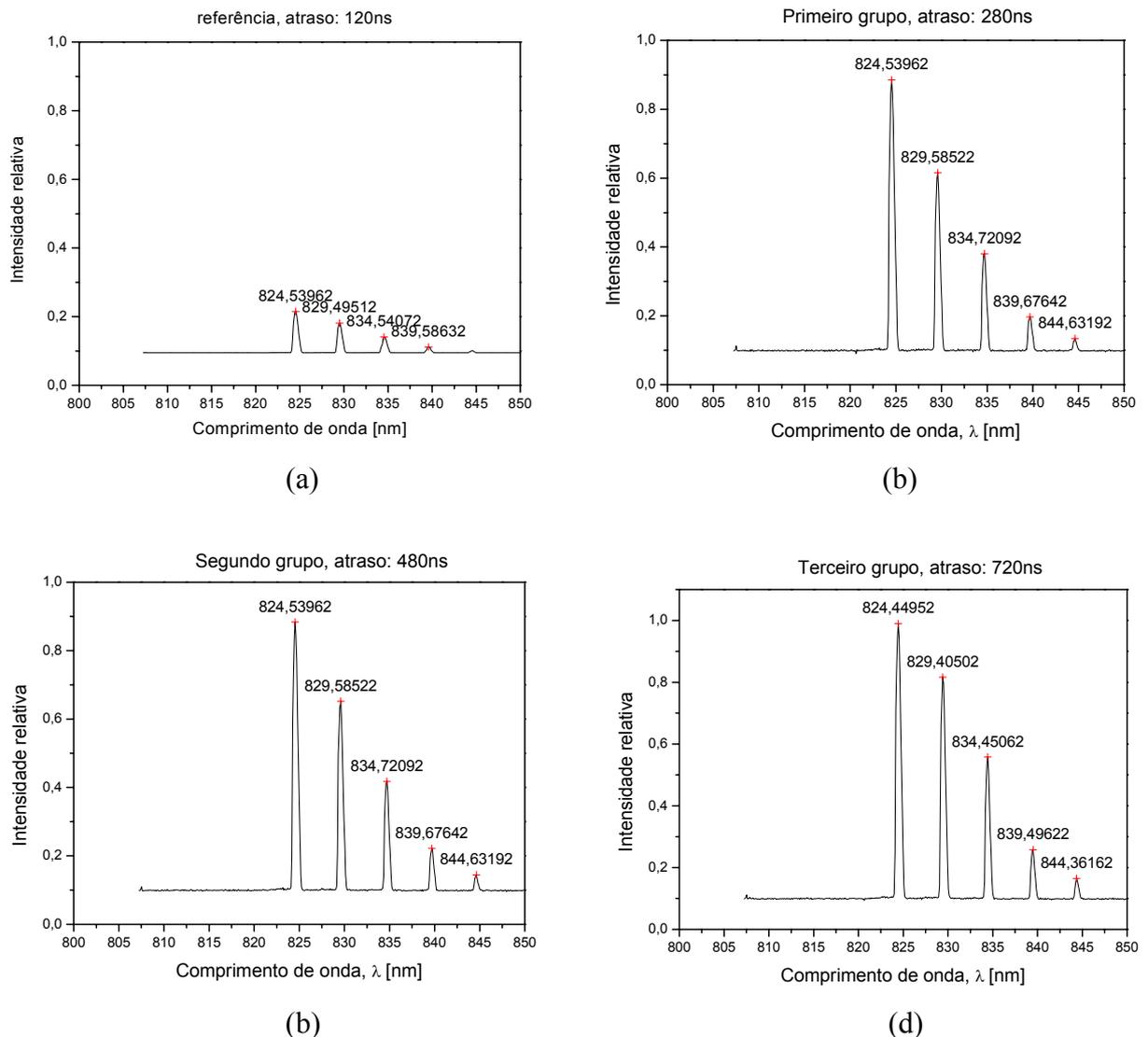


Figura 6.5 - Espectros observados nos quatro intervalos de tempo: 120, 280, 480 e 720ns, relativos a região de referência (sem sensores), (a), e aos três grupos de sensores, (b), (c) e (d)

Nas figuras 6.5 (b), (c) e (d) são apresentados os espectros dos três diferentes grupos de sensores, relativos aos intervalos de tempo de 280, 480 e 720 ns. Para a medida final de interesse os espectros dos três grupos de sensores devem ser subtraídos do espectro de referência apresentado na figura 6.5 (a).

