



IMPLEMENTAÇÃO DE UM SENSOR À FIBRA ÓPTICA POLARIMÉTRICO PARA MEDIDAS DE DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS

Código: AACIBA

Resumo. *Este artigo descreve um sensor à fibra óptica polarimétrico projetado para medir deformações em estruturas. Tem como princípio de funcionamento o efeito do deslocamento de fase relativo entre os modos de polarização dos dois eixos principais de fibras ópticas de alta birrefringência (Hi-Bi). Além da fibra, a instrumentação consiste de um laser de He-Ne, lentes objetivas, polarizadores, um fotodetector de silício e um amplificador lock-in. O sensor foi inserido em um cilindro de acrílico. Foi implementado com compensação para ser insensível à variações de parâmetros externos indesejáveis, como, por exemplo, a temperatura, utilizando a técnica de emendas proposta por Dakin & Wade (1984). Foi construído com região sensora de 5 mm e pode medir deformações na faixa de 0 a 500 $\mu\epsilon$. Esta faixa é útil para se estudar deformações em estruturas de concreto. O sensor pode ser ajustado para operar em uma faixa de deformação específica através da escolha do tipo de fibra, do comprimento da região sensora e do comprimento de onda da luz incidente.*

Palavras-chave: Sensor à fibra óptica, Sensor de deformação, Sensor polarimétrico, Medidas de deformações, Deformações em estruturas.

1. INTRODUÇÃO

Quando se necessita medir deformações em superfícies não uniformes, como as do concreto, utiliza-se extensômetros grandes para se medir deformações médias. Com isto são minimizadas imprecisões devido à descontinuidade da superfície.

Consideráveis vantagens têm sido conseguidas com o uso de fibras ópticas em sistemas sensores projetados para medir ou monitorar uma variedade de parâmetros físicos como temperatura, pressão, deformação, etc. Esses sensores possuem várias características que os tornam atraentes para o monitoramento de deformações estruturais: possuem alta sensibilidade, tamanho reduzido, podendo ser configurados em formas arbitrárias para penetrar em locais de difícil acesso. São não somente imunes às interferências eletromagnéticas (EMI), um importante fator em ambientes ruidosos, como nas indústrias, mas também seguros em ambientes eletricamente perigosos, arriscados ou explosivos.

Logicamente, as desvantagens existem, e relacionam-se principalmente ao fato de não ser uma tecnologia tão convencional ao usuário, requerendo algum investimento inicial e capacitação técnica de pessoal qualificado, além é claro, das dificuldades associadas à própria confecção dos sensores, como a necessidade de se dispor de uma oficina mecânica de precisão. Por serem extremamente sensíveis (dependendo da configuração), podem ser susceptíveis à ação de mais de uma grandeza física, que não a própria de interesse. Isto torna necessário um processo de demodulação, às vezes complicado, com elevado conteúdo de eletrônica para processamento do sinal e/ou compensação por controle automático, segundo Bock *et. al.* (1992).

Os sensores à fibra óptica operam segundo o princípio de que algum parâmetro físico da fibra é perturbado devido a um distúrbio externo, gerando uma variação na amplitude, fase, comprimento de onda, polarização e/ou conteúdo modal da onda óptica que se propaga na fibra.

Alguns tipos de sensores à fibra óptica empregam fibras de alta birrefringência (Hi-Bi). Birrefringência é um fenômeno que ocorre em materiais que apresentam dois índices de refração diferentes dependendo da polarização da luz, ou seja, a velocidade de propagação da luz dependerá da direção do vetor campo elétrico, o qual descreve sua polarização.

Os sensores polarimétricos utilizam (porém não obrigatoriamente) fibras ópticas de alta birrefringência, com polarização dos modos mutuamente ortogonais, nas quais a diferença entre os índices de refração efetivos é significativa. Considerando-se que o acoplamento entre modos é baixo, a energia luminosa que excita os modos próprios de propagação da fibra permanecerão nestes, mesmo quando a fibra sofrer variações de temperatura ou deformações longitudinais. Tais influências externas afetarão as velocidades relativas de propagação da energia nestes modos. As variações no atraso relativo entre modos são linearmente proporcionais às deformações longitudinais da fibra Hi-Bi. Este atraso relativo pode ser medido excitando-se ambos os modos igualmente e analisando-se a luz de saída, através de um polarizador.

