

unesp

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

***DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM
ENGENHARIA ELÉTRICA***

1210001056



Nº 18

**IMPLEMENTAÇÃO DE SENSORES À FIBRA
ÓPTICA POLARIMÉTRICOS PARA MEDIDAS
DE DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS
ALUNO: WAGNER PERON FERREIRA
ORIENTADOR: APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO**

Te.1056

unesp 

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 12 13 14 15 16 17 18 19

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**IMPLEMENTAÇÃO DE SENSORES À FIBRA
ÓPTICA POLARIMÉTRICOS PARA MEDIDAS DE
DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS**

WAGNER PERON FERREIRA

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia
de Ilha Solteira - UNESP como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia Elétrica (ME).

ORIENTADOR : Prof. Dr. APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO

**ILHA SOLTEIRA-SP
DEZEMBRO-1997**

1210001056



Proc. 040/98 NRD 15

UNESP- "CAMPUS" DE ILHA SOLTEIRA SERVIÇO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA <i>30.03.98</i>	DATA DE TOMBAMENTO <i>30.04.98</i>
REGISTRADO POR <i>Elia</i>	TOMBO <i>1056</i>
ACQUIÇÃO <i>Doacat R\$ 1000 auto</i>	CLASSIFICAÇÃO <i>F383.i</i>

“IMPLEMENTAÇÃO DE SENSORES À FIBRA ÓPTICA POLARIMÉTRICOS PARA MEDIDAS DE DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS”

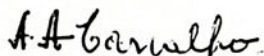
Wagner Peron Ferreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA
SOLTEIRA - UNESP - COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA (ME).



Nobuo Oki, D. Sc.- Coordenador

COMISSÃO EXAMINADORA :



Aparecido Augusto de Carvalho, D. Sc - Orientador



João Sinézio de Carvalho Campos, D. Sc.



Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira, D. Sc

Ilha Solteira - SP, dezembro de 1997

A Deus e a minha Família



AGRADECIMENTOS

Ao Professor Aparecido Augusto de Carvalho pela amizade, boa vontade, orientação e estímulo;

A todos os colegas do curso de pós-graduação;

A todos os funcionários do DEE (Departamento de Engenharia Elétrica) da FEIS (Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira);

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Elétrica Everaldo Leandro e Valdemir Chaves;

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Civil Gilson Campos Correa e Mário Roberto Correa Ferreira.

A Telebrás (CPQD) representada pelo Dr. Danilo Dime;

Ao Prof. Cláudio Kitano (ITA);

Édy Carlos Monteiro, aluno de doutorado do ITA;

Ao grupo de Sensores Ópticos do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do CTA, em particular :

Major Osni Lisboa;

Ten. Cel. Gáudio Vinícius Lopes Besch;

Cap. Av. Ranulfo Acir de O. Resende;

Pesquisador Flávio Galdieri.

Ao prof. José Edimar B. Oliveira (ITA).

Ao Prof. Dr. Marcelo M. Werneck da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

A minha namorada Eliane M. Queiroz.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro.

Resumo

Este trabalho descreve a implementação de sensores a fibra óptica polarimétricos para medidas de deformações em estruturas. Têm como princípio de funcionamento o efeito do acoplamento de polarização entre os dois eixos principais de fibras de alta birrefringência (HB). Além da fibra, a instrumentação consiste de um laser de He-Ne polarizado, polarizadores, lentes objetivas, um fotodetector de silício e um amplificador lock-in. Os sensores foram inseridos em cilindros de acrílico. Dois dos protótipos foram implementados com compensação para serem insensíveis à variações de parâmetros externos indesejáveis, como, por exemplo, a temperatura, utilizando a técnica de emendas proposta por Dakin e Wade. Foram construídos com dois comprimentos de regiões sensoras, 3 e 5 mm e podem medir deformações na faixa de 0 a 500 microstrains. Esta faixa é útil para se estudar deformações em estruturas de concreto. Os sensores podem ser ajustados 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.



Implementation of Polarimetric Optical Fiber Sensors for Measurement of Strain in Structures

Abstract

This work describes the implementation of polarimetric fiber optic sensors for measurement of strain in structures. The sensors are based on the effect of polarization coupling between two orthogonally polarized eigenmodes of a highly birefringent (HB) polarization-maintaining optical fiber which serves as the sensing element. The instrumentation of the sensors consists of a He-Ne linearly polarized laser, polarizers, objectives, a silicon photodetector and a lock-in amplifier. The sensing elements were embedded in acrylic cylinders. Two of the prototypes were compensated against undesirable external parameters, such as the temperature, using the splice technique proposed by Dakin and Wade. They were constructed using two different lengths of sensing fiber : 3 mm and 5 mm and were able to measure strain in the range of 0 to 500 microstrains. This strain range is useful for studying concrete structures. The sensors can be adjusted to a specified strain range through an appropriate choice of the sensing length and wavelength of the incident light.



ÍNDICE

Capítulo 1 - Introdução -----	1
1.1 - Características Gerais dos Sensores à Fibra Óptica -----	2
1.2 - Princípio de Funcionamento -----	4
1.3 - Sensores Polarimétricos-----	6
1.4 - Objetivo do Trabalho -----	7
Capítulo 2 - Fundamentos Teóricos -----	8
2.1 - Polarização da Luz -----	8
2.2 - Tipos de Luz Polarizada -----	9
2.2.1 - Polarização Linear -----	11
2.2.2 - Polarização Circular -----	12
2.2.3 - Polarização Elíptica -----	13
2.3 - Birrefringência -----	14
2.4 - Fibras Ópticas -----	17
2.4.1 - Introdução -----	17
2.4.2 - Tipos de Fibras Ópticas -----	19
2.4.3 - Fibras de Alta Birrefringência -----	23
2.4.3.1 - Fibras GE (Birrefringência Induzida pela Geometria) -----	25
2.4.3.1-1 - Fibras Ópticas GE tipo E -----	25
2.4.3.1-2 - Fibras Ópticas GE tipo D -----	26



2.4.3.2 - Fibras SE -----	27
2.4.3.2-1 - Fibras “Bow-Tie” (Gravata Borboleta) -----	27
2.4.3.2-2 - Fibras Panda -----	28
2.4.3.2-3 - Fibras com SAP Elíptico -----	28
2.5 - O Sensor Polarimétrico -----	29
2.5.1 - Princípio de Funcionamento -----	29
2.5.2 - A Influência da Temperatura na Operação do Sensor -----	33
2.5.3 - Técnicas de Emendas para Compensação do “Fading” -----	38
 Capítulo 3 - Materiais e Métodos -----	 41
3.1 - Introdução -----	41
3.2 - Implementação do Sistema Óptico -----	41
3.2.1 - Bancadas Ópticas -----	41
3.2.2 - O Sistema Óptico -----	42
3.2.2.1 - Laser -----	43
3.2.2.2 - Chopper -----	43
3.2.2.3 - Posicionador de Fibras Ópticas -----	44
3.2.2.4 - Suporte de Fibras Ópticas -----	44
3.2.2.5 - Polarizador -----	45
3.2.2.6 - Suporte Giratório para o Polarizador -----	45
3.2.2.7 - Sistema de Fotodeteção -----	46
3.2.2.8 - Amplificador Lock-In -----	47
3.2.2.9 - Fibra Óptica -----	47
3.3 - Descrição dos Experimentos -----	47
3.3.1 - Medidas de Deformações Através de Ensaio de Tração -----	48

3.3.2 - Medidas de Deformações Através de Ensaios de Compressão -----	49
3.3.2.1 - Medidas Realizadas com o Corpo de Provas CP2 -----	50
3.3.2.2 - Medidas Realizadas com o Corpo de Provas CP3 -----	51
3.3.3 - Técnica de Emendas para a Minimização do “Fading” -----	52
3.3.4 - Método para a Determinação dos Eixos	
Principais das Fibras Ópticas -----	54
Capítulo 4 - Resultados e Discussões -----	56
4.1 - Introdução -----	56
4.2 - Medidas de Deformações Através de Ensaios de Tração -----	57
4.3 - Medidas de Deformações Através de Ensaios de Compressão sem	
Compensação do “Fading” -----	61
4.4 - Influência da Temperatura no Sensor Polarimétrico -----	65
4.5 - Medidas de Deformações Através de Ensaios de Compressão com	
Compensação de “Fading” -----	68
Capítulo 5 - Conclusões -----	79
Referências Bibliográficas -----	82



Índice de Figuras

Figura 2.1 - Representação instantânea do vetor campo elétrico de um raio luminoso propagando-se na orientação de z -----	9
Figura 2.2 - Esquema dos tipos de polarização da luz -----	14
Figura 2.3 - Luz incidindo no cristal birrefringente com diversas orientações do eixo óptico (AO); a) Luz propagando-se na direção do eixo óptico; b) e c) Luz propagando-se na direção perpendicular ao eixo óptico; d) Dupla refração -----	15
Figura 2.4 - Reflexão e refração na fibra óptica -----	17
Figura 2.5 - Ângulo de admissão e abertura numérica da fibra óptica -----	18
Figura 2.6 - A fibra óptica de índice degrau -----	19
Figura 2.7 - A fibra óptica de índice gradual -----	20
Figura 2.8 - A fibra óptica monomodo -----	20
Figura 2.9 - Tipos de fibras, classificadas de acordo com o material utilizado em sua confecção -----	21
Figura 2.10 - Tipos de fibras ópticas monomodo especiais quanto à polarização -----	22
Figura 2.11 - Alguns tipos de fibras HB -----	25
Figura 2.12 - Fibra óptica GE tipo E -----	26
Figura 2.13 - Seção transversal da fibra óptica GE tipo D -----	26
Figura 2.14 - Seção transversal da fibra óptica tipo SE "Bow-Tie" -----	27
Figura 2.15 - Seção transversal da fibra óptica tipo SE Panda -----	28
Figura 2.16 - Seção transversal da fibra óptica tipo SE com SAP elíptico -----	29

Figura 2.17 - Configuração experimental básica utilizada para os sensores à fibra óptica, do tipo transmissão (P1 e P2 são polarizadores) ----	33
Figura 2.18 - Representação do vetor campo elétrico incidente na fibra óptica HB. P1 e \hat{A} são direções de transmissão dos polarizadores P1 e P2, respectivamente -----	34
Figura 2.19 - A técnica de emendas em fibras HB -----	38
Figura 3.1 - A bancada óptica de granito -----	42
Figura 3.2 - Configuração básica do sistema óptico -----	43
Figura 3.3 - Posicionador de fibras ópticas -----	44
Figura 3.4 - Suporte de fibras ópticas -----	45
Figura 3.5 - Suporte giratório para o polarizador -----	46
Figura 3.6 - O sistema de fotodeteccção -----	46
Figura 3.7 - Corpo de provas CP1 -----	48
Figura 3.8 - Esquema do ensaio de tração -----	49
Figura 3.9 - Corpo de provas CP2 -----	50
Figura 3.10 - Esquema do equipamento utilizado para aplicação de forças de compressão -----	51
Figura 3.11 - Corpo de provas CP3 -----	51
Figura 3.12 - Esquema geral de emendas realizadas nos sensores empregados nos corpos de provas CP3 -----	53
Figura 4.1 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico em função da deformação, resultante de forças de tração, aplicadas no corpo de provas CP1, em ordem crescente de magnitude (Ensaio n ^o 1) ----	57

- Figura 4.2 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico em função da deformação, resultante de forças de tração, aplicadas no corpo de provas CP1, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 2) ---- 58
- Figura 4.3 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico, em função da deformação, resultante de forças de tração aplicadas no corpo de provas CP1, em ordem decrescente de magnitude (Ensaio nº 3)---59
- Figura 4.4 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP2, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 4)-----61
- Figura 4.5 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP2, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 5)-----62
- Figura 4.6 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP2, em ordem decrescente de magnitude (Ensaio nº 6)---63
- Figura 4.7 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico, com comprimento da região sensora de 3 mm, em função da temperatura de um trecho do terminal de entrada da fibra, para duas diferentes direções de polarização da luz incidente (Ensaio nº 7) -----66
- Figura 4.8 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico, com comprimento da região sensora de 5 mm, em função da temperatura de um trecho do terminal de entrada da fibra, para duas diferentes direções de polarização da luz incidente (Ensaio nº 8) -----67
- Figura 4.9 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora de 3 mm, em função da deformação, resultante de forças de

compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem
crescente de magnitude (Ensaio nº 9) ----- 69

Figura 4.10 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora
de 3 mm, em função da deformação, resultante de forças de
compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem
crescente de magnitude (Ensaio nº 10) ----- 70

Figura 4.11 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora
de 3 mm, em função da deformação, resultante de forças de
compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem
crescente e decrescente de magnitude (Ensaio nº 11) ----- 71

Figura 4.12 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora
de 5 mm, em função da deformação, resultante de forças de
compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem
crescente de magnitude (Ensaio nº 12) ----- 72

Figura 4.13 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora
de 5 mm, em função da deformação, resultante de forças de
compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem
crescente de magnitude (Ensaio nº 13) ----- 73

Figura 4.14 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora
de 5 mm, em função da deformação, resultante de forças de
compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem
crescente de magnitude (Ensaio nº 14) ----- 74

Figura 4.15 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora de 5 mm, em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 15) ----- 75

Figura 4.16 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora de 5 mm, em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem crescente e decrescente de magnitude (Ensaio nº 16) ----- 76

Figura 4.17 - Sinais produzidos pelo sensor compensado, com região sensora de 5 mm, em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem crescente e decrescente de magnitude (Ensaios nºs 12 a 16) ----- 77

CAPÍTULO 1

Introdução

Estruturas devem ser apropriadamente projetadas para resistir às cargas sobre elas aplicadas.

As paredes de um reservatório devem apresentar resistência adequada para suportar, muitas vezes, elevadas pressões; as lajes de um edifício devem ser suficientemente fortes para não oferecerem perigo aos moradores; as asas de um avião devem ser capazes de suportar, com segurança as cargas aerodinâmicas que sobre elas agem durante o vôo ou na aterrissagem.

Ao mesmo tempo, os elementos estruturais devem ter dimensões reduzidas para minimização do custo. Às vezes, como no caso dos satélites, a viabilidade e o sucesso de uma missão podem depender do peso do conjunto.

Um tipo de sensor bem conhecido é o “strain gage”, cujo principio de funcionamento fundamenta-se na variação da resistência elétrica de um material quando este sofre deformação. Apresentam como características importantes a linearidade, pequeno tamanho e uma tecnologia bastante consolidada. Possuem, todavia algumas limitações :

a) A pressão aplicada não deve exceder o limite elástico do “gage”, que é de 4% do comprimento do elemento. A sua faixa dinâmica é de aproximadamente 3000 $\mu\epsilon$ para “strain gages” semicondutores e de 40 000 $\mu\epsilon$ para “strain gages” metálicos.

b) A medida somente será correta se toda a deformação for transmitida ao “gage”. Isto é alcançado pela cuidadosa colagem do “gage” com adesivo elástico, que deve ser também estável com tempo e temperatura. Ao mesmo tempo o “gage” deve ser isolado eletricamente do objeto no qual está colado e ser protegido do ambiente.



c) A temperatura é uma fonte de interferência por várias razões. Ela afeta a resistividade do material, suas dimensões e as dimensões do material suporte. Qualquer mudança na temperatura causará uma variação na resistência elétrica do “strain gage”, mesmo sem aplicação de força mecânica. Em um “strain gage” metálico esta variação pode atingir $50 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$. Efeitos de temperatura são ainda mais pronunciados em “strain gages” semicondutores.

d) São sujeitos a fontes de interferência, de origem termoelétrica. Quando alimentados com sinal DC, são geradas tensões que se adicionam ao sinal devido a deformação.

Quando se necessita efetuar medidas em superfícies não uniformes, como as do concreto, utiliza-se “strain gages” de tamanhos grandes para se medir deformações médias. Com isto são minimizadas imprecisões devido à descontinuidade da superfície.

Consideráveis vantagens se tem conseguido com o uso de fibras ópticas em sistemas sensores projetados para medir ou monitorar uma variedade de parâmetros físicos (temperatura, pressão, deformação, etc). Esses sensores oferecem muitas vantagens sobre os dispositivos já existentes. Possuem maior sensibilidade, são muito pequenos, podendo ser configurados em formas arbitrárias para penetrar em locais de difícil acesso. Eles não são 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. Outra característica importante deve-se ao fato de serem diretamente compatíveis com telemetria a fibra óptica, sistemas de transmissão de dados ópticos e tecnologia de multiplexação/demultiplexação óptica [24].

1.1 - Características Gerais dos Sensores à Fibra Óptica

A partir da década de 70, com o desenvolvimento da tecnologia de produção de fibras ópticas com baixa atenuação, o universo das telecomunicações começou a sofrer uma verdadeira revolução. Para se ter idéia do que isto significa, cita-se que a capacidade de transmissão em cada janela óptica, de uma única fibra, é de aproximadamente 25 000 GHz, um número equivalente a todas as chamadas telefônicas nos EUA no horário de maior pico do



ano, ou, grosseiramente equivalente a mil vezes todo o espectro de RF usado para comunicação no espaço livre [2].

Como subproduto desta revolução tecnológica, surgiu um campo de pesquisa hoje muito predominante que combina a área de comunicação por fibras ópticas com dispositivos opto-eletrônicos para gerar os chamados sensores à fibra óptica (SFO).

Historicamente, um dos primeiros trabalhos de divulgação de grande vulto, neste assunto, foi publicado em 1982, por Giallorenzi et alii. [3]. Nesta época, foi constatada a existência de cerca de 60 tipos diferentes de publicações sobre SFO em revistas técnicas e científicas, para as mais variadas aplicações.

As aplicações dos SFO [5]-[8] variam do monitoramento estrutural (“strain”, força, torque, vibração, deslocamento, temperatura) a processos de controle de fluxo, de pressão, nível de líquido e temperatura em sistemas industriais. Dentre as aplicações mais interessantes, podem ser citadas as estruturas inteligentes (“smart structures”), para sensoriamento de deformação e temperatura distribuídos, os sensores acústicos (hidrofone à fibra óptica), sensores para navegação inercial (giroscópio) em sistemas aeroespaciais e sondas para química e medicina. As aplicações de alta confiabilidade, incluem os sensores para controle, “damage” e monitoração de maquinários, além dos sensores de alto desempenho para fins de vigilância (radar) e navegação. Nos sistemas elétricos de potência, citam-se os sensores magnéticos (corrente e campo magnético) e os sensores de campos elétricos e tensões elevadas. Além desses, uma variedade de outros SFO já foram relatados para os mais variados fins, como os sensores de radiação ionizante, de detecção de gases, para espectroscopia, para pirometria e outros.

Dentre as características gerais dos SFO que, sem dúvida, contribuíram para que se tornassem tão interessantes para pesquisa e desenvolvimento, citam-se :

- Imunidade à interferência eletromagnética,
- Passividade (não reativos, composição dielétrica),
- Peso e tamanho reduzidos (importante para multiplexação de sensores ao longo de grandes trechos de fibra),



- Baixo custo por comprimento,
- Versatilidade geométrica (configurações concentradas e distribuídas),
- Podem operar em ambientes hostis,
- Ausência de aquecimento por efeito Joule.

Logicamente, as desvantagens existem, e relacionam-se principalmente ao fato de não ser uma tecnologia tão convencional ao usuário (como a eletrônica de dispositivos a semicondutor, por exemplo), requerendo algum investimento inicial e capacitação técnica de pessoal qualificado, além é claro, das dificuldades associadas à própria confecção dos sensores, como o acesso à oficinas de mecânica de precisão. Também por serem extremamente sensíveis (dependendo da configuração), podem ser susceptíveis a ação de mais de uma grandeza física, que não a própria de interesse. Isto torna necessário um processo de demodulação, as vezes complicado, com elevado conteúdo de eletrônica para processamento do sinal e/ou compensação por controle automático [9].

1.2 - Princípio de Funcionamento

Os SFO 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.

Segundo Kyuma [5], em princípio, os SFO podem ser divididos em sensores do tipo :

A) INTRÍNSECOS (“all fiber sensor”)

A modulação do sinal óptico ocorre enquanto a luz é guiada na fibra, isto é, a luz permanece sempre em seu interior. Assim, por exemplo, a potência óptica conduzida é



suficiente para interrogação multi-sensores (multiplexação espacial) sem prejudicar o desempenho.

B) EXTRÍNSECO

Neste caso, a luz deixa a fibra para interagir com o sensor óptico. A fibra óptica serve apenas como guia óptico, para conduzir luz não modulada ao sensor, e receber dele (na saída) luz modulada. Portanto são considerados como sensores comuns que estão sendo interrogados por fibras ópticas, e não propriamente como SFO.

Além desta classificação independentemente de serem intrínsecos ou extrínsecos, os SFO podem ser divididos em :

A) SENSORES DE AMPLITUDE (OU INTENSIDADE)

A grandeza física a ser medida induz uma variação na intensidade (W/m^2) da luz que se propaga na região sensora, provocando sua atenuação. Normalmente, utilizam-se fibras ópticas multimodos para esta finalidade [3], [5].

B) SENSORES DE FASE

Estes sensores operam detectando o deslocamento de fase óptica induzida pela grandeza física na fibra, comparando-a com uma amostra de luz não defasada que percorre um outro trecho de fibra não perturbado (ramo de referência). Normalmente, esta comparação é realizada sobrepondo-se os dois campos ópticos coerentes, constituindo um interferômetro de dois feixes (Mach-Zehnder, Michelson, Sagnac, Fabry-Perot) [7], [8]. São utilizadas fibras ópticas monomodo (circular ou birrefringente) para estas configurações.



Nas referências [3] e [5] são apresentados vários exemplos de sensores de amplitude. Um sensor de intensidade clássico é o sensor por microcurvatura, baseado no princípio de perdas de luz por irradiação em um trecho de guia submetido a uma curvatura acentuada, podendo ser utilizado para medir força e pressão.

Relativamente aos sensores de amplitude, os sensores de fase têm a vantagem de possuírem eficiência óptica e sensibilidade extremamente elevadas. Com uma potência modesta de 100 μW aplicada a um fotodetector, o ruído “shot” limita o mínimo deslocamento de fase detectável a aproximadamente 10^{-7} rad/Hz^{1/2}, equivalente a uma variação de 10^{-14} m no comprimento da fibra. Se a fibra sensora for de 100 m de comprimento, um “strain” de 1 parte em 10^{16} pode ser detectado. Ainda, se o trecho de 100 m de fibra for enrolado em torno de um cilindro de 1 polegada de diâmetro, uma variação de 0,004 femtômetros no raio do cilindro poderá ser percebida [4].

A intensidade de saída dos interferômetros de dois feixes geralmente pode ser separada em uma componente AC, contendo a informação sobre a grandeza física e um termo de variação lenta (deriva ou “drift”), governado por perturbações térmicas e mecânicas de baixa frequência. Um grande número de técnicas de demodulação têm sido desenvolvidos para produzir uma tensão de saída que seja proporcional à fase desejada, independentemente dessas perturbações indesejáveis que podem provocar degeneração (“fading”) do sinal [7].