Observa-se que o número de sensores a ser interrogado com o SLED pode ser aumentado para 12 em cada grupo, tendo em vista que os espectros dos sensores apresentado foram tomados com a metade do espectro do SLED. Já em relação ao número de grupo de sensores dependerá da incerteza aceitável, pois como já foi discutido no capítulo 5, em uma multiplexação temporal o espectro da rede de Bragg apresenta certo desvio, que está relacionado com a quantidade de

sensores, a superposição entre eles e com o percentual de refletividade de cada um. Dependendo das características dos sensores é possível interrogar com esse sistema centena de sensores com baixa incerteza na medição.

## 6.5.

### **Aplicação do sistema de multiplexação na medida de compressão transversal**

No capítulo 4 foram discutidos os efeitos provocados em uma rede de Bragg, escrita em fibras ópticas de baixa birrefringência (*standard*), sujeita a esforços de compressão transversais. Nesse capítulo, ao invés de fibras *standard* serão usadas fibras de alta birrefringência sendo submetida aos mesmos esforços. O conceito envolvido nos dois casos é o mesmo. Deve ser lembrado que o objetivo principal desse trabalho é o sistema de multiplexação e, a compressão na fibra e só um exemplo de implementação experimental.

Redes de Bragg escritas em fibras HiBi têm sido amplamente investigadas nos últimos anos. A possibilidade de se obter informação dos dois componentes de deformação em conjunto com a temperatura faz com que a sua aplicação seja de grande interesse nas áreas de materiais compósitos, estruturas inteligentes [45-50].

O experimento realizado com o sistema de multiplexação foi caracterizado pela aplicação de uma força na direção transversal da fibra. Na figura 6.7 são ilustrados esquematicamente os detalhes da aplicação da força na fibra. A idéia é obter informações da força aplicada em função das variações do comprimento de onda relativas ao dois picos, associados às polarizações, independentemente. Como já foi apresentado antes, o sistema trabalha com uma polarização linear, sendo assim, para serem obtidas as informações dos dois picos separadamente, basta intercalar a conexão do eixo da chave óptica com os dois eixos da fibra. Na figura 6.6 (a) são ilustrados os espectros de um grupo de sensores relativos aos dois estados de polarização, obtidos independentemente. De forma comparativa, foi obtido o espectro de um sensor do grupo de sensores usando luz não polarizada com auxílio de um sistema óptico diferente (utilizando o OSA), figura 6.6 (b). Os dois picos observados no espectro do sensor, figuras 6.6 (a) e (b), estão associados à birrefringência intrínseca peculiar a fibra HiBi.

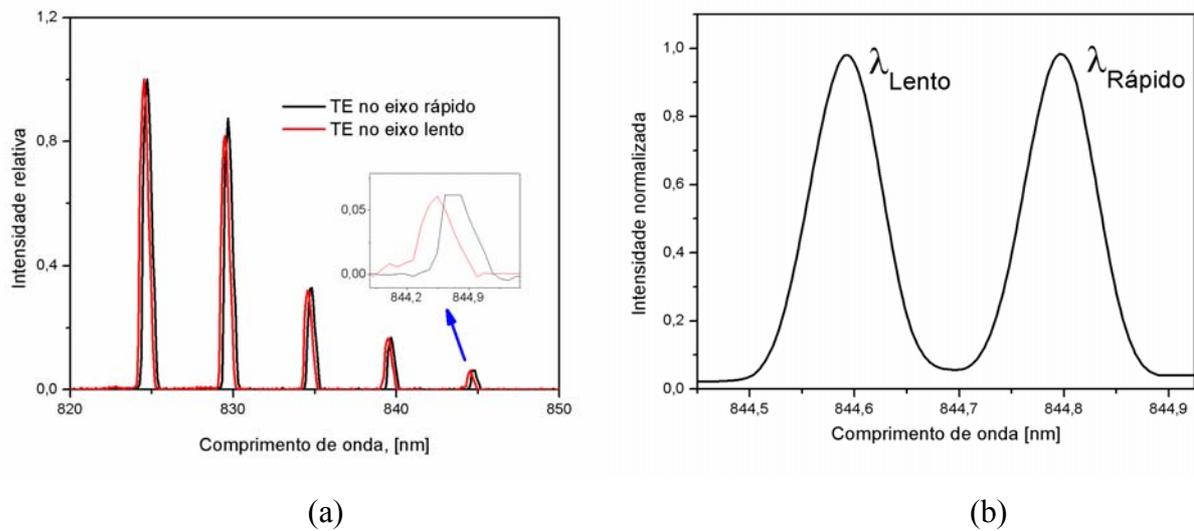


Figura 6.6 - (a) Espectro refletido de um grupo de sensores com os dois modos de polarização independentes. (b) espectro de um sensor obtido com o auxílio do OSA, usando luz não polarizada

