

Dionísio Cerqueira Alves Pereira

**Sensores de fibra óptica baseados em
redes de Bragg para monitorização
ambiental e estrutural**



**Departamento de Física
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Março de 2003**

Dionísio Cerqueira Alves Pereira

Sensores de fibra óptica baseados em redes
de Bragg para monitorização ambiental e
estrutural



*Dissertação submetida para a obtenção do
grau de Mestre em Optoelectrónica e Lasers*

Departamento de Física
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Março de 2003

Dissertação realizada sob a supervisão do Doutor
José Luís Campos de Oliveira Santos, Professor
Associado do Departamento de Física da
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

“O único modo de evitar os erros é adquirindo experiência; mas a única maneira de adquirir experiência é cometendo erros.”

Autor desconhecido

Agradecimentos

- Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador Doutor José Luís Campos de Oliveira Santos pelo estímulo e confiança que sempre me manifestou e pelas sábias sugestões que nos momentos mais atribulados me transmitiu. Gostaria igualmente de manifestar o meu apreço pela leitura e correcções sugeridas na organização desta dissertação.
- À Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos do INESC-Porto pelo acolhimento e bolsa de investigação proporcionados que foram decisivos na minha formação científica e clarificou alguns “buracos negros” remanescentes da minha formação anterior.
- Ao Orlando Frazão, pelos conhecimentos, energia e capacidade de trabalho que me transmitiu e por me ter feito acreditar que a ciência nasce em todas as pessoas.
- Ao João Ferreira, pelo paciente apoio e disponibilidade sempre manifestadas no capítulo da programação de controlo dos equipamentos de medição. Nunca me poderei esquecer da serenidade demonstrada num tal sábado 6 de Abril de 2002.
- Ao Prof. Joaquim Figueiras e ao Eng^o Carlos Félix pela colaboração e oportunidades concedidas quer no trabalho laboratorial quer nos testes de campo realizados.
- A todos os colegas e amigos da Unidade de Optoelectrónica pela ajuda, companheirismo e ambiente proporcionados que contribuem sem dúvida, para a criação de um verdadeiro e genuíno espírito de equipa. Um agradecimento especial à Luísa pela ajuda e bom humor sempre presente.

Sumário

O trabalho desenvolvido nesta dissertação e introduzido no capítulo 1, tem como principal objectivo o estabelecimento de pontes entre a tecnologia de sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica e o seu potencial de aplicação em diferentes domínios.

No capítulo 2, são apresentados uma série de conceitos e princípios que exprimem a generalidade dos fenómenos presentes no funcionamento dos sensores em fibra óptica, antes mesmo do surgimento das redes de Bragg. São mencionados, relativamente ao processo de medida, os diferentes tipos de sistemas sensores, bem como algumas das principais técnicas de processamento de sinal que lhe estão associadas.

O capítulo 3 é centrado na descrição formal do conceito de rede de Bragg em fibra óptica (FBG). É de igual modo feita referência a um segundo tipo de estruturas (redes de período longo (LPG) em fibra óptica) que desempenham funções complementares às redes de Bragg uma vez inscritas no núcleo da fibra óptica. Para as duas estruturas são descritas as técnicas mais relevantes envolvidas no seu fabrico.

Em paralelo, é apresentado um tratamento introdutório do mecanismo intrínseco de sensibilidade da fibra óptica à deformação e à temperatura, a partir do qual é estabelecida a ligação com a sensibilidade proporcionada por uma rede de Bragg sob a actuação das mesmas grandezas. Por último, é destacado o mecanismo de hidrogenização como técnica de aumento da fotosensibilidade.

O capítulo 4 (o mais extenso) é iniciado com a retrospectiva de alguns processos até agora implementados com sensores ópticos para a medição remota do índice de refração de líquidos. De seguida, é apresentado um tratamento formal que sustenta o mecanismo intrínseco de sensibilidade ao índice de refração externo dos dois tipos de redes utilizadas nas cabeças sensoras. São apresentados os resultados experimentais (para a medição simultânea da temperatura e da salinidade) obtidos em laboratório. Estes resultados derivam directamente dos dois tipos de cabeças sensoras utilizadas: híbrida ($LPG's+FBG's$) ou unicamente com $FBG's$ implementando o processo de “etching” com HF. Na parte final deste capítulo são apresentados os resultados preliminares obtidos com um cabo óptico integrando redes de Bragg em fibra óptica na monitorização distribuída da temperatura da água no canal de *Mira* na *Ria de Aveiro*.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos em campo para a monitorização de estruturas de engenharia civil no decurso de dois ensaios de carga realizados na *Ponte Luiz I* e *Viaduto de S.Roque* na cidade do Porto. As conclusões finais são apresentadas no capítulo 6.