1.3 - Sensores Polarimétricos

Além dos SFO do tipo intensidade e de fase, têm sido grande o uso dos sensores polarimétricos para medir deslocamento, temperatura e pressão [6]. Os sensores polarimétricos utilizam (porém, isto não é obrigatório) fibras ópticas altamente birrefringentes (Hi-Bi), mutuamente ortogonais, e cuja diferença entre os índices de refração efetivos é significativa [10]. A energia luminosa acoplado-se aos modos próprios permanecerão nestes modos mesmo quando a fibra sofre variações de temperatura ou “strain” longitudinal. Contudo, tais influências externas afetarão as velocidades relativas de propagação da energia nestes modos. As variações no atraso relativo entre modos tem mostrado ser linearmente



proporcional ao "strain" longitudinal na fibra Hi-Bi. Este atraso relativo pode ser medido, excitando-se ambos os modos igualmente, e analisando-se a luz da saída através de um polarizador. Um destes sensores polarimétricos, contudo, utilizando fibras fracamente birrefringentes (Lo-Bi), foi apresentado na referência [11]. Bakalidis et alii. (1996) [17], descreveram um sensor de força, de intensidade, modulada utilizando fibras ópticas multimodo de índice degrau. O sensor mostrou boa resolução, estabilidade e repetitividade da ordem de $\pm 0,5\%$. Wojtek J. Bock, et alii. (1996), desenvolveram um sensor para medidas hidrostáticas de baixa pressão (0-200 MPa) utilizando fibras Panda 800 e a nova "side-hole" de centro elíptico altamente birrefringente. O sensor é seguro e barato, apresentando precisão melhor do que 1%, para uma significativa faixa de temperatura [18].

1.4 - Objetivo do Trabalho

O trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de sensores polarimétricos a fibra óptica intrínsecos utilizando fibras monomodo de alta birrefringência para a medição de deformações, em tempo real, em estruturas .

A faixa investigada, de 0 a 500 $\mu\epsilon$, é de interesse no estudo de deformações de estruturas de concreto.



CAPÍTULO 2

Fundamentos Teóricos

2.1 - Polarização da Luz

As ondas são classificadas em longitudinais e transversais. A distinção entre elas surge da diferença entre a direção na qual ocorre o distúrbio e a direção em que ele se propaga [19].

No caso das ondas longitudinais, as partículas do meio são deslocadas de suas posições de equilíbrio em direção paralela à da propagação da onda. Já as transversais, propagando-se num meio, provocam oscilações nas partículas na direção perpendicular à de propagação.

Para uma descrição completa de uma onda transversal deve-se especificar não apenas a frequência, a fase e a direção da onda, mas também, a magnitude e a direção do deslocamento transversal. A direção do vetor deslocamento é denominada de polarização e o plano contendo a direção de polarização e o vetor propagação é denominado plano de polarização.

Em um meio isotrópico e elástico, as ondas eletromagnéticas geralmente podem ser descritas pela superposição de ondas planas. Elas consistem de variações senoidais dos campos elétricos e magnéticos, alinhados perpendicularmente um em relação ao outro e à direção de propagação. Para a luz, é suficiente especificar o comportamento do campo elétrico \vec{E} , uma vez que a indução magnética \vec{B} fica determinada, automaticamente, por sua relação com \vec{E} , estabelecidas pelas equações de Maxwell.



2.2 - Tipos de Luz Polarizada

Para caracterizar o vetor campo elétrico \vec{E} , considera-se uma onda plana com um vetor propagação de onda \vec{k} que determina a direção de propagação. O vetor campo elétrico pode estar em qualquer direção perpendicular a \vec{k} , enquanto o vetor indução magnética \vec{B} estará na direção do vetor $\vec{k} \times \vec{E}$ [20]. Considere \vec{k} situado ao longo do eixo z, no sistema de coordenadas cartesianas, e tendo magnitude :

$$k = \frac{\omega}{v} \quad (2.1)$$

sendo ω a frequência angular de oscilação dos campos elétrico e magnético, em rd/s, e v a velocidade de fase, em m/s.

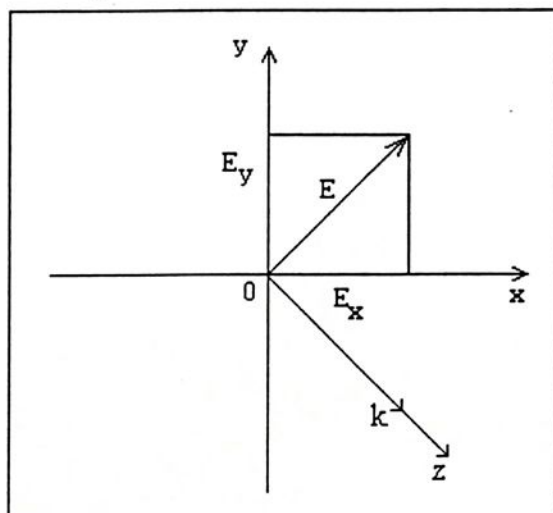


FIGURA 2.1 - Representação instantânea do vetor campo elétrico

de um raio luminoso propagando-se na orientação de z.

Como \vec{E} varia senoidalmente no tempo, a representação da Figura 2.1 mostra a sua magnitude e direção num instante particular de tempo. Denominando as componentes de \vec{E} nas direções x e y, de E_x e E_y , respectivamente, pode-se escrever :

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} \quad (2.2)$$

$$E_x = E_{0x} e^{i(\omega t - kz + \phi_x)} \quad (2.3)$$

$$E_y = E_{0y} e^{i(\omega t - kz + \phi_y)} \quad (2.4)$$

$$E_z = 0 \quad (2.5)$$

onde:

E_{0x} e E_{0y} são as amplitudes das componentes ondulatórias propagando-se na direção z. ϕ_x e ϕ_y são suas fases.

Combinando as expressões (2.2), (2.3) e (2.4), obtém-se :

$$\vec{E} = \vec{i} E_{0x} e^{i(\omega t - kz + \phi_x)} + \vec{j} E_{0y} e^{i(\omega t - kz + \phi_y)} \quad (2.6)$$

ou também,

$$\vec{E} = (\vec{i} E_{0x} e^{i\phi_x} + \vec{j} E_{0y} e^{i\phi_y}) e^{i(\omega t - kz)} = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - kz)} \quad (2.7)$$

As componentes de \vec{E} no plano real podem ser escritas como :

$$E_x(x,y,z) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \phi_x) \quad (2.8)$$

$$E_y(x,y,z) = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \phi_y) \quad (2.9)$$

$$E_z(x,y,z) = 0 \quad (2.10)$$



O tipo de polarização dependerá da relação de amplitudes entre as componentes E_x e E_y , bem como de sua fase relativa ϕ .

$$\phi = \phi_x - \phi_y \quad (2.11)$$

Estabelecendo a fase de E_x como referência ($\phi_x = 0$) é possível escrever :

$$E_x(x,y,z,t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz) \quad (2.12)$$

$$E_y(x,y,z,t) = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \phi) \quad (2.13)$$

2.2.1 - Polarização Linear

O fenômeno da luz linearmente polarizada ou plano polarizada ocorre quando :

- a) $\phi = 0$ ou múltiplos inteiros de $\pm 2\pi$. (componentes E_x e E_y do vetor campo elétrico \vec{E} em fase).

$$\vec{E} = (E_{0x} \vec{i} + E_{0y} \vec{j}) \cos(\omega t - kz) \quad (2.14)$$

Neste caso, E_y é proporcional a E_x :

$$E_y = \left(\frac{E_{0y}}{E_{0x}} \right) E_x \quad (2.15)$$



b) ϕ é múltiplo ímpar de $\pm\pi$.

$$\vec{E} = (E_{0x} \vec{i} - E_{0y} \vec{j}) \cos(\omega t - kz) \quad (2.16)$$

e

$$E_y = -\left(\frac{E_{0y}}{E_{0x}}\right) E_x \quad (2.17)$$

2.2.2 - Polarização Circular

A polarização circular ocorre quando as componentes do campo elétrico (E_x e E_y) possuem amplitudes iguais e diferença de fase (ϕ) de $\pm \frac{\pi}{2} + 2m\pi$, para $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Neste caso tem-se : $E_{0x} = E_{0y} = E_0$.

$$\vec{E}_x(x,y,z,t) = E_0 \cos(\omega t - kz) \vec{i} \quad (2.18)$$

$$\vec{E}_y(x,y,z,t) = E_0 \sin(\omega t - kz) \vec{j} \quad (2.19)$$

consequentemente :

$$\vec{E} = E_0 [\cos(\omega t - kz) \vec{i} + \sin(\omega t - kz) \vec{j}] \quad (2.20)$$

A amplitude de \vec{E} será constante, pois :

$$E = \sqrt{E_{0x} \cdot E_{0y}} = E_0 \quad (2.21)$$

Entretanto, a direção de \vec{E} é variante no tempo e não está restrita a um único plano.

Fixando o eixo z e variando o tempo t, num ciclo completo, o vetor \vec{E} descreve um círculo. O sentido do movimento (horário ou anti-horário) caracteriza a polarização a direita e a esquerda respectivamente.

2.2.3 - Polarização Elíptica

Quando o campo elétrico varia em magnitude e fase com o tempo, a luz é dita elípticamente polarizada. A extremidade do vetor \vec{E} descreve uma elipse no plano xy, perpendicular a k.

Partindo-se das expressões gerais (2.12) e (2.13), demonstra-se que a equação da elipse, descrita pela extremidade do vetor campo elétrico resultante é :

$$\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos\phi = \sin^2\phi \quad (2.22)$$

Pode-se verificar que :

1) Se o ângulo ϕ for um múltiplo ímpar de $\pi/2$ e $E_{0y} = E_{0x} = E_0$ a expressão (2.22) se reduz a:

$$E_x^2 + E_y^2 = E_0^2 \quad (2.23)$$

Esta é a equação de um círculo de raio E_0 (polarização circular).

2) Se o ângulo ϕ for múltiplo de π a expressão (2.22) reduz-se a :

$$E_y = \pm \left(\frac{E_{0y}}{E_{0x}}\right) E_x \quad (2.24)$$

O sinal positivo na expressão (2.24) corresponde à situação em que ϕ é múltiplo par de π , enquanto o sinal negativo ocorre quando ϕ é múltiplo ímpar de π . A equação (2.24) descreve uma linha reta, com inclinação positiva ou negativa, ou seja, caracteriza a polarização linear. Assim, as polarizações circular e linear podem ser consideradas como casos particulares de polarização elíptica. A Figura 2.2 apresenta um resumo dos tipos de polarização.

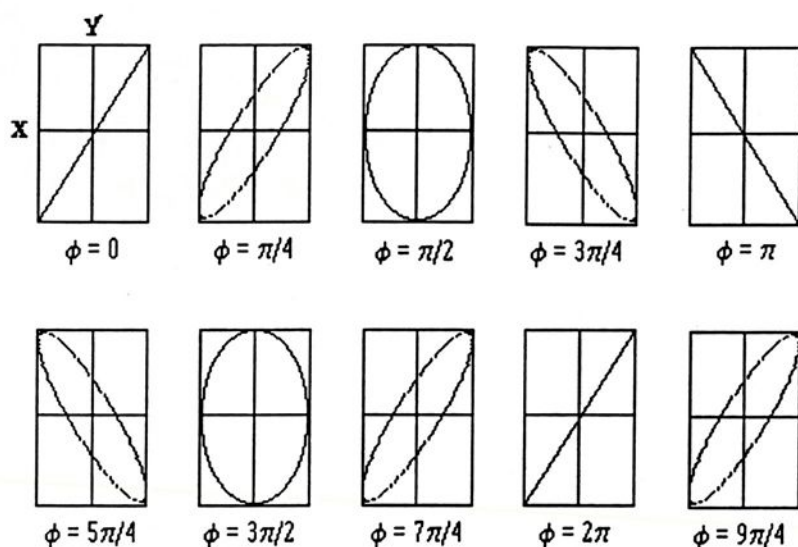


FIGURA 2.2 - Esquema dos tipos de polarização da luz

2.3 - Birrefringência

Birrefringência é um fenômeno que ocorre em materiais que apresentam índice de refração dependente da direção de polarização da luz incidente.

Esses materiais apresentam dois índices de refração diferentes (razão do nome birrefringência) ou seja, a velocidade de propagação da luz dependerá da direção do vetor campo elétrico que descreve sua polarização.

Cabe observar que a birrefringência, assim como o dicroísmo envolvem anisotropia do material. As propriedades em questão são índice de refração (n) e coeficiente de extinção (k), para uma dada frequência da luz. Considerando o campo elétrico da luz incidente \vec{E}

decomposto em duas direções perpendiculares, têm-se E_x e E_y , onde x é a direção do eixo óptico do material. Para o material dicróico, $\eta_x = \eta_y$ e $k_x \neq k_y$, enquanto que para o material birrefringente, o contrário ocorre, isto é: $\eta_x \neq \eta_y$ e $k_x = k_y$. As condições citadas dependem da frequência; assim, há cristais que são birrefringentes numa faixa de comprimentos de onda, enquanto comportam-se como dicróicos, em outra (por exemplo, a calcita).

A Figura 2.3 ilustra situações diferentes de orientação do eixo óptico de uma lâmina birrefringente, em relação à direção de propagação da luz incidente.

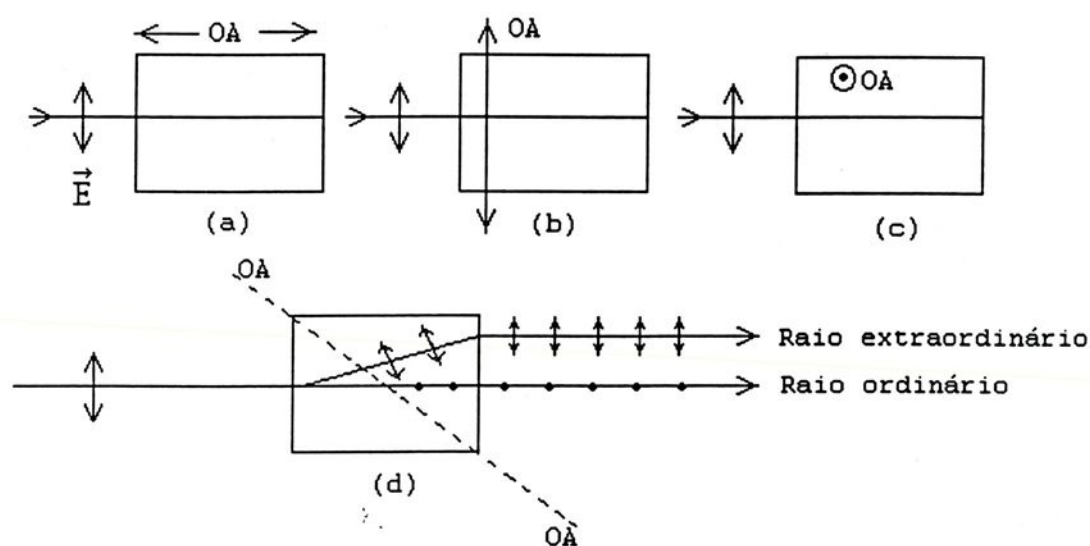


FIGURA 2.3 - Luz incidindo no cristal birrefringente com diversas orientações do eixo óptico (OA); a) Luz propagando-se na direção do eixo óptico; b) e c) Luz propagando-se na direção perpendicular ao eixo óptico; d) Dupla refração.

Na Figura 2.3(a), ambas as direções das componentes da luz incidente não polarizada estão orientadas perpendicularmente ao eixo óptico (OA) do cristal, propagando-se à mesma velocidade (submetidas ao mesmo índice de refração ($\eta_x = \eta_y$)).

Nas Figuras 2.3(b) e 2.3(c), o eixo OA é paralelo a uma das direções do campo elétrico (de uma componente) e perpendicular à outra. Neste caso, as componentes se propagam através do cristal com velocidades diferentes uma da outra (submetidas a dois índices de

refração diferentes ($\eta_x \neq \eta_y$). Quando saem do cristal, haverá diferença de fase entre ambas as componentes. Baseados neste princípio, constroem-se dispositivos ópticos que agem como retardadores de fase, as lâminas de retardo.

Nos casos representados nas Figuras 2.3(b) e 2.3(c), a luz que se propaga no cristal pode desenvolver diferença de fase entre as componentes perpendicular e paralela ao eixo óptico OA, mas o feixe luminoso permanece um só. Se, entretanto, o eixo OA está situado, formando um ângulo arbitrário (diferente de 0° e 90°) em relação à direção do feixe, a luz sofrerá dupla refração e dois feixes emergirão do cristal, os quais recebem os nomes de raio ordinário (o) e raio extraordinário (e); esta situação é ilustrada na Figura 2.3(d). O raio extraordinário recebe este nome por não se comportar segundo a lei de Snell para refração em superfícies cristalinas. Os dois feixes, ordinário e extraordinário são linearmente polarizados em direções ortogonais: o raio ordinário está polarizado perpendicularmente a OA, e assim, propaga-se com índice de refração (η_o). O raio extraordinário está polarizado perpendicular à direção de polarização do raio ordinário. Dentro do cristal o raio extraordinário pode ser decomposto nas direções paralela e perpendicular ao eixo óptico; sua componente perpendicular propaga-se à mesma velocidade do raio ordinário, enquanto a outra se propaga com outro índice de refração (η_e). O efeito total de suas duas componentes causa o desvio do raio extraordinário, mostrado na Figura 2.3(d).

Assim mais precisamente, o termo birrefringência refere-se à existência de dois índices de refração, enquanto a dupla refração designa o fenômeno de separação de um feixe incidente em raio ordinário e extraordinário, embora, em geral, as duas terminologias sejam usadas indistintamente na literatura.

Todos os polarizadores birrefringentes têm em comum o princípio básico de separar a onda luminosa incidente em raios ordinário e extraordinário, usando o fato de existirem dois índices de refração diferentes ($\eta_o \neq \eta_e$).

A Figura 2.3(d) mostrou que houve dois feixes à saída do cristal uniaxial. Devido a pequena separação angular dos dois feixes ($6,2^\circ$ para a calcita, por exemplo), foram desenvolvidas várias técnicas para aumentar a separação entre os feixes ordinário e extraordinário.



2.4 - Fibras Ópticas

2.4.1 - Introdução

Fibras ópticas são guias de onda dielétricos que podem guiar luz (Figura 2.4). São constituídas fundamentalmente por um núcleo que é envolvido por uma casca concêntrica com índice de refração menor [21]. O núcleo é um fio de vidro especial que pode ser um polímero com apenas 125 micrometros de diâmetro.

Para prevenir a casca contra danos, ela é geralmente encapsulada com um material plástico.

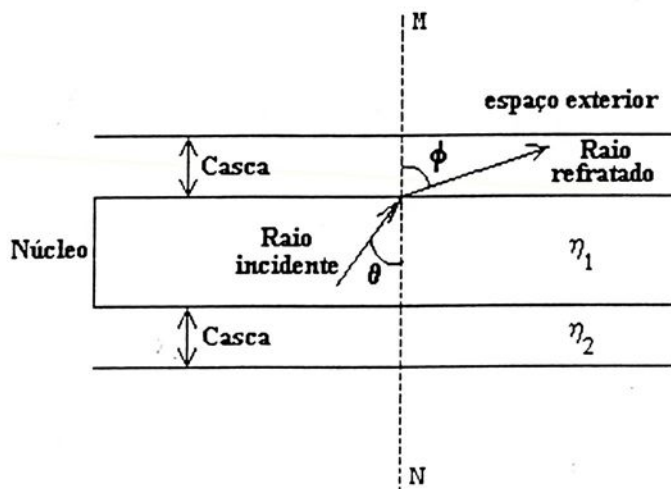


FIGURA 2.4 - Reflexão e refração na fibra óptica.

Um raio de luz que viaja pelo núcleo da fibra óptica e dirige-se em direção à casca, forma um ângulo θ com a reta MN. Existe um ângulo denominado crítico a partir do qual se produz a reflexão total, ou dito de outra forma, quando o ângulo que a luz forma com a reta MN for maior que o crítico, a luz permanecerá no interior da fibra.

Os materiais do núcleo e da casca devem ter um índice de refração tal que o raio de luz que se dirige do núcleo ao exterior forme, com a perpendicular à superfície da casca, um

ângulo maior que o crítico para que ele possa refletir totalmente e voltar ao núcleo. Esta relação de ângulos e índices de refração é dada pela Lei de Snell :

$$\eta_1 \cdot \text{sen } \theta = \eta_2 \cdot \text{sen } \phi \quad (2.25)$$

O **ângulo de admissão** ou aceitação é o maior ângulo de penetração da luz num cabo de fibra óptica (Figura 2.5).

A **abertura numérica** é um parâmetro que indica a capacidade para captar luz de um determinado cabo de fibra óptica, sendo uma medida do máximo ângulo incidente (θ) do raio luminoso em relação ao eixo axial da fibra.

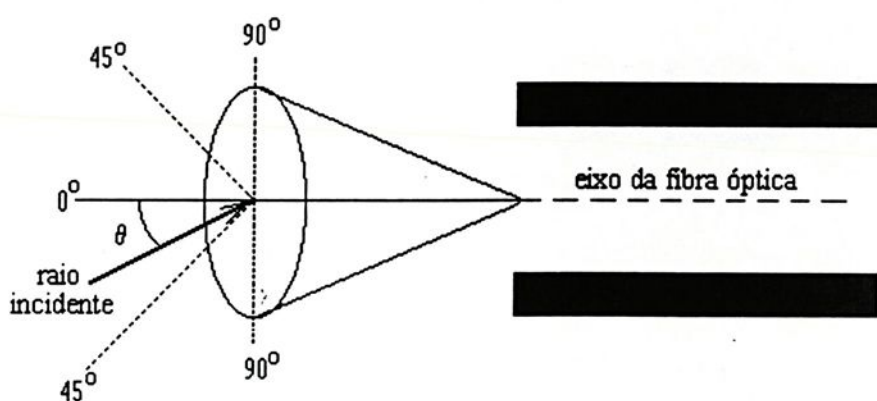


FIGURA 2.5 - Ângulo de admissão e abertura numérica da fibra óptica.

Os dois parâmetros ângulo de admissão e abertura numérica podem ser calculados um a partir do outro, já que o seno do ângulo de aceitação é a abertura numérica.

Como se pode ver pela Figura 2.5, quanto maior o ângulo de admissão maior será a capacidade da fibra para admitir luz. Possuir uma grande abertura numérica implica na desvantagem de que o núcleo deve ter um diâmetro grande, o que permite a penetração de vários raios luminosos. Como resultado, a luz se propaga pela fibra com um grande número de modos. Cada modo é uma solução das equações de Maxwell.

2.4.2 - Tipos de Fibras Ópticas

Em uma fibra óptica a propagação da luz é regida pelas equações de Maxwell. A luz que entra em seu núcleo não se propaga aleatoriamente, é guiada em certos modos. Um modo é uma onda com distribuição particular de campo eletromagnético que satisfaz as equações de Maxwell, transportando uma parcela da energia total transmitida. Sua propriedade de distribuição não muda com a propagação. A identificação do modo por sua constante de propagação β é única.

A propagação dos modos na fibra óptica pode ser guiada tanto pelo núcleo como pela casca através de campos evanescentes os quais decaem exponencialmente pela espessura da casca.

De acordo com a forma de guiar os raios de luz as fibras ópticas podem ser classificadas em monomodo e multimodo. As multimodos podem ser de índice degrau ou de índice gradual.