O primeiro passo é identificar o ângulo de aplicação da força na fibra HiBi, buscando os eixos correspondentes aos dois modos de polarização, figura 6.6 (b), rápido e lento [8], nos quais a rede de Bragg apresenta maior sensibilidade quando submetido a esforços. Uma forma de encontrar tais posições é aplicar uma força, antes da região que contém a rede de Bragg, em diferentes ângulos, como ilustrado na figura 6.7 e, observar a intensidade luminosa, através de um sistema de polarização. Quando uma força lateral é aplicada em um certo ângulo relativo a um dos eixos principais da fibra, a orientação dos eixos de birrefringência muda, provocando um acoplamento entre os modos originais, sendo assim, o estado de polarização será ditado por essa força aplicada e pelo ângulo. Essa análise é possível usando o sistema aqui apresentado porque ele funciona como um discriminador de polarização [51-52]. Sabendo que a chave óptica polariza linearmente a luz no modo TM, a conexão com a fibra HiBi é feita de tal forma que a luz polarizada pode ser alinhada em uma das direções principais, eixo lento ou rápido. A luz polarizada que sai da chave óptica entra na fibra HiBi sofre a perturbação (força) e depois é refletida pela rede de Bragg voltando à chave óptica que passa a funcionar como um analisador. O resultado pode ser visto na figura 6.8 (a), que mostra a variação da intensidade em função do ângulo de aplicação da força. Tanto no eixo lento quando no eixo rápido a intensidade não varia com a força aplicada. Para discriminar um do outro, basta saber que no eixo lento a faixa

de insensibilidade angular é menor que no eixo rápido [51]. Com esse método é possível determinar a posição dos eixos com um erro de  $\pm 5^\circ$ .

