



Universidade Federal do Pará  
Instituto de Tecnologia  
Faculdade de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Renato da Silva Maciel

**UTILIZAÇÃO DE SENSORES À BASE DE FIBRA ÓPTICA  
VISANDO O MONITORAMENTO DE GRANDES  
ESTRUTURAS NA ENGENHARIA CIVIL**

Belém  
2013

Renato da Silva Maciel

**UTILIZAÇÃO DE SENSORES À BASE DE FIBRA ÓPTICA  
VISANDO O MONITORAMENTO DE GRANDES  
ESTRUTURAS NA ENGENHARIA CIVIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Pará – UFPA como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, para obtenção do grau de MESTRE em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luis Augusto Conte Mendes Veloso.

Belém

2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

Maciel, Renato da Silva, 1984-

Utilização de sensores base de fibra óptica  
visando o monitoramento de grandes estruturas na  
engenharia civil / Renato da Silva Maciel. -  
2013.

Orientador: Luis Augusto Conte Mendes Veloso.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2013.

1. Engenharia civil - Sensoriamento remoto.
2. Fibras ópticas. I. Título.

CDD 23. ed. 624

---

**UTILIZAÇÃO DE SENSORES À BASE DE FIBRA ÓPTICA VISANDO O  
MONITORAMENTO DE GRANDES ESTRUTURAS NA ENGENHARIA  
CIVIL.**


**AUTOR:**

**RENATO DA SILVA MACIEL**

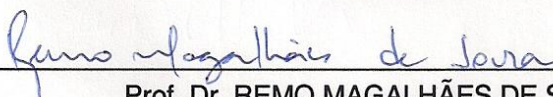
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA  
APROVADA PELO COLEGIADO DO CURSO DE  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ,  
COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE  
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA EM: 14/10/2013

**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. Dr. LUIS AUGUSTO CONTE MENDES VELOSO  
Orientador

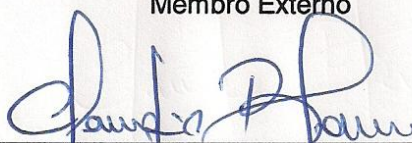


Prof. Dr. REMO MAGALHÃES DE SOUZA  
Membro Interno



Prof. Dr. MARCO JOSÉ DE SOUSA  
Membro Externo

**Visto:**



Prof. CLAUDIO JOSÉ CAVALCANTE BLANCO, Ph. D  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois um homem sem religião não possui um sentido de vida.

À minha mãe, Maria de Fátima, que por muito tempo se dedicou a ajudar no meu desempenho acadêmico, profissional e pessoal. Estando sempre presente nas horas mais difíceis de minha vida, colaborando com seu carinho e afeto.

Ao meu pai, Raimundo, por patrocinar por tanto tempo os meus estudos e por acreditar na minha vitória.

Aos meus tios e primos, que são tantos, ficando difícil citá-los, mas que tanto me alegraram nos momentos de tristeza, sempre me apoiando, e desejando sucesso na carreira que escolhi.

Às famílias, Nogueira e Milhomens, que me acolheram como um filho e sempre se colocaram à disposição.

À minha esposa, Francylla (Linda), por ser tão atenciosa e carinhosa, e dedicar seu tempo em me ajudar, fazendo a vida de dificuldades se transformar em uma mar de felicidades.

Ao meu Avô, Benedito, por me dar exemplo de caráter, trabalho, empenho e dedicação, valores que são fundamentais na vida de um homem.

À minha Avó, Maria Ivone (*in memoriam*), por tantos momentos felizes.

Ao orientador, Luis Veloso, mais que um professor, um verdadeiro amigo, acreditando no meu potencial e contribuindo com seus conhecimentos inestimáveis na pesquisa.

Ao corpo docente do curso de Mestrado em Engenharia Civil da UFPA, por colaborarem com seus conhecimentos e se dedicarem para a formação dos alunos.

Aos amigos, que tanto colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

## SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	3
LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE TABELAS.....	9
RESUMO.....	10
ABSTRACT .....	11
1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. O Estado-da-Arte no Monitoramento da Integridade de Estruturas Civas .....	14
1.2. Monitoramento de Obras de Arte Especiais.....	16
1.3. Organização do Trabalho .....	21
2. SENSORES ÓPTICOS.....	23
2.1. Fibra Óptica.....	23
2.2. Componentes Passivos .....	27
2.3. Componentes Ativos.....	30
2.4. Tecnologia de Mensuração.....	30
2.4.1. Sensores Pontuais .....	32
2.4.2. Sensores Indicadores Longos .....	39
2.4.3. Sensores Distribuídos (Raman e Brillouin) .....	40
2.5. Algumas Aplicações dos Sensores Ópticos na Engenharia Civil .....	43
2.5.1. Ensaio em laboratórios e testes em campo.....	44
2.5.2. Barragens.....	48
2.5.3. Pontes .....	50
2.5.4. Túneis.....	53
3. PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA ELÉTRICA.....	58
3.1. Princípios Gerais .....	58
3.2. Princípios do Circuito de Medição.....	59
3.3. Ordenação dos Extensômetros em Rosetas.....	60
3.4. Extensômetro Elétrico x Extensômetro Óptico.....	62
4. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL.....	67
4.1. Ensaio em Laboratório .....	67
4.1.1. Ensaio de tração em barras de aço .....	67
4.1.2. Ensaio no modelo do medidor triortogonal de junta .....	68
4.1.3. Ensaio de Compressão de Corpos de Prova de Concreto .....	70
4.2. Materiais e Métodos .....	71
4.3. Resultados Obtidos .....	72
4.3.1. Ensaio de tração das barras de aço .....	72

4.3.2. Ensaio com o modelo do medidor triortogonal de junta .....	76
4.3.3. Ensaio dos Corpos de Prova de Concreto .....	80
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	91
6. REFERÊNCIAS .....	93
ANEXO A.....	98
ANEXO B.....	106
ANEXO C .....	110

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1–Comparação do monitoramento de Estrutura com diagnóstico de paciente (GLIŠIĆ E INAUDI, 2007). .....	15
Figura 1.2 - Comparação dos transdutores lineares de deslocamento.....	16
Figura 1.3 - Leitura do deslocamento do pêndulo feita por meio do coordenômetro. ....	18
Figura 1.4 - Estágio e Andamento das Usinas Hidrelétricas do PAC (PAC, 2010). .....	19
Figura 2.1 - Estrutura de uma fibra óptica.....	23
Figura 2.2 - Ilustração da Lei de Snell.....	24
Figura 2.3 - Reflexão interna total. ....	24
Figura 2.4 - Ilustração da abertura numérica (CRISP, 2001).....	25
Figura 2.5 - Classificação das fibras ópticas (adaptado de CRISP, 2001).....	26
Figura 2.6 - Conector mecânico de fibra óptica (a) explodido e (b) fechado.....	27
Figura 2.7 - Tipos de conectores em fibra óptica. ....	28
Figura 2.8 - Ferrolho do conector de fibra óptica.....	28
Figura 2.9 - Máquina de fusão de fibra óptica. ....	29
Figura 2.10 - Classificação das tecnologias de mensuração dos sensores ópticos (adaptado de GLIŠIĆ e INAUDI, 2007). .....	31
Figura 2.11 - Ilustração de múltiplas reflexões dentro de um plano de espelhos do interferômetro Fabry-Perot, ou ressonador (MEASURES, 2001, p. 108).....	33
Figura 2.12 - Interferômetro Fabry-Perot (FISO apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007, p. 25). ....	33
Figura 2.13 - Demodulador para interferômetros Fabry-Perot para simples e múltiplos canais (ROCTEST apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).....	34
Figura 2.14 - Ilustração do esquema de funcionamento das fibras de rede Bragg(adaptado de GLIŠIĆ e INAUDI, 2007). .....	35
Figura 2.15 - Configuração de um sistema do sensor interferômetro SOFO (SMARTEC apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007). .....	39
Figura 2.16 - Unidade de medição portátil do sistema SOFO (SMARTEC apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007). ....	40
Figura 2.17 - Componentes ópticos de espalhamento em fibras (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007). ....	41
Figura 2.18 - (a) Detecção de percolação e (b) Monitoramento de temperatura em barragem de concreto (AUFLEGER et al., 2005 apud MOSER, 2006).....	43
Figura 2.19 - Modelo estrutural do pilar de uma ponte de concreto armado (ANSARI, 2005). .....	44
Figura 2.20 - Histórico das deformações ao longo do tempo (ANSARI, 2005). ....	45
Figura 2.21 - Topologia dos sensores e os resultados obtidos com o teste de carga (GLIŠIĆ e INAUDI, 2008). ....	46
Figura 2.22 - Deformadas da estaca e localização da falha (GLIŠIĆ e INAUDI, 2008). ....	46



Figura 2.23 - Instrumentação das barras suplementares (esquerda) e esquema de instalação dos extensômetros nas amostras (direita) (BAGCHI et al, 2009).	47
Figura 2.24 - Comparação dos extensômetros FBG, SG1 e SG2 nas amostras 1 (a) e 2 (b) (BAGCHI et al, 2009).	48
Figura 2.25 - Medições de deslocamentos realizados com os extens. ópticos e extens. haste, bem como a diferença entre eles e o nível d'água da barragem (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).	49
Figura 2.26 - Face de concreto da Barragem de Enrocamento Gudongkou e o sistema de monitoramento em fibra óptica para fissuras e fendas (ANSARI, 2005).	49
Figura 2.27 - Ponte da Trilha de Beddington (MEASURES, 2001).	50
Figura 2.28 - Alívio de deformação termicamente corrigido para o aço (SS), Compósito de Fibra de Carbono (TR) e Leadline (LL) (MEASURES, 2001).	51
Figura 2.29 - Variação temporal de deformação presentes na Figura 32 (MEASURES, 2001)	51
Figura 2.30 - Comparação das deflexões do teste de carga (ANSARI, 2005).	52
Figura 2.31 - Deflexões verticais para a Unidade 2IB, no período 1995-2003 (ANSARI, 2005).	53
Figura 2.32 - Exemplo de uma rede de sensores para o monitoramento da deformação de túnel (sem controle de tensão de cisalhamento) (SMARTEC apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).	54
Figura 2.33 - Representação esquemática das redes de sensores para monitorar a convergência de novos túneis usando apenas topologias paralelas (à esquerda) eo uso combinado topologias paralelas e extensômetros multiponto (direita) (SMARTEC apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).	54
Figura 2.34 - Mudança periódica na convergência dos sensores do túnel (ANSARI, 2005, pág. 191).	55
Figura 2.35 - Planta da Estação Metroviária Alto do Ipiranga, na cota da laje de fundo. A região delimitada pela circunferência vermelha corresponde à área monitorada (ASSIS, TRAUTWEIN e BITTENCOURT, 2008).	56
Figura 2.36 - (a) Instalação do sensor poro-pressão, (b) instalação do extensômetro na armadura e (c) instalação de extensômetro imerso (ASSIS, TRAUTWEIN e BITTENCOURT, 2008).	57
Figura 2.37 - Evolução da pressão na laje de fundo durante a monitoração (ASSIS, TRAUTWEIN e BITTENCOURT, 2008).	57
Figura 3.1 – Ponte de Wheatstone (PORTELA e SILVA, 1996).	59
Figura 3.2 - Esquemas de circuitos da Ponte de Wheatstone (PORTELA e SILVA, 1996).	60
Figura 3.3 - (a) Roseta equidistante 120°, (b) Roseta sobreposta 120°, (c) Roseta equidistante 45° e 90°, (d) Roseta sobreposta 45° e 90°.	61

Figura 3.4 - Rosetas: (a) retangular ou estrela e (b) triangular ou equiangular (PORTELA e SILVA, 1996). .....	61
Figura 3.5 - Rosetas: (a) leque, (b) em "T" e (c) em "T"-Delta (PORTELA e SILVA, 1996). .	62
Figura 3.6 - Rosetas tridimensionais (PORTELA e SILVA, 1996). .....	62
Figura 3.7 - Comparação dos fatores de calibragem entre os extensômetros elétrico e óptico (adaptado de MEASURES, 2001).....	64
Figura 3.8 - Correção da leitura do sensor óptico elementos fletidos de pequena espessura. ....	65
Figura 3.9 - Comparação do sinal de saída de temperaturas do ext. óptico e ext. elétrico. Ext. óptico em diferentes condições de instalação. (KLECKERS e GÜNTHER, 2007).....	65
Figura 4.1 - Disposição dos sensores na barra de aço. ....	67
Figura 4.2 - Câmera Termográfica. ....	68
Figura 4.3–(a) Modelo do medidor triortogonal de junta e (b) ampliação do dispositivo de simulação dos deslocamentos. ....	69
Figura 4.4 - Esquema de instalação de extensômetros no medidor triortogonal de junta. ....	69
Figura 4.5 - Modelo teórico aplicado no medidor triortogonal de junta para medir o deslocamento. ....	70
Figura 4.6 - (a) ADS e (b) Braggmeter Benchtop. ....	71
Figura 4.7 - Processo de fusão de fibra óptica: (a) clivagem, (b) eletrodo de fusão e (c) aparelho de fusão. ....	72
Figura 4.8 - Revestimento metálico do cabo da fibra óptica. ....	72
Figura 4.9 - Inspeção da fibra óptica pelo aparelho OTDR e Power Meter.....	73
Figura 4.10 - Ensaio de tração das barras de aço: (a) sistemas de aquisições e (b) barra instrumentada. ....	73
Figura 4.11 - Imagem da câmera termográfica das barras: (a) BA-01, (b) BA-02 e (c) BA-03. ....	74
Figura 4.12 - Curvas de deformação: (a) BA-01, (b) BA-02 e (c) BA-03.....	74
Figura 4.13 - Curvas de deformação dos valores médios: (a) BA-01, (b) BA-02 e (c) BA-03. ....	75
Figura 4.14 - Ensaio com o modelo de medidor triortogonal de junta instrumentado: aparato experimental (a), sistema de aquisição elétrico ADS-2000 (b) e sistema de aquisição óptico Braggmeter Industrial (c). ....	77
Figura 4.15 - Chapa flexível do modelo de medidor triortogonal de junta. ....	77
Figura 4.16 - Deformações medidas pelos extensômetros: (a) Direção 1, (b) Direção 2 e (c) Direção 3. ....	78
Figura 4.17 - Modelo analítico adotado para as chapas flexíveis. ....	79
Figura 4.18 - Comparação dos deslocamentos sofridos pelo medidor de junta: (a) Direção1 e (b) Direção2.....	80

Figura 4.19 - Corpo de prova cilíndrico instrumentado.....	81
Figura 4.20 - Ensaio de módulo de elasticidade do CP T1.....	82
Figura 4.21 - Ensaio de módulo de elasticidade do CP T2.....	83
Figura 4.22 - Ensaio de módulo de elasticidade do CP T3.....	84
Figura 4.23 - Ensaio de módulo de elasticidade do CP T1 - sinal com salto. ....	85
Figura 4.24 – Demonstração do erro de leitura do <i>threshold</i> .....	85
Figura 4.25 – Fluxograma da Rotina gerada no MathCad para reduzir as leituras do sistema elétrico e sistema EMIC. ....	86
Figura 4.26 - Gráficos de deformação-tempo. (a, c, e) leituras em atraso e (b, d, f) as leituras corrigidas. ....	87
Figura 4.27 - Diagramas de tensão-deformação: (a) CP-T1, (b) CP-T2 e (c) CP-T3.....	88
Figura 4.28 - Gráfico deformação-tempo dos extensômetros instalados no corpo de prova T3. (a) ext. elétrico e (b) ext. óptico.....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Parâmetros frequentemente monitorados (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007)....	16
Tabela 2.1 - Tipos de sensores ópticos encontrados no mercado (Fonte: FIBERSENSING, 2010). .....	29
Tabela 2.2 - Comparação das tecnologias de medição de sensores ópticos (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007) .....	32
Tabela 2.4 - Comparação do procedimento de instalação dos extensômetros elétricos com os ópticos. ....	66
Tabela 4.1 - Diferenças percentuais entre os resultados dos extensômetros. ....	76
Tabela 4.2 - Diferenças percentuais entre os resultados dos extensômetros. ....	78
Tabela 4.3 - Erro máximo percentual dos deslocamentos medidos diretamente pelo transdutor de deslocamento e os calculados a partir das deformações dos extensômetros.....	80
Tabela 4.4 - Valores dos módulos de elasticidade obtidos. ....	89
Tabela 4.5 - Tabela dos erros calculados dos sistemas óptico e elétrico.....	90

## RESUMO

MACIEL, Renato. **UTILIZAÇÃO DE SENSORES À BASE DE FIBRA ÓPTICA VISANDO O MONITORAMENTO DE GRANDES ESTRUTURAS NA ENGENHARIA CIVIL**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

As fibras ópticas são utilizadas em diferentes áreas e nas mais variadas aplicações. Na Engenharia Civil começaram a ser utilizadas no monitoramento de estruturas como alternativa de substituição dos tradicionais sensores elétricos. Este trabalho tem como objetivo estudar a aplicação e viabilidade dos sensores a base de fibra óptica no monitoramento de grandes estruturas da engenharia civil. Para avaliação dos resultados, foram realizados três diferentes tipos de testes experimentais onde corpos-de-prova foram instrumentados com extensômetros elétricos e ópticos. O primeiro tipo de teste correspondeu a ensaios de tração simples em barras de aço com carregamento monotônico até o rompimento de barras de aço. No segundo tipo de teste foi estudada a automação de um medidor triortogonal de junta que é um instrumento tipicamente utilizado para a instrumentação de barragens de concreto. Finalmente o último tipo de testes foi constituído por ensaios de cilindros de concreto à compressão para a determinação do módulo de elasticidade. Com relação à utilização dos sensores ópticos, durante a realização dos testes surgiram muitos problemas relacionados com a unidade óptica de aquisição de dados sendo necessária a utilização de três diferentes modelos de unidade de aquisição para a conclusão dos testes. No que se refere à exatidão dos resultados, observou-se que os resultados apresentados pelos sensores ópticos foram compatíveis com os resultados dos sensores elétricos. Entretanto, quando os sensores ópticos foram solicitados por grandes deformações implicaram em perda de sinal devido à interrupção do fluxo de luz, inabilitando o sensor para leituras.

Palavras-chave: Sensores Ópticos. Rede Bragg. Monitoramento de Estruturas.

## ABSTRACT

MACIEL, Renato. **USE OF OPTIC FIBER SENSORS AIMING MONITORING OF LARGE CIVIL ENGINEERING STRUCTURES**. 2013. 113 f. Dissertation (Master Degree) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

Optical fibers are used in different areas and in many applications. In Civil Engineering, they have been used for the structural monitoring as an alternative to traditional electrical sensors. This work aims to study the feasibility and application of sensors based on optic fibers to monitor large civil engineering structures. Three different types of experimental tests were carried out to evaluate the results where specimens were instrumented with electrical and optical strain gages. The first type of tests was simple tensile tests where steel bars were submitted to monotonic loading until collapse. In the second type of test, the automation of a triorthogonal joint gage, that is a typical instrument used for monitoring concrete dams. Finally, was studied the last type of tests was compression tests carried out with cylindrical concrete specimens for determining Young modulus. Regarding the use of optical sensors, there were many problems with the optical data acquisition system; so three different data acquisition units were used to carry on the tests. Concerning the accuracy of the results, it was observed that the results obtained with optical sensors were similar to the electrical sensors results. However, when the optical sensors were submitted to large deformations, signal loss occurred due to the interruption of the light flow.

Keywords: Fiber Optic Sensors. Bragg Grating. Monitoring of Structure.

## 1. INTRODUÇÃO

As fibras ópticas surgiram durante a década de 1970, sendo sua aplicação e estudos direcionados primordialmente para a área de comunicação. Posteriormente, iniciaram-se pesquisas direcionando o uso de fibras ópticas em sensores capazes de medir parâmetros físicos, de onde surgiram os sensores à base de fibras ópticas (SOARES, 1989).

As fibras ópticas possuem notáveis características, consideradas como vantagens para a área de monitoramento. Dentre essas características estão a imunidade à interferências eletromagnéticas, dimensões reduzidas, matéria-prima abundante, grande capacidade de transporte de informação e baixa atenuação. A atenuação é um fator que determina as distâncias entre os sensores e as unidades de aquisição. Quanto maior a distância maior é a perda de sinal, e as fibras ópticas podem vencer grandes distâncias devido a sua baixa atenuação.

O presente trabalho visa o estudo da aplicação e viabilidade de sensores à base de fibra óptica no monitoramento de grandes estruturas da engenharia civil no Brasil. Algo interessante a investigar é o comportamento dessa tecnologia inovadora de sensoriamento por sensores ópticos utilizadas na área de instrumentação de grandes estruturas.

Sabe-se que o questionamento sobre a comparação entre os sensores ópticos e elétricos é inevitável para quem trabalha com pesquisas que utilizam a instrumentação como técnica de resolução de problemas. Para este trabalho, não seria diferente a intrigante questão: quais as diferenças dos resultados apresentados entre os sensores ópticos e sensores elétricos? E quais os benefícios proporcionados pelos sensores ópticos?

Uma das dificuldades encontradas neste trabalho são as pouquíssimas publicações de pesquisas relacionadas às aplicações dos sensores ópticos no monitoramento de estruturas no Brasil, o que inviabiliza o conhecimento da tecnologia por profissionais da área, tornando por comodidade e baixo custo a utilização massificante dos tradicionais sensores elétricos resistivos.

O trabalho teve início com a aquisição de sensores ópticos e a unidade de aquisição (interrogador) *Braggmeter* fabricada pela empresa *Fibersensig* através de um Projeto financiado pelo FINEP. No entanto, desde o início do projeto o sistema

não teve bom funcionamento, atrapalhando o início, meio e fim da pesquisa. No Anexo A do trabalho apresenta-se o relatório de avaliação de desempenho do Braggmeter realizado por pesquisadores do LEA-UFPA – Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado da UFPA atestando problemas de funcionamento na unidade óptica de aquisição de dados. Outras duas unidades de aquisição de dados foram utilizadas no desenvolvimento da pesquisa, mediante o empréstimo da empresa de assistência técnica *LUPATECH*, e que também apresentaram algum tipo de defeito, totalizando três diferentes unidades ópticas para a conclusão dos ensaios em laboratório. No início do planejamento da pesquisa, cogitou-se a ideia de utilizar os sensores ópticos em estruturas reduzidas em laboratório, além de aplicar no monitoramento de estruturas reais, mas as dificuldades apresentadas pelo sistema de aquisição limitou os objetivos da pesquisa, de modo que o estudo deteve-se em ensaios laboratoriais.

Outra dificuldade é o elevado custo de aquisição de todos os componentes necessários para se realizar as investigações por meio dessa tecnologia. Porém, há uma tendência de que com o desenvolvimento tecnológico, essa diferença de custo diminua. Além disso, a instrumentação de estruturas com sensores à base de fibra óptica passa a ser uma alternativa economicamente viável na medida em que são aumentadas suas quantidades. Isso porque devido à multiplexação<sup>1</sup> podem ser utilizados até vinte sensores em apenas um cabo de fibra óptica, instalados em série, diminuindo a quantidade de cabos e também do número de canais do sistema de aquisição de dados.

Dentre as tecnologias de sensores ópticos utilizados pelo mundo, uma ganha notoriedade por sua facilidade de manuseio e operação, seu pequeno porte e características intrínsecas. Esta tecnologia chama-se Rede Bragg.

Dessa forma, o objetivo geral da pesquisa baseia-se em testar a aplicação dos sensores ópticos de rede Bragg visando o monitoramento de grandes estruturas na engenharia civil, por meio de ensaios em laboratório.

Para que a pesquisa alcançasse seu objetivo principal foram necessários: a) realizar ensaios em laboratório utilizando sensores a base de fibra óptica de Rede

---

<sup>1</sup> Multiplexação é o processo de transmissão de diferentes informações através de um único meio de transmissão, ou seja, uma única fibra óptica.



Bragg e sensores elétricos; b) analisar e comparar os resultados obtidos em laboratórios com os extensômetros ópticos e elétricos.

Para entender mais sobre a essência desta pesquisa proposta, faz-se necessário a introdução de alguns conhecimentos acerca das peculiaridades do monitoramento das estruturas na engenharia civil.

### **1.1. O Estado-da-Arte no Monitoramento da Integridade de Estruturas Civis**

A necessidade de se monitorar estruturas civis na Engenharia surgiu com o avanço das novas técnicas construtivas, com a utilização das quais se ousa conceber verdadeiras “obras de arte”, vencendo grandes vãos, concretando volumosos blocos, construindo imensos arranha-céus, etc. Logicamente, o monitoramento de uma estrutura depende de sua complexidade e necessidade, como por exemplo, o monitoramento da “saúde estrutural” de uma Barragem. Uma obra como esta deve ser monitorada quase que diariamente, pois existem vários fatores que exigem essa dedicação, como a garantia do fornecimento contínuo de energia, a estabilidade da economia de um país, a segurança de moradores à jusante, dentre outros.

O monitoramento da integridade de uma estrutura civil pode ser comparado ao processo de diagnóstico de um paciente por um médico. Quando o paciente percebe que algo em seu organismo não está em bom funcionamento, este procura um médico para diagnosticar qual o problema e lhe propor uma medicação para curá-lo, da mesma forma acontece com o monitoramento de uma estrutura civil, como apresentado na figura 1.1 (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

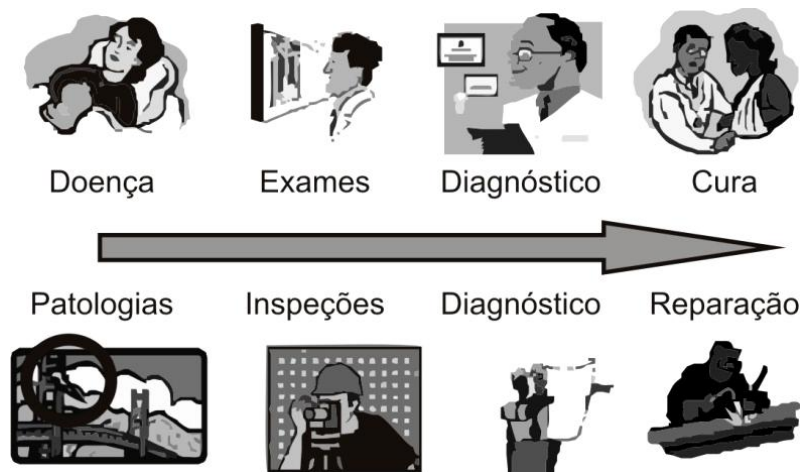


Figura 1.1–Comparação do monitoramento de Estrutura com diagnóstico de paciente (GLIŠIĆ E INAUDI, 2007).

Conforme o esquema apresentado na figura 1.1, seguindo as premissas de Glišić e Inaudi (2007), define-se as seguintes ações para o monitoramento:

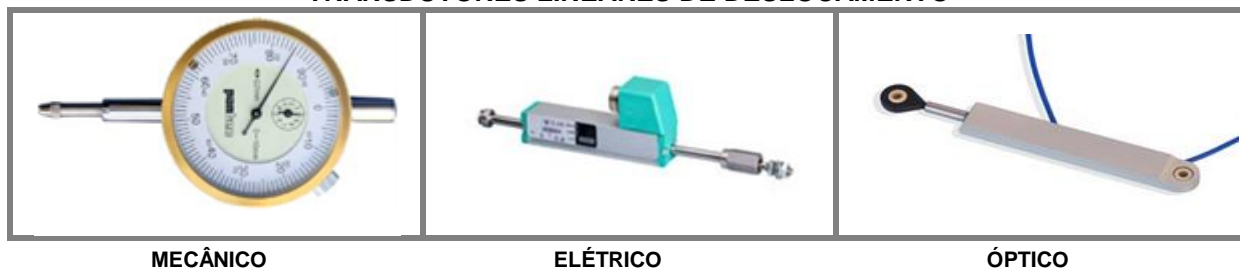
- 1) detectar a avaria na estrutura (por exemplo, ocorrência de fissuras,...);
- 2) registrar o momento da ocorrência do problema (por exemplo, 02 de setembro de 2010 às 14h30min...);
- 3) indicar a posição física do problema (por exemplo, o feixe externo, 5 m do pilar...);
- 4) quantificar o problema (por exemplo, abriu 1,5 mm,...);
- 5) executar as ações (por exemplo, corrigir o problema com epóxi...).

Segundo Glišić e Inaudi (2007), monitorar não é apenas fazer um diagnóstico e propor uma cura, mas sim realizar uma inspeção detalhada com análises relacionadas, para posteriormente, de posse dos dados do monitoramento e auxílio de algoritmos pré-definidos, detectar comportamentos incomuns de uma estrutura, para prevenir possíveis danos ou patologias.

O monitoramento, geralmente, se resume em mensurar parâmetros mecânicos, físicos ou químicos, como os apresentados na tabela 1.1, frequentemente monitorados em estudos e pesquisas de estruturas, sendo sua escolha condicionada a diversos fatores como: tipo e finalidade da estrutura, as cargas atuantes, o ambiente em que a estrutura está inserida, o material utilizado, para futuramente serem analisados (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007). Para tanto, faz-se necessário a utilização de instrumentos ou um conjunto de instrumentos, podendo ser mecânicos, elétricos ou ópticos (figura 1.2). Os primeiros instrumentos de medição foram os mecânicos; posteriormente, no campo da engenharia, se

massificou a utilização de instrumentos elétricos, que utilizam a variação de resistência elétrica para mensurar uma determinada grandeza. A partir de 1990 começou-se a utilizar sensores ópticos para o uso na instrumentação.

#### TRANSDUTORES LINEARES DE DESLOCAMENTO



MECÂNICO

ELÉTRICO

ÓPTICO

Figura 1.2 - Comparação dos transdutores lineares de deslocamento.  
(Fonte: DRKATECFERRAMENTAS, 2010; GEFRAN, 2010 e HELLOTRADE, 2011)

Tabela 1.1 - Parâmetros frequentemente monitorados (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

<b>MECÂNICOS</b>	Tensão, deformação, deslocamento, abertura de fissuras e trincas, fadiga, carregamento
<b>FÍSICOS</b>	Temperatura, umidade, pressão de poros
<b>QUÍMICOS</b>	Penetração de cloretos, sulfato, o pH, carbonatação, a oxidação do aço, a deterioração da madeira

Algumas das estruturas da engenharia civil que comumente são investigadas por pesquisadores e instituições de tecnologia são conhecidas por obras de arte especiais.

## 1.2. Monitoramento de Obras de Arte Especiais

Por definição, as obras de arte especiais são todas as obras que fogem da engenharia convencional, como pontes, viadutos, túneis, barragens, eclusas, diques, muros de contenções.

### a) Barragens

As grandes barragens são construções que normalmente requerem uma enorme quantidade de recursos financeiros, materiais e humanos para a sua construção. Historicamente, esses tipos de construções sempre desempenharam um papel primordial para a sociedade gerando energia elétrica, armazenando água para a agricultura e permitindo a implantação de grandes obras hidráulicas.

O estudo sobre segurança de barragens surgiu nos Estados Unidos por volta da década de 1950 (CENTRO DA MEMÓRIA DA ELETRICIDADE NO BRASIL, 1998), com o programa de segurança de barragens do *Bureau of Reclamation*, que

após a revisão do *National Research Council's Report*, instituiu as recomendações acerca do assunto, dentre elas:

- Instalar instrumentação de campo, se necessária, para monitorar o comportamento estrutural das barragens e assessorar as avaliações de segurança.
- Dar prioridade mais elevada ao Programa de Vistoria das Estruturas Existentes, principalmente na avaliação de barragens em locais de alto risco.

Nesse sentido, se enquadra a auscultação de barragens, que é um procedimento desenvolvido por meio de pessoal qualificado por meio de inspeções visuais e pela monitoração do comportamento de barragens. Esse procedimento tem como objetivo verificar as condições de segurança dessas construções.

As barragens de concreto, um dos componentes de uma usina hidrelétrica, podem ser de diversos tipos: de gravidade, laje e contrafortes, arcos múltiplos ou arcos simples. Independentemente do tipo de barragem, todas estão sujeitas às mesmas considerações básicas com respeito à segurança. Dentro desta segurança está inserido o monitoramento da estrutura, em que a tecnologia dos sensores ópticos vem a ser mais uma opção.

No caso da Barragem UHE Tucuruí/PA, esta possui vários instrumentos instalados para a verificação de suas condições de segurança. Entretanto, a leitura desses instrumentos é feita manualmente pelos técnicos da equipe de auscultação, estando sempre sujeitos ao erro humano, além do tempo decorrido para a leitura de cada um dos instrumentos, conforme figura 1.3.



Figura 1.3 - Leitura do deslocamento do pêndulo feita por meio do coordenômetro<sup>2</sup>.

No Brasil, o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) está financiando muitos empreendimentos em diversas áreas, dentre elas, o de geração de energia elétrica, visando fortalecer o setor energético brasileiro, alcançando os objetivos do Programa “Luz para Todos”. No Pará, inclui-se neste programa a construção das eclusas de Tucuruí, visando melhorar a navegabilidade do rio Tocantins, e a Hidrelétrica de Belo Monte, ampliando a geração de energia elétrica no país (PAC, 2012).

Segundo o PAC (2012), em seu 5º Balanço sobre Infraestrutura energética até o final de 2012, estão concluídas e em operação, as usinas hidrelétricas de Estreito (TO/MA), Santo Antônio (RO), Rondon II (RO), Dardanelos (MT), Passo São João (RS) e São José (RS), e mais 11 obras de usinas hidrelétricas em andamento, e as demais em processo de licitação, como mostra a figura 1.4.

---

<sup>2</sup>Coordenômetro é um equipamento ótico que fornece leituras em duas direções ortogonais, sendo uma paralela ao eixo da barragem e outra normal ao eixo (MATOS, 2002).

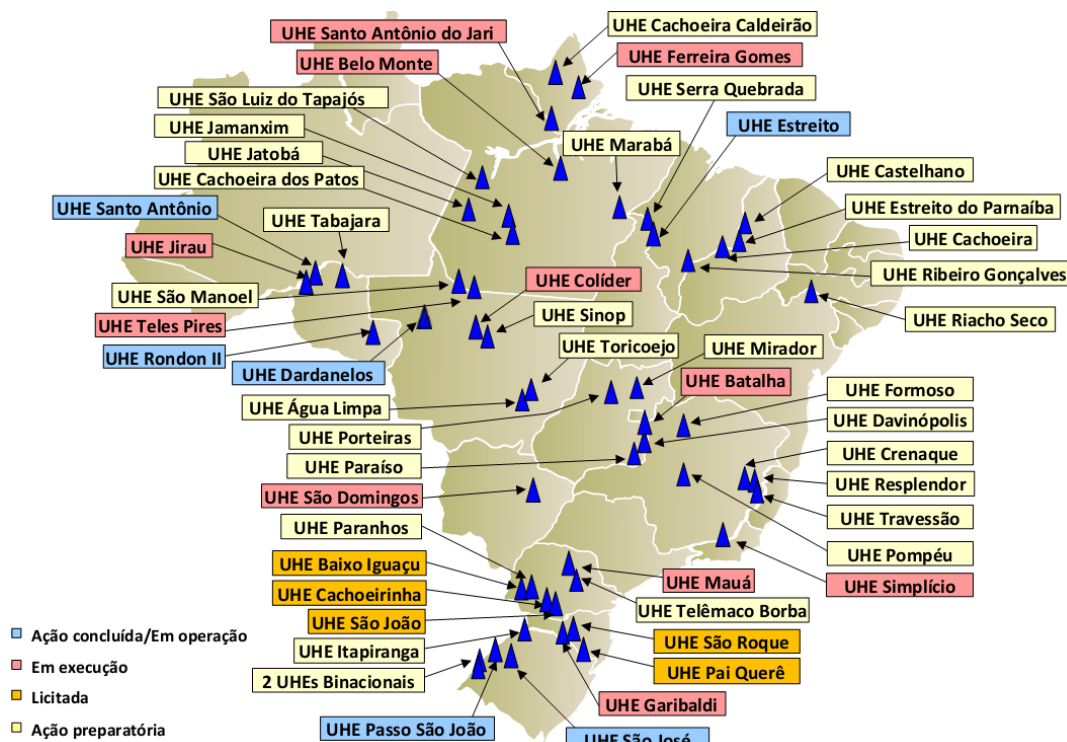


Figura 1.4 - Estágio e Andamento das Usinas Hidrelétricas do PAC (PAC, 2012).

Em 2010, no Brasil, foi criada a lei nº 12.334 que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, além de criar o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Dentre os objetivos da lei estão:

Art. 3º São objetivos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB):

[...]

III - **promover o monitoramento** e o acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens;

IV - criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança;

[...]

(BRASIL, 2010)

## b) Pontes e Viadutos

As obras de pontes e viadutos são utilizadas, geralmente, em obras de drenagem, para facilitar a travessia de um talvegue e também complementa obras da malha rodoviária de cidades, o que permite a interligação entre localidades.

O monitoramento de uma ponte depende muito da sua importância no tráfego e da sua complexidade estrutural, podendo ser aplicado um monitoramento contínuo ou esporádico. A necessidade desse monitoramento parte justamente da verificação da estrutura no estado de serviço e quando de uma solicitação inesperada como uma grande enchente de um rio.

Uma situação pioneira no Brasil partiu do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP) e da Secretaria de Vias Públicas do Município de São Paulo que estão investindo cerca de 3 milhões de reais no SIGOA (Sistema de Gerenciamento de Obras-de-Arte), o sistema contempla a vistoria e cadastramento de anomalias de pontes e viadutos (HORTA, 2000).