Na fibra óptica de índice degrau, o índice de refração do núcleo é completamente diferente do índice de refração da casca. Dessa forma, durante a transmissão, a luz incide na casca refletindo-se em direção ao núcleo, como se observa na Figura 2.6 :

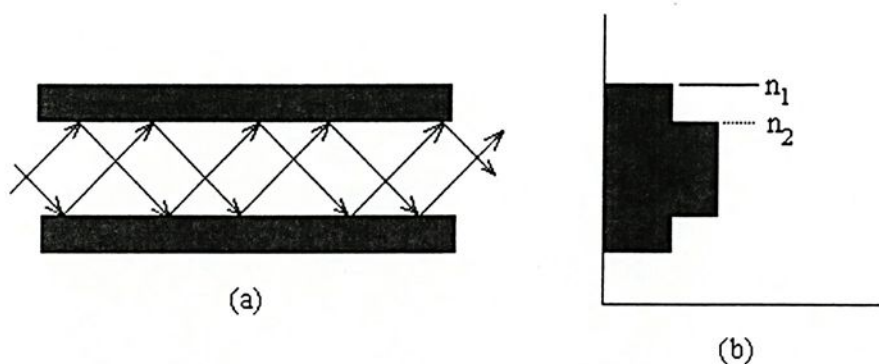


FIGURA 2.6 - A fibra óptica de índice degrau.

Na fibra óptica de índice gradual, o núcleo não mantém um índice de refração constante, mas diminui progressivamente do eixo para fora. Com esta técnica produz-se uma refração gradual como se observa na Figura 2.7.

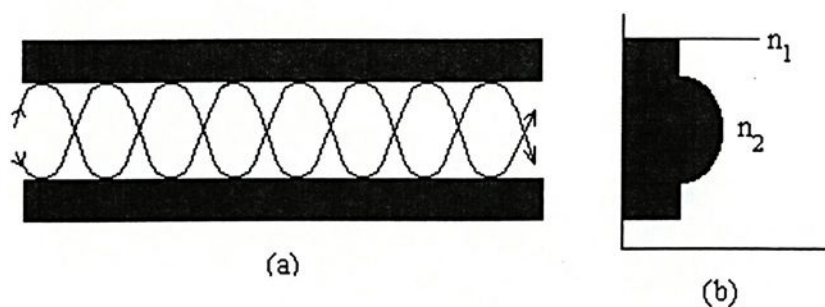


FIGURA 2.7 - A fibra óptica de índice gradual.

Na fibra monomodo o núcleo é finíssimo, de apenas alguns micrômetros, e através dele os raios de luz seguem um único caminho, como se observa na Figura 2.8.

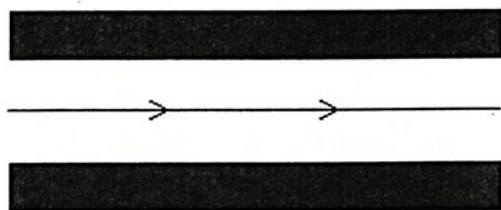


FIGURA 2.8 - A fibra óptica monomodo.

A Figura 2.9 apresenta um esquema dos tipos de fibras, classificados de acordo com o material utilizado na confecção das mesmas.

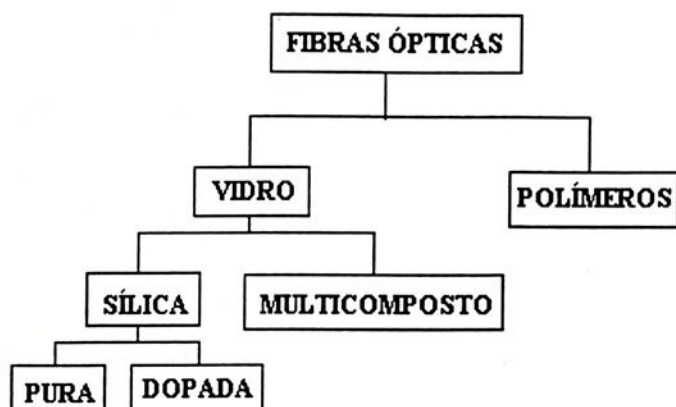


FIGURA 2.9 - Tipos de fibras, classificadas de acordo com o material utilizado em sua confecção.

Embora em uma fibra óptica monomodo convencional devesse existir apenas um modo de propagação, de fato existem dois modos ortogonais de propagação. Sob condições ideais de geometria cilíndrica e isotropia do material, um modo excitado com sua polarização em uma direção não deveria se acoplar aquele cuja polarização lhe é perpendicular. Na prática, porém, pequenos desvios da geometria cilíndrica, ou pequenas alterações na isotropia do material resultam em acoplamento entre os dois modos. Assim em fibras monomodo convencionais existem pequenas diferenças entre os índices de refração, para os modos polarizados segundo direções ortogonais. O grau de birrefringência modal é designado por B , sendo definido por

$$B = |\eta_x - \eta_y| \quad (2.26)$$

A Figura 2.10 apresenta um diagrama de fibras monomodo, projetadas especialmente para preservarem a polarização da luz.

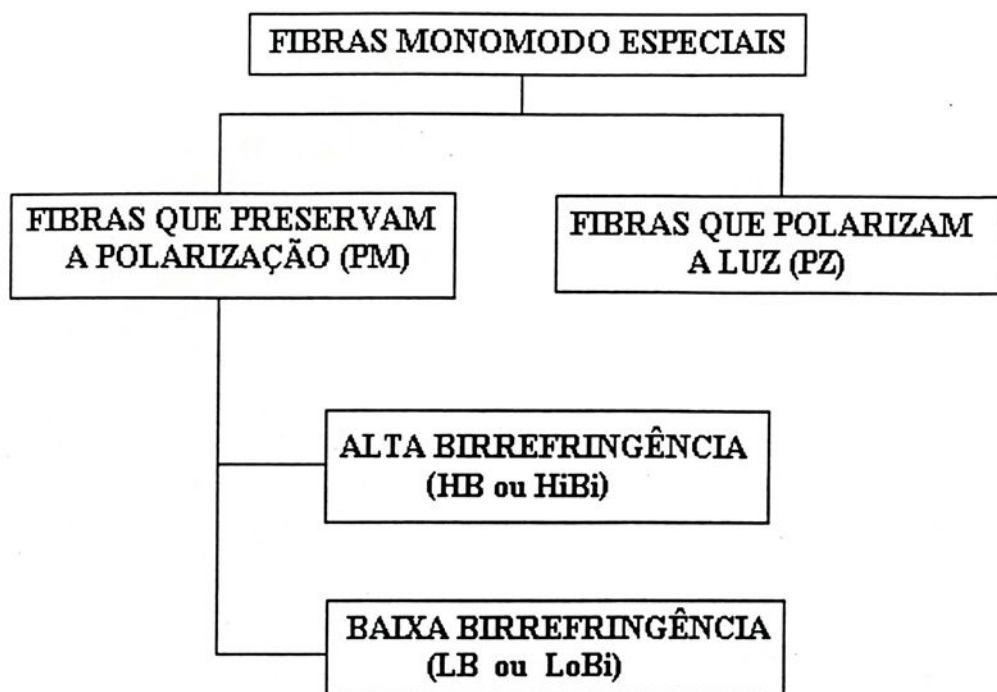


FIGURA 2.10 - Tipos de fibras ópticas monomodo especiais quanto à polarização.

Tanto as fibras de alta quanto as de baixa birrefringência podem preservar a polarização da luz que transmitem. Apenas o princípio pelo qual isto ocorre é diferente.

As de alta birrefringência (HB) são construídas de forma a possuírem constantes de propagação muito diferentes para os dois modos de propagação da luz. Assim se o vetor campo elétrico da luz incidente plano-polarizada estiver alinhado com um dos eixos ópticos da fibra, não haverá acoplamento entre os modos, preservando-se a polarização da luz transmitida.

As de baixa birrefringência (LB) foram projetadas para apresentarem birrefringência modal tão pequena que não há diferença de fase entre as componentes do vetor campo elétrico da luz plano polarizada. Dessa forma há preservação da polarização na fibras LB.

Pelo fato dos sensores desenvolvidos terem sido construídos com fibras HB, estas são vistas com maior detalhamento nas secções seguintes.

2.4.3 - Fibras de Alta Birrefringência

Quanto maior a anisotropia da seção reta de uma fibra, maior será a diferença entre os índices de refração η_x e η_y e, conseqüentemente, entre as constantes de propagação β_x e β_y .

As fibras ópticas de alta birrefringência (HB) são fabricadas baseadas neste princípio, ou seja, nelas o objetivo é obter $\eta_x \neq \eta_y$ e $\beta_x \neq \beta_y$. Caso luz linearmente polarizada incida num trecho z de fibra HB, o vetor campo elétrico \vec{E} que a descreve pode ser decomposto nas componentes E_x e E_y , submetidas a diferentes índices de refração dentro da fibra (η_x e η_y) e portanto, propagando-se a diferentes velocidades. Ao longo do comprimento da fibra, a luz inicialmente plano-polarizada, passará então por diversos estados de polarização, genericamente elípticos. A defasagem entre as componentes de \vec{E} , a qual chamaremos de $\phi(z)$ é, assim função do comprimento de fibra percorrido pela luz.

Chama-se comprimento de batimento L_B o comprimento de fibra percorrido pela luz, tal que $\phi(L_B) = 2\pi$, ou seja, aquele para o qual se repete a situação inicial de polarização (ocorrida para $z = 0$).

O retardo de fase pode ser escrito em função de z como segue :

$$\beta_x = \frac{2\pi\eta_x}{\lambda} \quad (2.27)$$

$$\beta_y = \frac{2\pi\eta_y}{\lambda} \quad (2.28)$$

Portanto, a defasagem entre os modos $\phi(z)$ será :

$$\phi(z) = (\beta_x - \beta_y)z = \left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right)(\eta_x - \eta_y) \quad (2.29)$$

Considerando-se $z = L_B$ e sabendo-se que $\phi(L_B) = 2\pi$, pode-se escrever ϕ como função do comprimento de batimento :

$$\phi(L_B) = \frac{2\pi}{\lambda} L_B (\eta_x - \eta_y) = 2\pi \quad (2.30)$$

$$\eta_x - \eta_y = \frac{\lambda}{L_B} \quad (2.31)$$

A birrefringência pode ser expressa como :

$$B = |\eta_x - \eta_y| = \frac{\lambda}{L_B} = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{\frac{2\pi}{\lambda}} \quad (2.32)$$

Na fabricação das fibras ópticas HB são produzidas assimetrias azimutais em sua estrutura. Esta assimetria pode ser inerente à forma da estrutura (birrefringência geométrica) ou causada por tensões internas ("stress applying parts (SAP)" - birrefringência por esforços mecânicos). A birrefringência é alcançada através da forma elíptica da seção reta do núcleo da fibra, fugindo bastante da simetria circular das fibras convencionais, e grande diferença entre índices de refração do núcleo e casca.

A birrefringência induzida por esforços causam diferenças anisotrópicas no índice de refração de uma fibra óptica de núcleo circular.

As diferenças provocadas pelo esforço são obtidas fazendo as regiões SAPs altamente dopadas, o que as leva a possuírem coeficiente de expansão diferente.

A Figura 2.11 resume alguns tipos de fibras ópticas HB.



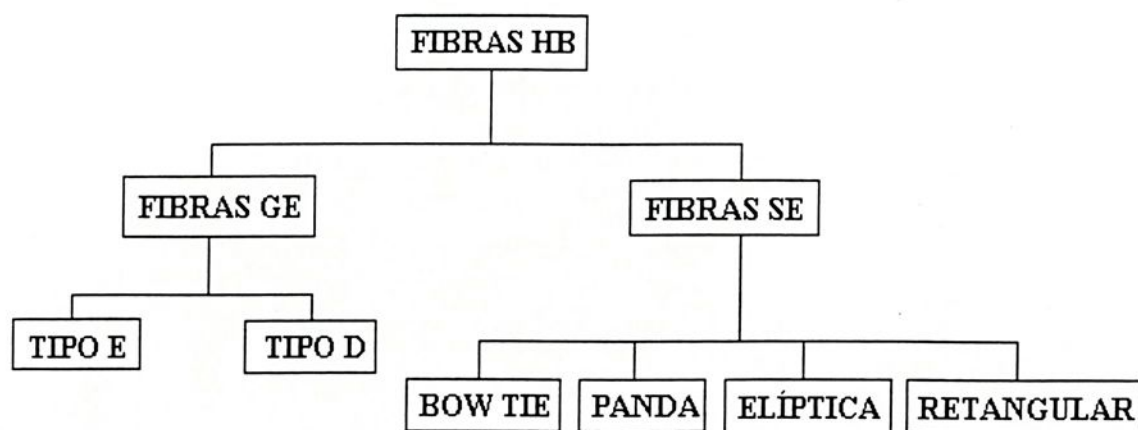


FIGURA 2.11 - Alguns tipos de fibras HB.

2.4.3.1 - Fibras GE (Birrefringência Induzida pela Geometria)

Operam na faixa de comprimento de onda que vai desde 514 ηm à 1550 ηm , com atenuação de 9 dB/Km à 820 ηm e menor que 3 dB/Km para 1300 ηm .

2.4.3.1-1 - Fibras Ópticas GE Tipo E

Este tipo de fibra possui núcleo elíptico e seção interna circular (Figura 2.12). Apresenta índices de refração do núcleo e da casca muito diferentes (tipicamente $\eta_1 - \eta_2 = 0.04$) e alta birrefringência ($B \cong 5 \times 10^{-4}$).

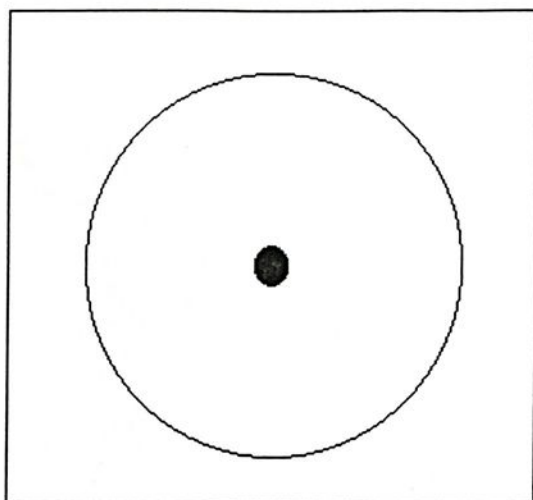


FIGURA 2.12 - Fibra óptica GE tipo E.

2.4.3.1-2 - Fibras Ópticas GE Tipo D

A Figura 2.13 ilustra o tipo D da fibra GE. Nela, parte da seção reta é removida na pré-forma antes da etapa de estiramento produzindo a seção reta em forma de D. A face plana do “D” é paralela ao maior eixo da elipse. Esta geometria facilita a localização dos eixos de birrefringência.

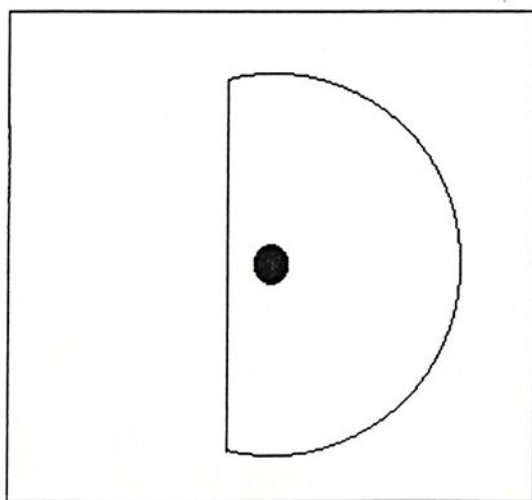


FIGURA 2.13 - Seção transversal da fibra óptica GE tipo D.

2.4.3.2 - Fibras SE

São fibras ópticas com birrefringência induzida por esforços mecânicos que produzem diversos formatos e distribuições de regiões SAP.

Nas fibras ópticas com birrefringência induzida por esforços há um compromisso de fabricação entre sua capacidade de manter a polarização e a atenuação provocada. SAPs altamente dopados mantêm a polarização mais eficientemente se colocados mais próximos ao núcleo, o que aumenta as perdas. Além disso, efeitos de micro e macro curvaturas são capazes de destruir as propriedades de manutenção de polarização, o que dificulta o encapsulamento de componentes ópticos.

2.4.3.2-1 - Fibras “Bow Tie” (Gravata Borboleta)

Seu nome vem pela semelhança de sua seção reta à uma gravata borboleta. Elas precisam de uma etapa intermediária de gravação da camada de diferente expansão térmica durante a preparação da pré forma antes da deposição do núcleo e casca. Eles operam na faixa de comprimento de onda de 488 ηm a 1550 ηm com comprimentos de batimentos menores que 2 mm. A Figura 2.14 ilustra uma fibra óptica tipo “Bow Tie”.

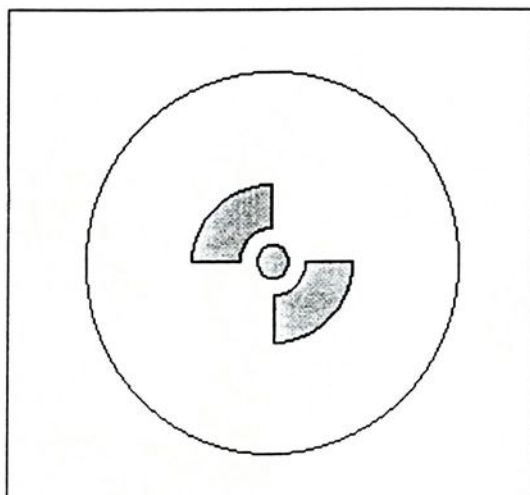


FIGURA 2.14 - Seção transversal da fibra óptica tipo SE “Bow-Tie”.

2.4.3.2-2 - Fibras Panda

Seu nome vem da alusão ao aspecto de sua seção reta semelhante a face de um urso Panda (Figura 2.15). Possuem SAPs circulares onde foram abertos furos durante o processo de fabricação, no qual é inserido material com coeficiente de expansão adequado.

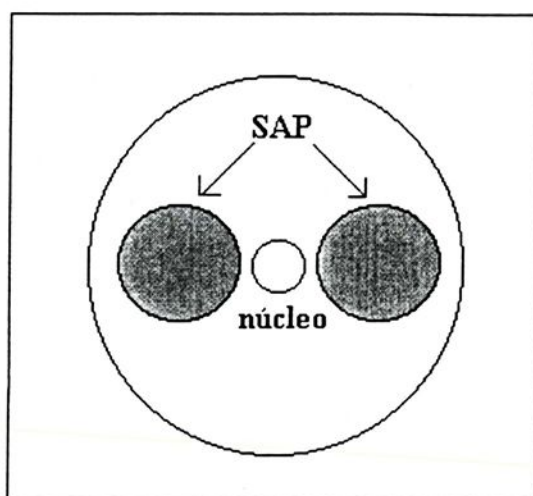


FIGURA 2.15 - Seção transversal da fibra óptica tipo SE Panda.

2.4.3.2-3 - Fibras com SAP Elíptico

Tais fibras são fabricadas por um processo de deposição de vapor químico modificado (MCVD) no qual uma camada, com expansão térmica diferente, é depositada antes do núcleo e/ou casca. Assim, o processo de colapso é mais complexo para permitir a estrutura multicamadas necessária. Um exemplo é a casca feita de B_2O_3 , dopada com SiO_2 enquanto o núcleo é composto de sílica pura. As dopagens também podem ser com G_eO_2 ou outros dopantes (Figura 2.16).

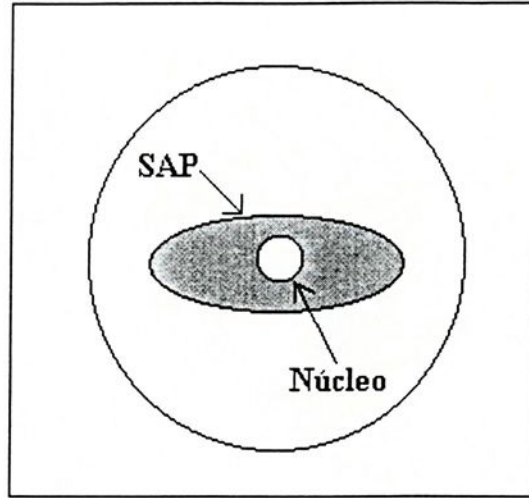


FIGURA 2.16 - Seção transversal da fibra óptica tipo SE com SAP elíptico.

2.5 - O Sensor Polarimétrico

2.5.1. Princípio de Funcionamento

A influência de parâmetros externos no modo de propagação de fibras ópticas de alta birrefringência torna possível utilizá-las como sensores.

A maior parte das pesquisas nesta área tem se concentrado no estudo dos efeitos perturbadores nos dois modos fundamentais de polarização em fibras monomodos HB e envolvem o estudo da influência da temperatura, forças de compressão, alongamento axial e corrente elétrica.

Quando luz linearmente polarizada é lançada à 45° dos eixos de polarização principal da fibra HB, os 2 modos próprios paralelos aos eixos x e y da fibra são igualmente excitados. Ambas as ondas propagam na fibra HB como se em dois meios diferentes, com diferentes índices de refração η_x e η_y . No percurso através da fibra, essas ondas experimentam diferentes mudanças de fase $2\pi\eta_x L/\lambda$ e $2\pi\eta_y L/\lambda$.

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

$$\Delta\phi = 2\pi.L.(\eta_x - \eta_y)/\lambda \quad (2.33)$$

A intensidade do sinal de saída do sensor (I) observada a 45° dos eixos próprios da fibra é proporcional a diferença de fase entre os dois modos próprios de propagação [24].

$$I \cong E_0^2 [1 + \cos(\Delta\beta)L] \quad (2.34)$$

como consequência da superposição das duas ondas :

$$E_0 \exp(i\beta_x L) \quad (2.35)$$

$$E_0 \exp(i\beta_y L) \quad (2.36)$$

polarizadas ao longo dos dois eixos principais e propagando-se ao longo da fibra de comprimento L . Portanto, a resposta do sensor é periódica com o comprimento da região sensora e pode ser afetada por parâmetros externos tal como pressão e temperatura.

A birrefringência das fibras HB dependem significativamente de variações da pressão hidrostática externa, conforme demonstrado por Bock para as fibras elípticas e bow-tie [9]. A pressão externa afetará a birrefringência $\eta_x - \eta_y$ bem como o comprimento do elemento sensor.

Vamos considerar a influência de uma pressão externa nas características do sinal de saída do sensor polarimétrico. A birrefringência total da fibra HB sob a influência da pressão pode ser expressa como [24]:

$$\Delta\beta = (\beta_x - \beta_y) + A.C.p.2\pi/\lambda \quad (2.37)$$

sendo:

A - coeficiente que depende da geometria da fibra HB utilizada;

C - constante fotoelástica relativa;

p - pressão aplicada;

λ - comprimento de onda da luz.

C pode ser expressa por :

$$C = \eta^3 (p_{11} - p_{12})(1 + \nu)/(2Y) \quad (2.38)$$

sendo:

Y = módulo de Young;

ν = razão de Poisson;

p_{11} e p_{12} = coeficientes ópticos de deformação;

η = índice de refração da fibra.

Combinando as equações (2.34) e (2.37) chega-se a equação que descreve a modulação da intensidade de luz, sob pressão, na saída do sensor :

$$I = I_0 \cos^2 [\pi L/\lambda(\lambda/L_B + A.C.p)] \quad (2.39)$$

I_0 é a intensidade de luz lançada no interior da fibra e L_B denota seu comprimento de batimento. A intensidade de saída do sensor é uma função periódica, com período T_P (quantidade de pressão necessária para induzir uma mudança de fase de 2π de uma luz polarizada observada na saída).

T_p pode ser calculado através da equação (2.39), sendo expresso por :

$$T_p = \lambda / (L.A.C) \quad (2.40)$$

Portanto T_p é inversamente proporcional ao comprimento L do sensor e dependente do tipo de fibra usada (constantes A e C). Então (2.39) pode ser escrita como :

$$I = I_0 \cos^2 [\pi p / T_p + \delta] \quad (2.41)$$

sendo δ a fase inicial, calculada por $\delta = \pi L / L_B$.