Deve ser ressaltado, que ao contrário da fibra Hi-Bi, a fibra óptica convencional não polarizada (usada em sistemas de comunicação), contém defeitos internos ao longo de sua extensão, que alteram aleatoriamente a polarização da luz no seu interior. Por isso, não são normalmente empregadas em sensores interferométricos.

A fibra óptica de alta birrefringência foi utilizada por Bock (1990) para construir um sensor projetado para medir altas pressões, com uma precisão melhor que 1% para uma faixa considerável de temperatura. Silveira Jr. *et al.* (1994) descreveram um sensor à fibra óptica para medidas de deformações estruturais. Utilizaram, contudo, fibras ópticas de baixa birrefringência (Lo-Bi).

Este artigo descreve um sensor à fibra óptica polarimétrico, intrínseco, construído com fibra monomodo de alta birrefringência, com o objetivo de medir deformações, em tempo real, de estruturas. A faixa investigada, de 0 a 500 $\mu\epsilon$, é de interesse no estudo de deformações de estruturas de concreto.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Princípio de funcionamento do sensor polarimétrico

Quando luz linearmente polarizada é lançada à 45^0 dos eixos de polarização principal da fibra Hi-Bi, os 2 modos próprios, paralelos aos eixos x e y da fibra, são igualmente excitados. Ambas as ondas viajam através da fibra como se propagassem em dois meios diferentes, com diferentes índices de refração η_x e η_y . No percurso através da fibra de comprimento L essas

ondas experimentam, respectivamente, mudanças de fase $2\pi\eta_x L/\lambda$ e $2\pi\eta_y L/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda da luz incidente

A diferença de fase ($\Delta\phi$) entre os modos de polarização da luz, na saída da fibra, pode ser escrita como:

$$\Delta\phi = 2\pi L.(\eta_x - \eta_y)/\lambda \quad (1)$$

A “Fig. 1” ilustra a configuração experimental básica normalmente utilizada para os sensores à fibra óptica, do tipo polarimétrico.

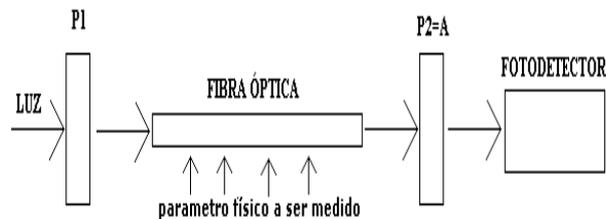


Figura 1 - Configuração experimental básica utilizada para os sensores à fibra óptica do tipo transmissão (P_1 e P_2 são polarizadores).

O ângulo do eixo de transmissão do polarizador P_1 definirá a direção do campo elétrico que incide na fibra, em relação à seus eixos próprios. Por sua vez, o ângulo do eixo de P_2 define a direção de análise na qual é medida a intensidade óptica de saída da fibra, a qual é proporcional a corrente elétrica no fotodetector.

Na “Fig. 2” é representado o vetor campo elétrico incidente na fibra óptica através da direção do polarizador P_1 e a direção de transmissão do analisador (A ou polarizador P_2). Os eixos x e y representam os eixos próprios da fibra Hi-Bi.

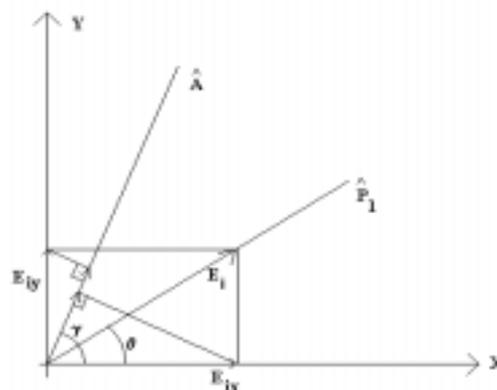


Figura 2 - Representação do vetor campo elétrico incidente na fibra óptica Hi-Bi. \hat{P}_1 e \hat{A} são as direções de transmissão dos polarizadores P_1 e P_2 , respectivamente.