O projeto em andamento entre a Universidade Federal do Pará – UFPA e a Empresa VALE, intitulado “Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação da Integridade Estrutural de Pontes e Viadutos Ferroviários ao Longo da Estrada de Ferro Carajás”, consiste basicamente em desenvolver uma metodologia e avaliar a capacidade das pontes ferroviárias ao longo do trajeto Carajás/PA – São Luís/MA, Estrada de Ferro Carajás. Este projeto surgiu com a necessidade da VALE em aumentar a sua capacidade de transporte.

Para o projeto VALE-UFPA, é perfeitamente aplicável a identificação dos requisitos que as estruturas precisam atender para garantir o seu comportamento adequado feito por Norris (2005) apud Pimentel (2008):

- 1) resistência adequada de forma a suportar os efeitos dinâmicos devidos ao tráfego;
- 2) rigidez apropriada para garantir o cumprimento dos critérios de segurança da via ferroviária;
- 3) resposta dinâmica adequada garantindo que as vibrações (acelerações e deslocamentos) não coloquem em risco a estabilidade do lastro;
- 4) características dos veículos ferroviários (cargas por eixo, espaçamento dos eixos, suspensões, etc.)
- 5) velocidades de circulação.



O Brasil investiu em infraestrutura logística até o final de 2010, quase 60 milhões de reais, através do programa PAC (PAC, 2010). No Pará, o investimento em obras de novas pontes para complemento de obras rodoviárias pelo Governo Federal através do Departamento Nacional em Infraestrutura de Transportes – DNIT alcançou em 2010 o valor de 250 milhões.

#### c) Túneis e demais obras

Os túneis são obras implantadas em rodovias, ferrovias, metrô, usinas hidrelétricas e obras de infraestrutura urbana de várias capitais e regiões brasileiras, geralmente, construídos em áreas cuja topografia inviabiliza a construção de desvios e pontes.

Durante a fase de escavação de um túnel é importante o monitoramento do deslocamento de suas paredes, até como forma de prevenção ao desabamento conforme o avanço da escavação. As informações extraídas por sensores ou instrumentos mostram a estabilidade do material que está sendo escavado e possibilita ações de prevenção.

Em geral, as obras geotécnicas requerem uma atenção ímpar ao monitoramento, se possível de maneira intermitente, isto devido às dificuldades do conhecimento íntimo das múltiplas e complexas propriedades dos diferentes tipos de solo e rochas.

### **1.3. Organização do Trabalho**

O capítulo 1 foi dedicado à introdução do trabalho explicando o tema da pesquisa, os objetivos traçados e a serem alcançados, as dificuldades encontradas que deverão ser superadas e um pequeno preâmbulo sobre o monitoramento das estruturas civis.

O capítulo 2 trata da apresentação de todo o estudo bibliográfico realizado para o desenvolvimento do trabalho, definindo conceitos da área de sensoriamento por fibras ópticas, classificando as técnicas existentes de monitoramento dessa tecnologia e a demonstração das aplicações existentes em pesquisas e trabalhos de



instrumentação que utilizaram os sensores ópticos como uma alternativa para monitorar estruturas.

O capítulo 3 explana a metodologia proposta para a utilização dos sensores ópticos no desenvolvimento da pesquisa, explicando passo a passo as atividades a serem realizadas, desde os ensaios em laboratório, até a análise dos dados.

O capítulo 4 mostra os resultados obtidos com os ensaios em laboratório, quais sejam: ensaio de tração de barras de aço, ensaio com o medidor triortogonal de junta e o ensaio de corpos de prova de concreto.

Finalmente, no capítulo 5, apresentam-se as principais conclusões obtidas durante a realização do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

## 2. SENSORES ÓPTICOS

O sistema de monitoramento de integridade de estruturas típico é composto de diversos elementos, como os sensores, cabeamento, sistema de aquisição de dados, armazenamento dos dados e análise de dados (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007). Para os sensores ópticos, estes elementos componentes do sistema são especificados como cabo de fibra óptica, componentes passivos e componentes ativos (MOSZKOWICZ, 2002).

### 2.1. Fibra Óptica

A fibra óptica pode ser definida como um material dielétrico constituído de casca e núcleo, podendo ser em sílica ou materiais poliméricos, com índices de refração diferentes que conseguem manter a radiação no núcleo com contínuas reflexões de uma extremidade à outra, sendo revestida por uma camada de proteção, geralmente em material polimérico (acrilato) para aumentar a resistência mecânica e permitir o manuseio, como mostra a figura 2.1. Existem outras formas de proteção que são utilizadas no campo das telecomunicações (MEASURES, 2001).

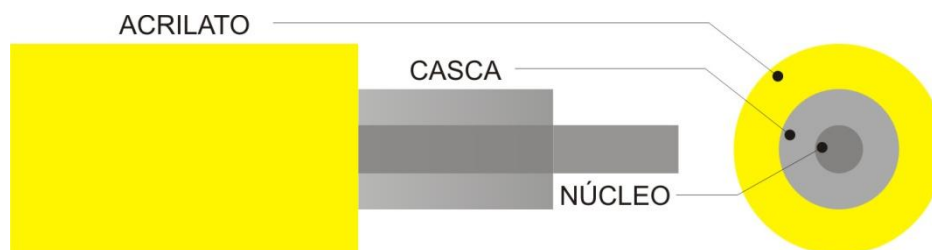


Figura 2.1 - Estrutura de uma fibra óptica.

Essa diferença na composição entre a casca e o núcleo da fibra é que permite o confinamento da energia luminosa, que por ela atravessa, na região que possui o maior índice de refração, no caso, o núcleo. A lei que rege esse princípio de propagação da luz no núcleo, nada mais é do que a *Lei de Refração de Snell*, figura 2.2 e a equação 2.1 (MEASURES, 2001).

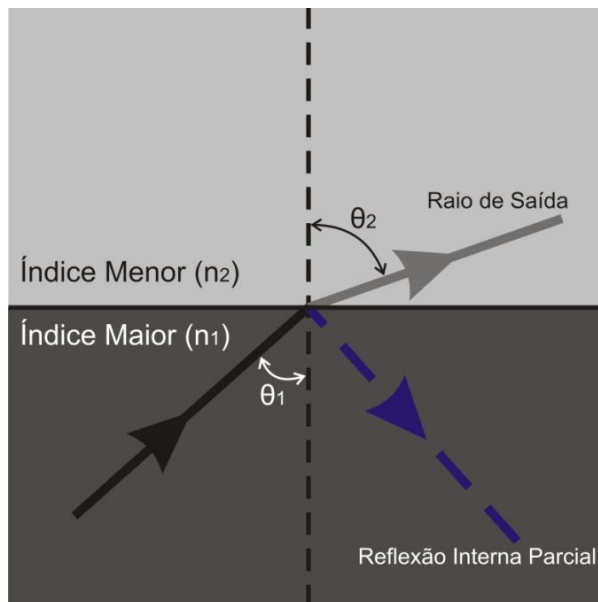


Figura 2.2 - Ilustração da Lei de Snell.

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2 \quad (2.1)$$

Da lei de Snell, pode-se fazer a seguinte análise: se  $n_1$  é maior que  $n_2$ , o ângulo de refração ( $\theta_2$ ) sempre vai ser maior que o ângulo de incidência ( $\theta_1$ ). Para  $\theta_2$  igual a 90 graus, tem-se o fenômeno de reflexão interna total, ou seja, sendo igual a 90 graus o feixe sairá rasante à interface dos dois meios.

Para que ocorra a reflexão total, existe o que se chama de ângulo crítico de incidência ( $\theta_c$ ), dado por:

$$\theta_c = \text{arcsen} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.2)$$

Para ângulos de incidência ( $\theta_1$ ) maior que o ângulo crítico ( $\theta_c$ ), a luz é quase que completamente refletida de volta ao meio original. Fisicamente, pode-se concluir que está ocorrendo o fenômeno da Reflexão Interna Total, ou seja, a energia luminosa é toda confinada no meio de maior índice de refração, o que ocorre no núcleo das fibras ópticas, como apresentado na figura 2.3 (MEASURES, 2001).

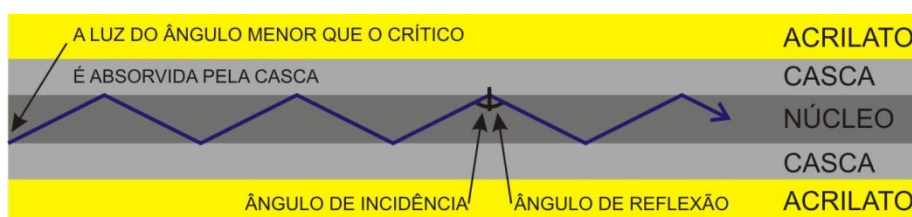


Figura 2.3 - Reflexão interna total.

Sabe-se que nem todo raio que adentra a fibra é propagado, portanto, é necessário definir um ângulo de aceitação ( $\theta_a$ ), o qual irá representar o conjunto de raios que incidem na face da fibra e que irão ser propagados pelo núcleo. Portanto, os raios incidentes, com ângulo maior que o ângulo de aceitação, serão refratados do núcleo para a casca. De posse dessas grandezas, pode-se definir o parâmetro que caracteriza a transmissão de uma fibra óptica: a chamada Abertura Numérica (AN) (ver figura 2.4) (CRISP, 2001, p. 29).

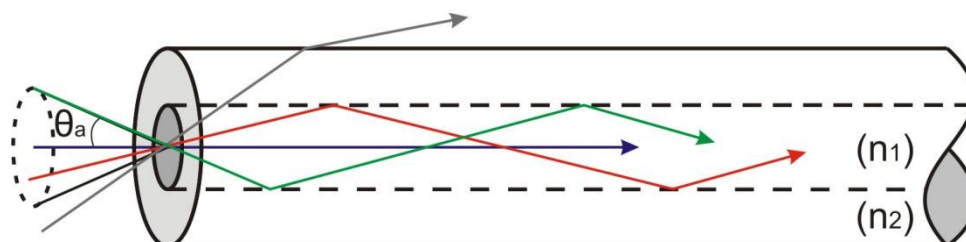


Figura 2.4 - Ilustração da abertura numérica (CRISP, 2001).

A Abertura Numérica é definida pela seguinte expressão:

$$AN = \sqrt{(n_{\text{núcleo}}^2 - n_{\text{casca}}^2)} \quad (2.3)$$

Sendo que o ângulo de aceitação ( $\theta_a$ ) é dado por:

$$\theta_a = \text{arc sen}(AN) \quad (2.4)$$

A teoria de raios da óptica geométrica permite visualizar apenas o fenômeno físico de propagação da luz nas fibras ópticas. Evidentemente, os conceitos da óptica geométrica não são suficientes para descrever completamente os efeitos de propagação da luz em fibras ópticas, principalmente quando consideram-se fibras do tipo monomodo. Uma descrição mais rigorosa utiliza a teoria ondulatória da luz, uma análise utilizando a teoria dos campos eletromagnéticos, baseada nas equações de Maxwell para condições de contorno (AZADEH, 2009).

As fibras ópticas, em geral, são classificadas por suas características de transmissão, que estão diretamente relacionadas à diferença do índice de refração núcleo-casca, o que irá determinar a sua capacidade de propagação em um ou mais modos. Geralmente estão divididas em dois grupos, monomodos e multimodos, conforme a figura 2.5.

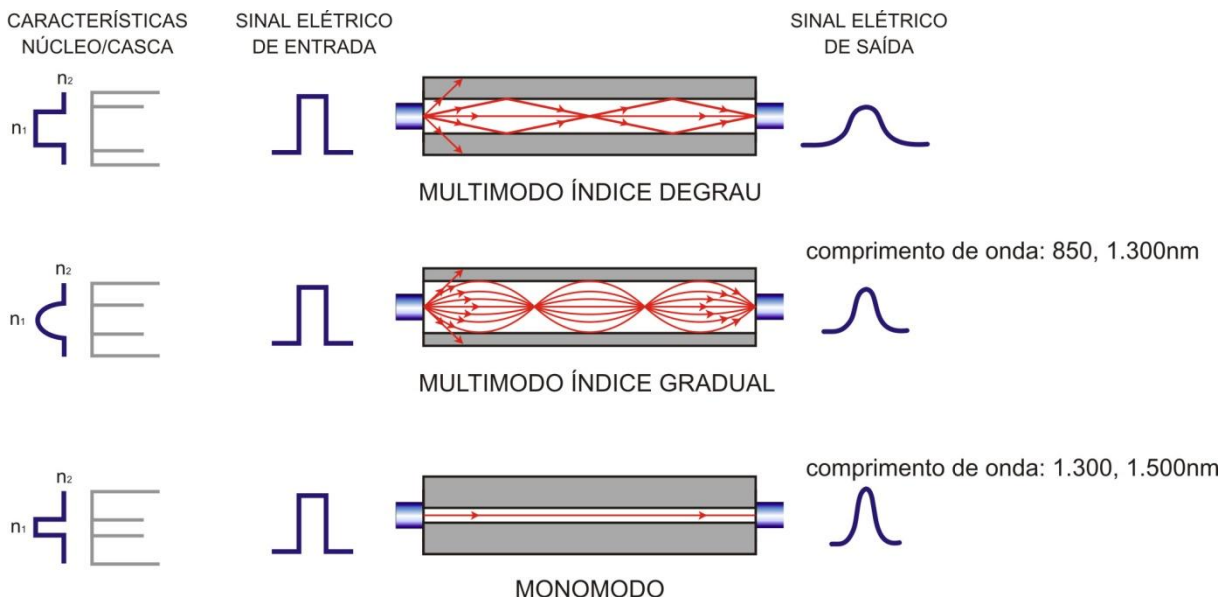


Figura 2.5 - Classificação das fibras ópticas (adaptado de CRISP, 2001).

O número de modos (NM) que uma fibra poderá transportar é calculado com base em sua abertura numérica, que por sua vez depende do índice de refração do núcleo e casca, como se pode observar na equação 2.5 (CRISP, 2001).

$$NM = \frac{\left(\varnothing_{núcleo} \cdot NA \cdot \frac{\pi}{\lambda}\right)^2}{2} \quad (2.5)$$

As fibras multimodos podem ser do tipo Índice Degrau (ID) ou Índice Gradual (IG). As fibras multimodos do tipo ID foram as pioneiras em termos de aplicações práticas. As fibras do tipo ID caracterizam-se por uma variação abrupta no índice de refração e dimensões relativamente maiores, sendo a capacidade de captar e confinar a energia luminosa, uma de suas principais características, isso atribuída à diferença relativa entre os índices de refração núcleo-casca, ou especificamente, a alta abertura numérica que varia entre 0,2 a 0,4 (CRISP, 2001).

Já as fibras multimodos do tipo IG, possuem uma capacidade de transmissão maior que as do tipo ID, mas por outro lado possuem dimensões e aberturas numéricas menores. Sua principal característica, porém, é a diminuição gradual do índice de refração do núcleo para a casca (CRISP, 2001).

As fibras monomodos diferenciam-se das multimodos basicamente pela sua alta capacidade de transmissão de dados e por suas dimensões reduzidas do núcleo. Contudo, essas suas características apresentavam problemas, como a emenda da fibra, uma vez que seu núcleo é da ordem de 10µm, necessitava de equipamentos e técnicas de alta precisão. Outro problema é encontrar uma fonte

óptica de alta coerência, de forma a permitir um acoplamento eficiente no núcleo da fibra (CRISP, 2001).

## 2.2. Componentes Passivos

Alguns exemplos de componentes passivos são os conectores e acopladores que possibilitam a emenda entre as fibras e a conexão aos receptores. No entanto, a emenda de uma fibra óptica poderá se dar por processo mecânico ou por fusão.

A emenda mecânica é implementada de duas maneiras. A primeira consiste no uso de alinhadores de precisão, onde as fibras são introduzidas, conforme ilustrado na figura 2.6. Seguem-se as seguintes etapas: 1) limpeza da fibra, 2) decapagem, 3) clivagem (corte), 4) inserção das pontas ópticas em cada extremidade do conector e 5) fechamento e travamento do conector.

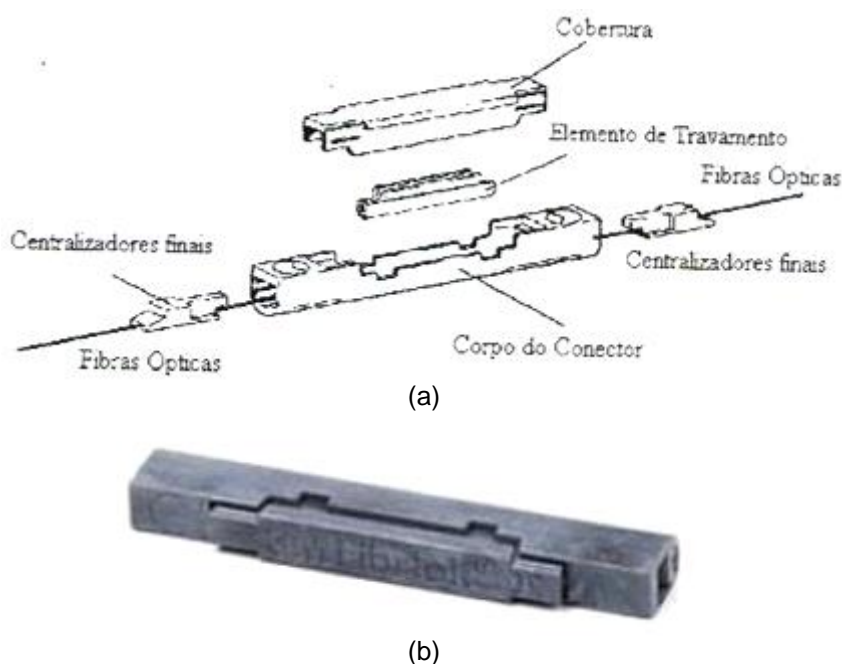


Figura 2.6 - Conector mecânico de fibra óptica (a) explodido e (b) fechado.  
(Fonte: LUCALM, 2010 e GSTATIC, 2011)

Na emenda por alinhadores de precisão, estes possuem uma ranhura na qual as fibras ópticas, após o processo de decapagem e clivagem, são alinhadas frente a frente e são aproximadas uma da outra até o contato entre ambas. Posteriormente, é introduzido um gel casador de índice de refração entre as duas fibras, de forma que o casamento entre as duas seja melhorado. Finalmente, através do monitoramento do equipamento de medição (Power Meter e OTDR)<sup>3</sup> as fibras são aproximadas, ajustadas e, quando for obtido o ponto de menor atenuação, as fibras

<sup>3</sup> Power Meter é o equipamento que mede a potência luminosa que atravessa uma fibra e o OTDR é o equipamento que localiza eventos na fibra, como comprimento, emendas, conectores, rupturas e atenuações. O OTDR será descrito com mais detalhes no subitem 2.4.3.

serão “travadas”. Este processo é bastante utilizado em situações de emergência, como uma medida provisória, uma vez que a atenuação é grande quando comparada com outros processos de emendas, tendendo a aumentar com o tempo (CRISP, 2001).

A segunda forma seria emenda por conectores e adaptadores, consiste em acoplar cada terminal de uma fibra com conector, utilizando um adaptador como emenda. Existem diversos tipos de conectores, o mais utilizado em instrumentos de medição é do tipo FC com rosca, possuem baixa perda de inserção e retorno, figura 2.7(CRISP, 2001).



Figura 2.7 - Tipos de conectores em fibra óptica.  
(Fonte: EXTRAVASE, 2010)

Os conectores possuem um elemento chamado de ferrolho, responsável por conduzir o fino núcleo da fibra e fixá-lo dentro do conector, a ponta do lado esquerdo, figura 2.8, precisa ser perfeitamente limpa, pois qualquer sujeira poderá prejudicar a passagem da luz.



Figura 2.8 - Ferrolho do conector de fibra óptica.  
(Fonte: ASIA, 2011)

A emenda por fusão caracteriza-se pela fusão entre as extremidades das fibras de modo a permitir a continuidade do feixe óptico. Para este processo é necessário a utilização de um equipamento, apropriado para este fim, chamado de máquina de emenda. É possível distinguir dois tipos de máquinas, a máquina de emenda manual e a máquina de emenda automática, figura 2.9 (CRISP, 2001).





Figura 2.9 - Máquina de fusão de fibra óptica.  
(Fonte: FIBEROPTICS4SALE, 2010)

Outro componente passivo são normalmente os sensores, ou seja, elemento transdutor responsável em converter a mudança do parâmetro a ser medido em mudança correspondente nas propriedades da luz guiada pela fibra óptica.

Alguns tipos de sensores ópticos estão apresentados na tabela abaixo:

Tabela 2.1 - Tipos de sensores ópticos encontrados no mercado (Fonte: FIBERSENSING, 2010).

	<p>Extensômetro para imersão em concreto, utilizado para medir deformações. Aplicáveis em pontes, barragens, túneis, usinas, edifícios, etc.</p>
	<p>Extensômetro para colar em superfícies, utilizado para medir deformações, uma versão em fibra óptica do <i>strain gage</i> resistivo. Aplicáveis em estruturas de engenharia civil e metálicas.</p>
	<p>Sensor de temperatura para uma larga escala de aplicações.</p>
	<p>Sensor de deslocamento linear. Aplicáveis em estruturas de engenharia civil, controle de pneumático e hidráulico, além de automação de máquinas.</p>
	<p>Acelerômetros. Aplicáveis em motores, hidro-geradores, transformadores, pontes, edifícios, etc.</p>



### 2.3. Componentes Ativos

Os componentes ativos são as unidades de medição que contemplam a função tanto de transmissor, como a de um detector óptico, ou seja, converte os sinais elétricos em sinais ópticos e vice-versa (MEASURES, 2001).

As unidades de medição são compostas de fontes ópticas, unidades de processamento de sinal e fonte de corrente. Os principais tipos de fontes luminosas são:

- fonte de espectro contínuo (lâmpadas incandescentes);
- fontes monocromáticas incoerentes (diodos emissores de luz – LED's);
- fontes monocromáticas coerentes (lasers).

As fontes luminosas possuem características necessárias que irão depender fundamentalmente de sua aplicação, ou seja, comunicação de longo ou curto alcance. Os principais parâmetros definidores são:

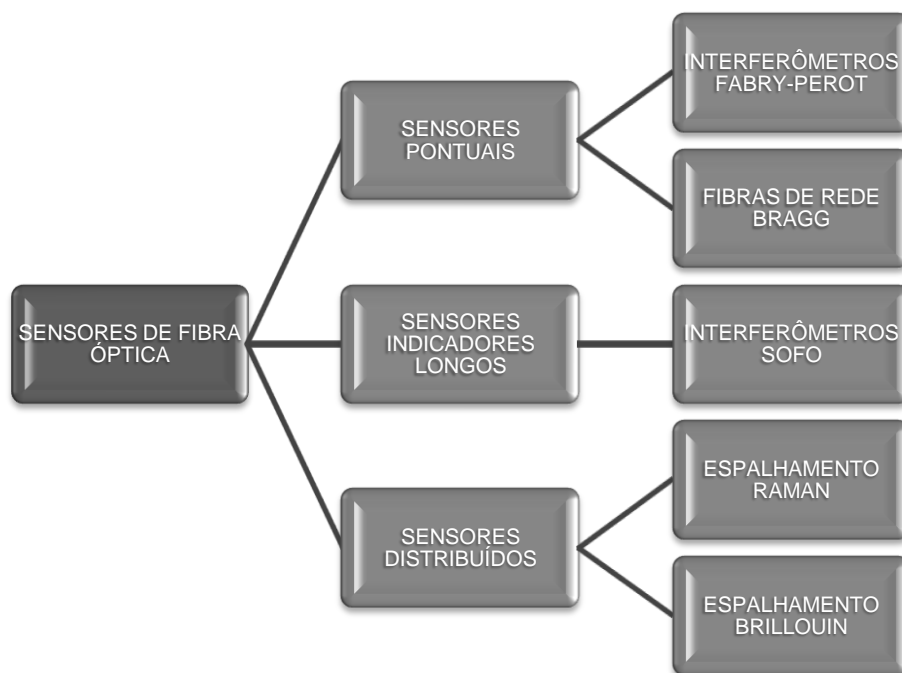
- potência: deverá ser o suficiente para permitir a precisão na emissão e recepção do sinal;
- velocidade: deverá ser rápida o suficiente para permitir a modulação da potência da fonte à taxa pretendida;
- comprimento espectral: deverá ser estreito, minimizando os efeitos da dispersão cromática;
- ruído: a fonte luminosa deverá ser o mais estável possível, não sofrendo flutuações aleatórias, sendo requisito indispensável para sistemas de detecção coerentes;
- dimensões e configurações compatíveis com os tipos de fibras ópticas utilizadas no sistema de monitoração;
- insensibilidade a alterações ambientais, tais como temperatura e umidade.

### 2.4. Tecnologia de Mensuração

O advento da inovação dos sensores ópticos já se transformou em uma “Corrida Tecnológica”, onde instituições trabalham diariamente para lançar no mercado diversos tipos de sensores à base de fibras ópticas, são Universidades e

Centros de Investigação Industrial, o resultado é uma grande variedade de sensores para diversos tipos de medidas e aplicações (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

Segundo Glišić e Inaudi (2007), as principais tecnologias de mensuração que atingiram um nível industrial ou pelo menos apresentaram um avanço na fase de ensaios de campo, encontram-se descritas na figura 2.10.



**Figura 2.10 - Classificação das tecnologias de mensuração dos sensores ópticos (adaptado de GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).**

A tabela 2.2 mostra uma comparação entre as tecnologias de mensuração dos sensores à base de fibra óptica com relação a alguns parâmetros importantes na área de monitoramento de estruturas. A partir dessa comparação é possível determinar o tipo de tecnologia a ser usada em determinadas situações previamente definidas.

Tabela 2.2 - Comparação das tecnologias de medição de sensores ópticos (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007)

	INTERFERÔ- METRO SOFO	INTERFERÔ- METRO FABRY-PEROT	REDE BRAGG	ESPALHA- MENTO RAMAN	ESPALHA- MENTO BRILLOUIN	
Tipo de Sensor	Indicador Longo (Tensão Integral)	Ponto	Ponto	Distribuído	Distribuído	
Principais parâmetros mensuráveis	Deformação Tensão Inclinação Força	Tensão Temperatura Pressão	Tensão Temperatura Aceleração Nível d'água	Temperatura	Tensão Temperatura	
Multiplexagem	Paralelo	Paralelo	Série e Paralelo	Distribuído	Distribuído	
Pontos de medição em uma linha	1	1	10-50	10.000	30.000	
Precisão Típica	Deformação ( $\mu\epsilon$ )	1	1	-	20	
	Alongamento ( $\mu\text{m}$ )	1	100	1	-	
	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	-	0,1	0,1	0,1	0,2
	Inclinação ( $\mu\text{rad}$ )	30	-	-	-	-
	Pressão (% escala completa)	-	0,25	-	-	-
Alcance (Range)	20m	-	-	8km	30km, 150km com extensores de alcance	
Tipo de fibra	Monomodo	Multimodo	Monomodo	Multimodo	Monomodo	

Complementando a informação sobre os tipos de sensores ópticos, segundo Measures (2001), a classificação se dá em cinco tipos, a saber: interferômetros, intensímetros, polarimétricos, modalmétricos e espectrômetros.

#### 2.4.1. Sensores Pontuais

##### 2.4.1.1. Interferômetros Fabry-Perot

Segundo Measures (2001), um tipo de interferômetro é formado por dois planos, espelhos em paralelos separados por uma distância  $L$  e alinhados com suas normais em uma direção de propagação de um plano de ondas de luz (ver figura 2.11).

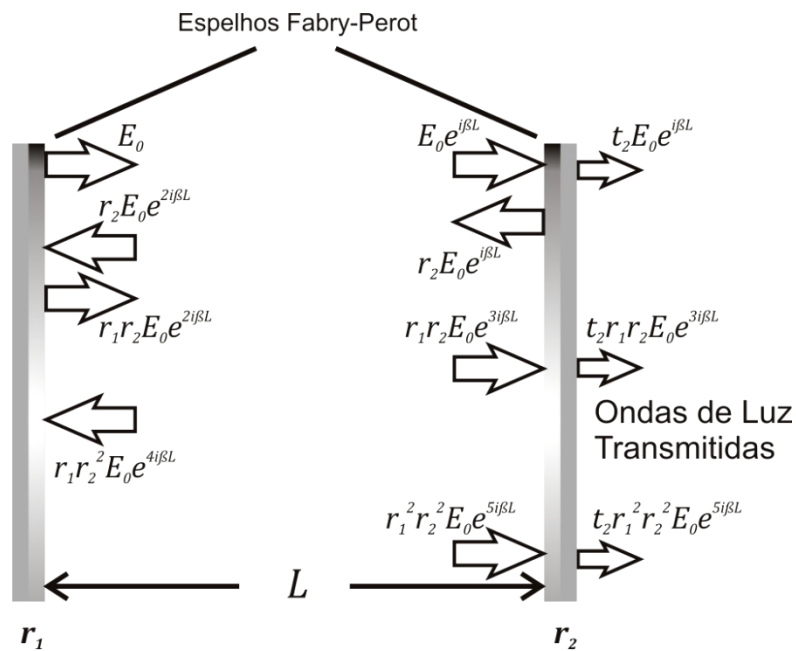


Figura 2.11 - Ilustração de múltiplas reflexões dentro de um plano de espelhos do interferômetro Fabry-Perot, ou ressonador (MEASURES, 2001, p. 108)

Os interferômetros extrínsecos Fabry-Perot são constituídos de um tubo capilar de sílica contendo duas fibras ópticas clivadas alinhadas de topo de sentido oposto, deixando uma folga ou cavidade de ar entre elas de micrometros, como mostra a figura 2.12 (MEASURES, 2001 apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

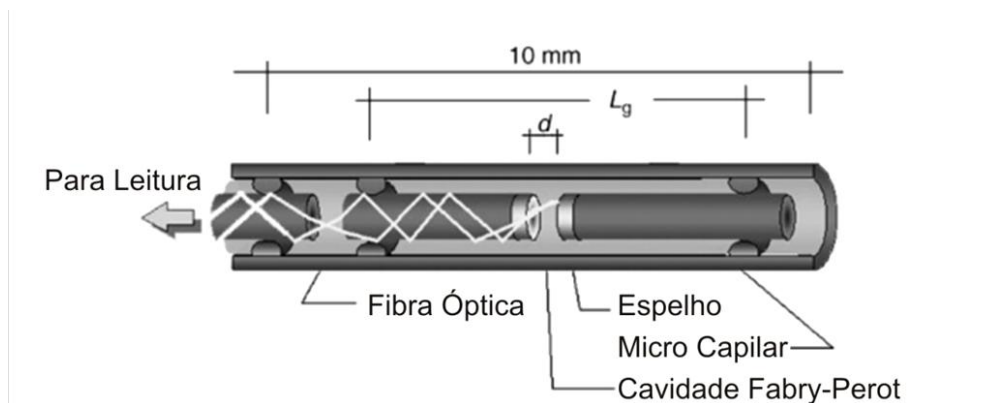


Figura 2.12 - Interferômetro Fabry-Perot (FISO apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007, p. 25).

O funcionamento do sensor baseia-se na cavidade de Fabry-Perot, quando uma luz é incidida em uma das fibras, um sinal de interferência é refletido de volta, devido a incidência da luz na interface vidro-ar e ar-vidro, funcionando como espelhos. Esta interferência pode ser desmodulada utilizando técnicas coerentes ou de baixa coerência para reconstruir as alterações no espaçamento entre as fibras. Uma vez que as duas fibras estão associadas ao tubo capilar perto de suas duas extremidades (com uma distância típica de 10 mm), a mudança de intervalo

corresponderá à variação da tensão média entre dois pontos de fixação (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).



Figura 2.13 - Demodulador para interferômetros Fabry-Perot para simples e múltiplos canais (ROCTEST apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007)

#### 2.4.1.2. Rede Bragg

O cientista *Lawrence Bragg*, em seu trabalho sobre o espalhamento do Raio-X em planos reticulados de cristais, observou regiões de interferência entre as ondas de luz incidentes nos cristais e as ondas espalhadas pelas variações periódicas. A estas regiões de interferências chamaram de Rede Bragg (MEASURES, 2001).

Segundo Glišić e Inaudi (2007), os sensores de rede Bragg são modificações periódicas no índice de refração do núcleo da fibra que pode ser produzidas adequadamente pela exposição aos raios UV intensos. A formação permanente dessas redes foi primeiramente demonstrada pelos estudos de Hill et. al. (1978 apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007). Excitando uma fibra óptica dopada com germânio com intensa radiação de laser argônio, com comprimento de onda de 488nm, após vários minutos observou-se que a intensidade da luz refletida aumentava até que finalmente quase toda luz fosse refletida. O crescimento da luz retro-refletida foi explicado em termos de novo efeito não-linear chamado de fotossensibilidade, que permite que o índice de refração no núcleo da fibra aumente pela exposição intensa à radiação laser.

As redes produzidas possuem 10mm de comprimentos de onda normalmente. Essas Redes explicam o funcionamento deste tipo de sensor da seguinte maneira. Quando uma fonte de luz ajustável é injetada na fibra que contém a rede Bragg, o comprimento de onda correspondente à rede de campo será refletida, enquanto

todos os outros comprimentos de onda vão passar através das redes não perturbadas, funcionando como um filtro fixo de banda, refletindo a luz com comprimentos de onda próximos ao comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ) e transmitir comprimentos de onda suficientemente diferentes de  $\lambda_B$  (figura 2.14) (MEASURES, 2001).

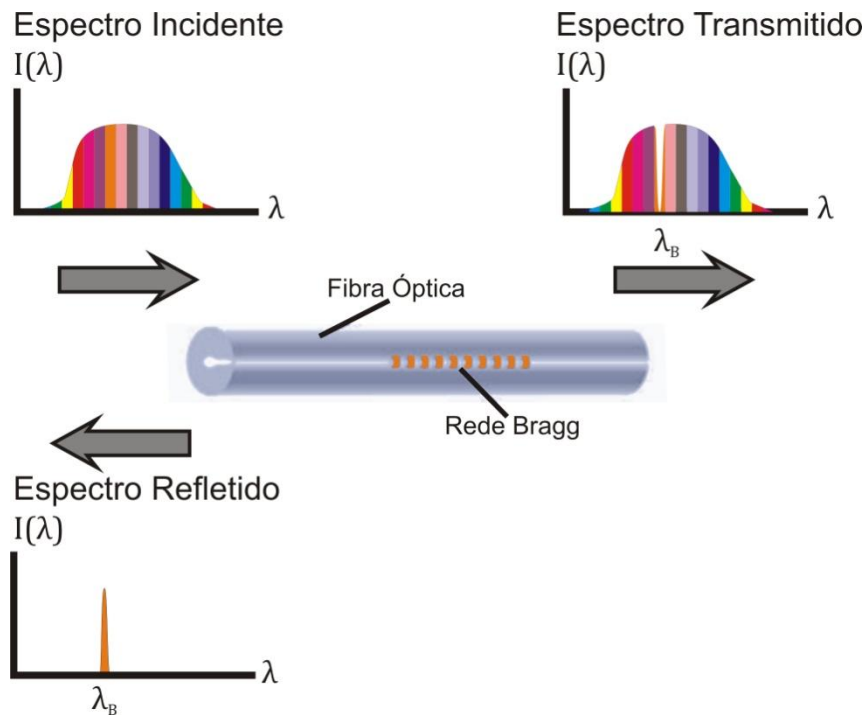


Figura 2.14 - Ilustração do esquema de funcionamento das fibras de rede Bragg (adaptado de GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

As fibras de rede Bragg (FRB) são sensores intrínsecos, onde qualquer alteração na tensão do local ou temperatura modifica o índice de refração e o período da rede e, conseqüentemente, altera o comprimento de onda Bragg (MEASURES, 2001). Sendo o período da Rede dependente da tensão e temperatura, tornando-se possível medir estes dois parâmetros, analisando a intensidade da luz refletida em função do comprimento de onda. Isso geralmente é feito usando um laser sintonizável contendo um filtro de comprimento de onda (como uma cavidade Fabry-Perot) ou um aparelho (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

As resoluções da ordem de  $1\mu\epsilon$  para a deformação, e  $1^\circ\text{C}$  para temperatura, podem ser obtidos com os melhores desmoduladores. Para as redes de Bragg, o comprimento de onda é dado por:

$$\lambda_B = 2n_0\Lambda \quad (2.6)$$

onde:  $n_0$  é o índice efetivo de refração do núcleo;  $\Lambda$  é o período de concessão das perturbações do índice.

Segundo Measures (2001), as equações que regem o funcionamento dos sensores de rede Bragg são as equações fundamentais da optotermomecânica, que serão descritas abaixo. O parâmetro fundamental que encontra-se na maioria dos sensores ópticos estruturais é o comprimento do percurso óptico da seção de detecção. Sob condições uniformes, este parâmetro é dado por:

$$\zeta_L = nL \quad (2.7)$$

onde:  $n$  é o índice de refração do núcleo;  $L$  é o comprimento da fibra óptica.