2.5.2 - A Influência da Temperatura na Operação do Sensor

A Figura 2.17 ilustra a configuração experimental básica normalmente utilizada para os sensores à fibra óptica, do tipo transmissão. Tem-se utilizado também a configuração tipo reflexão [18].

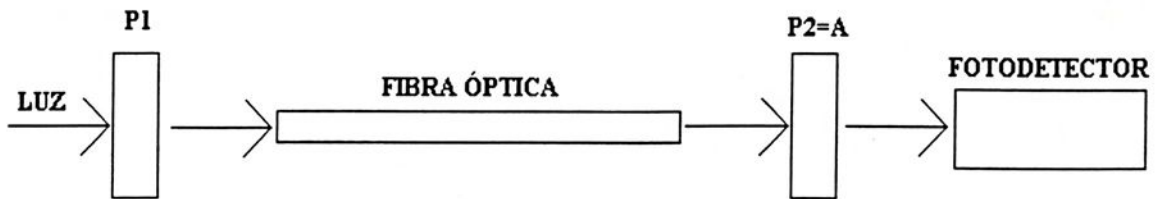


FIGURA 2.17 - Configuração experimental básica utilizada para os sensores à fibra óptica, do tipo transmissão (P_1 e P_2 são polarizadores).

Empregar-se-á esta configuração para a análise do efeito da temperatura no funcionamento do sensor, com o objetivo de minimizar a sua influência no sinal de saída do sensor.

O ângulo de transmissão de P_1 definirá a direção do campo elétrico que incide na fibra, em relação à seus eixos próprios. Por sua vez, o ângulo de P_2 define a direção de análise em que é medida a potência óptica de saída da fibra óptica.

Na Figura 2.18, 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).

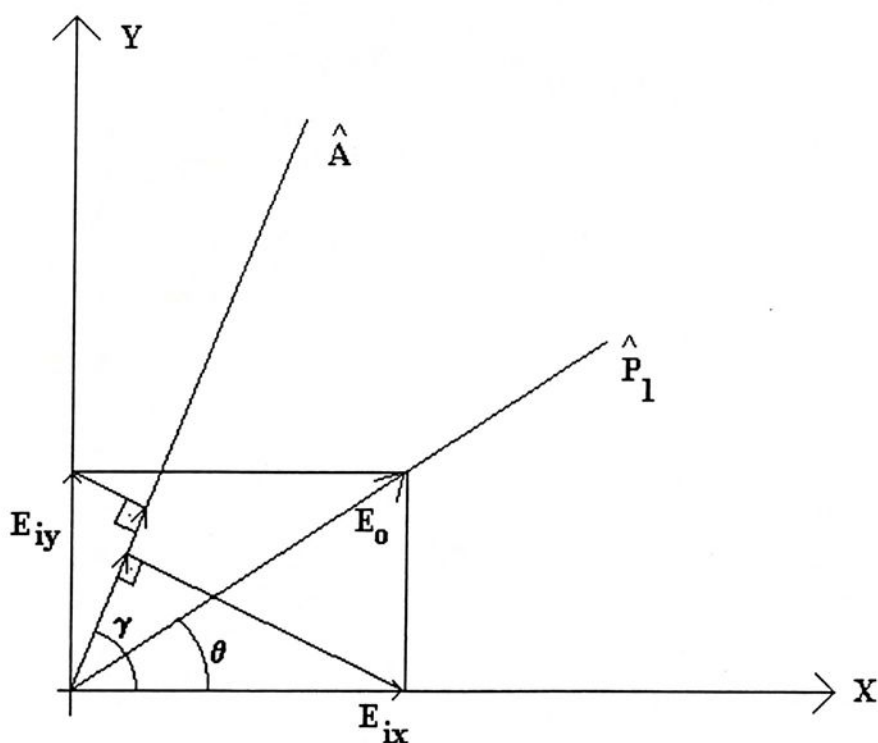


FIGURA 2.18 - Representação do vetor campo elétrico incidente na fibra óptica HB. P1 e \hat{A} são direções de transmissão dos polarizadores P1 e P2, respectivamente.

Através do esquema ilustrado na Figura 2.18 os eixos de transmissão dos polarizadores P1 e P2 (\hat{A}) podem girar em relação ao eixo óptico da fibra HB. O ângulo do eixo de transmissão do polarizador P1 definirá como o campo elétrico da luz alimentará os eixos próprios da fibra. O ângulo P2 define a direção de análise na qual mede-se a potência de saída da luz na fibra.

A Figura 2.18 ilustra as direções dos eixos de transmissão dos polarizadores P1 e P2 em relação aos eixos próprios da fibra HB. E_i é o vetor campo elétrico incidente na fibra .

Pela Figura 2.18 pode-se escrever as expressões de campo elétrico incidente na entrada da fibra.

$$E_{ix} = E_0 \cos \theta \quad (2.42)$$



$$E_{iy} = E_0 \text{sen } \theta \quad (2.43)$$

assim :

$$\vec{E}_i = E_0 \cdot \cos \theta \cdot \cos \omega t \hat{x} + E_0 \cdot \text{sen } \theta \cdot \cos \omega t \hat{y} \quad (2.44)$$

O trecho sensor da fibra provocará desvio de fase de ϕ entre as componentes de campo elétrico, quando a força atuar no corpo de provas de acrílico. Então, o vetor campo elétrico emergente (\vec{E}_e) na saída da fibra HB é :

$$\vec{E}_e = E_0 \cdot \cos \theta \cdot \cos \omega t \hat{x} + E_0 \cdot \text{sen } \theta \cdot \cos (\omega t + \phi) \hat{y} \quad (2.45)$$

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

$$\vec{E}_A = [E_0 \cos \theta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega t + E_0 \text{sen } \theta \cdot \text{sen } \gamma \cdot \cos (\omega t + \phi)] \hat{A} \quad (2.46)$$

O módulo do vetor de Poynting (vetor fluxo de energia por unidade de área por segundo) para a luz é dado por :

$$S = \epsilon_0 \cdot c \cdot E^2 \quad (2.47)$$

onde :

ϵ_0 - permissividade do vácuo

c - velocidade da luz no vácuo

E - módulo do vetor campo elétrico da luz

Para a onda luminosa, a potência óptica é calculada por :

$$P = \langle S \rangle = \epsilon_0 \cdot c \cdot \langle E^2 \rangle \quad (2.48)$$

Assim, das equações (2.47) e (2.48) tem-se :

$$P = \epsilon_0 \cdot c \cdot \langle E_A^2 \rangle \quad (2.49)$$

$$P = \epsilon_0 \cdot c \cdot \{ E_0^2 \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \gamma \cdot \cos^2 \omega t + E_0^2 \sin^2 \theta \cdot \sin^2 \gamma \cdot \cos^2 (\omega t + \phi) + 2E_0^2 \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma \cdot \cos \omega t \cdot \cos (\omega t + \phi) \} \quad (2.50)$$

$$P = \epsilon_0 \cdot c \cdot E_0^2 \left[\frac{\cos^2 \theta \cdot \cos^2 \gamma}{2} + \frac{\sin^2 \theta \cdot \sin^2 \gamma}{2} + \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma \cdot \cos \phi \right] \quad (2.51)$$

Analisando a equação (2.51) pode-se chegar as seguintes conclusões :

1) Para $\theta = 0$ ou 90°

Neste caso o campo elétrico da luz alimentará apenas um dos eixos próprios da fibra óptica HB, tornando o sistema insensível à temperatura. Da expressão (2.51) observa-se que em ambos os casos, o termo que é função de ϕ é nulo, o que é consistente com a análise física.

pois o campo elétrico possui apenas uma componente diferente de zero não se podendo medir defasagens.

2) Para $\gamma = 0$ ou 90°

Neste caso é o analisador que possui o eixo de transmissão alinhado com uma das direções do eixo óptico. Portanto só passa por ele uma componente da luz emergente, anulando-se a outra, não se podendo medir defasagem entre ambas.

3) Para $\gamma = \theta = 45^\circ$

Para este caso, pode-se demonstrar, matematicamente que a expressão (2.51) assume valor máximo, considerando-se também $\cos \phi = 1$, ou seja quando a diferença de fase entre as componentes do campo elétrico incidente é igual a $2n\pi$, sendo n inteiro.



2.5.3 - Técnicas de Emendas para Compensação do “Fading”

A técnica de emendar fibras ópticas é um procedimento bastante delicado e exige grande precisão [22].

O acoplamento de luz no terminal de entrada é feito alinhando-se o campo elétrico da luz com apenas um eixo óptico próprio da fibra óptica altamente birrefringente (HB) (f - “fast” ou s - “slow”). Ao atravessar totalmente a extensão do terminal de entrada, o vetor campo elétrico encontra uma primeira emenda, que é feita como mostra a Figura 2.19, 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 HB na região sensora. Ao encontrar a 2ª emenda o vetor campo elétrico excita o outro eixo óptico próprio da fibra HB que não foi excitado no terminal de entrada (como mostra a Figura 2.19).

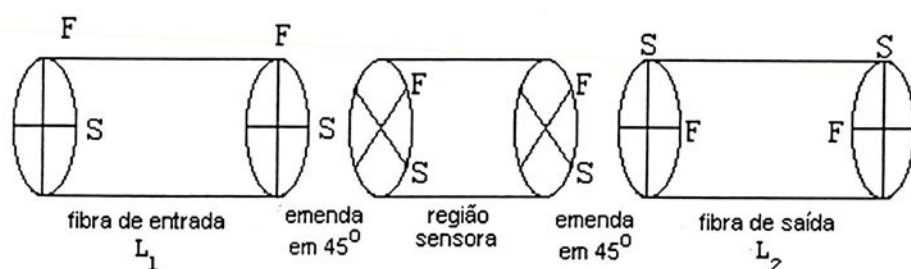


FIGURA 2.19 - A técnica de emendas em fibras HB.

Tornando o comprimento do terminal de entrada (L_1) e o comprimento do terminal de saída (L_2) iguais, os efeitos de temperatura, micro-vibrações e outros parâmetros indesejáveis serão minimizados.

Na região sensora, por se tratar de um trecho de pequeno comprimento, os efeitos de variação de temperatura são drasticamente reduzidos.

É importante ressaltar que existem perturbações na resposta do sensor mesmo com o uso desta técnica. Isso se deve ao fato de que as emendas realizadas não são perfeitas. A existência de pequenas variações de temperatura na região sensora é detectada pelo sensor.

O retardo de fase relativo total das fibras L_1 e L_2 entre os 2 modos próprios, polarizados perpendicularmente, em uma fibra HB, é dado pela equação :

$$\Delta\phi = \Delta\phi(L_1) + \Delta\phi(L_2) \quad (2.52)$$

onde

$$\Delta\phi(L_i) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\eta_i L_i \quad (2.53)$$

O retardo de fase induzido pela temperatura pode ser expresso como :

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta\phi)}{dT} &= \frac{2\pi}{\lambda} \sum_i \frac{d}{dT} (\Delta\eta_i L_i) = \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \sum_i \left(L_i \frac{d(\Delta\eta_i)}{dT} + \Delta\eta_i \frac{dL_i}{dT} \right) \end{aligned} \quad (2.54)$$

onde $\Delta\eta_i = \eta_{xi} - \eta_{yi}$ e η_{xi}, η_{yi} são os 2 índices de refração para os 2 modos de polarização linearmente ortogonais em uma seção i :

Fazendo-se $L_1 = L_2 = L$ e girando-se a seção de entrada de 90° em relação à de saída, tem-se :

$$\Delta\eta_2 = -\Delta\eta_1 \text{ ou } \sum \Delta\eta_i = 0 \quad (2.55)$$

onde :

$$\frac{d(\Delta\phi)}{dT} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(L \sum_i \frac{d(\Delta\eta_i)}{dT} + \frac{dL}{dT} \sum_i \Delta\eta_i \right) \quad (2.56)$$

E finalmente :

$$\frac{d(\Delta\phi)}{dT} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{dT} \left(L \sum_i \Delta\eta_i \right) = 0 \quad (2.57)$$

Portanto, o retardo de fase relativo total entre os dois modos próprios polarizados perpendicularmente com relação a temperatura é nulo.

ou
$$\Delta\phi(T) = \text{constante} \quad (2.58)$$

A equação (2.58) evidencia que o sensor será imune a temperatura ambiente ou qualquer outro parâmetro físico atuando nas seções de entrada e saída da fibra. Entretanto, se somente uma parte do sensor for exposta a influência de um parâmetro físico, o sensor medirá este parâmetro.



CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

3.1 - Introdução

Este capítulo descreve os materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento do trabalho e a metodologia adotada com o objetivo de implementar sensores à fibra óptica para medições de deformações em estruturas. São descritos os experimentos realizados, a técnica de emendas para minimização do “fading” e o método para a determinação dos eixos principais das fibras empregadas como sensores, .

O trabalho foi desenvolvido em sua fase inicial no Laboratório de Engenharia Civil da CESP e, na sua maior parte, no Laboratório de Sensores do Departamento de Engenharia Elétrica e no de Solos do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS) da UNESP.

3.2 - Implementação do Sistema Óptico

3.2.1 - Bancadas Ópticas

Foram implementadas duas bancadas ópticas. A primeira foi projetada para utilização em laboratório, sendo constituída por duas mesas de granito com dimensões de 1,10 m x 0,60 m e altura de 1,10 m (Figura 3.1). Os pés das duas mesas estão apoiadas sobre placas de isopor, para isolamento contra vibrações. Em uma das mesas foram fixados um laser de He-Ne com luz polarizada, um chopper, um posicionador para fibras ópticas monomodos. Na outra fixou-se o suporte de saída da fibra e o fotodetector. Tal disposição



dos equipamentos, com isolamento físico entre o chopper e o fotodetector, é necessário para minimizar os ruídos indesejáveis que surgem mesmo quando se utiliza detecção síncrona. O sinal do fotodetector foi processado por um amplificador lock-in.

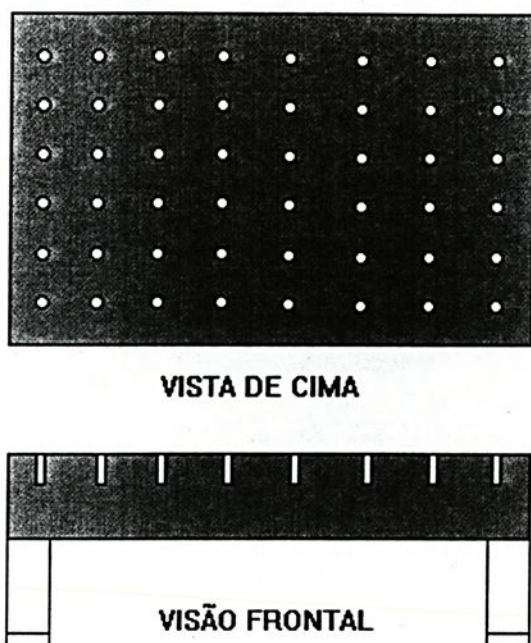


FIGURA 3.1 - A bancada óptica de granito.

A segunda bancada óptica foi projetada para testes de campo. É constituída por duas mesas de madeira com dimensões de 0,55 m x 0,30 m x 0,035 m.

3.2.2 - O Sistema Óptico

A Figura 3.2 ilustra o esquema do sistema óptico utilizado nos experimentos.

Dos componentes utilizados, alguns eram disponíveis no laboratório, alguns adquiridos e outros construídos na oficina mecânica da (FEIS).

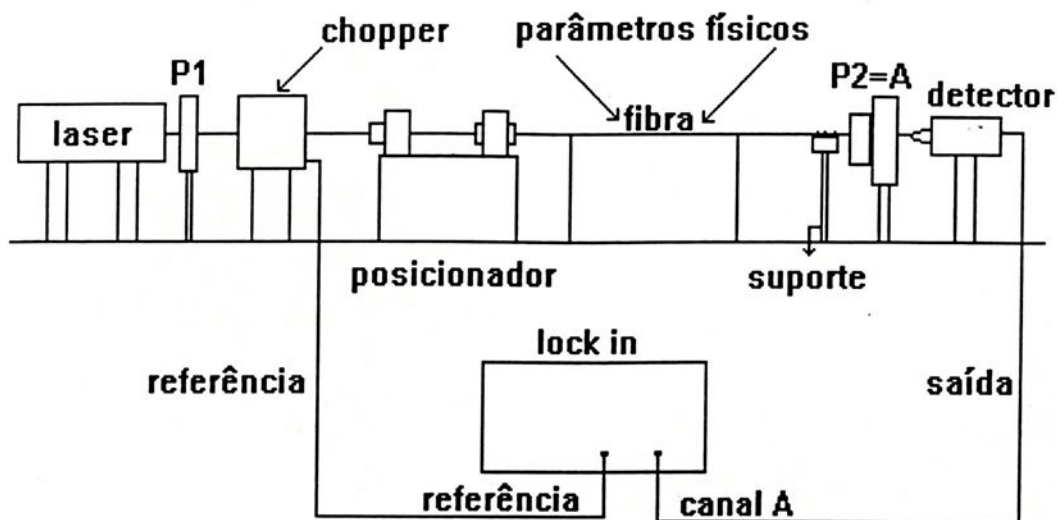


FIGURA 3.2 - Configuração básica do sistema óptico

Os seguintes componentes foram utilizados :

3.2.2.1 - Laser

Modelo LGK 7628, da Carlzeiss Jena, de 15mW de potência máxima, que emite luz polarizada no comprimento de onda de 633 nm.

3.2.2.2 - Chopper

Modelo EG&G Parc, modelo 194 A, com velocidade entre 0,5 e 25,5 rps e várias pás disponíveis. A frequência utilizada em todos os ensaios foi de 9.8 Hz.

3.2.2.3 - Posicionador de Fibras Ópticas

Modelo F-91-C1 da Newport. Seu desenho esquemático é mostrado na Figura 3.3

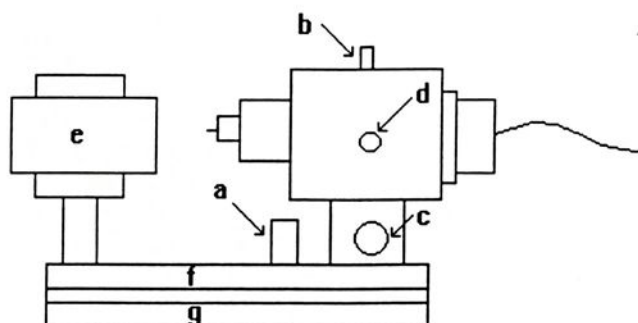


FIGURA 3.3 - Posicionador de fibras ópticas

Identificação dos componentes do posicionador :

- a - ajuste do plano horizontal perpendicular ao plano do desenho
- b - ajuste fino de "a"
- c - ajuste do plano vertical perpendicular ao plano do desenho
- d - ajuste fino de "c"
- e - lente objetiva
- f - base móvel
- g - base fixa

3.2.2.4 - Suporte de Fibras Ópticas

Este suporte possibilita que a extremidade de saída da fibra fique perpendicular à superfície do polarizador. Foi construído na oficina mecânica da FEIS. Seu desenho esquemático é apresentado na Figura 3.4.



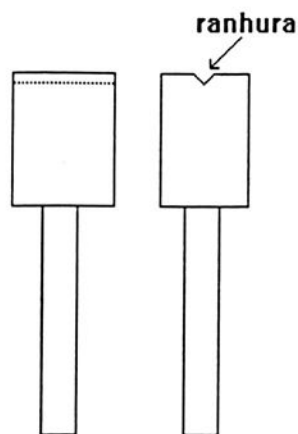


FIGURA 3.4 - Suporte de fibras ópticas

3.2.2.5 - Polarizador

Utilizou-se um polarizador dicróico. Este polarizador contém cristais de prata alongados que absorvem a luz polarizada preferencialmente ao longo de um eixo comum do cristal e transmitem a luz polarizada perpendicularmente a este eixo.

3.2.2.6 - Suporte Giratório para o Polarizador

Este suporte (Figura 3.5), construído na oficina mecânica da FEIS, além de permitir a fixação do polarizador na altura conveniente, possibilita ajustes para que sua superfície fique perpendicular à fibra. Possibilita também a rotação do polarizador. Esta característica é importante na determinação dos eixos principais da fibra e na verificação de como a luz polarizada se encontra na saída da fibra.

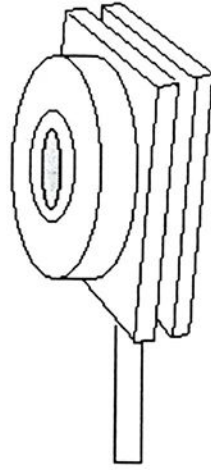


FIGURA 3.5 - Suporte giratório para o polarizador

3.2.2.7 - Sistema de Fotodeteção

O sistema de detecção implementado foi um circuito relativamente simples, conforme mostra a figura 3.6, em que se utilizou o fototransistor TIL31, um resistor de 10 k Ω e um resistor variável de 100 k Ω , que teve a função de regular a sensibilidade do receptor. O circuito foi alimentado por uma bateria de 9 V. Este tipo de alimentação contribui para a redução de ruídos.

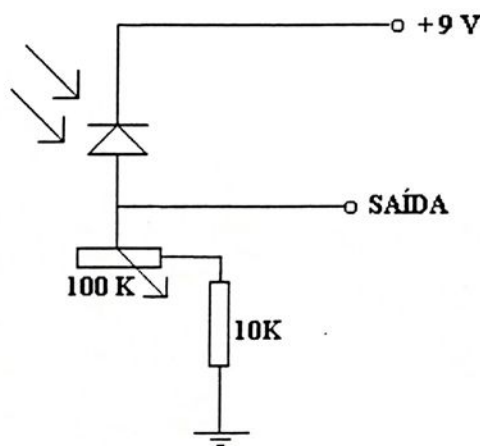


FIGURA 3.6 - O sistema de fotodeteção

3.2.2.8 - Amplificador Lock-In

Modelo 5209 da EG&G

3.2.2.9 - Fibra Óptica

Utilizou-se uma fibra óptica da Newport com as seguintes características :

Tipo F-SPV, comprimento de onda de operação de 633 nm, diâmetro do revestimento do núcleo de 125 µm, diâmetro do revestimento da jaqueta de 250 µm, comprimento de onda de corte de 550 nm, atenuação máxima menor que 12 dB/Km, diâmetro nominal do centro de 2.6 µm, abertura numérica de 0.16 e comprimento de batimento $L_B < 2$ mm.

3.3 - Descrição dos Experimentos

Os primeiros ensaios foram realizados com a fibra óptica inserida diretamente em corpos de prova de argamassa. Não se utilizou o concreto por ele ser um composto muito heterogêneo. Constatou-se, posteriormente, que esta metodologia não era adequada, em função dos seguintes fatores :

- 1) Devido à fragilidade da fibra eram necessários muitos cuidados para inseri-la no corpo de prova;
- 2) A superfície da fibra é muito lisa o que propiciava o seu deslizamento no interior do corpo de prova, prejudicando a transmissão dos esforços deste para a fibra.

Optou-se, então, por se inserir a fibra em corpos de prova de acrílico. Após ensaiados, estes corpos podem ser fixados em corpos de prova de concreto. O acrílico possui curva



tensão x deformação linear na faixa de 0 a 500 microstrains, que é a faixa importante para ensaios de estruturas de concreto. Esta metodologia tem sido adotada pelos profissionais de Engenharia Civil, empregando-se “strain gages” como sensores.

Foram realizados ensaios de tração e de compressão em corpos de prova de acrílico. Para a finalidade de estudos em estruturas de concreto é relevante medir deformações produzidas por forças de compressão.