Os eixos de transmissão dos polarizadores P_1 e P_2 podem girar em relação aos eixos próprios da fibra Hi-Bi.

O vetor \vec{E}_i corresponde ao campo elétrico incidente na fibra cuja amplitude é E_o . A “Eq. (2)” descreve o campo elétrico do sinal incidente ao acesso de entrada da fibra :

$$\vec{E}_i = E_0 (\cos \theta \hat{x} + \sin \theta \hat{y}) e^{j\omega t} \quad (2)$$

onde ω é a frequência angular da portadora óptica, e não foi considerada a fase inicial da luz ao entrar na fibra por não ser relevante ao funcionamento do sensor.

O trecho sensor da fibra provocará um desvio de fase relativo total ψ , entre as duas componentes de campo elétrico, quando forças externas atuarem no corpo de provas de acrílico. Então, o vetor campo elétrico emergente (\vec{E}_e) na saída da fibra Hi-Bi é dado por:

$$\vec{E}_e = E_0 [\cos \theta \bar{x} + \sin \theta e^{j(\Delta\phi + \psi)} \bar{y}] e^{j\omega t} \quad (3)$$

onde $\Delta\phi$ é dado pela “Eq(1)”. Os termos de fase comuns as duas componentes foram desconsiderados uma vez que não estarão presentes na análise final.

Na saída do analisador $P2$ tem-se o vetor \vec{E}_A . Denominando \hat{A} o vetor unitário na direção de transmissão do analisador, o vetor campo elétrico \vec{E}_A é escrito como :

$$\vec{E}_A = E_0 [\cos\theta \cos\gamma + \sin\theta \sin\gamma e^{j(\Delta\phi + \psi)}] e^{j\omega t} \hat{A} \quad (4)$$

Utilizando a “Eq. 4”, Silva (1995) deduziu a expressão da intensidade óptica, I , na saída da fibra a partir de :

$$I = \frac{\vec{E}_A \cdot \vec{E}_A^*}{2\eta_0} \quad (5)$$

sendo $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$, a impedância intrínseca do ar, onde μ_0 e ϵ_0 são as permeabilidade e permissividade do ar. Assim,

$$I = \frac{\epsilon_0 c E_0^2}{2} \left\{ \cos^2 \theta \cos^2 \gamma + \sin^2 \theta \sin^2 \gamma + \frac{\sin 2\theta \sin 2\gamma}{2} \cos(\Delta\phi + \psi) \right\} \quad (6)$$

possuindo unidade de W/m^2 , e c a velocidade da luz no vácuo. Na “Eq. (6)”, somente a 3ª parcela é relevante pois contém o sinal de informação ψ .

Analisando-se a “Eq. (6)” pode-se chegar as seguintes conclusões :

1) Para $\theta = 0$ ou 90° , ou, para $\gamma = 0$ ou 90°

A parcela relevante na “Eq.6”, que contém o termo de fase ψ se anula, tornando o sistema insensível à forças externas que se desejam medir.

2) Para $\theta = 45^\circ$ e $\gamma = -45^\circ$

Neste caso, a parcela da “Eq.6” relacionada a ψ não se anula. Em particular, na situação onde o comprimento L é tal que $\Delta\phi$ seja igual a 90° , obtém-se :

$$I = \frac{\epsilon_0 c E_0^2}{4} \{1 + \sin\psi\} \quad (7)$$

uma situação denominada de “quadratura de fase”, onde o sensor apresenta seu melhor desempenho.

Desta forma, deve ser empregada a situação 2), de polarizadores cruzados, que conduz a saída óptica nula na ausência de fase relativa ψ , ou seja, na ausência de força externa (e na situação de quadratura).

O arranjo experimental da “Fig 1” foi testado pelos autores do trabalho, contudo, os resultados obtidos não foram conclusivos por não apresentarem reprodutibilidade.

O que acontece é que se torna difícil determinar um comprimento de fibra, L , que conduza à condição de quadratura. Para complicar ainda mais, o termo de fase relativa $\Delta\phi$, é contituído por duas parcelas, uma relacionada à birrefringência e caminho óptico, e outra relacionada a perturbações ambientais no meio que envolve a fibra como , por exemplo, deriva térmica, vibrações, etc. Este efeito é comum a qualquer tipo de configuração interferométrica e causa degradação (fading) do sinal.