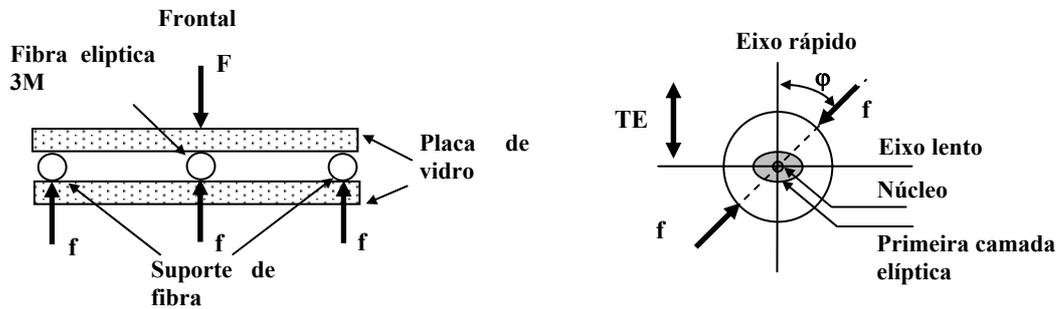


Figura 6.7 - Rede de Bragg em fibra óptica submetida à compressão transversal

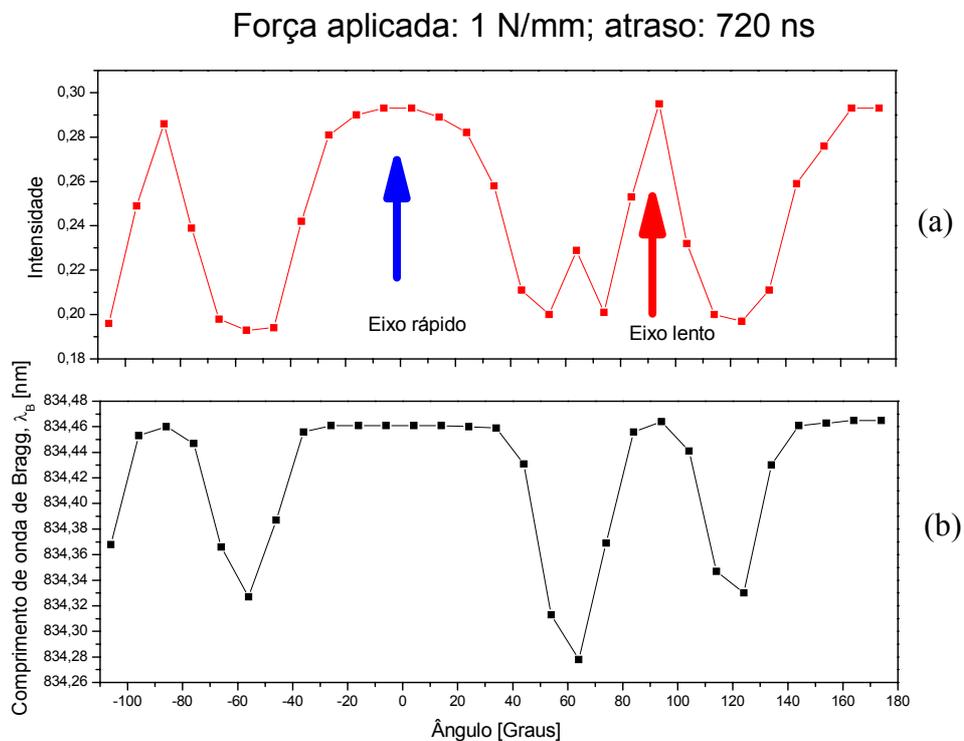


Figura 6.8 - (a) Intensidade e (b) comprimento de onda de Bragg versus diferente ângulos de aplicação de força. Força aplicada antes da rede de Bragg

A variação observada no comprimento de onda, figura 6.8 (b), se deve a mudança no estado de polarização, lembrado que o espectro da rede de Bragg escrita em fibras HiBi apresenta dois picos, associados a cada polarização, tem-se que a medida que o estado de polarização muda os picos da rede vão sendo iluminados de forma diferenciada, conseqüentemente, observa-se que o

comprimento de onda varia de um pico ao outro dependendo do estado de polarização.

Depois de conhecida a direção principal dos eixos, foi aplicada uma força de compressão transversal nas duas direções, separadamente. A direção de polarização da luz escolhida foi sempre ortogonal à direção da força aplicada.

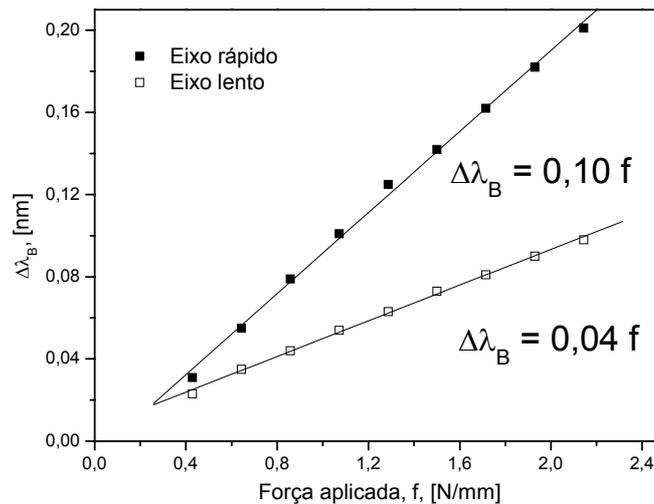


Figura 6.9 - Variação do comprimento de onda de Bragg, em função da força aplicada

Aplicando uma força transversal de 0 a 2.2 N/mm no sensor cuja comprimento da rede de Bragg é de 835 nm, localizado no terceiro grupo (atraso igual a 720 ns) observa-se uma variação no comprimento de onda de Bragg. A sensibilidade dessa variação depende da direção de aplicação da força. Na figura 6.9 nota-se que a variação do comprimento de onda é maior quando a força é aplicada na direção do eixo rápido, que apresenta uma sensibilidade de  $\Delta\lambda_B/\Delta f \approx 0.1 \text{ nm/Nmm}^{-1}$ , enquanto que na direção do eixo lento o valor é de  $\Delta\lambda_B/\Delta f \approx 0.04 \text{ nm/Nmm}^{-1}$ . Nos dois casos a direção de polarização da luz é sempre perpendicular à aplicação da força.