3.3.1 - Medidas de Deformações Através de Ensaios de Tração

Estas medidas foram realizadas no Laboratório de Sensores do Departamento de Engenharia Elétrica.

Construiu-se um corpo de prova de acrílico, com forma cilíndrica, denominado **CPI**, que foi submetido à tração. Foi feita uma ranhura em toda a extensão do comprimento do corpo de provas para que a fibra óptica pudesse ser fixada no centro do cilindro. As extremidades do corpo de prova possuíam diâmetro maior que a região central para permitir a aplicação da força de tração. A parte curvilínea do corpo de provas tem a função de transmitir forças por igual à região sensora. A fixação da fibra óptica foi realizada com cola acrílica (Sinteglas S-330) apenas na porção central do corpo de prova (região sensora). A região sensora possui comprimento de 80 mm e diâmetro de 10 mm. A figura 3.7 mostra o desenho do **CPI**.

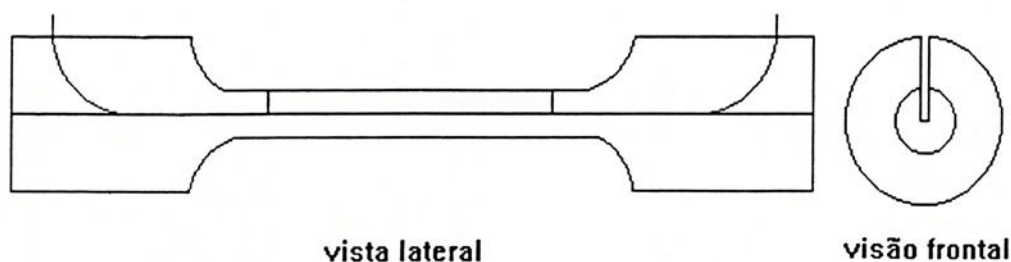


FIGURA 3.7 - Corpo de provas CPI

A figura 3.8 mostra o esquema do sistema de tração implementado para a realização dos experimentos com o sensor polarimétrico.

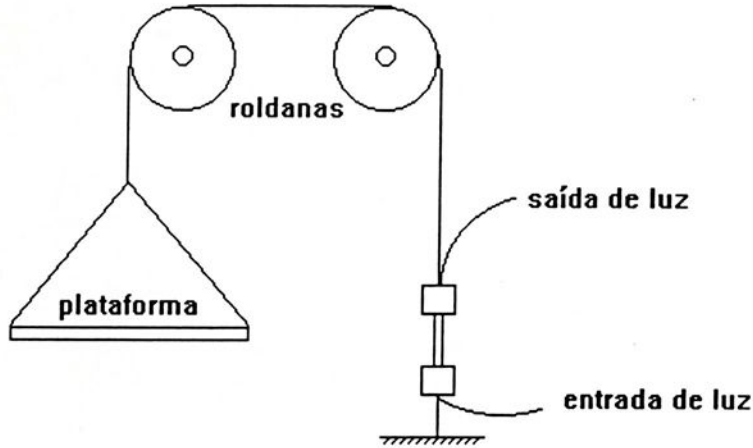


FIGURA 3.8 - Esquema do ensaio de tração

As extremidades do corpo de prova foram tracionadas através de cabos de aço. Os apoios para as extremidades do corpo de provas seguiam um contorno curvilíneo. O encaixe do corpo de provas nos apoios foi bem implementado. Uma das extremidades do **CPI** foi fixada e na outra extremidade, o cabo de aço foi percorrido ao longo de 2 treliças e fixado a uma plataforma de madeira. Esta serviu para a colocação de cilindros de chumbo cujas massas foram determinadas com uma balança eletrônica (Mettler, modelo P5N).

3.3.2 - Medidas de Deformações Através de Ensaio de Compressão

As medidas de deformações, através de ensaios de compressão, foram realizadas no Laboratório de Solos, do Departamento de Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

3.3.2.1 - Medidas Realizadas com o Corpo de Provas CP2

A Figura 3.9 mostra o desenho do corpo de provas de acrílico, denominado CP2, que foi utilizado nos primeiros ensaios de compressão. Ele foi cortado, em sua extensão longitudinal, da superfície até o seu centro, para possibilitar a fixação da fibra óptica.

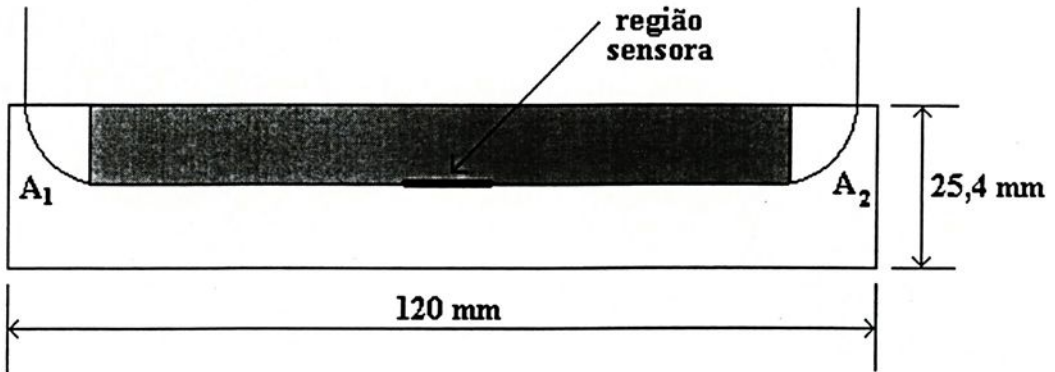


FIGURA 3.9 - Corpo de provas CP2

Como se pode observar, a fibra não foi colada em toda a extensão longitudinal do corpo de provas. As forças foram aplicadas nas faces A₁ e A₂ utilizando-se a prensa PAVITEST, modelo C1006 (Figura 3.10). Esta prensa pode aplicar forças de até 49.000 N. Foram aplicadas, com intervalos de 200 N.

Para se minimizar o "fading" implementou-se o sensor com a técnica de emendas, conforme proposto por Dakin [25], sendo de 10 mm o comprimento da região sensora. A descrição da técnica de emendas é apresentada no item 3.3.3.

Quando da realização dos ensaios com CP1 e CP2, os eixos principais das fibras ópticas ainda não haviam sido identificados.

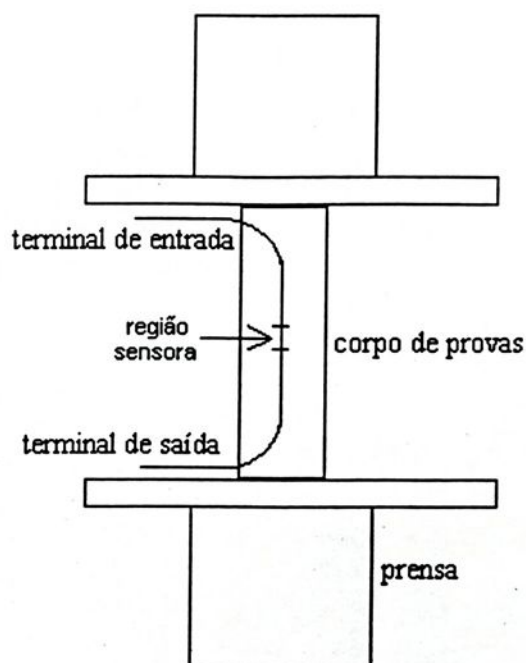


FIGURA 3.10 - Esquema do equipamento utilizado para aplicação de forças de compressão.

3.3.2.2 - Medidas Realizadas com os Corpos de Provas CP3

A Figura 3.11 mostra o esquema do corpo de prova denominado CP3. É um corpo cilíndrico com diâmetro de 2,54 cm e comprimento de 3,00 cm. 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.

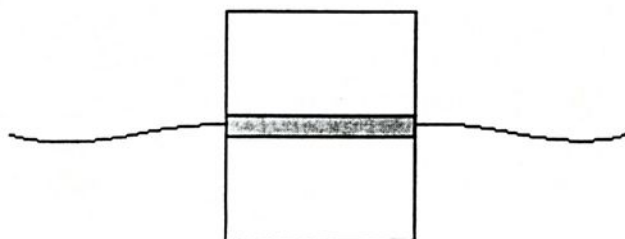


FIGURA 3.11 - Corpo de prova CP3

Foram implementados dois corpos de prova **CP3**. Em um deles a região sensora possuía comprimento de 5 mm e no outro de 3 mm. Ambos os sensores foram implementados utilizando-se a técnica de emendas.

Para se realizar os experimentos com os dois sensores, os eixos ópticos principais das fibras foram previamente determinados, utilizando-se a metodologia descrita no item 3.3.4.

A luz linearmente polarizada do laser foi injetada paralelamente a um dos eixos principais da fibra. Conforme mencionado no Capítulo II, é possível eliminar a influência de parâmetros externos em ambientes instáveis e simultaneamente preservar a polarização linear da luz quando esta é injetada paralelamente a um dos dois eixos principais da fibra.

Forças de compressão foram aplicadas com intensidades espaçadas de 100 N. O tempo de aplicação da força, para cada intensidade, era de 2 minutos. Neste intervalo efetuava-se a leitura do sinal no amplificador lock-in. O sinal não se mantinha exatamente constante e era feita a leitura de sua variação.

3.3.3 - Técnica de Emendas para a Minimização do “Fading”

Por envolver implementação mais simples optou-se, neste trabalho, por utilizar o método de Dakin e Wade para minimizar os problemas de “fading” do sensor polarimétrico.

Foram realizadas emendas em duas fibras ópticas birrefringentes, uma com comprimento da região sensora de 3 mm e a outra de 5 mm. Utilizou-se o equipamento Ericsson, modelo FSU 925 PM-A, pertencente ao Instituto de Estudos Avançados (IEAv), do Centro Tecnológico de Aeronáutica - CTA, em São José dos Campos - SP.

As emendas foram implementadas segundo o esquema mostrado na Figura 3.12.



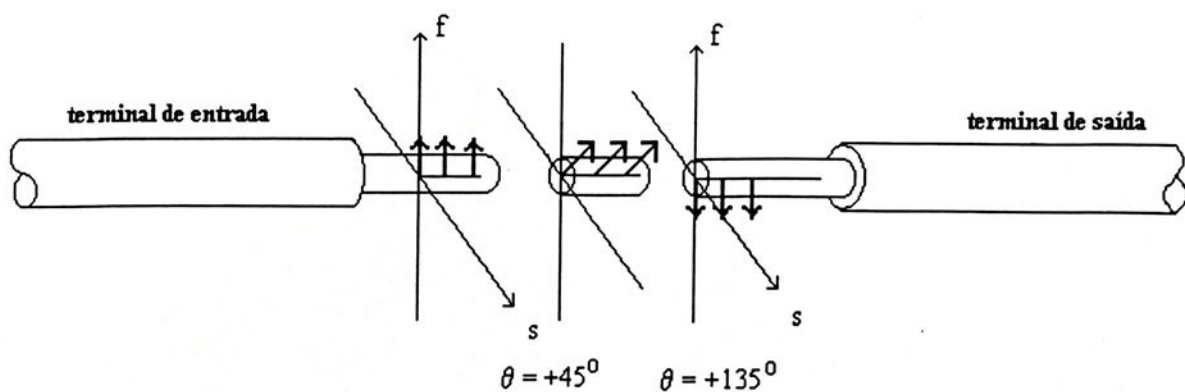


FIGURA 3.12 - Esquema geral de emendas realizadas nos sensores empregados nos corpos de provas CP3.

No procedimento experimental para realização das emendas é de fundamental importância os processos de limpeza e clivagem das fibras, caso contrário a máquina aborta a operação mesmo que a “sujeira” seja constituída por resíduos de “jacket” ou partículas com dimensões sub-milimétricas.

A remoção do “jacket” (acrilato) é feita com um amolecimento inicial, mergulhando a região a ser descascada em solução de diclorometano. Em seguida, usando uma ferramenta semelhante a um descascador de fio de cobre, remove-se o “jacket”. Então é realizada uma limpeza da região, com álcool isopropílico.

A clivagem é realizada num clivador fabricado pela Ericsson. Ele é automatizado, prendendo os dois lados da fibra a ser clivada e aplicando uma tração rigorosamente controlada. Em seguida, automaticamente é efetuada a clivagem.

Uma primeira inspeção das qualidades de limpeza e clivagem pode ser feita usando o “display” de cristal líquido da máquina de emendas.

A máquina então, a partir de um programa em sua memória, lança um feixe de luz sobre as fibras e analisa a luz espalhada. A partir disso, executa automaticamente os alinhamentos angular e linear. Na programação da máquina, são inseridos dados a respeito do tipo de fibra (comum, birrefringente, tipo de núcleo, etc), correntes de pré-fusão e fusão, tempos de pré-fusão e fusão, etc.

Para o sensor, com comprimento da região sensora de 5 mm, na emenda número 1, a perda foi de 0,18 dB e a razão de extinção de - 0.09 dB. Para a emenda número 2, a máquina não forneceu o valor da perda. O valor da razão de extinção foi de - 0.09 dB.

Para o sensor com comprimento da região sensora de 3 mm, a perda foi de 1,9 dB e a razão de extinção de 0,39 dB para a emenda número 1. Para a emenda número 2, a máquina não forneceu o valor da perda. A razão de extinção foi de 1,9 dB.

3.3.4 - Método para a Determinação dos Eixos Principais das Fibras Ópticas

A identificação dos eixos principais das fibras ópticas foi feita apenas para os sensores utilizados nos corpos de prova CP3. Foi realizada variando-se a direção da polarização da luz incidente na entrada da 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 no terminal de entrada da fibra, 30 °C (temperatura ambiente) e 45 °C, para cada ângulo. Utilizou-se um resistor de 8,2 Ω de 50 W, situado próximo à fibra para propiciar o aquecimento.

Enquanto não se obteve o alinhamento desejado a variação da temperatura produzia uma grande instabilidade do sinal de saída. Para a fibra com comprimento sensor de 3 mm, a variação máxima do sinal medido pelo amplificador lock-in foi de 52%, considerando-se como referência a amplitude do sinal na temperatura de 30 °C. Na faixa de ângulo de giro de 20 a 30° a variação do sinal foi inferior a 5%. Decidiu-se, então, variar o ângulo de giro de 2,5 em 2,5°. Um dos eixos principais foi identificado em 25°, ângulo em que houve a menor variação do sinal de saída com a temperatura.

Para a fibra com comprimento sensor de 5 mm, a variação máxima do sinal medido pelo amplificador lock-in foi de 15%, considerando-se como referência a amplitude do sinal na temperatura de 30 °C. Na faixa de ângulo de giro de 5 a 20° a variação do sinal foi inferior a 3%. Variando-se o ângulo de giro de 2,5 em 2,5° identificou-se um dos eixos principais em 17,5°, onde houve uma variação mínima do sinal do sensor.



Realizaram-se também experimentos nos quais se efetuou a leitura do sinal dos sensores em quatro diferentes temperaturas (30, 34, 38 e 43°C), em dois diferentes ângulos: aquele paralelo ao eixo principal da fibra e o outro 45° defasado deste.



CAPÍTULO 4

Resultados e Discussões

4.1 - Introdução

Este capítulo descreve os resultados obtidos com os sensores à fibras ópticas, nos ensaios de tração e compressão de corpos de acrílico, realizados com o objetivo de se medir deformações em estruturas. A faixa de deformações estudada (0 a 500 microstrains) é adequada para medidas em estruturas de concreto. Neste caso, o corpo de provas de acrílico deve ser firmemente inserido no corpo de concreto a ser analisado. Os resultados são apresentados na ordem cronológica de realização dos experimentos.



4.2 - Medidas de Deformações Através de Ensaio de Tração

As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram os resultados obtidos quando forças de tração foram aplicadas, em ordem crescente de magnitude, no corpo de provas de acrílico CP1.

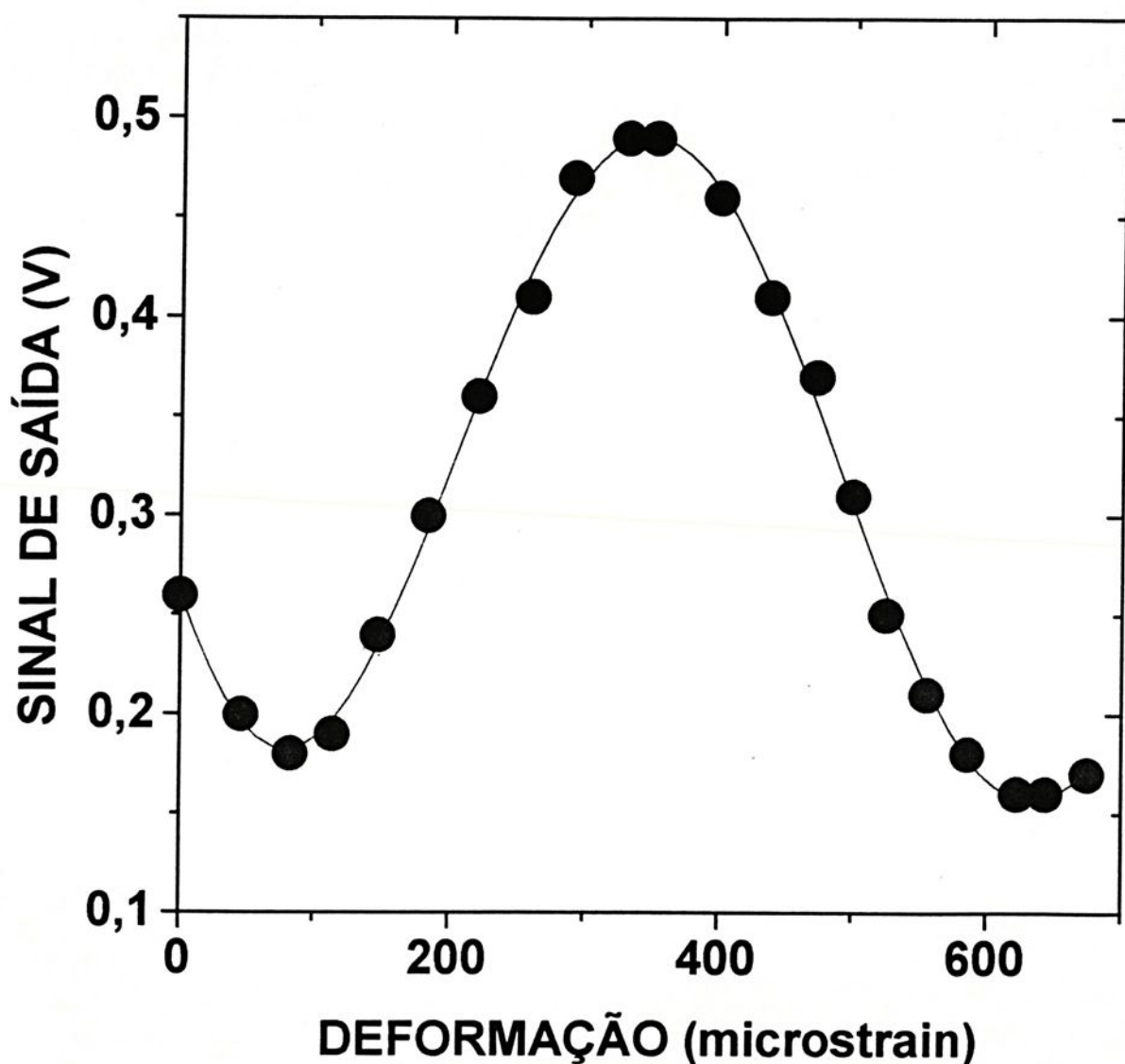


FIGURA 4.1 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico em função da deformação, resultante de forças de tração, aplicadas no corpo de provas CP1, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 1).

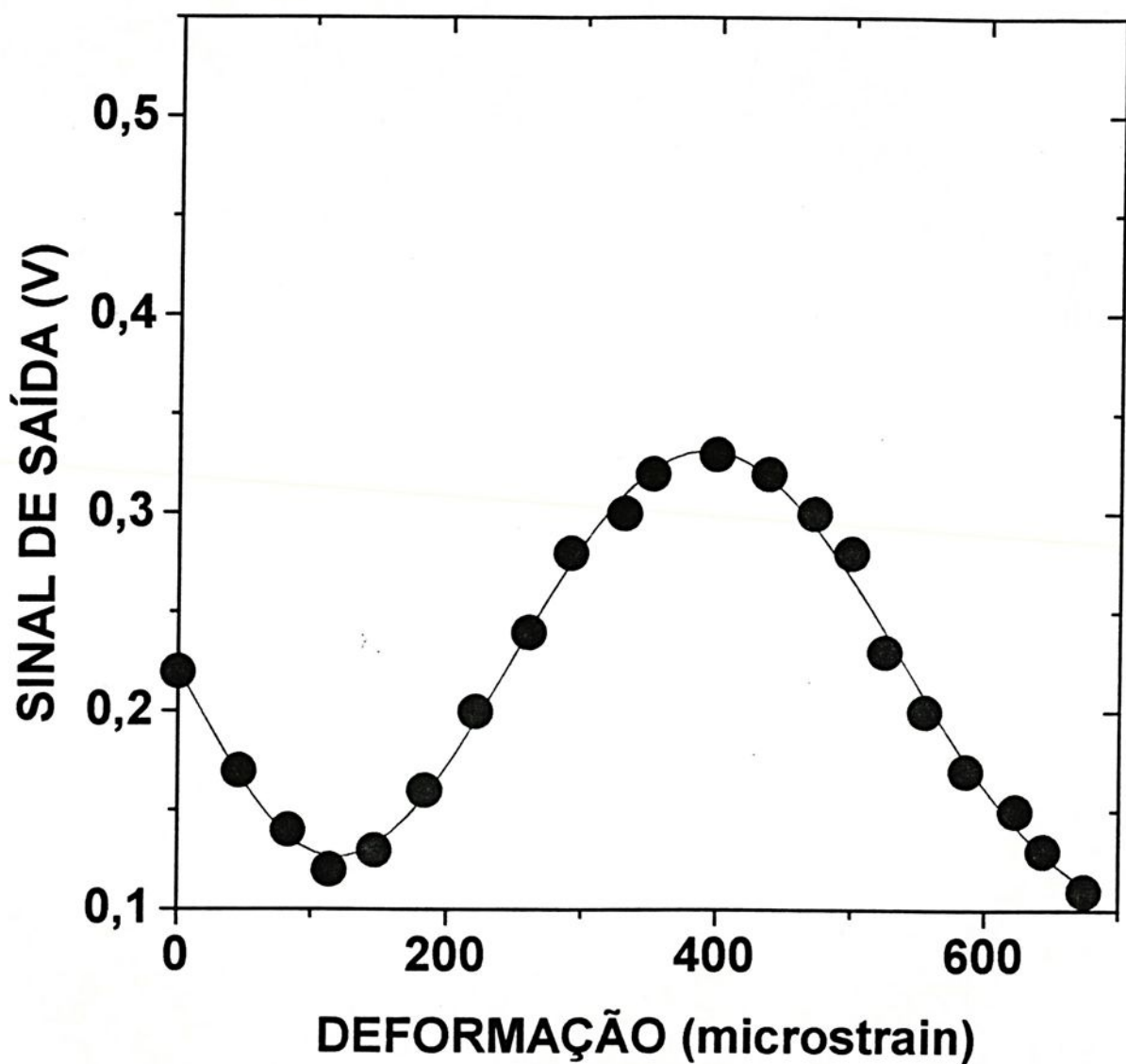


FIGURA 4.2 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico em função da deformação, resultante de forças de tração aplicadas no corpo de provas CP1, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 2).