Por isso, foi proposta a configuração polarimétrica local, utilizando-se emendas por fusão, a ser descrita a seguir (Dakin e Wade/84).

2.2. Técnica de emendas para compensação da influência da temperatura

A técnica de emendar fibras ópticas é um procedimento bastante delicado e exige grande precisão. O acoplamento de luz no acesso de entrada é feito alinhando-se o campo elétrico da luz com apenas um eixo óptico próprio da fibra óptica (Hi-Bi) (f - “fast” ou s - “slow”), com o auxílio do polarizador. Ao atravessar totalmente a extensão do terminal de entrada, o vetor campo elétrico encontra uma primeira emenda, que é feita como mostra a “Fig. 3”, com seus eixos deslocados de 45° em relação ao terminal de entrada. A partir da primeira emenda o vetor campo elétrico excita igualmente os dois eixos próprios da fibra Hi-Bi, na região sensora. A próxima emenda, serve para analisar o feixe óptico, e é feita a 90° da fibra de entrada. Um segundo polarizador é considerado na saída da associação.

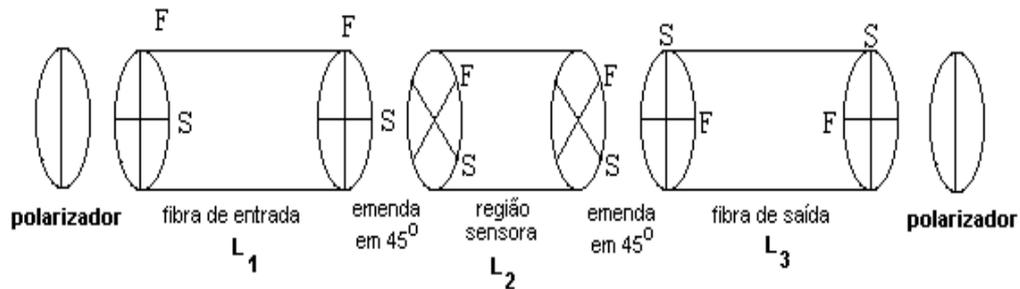


Figura 3 – Sensor polarimétrico local empregando a técnica de emendas em fibras Hi-Bi.

Na região sensora, por se tratar de um trecho de pequeno comprimento (inferior a 5 mm), os efeitos de variação longitudinal de temperatura são drasticamente reduzidos.

O vetor campo elétrico emergente (\vec{E}_e) na saída da associação pode ser obtido com o auxílio de matriz de Jones, conforme Udd (1991) :

$$\vec{E}_e = [M] \vec{E} \quad (8)$$

onde $[M]$ é a matriz de Jones do conjunto e \vec{E}_i é o vetor campo elétrico de entrada. A matriz $[M]$ pode ser determinada por :

$$[M] = [P] [HiBi]_1 [R^{-1}(\theta)] [HiBi]_2 [R(\theta)] [HiBi]_3 [P] \quad (9)$$

para as matrizes de Jones de polarização [P], das fibras [HiBi], e de rotação de eixos [R(θ)], sendo :

$$[R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

No caso deste trabalho, $\theta = 45^\circ$ e

$$[P] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11A)$$

$$[HiBi]_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\phi_i} \end{bmatrix} \quad (11B)$$

para $i = 1, 2, 3$. Ou seja, para cada trecho de fibra de comprimento L_i , associa-se um deslocamento de fase.

$$\phi_i = \Delta\beta_i L_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

sendo $\Delta\beta_i$ a variação total da constante de propagação, ou devido aos caminhos ópticos dos trechos de fibra óptica Hi-Bi, ou devido à forças externas aplicadas.

Executando as operações indicadas na “Eq.(9)”, obtém-se :

$$[M] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + e^{j\phi_2} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

onde $\phi_2 = \Delta\beta_2 L_2$. Ou seja, [M] independe das variações de fase ϕ_1 e ϕ_3 que ocorrem nos trechos de entrada e saída da associação, respectivamente. A região sensora está restrita a região de comprimento L_2 .