Para a FRB, é o período de modulação do índice que constitui o parâmetro de comprimento adequado para a equação 2.7, em oposição ao comprimento da rede (ou seja,  $\zeta_L(FRB) = n\Lambda$ ). Em geral a equação 2.7 é uma função da tensão aplicada ( $\sigma$ ) e da temperatura ( $T$ ), podendo ser escrita da seguinte forma:

$$\zeta_L = \zeta_L(\sigma, T) \quad (2.8)$$

O incremento na equação 2.8 com relação a algum estado de referência de tensão ( $\sigma_0$ ) e temperatura ( $T_0$ ) é descrita como:

$$\Delta\zeta_L = \zeta_L(\sigma, T) - \zeta_L(\sigma_0, T_0) \quad (2.9)$$

A expansão de Taylor da equação 2.9, retendo apenas os termos lineares, será:

$$\Delta\zeta_L = \left[ \frac{\partial\zeta_L}{\partial\sigma} \right]_T \Delta\sigma + \left[ \frac{\partial\zeta_L}{\partial T} \right]_\sigma \Delta T \quad (2.10)$$

Para Measures (1992) apud Glišić e Inaudi (2007), com relação a equação 2.7, a variação de  $\Delta\zeta_L$  devido as mudanças incrementais de  $\sigma$  e  $T$  pode ser expandida da seguinte forma:

$$\Delta\zeta_L = \left\{ n \left[ \frac{\partial L}{\partial\sigma} \right]_T + L \left[ \frac{\partial n}{\partial\sigma} \right]_T \right\} \Delta\sigma + \left\{ n \left[ \frac{\partial L}{\partial T} \right]_\sigma + L \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]_\sigma \right\} \Delta T \quad (2.11)$$

Podendo ser reescrita de uma forma ligeiramente diferente:

$$\Delta\zeta_L = nL \left[ \left\{ \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right]_T + \frac{1}{n} \left[ \frac{\partial n}{\partial \varepsilon} \right]_T \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right]_T \right\} \Delta\sigma + \left\{ \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} \right]_T + \frac{1}{n} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]_T \right\} \Delta T \right] \quad (2.12)$$

Com a introdução do Módulo de Young,  $E_F$ , e o coeficiente de expansão térmica,  $\alpha_F$ , para uma fibra óptica, a equação 2.12 tem a forma:

$$\Delta\zeta_L = nL \left[ \left\{ 1 + \frac{1}{n} \left[ \frac{\partial n}{\partial \varepsilon} \right]_T \right\} \frac{\Delta\sigma}{E_F} + \left\{ \alpha_F + \frac{1}{n} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]_T \right\} \Delta T \right] \quad (2.13)$$

Da equação 2.13, podemos extrair a informação de que o termo da equação 2.14 se referencia ao efeito tenso-óptico, chamada de sensibilidade de deformação ( $S_\varepsilon$ ); e o termo da equação 2.15 se referencia ao efeito termo-óptico, chamada de sensibilidade de temperatura ( $S_T$ ) (MEASURES, 2001).

$$S_\varepsilon \equiv \left\{ 1 + \frac{1}{n} \left[ \frac{\partial n}{\partial \varepsilon} \right]_T \right\} \quad (2.14)$$

$$S_T \equiv \left\{ \alpha_F + \frac{1}{n} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]_T \right\} \quad (2.15)$$

Segundo Measures (2001), no caso de um sensor FRB, a equação 2.13 tem a mesma forma, com exceção do comprimento  $L$  que será substituído pelo  $\Lambda$ , o período do índice de modulação da rede Bragg.

Então a equação 2.13, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\Delta\zeta_L}{\zeta_L} = S_\varepsilon \Delta\varepsilon + S_T \Delta T \quad (2.16)$$

Em Maul e Kipp (2010), tanto a sensibilidade de deformação ( $S_\varepsilon$ ) quanto a sensibilidade de temperatura ( $S_T$ ), são definidas a partir dos seguintes coeficientes:

$$\alpha_{n\varepsilon} = \left[ \frac{1}{n} \frac{\partial n(\varepsilon, T)}{\partial \varepsilon} \right] \quad (2.17)$$

$$\alpha_{\Lambda\varepsilon} = \left[ \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda(\varepsilon, T)}{\partial \varepsilon} \right] \quad (2.18)$$

$$\alpha_{nT} = \left[ \frac{1}{n} \frac{\partial n(\varepsilon, T)}{\partial T} \right] \quad (2.19)$$

$$\alpha_{\Lambda T} = \left[ \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda(\varepsilon, T)}{\partial T} \right] \quad (2.20)$$



onde:  $\alpha_{n\varepsilon}$  (coeficiente fotoelástico) exprime deformação em variação do índice de refração;  $\alpha_{\Lambda\varepsilon}$  descreve a variação relativa do comprimento de Bragg com a deformação elástica;  $\alpha_{nT}$  (coeficiente termo-óptico) expressa a variação térmica com o índice de refração do núcleo da fibra de sílica dopado com germânio;  $\alpha_{\Lambda T}$  (coeficiente térmico de expansão – longitudinal) dá a mudança reversível do comprimento da fibra de sílica com a temperatura.

Para a solução demonstrada por Yu e Yin (2002) que equivale ao mesmo resultado da solução de Measures (2001), no entanto mais simplificado, diferenciando a equação 2.6 a mudança do comprimento de onda Bragg,  $\lambda_B$ , é dado por:

$$\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_0}{\partial L} + n_0 \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta L + 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_0}{\partial T} + n_0 \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.21)$$

O primeiro termo na equação 2.21 representa o efeito de tensão em uma fibra óptica. Isso corresponde a uma mudança no período da rede e alteração da tensão induzida no índice de refração devido ao *efeito fotoelástico*<sup>4</sup>. Para fazer o cálculo mais fácil, a tensão afetada pode ser expressa como:

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (1 - P_e) \varepsilon \quad (2.22)$$

Se a fibra é estendida em ambas as extremidades do corpo e nenhuma força aplicada, o núcleo da fibra e o revestimento podem ser considerados homogêneos e isotrópicos, a resposta de tensão do sensor FRB germanosilicato, a temperatura constante sob tensão é então dada por: (TAO, YANG e ZHANG, 2001, p. 157)

$$\frac{(\Delta \lambda_B / \lambda_B)}{\varepsilon} \approx 0,78 \quad (2.23)$$

Em resumo, a equação básica de monitoramento estrutural (2.16), para sensores de Rede Bragg, assume a seguinte forma:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = S_\varepsilon \Delta \varepsilon + S_T \Delta T \quad (2.24)$$

<sup>4</sup> O efeito fotoelástico são franjas luminosas escuras ou coloridas, proporcionadas pela passagem da luz polarizada por um material fotoelástico, formando desenhos que permitem a análise das tensões e deformações de um material (SHIMANO, 2006).

## 2.4.2. Sensores Indicadores Longos

### 2.4.2.1. SOFO

Desenvolvido pelo Instituto Federal Suíço de Tecnologia na cidade de Lausanne e comercializado pela empresa Smartec e grupo Roctest, o sistema SOFO (SOFO é uma sigla derivada do francês para "monitoração estrutural de fibras ópticas", ou seja, *surveillance d'ouvrages par fibres optiques*) é um sensor indicador de deformação ao longo da fibra, possuindo uma excelente estabilidade em seu uso ao longo do tempo e resistente a temperatura (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

Segundo Glišić e Inaudi (2007), este sensor é composto de um par de fibras ópticas do tipo monomodo, sendo uma delas integrada a estrutura a ser monitorada, chamada de fibra de medição, e a outra é solta no mesmo tubo que as envolve, esta chamada de fibra de referência, o esquema de composição de um sensor SOFO é mostrado na figura 2.15.

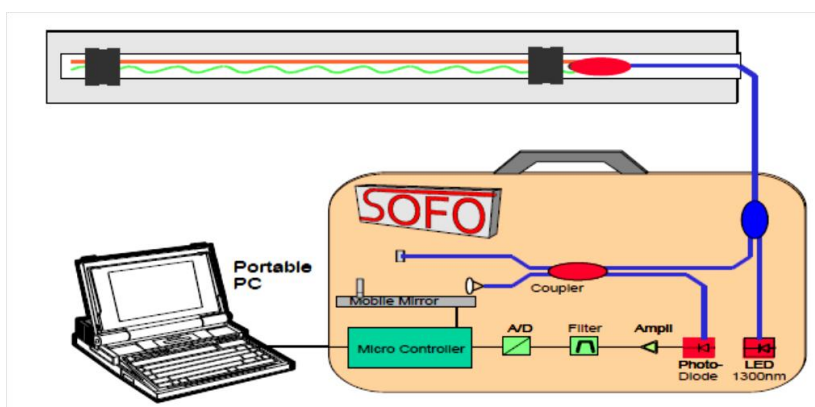


Figura 2.15 - Configuração de um sistema do sensor interferômetro SOFO (SMARTEC apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

O princípio de funcionamento do sensor SOFO está baseado na diferença de comprimento entre as duas fibras que o compõe após a aplicação de uma deformação na estrutura, para realizar a leitura absoluta deste trajeto em desequilíbrio é utilizado o duplo interferômetro Michelson. No primeiro interferômetro é realizada a medição da fibra de referência, o segundo está contido na unidade de leitura portátil. No segundo interferômetro, por meio de um espelho de varredura, é apresentado um trajeto em desequilíbrio bem conhecido entre seus dois braços. Devido à baixa coerência da fonte utilizada (a  $1,3\mu\text{m}$  de radiação de um diodo emissor de luz), franjas de interferência são detectadas apenas quando a leitura do interferômetro compensa exatamente a diferença de comprimento entre as fibras na estrutura (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

A estabilidade e a precisão deste sensor são confirmadas por ensaios laboratoriais e testes em campo. Mesmo uma mudança nas propriedades de transmissão da fibra não afeta a precisão, pois a informação é codificada em deslocamento em uma coerência da luz e não na sua intensidade. Toda a informação pode ser captada por uma única unidade de leitura, monitorando várias fibras e em diversas estruturas (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).



Figura 2.16 - Unidade de medição portátil do sistema SOFO (SMARTEC apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

A unidade de leitura é portátil, é a prova d'água e alimentados por bateria, ideal para ambientes agressivos, como os encontrados na maioria dos ambientes de construção (ver figura 2.16). Cada medição leva cerca de 10 segundos e todos os resultados são automaticamente analisados e armazenados com vista à interpretação de um computador portátil externo (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

Segundo Glišić e Inaudi (2007), o sistema SOFO tem sido utilizado com sucesso para monitorar mais de 400 estruturas, até agora, incluindo pontes, prédios, túneis, estacas, paredes ancoradas, barragens, monumentos históricos, as centrais nucleares e de modelos de laboratório, provando ser uma das mais adaptadas e amplamente utilizadas tecnologias de fibra óptica para monitoração de estrutura civil.

#### 2.4.3. Sensores Distribuídos (Raman e Brillouin)

O ponto de partida para o monitoramento distribuído começou com o desenvolvimento do OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*) que é um reflectômetro óptico no domínio do tempo utilizado em telecomunicações para medir

a potência retroespalhada a partir de diferentes pontos da fibra. O funcionamento do OTDR é baseado no espalhamento Rayleigh<sup>5</sup>, onde um pulso óptico é lançado na fibra e um fotodetector mede a quantidade de luz que é retroespalhada através da fibra óptica durante a propagação do pulso. Além das informações sobre perdas nas fibras, os perfis OTDR são muito úteis para localizar quebras, para avaliar as emendas e conexões e, em geral, para avaliar a qualidade geral de um link de fibra (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

Segundo Measures (2001), os processos de espalhamento Raman e Brillouin (inelásticos) podem ser usados para determinação do perfil de temperatura ao longo de uma fibra óptica. Os primeiros estudos sobre detecção de temperatura utilizando o espalhamento Raman foram demonstrados por Dakin *et. al.* (1985) e Hartog *et. al.* (1985) e comercializados por diversas empresas ao término da década de 80. Complementando, segundo Glišić e Inaudi (2007), o espalhamento Brillouin foi introduzido mais tarde, como forma de maior gama de OTDRs e depois para determinação de tensão e / ou aplicações de monitoramento de temperatura. A figura 2.17 mostra o espectro da luz espalhada a partir de um único comprimento de onda  $\lambda_0$  em fibras ópticas.

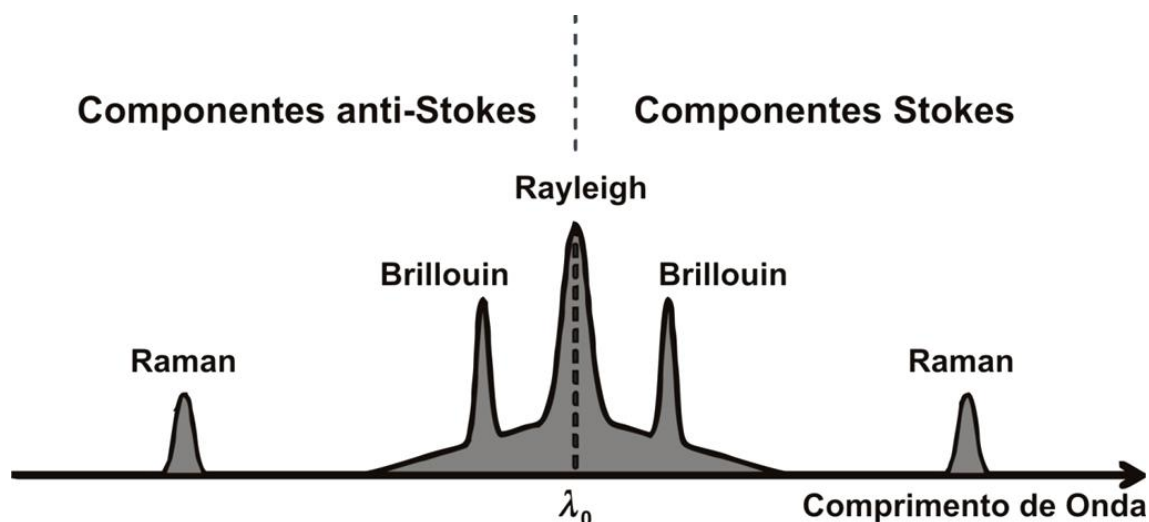


Figura 2.17 - Componentes ópticos de espalhamento em fibras (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

A luz do espalhamento Raman é causada por influência térmica de vibrações moleculares. Consequentemente, a luz retroespalhada carrega a informação sobre a temperatura do local onde ocorreu a dispersão. A amplitude do componente anti-Stokes (energia de maior fóton) depende fortemente da temperatura, enquanto que a amplitude da componente Stokes (energia de menor fóton) não (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

<sup>5</sup> O espalhamento Rayleigh é o espalhamento elástico de um fóton de luz sobre uma molécula.

A técnica de monitoramento Raman requer alguma filtragem para isolar os componentes de frequência adequados. Este consiste em registrar a relação entre a amplitude anti-Stokes e da amplitude de Stokes, que contém as informações de temperatura. Como a magnitude da luz espontânea Raman retroespalhada é bastante baixa (10 dB abaixo do espalhamento espontâneo Brillouin), fibras de alta abertura numérica multimodo são utilizadas para maximizar a intensidade da luz guiando os retroespalhados. No entanto, as características de atenuação relativamente elevadas das fibras multimodo limita a faixa de distância de sistemas Raman baseada em cerca de 8 km (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

Aufleger et al. (2005) apud Moser (2006), em seu trabalho cita também a aplicação dos sensores Raman na determinação de percolação da água na base de barragens de terra por meio de dois métodos: método do gradiente e método com aquecimento (*Heat-up Method*).

No método do gradiente, a temperatura é um rastreador para detectar anomalias no campo de fluxo. O método do gradiente é utilizado baseando-se no fato de que ocorrem variações sazonais de temperatura da água em lagos, reservatórios e rios causando mudanças na temperatura da água percolada através da barragem durante o ano. A presença da percolação, portanto pode ser detectada pela diferença de temperatura dentro do maciço. Como uma temperatura constante indica baixa percolação e uma temperatura variando significativamente no tempo, indica percolação significativa. Uma limitação deste método é que requer a presença de diferença de temperatura entre as superfícies externas, especialmente a temperatura do reservatório, e a de envolvimento dos cabos. Quando esta situação não existe, o método do gradiente não é aplicável e deve ser utilizado o método do aquecimento.

O método com aquecimento utilizava além da fibra óptica um cabo de cobre contíguo. Quando se aplicava uma tensão no cabo de cobre, este se aquecia e elevava a sua temperatura em pontos onde não havia água, e nos pontos em que havia a presença de água a temperatura era baixa, pois a água resfriava o cabo de cobre.

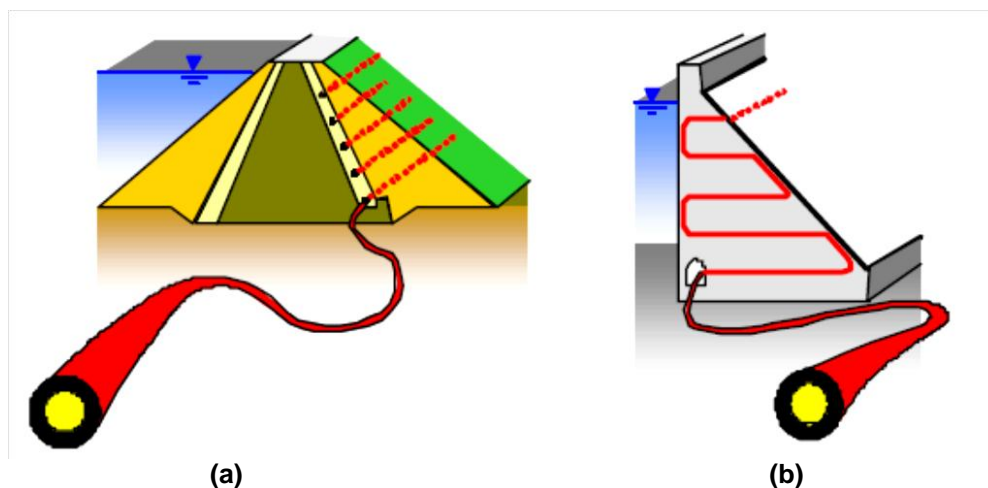


Figura 2.18 - (a) Detecção de percolação e (b) Monitoramento de temperatura em barragem de concreto (AUFLEGER et al., 2005 apud MOSER, 2006).

Segundo Karashima et al. (1990) apud Glišić e Inaudi (2007), o espalhamento Brillouin ocorre devido a uma interação entre a propagação do sinal óptico e excitação térmica de ondas acústicas na faixa de Giga-hertz na fibra, dando origem a uma frequência deslocada de componentes. Ele pode ser visto como a difração da luz em uma rede dinâmica gerada por uma onda acústica (uma onda acústica é realmente uma onda de pressão que apresenta uma modulação do índice de refração através do efeito elasto-óptica). O resultado dessa mudança de frequência chamada de Brillouin é o transporte de informação sobre a temperatura local e a tensão da fibra.

## 2.5. Algumas Aplicações dos Sensores Ópticos na Engenharia Civil

A aplicação de sensores à base de fibras ópticas na área de monitoramento vem se ampliando, diversas áreas utilizam este tipo de sensores, logicamente que para determinadas áreas a sua utilização não encontrou dificuldades, como na aplicação no monitoramento de veículos de transportes. Alguns desses veículos, como aeronaves, navios e automóveis, utilizam a tecnologia de sensores ópticos.

Outras áreas como a da engenharia civil, a utilização desses sensores ópticos vem aumentando, sendo a maior dificuldade a fragilidade dos componentes, como o transporte dos cabos e o cuidado com a instalação do sensor, por exemplo. O monitoramento de estruturas, geralmente, se faz durante o processo construtivo, um meio bastante agressivo, incompatível com os cuidados que se deve ter com os sensores ópticos.



Neste tópico serão descritos alguns exemplos de utilização dos sensores ópticos na área da engenharia civil, tanto em laboratório como no monitoramento em campo, dando ênfase a grandes estruturas.

### 2.5.1. Ensaios em laboratórios e testes em campo

Os ensaios em laboratório geralmente são os pontos de inícios de todas as aplicações em campo. Neste tópico, procurou-se apresentar as experiências e resultados obtidos em ensaios utilizando os sensores ópticos, para que possam nortear as experiências propostas neste trabalho.

Em Ansari (2005, pág. 448), a comparação de resultados em um ensaio de um modelo reduzido do pilar de apoio de uma ponte de concreto armado, como mostrado na figura 2.19, obteve a conclusão de que os sensores ópticos obtiveram menores ruídos que os elétricos, da ordem de frequência de 4 Hz. O modelo do pilar foi ensaiado por um quadro de teste eletro-mecânico-hidráulico, que simulou o ambiente de esforços da estrutura. O histórico de deformações ao longo do tempo está descrito na figura 2.20.



Figura 2.19 - Modelo estrutural do pilar de uma ponte de concreto armado (ANSARI, 2005).

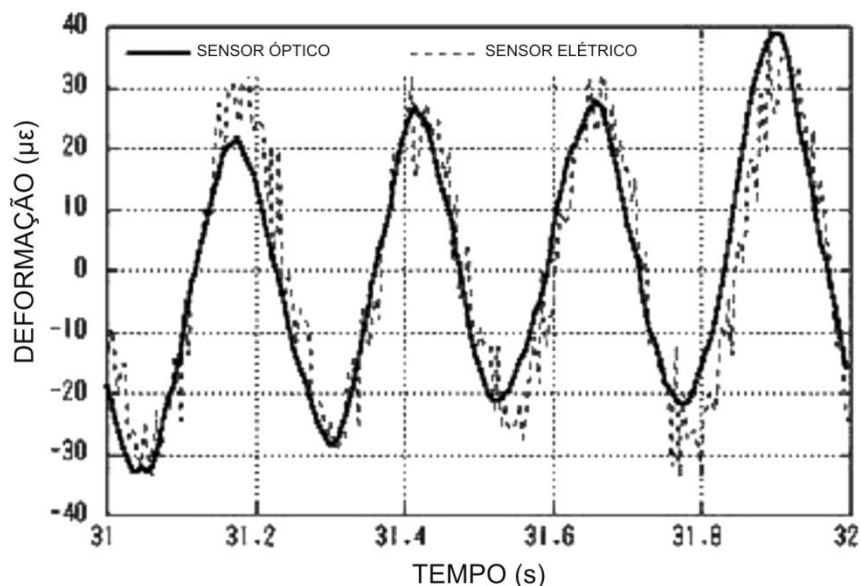


Figura 2.20 - Histórico das deformações ao longo do tempo (ANSARI, 2005).

Outra experiência relevante foi um ensaio de carga em uma estaca na nova unidade de produção de semicondutores do Parque Científico de Tainan, Taiwan. O parque está localizado em uma área onde o solo é composto de argila e areia com propriedades mecânicas pobres. Decidiu-se então realizar uma prova de carga em um modelo de estaca em escala real sob as condições do terreno, utilizando-se a tecnologia SOFO (GLIŠIĆ e INAUDI, 2008).

O teste coletou ricas informações sobre o comportamento estrutural das estacas, como a distribuição de tensão, as forças normais, o deslocamento na estaca, a distribuição de forças de atrito entre a estaca e o solo, a determinação do módulo de Young, a capacidade de carga máxima e determinação de falha nas estacas, bem como a determinação qualitativa das propriedades mecânicas do solo (três zonas são distinguidas na figura 2.21).



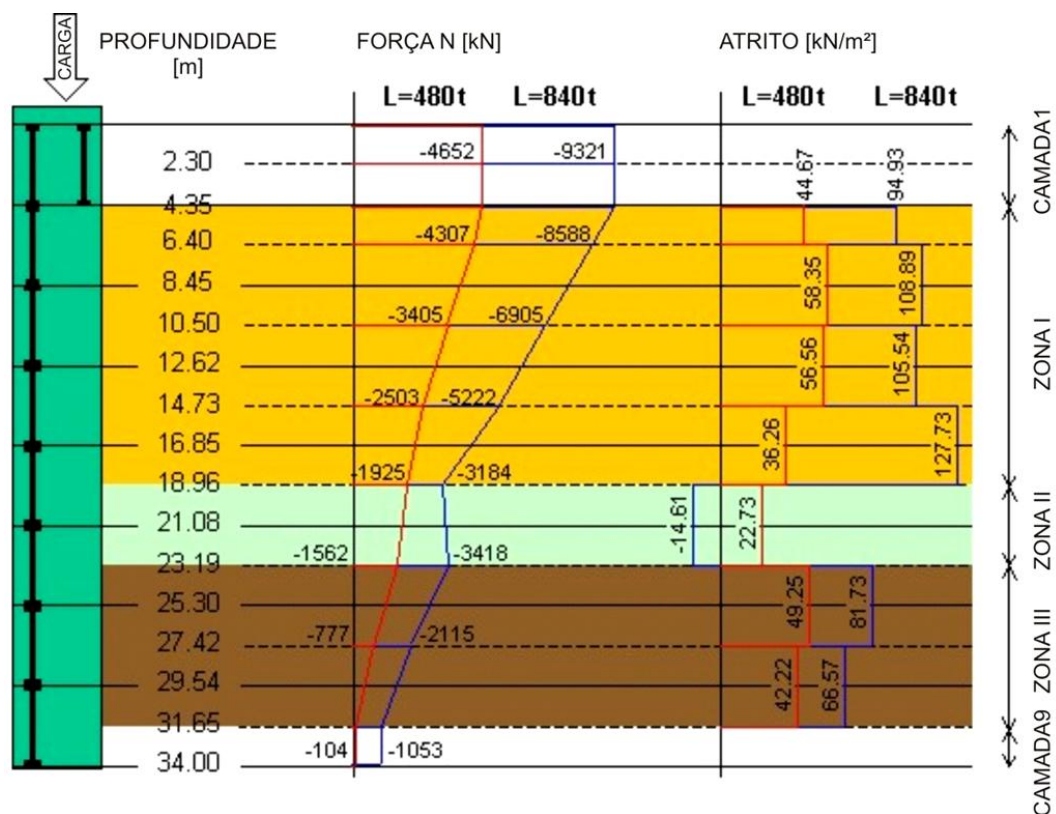


Figura 2.21 - Topologia dos sensores e os resultados obtidos com o teste de carga (GLIŠIĆ e INAUDI, 2008).

Como pode-se observar na figura 2.21, para o ensaio de compressão axial e de arrancamento, uma topologia simples de sensores SOFO foi utilizada, distribuindo-os em 8 células instaladas nos vergalhões, sendo que para detectar e compensar uma possível excentricidade de carga instalaram-se mais um sensor no topo da estaca em um vergalhão oposto ao outro. Para o teste de flexão a topologia utilizada foi a de sensores paralelos, permitindo a determinação da curvatura média, o cálculo da deformada e a localização da falha na estaca, representados na figura 2.22.

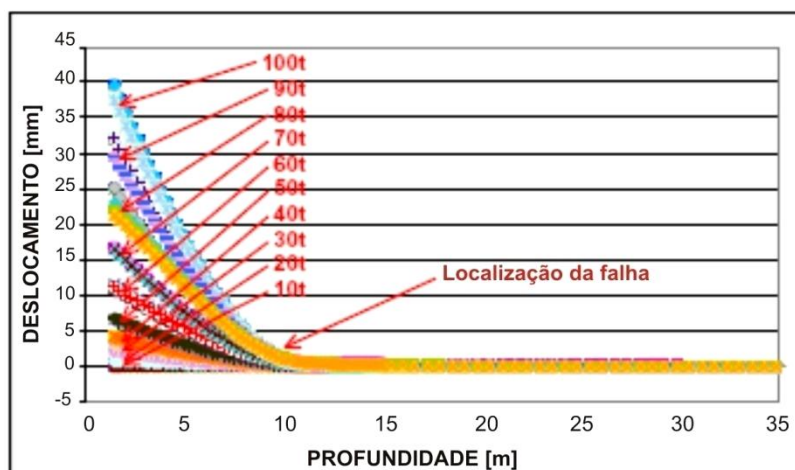
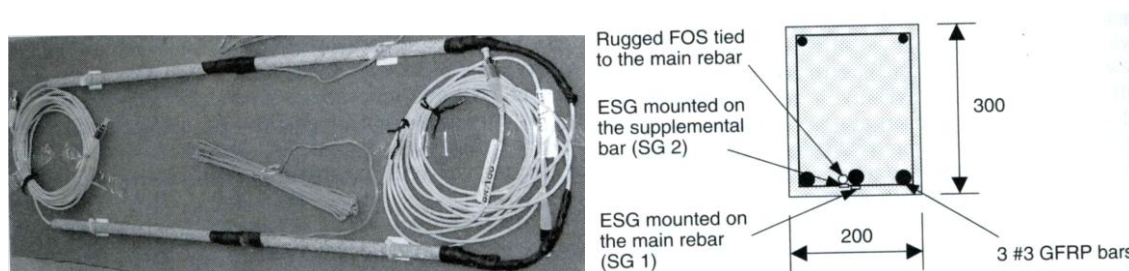


Figura 2.22 - Deformadas da estaca e localização da falha (GLIŠIĆ e INAUDI, 2008).

A pesquisa de Bagchi et al. (2009) publicada na revista *Experimental Techniques*, cujo título é “*Evaluation of a Rugged FBG Strain Sensor System for Monitoring Reinforced Concrete Structures*”, trata-se de uma avaliação de um sistema de sensores rede Bragg para o monitoramento de estruturas de concreto armado.

Bagchi et al. (2009) em seu trabalho realizou a instrumentação de duas vigas de concreto armado, reforçado com barras revestidas com fibras poliméricas (barras suplementares), conforme mostra a figura 2.23. Foram utilizados extensômetros ópticos de rede Bragg e extensômetros elétricos instalados nas barras da viga para monitorar a deformação das barras.



**Figura 2.23 - Instrumentação das barras suplementares (esquerda) e esquema de instalação dos extensômetros nas amostras (direita) (BAGCHI et al, 2009).**

O resultado do ensaio nas vigas encontra-se descrito na figura 2.24. Em ambas as amostras os resultados apresentados entre FBG e SG1 seguem a mesma tendência, apresentando uma pequena diferença de valores devido a combinação de diversos fatores, entre eles, o feito do revestimento polimérico na fibra óptica, o efeito da diferença de cisalhamento entre a barra suplementar e a barra principal, e uma pequena diferença de posição entre os sensores óptico e elétrico. O efeito da defasagem de cisalhamento pode ser influenciado também na transferência de tensão entre o revestimento de acrilato e o núcleo da fibra (BAGCHI et al, 2009).

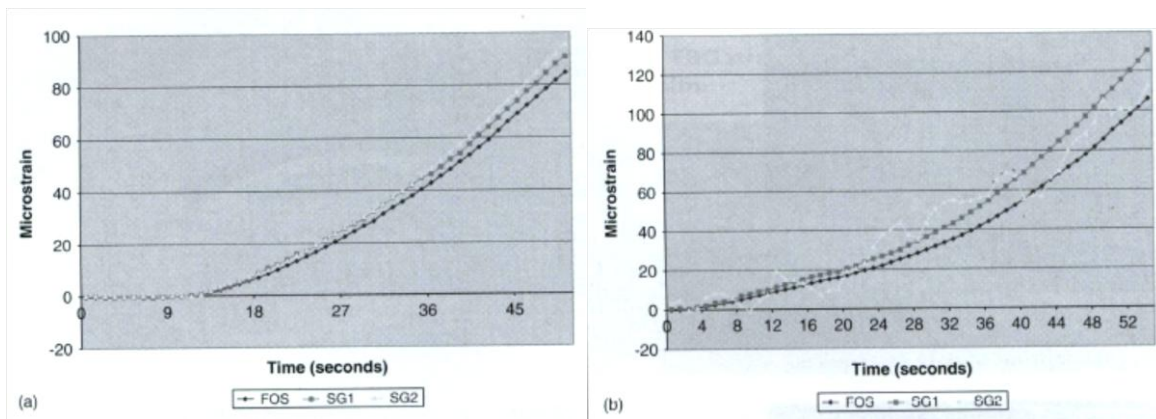


Figura 2.24 - Comparação dos extensômetros FBG, SG1 e SG2 nas amostras 1 (a) e 2 (b) (BAGCHI et al, 2009).

Os resultados da figura 2.24 indicam que os efeitos da diferença de cisalhamento não são significativos. Na amostra 1, a medição do sensor óptico FOS apresenta uma correlação muito boa com a SG2. Na amostra 2, a leitura errada do SG2 é atribuída ao seu mau funcionamento (BAGCHI et al, 2009).

### 2.5.2. Barragens

Segundo Glišić e Inaudi (2007, p. 202), devido a grandeza da estrutura de uma barragem, o uso de tecnologias distribuídas de fibra óptica traz novas possibilidades para o acompanhamento de deformação, temperatura e infiltração. A vantagem é que um único sensor distribuído permite o monitoramento de grandes áreas, o que se tornava inviável com os sensores tradicionais.

No monitoramento da Barragem da Emosson, localizada nos alpes suíços na cidade Martigny, aplicou-se uma substituição de um extensômetro haste por uma barra instrumentada com sensor óptico (chamada F3), próximo ao extensômetro óptico F3 colocou-se um extensômetro haste F4 para comparação de resultados. A figura 2.25 mostra as leituras dos extensômetros F3 e F4, bem como o nível de água da barragem (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007, p. 205).

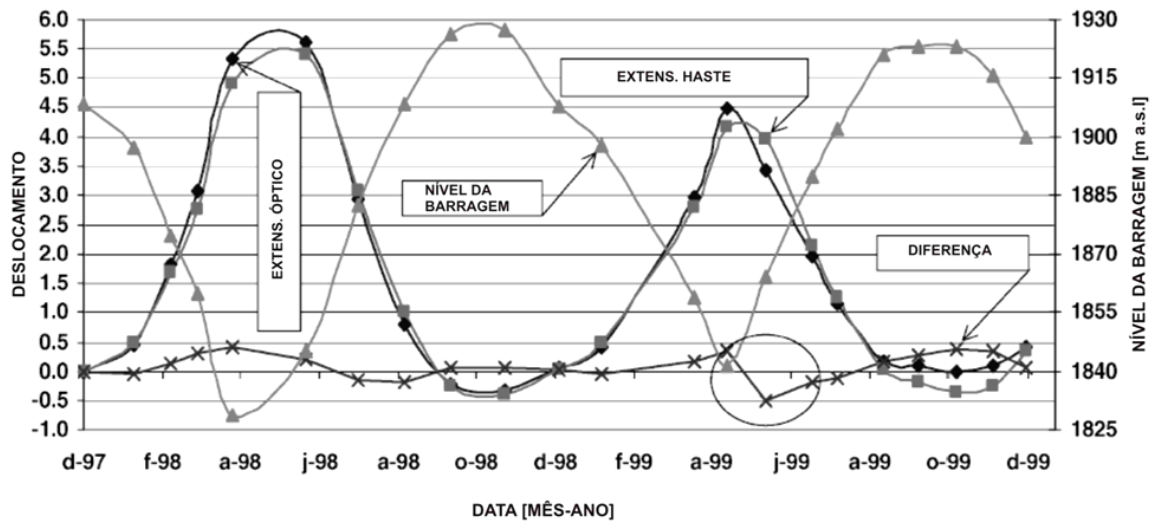


Figura 2.25 - Medições de deslocamentos realizados com os extens. ópticos e extens. haste, bem como a diferença entre eles e o nível d'água da barragem (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

As leituras apresentadas na figura 2.25 mostram que há uma boa concordância entre os extensômetros, sendo que a resposta do sensor óptico é mais rápida que a do extensômetro haste, o que define a sua sensibilidade. A diferença na leitura do extensômetro haste em relação ao extensômetro óptico já era esperada, devido ao atrito da haste com as paredes do poço em que estava instalada (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

Em Ansari (2005, p. 296), uma das aplicações de monitoramento à base de fibra óptica em estruturas de engenharia hidráulica foi a implementação na face de concreto da barragem de enrocamento Gudongkou, localizada na província de Hubei, China. O monitoramento de detecção de fissuras e fendas utilizou o sistema de fibra óptica distribuída e OTDR TES3031, conforme demonstrado na figura 2.26.

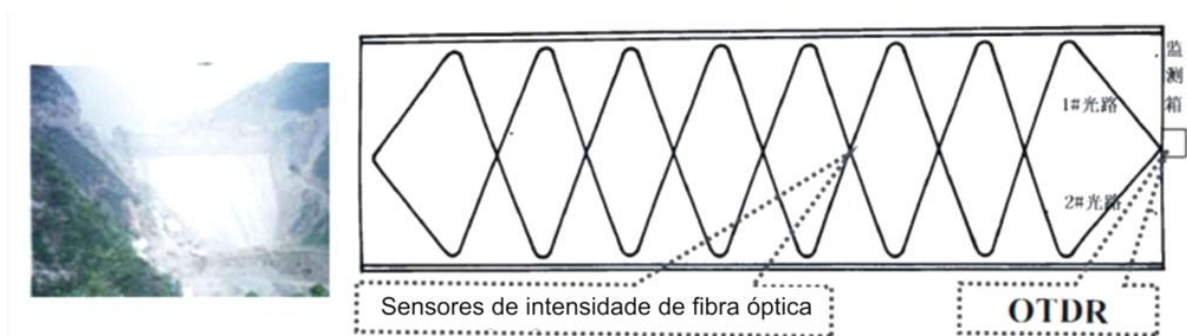


Figura 2.26 - Face de concreto da Barragem de Enrocamento Gudongkou e o sistema de monitoramento em fibra óptica para fissuras e fendas (ANSARI, 2005).

### 2.5.3. Pontes

A aplicação de sensores ópticos para monitoramento em pontes é uma das mais vastas. Cita-se alguns dos principais exemplos encontrados em bibliografias desse seguimento.

Em Measures (2001, p. 403), uma das aplicações dos sensores de rede Bragg foi em 1993 na Ponte da Trilha de Beddington (figura 2.27) na cidade de Calgary, Canadá. O objetivo do monitoramento foi o acompanhamento e comparação de três tipos de protensão: Cabo de Aço Convencional (SS), Cabo Compósito de Fibra de Carbono (TR) e Cabo *Leadline Rod* (LL).