A Figura 4.3 mostra os resultados obtidos quando forças de tração foram aplicadas no CPI, em ordem decrescente de magnitude.

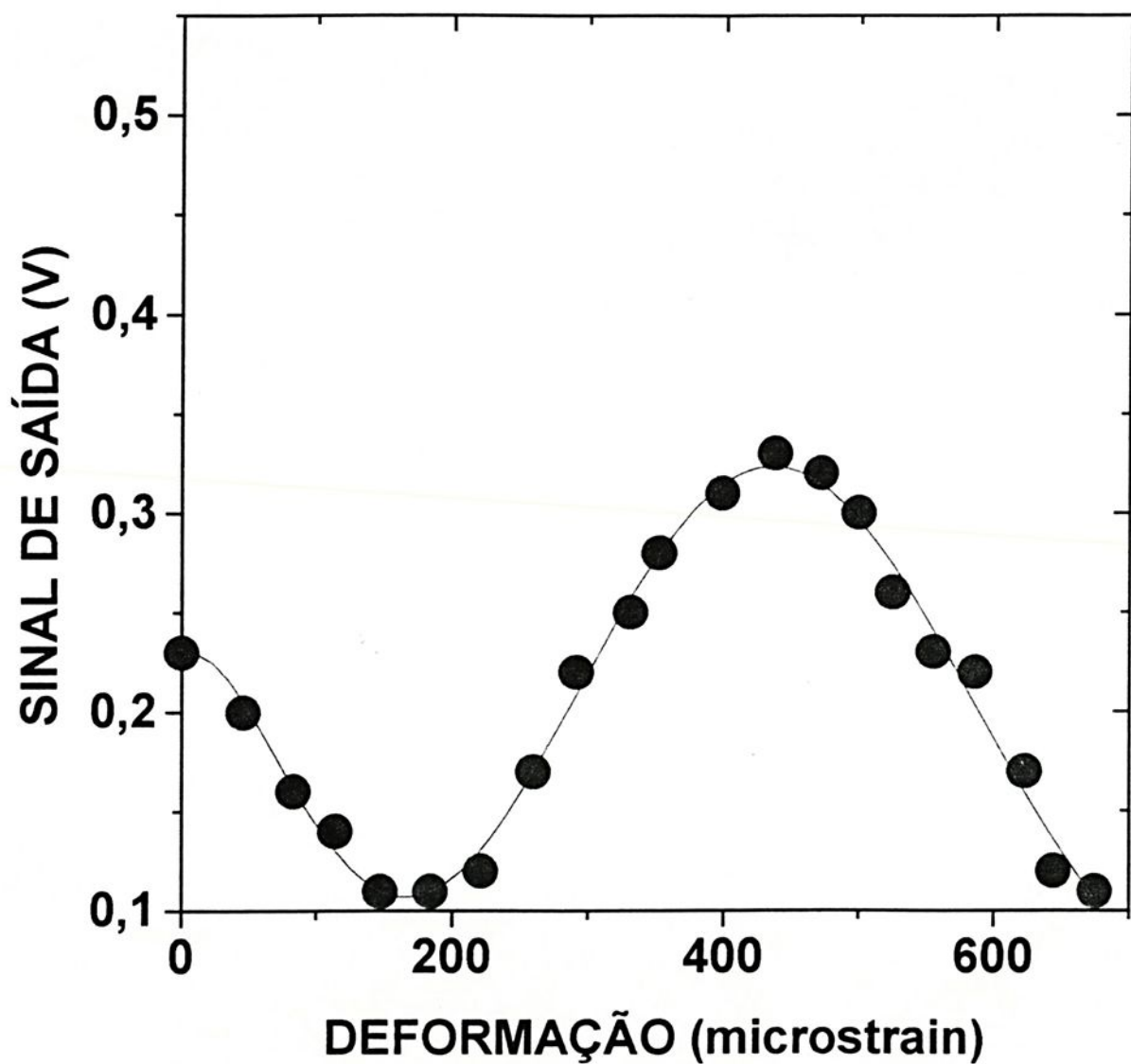


FIGURA 4.3 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico, em função da deformação, resultante de forças de tração aplicadas no corpo de provas CPI, em ordem decrescente de magnitude (Ensaio nº 3).

Conforme esperado teoricamente, o sinal produzido pelo sensor polarimétrico é uma função periódica da deformação sofrida pelo corpo de provas. Os gráficos foram traçados utilizando-se o programa “Microcal Origin - versão 3.5”. A curva de ajuste é um polinômio de 6º grau.

Observa-se que a repetitividade do sinal não foi boa. Estas medidas foram preliminares e evidenciaram a necessidade de se utilizar técnicas mais aprimoradas para a implementação do sensor. O trabalho de Bock [23] relata o emprego de sensores a fibra óptica polarimétricos para medidas de altas pressões, utilizando a técnica de emendas, patenteada por Dakin [25]. A partir de então todos os sensores deste trabalho foram implementados utilizando-se a técnica de emendas.



4.3 - Medidas de Deformações Através de Ensaios de Compressão sem Compensação de “Fading”

As Figuras 4.4 a 4.6 mostram os resultados dos ensaios de compressão realizados com o sensor polarimétrico, com região sensora de 10 mm, inserido no corpo de provas CP2. Quando da realização dos experimentos ainda não haviam sido identificados os eixos principais da fibra.

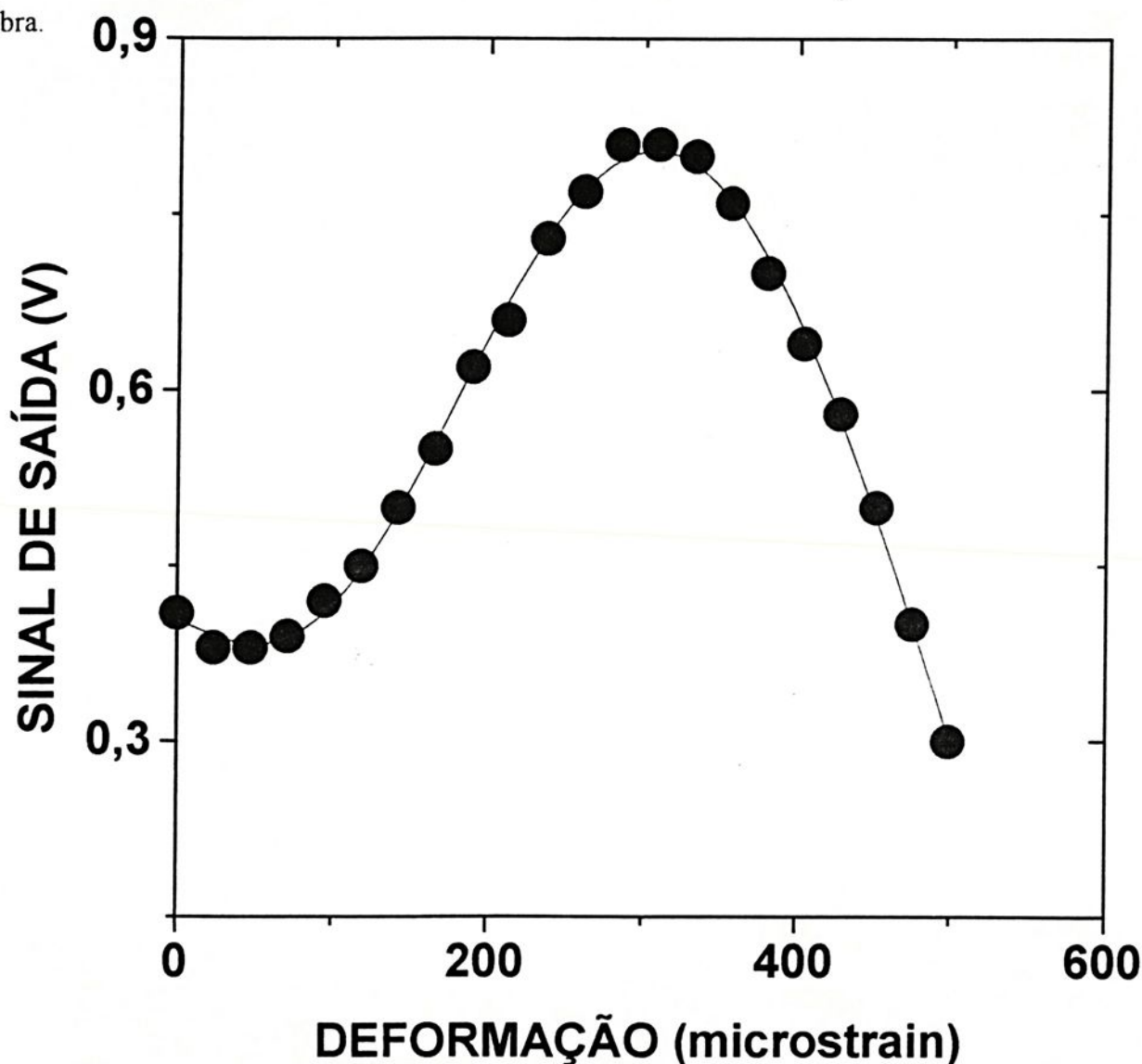


FIGURA 4.4 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico em função da deformação, decorrente de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP2, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 4).

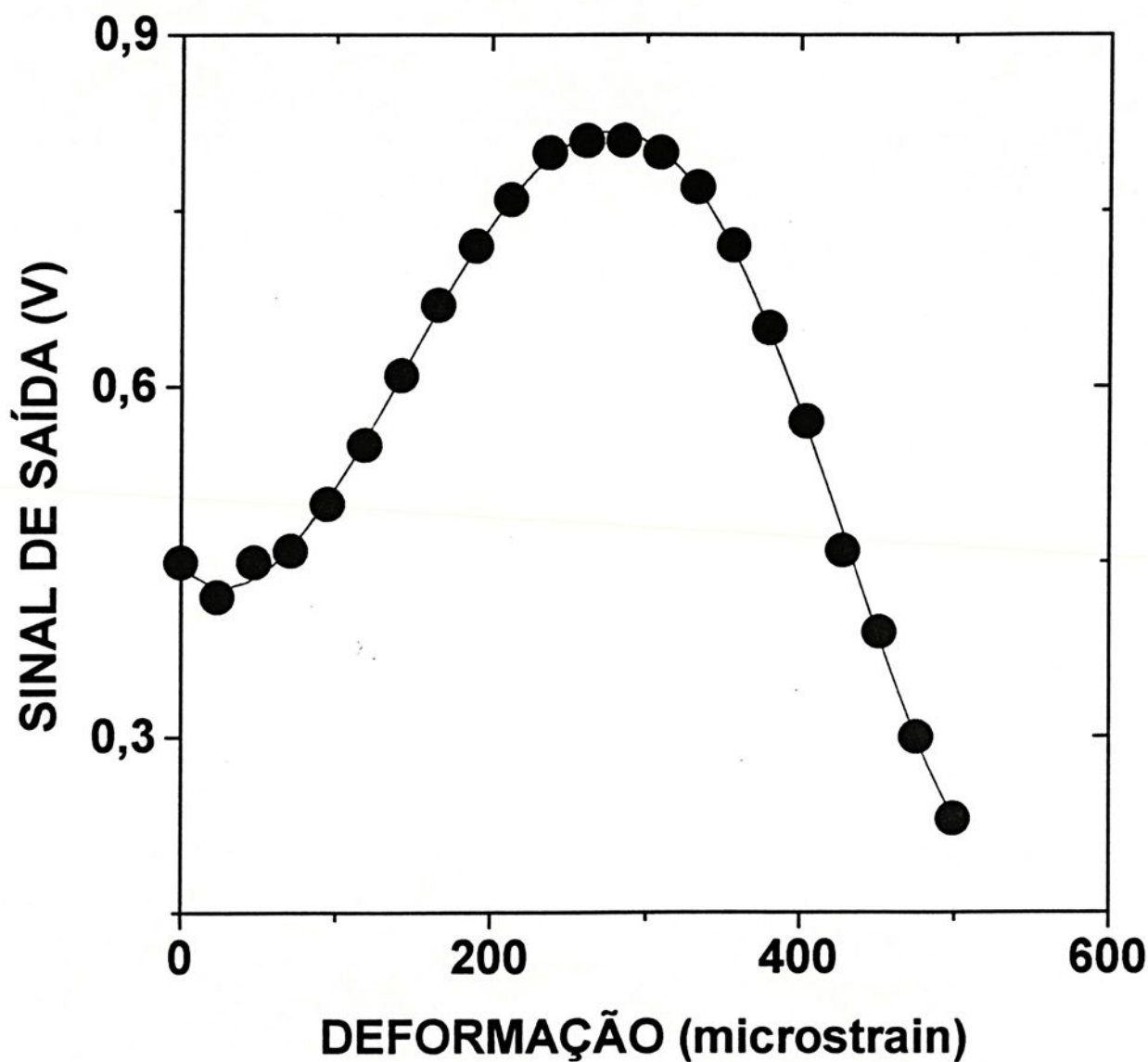


FIGURA 4.5 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP2, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 5).

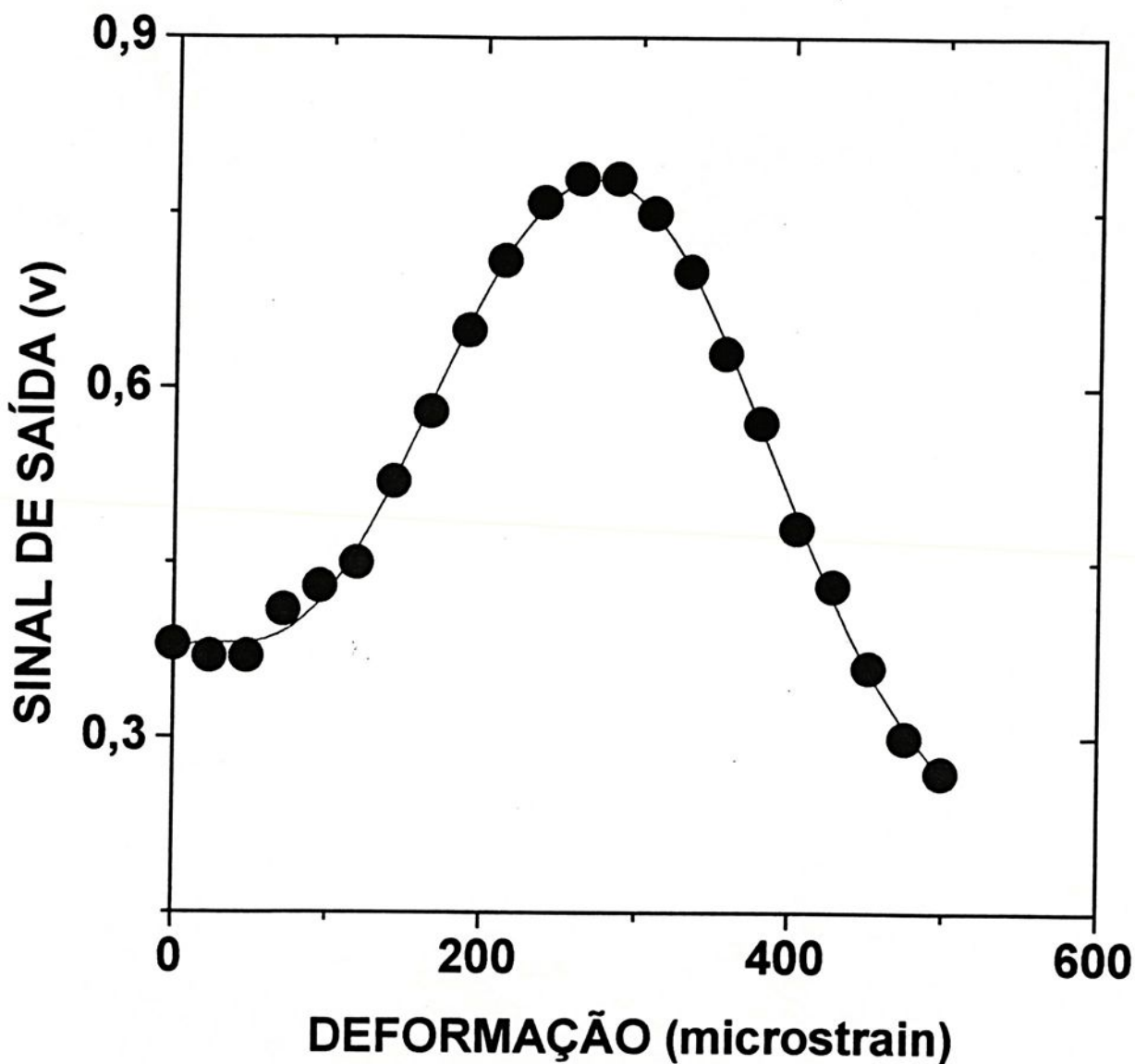


FIGURA 4.6 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP2, em ordem decrescente de magnitude (Ensaio nº 6).

Observa-se novamente o caráter periódico do sinal de saída do sensor polarimétrico com a deformação. Os resultados são semelhantes aos obtidos por Bock [23] e podem ser explicados pela teoria apresentada na secção 2.5.

A luz não foi injetada na fibra com sua direção de polarização paralela a um dos eixos principais da fibra. Comparando os gráficos apresentados nas Figuras 4.4 a 4.6, observa-se que a reprodutibilidade do sensor ainda não foi boa. Isto ocorre devido à influência de fatores externos, tais como temperatura e micro-vibrações que alteram o estado de polarização da luz na fibra causando instabilidade no sinal de saída.

Com o comprimento de 10 mm da porção sensora não houve uma relação unívoca entre deformação e o sinal do sensor. Não é possível, portanto, obter-se uma curva de calibração do sensor.

Por este motivo, sabendo que há uma relação inversamente proporcional entre o período e o comprimento da região sensora [23], implementou-se, a seguir, sensores com comprimento da região sensora de 5 mm e 3 mm, para o sensor operar em sub-ciclo. Havia necessidade de se determinar, antes, os eixos ópticos principais da fibra.



4.4 - Influência da Temperatura no Sensor Polarimétrico

O reconhecimento dos eixos principais da fibra óptica foi feito variando-se a direção da polarização da luz incidente na entrada da fibra, através da rotação do polarizador e do laser. A descrição da forma como os eixos ópticos principais foram identificados foi apresentada no item 3.3.4.

A seguir realizaram-se experimentos 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.

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram a influência da temperatura nas fibras inseridas nos corpos de provas CP3, com comprimentos das regiões sensoras, respectivamente, de 3 mm e de 5 mm.



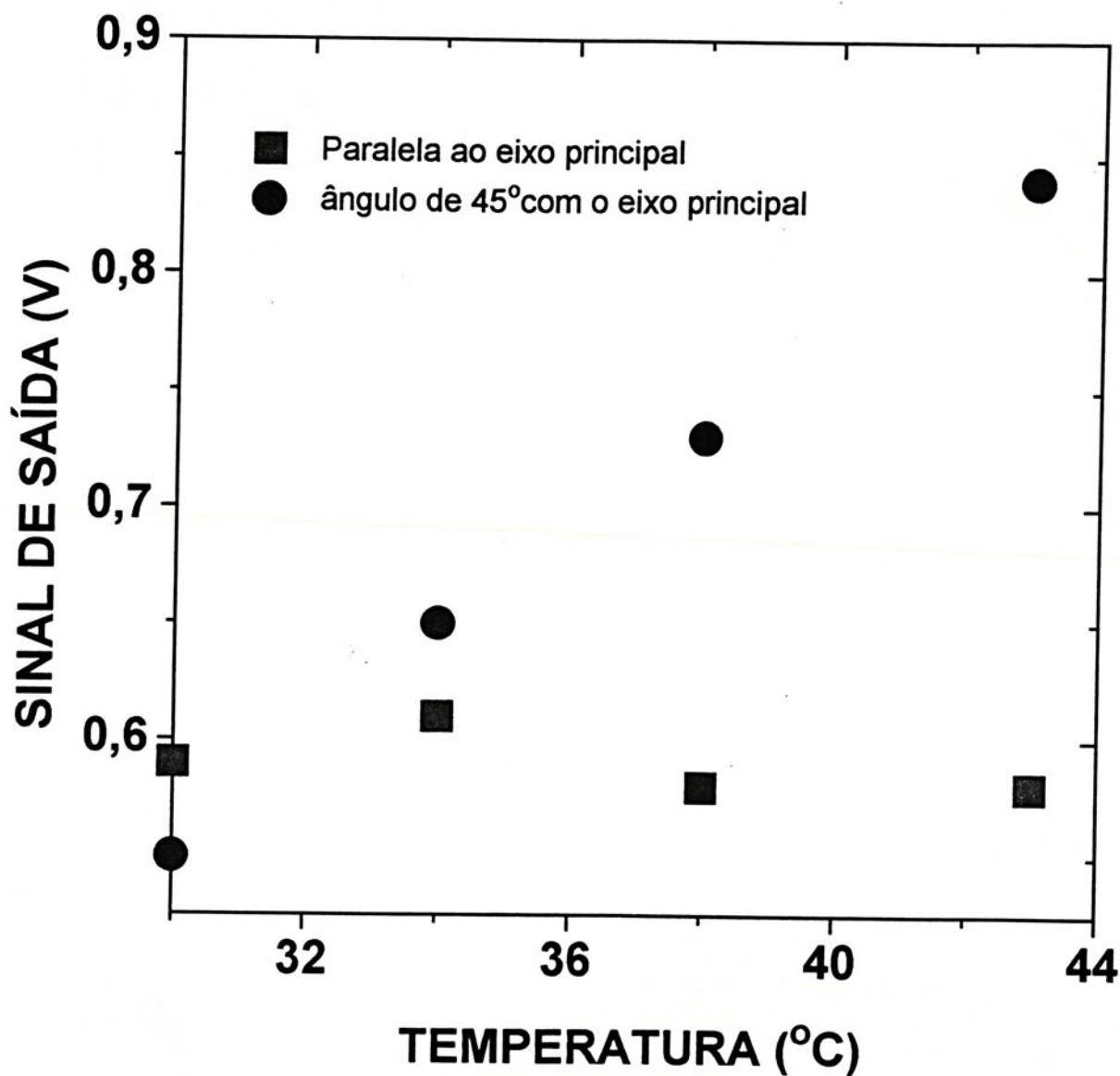


FIGURA 4.7 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico, com comprimento da região sensora de 3 mm, em função da temperatura de um trecho do terminal de entrada da fibra, para duas diferentes direções de polarização da luz incidente (Ensaio nº 7).