A “Eq. 13” evidencia que o sensor será imune a temperatura ambiente ou qualquer outro parâmetro físico atuando nas seções de entrada e saída da fibra. Então, os efeitos indesejáveis da deriva térmica poderão ser minimizados diminuindo-se o comprimento L_2 , sem contudo perder sensibilidade pelo fato do sensor ser interferométrico

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido nos laboratórios da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. A “Fig. 4” ilustra o esquema do sistema óptico utilizado nos experimentos.

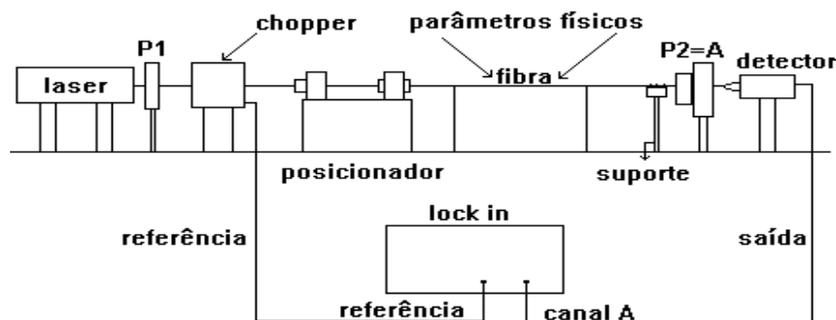


Figura 4 - Configuração básica do sistema óptico.

Por envolver implementação mais simples (relativamente a técnica de compensação ativa) optou-se por utilizar o método de Dakin e Wade para minimizar a influência da temperatura e de micro-vibrações no sinal do sensor. As emendas foram feitas segundo o esquema mostrado na “Fig. 3”, utilizando o equipamento Ericsson, modelo FSU 925 PM-A.

O corpo de provas de acrílico foi construído com formato cilíndrico com diâmetro de 2,5 cm e altura de 3,0 cm. O acrílico possui curva tensão x deformação linear, na faixa de 0 a 500 $\mu\epsilon$, que é a faixa útil para ensaios de estruturas de concreto. Foi feito um orifício de 2,5 mm de diâmetro, na sua porção central, para a inserção da fibra óptica. Esta foi fixada injetando-se, cuidadosamente, cola acrílica no orifício. A região sensora da fibra possuía comprimento de $L_2 = 5$ mm, aproximadamente. Foram fabricados 3 sensores com emendas, e apresenta-se aqui o que conduziu aos melhores resultados.

A fibra HiBi (Newport) que foi utilizada era monomodo para o laser de He-Ne. A identificação dos eixos principais da fibra foi realizada variando-se a direção da polarização da luz incidente na fibra, através do giro do polarizador e do laser. Sem nenhuma força aplicada, variando-se o ângulo de giro de 5 em 5°, na faixa de 0 a 90°, mediu-se o sinal do sensor em duas diferentes temperaturas: 30 °C e 45 °C. Enquanto não se obteve o alinhamento desejado, a variação da temperatura produzia uma grande instabilidade do sinal de saída. Identificada a faixa de menor instabilidade variou-se o ângulo de giro de 2,5° em 2,5° e identificou-se o ângulo no qual a variação do sinal do sensor com a temperatura foi mínima.

As forças de compressão foram aplicadas no corpo de provas utilizando-se a prensa Pavitest, modelo C1006, conforme Ferreira (1997).

4. RESULTADOS

A “Figura 5” ilustra os resultados obtidos nos experimentos realizados para se avaliar a influência da temperatura no sinal de saída do sensor polarimétrico. Sem aplicar forças, para 4 diferentes temperaturas de um trecho do terminal de entrada da fibra, monitorou-se o sinal produzido pelo sensor, quando a luz do laser incidiu com sua direção de polarização paralela e a 45° de um dos eixos principais da fibra.