**Figura 2.27 - Ponte da Trilha de Beddington (MEASURES, 2001).**

Os dados apresentados na figura 2.28 foram corrigidos para uma deformação aparente térmica, com base na temperatura ambiente. Uma vez que os três materiais de protensão possuem diferentes coeficientes de expansividade térmica, foi feita uma tentativa de normalizar os dados com relação à temperatura de modo a estabelecer uma comparação válida utilizada para o relaxamento permanente dos cabos. Já que as armaduras possuem uma adequação termicamente melhor entre o concreto, assumiu-se uma expansividade global igual a do concreto para as vigas, e as medidas normalizadas para 20 °C (MEASURES, 2001, pág. 410).



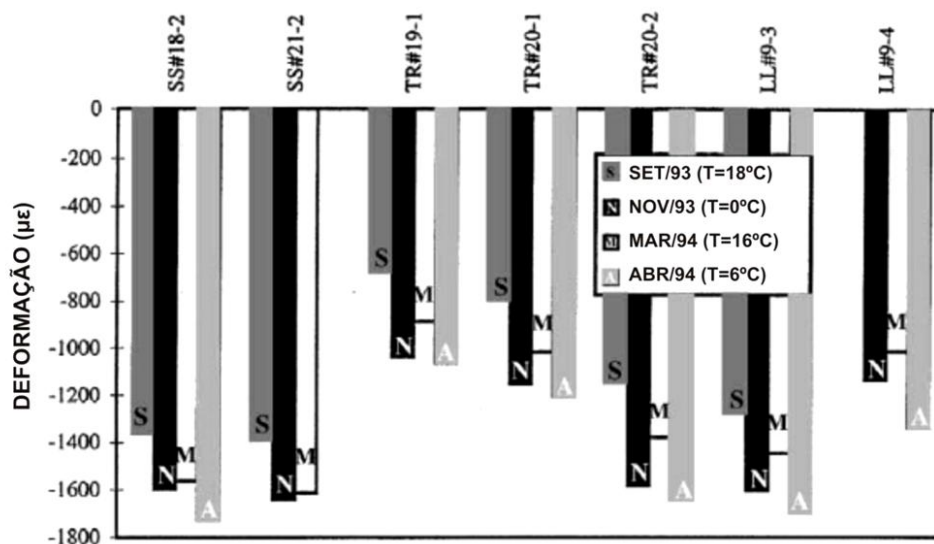


Figura 2.28 - Alívio de deformação termicamente corrigido para o aço (SS), Compósito de Fibra de Carbono (TR) e Leadline (LL) (MEASURES, 2001).

Durante os primeiros 18 meses de monitoramento obteve-se o resultado do relaxamento da tensão inicial, o que nada mais é que a perda de tensão ao longo do tempo, descrito na figura 2.29.

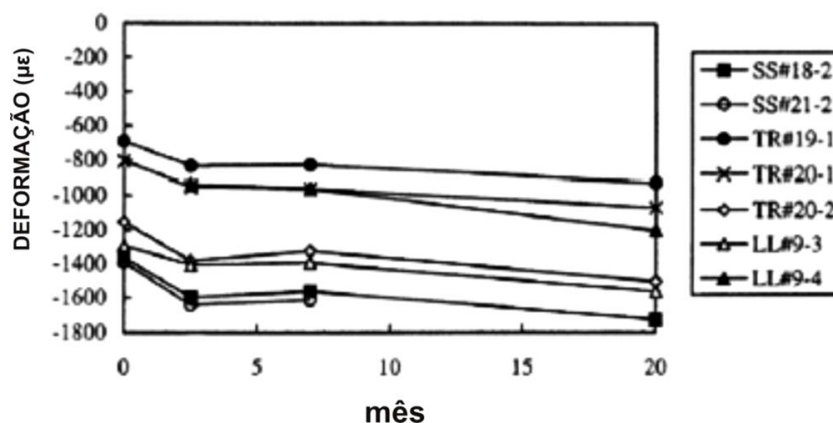


Figura 2.29 - Variação temporal de deformação presentes na Figura 32 (MEASURES, 2001)

O mais interessante na aplicação apresentada por Measures (2001) é o monitoramento contínuo da ponte da Trilha de Beddington. Comparando este tipo de utilização dos sensores ópticos com os sensores elétricos, constata-se a vantagem de utilização destes sensores ópticos para este tipo de monitoramento uma vez que com o passar do tempo o sensor elétrico começa a perder a sua eficiência, devido a fatores ambientais.

Em uma pesquisa descrita por Robertson, Johnson e Wang apud Ansari (2005, pág. 331), sobre a instrumentação do Viaduto North Halawa Valley localizado na ilha do Havaí, apresentavam-se resultados de comparação do monitoramento de

deflexões medidas através de um sistema de linha-base, pesquisa óptica, inclinômetros e modelo SAP2000, conforme figura 2.30.

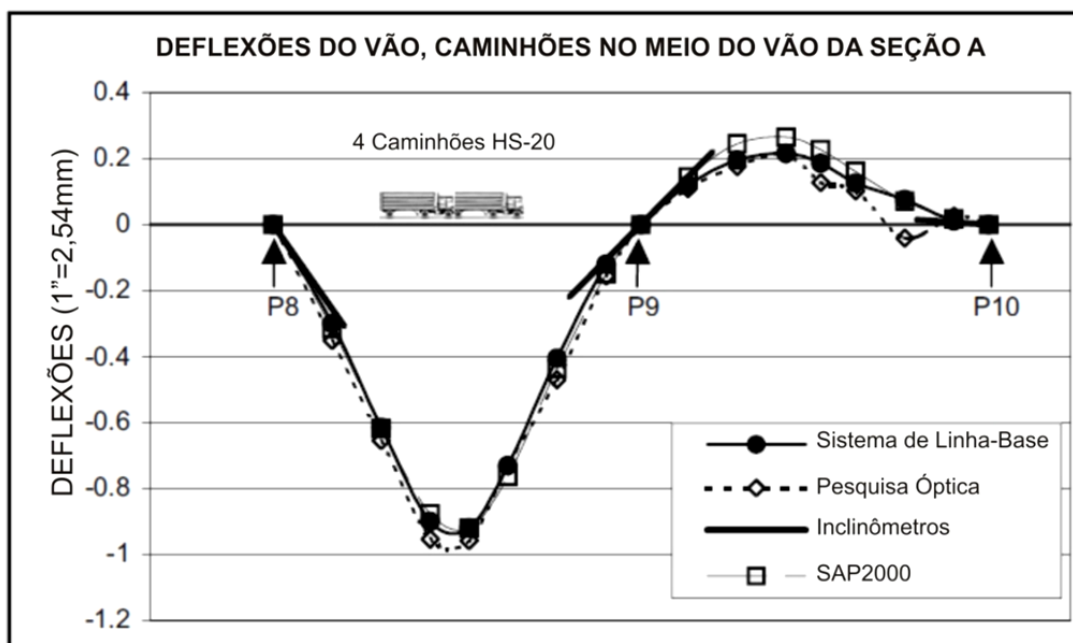


Figura 2.30 - Comparação das deflexões do teste de carga (ANSARI, 2005).

O ensaio descrito na figura 2.30 foi realizado em 1997 através de um teste de carga com caminhões carregados do tipo HS-20. O sistema de linha-base concordou com o levantamento da pesquisa óptica, com exceção dos erros óbvios próximos ao pilar P10. Além do teste de carga, a pesquisa perdurou por um bom tempo, com o intuito de realizar o monitoramento em longo prazo, as informações foram obtidas no período de 1995 a 2003 estão descritas na figura 2.31, comparando as informações do sistema de linha-base, investigação óptica e a previsão teórica do modelo constitutivo SFRAME.

O sistema de linha-base é simplesmente a verificação das flechas das vigas da ponte utilizando uma linha resistente esticada entre os vãos e mensurando a deflexão vertical utilizando-se paquímetros digitais de precisão.

### COMPARAÇÃO DE DEFLEXÃO DA UNIDADE 2IB - 1995-2003

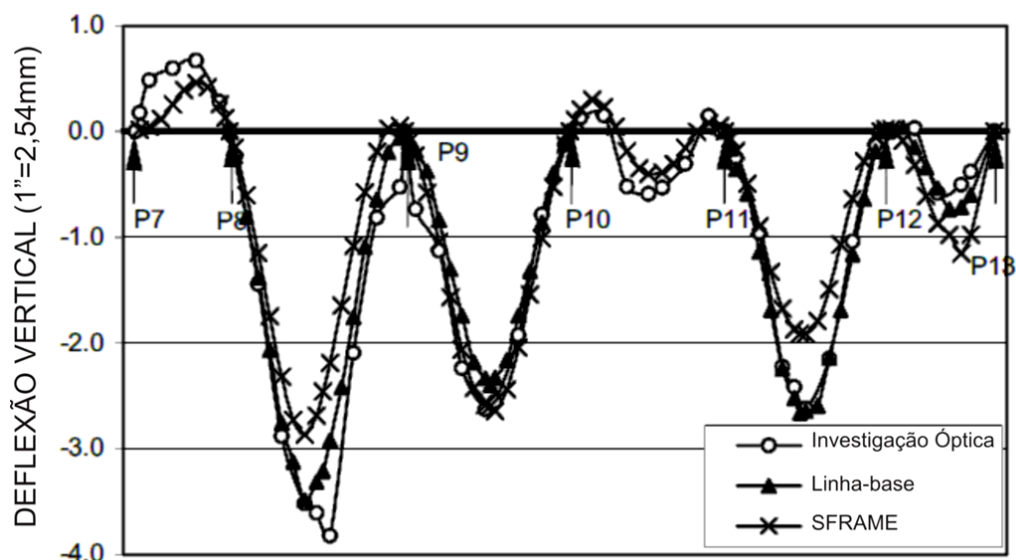


Figura 2.31 - Deflexões verticais para a Unidade 2IB, no período 1995-2003 (ANSARI, 2005).

Segunda a conclusão da pesquisa apresentada por Ansari (2005), o sistema de linha-base apresentou um ótimo desempenho de monitoramento em longo prazo, apenas sendo necessário automatizá-lo, pois utiliza-se de paquímetro digital de precisão para as leituras das deflexões. As investigações ópticas apresentaram erros aparentes nas leituras, mas permaneceram com suas leituras. Já os sensores elétricos utilizados na pesquisa, que por causa das alterações que sofreram nos cabos e nas emendas ao longo do tempo não foram utilizados no monitoramento em longo prazo.

#### 2.5.4. Túneis

Segundo Glišić e Inaudi (2007, pág. 222) o monitoramento de deformações em túneis possui um custo elevado, pois para se determinar a deformação em um ponto, são necessárias três topologias de sensores em paralelo, o que exigiria um grande número dessas topologias. É por isso, que somente as seções transversais mais importantes são instrumentadas. Quando a tensão de cisalhamento não for significativa, a topologia de sensores em paralelo em uma célula poderá ser reduzida a dois, ou seja, os sensores paralelos inclinados podem ser omitidos. Um esquema de utilização de sensores paralelos de forma reduzida é apresentado na figura 2.32.



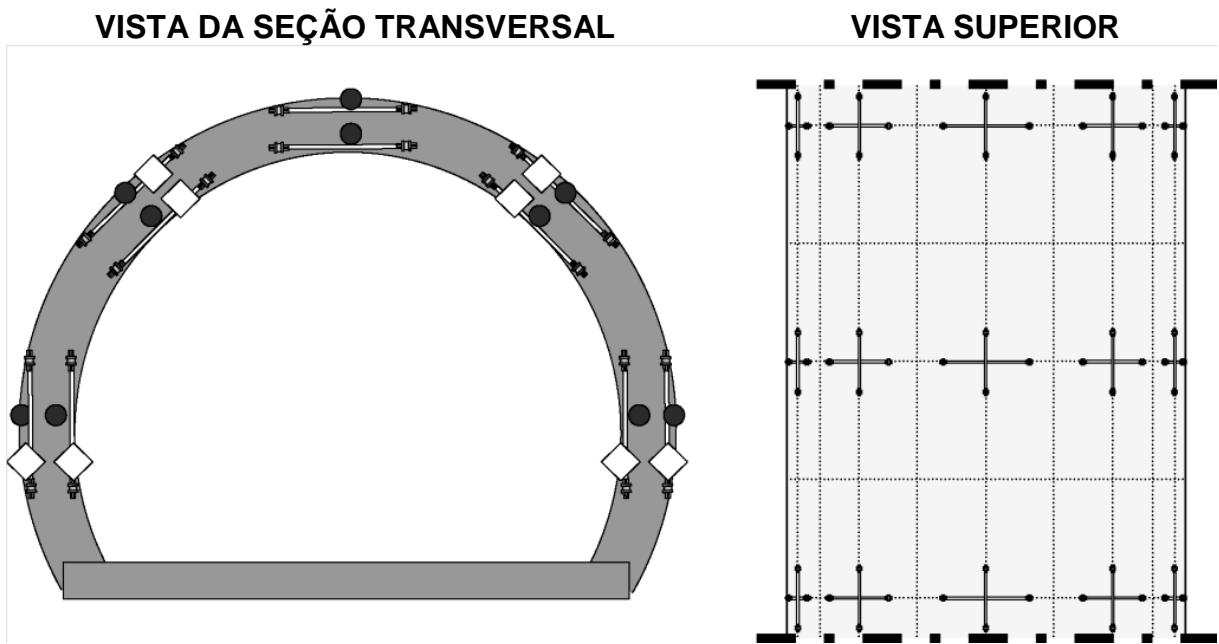


Figura 2.32 - Exemplo de uma rede de sensores para o monitoramento da deformação de túnel (sem controle de tensão de cisalhamento) (SMARTEC apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

Outra aplicação, e uma das mais importantes em túneis, é o monitoramento de convergência da seção transversal. Dependendo da forma da seção do túnel e da fase em que está a obra (estrutura nova: é possível a incorporação dos sensores; estrutura existente: só é possível a instalação na superfície), uma rede de diferentes sensores poderá ser adotada, ver figura 2.33 (GLIŠIĆ e INAUDI, 2007, pág. 219).

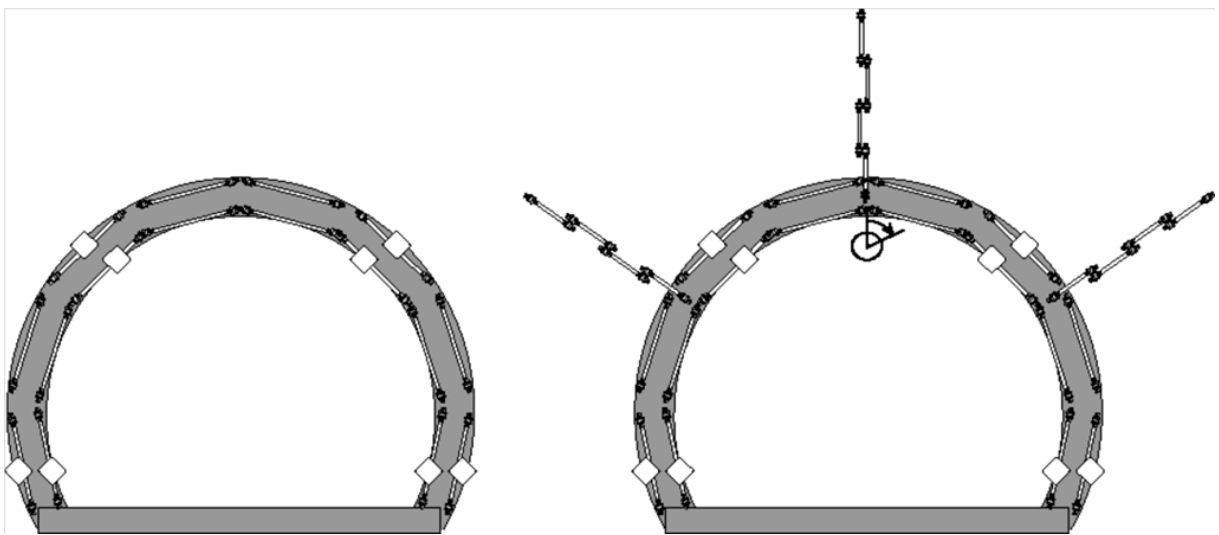


Figura 2.33 - Representação esquemática das redes de sensores para monitorar a convergência de novos túneis usando apenas topologias paralelas (à esquerda) e uso combinado topologias paralelas e extensômetros multiponto (direita) (SMARTEC apud GLIŠIĆ e INAUDI, 2007).

Uma aplicação interessante foi descrita em Ansari (2005, pág. 190) sobre o túnel da construção do Metrô da Linha nº 13 de Tokyo, Japão. Os parâmetros monitorados no túnel foram: o deslocamento transversal e a deformação

longitudinal. As escavações do segmento A do túnel, programada em 5 etapas, foram monitoradas por sensores ópticos distribuídos Brillouin.

As convergências de deslocamento da seção transversal não ultrapassaram a magnitude de 0,9 mm, tanto no sentido vertical quanto no sentido horizontal, conforme figura 2.34. As deformações longitudinais geraram tensões de compressão ao longo do túnel, com exceção nas extremidades e bordas das seções transversais instrumentadas (ANSARI, 2005, pág. 191).

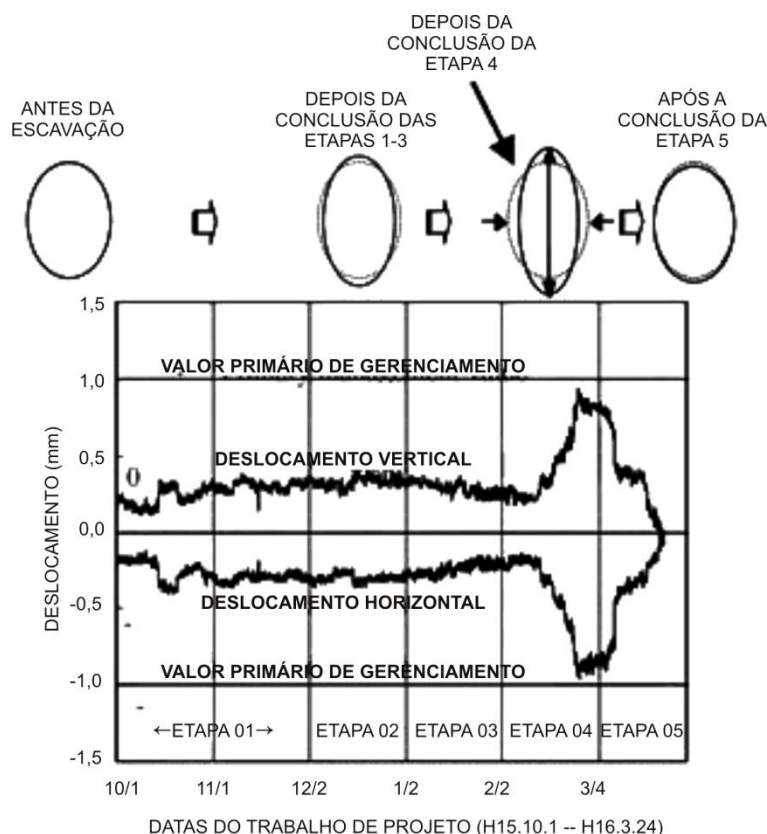


Figura 2.34 - Mudança periódica na convergência dos sensores do túnel (ANSARI, 2005, pág. 191).

A figura 2.34 mostra que durante a escavação da etapa 4 a seção do túnel sofreu um deslocamento na vertical de 1,8mm e uma deslocamento de -1,8mm na horizontal, mas após a conclusão da etapa 5 sua seção quase que retornou a situação inicial.

O túnel Gotthard, uma obra que complementa a linha férrea do projeto Alptransit, atravessando os alpes suíços, foi instrumentado pela empresa Smartech SA. A instrumentação teve o objetivo de monitorar os contrafortes da entrada do túnel e o revestimento de concreto no interior. Foram utilizados sensores ópticos do tipo SOFO, estes darão informações quantitativas sobre as cargas que se desenvolvem nessa estrutura a curto e longo prazo (GLIŠIĆ e INAUDI, 2008).

Outra obra monitorada de interesse para a pesquisa foi a da Estação Alto do Ipiranga em São Paulo. Sua planta é mostrada na figura 2.35. O monitoramento se deteve na observação do comportamento da laje de fundo medindo as seguintes grandezas: (i) pressões na cota da face inferior da laje, (ii) deformações no concreto e em armaduras selecionadas e (iii) temperatura do concreto. A tecnologia utilizada para o monitoramento da Estação foi baseada em fibras ópticas do tipo rede Bragg (ASSIS, TRAUTWEIN e BITTENCOURT, 2008).

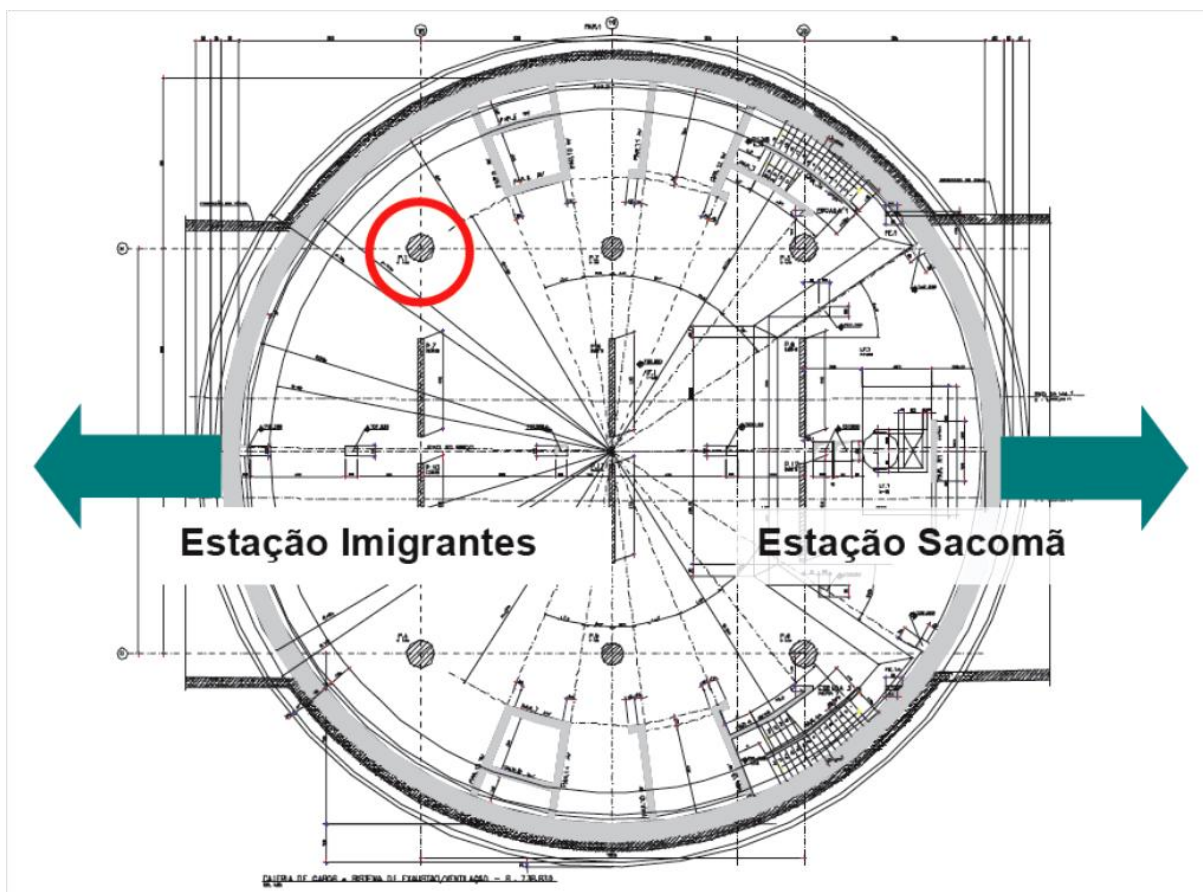


Figura 2.35 - Planta da Estação Metroviária Alto do Ipiranga, na cota da laje de fundo. A região delimitada pela circunferência vermelha corresponde à área monitorada (ASSIS, TRAUTWEIN e BITTENCOURT, 2008).

No monitoramento da Estação Metroviária Alto do Ipiranga foram utilizados os sensores do tipo poro-pressão, extensômetros para armadura e imerso no concreto e o termômetro óptico, conforme é mostrado na figura 2.36.

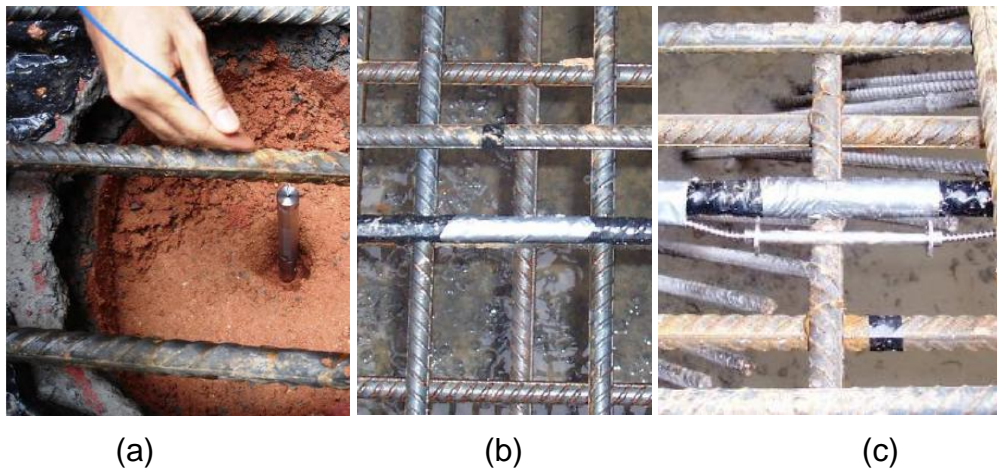


Figura 2.36 - (a) Instalação do sensor poro-pressão, (b) instalação do extensômetro na armadura e (c) instalação de extensômetro imerso (ASSIS, TRAUTWEIN e BITTENCOURT, 2008).

O trabalho apresentado no monitoramento da Estação Metroviária Alto do Ipiranga mostrou que os sensores ópticos são uma alternativa potencial e confiável para o monitoramento de obras, mostrando resultados qualitativos e coerentes, como o resultado esperado pelos projetistas da pressão sob a laje confirmou-se pelos dados apresentados do sensor poro-pressão na figura 2.37 (ASSIS, TRAUTWEIN e BITTENCOURT, 2008).

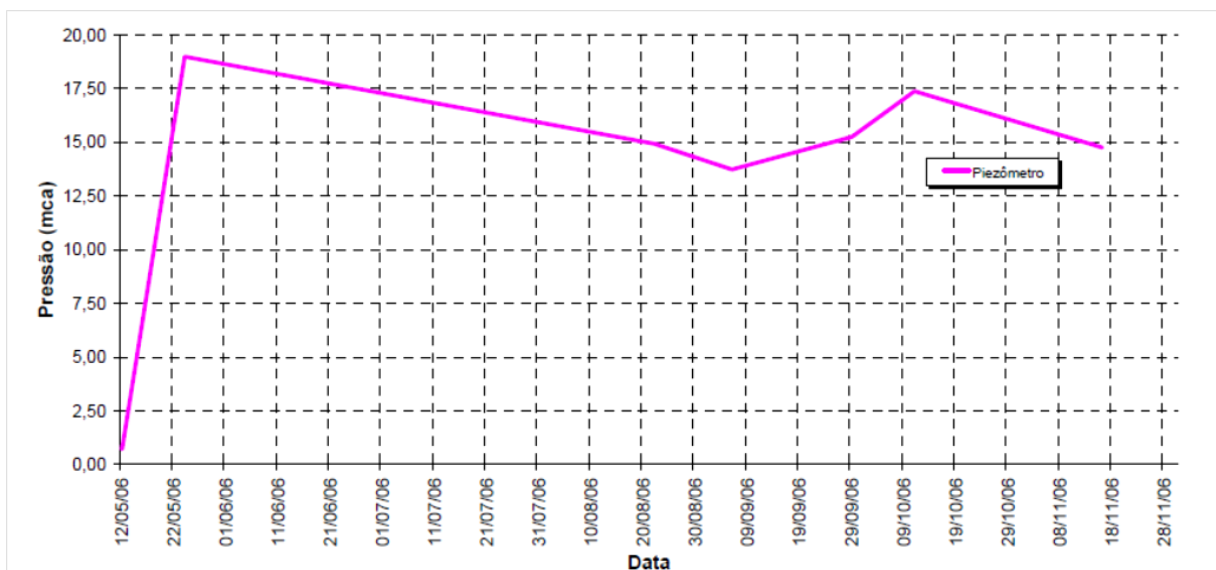


Figura 2.37 - Evolução da pressão na laje de fundo durante a monitoração (ASSIS, TRAUTWEIN e BITTENCOURT, 2008).

### 3. PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA ELÉTRICA

#### 3.1. Princípios Gerais

Segundo Portela e Silva (1996), a extensometria é um conjunto de técnicas que permitem determinar o estado de deformação em torno de um ponto de um corpo, a partir do conhecimento das extensões em várias direções nesse ponto.

O uso de extensômetros de resistência, ou "*strain gages*", para a medida de deformações, é uma das formas mais comuns de medição que transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica, utilizado tanto para a análise experimental de tensões mecânicas como para a determinação das cargas de serviço.

Quando um material metálico sofre uma deformação em suas dimensões provocadas por um agente externo como consequência muda a sua resistência elétrica. O funcionamento dos extensômetros elétricos está baseado neste princípio. Portanto, a operação dos *strain gages* na determinação de deformações ocorre pela variação de resistência elétrica dada pela seguinte equação:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad (3.1)$$

onde:  $k$  é a constante característica do extensômetro;  $R$  é a resistência elétrica dada Ohm ( $\Omega$ );  $\Delta R$  é a variação de resistência elétrica dada Ohm ( $\Omega$ );  $\varepsilon$  é a deformação dada m/m.

A constante característica do extensômetro ( $k$ ), chamado de *gage factor*, depende do material metálico que será usado na sua fabricação, formas construtivas, tamanhos, etc. Este fator indica a proporcionalidade de mudança relativa de resistência em relação a magnitude de deformação medida, pode ser considerado constante sendo, portanto, fornecido pelo fabricante (PORTELA e SILVA, 1996).

O valor da resistência ( $R$ ) do *strain gage* também é fornecido pelo fabricante. Assim, durante a medição, o valor da variação da resistência do extensômetro ( $\Delta R$ ) deverá ser medido pelo usuário.



No processo de monitoramento ou medição, o extensômetro deve ser fixado à superfície da estrutura que sofrerá a deformação, por meio de adesivo apropriado. Após ser submetido a esforços, as dimensões da estrutura sofrerá alterações. O extensômetro, colado à superfície, terá a mesma variação dimensional que a estrutura. Assim, as variações da resistência do extensômetro são proporcionais às variações dos comprimentos mensurados.

### 3.2. Princípios do Circuito de Medição

Para a aferição das variações de resistência são utilizados circuitos elétricos especiais com extensômetros instalados sobre o corpo de prova ou sobre a estrutura em estudo. O circuito é geralmente chamado de “Ponte de Wheatstone”. Este é o circuito mais frequentemente utilizado, pois apresenta maior precisão para medidas de pequenas variações de resistência, conforme o esquema ilustrado na figura 3.1.

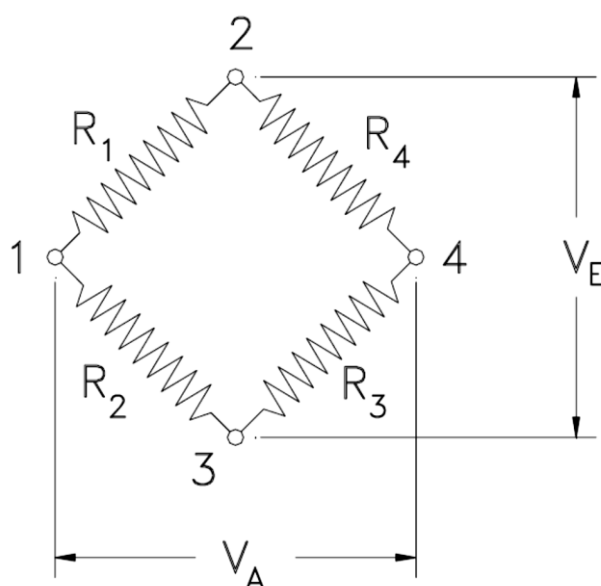


Figura 3.1 – Ponte de Wheatstone (PORTELA e SILVA, 1996).

Uma ou mais resistências da ponte poderão ser substituídas pelos extensômetros. Se apenas uma resistência for substituída tem-se a ligação em um quarto de ponte. Se duas resistências da ponte forem substituídas por dois extensômetros tem-se a ligação em meia ponte. As ligações ainda podem ser em três quartos de ponte e ponte inteira. Neste último caso, todas as resistências da ponte são substituídas por extensômetros. Na figura 3.2 apresentam-se os esquemas de ponte completa, meia ponte e um quarto de ponte.

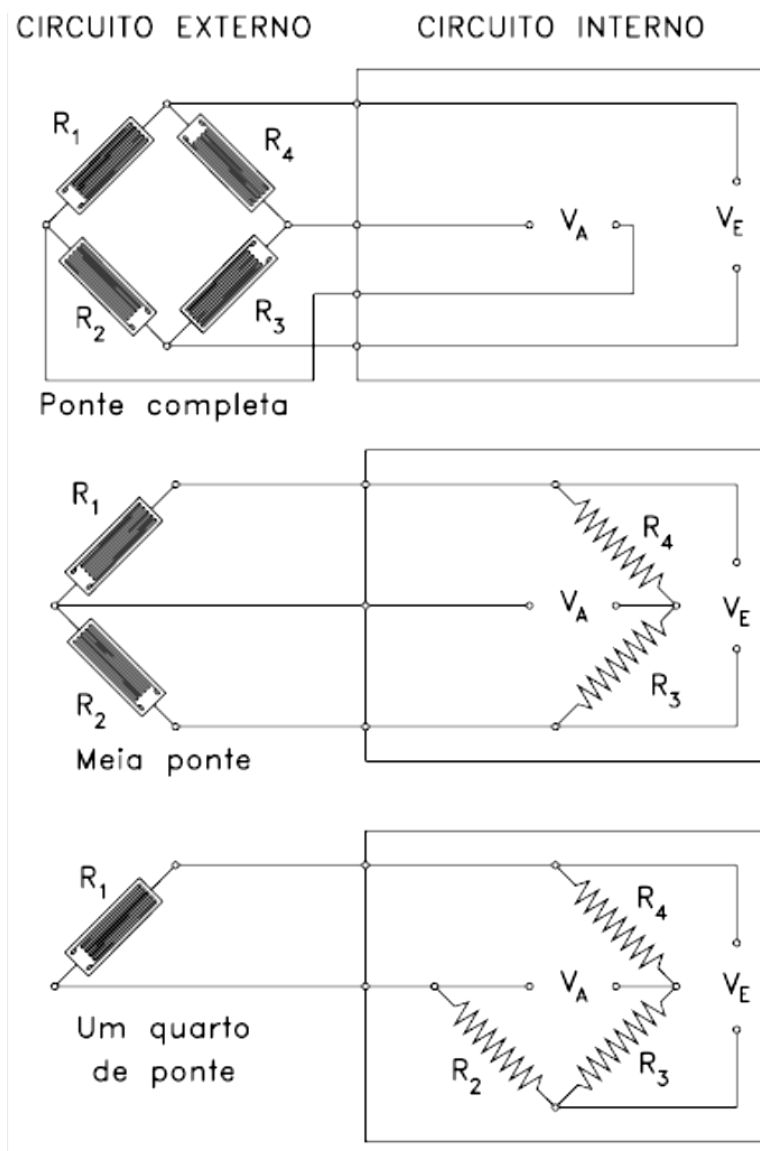


Figura 3.2 - Esquemas de circuitos da Ponte de Wheatstone (PORTELA e SILVA, 1996).

### 3.3. Ordenação dos Extensômetros em Rosetas

Conforme visto anteriormente, para cada resistência da ponte de Wheatstone pode-se substituir por um extensômetro. No entanto, cada trabalho possui a sua peculiaridade de medição, em muitas estruturas ou corpos de prova, utiliza-se mais de um extensômetro em diferentes direções a fim de se descobrir as deformações.

Uma análise completa das tensões envolve medições em mais de uma direção. Segundo Boyes (2010, pág. 95), a utilização de três extensômetros em direções distintas em uma superfície são o suficiente para uma boa análise, uma vez que a deformação é representada por uma elipse.

Assim, utilizam-se as rosetas de extensômetros, que são grupos de extensômetros ligados entre si de modo a ocuparem, no ponto de estudo, posições geométricas bem definidas relativamente às que se tomam para referência. As rosetas podem ser planas ou tridimensionais. As direções comumente escolhidas para medir as deformações são ou  $120^\circ$  ou  $45^\circ$  e  $90^\circ$ . Alguns tipos de roseta estão representados na figura 3.7.

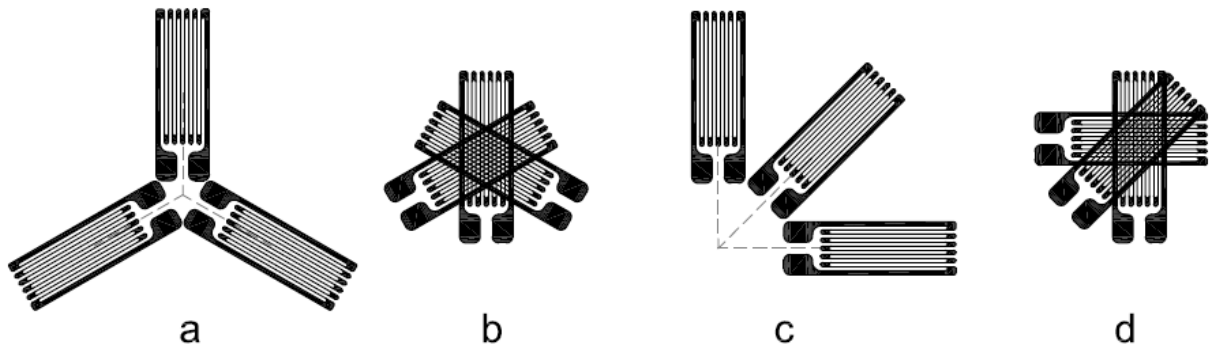


Figura 3.3 - (a) Roseta equidistante  $120^\circ$ , (b) Roseta sobreposta  $120^\circ$ , (c) Roseta equidistante  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , (d) Roseta sobreposta  $45^\circ$  e  $90^\circ$ .