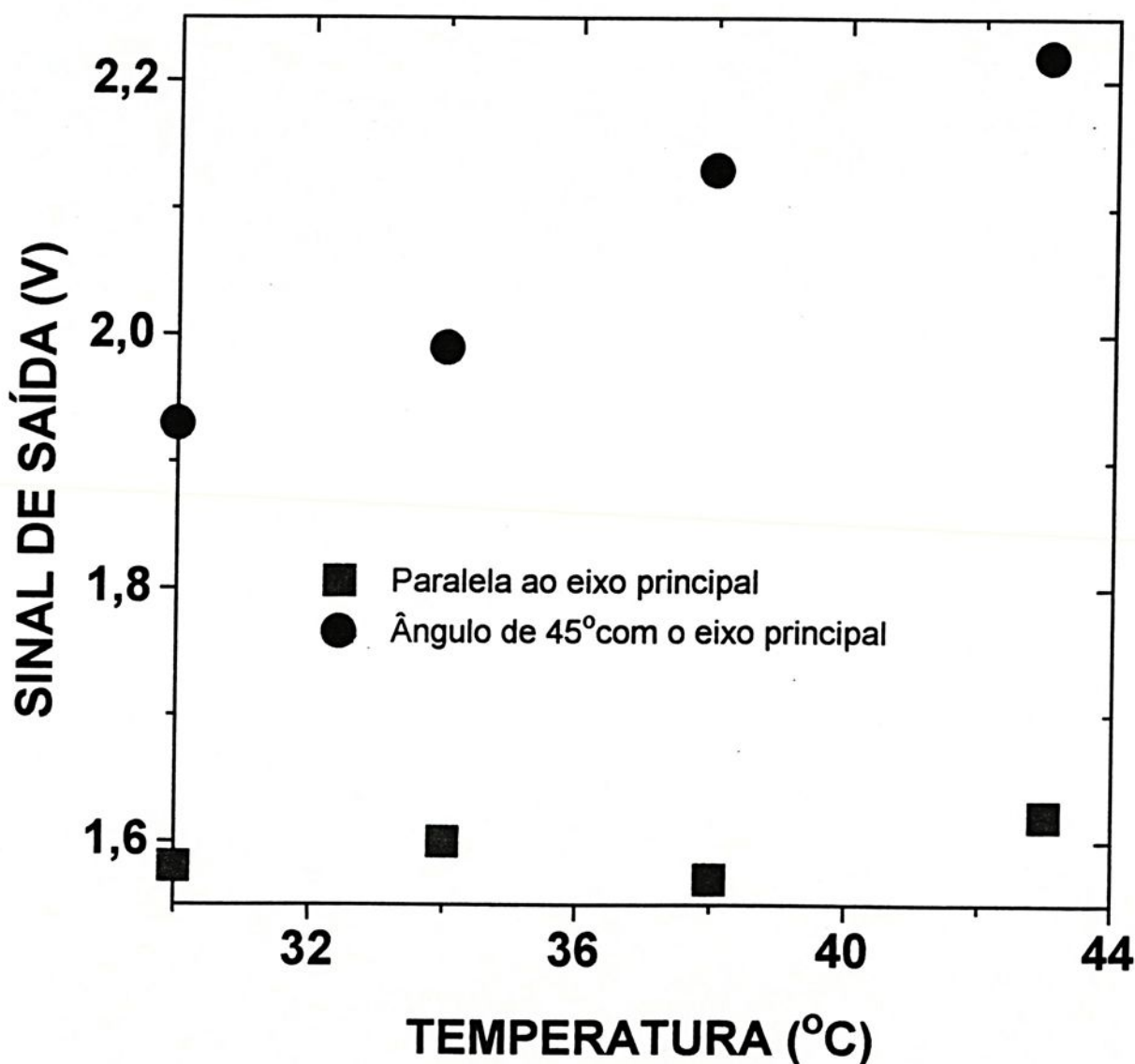


FIGURA 4.8 - Sinal produzido pelo sensor à fibra óptica polarimétrico, com comprimento da região sensora de 5 mm, em função da temperatura de um trecho do terminal de entrada da fibra, para duas diferentes direções de polarização da luz incidente (Ensaio nº 8).



As Figuras 4.7 e 4.8 mostram que a sensibilidade à temperatura do sensor compensado (com direção de polarização da luz incidente paralela a um dos eixos principais da fibra óptica) foi drasticamente reduzida. Há variação somente de 5% do sinal de saída para a fibra com região sensora de 3 mm e de 2,5 % para a com região sensora de 5 mm, enquanto para os sensores não compensados, as variações foram, respectivamente, de 52% e de 15%, na faixa de 30 a 43 °C.

4.5 - Medidas de Deformações Através de Ensaio de Compressão com Compensação de “Fading”

As Figuras 4.9 a 4.11 mostram os resultados obtidos para o sensor compensado, com comprimento da região sensora de 3 mm. O sensor, inserido no corpo de prova CP3, trabalha em sub-ciclo, possibilitando uma relação unívoca entre o sinal de saída e a deformação. Como esperado, a repetitividade do sinal foi melhor que nos sensores não compensados. A curva de ajuste é um polinômio de terceiro grau.



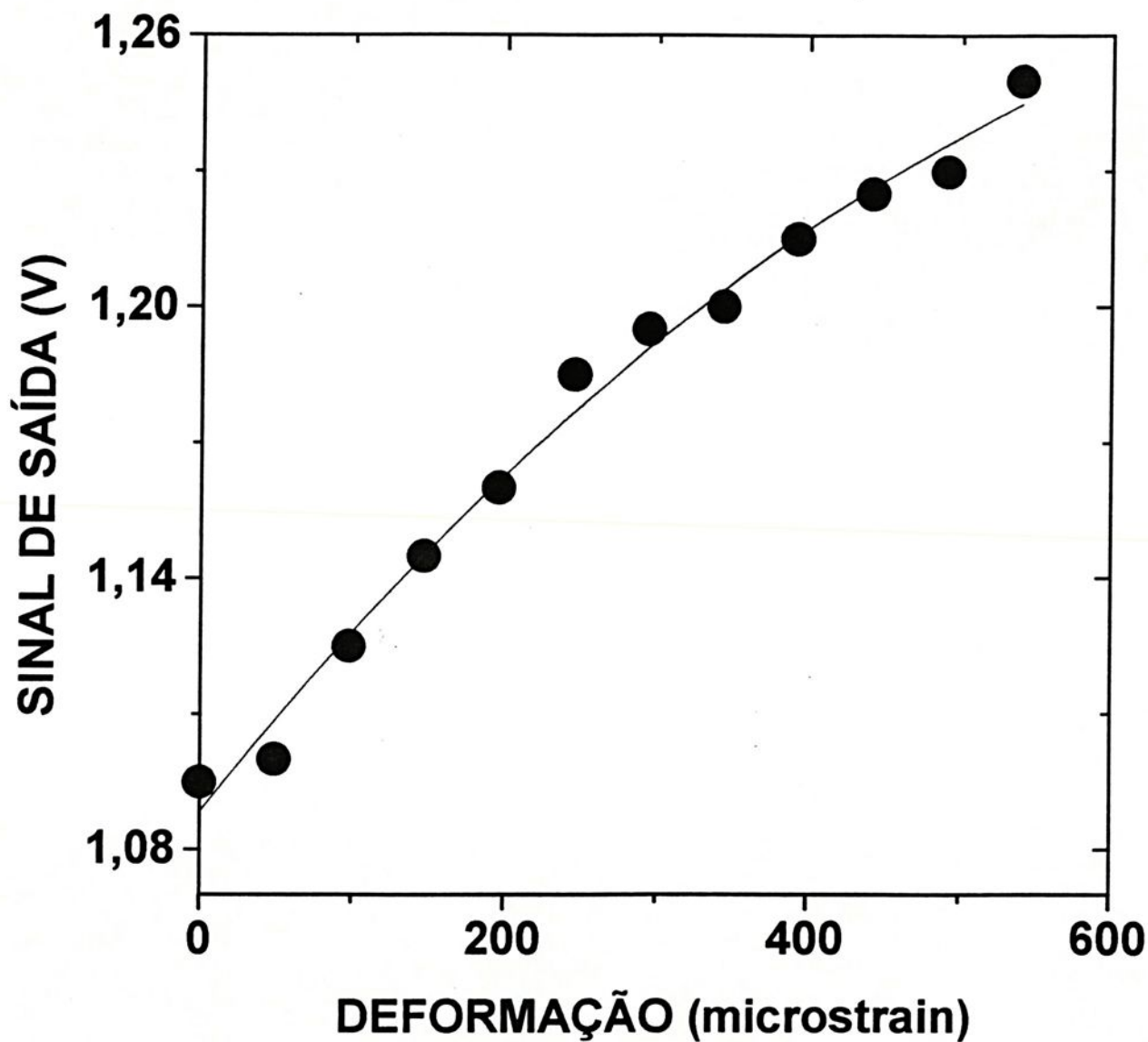


FIGURA 4.9 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora de 3mm, em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 9).

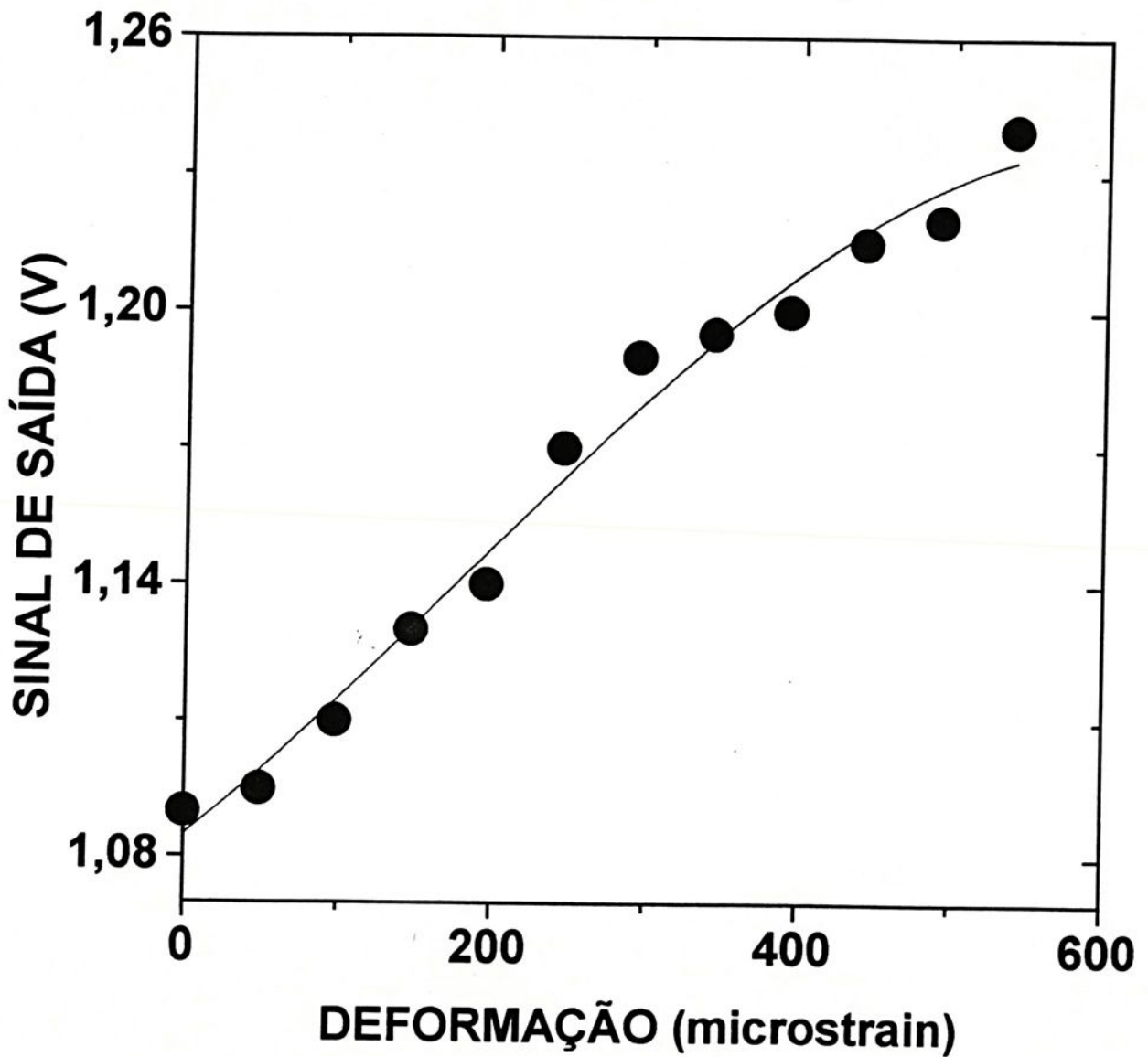


FIGURA 4.10 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora de 3mm, em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 10).

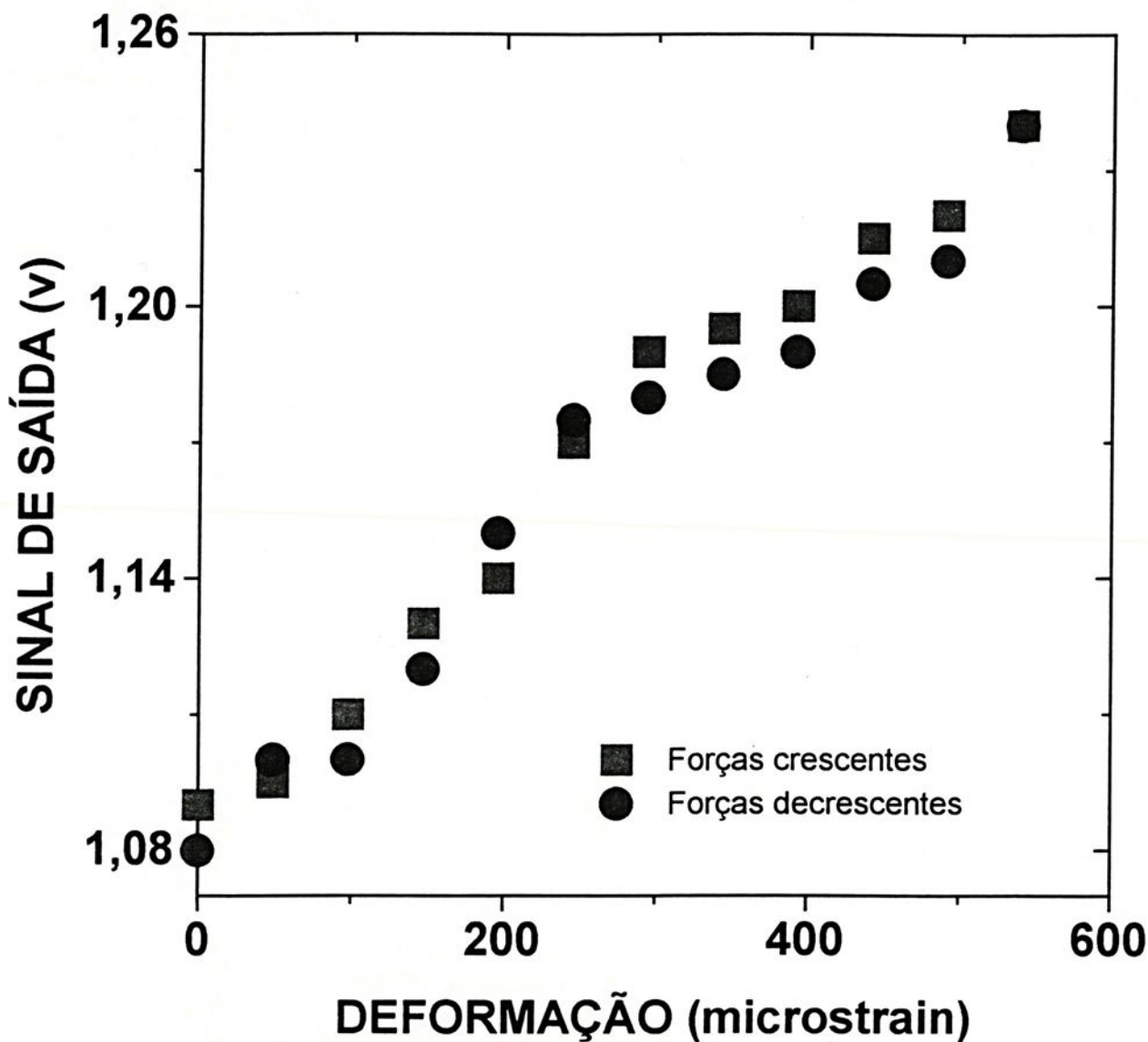


FIGURA 4.11 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora de 3 mm, em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem crescente e decrescente de magnitude (Ensaio nº 11).

Os resultados obtidos para o sensor compensado, com comprimento da região sensora de 5 mm, são apresentados nas Figuras 4.12 a 4.16. O sensor também trabalha em sub-ciclo.

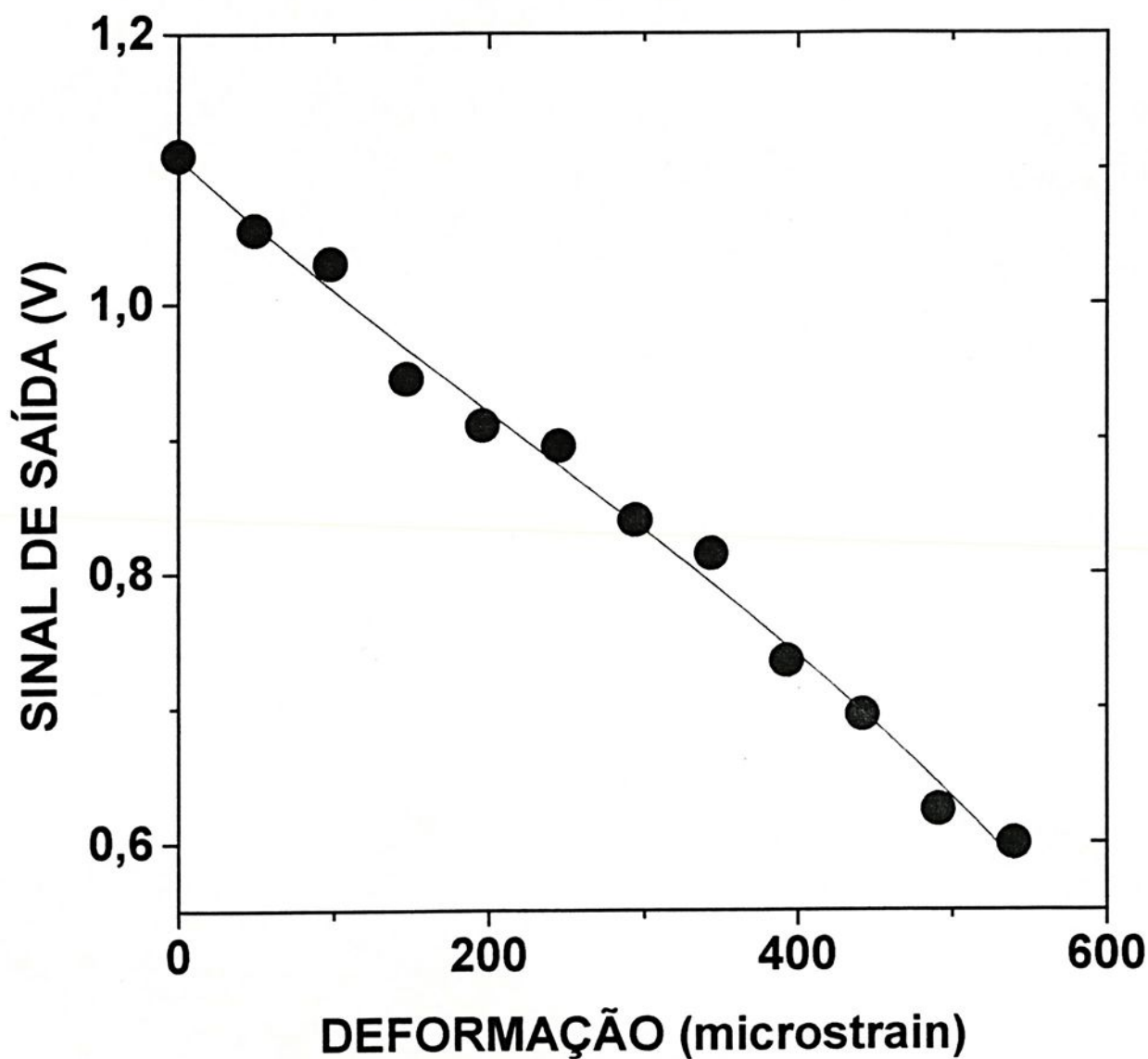


FIGURA 4.12 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora de 5 mm, em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 12).

A Figura 4.13 mostra, para cada ponto da curva, o valor médio e a faixa de variação do sinal em torno deste valor médio. A curva de ajuste é um polinômio de terceiro grau.

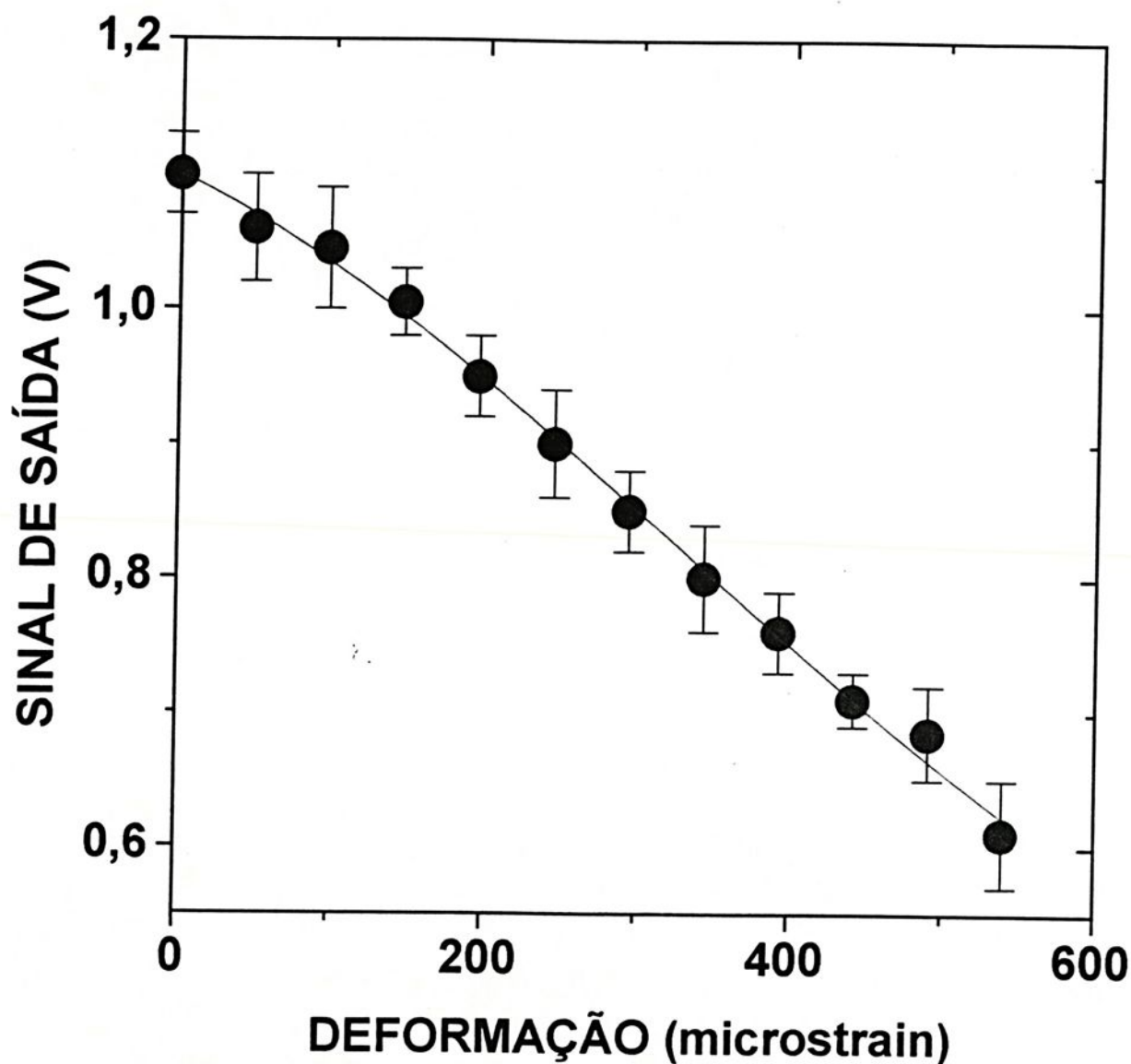


FIGURA 4.13 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora de 5 mm, em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 13).