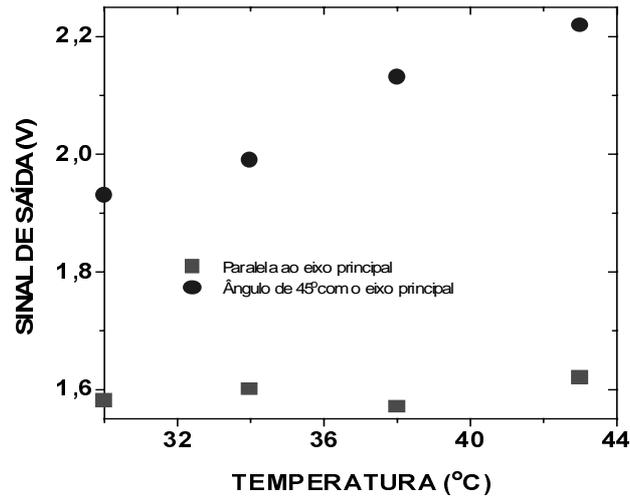


Figura 5 - Sinal produzido pelo sensor em função da temperatura de um trecho de entrada da fibra, para duas diferentes direções de polarização da luz.

A “Figura 6” ilustra a resposta do sensor quando se aplicou forças de compressão no corpo de prova, em ordem crescente e decrescente de magnitude.

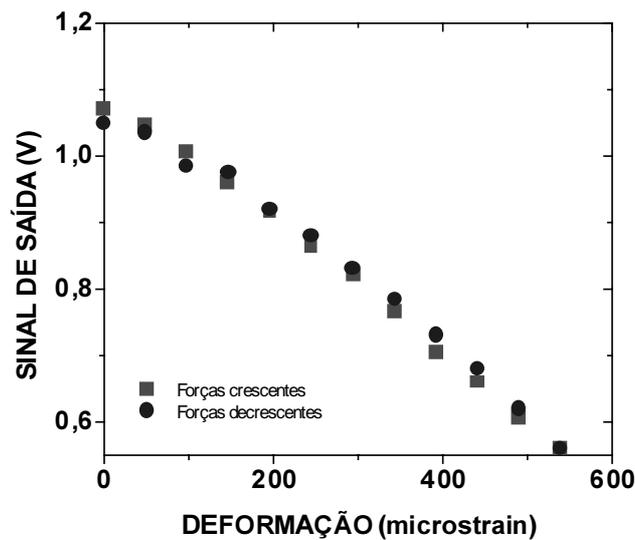


Figura 6 – Resposta do sensor à fibra óptica com a deformação, quando se aplicou forças em ordem crescente e decrescente de magnitude.

A “Figura 7” ilustra os resultados obtidos na realização de 5 ensaios com o sensor, nos quais as condições experimentais foram mantidas as mesmas. As curvas fornecem informações a respeito da repetibilidade do sensor.

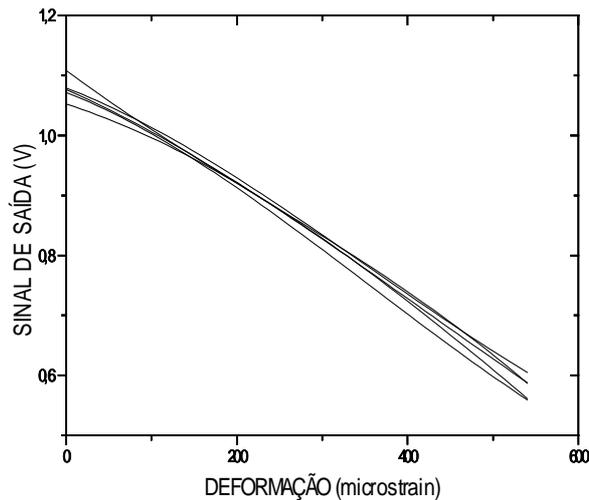


Figura 7 – Sinais produzidos pelo sensor em função da deformação, em 5 diferentes ensaios.

A sensibilidade média apresentada pelo sensor nos 5 experimentos foi de 1 mV/ $\mu\epsilon$.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu montar uma infra-estrutura adequada para o desenvolvimento de sensores à fibra óptica, com a implementação de uma bancada óptica e o domínio de técnicas específicas para este tipo de sensor.

Foi realizada uma análise teórica do sensor polarimétrico, visando sua aplicação em medidas de deformações na faixa de 0 a 500 $\mu\epsilon$ (faixa de interesse para o concreto).

Na realização dos experimentos preliminares com corpos de acrílico, constatou-se que a resposta do sensor estava de acordo com a teoria, mas havia a influência marcante da temperatura, de micro-vibrações e de outros tipos de ruídos que tornaram muito pobre a repetibilidade do sinal.