No caso plano, em que são necessários apenas três extensômetros, as configurações mais frequentes são: a roseta retangular ou em estrela (em que os três extensômetros formam entre si ângulos de  $45^\circ$  e  $90^\circ$  como mostra a figura 3.3-a), e a roseta triangular ou equiangular (em que os extensômetros formam entre si ângulos de  $60^\circ$ , como mostra a figura 3.3-b).

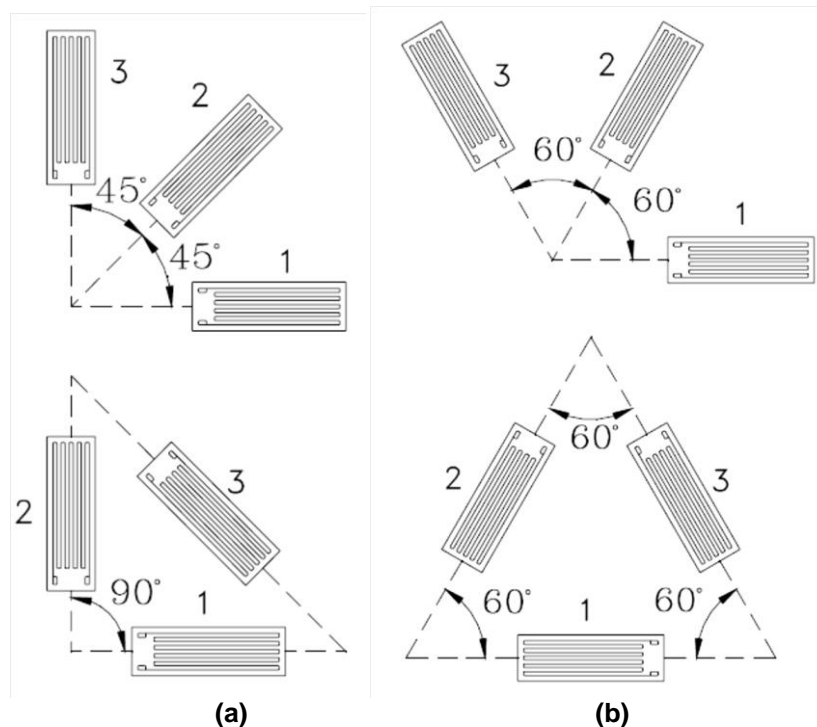


Figura 3.4 - Rosetas: (a) retangular ou estrela e (b) triangular ou equiangular (PORTELA e SILVA, 1996).



Muitas vezes emprega-se um quarto extensômetro que servirá como um aferidor- compensador das leituras feitas, surgindo assim a roseta em leque (figura 3.4-a), roseta em T (figura 3.4-b) e roseta em T-Delta (figura 3.4-c).

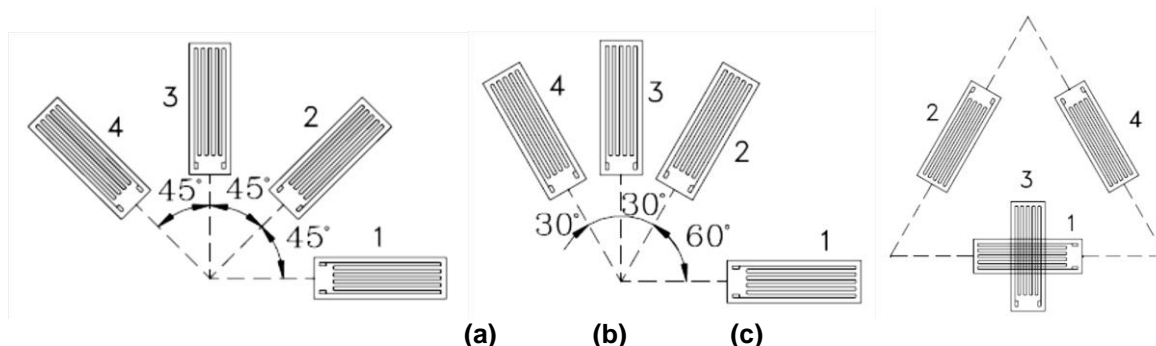


Figura 3.5 - Rosetas: (a) leque, (b) em "T" e (c) em "T"-Delta (PORTELA e SILVA, 1996).

No caso dos estados tridimensionais utilizam-se, normalmente, uma roseta retangular de seis extensômetros dispostos segundo as arestas de um tetraedro reto elementar, podendo ainda usar-se um sétimo extensômetro como corretor colocado normalmente no plano dos extensômetros (4), (5) e (6), como mostra a figura 3.5.

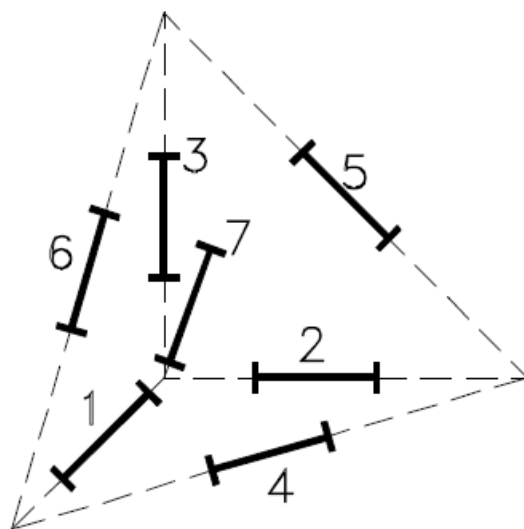


Figura 3.6 - Rosetas tridimensionais (PORTELA e SILVA, 1996).

### 3.4. Extensômetro Elétrico x Extensômetro Óptico

O extensômetro elétrico resistivo (*strain gage*), inventado pelo cientista Arthur Claude Ruge, mede a tensão mecânica do objeto instrumentado pela mudança de sua resistência elétrica. Os tipos de extensômetros são: metálico, semicondutor, vapor depositado, capacitivo, piezoelétrico, fotoelástico, mecânico, dentre outros sistemas (HOFFMANN, 1989).

Segundo Hoffmann (1989, pág. 12), o princípio de funcionamento do extensômetro metálico baseia-se na relação de tensão mecânica/resistência de condutores elétricos. Qualquer condutor elétrico muda a sua resistência a uma variação de tensão mecânica, seja aplicando uma força de tração ou compressão. A mudança de resistência é devida em parte a deformação do condutor e parcialmente devido a mudanças na microestrutura, o que gera uma alteração da resistividade  $\rho$  do material condutor. Esse processo é descrito pela relação:

$$\frac{dR}{R} = \underbrace{\varepsilon(1 + 2\nu)}_{\text{geométrica}} + \underbrace{\frac{d\rho}{\rho}}_{\text{microestrutura}} \quad (3.2)$$

onde:  $R$  é a resistência elétrica,  $\varepsilon$  é a deformação do condutor,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson e  $\rho$  é a resistividade do material metálico.

Para determinados materiais metálicos, a parcela devido a microestrutura da equação 3.2 pode ser considerada nula, uma vez que a variação de resistividade do material condutor é muito pequena. Restando somente a parcela geométrica, e considerando que para materiais no regime plástico as deformações ocorrem a volume constante, considera-se o coeficiente de Poisson igual a 0,5. Desta forma, obtemos uma constante ou fator de calibração ( $Ge$ ) expressa pela equação:

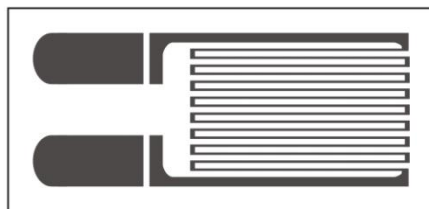
$$Ge = \frac{dR/R}{dl/l} = 2 \frac{\Omega/\Omega}{m/m} \quad (3.3)$$

Na prática, foram realizados vários ensaios com diferentes materiais, através de fios esticados livremente, como resultado concluiu-se que os materiais mais indicados para utilização em extensômetros metálicos resistivos são os que apresentaram uma inclinação  $Ge \cong 2$  da curva  $\Delta R/R(\Omega/\Omega) \times \varepsilon(m/m)$ , pois mantém essa inclinação durante toda a fase elástica do material. Essa inclinação é conhecida como fator de calibração do extensômetro ( $Ge$ ), dada pela equação 3.3 (HOFFMANN, 1989).

Segundo Hoffman (1989, pág. 20), a unidade de deformação do tipo “microstrain” ( $\mu\varepsilon$ ), define-se como uma pseudo-unidade, não havendo nenhuma base matemática, apenas uma designação originada nos Estados Unidos, alertando para o cuidado no uso desta unidade. O valor do microstrain é definido como  $1 \mu\varepsilon = 10^{-6} \text{ cm/cm}$  (WILSON, 2005, pág. 511).

O fator de calibração de um extensômetro elétrico é aproximadamente 2, em comparação ao extensômetro óptico cujo fator é cerca de 0,8, apresentado na figura 3.6 (MEASURES, 2001, pág. 270).

#### Extensômetro em Folha Resistiva



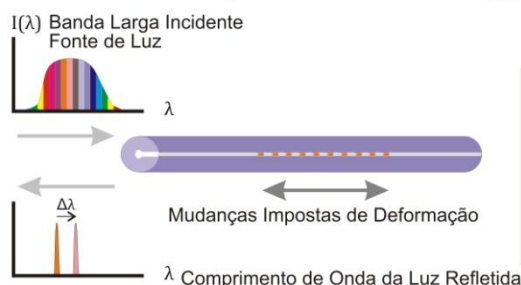
$$\Delta l/l = \varepsilon \longrightarrow \Delta R$$

Fator de Calibragem:

$$Ge = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \sim 2$$

{para fios constantes}

#### Extensômetro Óptico de Rede Bragg



$$\Delta l/l = \varepsilon \longrightarrow \Delta\lambda$$

Fator de Calibragem:

$$Go = \frac{\Delta\lambda/\lambda}{\Delta l/l} = \frac{\Delta\lambda/\lambda}{\varepsilon} \sim 0,8$$

{para fibra de sílica}

Figura 3.7 - Comparação dos fatores de calibragem entre os extensômetros elétrico e óptico (adaptado de MEASURES, 2001).

O fator de calibragem do extensômetro óptico de 0,8 foi devido a ensaios realizados por Alavie et al. (1995) em 24 redes de Bragg no intervalo de comprimento de ondas de 1.532 à 1.554 nm, além da sensibilidade de temperatura  $S_T \cong 6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  para uma faixa de  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  (MEASURES, 2001, pág. 275).

Outro tipo de comparação que pode-se fazer entre os extensômetros resistivos e os ópticos é a instalação dos mesmos, conforme tabela 3.1. Para a instalação do *strain gage* resistivo seguem-se alguns passos como a preparação da superfície, colagem do sensor, solda eletrônica dos cabos aos terminais, estanhamento dos cabos e calibração no sistema de aquisição. Para a instalação extensômetro óptico, os passos são: preparação da superfície, colagem do sensor, conexões/emendas e caracterizar o sensor no sistema de aquisição.

Ainda sobre comparação entre os extensômetros, Kleckers e Günther (2007), afirmam em seu trabalho que a instrumentação de elementos finos, apresenta um erro na leitura de sensores ópticos que pode ser facilmente corrigido por meio da equação abaixo:

$$\varepsilon_{COR} = \frac{0,5 \cdot e}{0,5 \cdot e + d} \cdot \varepsilon_{MED} \quad (3.4)$$

onde:  $\varepsilon_{COR}$  é a deformação na superfície do elemento (deformação corrigida),  $\varepsilon_{MED}$  é a deformação medida pela fibra,  $e$  é a espessura do elemento e  $d$  é a distância do centro das fibras à superfície do elemento, conforme demonstrado na figura 3.8.

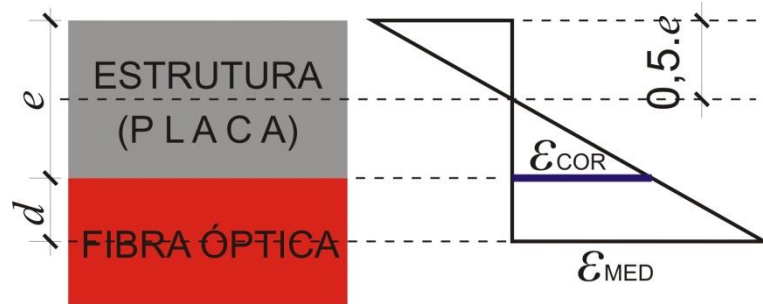


Figura 3.8 - Correção da leitura do sensor óptico para elementos fletidos de pequena espessura.

Como pode-se observar na figura 3.8, a correção matemática da equação 3.4 realiza uma transferência da deformação do centro da fibra óptica para a superfície da estrutura em que a fibra óptica está colada, pois a estrutura instrumentada possui dimensão aproximada à dimensão da fibra óptica. É necessário enfatizar que esta correção apresentada para a deformação medida é válida apenas para a consideração de flexão simples.

Em Kleckers e Günther (2007), apresenta um ensaio de temperatura entre o extensômetro óptico e o elétrico, concluindo que a forte dependência da temperatura do ponto zero de extensômetros ópticos requer uma compensação, conforme se apresenta na figura 3.9.

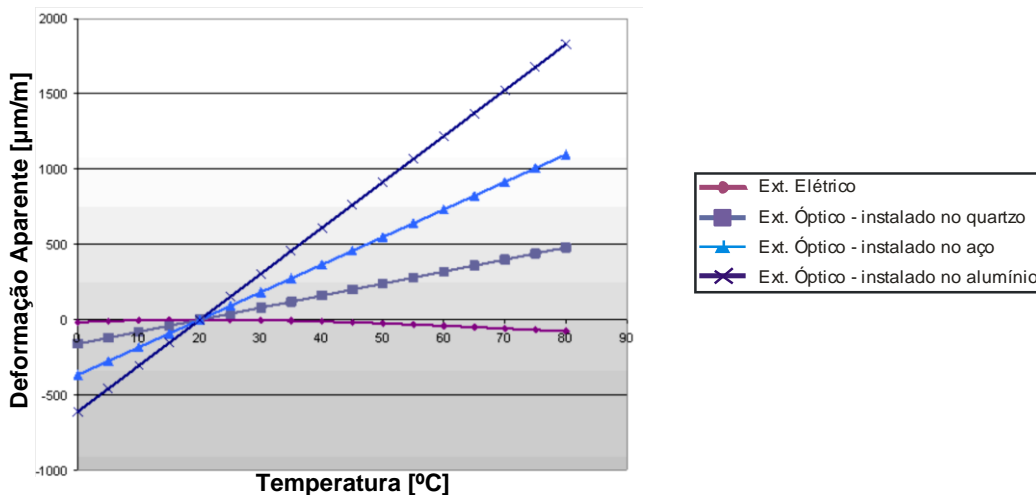


Figura 3.9 - Comparação do sinal de saída de temperaturas do ext. óptico e ext. elétrico. Ext. óptico em diferentes condições de instalação. (KLECKERS e GÜNTHER, 2007).

Tabela 3.1 - Comparação do procedimento de instalação dos extensômetros elétricos com os ópticos.

ATIVIDADES DA INSTRUMENTAÇÃO	PROCEDIMENTOS, MATERIAS E FERRAMENTAS	
	EXTENSÔMETRO ELÉTRICO	EXTENSÔMETRO ÓPTICO
Preparação da Superfície	Procede-se a limpeza da superfície onde será aplicado o sensor por meio de processo químico ou combinação do processo abrasivo e químico.	O processo é o mesmo do extensômetro elétrico, no entanto, deve-se ter um cuidado maior no manuseio do sensor óptico, afim de não danificar a fibra com dobras de raios curtos, o raio mínimo para uma fibra é de 10mm.
Colagem do Extensômetro	Utiliza-se um adesivo para a colagem, tendo sempre o cuidado para não haver solavancos ou bolsas de ar, entre o filme do extensômetro e a superfície. No processo de colagem utiliza-se, como auxílio, uma fita adesiva para que os terminais de conexão não sejam colados na superfície.	Utiliza-se um adesivo para a colagem, tendo sempre o cuidado para não haver solavancos ou bolsas de ar, entre o filme do extensômetro e a superfície. Durante a colagem, deve-se ter o cuidado com a pressão aplicada sobre o extensômetro.
Preparação do Cabeamento	O cabeamento elétrico deve ser estanhado nas extremidades, para garantir a corrente elétrica, evitando o mau contato entre partes metálicas. Cada extensômetro requer um cabo.	O extensômetro óptico é fabricado com cabos de comprimento definido em suas extremidades. Os cabos podem ser emendados (ver item 2.2. componentes passivos).
Conexão do Extensômetro ao Cabeamento	Os terminais do extensômetro devem ser soldados ao cabo, devendo-se usar o ferro de solda eletrônica (tipo lápis) e a bobina de solda estanho. Para conectar o extensômetro ao aparelho de aquisição de dados, dependendo do modelo, pode-se apenas colocar a ponta do cabo no conector parafusado ou soldá-los em um conector para porta LPT. Cada sensor terá que ser ligado numa entrada específica do sistema de aquisição de dados.	A ligação do extensômetro óptico ao sistema de aquisição é realizada por conectores (ferrolho) na placa de entrada (canal). Os sensores podem ser ligados em série até um determinado número, dependendo do fabricante, usando-se apenas uma entrada do sistema de aquisição de dados. Quando conectados em série, deve-se observar o comprimento de onda que o sensor está trabalhando.
Aferição e Calibragem do Extensômetro pelo Sistema de Aquisição	Instalar o extensômetro no sistema de aquisição, calcula-se o seu valor de engenharia, utilizando o valor encontrado no software de aquisição, assim inicia-se a calibração do extensômetro (zerar o sensor). Após a calibração fazer o balanceamento do sensor que determinará os seus valores limites.	O extensômetro é conectado ao sistema de aquisição, a caracterização do sensor é feita pelo programa de interface. Basta escolher o tipo de sensor que está sendo utilizado e dar um nome a ele para realizar um teste de medição.
Interferências	As resistências dos cabos (grandes extensões); interferências eletromagnéticas; variação de temperatura.	Micro-imperfeições originadas de sua fabricação.

## 4. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

### 4.1. Ensaio em Laboratório

Foram realizados alguns ensaios em laboratório com a finalidade de verificar o perfeito funcionamento dos equipamentos e aumentar a experiência no manuseio dos sensores ópticos utilizados. Os ensaios, basicamente, consistiam em comparar os resultados obtidos com os sensores ópticos com os resultados dos tradicionais sensores elétricos.

#### 4.1.1. Ensaio de tração em barras de aço

O primeiro ensaio realizado foi o de três barras de aço, com diâmetro de 20,0 mm e comprimento de 60 cm cada uma. As barras foram instrumentadas com sensores ópticos e sensores elétricos. Utilizando a máquina de tração, foi realizado o ensaio nas barras, denominadas de BA-01, BA-02 e BA-03. O ensaio foi embasado na norma da ABNT, NBR ISO-6892/2002 – “Material Metálico – Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração – Método de Ensaio”. As disposições dos sensores nas barras estão descritas na figura 4.1.

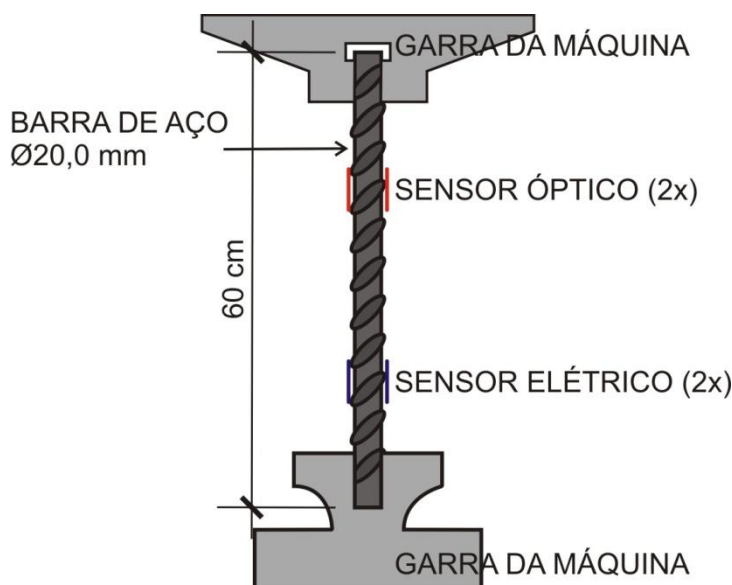


Figura 4.1 - Disposição dos sensores na barra de aço.

Foram fixados dois extensômetros iguais em lados opostos ao longo da barra, sendo um par de extensômetros ópticos e outro par de extensômetros elétricos, visando identificar uma possível excentricidade de força que vier acontecer durante

o ensaio da barra, seja ela decorrente do ajuste do corpo de prova na máquina de tração, ou devido a pequenas deformações das barras, como por exemplo, um descuido no desdobramento da barra.

Foi utilizada neste ensaio uma Câmera Termográfica, conforme figura 4.2, para a leitura da variação da temperatura ao longo do tempo durante o ensaio, pois sabe-se que esta variação influencia diretamente nos resultados apresentados pelos extensômetros. Com o monitoramento da variação térmica, será possível descontar a parcela de deformação devido aos efeitos térmicos.



Figura 4.2 - Câmera Termográfica.  
(Fonte: FLUKE, 2010)

#### 4.1.2. Ensaio no modelo do medidor triortogonal de junta

O segundo ensaio foi realizado com o modelo do medidor triortogonal de junta, com o intuito de utilização dos sensores ópticos para a aplicação na Barragem da UHE Tucuruí. O modelo utilizado encontra-se na figura 4.3.

O medidor triortogonal de junta é um instrumento instalado a cada junta estrutural de uma barragem entre blocos. Conforme a movimentação da estrutura é possível medir o deslocamento entre juntas em três eixos através do medidor triortogonal de junta. Atualmente, na barragem da UHE Tucuruí, as medições são feitas manualmente por profissionais da usina, utilizando um relógio comparador.



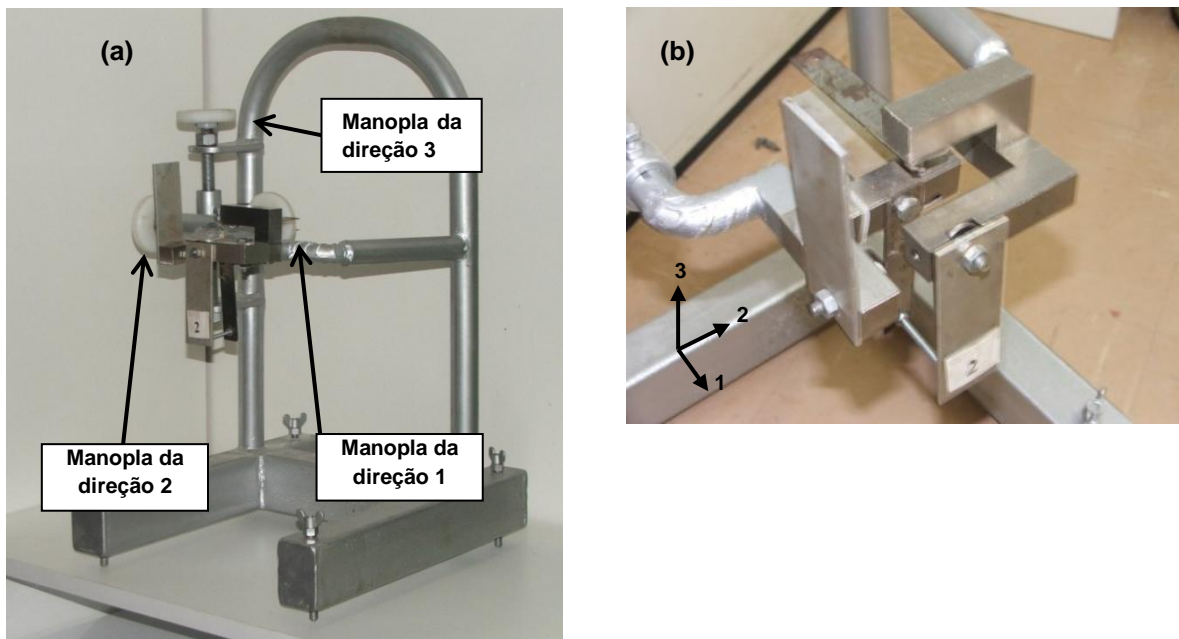


Figura 4.3—(a) Modelo do medidor triortogonal de junta e (b) ampliação do dispositivo de simulação dos deslocamentos.

Como a junta estrutural é composta de dois blocos adjacentes, a finalidade do instrumento é mensurar a variação de deslocamentos entre eles nos três eixos ortogonais. Por isso, em cada eixo de medição do instrumento instalou-se um conjunto de chapas metálicas para permitir a leitura desse instrumento por meio de extensômetros. Essas chapas são compostas de pares opostos, sendo uma chapa rígida e outra flexível. Por serem opostas, cada chapa foi instalada na posição correspondente a um bloco, figura 4.4. Na extremidade da chapa rígida foi instalado um parafuso para transmitir o deslocamento sofrido para a chapa flexível quando houver a movimentação entre blocos. Um desenho do protótipo automatizado do medidor triortogonal de junta está mostrado na figura 4.4.

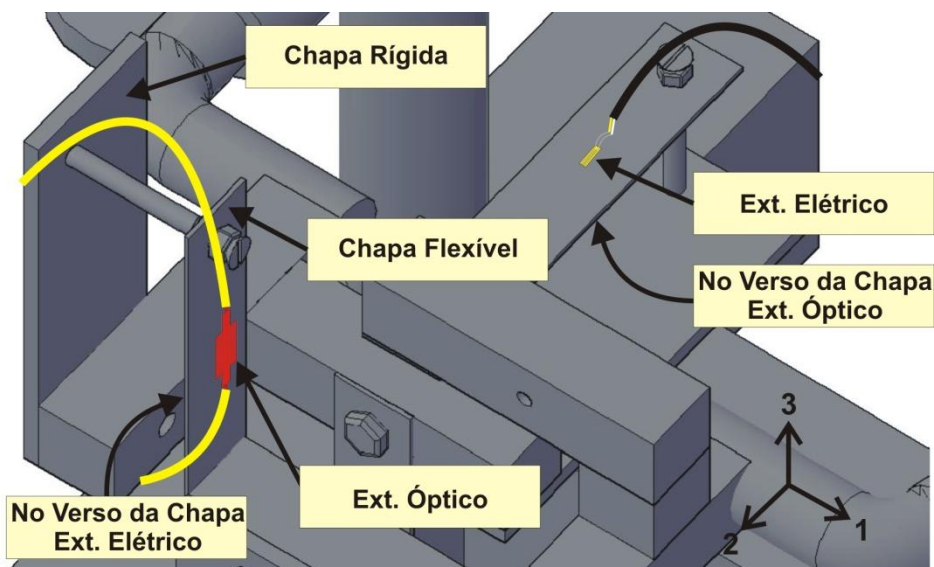


Figura 4.4 - Esquema de instalação de extensômetros no medidor triortogonal de junta.



A chapa flexível comporta-se como uma viga engastada elasticamente, figura 4.5, possibilitando calcular o deslocamento entre os blocos pela determinação da flecha na chapa flexível. Por isso, foram instalados dois extensômetros em cada chapa, um em cada face, sendo um extensômetro óptico e o outro elétrico. Portanto, a chapa flexível se deforma correspondentemente ao deslocamento do respectivo eixo. Como os extensômetros foram instalados em lados opostos da chapa, as deformações medidas têm sinais contrários.

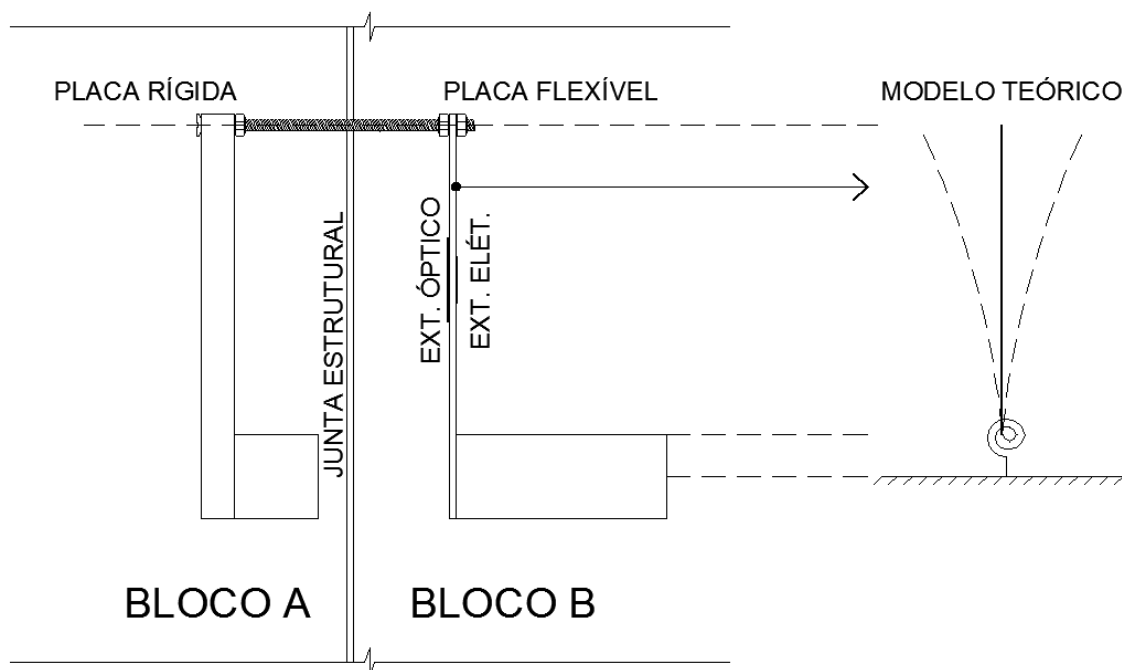


Figura 4.5 - Modelo teórico aplicado no medidor triortogonal de junta para medir o deslocamento.

Além da utilização dos extensômetros foi utilizado um transdutor de deslocamento a laser para aferição e calibração da constante elástica dos apoios das chapas flexíveis e também para comparação das flechas medidas pelos extensômetros. O transdutor a laser é da marca Baumer, classe 2, sendo o seu comprimento de onda de 630 – 680 nm e potência máxima < 1 mW, com uma faixa de medição de 16 à 26mm.

#### 4.1.3. Ensaio de Compressão de Corpos de Prova de Concreto

O terceiro e último ensaio corresponde a testes de compressão em corpos de prova de concreto para a determinação do módulo de elasticidade tangente inicial. O módulo de elasticidade no concreto é dado pela declividade da reta que intercepta os níveis de tensão de 0,5 MPa e  $0,3f_c$ , onde  $f_c$  representa a resistência do concreto, segundo o que prescreve a NBR 8522 – Concreto – Determinação do

Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão x Deformação – Método de Ensaio.

Assim, os corpos de prova foram instrumentados com extensômetros ópticos e extensômetros elétricos, para verificar as deformações longitudinais e assim obter as curvas de tensão-deformação. Para isso utilizou-se a prensa Emic, dotada de um clip-gage para medida de deformações o que possibilitou a comparação entre os resultados obtidos com os extensômetros ópticos e extensômetros elétricos.

#### 4.2. Materiais e Métodos

Para os ensaios em laboratório, serão utilizados as seguintes ferramentas e equipamentos: extensômetros ópticos de tecnologia Rede Bragg (poliamida e compósito) e elétricos; cabos ópticos (monomodos) e elétricos; unidades de medição, *Braggmeter* da empresa *fibersensing* para os sensores ópticos e ADS da empresa *Lynx* para os sensores elétricos (representados na figura 4.6); notebook com a instalação do programa *LynxAqDados* para leitura do sinal elétrico. No caso do sinal óptico, o próprio Braggmeter realiza a leitura e o armazenamento dos dados; câmera termográfica para a leitura da temperatura.



Figura 4.6 - (a) ADS e (b) Braggmeter Benchtop.  
(Fonte: GSTATIC, 2011 e FIBERSENSING, 2010)

Após os ensaios, os dados obtidos foram analisados e estudados para avaliar a diferença que possivelmente possa existir nos resultados obtidos por esses sensores.

### 4.3. Resultados Obtidos

#### 4.3.1. Ensaio de tração das barras de aço

É importante comentar sobre as dificuldades encontradas durante o ensaio. Ao se tentar utilizar os extensômetros ópticos em série constatou-se que o *Braggmeter Benchtop* apenas reconhecia um extensômetro por canal e não mais que isso. Primeiro tentou-se instalar os extensômetros ópticos em série nas barras por meio do procedimento de fusão de fibra óptica, uma vez que as emendas mecânicas por conectores apresentam atenuações maiores de sinal se comparadas com as emendas por fusão. O procedimento de emenda por fusão está apresentado na figura 4.7.

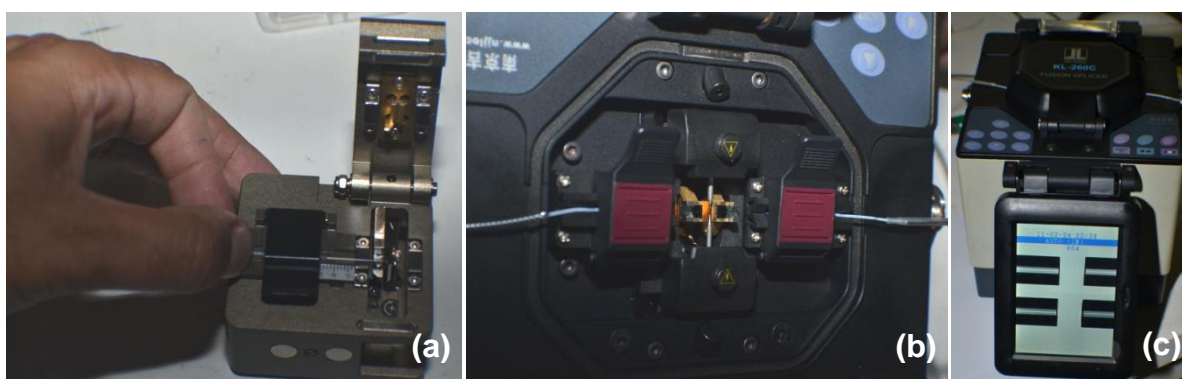


Figura 4.7 - Processo de fusão de fibra óptica: (a) clivagem, (b) eletrodo de fusão e (c) aparelho de fusão.

Durante o processo de emenda da fibra óptica, foi observado que no revestimento do cabo que está atrelado ao sensor encontra-se uma proteção metálica. Essa proteção garante ao cabo uma maior robustez de trabalho, como pode-se observar na figura 4.8.

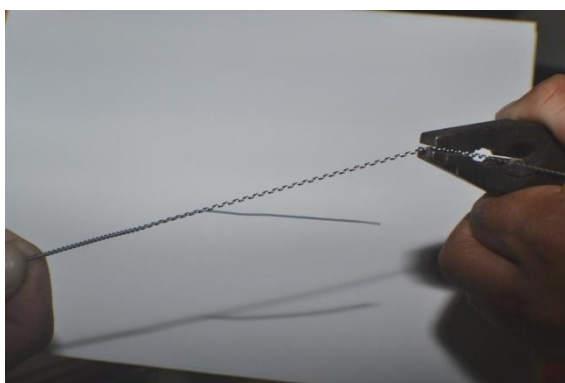


Figura 4.8 - Revestimento metálico do cabo da fibra óptica.

Mesmo com a emenda por fusão, o sistema *Braggmeter Benchtop* não reconheceu mais que um sensor na rede da fibra. A partir daí, utilizou-se os equipamento *Power Meter* e OTDR para verificação da fibra óptica e suas

características, sendo que o resultado mostrou que o problema encontrado pelo trabalho não estava inserido na fibra ou no sensor, mas sim no interrogador óptico, isto é, o sistema de aquisição *Braggmeter*. A figura 4.9 mostra a aplicação dos equipamentos *Power Meter* e OTDR na rede óptica do ensaio das barras de aço.



Figura 4.9 - Inspeção da fibra óptica pelo aparelho OTDR e Power Meter.

Para dar prosseguimento dos ensaios utilizou-se um interrogador óptico *Braggmeter* industrial em substituição pelo *Benchtop*, o interrogador elétrico ADS-2000 e uma Câmera Termográfica para verificar as variações de temperatura durante o ensaio de tração na barra. O monitoramento da temperatura durante o ensaio é importante, pois esta tem influência conforme o alongamento da barra, já que a barra libera energia aumentando a sua temperatura, que poderá influenciar nos resultados apresentados pelos sensores ópticos.