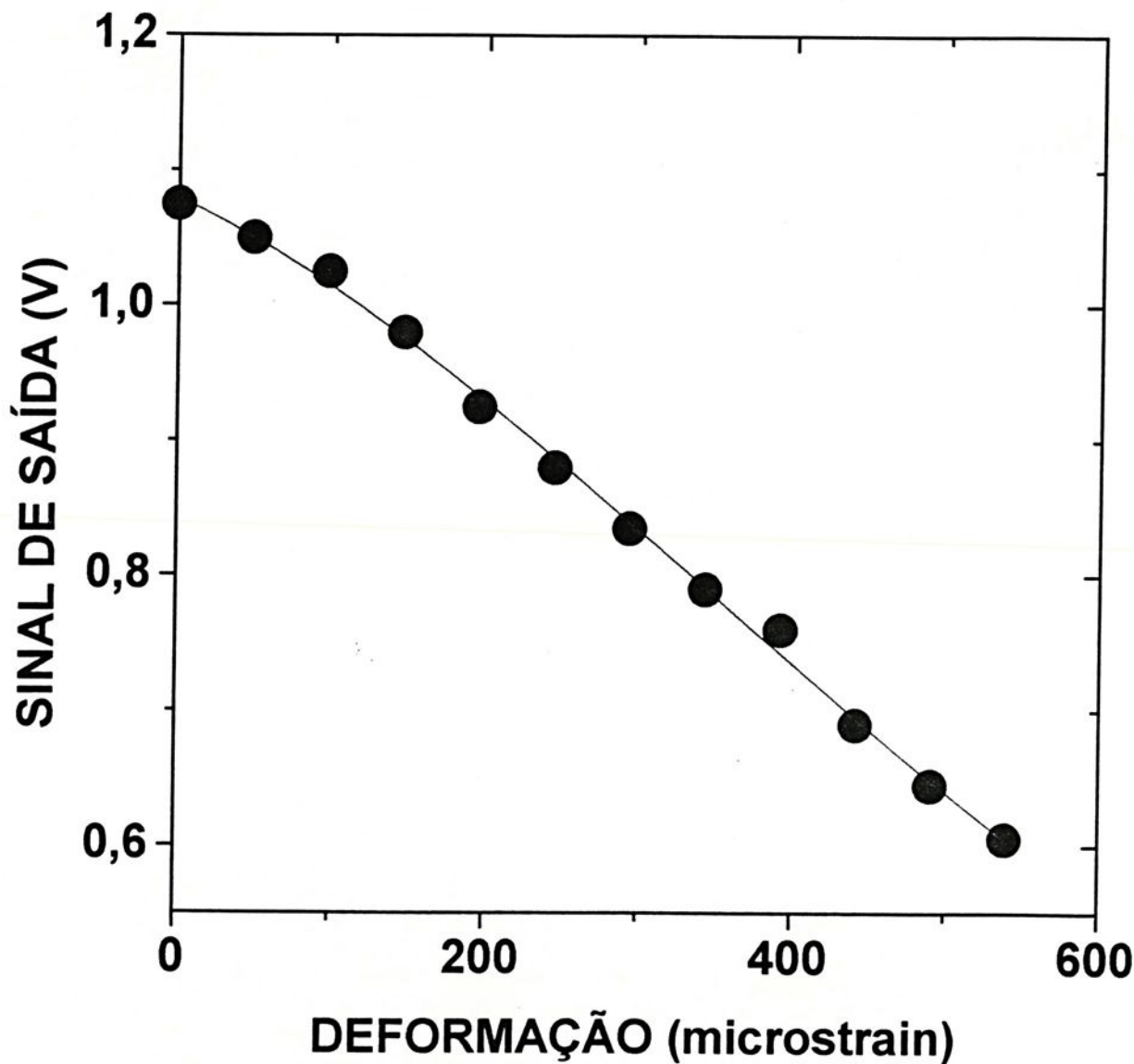


FIGURA 4.14 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora de 5 mm, em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 14).



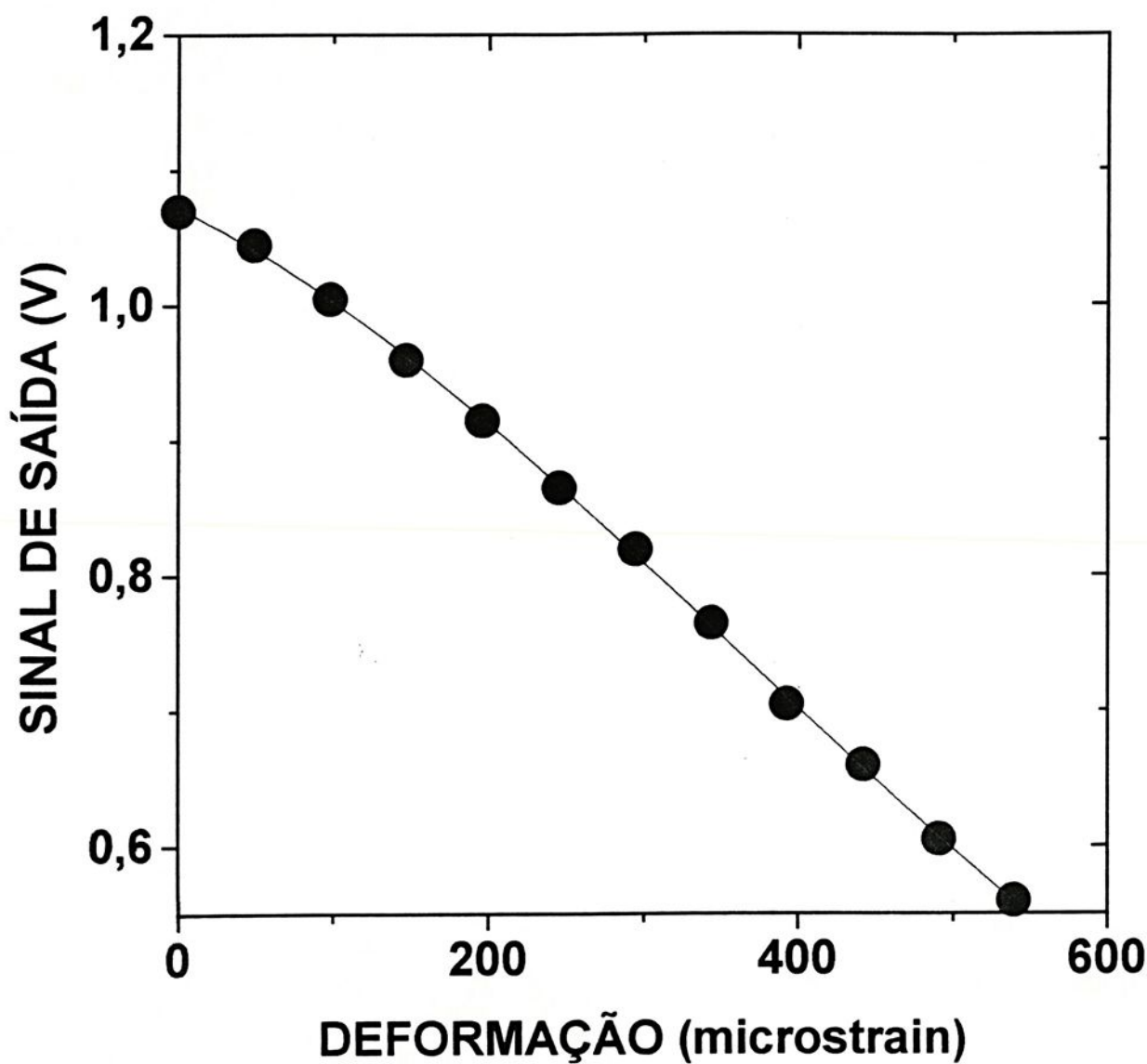


FIGURA 4.15 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora de 5 mm, em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem crescente de magnitude (Ensaio nº 15).

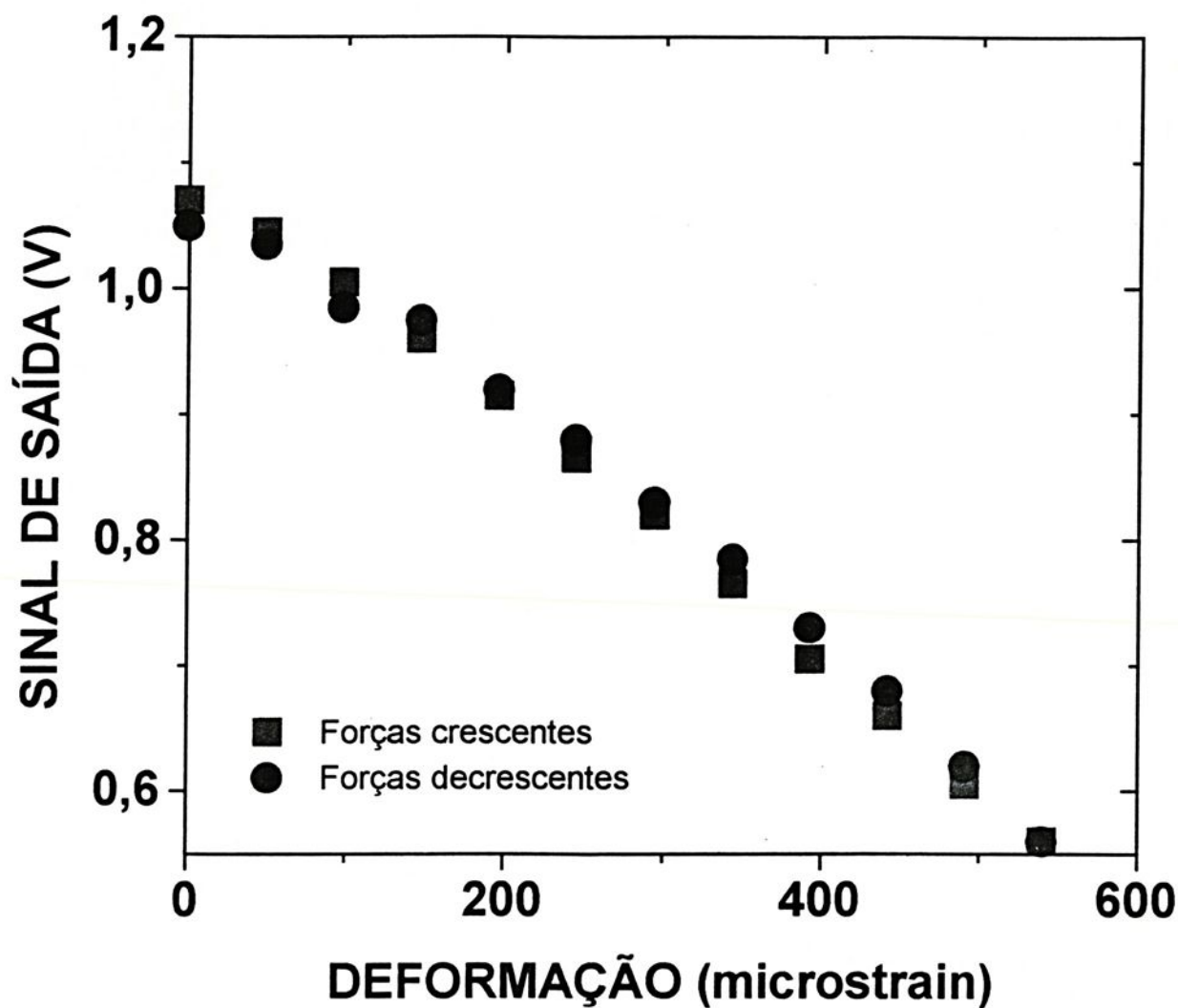


FIGURA 4.16 - Sinal produzido pelo sensor compensado, com região sensora de 5 mm, em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem crescente e decrescente de magnitude (Ensaio nº 16).

A Figura 4.17 mostra, em um mesmo gráfico, os resultados obtidos nos ensaios de números 12 a 16.

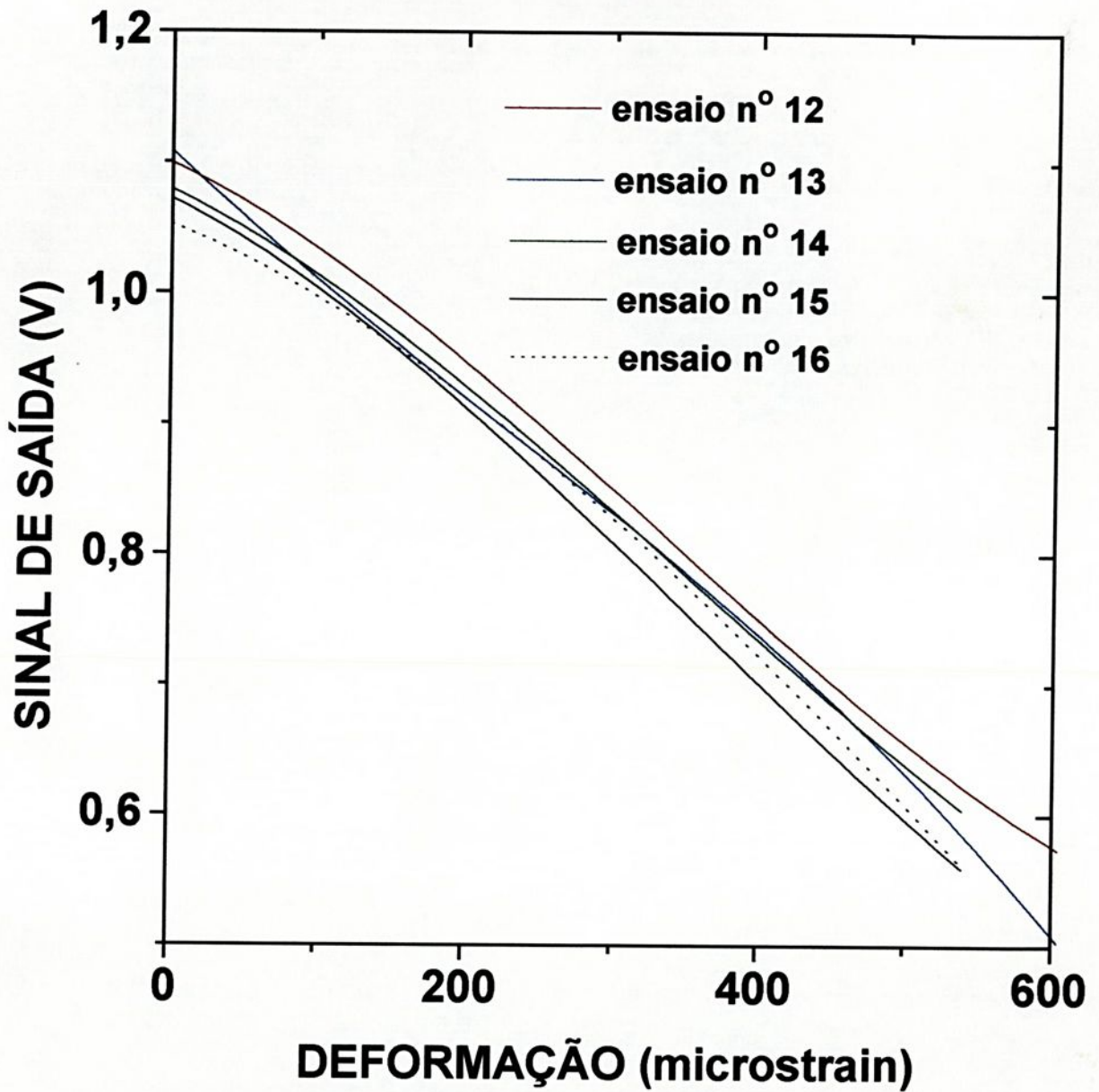


FIGURA 4.17 - Sinais produzidos pelo sensor compensado, com região sensora de 5 mm, em função da deformação, resultante de forças de compressão aplicadas no corpo de provas CP3, em ordem crescente e decrescente de magnitude (Ensaio n°s 12 a 16).

Pode-se constatar que este foi o sensor que apresentou os melhores resultados. Fica evidenciado o bom potencial dos sensores à fibra óptica polarimétricos compensados para medidas de deformações em estruturas, na faixa de 0 a 500 microstrains.

O sensor com comprimento de 5 mm apresentou sensibilidade de 0,98 mV/microstrain.



Capítulo 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 parâmetros estruturais na faixa de deformação de 0 a 500 $\mu\epsilon$ (faixa dinâmica de interesse para o concreto).

A opção em se trabalhar com a fibra inserida em tarugos de acrílico surgiu após discussões com especialistas em estruturas de concreto. Os experimentos iniciais realizados evidenciaram a impossibilidade de se trabalhar com a fibra diretamente em contacto com o concreto devido sua superfície ser lisa (não aderindo firmemente ao concreto), à heterogeneidades do concreto e às reações químicas que poderiam danificar a fibra.

Na realização dos experimentos preliminares, de tração, 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 repetitividade 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. Dessa forma as variações de modo comum da temperatura ou mudanças isotrópicas da pressão ambiente não afetam a polarização da luz nas secções de entrada e saída da fibra.



Utilizou-se, inicialmente, uma região sensora com comprimento de 10 mm, sendo a emenda realizada, de forma automatizada, com máquina específica para fibras que preservam a polarização da luz. As variações produzidas por parâmetros indesejáveis foram reduzidas, mas o sensor não trabalhou em sub-ciclo, o que é fundamental para determinar univocamente a força ou a deformação a partir do sinal elétrico produzido pelo sensor. Nessa etapa do trabalho ainda não se havia conseguido determinar os eixos próprios da fibra.

A implementação, a seguir, de novos sensores, com comprimentos das regiões sensoras de 5 mm e de 3 mm, possibilitou operação em semi-ciclo, na faixa de 0 a 500 $\mu\epsilon$. Foi muito importante determinar-se os eixos principais das fibras utilizando a técnica descrita na secção 3.3.3. 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.

Houve melhora significativa na repetitividade do sinal com os sensores compensados. Os melhores resultados foram do sensor com comprimento da região sensora de 5 mm. Neste, a precisão foi da ordem de 90%, nos cinco experimentos realizados.

Os resultados obtidos, mesmo com o sensor que apresentou as melhores respostas, 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) Certamente houve algum erro na determinação dos eixos próprios.

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 “strain gages”.



Sugestões para Trabalhos Futuros

- 1) Medidas de deformações em estruturas de concreto, inserindo-se, nestas, corpos de provas de acrílico, instrumentados com sensores à fibra óptica;
- 2) Implementação de um sensor de deformação que utilize uma secção de referência, igual à região sensora, para aprimorar a compensação de “fading”;
- 3) Implementação de um sistema com sensores à fibra óptica, miniaturizado, utilizando diodo laser e a configuração que emprega reflexão;
- 4) Implementação de um sistema que permita variação de sensibilidade, conforme a faixa de deformação de interesse, utilizando-se fibras ópticas com diferentes comprimentos de sua região região sensora.



Referências Bibliográficas

- [1] "Resistencia dos Materiais" - Versão SI - E.P.Popov, Prentice/Hall do Brasil, Segunda Edição, 1984, pp 507.
- [2] "Fiber Optic Networks", Green Jr., P.E., Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- [3] "Optical Fiber Sensor Technology", Giallorenzi, T.G. et alii., IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. QE-8, N^o 4, apr/1982, pp 626-665.
- [4] "Fiber-Optic Sensors Make Waves in Acoustic, Control, and Navigation", Dandridge, A., IEEE Circuits and Devices, vol. 6 N^o 6, nov 1990, pp 12-19.
- [5] "Development of Fiber Optic Sensing Systems" - A review, Kyuma, K., et alii, Optics and Lasers in Engineering, N^o 3, 1982, pp 155-182.
- [6] "Fiber-Optic Strain Sensors for Smart Structures", Turner, R.D. et alii., Journal of Intelligent Material System Structures, vol. 1, jan 1990, pp 26-49.
- [7] "Optical Fiber Sensors", Culshaw, B & Dakin, J., vols. 1 e 2, Artech House, London, 1988.
- [8] "Fiber Optic Sensor - An Introduction for Engineeres and Scientists", Udd, E., John Wiley, N.Y., 1991.



- [9] "Neural Processing - Type Fiber-Optic Strain Sensor", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, Bock, W.J. et alii., vol.41, N^o 6, dez 1992, pp 1062-1066.
- [10] "Method for Angular Alignment of Birrefringent Fibers in Fiber-Optic Pressure/Strain Measurement", Domanski, A. W., Wolinski, T.R., Bock, W.J., IEEE transaction on Instrumentation and Measurement, vol.41, N^o 6 dez 1992, pp 1050-1052.
- [11] "Sensor a Fibra Óptica para Medida de Deformações Estruturais", Silveira Jr., L., Silva, R.B., Zângaro, R.A. Anais do XVII Encontro de Física da Matéria Condensada, Caxambu, 1994, pp 9-14.
- [12] "Sensing with a LP₀₁-LP₀₂ Intermodal Interferometers, Eftimov", T.A & Bock, W.J., Journal of Lightwave Tecnology, vol. 11, N^o 12, dez 1993, pp 2150- 2156.
- [13] "Polarization Analysis of LP₀₁ and LP₁₁ Intermodal Interference in Highly Birrefringent Bow-Tie Optical Fiber", Eftimov, T.A. & Bock, W.J., Journal of Lightwave Technology, vol. 11, N^o 12, dez 1993, pp 1925-1936.
- [14] "Stable Phase-Modulated Fiber-Optic Sensors for Senior Electrical Engineering Laboratoty Curricula", Vengsarkar, A.M., IEEE Transaction on Education, vol. 35, N^o 1, fev 1992, pp 69-75.
- [15] "Fiber-Optic Strain-Gauge Manometer up to 100 MPa", Bock, W.J. et alii., IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. 41, N^o 1, fev 1992, pp 72-76.
- [16] "Optical Fiber Pressure Measurement", Murphy, M.M. & Jones, J.R., Measurements Scientific Tecnology, N^o 4, 1993, pp 258-262.



- [17] "A Low-Cost Fiber Optic Sensor", G.N.Bakalidis, E.Glavas, N.B.Voglis, and Ph.Tsalides, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 45, N^o 1, February 1996.
- [18] "Performance Analysis of Fiber-Optic Transducer for Measuring Low Pressures", W.J. Bock, W. Urbanczyk and A.Barwicz, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 45, N^o 2, April 1996.
- [19] Eugene Hecht, Optics Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, 1990, 676p.
- [20] "Sensor de Temperatura a Fibra Óptica de Alta Birrefringência", Leny Medeiros Silva, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Abril de 1995.
- [21] "Transmissão Digital e Fibras Ópticas", M.Sanchez - J.A. Corbelle - Mc Graw-Hill.
- [22] "Temperature-Compensated Fiber-Optic Strain Sensor Based on Polarization-Rotated Reflection", W.J.Bock and T.R.Wolinski, SPIE vol. 1370, Fiber Optic Smart Structures and Skins III - 1990, pp 189-196.
- [23] "High Pressure Polarimetric Sensor Using Birefringent Optical Fibers", W.J.Bock, IEEE - Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. 39 - February 1990.
- [24] "Development of a Polarimetric Optical Fiber Sensor for Electronic Measurement of High Pressure", W.J.Bock, IEEE - Transaction on Instrumentation and Measurement, vol.39 - October 1990.
- [25] "Compensated polarimetric sensor using polarisation-maintaining fibre in a differential configuration", J.P.Dakin, C.A.Wade , Electronics Letters, 5 thJanuary 1984 - Vol. 20, n^o 1.



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
AV. BRASIL, 56 - CAIXA POSTAL 31
15378-000 ILHA SOLTEIRA - SP