Consultando-se a literatura foi verificado que a solução dos problemas citados não era trivial. A minimização do “fading” em sensores polarimétricos construídos com fibras de alta birrefringência, é uma atividade árdua, envolvendo técnicas que, algumas vezes, são muito difíceis de serem implementadas.

Optou-se por empregar a técnica utilizada por Dakin e Wade para, simultaneamente, reduzir o ruído de fase e a sensibilidade indesejada a alterações ambientais de temperatura e de pressão. A implementação do sensor, com comprimento da regiões sensora de 5 mm, possibilitou operação em sub-ciclo, na faixa de 0 a 500 $\mu\epsilon$. Foi fundamental determinar-se os eixos principais das fibras. Ficaram implementados os sensores compensados, nos quais eventuais variações de temperatura e outros parâmetros físicos indesejáveis, nos terminais de entrada e saída, teoricamente, não influenciam o sinal dos sensores. Os resultados obtidos mostraram que não foi possível eliminar, completamente, o “fading” do sinal. Isto ocorreu devido aos seguintes fatores :

- 1) Embora as emendas tenham sido feitas com máquina de grande precisão, não se pode descartar um pequeno desalinhamento nas mesmas;
- 2) Admite-se a possibilidade de algum erro na determinação dos eixos próprios da fibra HiBi.

Estes fatores, obviamente, influenciam a insensibilidade do sensor a parâmetros externos indesejáveis.

Apesar destas limitações, os resultados obtidos neste trabalho mostram o bom potencial dos sensores à fibra óptica polarimétricos para medidas de deformações em estruturas. São muito versáteis, apresentam as vantagens citadas na Introdução e poderão vir a ser uma boa alternativa em relação aos extensômetros convencionais.

6. REFERÊNCIAS

- 1 - Dakin, J.P. & Wade C.A., 1984, Compensated polarimetric sensor using polarization-maintaining fiber in a differential configuration, *Electronics Letters*, vol. 20, n. 1, pp.51-53.
- 2 - Bock, W.J., Porada, E., and Zaremba, M. B., 1992, Neural processing type fiber –optic strain sensor, *IEEE - Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol. 41, n. 6, pp. 1062-1066.
- 3 - Bock, W.J., 1990, Development of a polarimetric optical fiber sensor for electronic measurement of high pressure, *IEEE - Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol. 39, n. 5, pp. 715-721.
- 4 - Silveira Jr, L., Silva, R. B. e Zângaro, R. A., 1994, Sensor à fibra óptica para medida de deformações estruturais, *Anais do XVII Encontro de Física da Matéria Condensada*, vol. 1, pp. 9-14.
- 5 - Silva, L. M., (1995) Sensor de Temperatura à Fibra Óptica de Alta Birrefringência, *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.*
- 6 - Udd, E., 1991, *Fiber Optic Sensors, An Introduction for Engineers and Scientists*, John Wiley & Sons.
- 7 - Ferreira, W. P., (1997), Implementação de sensores à fibra óptica polarimétricos para medidas de deformações em estruturas, *Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira – SP.*

Implementation of a Polarimetric Optical Fiber Sensor for Measurement of Strain in Structures

Abstract

This work describes the implementation of a polarimetric fiber optic sensor for measurement of strain in structures. The sensor is based on the effect of relative phase shift between two orthogonally polarized eigenmodes of a highly birefringent (HB) polarization-maintaining optical fiber which serves as the sensing element. The instrumentation of the sensor consists of a He-Ne laser, polarizers, objectives, a silicon photodetector and a lock-in amplifier. The sensing element was embedded in acrylic cylinders. The prototype was compensated against undesirable external parameters, such as the temperature, using the splice technique proposed by Dakin and Wade (1984). It was constructed using a 5 mm sensing length and was able to measure strain in the range of 0 to 500 $\mu\epsilon$. This strain range is useful for studying concrete structures. The sensor can be adjusted to a specified strain range through an appropriate choice of the sensing length and wavelength of the incident light.

Key words: Fiber optic sensor, Strain sensor, Polarimetric sensor, Strain measurement, Structure strain.