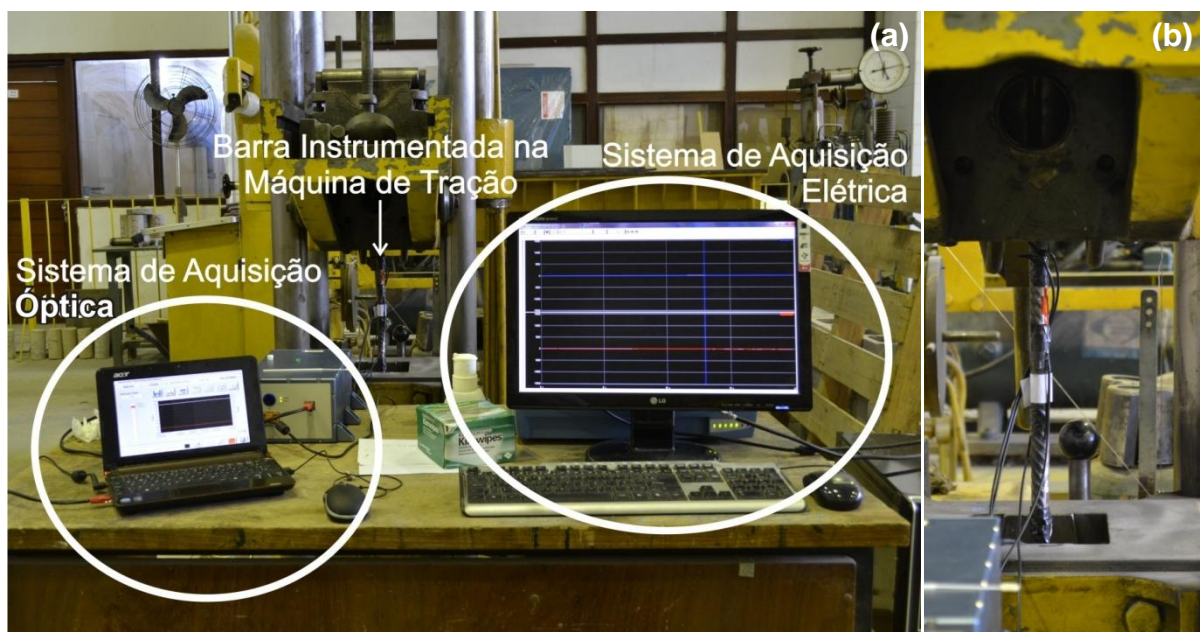


Figura 4.10 - Ensaio de tração das barras de aço: (a) sistemas de aquisições e (b) barra instrumentada.



A figura 4.11 mostra a temperatura das barras através da imagem capturada pela câmera termográfica na máquina de tração durante o ensaio. Para cada barra verificou-se a temperatura final no momento próximo a ruptura, sendo necessário realizar uma interpolação para a correção dos valores obtidos pelo extensômetro óptico.

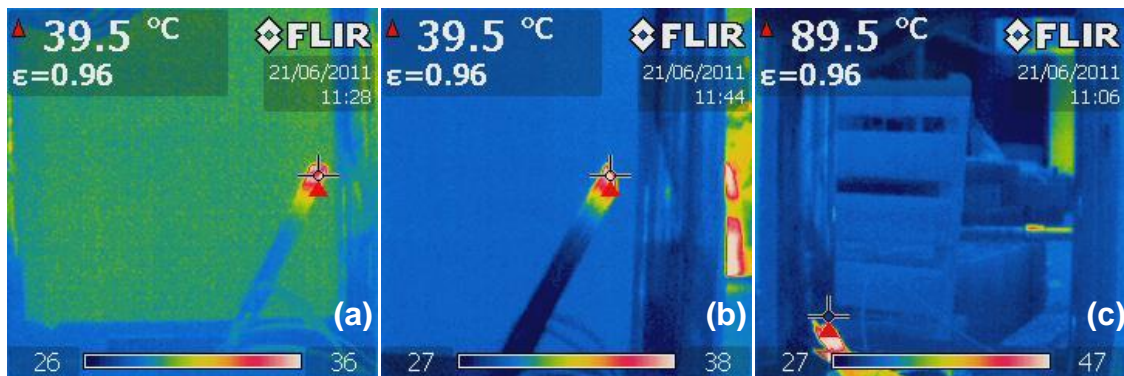


Figura 4.11 - Imagem da câmera termográfica das barras: (a) BA-01, (b) BA-02 e (c) BA-03.

Na figura 4.12, apresentam-se a comparação das curvas as séries temporais de deformação do extensômetro óptico e elétrico. Como em cada barra, instalou-se um par de cada tipo de extensômetro, têm-se quatro curvas de comparação para cada barra, sendo um par de extensômetros ópticos – direito e esquerdo, o outro par de extensômetros elétricos – direito e esquerdo.

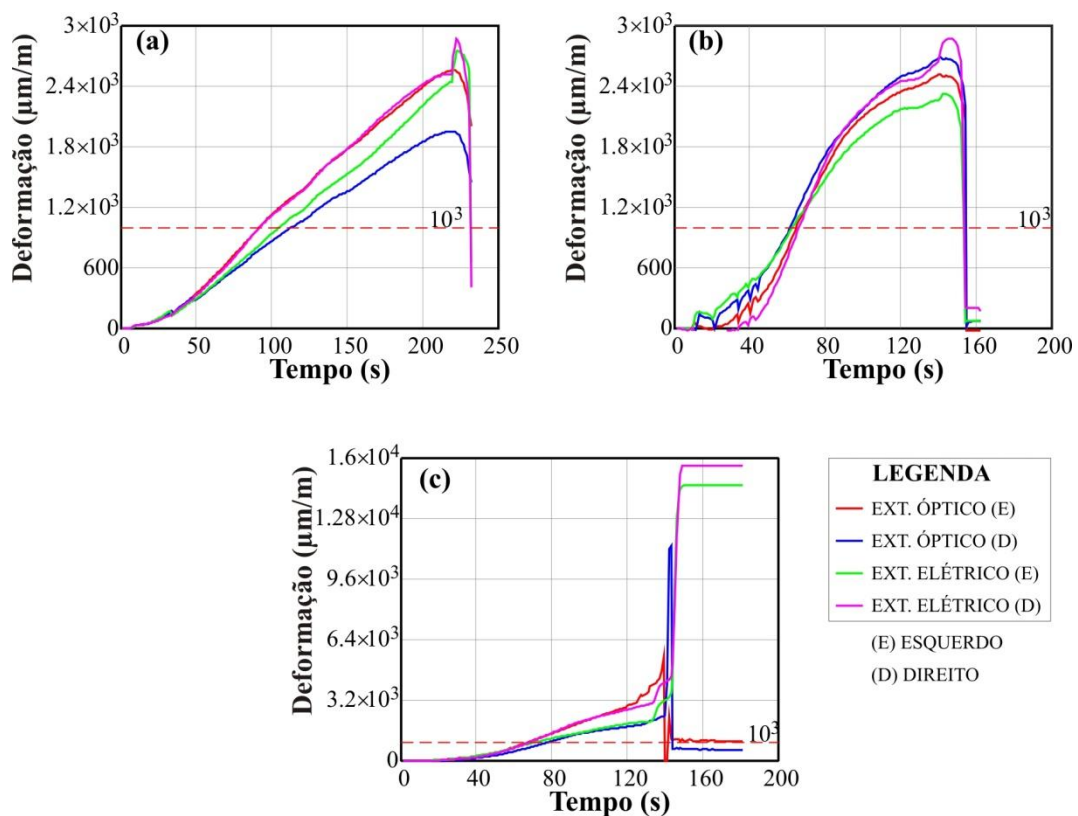


Figura 4.12 - Curvas de deformação: (a) BA-01, (b) BA-02 e (c) BA-03.

Conforme a figura 4.12-a percebe-se que o sensor óptico direito apresenta uma diferença menor que os demais extensômetros, podendo justificar essa diferença ao efeito do adesivo utilizado no processo de fixação do sensor, já demonstrado pelo trabalho de Bagchi et al (2009). A figura 4.12-b apresenta uma perturbação inicial na leitura das deformações devido ao desgaste das garras da máquina de tração. A figura 4.12-c mostra que a barra BA-03 foi a que mais se deformou, mostrando que os extensômetros ópticos deixaram de medir segundos antes do rompimento da barra, sendo considerada a carga de ruptura medida pelo extensômetro elétrico, o que ficou evidente neste ensaio foi o limite de resistência apresentado pelo sensor óptico comparado ao elétrico.

Em seguida, mostra-se a figura 4.13 com as curvas das séries temporais de deformação média do extensômetro óptico e as curvas das séries temporais de deformação média do extensômetro elétrico, para cada barra, sendo 4.13-a para BA-01, 4.13-b para BA-02 e 4.13-c para BA-03.

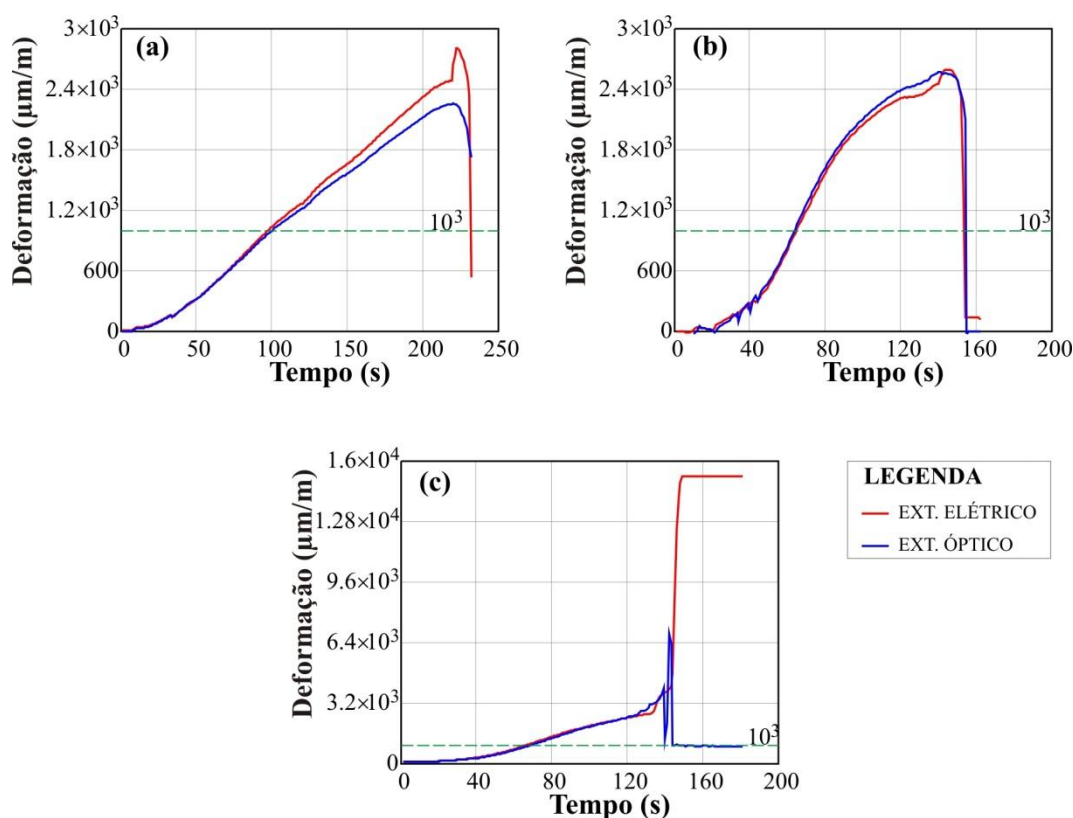


Figura 4.13 - Curvas de deformação dos valores médios: (a) BA-01, (b) BA-02 e (c) BA-03.

A temperatura ambiente foi medida em aproximadamente 30° C. Assim, dentro do intervalo de temperatura para cada barra, foi interpolado valores de temperatura para verificar a variação e corrigir os valores de deformação obtidos com os extensômetros óptico e elétrico, sendo o óptico corrigido de acordo com as orientações do anexo B.

A partir dos dados medidos foi possível a comparação entre as deformações medidas em cada barra de aço por meio dos extensômetros elétricos e ópticos. No entanto, a correção da deformação gerada pela variação de temperatura aumentou a diferença entre esses extensômetros, que foi calculado para os pontos de deformação de 100, 500, 10<sup>3</sup> e 2x10<sup>3</sup> μm/m. Na Tabela 4.1 apresenta-se a diferença percentual das leituras dos extensômetros medidas nas três barras de aço.

Tabela 4.1 - Diferenças percentuais entre os resultados dos extensômetros.

Barra	Diferença (%)*							
	para 100 μm/m		para 500 μm/m		para 10 <sup>3</sup> μm/m		para 2x10 <sup>3</sup> μm/m	
	Elétrico - Óptico	Elétrico - Óptico Corrigidos	Elétrico - Óptico	Elétrico - Óptico Corrigidos	Elétrico - Óptico	Elétrico - Óptico Corrigidos	Elétrico - Óptico	Elétrico - Óptico Corrigidos
BA-1	-5,61	-12,52	-1,03	-5,61	-3,73	-6,98	-8,07	-11,89
BA-2	-21,87	-23,59	7,10	1,06	3,76	1,68	2,68	0,79
BA-3	2,06	-0,23	-10,40	-31,80	-7,59	-22,03	-1,72	-3,66

$$*Diferença = \left( \frac{\text{Deformação óptico} - \text{Deformação elétrico}}{\text{Deformação elétrico}} \right) \cdot 100$$

A análise da figura 4.13 permite concluir que na barra BA-01 as deformações do extensômetro elétrico, a partir dos 10<sup>3</sup>μm/m, estão acima dos valores do extensômetro óptico; para a barra BA-02 ocorre o contrário, os valores do extensômetro óptico estão acima dos resultados apresentado pelo extensômetro elétrico; para a barra BA-03, ocorre que ora os valores do extensômetro óptico estão acima e ora estão abaixo dos valores do extensômetro elétrico. Outra observação foi a diferença do tempo de ensaio, onde a BA-01 rompeu em mais de 200s e a BA-02 em menos de 200s. A barra BA-03 foi que apresentou elevadas deformações até o seu rompimento.

#### 4.3.2. Ensaio com o modelo do medidor triortogonal de junta

O ensaio com o medidor triortogonal de junta foi uma verificação de variação de translação em três eixos ortogonais, utilizando o extensômetro óptico, o extensômetro elétrico e o transdutor linear elétrico a laser. A figura 4.14 mostra o modelo do medidor triortogonal de junta instrumentado com os dois sistemas de aquisição de dados, elétrico e óptico.



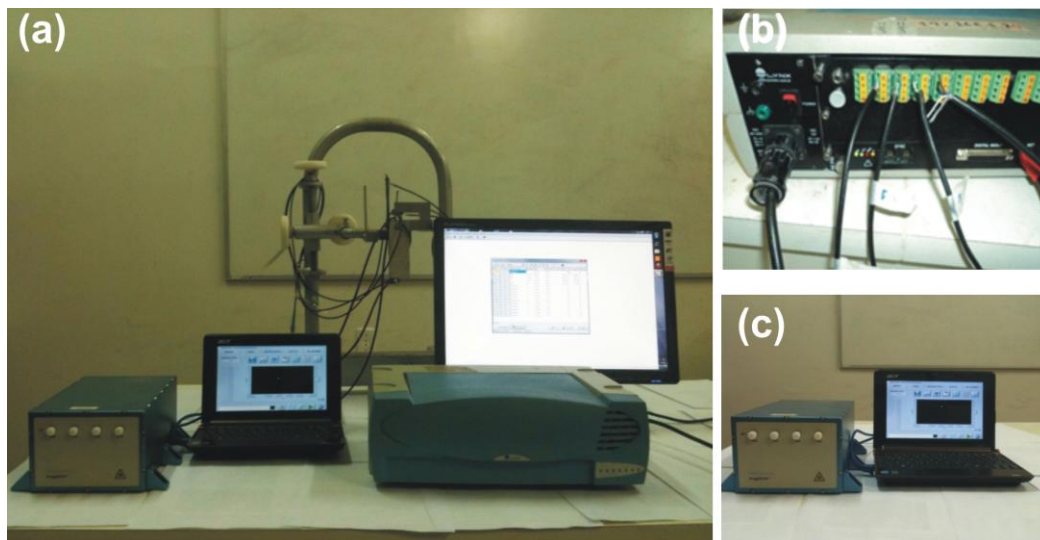


Figura 4.14 - Ensaio com o modelo de medidor triortogonal de junta instrumentado: aparato experimental (a), sistema de aquisição elétrico ADS-2000 (b) e sistema de aquisição óptico Braggmeter Industrial (c).

Observa-se na figura 4.14-b a quantidade de canais e cabos utilizados pelos sistemas de aquisição ADS-2000 para o ensaio é diferente. Enquanto o sistema óptico, figura 4.14-c, utiliza apenas um canal e sensores em série, o elétrico necessita de quatro canais para o seu funcionamento utilizando sensores em paralelo.

Na Figura 4.15 verificam-se as chapas flexíveis instrumentadas com extensômetros óptico e elétrico e o transdutor de deslocamento a laser utilizado para medir a flecha total na extremidade das chapas.

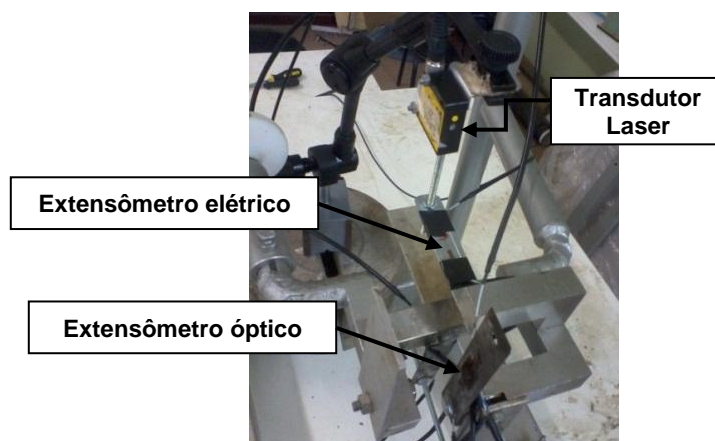


Figura 4.15 - Chapa flexível do modelo de medidor triortogonal de junta.

Durante o teste foi observado que os valores de deformações medidos pelos extensômetros ópticos tendem a ser superiores aos valores medidos pelos extensômetros elétricos. Quando realizada a correção dos valores ópticos pela equação 3.4, as diferenças em relação aos valores dos extensômetros elétricos aumentaram, conforme pode ser observado na Figura 4.16.

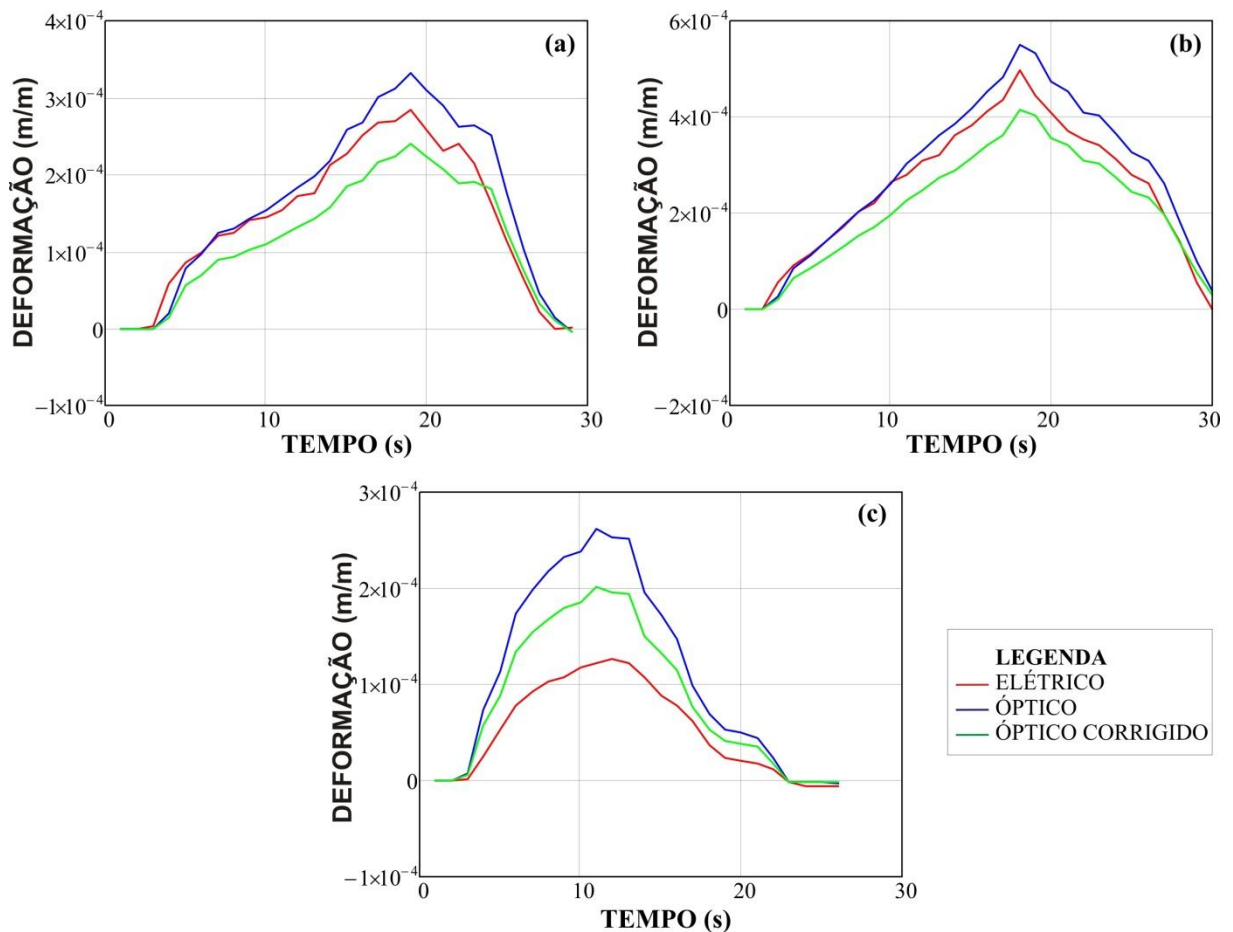


Figura 4.16 - Deformações medidas pelos extensômetros: (a) Direção 1, (b) Direção 2 e (c) Direção 3.

A partir dos dados medidos foi possível a comparação entre as deformações máximas medidas em cada chapa flexível por meio dos extensômetros elétricos e ópticos, bem como o valor da deformação do extensômetro óptico corrigido por meio da equação 3.4. Na tabela 4.2 apresenta-se a diferença percentual das leituras dos extensômetros medidas nas três direções de referência, tomando por base o ponto máximo de deformação.

Tabela 4.2 - Diferenças percentuais entre os resultados dos extensômetros.

POSIÇÃO	DIFERENÇA (%)*	
	ELÉTRICO - ÓPTICO	ELÉTRICO - ÓPTICO CORRIGIDO
Direção 1	17,18	-15,78
Direção 2	10,68	-16,65
Direção 3	114,78	65,97

$$*Diferença = \left( \frac{\text{Deformação óptico} - \text{Deformação elétrico}}{\text{Deformação elétrico}} \right) \cdot 100$$

O engaste perfeito é uma situação que dificilmente aparece na Análise Experimental. Por isso, a consideração de um engaste elástico onde é permitido o giro do apoio, figura 4.17.

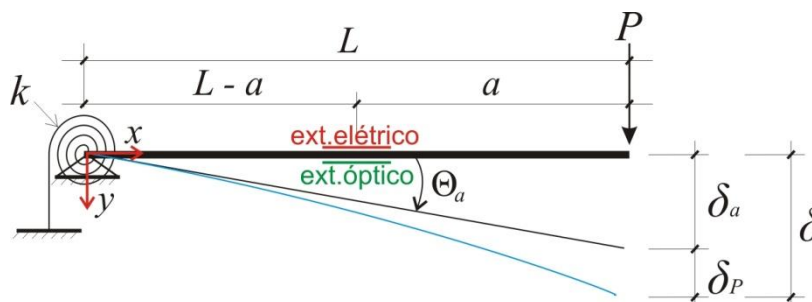


Figura 4.17 - Modelo analítico adotado para as chapas flexíveis.

Na situação supracitada, a flecha da barra tem uma parcela devido ao giro do apoio e outra decorrente da flexão (BLANCO, OLLER e GIL, 2008), sendo dada pela equação 4.1.

$$\delta = \left( \frac{P \cdot L}{k} \right) \cdot \frac{1}{\delta_a} + \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \cdot \frac{1}{\delta_P} \quad (4.1)$$

onde:  $P$  é a força calculada aplicada;  $L$  é o comprimento da barra;  $E$  é o módulo de elasticidade do material;  $I$  é o momento de inércia da seção e  $k$  é a constante de engastamento.

O cálculo da constante elástica do apoio,  $k$ , foi realizada a partir da determinação da curvatura na seção instrumentada com os valores dos extensômetros instalados, em uma face o óptico e na outra o elétrico, e também da medida das flechas da chapa, medida pelo transdutor de deslocamento a laser. A dedução da equação 4.1 encontra-se no anexo C.

A figura 4.18 apresenta uma comparação dos deslocamentos sofridos pelo medidor de juntas nas direções 1 e 2, considerando os valores extraídos pelos extensômetros e calculados por meio da equação 4.1, com os resultados obtidos pelo transdutor de deslocamento a laser.

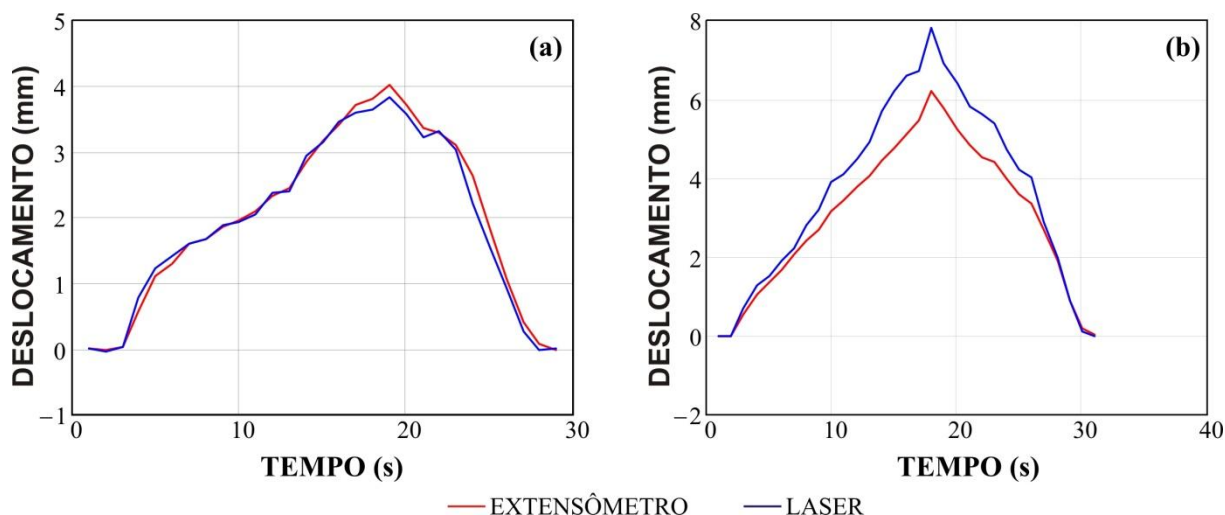


Figura 4.18 - Comparação dos deslocamentos sofridos pelo medidor de junta: (a) Direção1 e (b) Direção2.

Na tabela 4.3 apresenta-se o erro máximo percentual entre os deslocamentos máximos medidos pelo laser e os deslocamentos calculados por meio das deformações máximas medidas pelos extensômetros nas direções 1 e 2.

Tabela 4.3 - Erro máximo percentual dos deslocamentos medidos diretamente pelo transdutor de deslocamento e os calculados a partir das deformações dos extensômetros.

POSIÇÃO	ERRO (%)*
Direção 1	5,24
Direção 2	-20,45

$$*Erro = \left( \frac{\text{Deslocamento extensômetro} - \text{Deslocamento laser}}{\text{Deslocamento laser}} \right) \cdot 100$$

Dos resultados apresentados na tabela 4.3 verifica-se que o erro máximo percentual foi o módulo de aproximadamente 20%, sendo que nestas análises outras fontes de erro estão associadas tais como desconhecimento do valor do módulo de elasticidade do material das chapas flexíveis e também imprecisões nas distâncias mostradas na figura 4.17.

#### 4.3.3. Ensaio dos Corpos de Prova de Concreto

O ensaio seguiu as orientações da norma NBR-8522, sendo instrumentados três corpos de prova cilíndricos de 15x30cm. Os corpos de prova confeccionados com concreto foram identificados como T1, T2 e T3. Cada corpo de prova foi instrumentado com três sistemas de aquisição de dados: sistema *EMIC*, sistema *Braggmeter* e sistema *ADS*. A figura 4.19 mostra o corpo de prova instrumentado com os extensômetros.

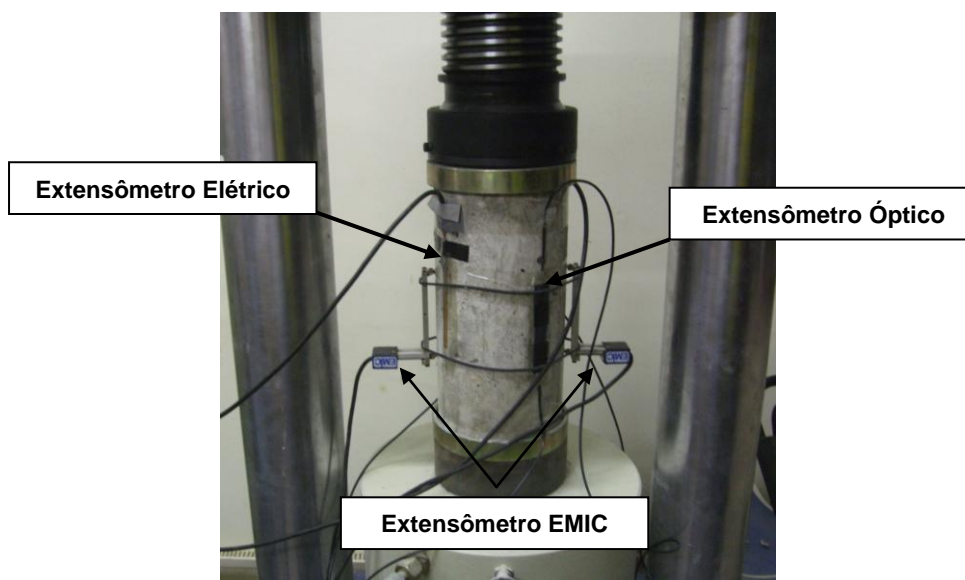


Figura 4.19 - Corpo de prova cilíndrico instrumentado.

Em cada corpo de prova foram instalados dois extensômetros de cada sistema de aquisição. O tratamento dos dados obtidos com o ensaio foram analisados e explicitados através de gráficos que serão descritos a seguir.

Primeiramente, a figura 4.20 apresenta o ensaio de módulo de elasticidade tangente inicial do corpo de prova T1, conforme as orientações da NBR-8522, apresentando a evolução de três ciclos de carregamento e descarregamento, o último carregamento que seria o quarto ciclo é onde se calcula o módulo de elasticidade do concreto e finaliza com o rompimento do corpo de prova. As figuras 4.20-a, 4.20-b e 4.20-c são os resultados para os extensômetros EMIC. As figuras 4.20-d, 4.20-e e 4.20-f são os resultados obtidos com os extensômetros ópticos. Por fim, as figuras 4.20-g, 4.20-h e 4.20-i são resultados extraídos com os extensômetros elétricos.

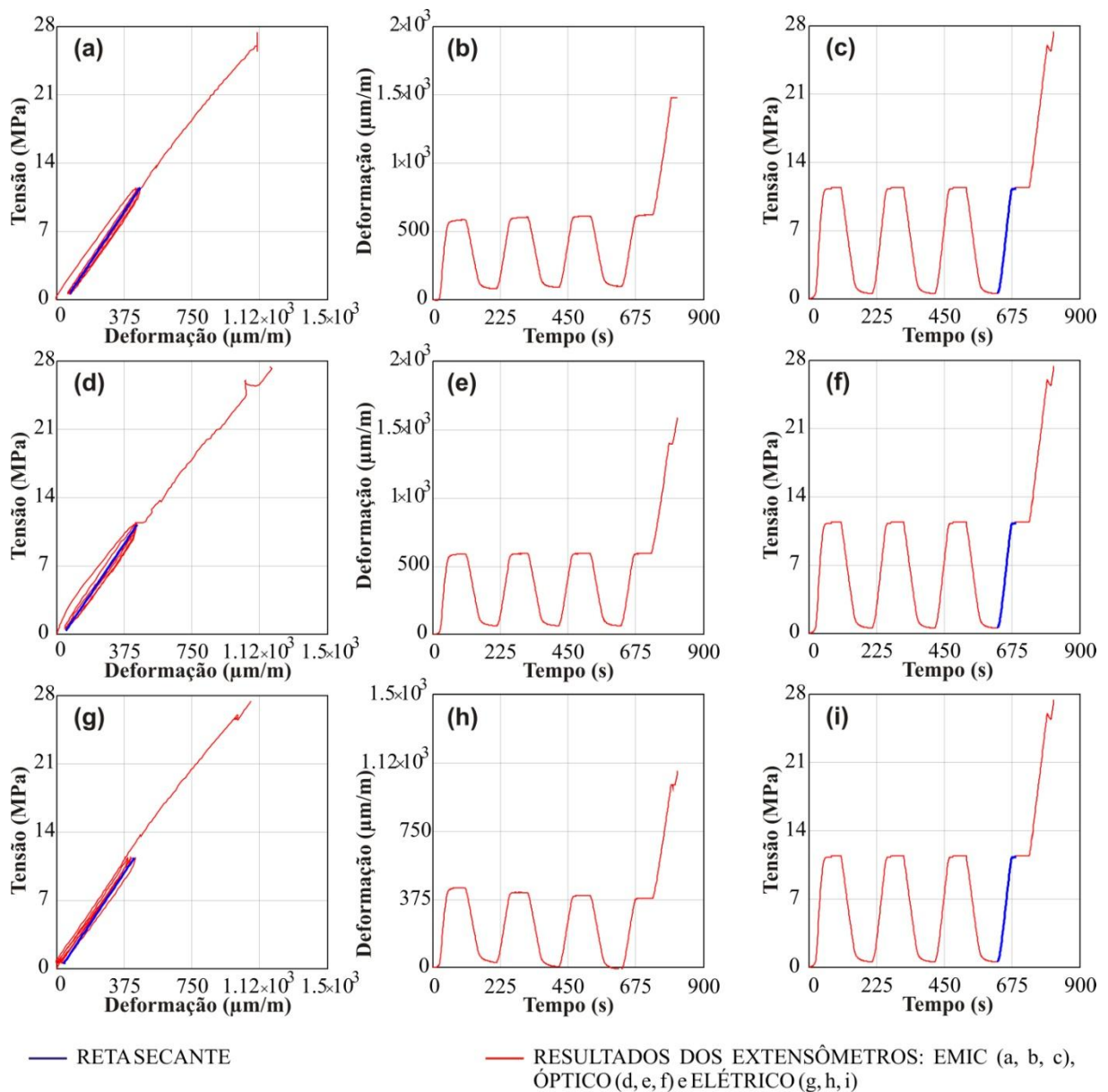


Figura 4.20 - Ensaio de módulo de elasticidade do CP T1.

Posteriormente, prosseguiram-se com os ensaios efetuando o corpo de prova T2, cujos resultados apresentam-se na figura 4.21. As figuras 4.21-a, 4.21-b e 4.21-c são os resultados para os extensômetros EMIC. As figuras 4.21-d, 4.21-e e 4.21-f são os resultados obtidos com os extensômetros ópticos. Por fim, as figuras 4.21-g, 4.21-h e 4.21-i são resultados extraídos com os extensômetros elétricos.



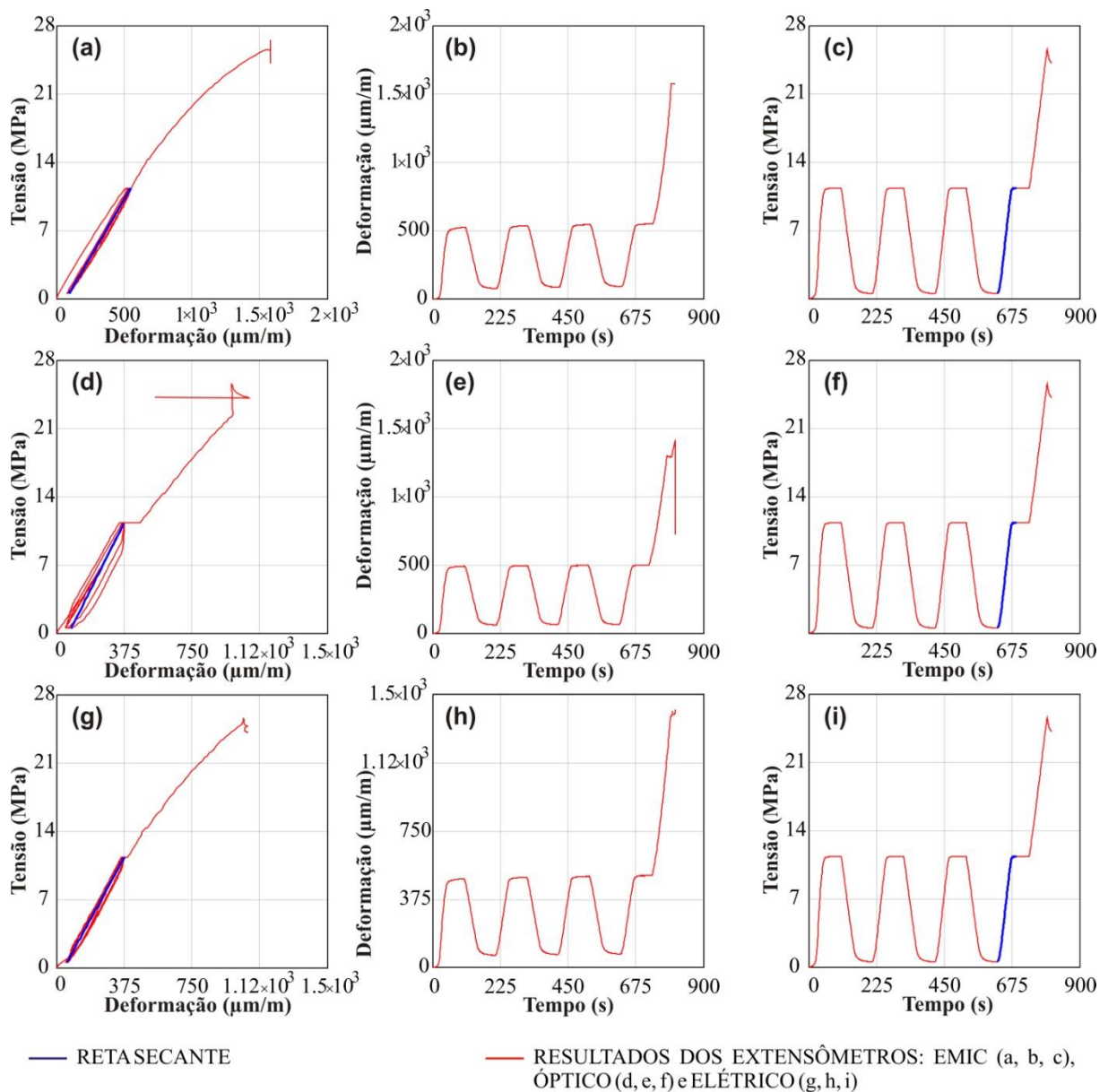


Figura 4.21 - Ensaio de módulo de elasticidade do CP T2.

Finalizando, o ensaio do último corpo de prova T3, cujos resultados apresentam-se na figura 4.22. As figuras 4.22-a, 4.22-b e 4.22-c são os resultados para os extensômetros EMIC. As figuras 4.22-d, 4.22-e e 4.22-f são os resultados para os extensômetros ópticos. Por fim, as figuras 4.22-g, 4.22-h e 4.22-i são resultados extraídos com os extensômetros elétricos.



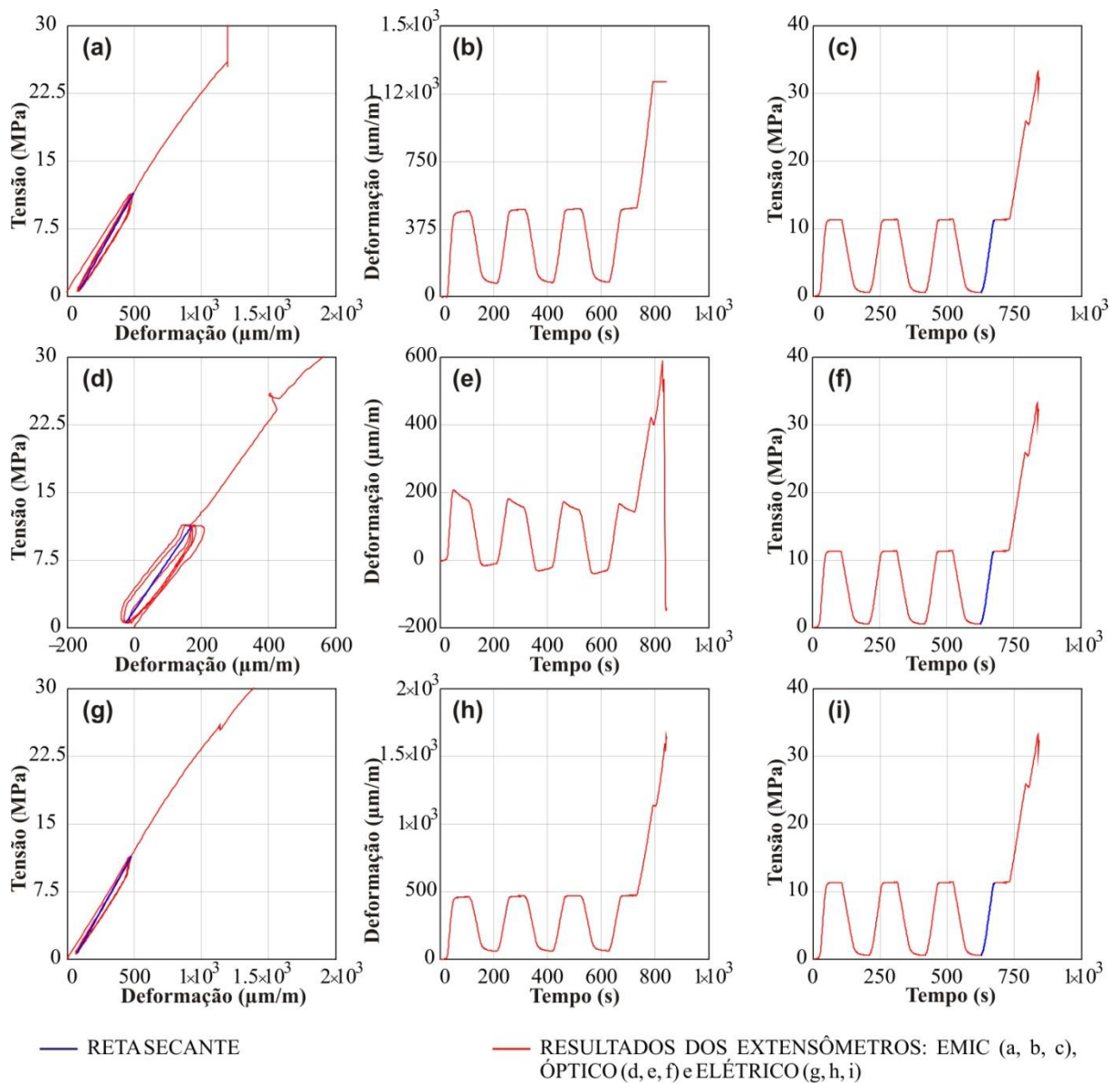


Figura 4.22 - Ensaio de módulo de elasticidade do CP T3.

Os dados de deformações obtidos com os extensômetros ópticos apresentaram uma peculiaridade. No ensaio do corpo de prova T1, alguns pontos sofreram um salto do sinal, conforme apresentado na figura 4.23. O problema apresentado de sinal do extensômetro óptico foi devido a perturbações da rede que criam diversos vales, com aspecto serrilhado, sendo detectados pelo limitador chamado de *threshold*. Este é um parâmetro importante, e deve ser definido de forma que todos os picos do espectro FRB estejam acima da linha e que o *threshold* corte o gráfico em dois pontos. O ganho define o poder que é enviado pelo laser, a fim de superar as perdas globais por meio da linha. O problema do salto de sinal devido o funcionamento do *threshold* está descrito na figura 4.24.

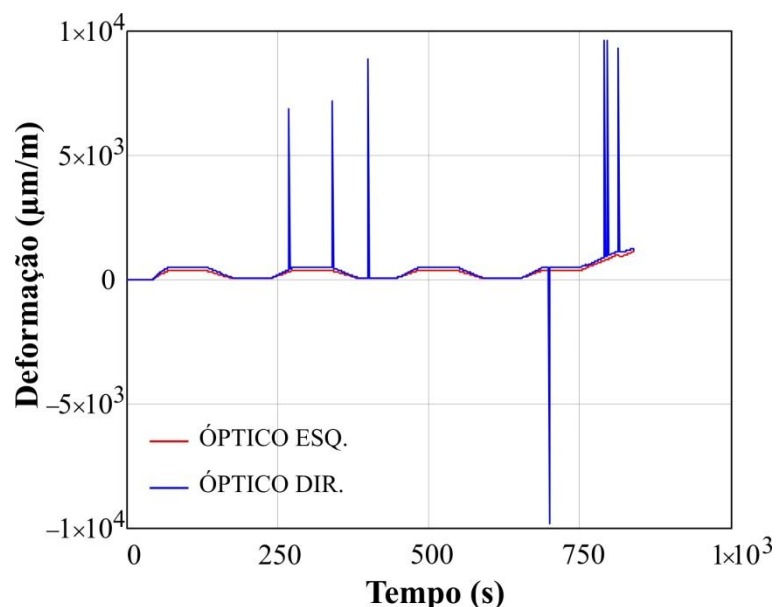


Figura 4.23 - Ensaio de módulo de elasticidade do CP T1 - sinal com salto.

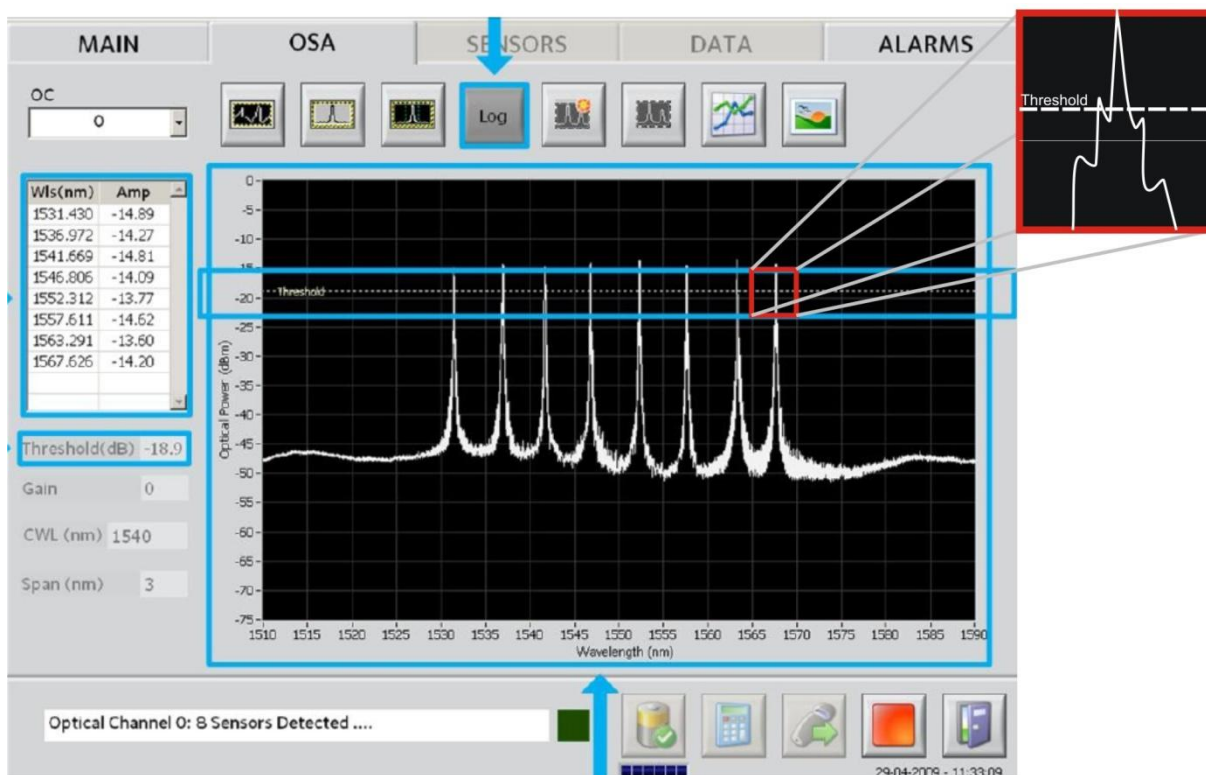


Figura 4.24 – Demonstração do erro de leitura do *threshold*.

Apesar dos esforços da equipe de instrumentação em programar o início do ensaio ao mesmo tempo para todos os sistemas de aquisições, ainda sim houve uma defasagem no início do mesmo, conforme a figura 4.23, além do que os sistemas possuem características próprias de leitura. Foi observado que o sistema EMIC não possui uma taxa de aquisição constante ao longo do tempo. Enquanto o sistema óptico realiza leituras em 1Hz, o sistema elétrico foi programado para realizar leituras em 5Hz e o sistema EMIC realiza leituras em 2Hz. Assim, foi

necessário reduzir todas as leituras para 1Hz, afim de se realizar uma comparação mais eficiente. A rotina utilizada no programa *MathCad®* para realizar a redução das leituras está representada no fluxograma abaixo.

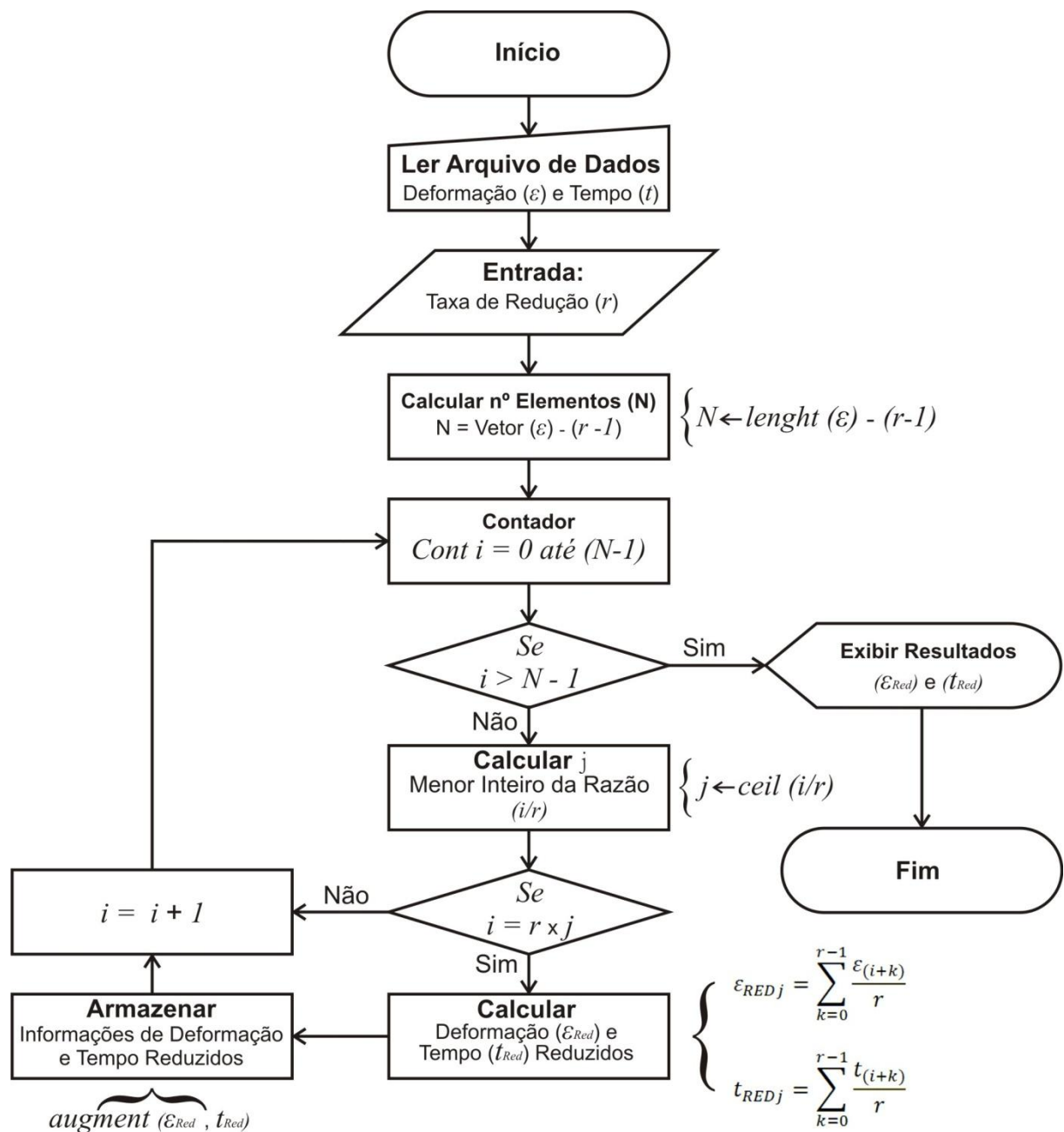


Figura 4.25 – Fluxograma da Rotina gerada no MathCad para reduzir as leituras do sistema elétrico e sistema EMIC.

No programa acima, pode-se observar que a redução do passo se dá tanto para a informação principal a ser extraída, como exemplo a deformação, como a redução do tempo correspondente às informações lidas. As leituras dos extensômetros elétricos foram reduzidas de 5Hz para 1Hz, já as leituras dos extensômetros EMIC foram reduzidas de 2Hz para 1Hz.

Na figura 4.26 apresentam-se os diagramas de deformação-tempo. Nele pode-se observar os atrasos ocorridos nos diferentes sistemas de aquisição durante o ensaio. As figuras 4.26-a, 4.26-c e 4.26-e, são os gráficos considerando os atrasos de tempo nas leituras dos corpos de prova T1, T2 e T3, respectivamente. Nas figuras 4.26-b, 4.26-d e 4.26-f, apresentam-se os diagramas corrigindo-se os atrasos no tempo, também, para os corpos de prova T1, T2 e T3, respectivamente. Mesmo corrigindo o início do ensaio para cada corpo de prova, pode-se observar que ainda sim existe uma pequena defasagem temporal que se acumula ao término do ensaio.

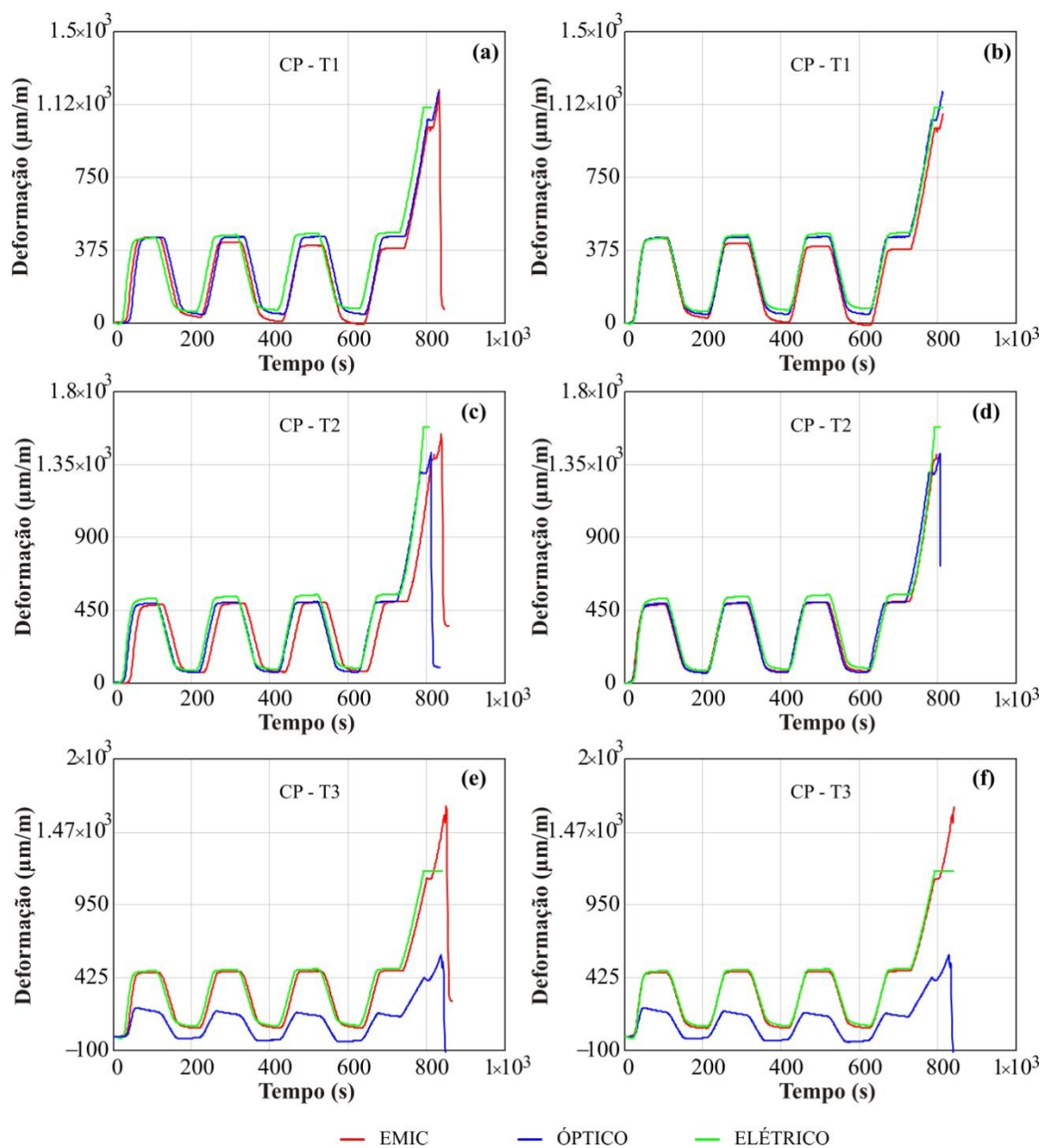


Figura 4.26 - Gráficos de deformação-tempo: (a, c, e) leituras em atraso e (b, d, f) as leituras corrigidas.

Na figura 4.26-e e 4.26-f observa-se uma grande diferença nas leituras obtidas com os extensômetros ópticos no último ensaio com o corpo de prova T3, o que pode-se supor que estas diferenças ocorreram devido a um problema de

potência do laser do interrogador óptico que somente foi percebido após os ensaios. Na figura 4.27 apresentam-se os diagramas de tensão-deformação dos corpos de prova ensaiados, onde fica evidente o problema apresentado no corpo de prova T3, cujo mesmo apresentou no valor do módulo obtido uma diferença de quase 50% em relação aos demais.

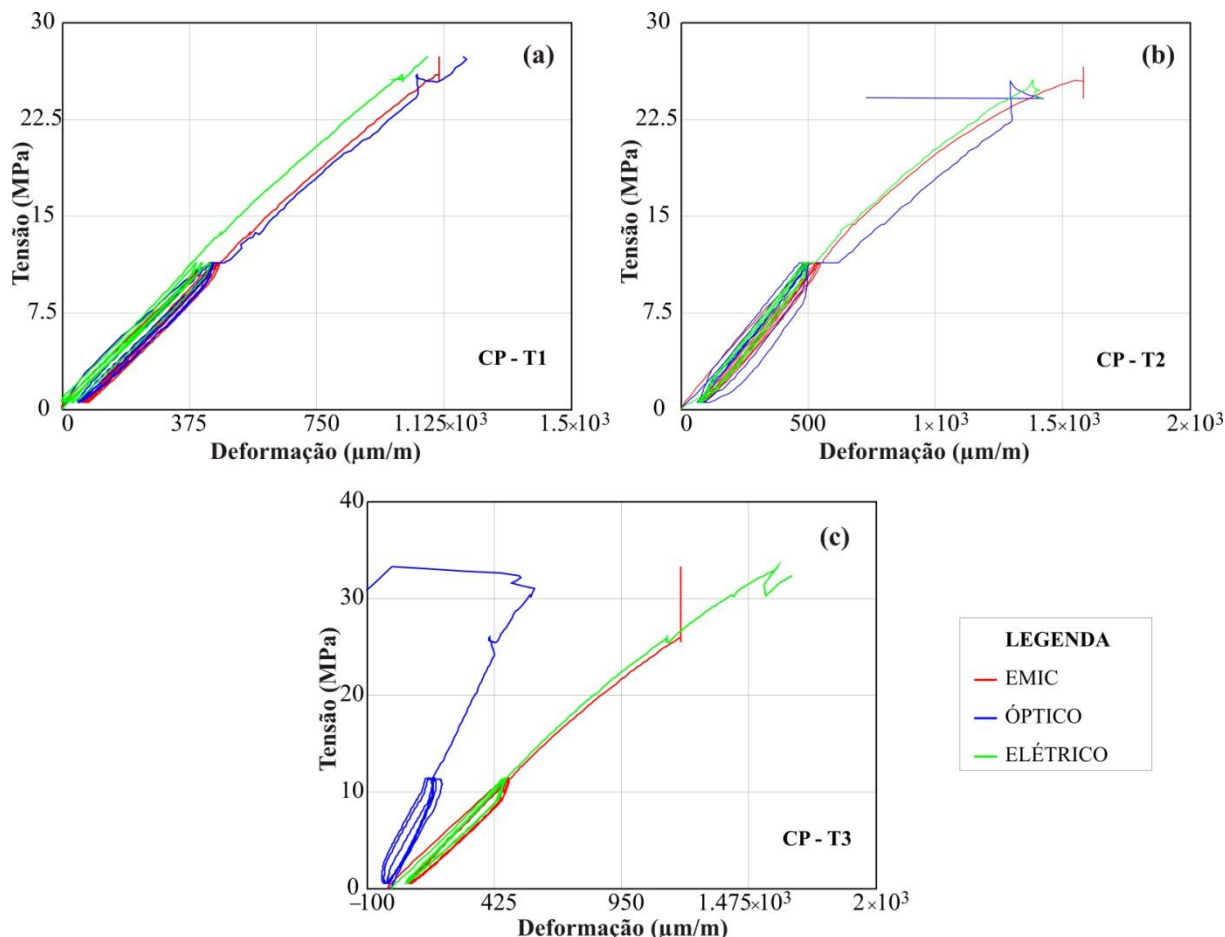


Figura 4.27 - Diagramas de tensão-deformação: (a) CP-T1, (b) CP-T2 e (c) CP-T3.

Os módulos são determinados conforme a reta secante do último ciclo de carregamento no diagrama de tensão-deformação, ou pode-se determinar através de interpolação da nuvem de pontos que se forma quando consideramos todos os ciclos. Como se observa na figura 4.27, para os corpos de prova T1 e T2 todos os sistemas se aproximam nos valores correspondentes as declividades das curvas, apenas há uma discrepância no corpo de prova T3, devido a uma provável falha mecânica no sistema de aquisição óptico.

Assim, os valores do módulo de elasticidade tangente inicial foram determinados conforme as recomendações da NBR-852, conforme apresentado nas figuras 4.20, 4.21 e 4.22. Obtiveram-se os valores apresentados na tabela 4.4 para cada sistema.



Tabela 4.4 - Valores dos módulos de elasticidade obtidos.

CORPO DE PROVA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)		
	EMIC	ÓPTICO	ELÉTRICO
T1	27,874	27,629	27,787
T2	23,706	27,670	25,631
T3	26,643	54,810	26,580

Não pode-se deixar de fazer uma observação no ensaio do corpo de prova T3, além dos problemas ocorridos no ensaio, a comparação entre os gráficos de deformação-tempo, mostram certa excentricidade ocorrida no ensaio, registrada tanto pelos extensômetros elétricos como pelos ópticos, conforme a figura 4.28.

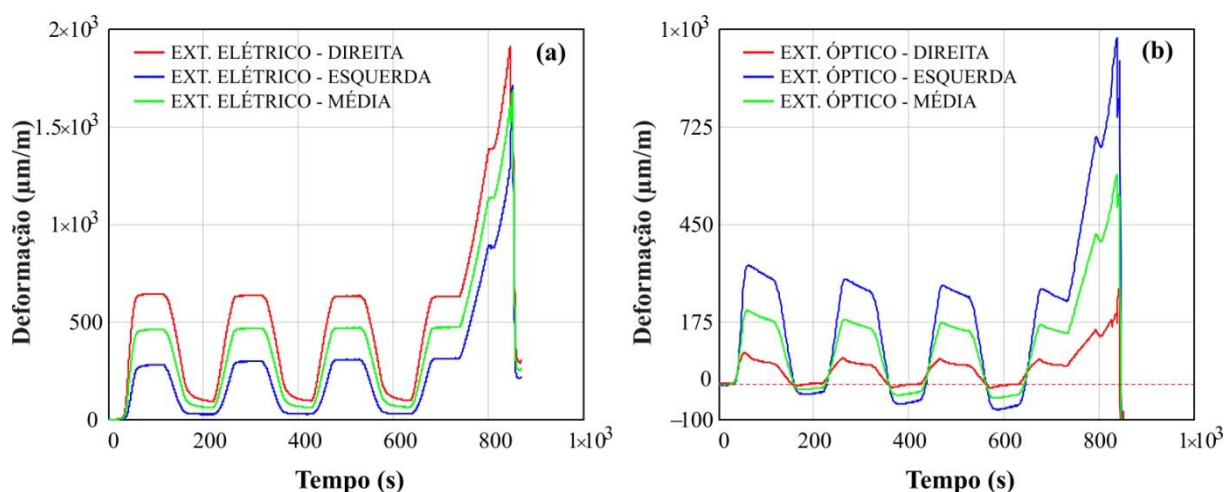


Figura 4.28 - Gráfico deformação-tempo dos extensômetros instalados no corpo de prova T3. (a) ext. elétrico e (b) ext. óptico.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 4.4 pode-se concluir que os valores de deformação dos extensômetros ópticos aproximam-se das deformações medidas pelos clip gages EMIC. Analisando a figura 4.28, observa-se alguma anomalia na medição das deformações do extensômetro óptico – direita, determinando o insucesso dos resultados com os extensômetros ópticos.

Como objetivo deste trabalho, a comparação principal entre os sistemas ópticos e elétricos, a tabela 4.5 apresenta a diferença de cada sistema comparado aos valores obtidos com o sistema EMIC. Devido os problemas evidenciados no ensaio do corpo de prova T3, a diferença de leitura do sistema óptico foi omitida.

Tabela 4.5 - Tabela das diferenças calculadas dos sistemas óptico e elétrico comparados com EMIC.

CORPO DE PROVA	DIFERENÇA ÓPTICO-EMIC (%)*	DIFERENÇA ELÉTRICO-EMIC (%)*
T1	-0,879	0,312
T2	16,720	8,120
T3	-	-0,236

$$*\text{Erro} = \left( \frac{\text{Mód. Óptico ou Elétrico} - \text{Mód. EMIC}}{\text{Mód. EMIC}} \right) \cdot 100$$



## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa teve como objetivo primordial o estudo da aplicação e viabilidade de sensores à base de fibra óptica no monitoramento de grandes estruturas da engenharia civil no Brasil. Os objetivos puderam ser alcançados, apesar dos inúmeros defeitos apresentados pela unidade de aquisição de dados óptica.

Uma informação pertinente observada durante os ensaios foi a importância do parâmetro *threshold*, onde o ganho define a potência que é enviado pelo laser, a fim de superar as perdas globais por meio desta linha, o qual deve ser definido para cada sensor dependendo da situação apresentada.

No ensaio de tração das barras de aço, verificou-se que os extensômetros elétricos permitem medir maiores níveis de deformações. Isso porque para os extensômetros ópticos, grandes níveis de deformações provocam alterações na geometria da fibra que interrompem o fluxo de luz inabilitando a leitura do sensor, ou seja, em determinado momento do ensaio o extensômetro elétrico continuou medindo sendo que o óptico já havia sido danificado pela grande deformação. Sobre o efeito de escorregamento devido a aderência da poliamida na superfície da barra de aço abordado em trabalhos da revisão bibliográfica, este efeito apresentou resultados inconclusos, pois ora as deformações medidas pelos extensômetros ópticos eram maiores que as do elétrico, ora eram menores.

Dos testes realizados com o modelo do medidor de junta triortogonal verificou-se a viabilidade de sua automação a partir da utilização de extensômetros ópticos. Entretanto, verificou-se que o sistema óptico tende a medir valores de deformação maiores que os extensômetros elétricos. Corrigindo os resultados dos extensômetros ópticos constatou-se que as diferenças em relação aos valores dos extensômetros elétricos aumentaram.

Com relação aos ensaios de compressão realizados em corpos de prova cilíndricos de concreto, com exceção do último teste, onde a unidade de aquisição de dados óptica mais uma vez apresentou um mau funcionamento, os resultados medidos pelos extensômetros ópticos, elétricos e Emic ficaram muito próximos entre si, mostrando o bom desempenho do sistema óptico.

No que se refere à tecnologia de medição a base de fibras ópticas, essa tecnologia está em franco desenvolvimento e apresenta grande potencial para o monitoramento de grandes estruturas, apresentando como vantagens:

- a) Imunidade às interferências eletromagnéticas;
- b) Longo período de funcionamento;
- c) Menos suscetível a atenuação de sinal devido o comprimento dos cabos, permitindo a monitoração de sensores posicionados a quilômetros da unidade de medição;
- d) Utilização de sensores em série resultando em grande economia de cabos;
- e) Resistência em ambientes agressivos (umidade, pressão, gases, etc.).

Desta feita, para a continuidade no seguimento do trabalho exposto, apresentam-se algumas perspectivas de desenvolvimento de pesquisas futuras, na área de instrumentação com sensores à base de fibras ópticas:

- a) Estudar outras tecnologias de mensuração que utilizam a fibra óptica;
- b) Aplicar a tecnologia de monitoramento à base de fibras ópticas de rede Bragg em grandes barragens de concreto;
- c) Estudar a utilização de extensômetros ópticos de rede Bragg a partir de ensaios em carregamentos cíclicos.

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão – NBR-8522**. Rio de Janeiro, 2008.

AFL-FSM-60S-CORE-ALIGNMENT-FUSION-SPLICER.JPG. 2010. Altura: 248 pixels. Largura: 254 pixels. 96 dpi. 24 BIT. 21,2 Kb. Disponível em: <<http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/wp-content/uploads/2010/11/AFL-FSM-60S-core-alignment-fusion-splicer.jpg>>. Acesso em 14 dez. 2010.

ANSARI, Farhad. **Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring**. Springer. Netherlands, 2005.

ASSIS, W. S.; TRAUTWEIN, L. M.; BITTENCOURT, T. N. Monitoração Estrutural da Estação Metroviária Alto do Ipiranga. In: 50º IBRACON, 2008, Salvador. 50º Congresso Brasileiro do Concreto, 2008.

AZADEH, Mohammad. **Fiber Optics Engineering**. Springer. New York, 2009.

BAGCHI, A.; MURISON, E.; MUFTI, A.A. and NOMAN, A.S., 2010. Evaluation of a Rugged Fiber Optic Sensor System for Monitoring Reinforced Concrete Structures. **Experimental Techniques**, The J of the Society of Experimental Mechanics, 34(2): 49-53.

BLANCO, E.; OLLER, S.; GIL, L. Análisis experimental de estructuras. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería – CIMNE. Barcelona, 2008.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm)>. Acesso em 14 dez. 2010.

BOYES, Walt. **Instrumentation Reference Book**. 4<sup>th</sup> Edition. Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2010.

CAZO, Rogério; et al. **Sensor de Deformação Usando Grades de Bragg**. Revista Científica Periódica – Telecomunicações, 2000. ISSN 1516 – 2338.

CENTRO DA MEMÓRIA DA ELETRICIDADE NO BRASIL. **ELETRONORTE 25 anos**. Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 1998.

CERAMIC\_FERRULE.JPG. 2011. Altura: 474 pixels. Largura: 800 pixels. 96 dpi. 24 BIT. 17,6 Kb. Formato JPG. Disponível em: <[http://www.asia.ru/images/target/photo/51474832/Ceramic\\_Ferrule.jpg](http://www.asia.ru/images/target/photo/51474832/Ceramic_Ferrule.jpg)>. Acesso em 16 fev. 2011.

CONECTORES.JPG. 2010. Altura: 201 pixels. Largura: 393 pixels. 96 dpi. 24 BIT. 10,1 Kb. Formato JPG. Disponível em: <<http://www.extravase.com/blog/wp-content/uploads/2008/02/conectores.JPG>>. Acesso em 14 dez. 2010.

CRISP, John. **Introduction to Fiber Optics**. 2<sup>nd</sup> Edition. Butterworth-Heinemann/Newnes, 2001.

FIBRLOCK.JPG. 2010. Altura: 243 pixels. Largura: 473 pixels. 96 dpi. 24 BIT. 23,3 Kb. Formato JPG. Disponível em: <<http://www.lucalm.hpg.com.br/figuras/emendas/fibrlock.jpg>>. Acesso em 30 set. 2010.

FIDANBOBOYLU, K.; EFENDIOGLU, H. **Fiber Optic Sensors and Their Applications**. In: 5<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), Karabuk, 2009.

FRAZÃO, O.; et al. **Sensores de Bragg em Fibra Óptica**. In: JETC99 - Jornadas de Engenharia de Telecomunicações e Computadores, Lisboa, 1999.

FURUKAWA. **Fibras Ópticas e Suas Aplicações**. Curso realizado em nov. 2009.

F-TI10\_C\_07A\_S\_328PX\_X\_220PX. 2011. Altura: 220 pixels. Largura: 328 pixels. 96 dpi. 24 BIT. 10,9 Kb. Formato JPEG. Disponível em: <[http://assets.fluke.com/images/Products/TF/f-ti10\\_c\\_07a\\_s\\_328px\\_x\\_220px.jpg](http://assets.fluke.com/images/Products/TF/f-ti10_c_07a_s_328px_x_220px.jpg)>. Acesso em 25 jan. 2011.

GAVEA SENSORS. Disponível em: <<http://www.gaveasensors.com/>>. Acesso em 20 fev. 2009.

GLIŠIĆ, Branko. INAUDI, Daniele. **Fibre Optic Methods For Structural Health Monitoring**. John Wiley & Sons Ltda. West Sussex, 2007.

GLIŠIĆ, Branko. INAUDI, Daniele. **Overview of Fibre Optic Sensing Applications to Structural Health Monitoring**. In: 13<sup>th</sup> FIG Symposium on Deformation and Analysis. In: 4<sup>th</sup> IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Lisbon, 2008.

GOMES, Maurício Ferreira; et al. **Controle do Deslocamento de Blocos de Concreto da UHE Tucuruí por Meio de Modelo Estatístico**. In: 50<sup>o</sup> IBRACON, 2008, Salvador. 50<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto, 2008.

HARRIS, Harry; SABNIS, Gajanan. **Structural Modeling and Experimental Techniques**. 2<sup>nd</sup> ed. CRC Press, 1999.

HOFFMANN, karl. **An Introduction to Measurements using Strain Gages**. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Darmstadt, 1989.

HORTA, E. F. Sistema de gerenciamento de obras-de-arte. **Revista Técnica**, São Paulo, n. 45, mar. 2000. Disponível em: <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/45/imprime32243.asp>. Acesso em 20 fev. 2011.

IMAGES.JPG. 2011. Altura: 225 pixels. Largura: 225 pixels. 96 dpi.24 BIT. 6,69 Kb. Formato JPG. Disponível em: <<http://t1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRP8GHvFfLJT9FZjxfmYZyyDpngeEsNm77JEVPil9FrJpyK0050&t=1>>. Acesso em 16 fev. 2011.

IMAGES.JPG. 2011. Altura: 118 pixels. Largura: 241 pixels. 96 dpi.24 BIT. 3,92 Kb. Formato JPG. Disponível em: <<http://t1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRzS2BqJj4vp9ODwe9-RJov-UZR06APESdcXcZ8zzm9bvfkFQUOFw>>. Acesso em 19 fev. 2011.

IMAGE\_RESIZED.ASPX.JPG. 2010. Altura: 260 pixels. Largura: 240 pixels. 96 dpi. 24 BIT. 9,89 Kb. Formato JPG. Disponível em: <[http://www.gefran.com/image\\_resized.aspx?method=F&w=240&h=260&cp=1&src=/images/resources/prodotti/3019f956-fed0-4e84-bb46-6b76432ef6ac\\_PY1.jpg](http://www.gefran.com/image_resized.aspx?method=F&w=240&h=260&cp=1&src=/images/resources/prodotti/3019f956-fed0-4e84-bb46-6b76432ef6ac_PY1.jpg)>. Acesso em 20 out. 2010.

INAUDI, Daniele; GROSSO, Andrea. **Fiber Optic Sensors for Structural Control**. In: The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 2008.

KLECKERS, Thomas; GÜNTHER, Bernd. **Optical versus electrical strain gages: A comparison**. HBM, 2007. Disponível em: <[http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/techarticles/2007/stressanalysis\\_optical-electrical\\_en.pdf](http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/techarticles/2007/stressanalysis_optical-electrical_en.pdf)>. Acesso em 20 mar. 2011.

KUROKAWA, S.; et al. **Global Concrete Structure Monitoring by utilizing Fiber Optic Sensor**. Disponível em: <<http://www.fibersensing.pt>>. Acesso em 20 mar. 2011.

MATOS, Silvia Frazão. **AVALIAÇÃO DE INSTRUMENTOS PARA AUSCULTAÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO. ESTUDO DE CASO: DEFORMÍMETROS E TENSÔMETROS PARA CONCRETO NABARRAGEM DE ITAIPU**. 2002. 88 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade do Paraná. Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil. Curitiba, 2002.

MAUL, Jochen; KIPP, Tobias. **Sensing of Surface Strain with Flexible Fiber Bragg Strain Gages**. HBM, 2010. Disponível em: <<http://www.hbm.com/en/menu/applications/experimental-stress-analysis/technical-articles/esa-technical-articles-detail-view/datum/2010/09/15/sensing-of-surface-strain-with-flexible-fiber-bragg-strain-gages/>>. Acesso em 11 mar. 2011.

MEASURES, Raymond. **Structural Monitoring with Fiber Optic Technology**. Academic Press. San Diego - Califórnia, 2001.

MOSZKOWICZ, Viktor. **Monitoração de Deformações em Dutos Utilizando Sensores a Fibra Óptica com base em Rede de Bragg**. In: Bol. téc. PETROBRAS, Rio de Janeiro, 2002.

PAC. **Programa de Aceleração do Crescimento**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/pac/>>. Acesso em 20 fev. 2010.

PIMENTEL, Ricardo. **Caracterização do Tráfego Ferroviário e dos seus Efeitos em Pontes de Pequeno Vão**. 2008. 163f. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil) - Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia. Porto, 2008.

PORTELA, Artur; SILVA, Arlindo. **Mecânica dos Materiais**. Editora Plátano. Portugal - Lisboa, 1996.

RIBEIRO, Ana. **Aplicação de Sensores de Fibras Ópticas à Observação do Comportamento de Obras Geotécnicas**. 2009. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) - Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Monte da Caparica, 2009.

ROCTEST. Disponível em: <<http://www.roctest.com>>. Acesso em 15 mar. 2010.

SHIMANO, Antonio. **Fotoelasticidade – Conceitos e Aplicações**. XI Congresso de Física Médica. Disponível em: <<http://www.abfm.org.br/c2006/palestras/IBB1-Shimano.pdf>>. Acesso em 17 fev. 2011.

SOARES, Edmundo. **Sensores de Fibras Ópticas**. Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações, Niterói, RJ, v. 04, n 1, 1-20, 1989. Disponível em: [http://iecom.dee.ufcg.edu.br/~jcis/Dezembro%201989/volume%204/JCIS\\_1989\\_4\\_01.pdf](http://iecom.dee.ufcg.edu.br/~jcis/Dezembro%201989/volume%204/JCIS_1989_4_01.pdf). Acesso em 19 out. 2008.

TAV BRASIL. Disponível em: <<http://www.tavbrasil.gov.br>>. Acesso em 05 out. 2010.

TAO, X. YANG, D. ZHANG, A. **Smart fibres, fabrics and clothing**. Cambridge: CRC Press, 2001.

VALE. **RELATÓRIO TÉCNICO FINAL – Segunda etapa – Obra de Arte Especial n. 01 – Viaduto sobre a primeira travessia**. Projeto: Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação da Integridade Estrutural de Pontes e Viadutos Ferroviários ao Longo da Estrada de Ferro Carajás, 2009.

VELOSO, L. A. C. M.; et al. **Alternativas para a automação dos medidores triortogonais de junta de barragens de concreto da UHE Tucuruí**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves. IBRACON, 2007.

WILSON, Jon. **Sensor Technology Handbook**. Newnes/Elsevier, 2005.

YU, Francis; YIN, Shizhuo. **Fiber Optic Sensors**. New York: Marcel Dekker, 2002.

12304.PNG. 2010. Altura: 277 pixels. Largura: 175 pixels. 32BIT. 51,1 Kb. Formato PNG. Disponível em: <<http://drikatecferramentas.com.br/images/equipamentos/12304.png>>. Acesso em 14 out. 2010.

2009021116431691266\_250x250.JPG. 2011. Altura: 116 pixels. Largura: 250 pixels. 96 dpi. 24 BIT. 5,63 Kb. Formato JPG. Disponível em: <[http://images1.hellotrade.com/data2/PN/FM/HELLOTD-1769129/2009021116431691266\\_250x250.jpg](http://images1.hellotrade.com/data2/PN/FM/HELLOTD-1769129/2009021116431691266_250x250.jpg)>. Acesso em 16 fev. 2011.

20090406130519730096.JPG. 2010. Altura: 200 pixels. Largura: 430 pixels. 96 dpi. 24 BIT. 13,9 Kb. Formato JPG. Disponível em: <<http://www.fibersensing.com/files/3/imagens/20090406130519730096.jpg>>. Acesso em 20 out. 2010.



## ANEXO A

Universidade Federal do Pará

Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado – LEA

Projeto TECCON

Avaliação das condições de uso do sistema de interrogação FS5200 em uso na Engenharia Civil – UFPA

Autor: Marco José de Sousa

### **1. Primeiro teste em 17 de Novembro de 2010**

Com a intenção de investigar os equipamentos de medição ópticos Interrogadores, entramos em contato com o professor Luiz Veloso do Curso de Engenharia Civil, cujo laboratório faz uso de um destes equipamentos, especificamente, um FS5200 da Fibersensing [1].

O FS5200 é um interrogador com uma saída com potência de 0dBm e equipado com um multiplexador de 4 canais. A potência óptica, quando utilizando o multiplexador, é de aproximadamente -6 dBm. Durante demonstração de operação oferecida por um aluno de mestrado do professor Luiz Veloso no dia 17 de Novembro de 2010, ficou evidente que o sistema não estava operando devidamente. Conectando-se apenas 1 sensor de temperatura (vide Fig. 1) por um cabo com comprimento de 1 metro posterior e anterior ao sensor, as leituras indicavam um retorno de apenas -25dBm para o centro do pico do sensor.

De acordo com as especificações da Fibersensing, a refletividade esperada para um sensor óptico de temperatura seria superior a 75% [2]. Como o cabo óptico tinha comprimento inferior a 1 metro, as perdas por atenuação são desprezíveis. Por outro lado, as perdas por inserção do conector APC podem atingir 0.44 dB e não podem ser desprezadas [3]. As perdas por inserção do sensor de temperatura seriam de aproximadamente 0.1dB. A perda total esperada para um setup como o mostrado na Fig. 1 seria, na pior das hipóteses, de aproximadamente  $2L_C + L_i + L_{FBG}$ , o onde  $L_C$  é a perda do conector APC,  $L_i$  é a perda por inserção e  $L_{FBG}$  é a perda por transmissão da FBG, o que corresponda a no máximo 25%. Portanto, as perdas seriam:

$$L_C = 0.44\text{dB}$$

$$L_i = 0.1\text{dB}$$

$$L_{\text{FBG}} = 1.25\text{dB}$$

A perda total seria, portanto, não poderia ser superior a 2 dB para o ponto de máxima reflexão do sensor e a leitura do interrogador deveria registrar algo em torno de -2 dBm. Porém, como mostrado na Fig. 2, o sinal observado neste ponto através do interrogador foi de apenas -25 dBm utilizando a saída principal de 0 dBm (sem o multiplexador). Foi considerado: (1) que a largura de banda do LASER de excitação é desprezível; (2) que o FS5200 compense as perdas devido aos seus componentes internos (porém mesmo que não sejam compensadas, ainda assim a leitura esperada seria algo superior a -5 dBm). Portanto, as perdas desconhecidas são da ordem de 20 dB, o que corresponderia a aproximadamente 100 Km de fibra óptica padrão com perdas de 0.2 dB/Km.

A explicação mais aceitável para o problema observado seria defeito no próprio interrogador FS5200. Dois poderiam ser os problemas: defeito no emissor (acoplamento ou o próprio LASER) ou defeito no receptor (idem acoplamento ou defeito no circuito de condicionamento, o que inclui eventuais defeitos no transdutor e circuitaria periférica).

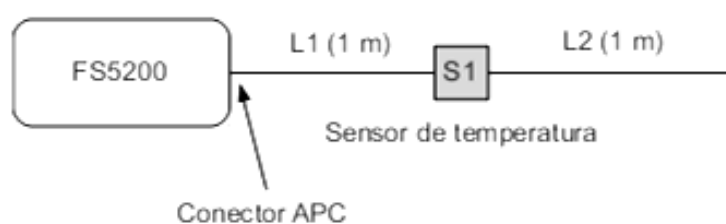


Fig. 1: Ilustração para a montagem utilizada nos testes.

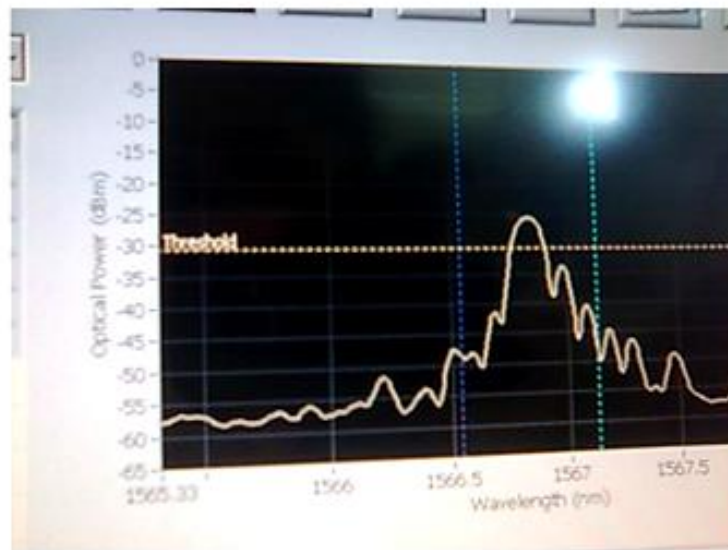


Fig. 2. O FS5200 é capaz de operar como um OSA onde é mostrado o espectro do sinal refletido por um sensor de temperatura nas condições descritas no texto.

### Conclusões

Provavelmente o interrogador não estava de fato gerando a potência óptica nominal de 0 dBm como especificado na folha de dados do fabricante devido a algum defeito. Para confirmar o problema seria necessário dispor de um medidor de potência óptica. A medida seria colhida na saída do interrogador e comparada com as especificações. Também seria colhida a medida da potência óptica do sinal que é transmitido através dos sensores. Caso o sinal transmitido fosse muito atenuado em comparação com o sinal de saída do interrogador, então os cabos ou conectores do arranjo seriam a fonte do problema. Caso tanto a potência óptica gerada pelo interrogador como o acoplamento estivessem em boas condições, então o problema estaria localizado no receptor do interrogador.

## 2. Segundo teste em 4 de Março de 2011

O segundo teste realizado em 4 de Março de 2011 foi realizado com a assistência do técnico Antônio Maria, diretor técnico da Fibertec, que gentilmente emprestou os equipamentos e seu tempo.

Os equipamentos cedidos pela Fibertec foram: Anritsu MT9083a OTDR e o Anritsu CMA5 PowerMeter [4][5].

Na primeira montagem, o MT9083a foi conectado ao CMA5 através de dois trechos de fibra óptica, L1 e L2, de 1 m de comprimento cada separados por um trecho de

aproximadamente 0.5 m com sensores ópticos extensômetros nas extremidade, S1 e S2, presos a uma barra de aço. A Fig. 3 ilustra a montagem realizada.



Fig. 3. Montagem para a primeira parte do teste.

O MT9083a foi configurado para funcionar como uma fonte óptica de potência constante. De acordo com o Sr. Antônio Maria, a potência gerada pelo aparelho seria de -17 dBm aproximadamente. Entretanto, de acordo com a folha de dados do fabricante (Anritsu) a potência óptica do equipamento seria algo entre -3.5 e -6.5 dBm. Ambos MT9083A e CMA5 foram ajustados para o comprimento de onda de 1550 nm. A potência registrada no PowerMeter foi de apenas -17.85 dBm. Considerando que as perdas por atenuação nos cabos são desprezíveis, as perdas por inserção dos sensores são de aproximadamente 0.1 dB e que as perdas por conector sejam de 0.5dB, então as perdas totais seriam de aproximadamente 3.2 dB, desprezando-se as perdas devido à reflexão dos sensores S1 e S2. Para uma potência de entrada de -6.5 dBm seria esperado uma potência de aproximadamente -9.7 dBm no PowerMeter. Porém, de acordo com o técnico Antônio, as leituras obtidas são típicas por se tratar de um equipamentos com bastante uso.

Para esclarecer questões relacionadas à potência, foi feita a montagem mostrada na Fig. 4, onde um cabo simples de 15 metros de fibra padrão foi utilizado para ligar o MT9083 ao CMA5 com apenas dois conectores APC no circuito. A potência registrada no PowerMeter foi de -22.28 dBm. As perdas esperadas seriam da ordem de 1 dB, portanto a potência de entrada seria da ordem de -20 dBm. O valor significativamente inferior registrado revela na verdade a imprecisão dos equipamentos devido, principalmente, à limpeza e alinhamento dos conectores. As folhas de dados dos equipamento realmente estabelecem um erro de absoluto que pode alcançar 3 dB nas medidas do PowerMeter devido a estes fatores. Em uma outra montagem preliminar onde dois cabos de aproximadamente 1 m foram unidos por um adaptador APC para APC (Fig. 5), os valores de potência lidos também foram da ordem de -20 dBm. Por tudo isso, conclui-se que as perdas devido aos cabos, conectores e emendas foram inferiores a 3 dB em todas as tomadas de medida preliminares.

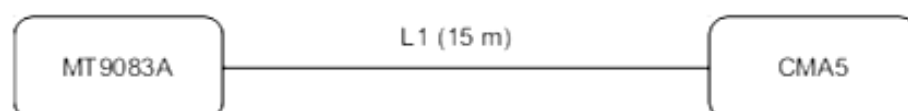


Fig. 4. Montagem simples para tomada de referência.



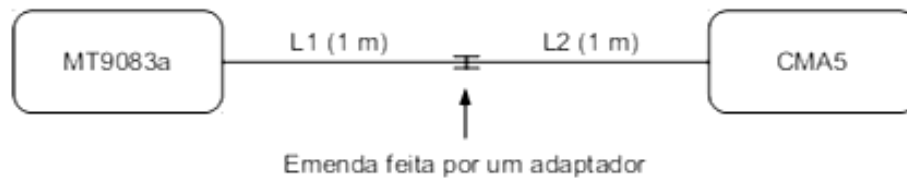


Fig. 5. Montagem simples para simples conferência.

Uma vez confirmadas as perdas esperadas para cabos e conectores, a montagem seguinte foi feita ligando-se o FS5200 ao PowerMeter. Foi utilizada a topologia mostrada na Fig. 6, que na verdade é idêntica à topologia da Fig. 3, apenas substituindo o MT9083a pelo interrogador FS5200. Entretanto, a potência registrada flutuava em torno de -35 dBm, chegando frequentemente muito próximo do limiar de recepção do PowerMeter (-50 dBm). O FS5200 não foi capaz de reconhecer quaisquer sensores.

O técnico da Fibertec, Sr Antônio Maria, sugeriu que poderia haver algum tipo de problema com o conector do próprio interrogador. O FS5200 foi aberto e o conector interno que liga o LASER ao conector da carcaça foi limpo. Depois disso a sensibilidade do equipamento aumentou consideravelmente. Repetindo a topologia da Fig. 6, o interrogador foi capaz de reconhecer o primeiro sensor (S1), porém não detectou o segundo. As leituras do CMA5 foram também muito baixas, semelhantes aos valores obtidos antes da limpeza.



Fig. 6. Primeira montagem para teste da potência de saída do FS5200.

Como havia a suspeita de que o sistema montado na barra de aço estava comprometido, a montagem seguinte utilizou apenas de um simples sensor óptico extensômetro colocado no ponto médio de um cabo de 2 m de comprimento aproximadamente. A montagem é mostrada na Fig. 7.



Fig. 7. Segunda montagem para teste a potência de saída do FS5200.

O valor de potência registrado pelo PowerMeter foi de -13.31 dBm. As perdas estimadas para o sistema foram de aproximadamente 1 dB. Logo, a potência de saída do FS5200 foi de aproximadamente -12 dBm, quase 16 vezes inferior à potência nominal (0 dBm).

A montagem final mostrada na Fig. 8 serviu para medir diretamente a potência de saída do FS5200 e eliminar quaisquer dúvidas sobre o mau funcionamento do interrogador. O valor de potência registrado foi de -13.2 dBm no PowerMeter, que é consistente com a medida da montagem anterior. A diferença desta montagem é a ausência da perda por inserção devido a presença do sensor extensômetro (da ordem de 0.1 dB).

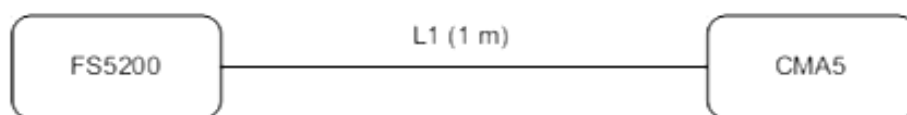


Fig. 8. Motagem para a medida direta da potência de saída do FS5200.

## Conclusões

Após a limpeza do conector do FS5200, a potência óptica de saída aumentou indiscutivelmente. Entretanto, nada pode ser afirmado quanto a sua sensibilidade. Os documentos disponibilizados pela Fibersensing são muito pobres e não descrevem, por exemplo, qual a sensibilidade esperada para o equipamento em questão ou o máximo alcance (considerando cenários comuns). De qualquer forma, é bastante óbvio que a perda da fonte interna de 10 dB de origem desconhecida tornou o aparelho praticamente inútil, uma vez que apenas 1 sensor pode ser reconhecido por vez utilizando-se cabos com poucos metros de comprimento.

Não há dúvidas de o equipamento esteja defeituoso. O mais preocupante é que, segundo o Prof. Luis Veloso, o FS5200 em questão sempre funcionou mal tal como testemunhado pelo técnico Antonio Maria da Fibertec e pelo autor. Além disso, o suporte técnico da Lupatech foi insuficiente. Trata-se de uma revelação preocupante pois o projeto TECCON em curso planeja adquirir um equipamento do mesmo fabricante e distribuidor em breve. Talvez seja mais sensato procurar por alternativas de fabricantes mais bem avaliados pela comunidade científica nacional.

## Referências

[1] FiberSensing FS5200 datasheet. <http://www.fibersensing.com>. Acessado pela última vez no mês de Dezembro de 2010.



[2] FiberSensing FS6300 datasheet. <http://www.fibersensing.com>. Acessado pela última vez no mês de Dezembro de 2010.

[3] MOLEX FC/APC Connectors & Adapters. <http://www.molex.com>. Acessado pela última vez no mês de Janeiro de 2010.

[4] Anritsu OTDR MT9083 series. <http://www.anritsu.com>. Acessado pela última vez em Março de 2011.

[5] Anritsu PowerMeter CMA5 series. <http://www.anritsu.com>. Acessado pela última vez em Março de 2011.

## **ANEXO B**

## 4. SENSOR CONFIGURATION

### SENSOR CALIBRATION SHEET

Every FiberSensing Sensor is provided with a calibration sheet. The layout of this document is the same for all strain sensors.

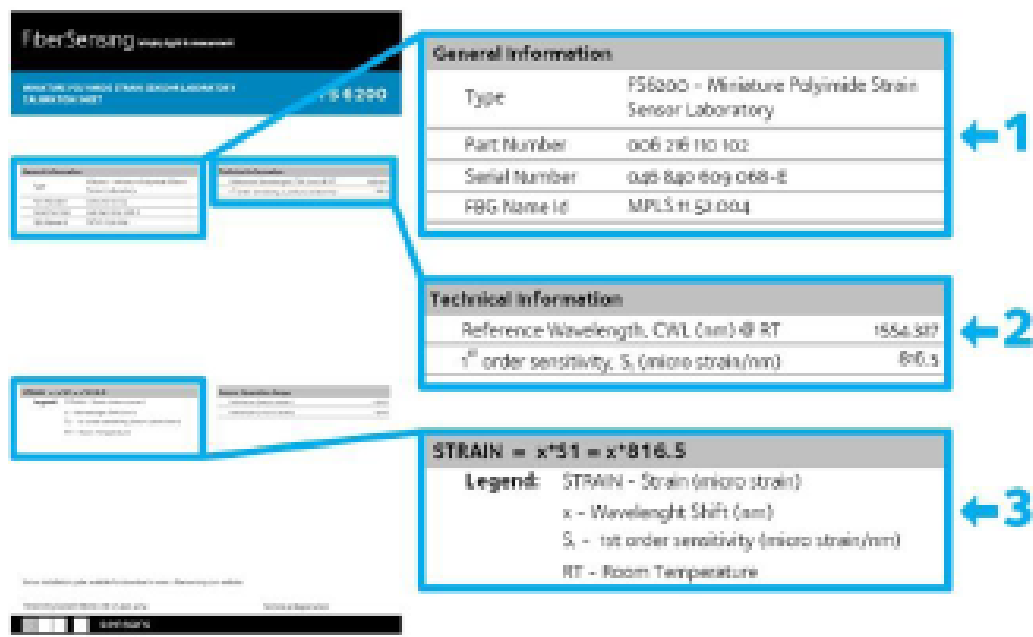


Figure 14

#### GENERAL INFORMATION

On number 1 form Figure 14 shows the general information on the particular sensor, such as its type, the sensor part number, its serial number and the production tracking number, the FBG ID.

#### TECHNICAL INFORMATION

Under the technical information table (number 2 in Figure 14), there is the most important information on the strain sensor: its central wavelength at room temperature and its sensitivity – values that should be used for strain computation.

### STRAIN COMPUTATION

Number 3 in Figure 14 exemplifies the calculations that should be performed for wavelength measurement to strain conversion. The strain variation, under constant temperature, of a Miniature Polyimide Strain Sensor is given by the product of wavelength shift from the zero moment by the sensor's sensitivity.

$$\text{Equation 1} \quad \text{strain} = x * S \leftrightarrow \text{strain} = (WL - CWL) * S$$

Where

x is the wavelength shift in nm

S is the given sensitivity in  $\mu\epsilon/\text{nm}$

CWL is the central wavelength of the sensor at the zero moment in nm

WL is the measured wavelength in nm.

### TEMPERATURE EFFECT ON THE SENSOR

The Miniature Polyimide Strain Sensor, as most sensors, is sensitive to temperature changes. The temperature induced wavelength shift can be confused as strain. For its correction, a representative temperature sensor should be used.

### EFFECT OF THE TEMPERATURE ON THE SENSOR

The temperature dependence of the Miniature Polyimide Strain Sensor is:

$$\text{Equation 2} \quad x = 7.32 * \Delta T$$

Where:

x is the wavelength shift in nm

$\Delta T$  is the temperature shift from the zero moment, in  $^{\circ}\text{C}$ , measured with a representative temperature sensor.

This means that to compensate for the effect of temperature on the sensor measurement the computation should be:

$$\text{Equation 3} \quad \text{strain} = x * S - 7.32 * \Delta T \leftrightarrow \text{strain} = (WL - CWL) * S - 7.32 * \Delta T$$

Note: this computation only corrects the effect of temperature on FBG and does not take into account the thermal expansion of the base material where the sensor is attached to.

**EFFECT OF THE TEMPERATURE ON THE SENSOR AND ON THE BASE MATERIAL**

To compensate also for the deformation of the structure due to temperature effects, the computation should be done considering the coefficient of thermal expansion (CTE) of the structure.

The total strain variation of a structure is:

Equation 4

$$\begin{aligned} \text{strain} &= \text{strain}_{\text{Load}} + \text{strain}_{\text{Temp on FBG}} + \text{strain}_{\text{Temp on Structure}} \leftrightarrow \\ \text{strain} &= \text{strain}_{\text{Load}} + \text{strain}_{\text{Temp on FBG}} + \text{CTE}_{\text{Structure}} \Delta T \end{aligned}$$

Where

Strain is total strain in  $\mu\epsilon$

Strain<sub>Load</sub> is the strain due to loading that we want to measure in  $\mu\epsilon$

Strain<sub>Temp on FBG</sub> is the temperature induced strain measurement, as explained above, in  $\mu\epsilon$

Strain<sub>Temp on Structure</sub> is the temperature induced strain on the structure, in  $\mu\epsilon$

CTE<sub>Structure</sub> is the thermal expansion coefficient of the structure material in  $^{\circ}\text{C}^{-1}$

Meaning that to compensate the deformation of the structure due to temperature effect it is necessary to know the CTE value of the material of the structure where the sensor is fixed on.

The strain caused by loading can then be computed as:

Equation 5

$$\begin{aligned} \text{strain}_{\text{Load}} &= \text{strain} - \text{strain}_{\text{Temp on FBG}} - \text{CTE}_{\text{Structure}} \Delta T \leftrightarrow \\ \text{strain}_{\text{Load}} &= x + S - 7.32 \times \Delta T - \text{CTE}_{\text{Structure}} \times \Delta T \end{aligned}$$

## ANEXO C



## INFORMAÇÕES INICIAIS

$\varepsilon_{elétrico}$  – Deformações do extensômetro elétrico

$\varepsilon_{COR}$  – Deformações do extensômetro óptico corrigido

$\delta_{laser}$  – Deslocamentos medidos pelo transdutor de deslocamentos a laser

$E$  – módulo de elasticidade da peça metálica

$I$  – momento de inércia da peça metálica

$L$  – comprimento da peça metálica

$n$  – número de amostras da medição realizada

$a$  – distância da carga  $P$  até o eixo do extensômetro

$e$  – espessura da peça metálica

$\alpha$  – curvatura da seção instrumentada

$\theta_a$  – rotação do apoio

A dedução da equação 4.1 é desenvolvida utilizando as equações propostas na Resistência dos Materiais. A figura C.1 ilustra uma barra engastada com um apoio elástico. Essa é a situação teórica adotada para o ensaio com o medidor triortogonal de junta.

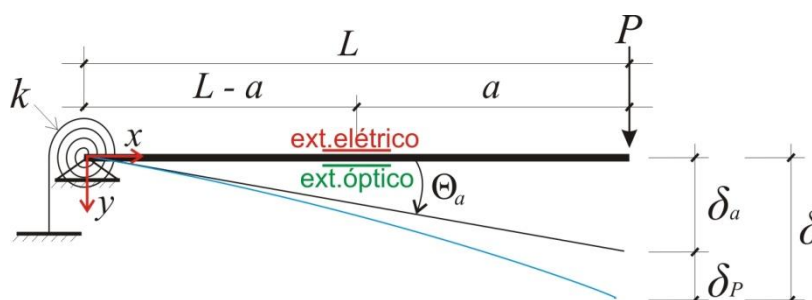


Figura C.1 - Modelo teórico adotado para a placa flexível do transdutor.

Conforme a figura C.1, tem-se que o valor da flecha total pode ser dado por:

$$\delta = \delta_a + \delta_p \quad (C1)$$

Ou seja,  $\delta_p$  é a parcela da flecha devido à flexão produzida pela força  $P$  e  $\delta_a$  é a parcela da flecha devido ao giro do apoio elástico.

Primeiramente, determina-se a flecha devido à flexão provocada pela força  $P$ . No ensaio, a força  $P$  é devido ao deslocamento transferido por um parafuso. Portanto, a força  $P$  deve ser calculada utilizando-se a curvatura  $\alpha$  extraída pelos extensômetros, para isso tem-se:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{elétrico} + |\varepsilon_{COR}|}{e} \quad (C2)$$

Assim, o momento em um ponto  $X$  qualquer na barra é calculado por:

$$M_{x=X} = -P \cdot (x) \quad (C3)$$

O momento calculado no ponto sobre os extensômetros, onde  $x = L - a$ , tem-se:

$$M_{x=L-a} = -P \cdot (L - a) = -E \cdot I \cdot \alpha \quad (C4)$$

Utilizando a igualdade acima, pode-se determinar os valores do vetor  $P$ :

$$P = E.I. \frac{\alpha}{L - a} \quad (C5)$$

E, para uma barra engastada e livre, a flecha devido uma flexão provocada por uma carga  $P$  é calculada por:

$$\delta_P = \frac{P.L^3}{3.E.I} \quad (C6)$$

Para a flecha devido ao giro do apoio, pode-se determinar pelo produto da rotação do apoio ( $\theta_a$ ) pelo comprimento da barra:

$$\delta_a = \theta_a \cdot L \quad (C7)$$

Assim, deve-se determinar o valor da rotação do apoio. Para isso, o ensaio contou com a utilização de um transdutor a laser, onde:

$$\theta_a \cdot L = \delta_{laser} - \delta_P \quad (C8)$$

Idem para os valores do vetor  $\theta_a$ :

$$\theta_a = \frac{\delta_{laser} - \delta_P}{L} \quad (C9)$$

Como o apoio considerado é elástico, existe uma constante de engastamento a se determinar. Ou seja, o momento para o ponto  $x = L$ , pode ser calculado por:

$$M_{x=L} = k_\theta \cdot \theta_a = P \cdot L \quad (C10)$$

Isolando a igualdade acima, pode-se determinar os valores do vetor  $k_\theta$ :

$$k_\theta = \frac{P \cdot L}{\theta_a} \quad (C11)$$

Para encontrar a constante de engastamento, basta calcular a média dos elementos do vetor  $k_\theta$ :

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n k_{\theta_i}}{n} \quad (C12)$$

E, para uma barra engastada, a flecha devido ao giro do apoio é calculada por:

$$\delta_a = \left(\frac{P \cdot L}{k}\right) \cdot L \quad (C13)$$

Assim, o valor da flecha total, pode ser determinado pela equação abaixo:

$$\delta = \left(\frac{P \cdot L}{k}\right) \cdot L + \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (C14)$$

Com a equação C14, calcula-se o valor total da flecha, substituindo o valor de P que não conhecemos pelo valor das deformações obtidas com os extensômetros.

Em seguida, apresentam-se os diagramas obtidos durante os testes realizados no trabalho para cada direção do modelo triortogonal de junta. Os diagramas são: Força-Curvatura e Deslocamento-Tempo.

### Diagramas Força-Curvatura

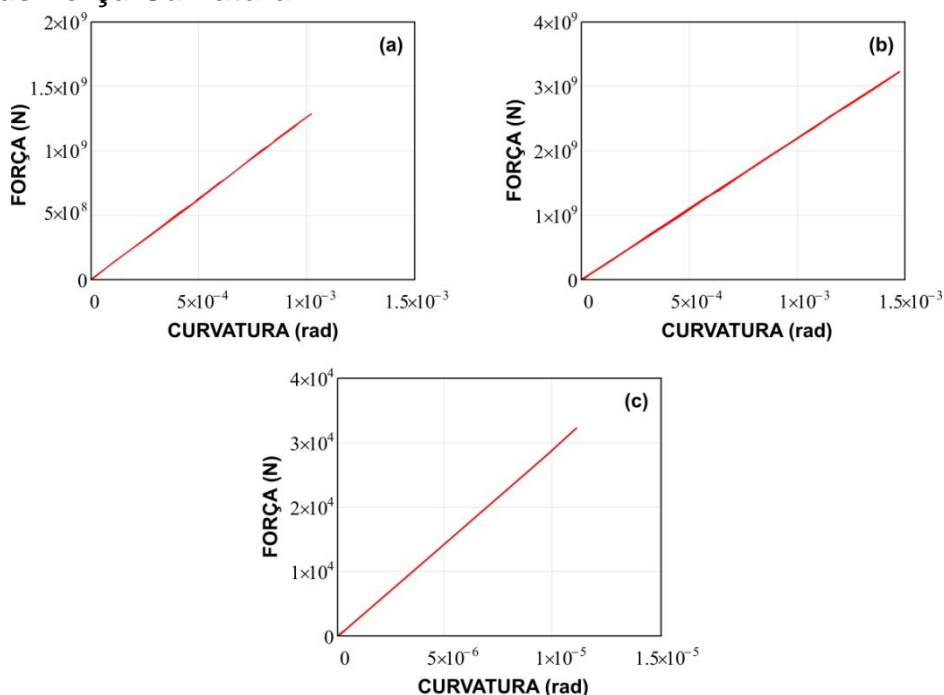


Figura C.2 - Diagrama Força-Curvatura: (a) Direção 1, (b) Direção 2 e (c) Direção 3.

### Diagramas Deslocamento-Tempo

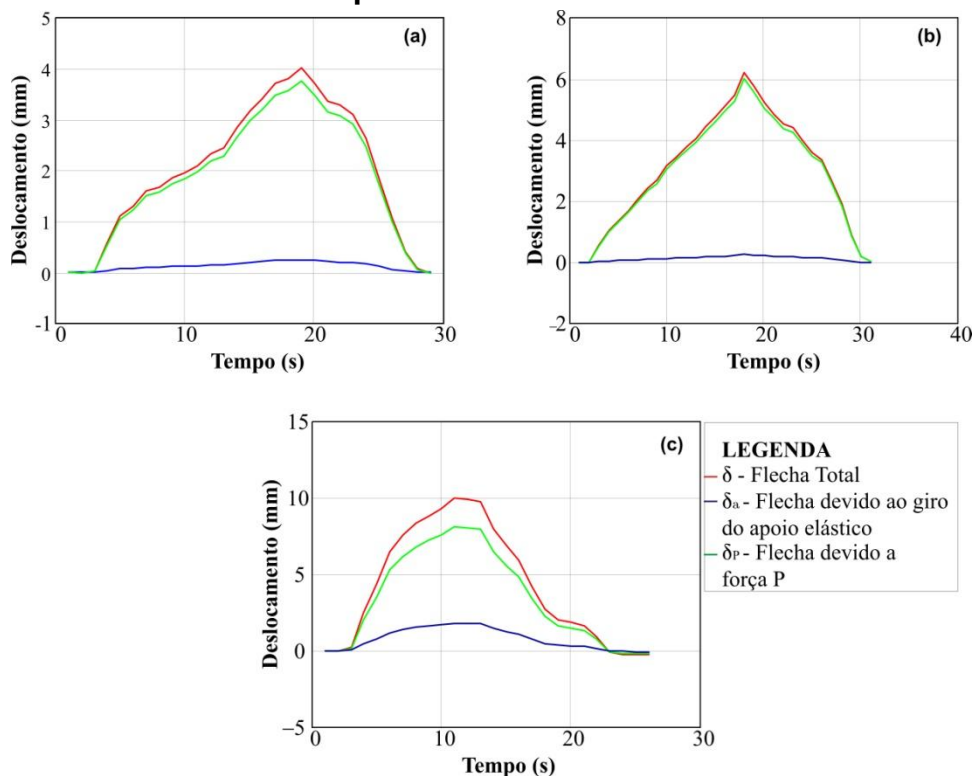


Figura C.3 - Diagrama Deslocamento-Tempo: (a) Direção 1, (b) Direção 2 e (c) Direção 3.



Instituto de Tecnologia  
Faculdade de Engenharia Civil  
Rua Augusto Corrêa, 01- Guamá. CEP 66075-110.  
Belém – Pará  
[www.ufpa.br](http://www.ufpa.br)