Summary

The main goal of the work developed in this thesis, is the establishment of connections between the knowledge acquired in the technology of Bragg gratings based in optical fibre sensors technology and its application in various domains.

In chapter 2, several concepts and principles related with optical fibre sensing are presented. Furthermore, are indicated different kinds of sensorial systems, as well as related signal processing techniques.

In Chapter 3, the formal description of Bragg gratings and an introduction to long period gratings is addressed. In both cases the main fabrication techniques of these structures are indicated. Next, the intrinsic mechanism of optical fibre sensitivity to temperature and strain is directly related with the sensitivity of the Bragg grating under the actuation of these parameters. At the end, are presented some considerations concerning the photosensitivity mechanism of silica as well as in what concerns the hydrogenization technique used to enhance the fibre grating properties.

In chapter 4 (the longest) some background the remote measurement of refractive index of liquids optical sensors is outlined. Next, a formal treatment that supports the intrinsic sensitivity mechanism of both types of sensing heads research in this work is presented. Then, experimental results obtained in laboratory are addressed, being also presented (distributed water temperature measurements) from the optical cable prototype installed in *Mira Channel* located in *Ria de Aveiro*.

Chapter 5 reports the technology adaptation and results obtained in the field application of fibre Bragg grating sensors to the monitorization of civil engineering structures. Finally, chapter 6 addresses the concluding remarks.

Índice

Capítulo 1

- Introdução.....1

Capítulo 2

Sensores em fibra óptica.....5

- Interferómetros de Michelson e Mach Zehnder6
- Interferómetro de Fabry-Perot7
- Interferómetro polarimétrico9
- Interferómetro espectrométrico, efeito Raman, efeito Brillouin10
- Técnicas de processamento de sinal em sensores de fibra óptica.....11

Capítulo 3

Redes de Bragg.....13

- Introdução: FBG, LPG.....13
- Reflectividade de uma rede de Bragg (FBG)14
- Transmitância de uma Rede de Período Longo(LPG).....18
- Fabricação de redes de Bragg em fibra óptica19
- Fabricação de redes de período longo em fibra óptica.....20
- Sensibilidade da fibra óptica à deformação e temperatura.....21
- Estudo do Efeito da Hidrogenização em Fibras Ópticas25

Capítulo 4

Dispositivos sensores para a medição de índice de refração29

- Introdução.....29
- Método refractométrico29
- Método SPR.....31
- Fotorefractómetro construído em fibra multimodo.....32
- Dispositivos em fibra óptica para a medição de índice de refração (LPG e FBG).....33

- Derivação da equação de valores próprios da óptica geométrica.....34
- Propagação em guias circulares37
- Redes de período longo – elementos sensores de índice de refração41
- Sistema sensor implementado com LPG´s e FBG´s.....45
 - Medição em transmissão.....45
 - Medição em reflexão48
- Sistema sensor implementado com FBG´s51
- Monitorização distribuída da temperatura com um cabo de fibra óptica incorporando redes de Bragg.....59

Capítulo 5

Aplicação de sensores em fibra óptica para a monitorização estrutural.....65

- Introdução.....65
 - Cabeças sensoras65
 - Cabeças metálicas.....65
 - Cabeças compósitas.....67
- Categorias de medição.....68
- Processamento de sinal e desmodulação.....69
- Resultados experimentais.....72
- Ponte Luiz I.....72
 - Instalação dos sensores.....72
 - Resultados comparativos do ensaio de carga realizado no dia 6 de Abril de 2002...74
 - Teste de monitorização de tráfego realizado no dia 9 de Abril de 2002.....76
 - Estimativa do volume de tráfego de veículos pesados no período da medição.....78
- Viaduto de S.Roque.....79
 - Resultados experimentais.....82

Capítulo 6

- Conclusões83

Apêndice 1	87
Apêndice 2	91
Apêndice 3	95
Referências	97

Capítulo 1 - Introdução

É hoje em dia consensual que uma sociedade tecnologicamente evoluída é aquela à qual estão directamente associadas preocupações em domínios tão diversos que vão desde a segurança ao ambiente e à própria relação custo-benefício de uma qualquer tecnologia emergente. Neste contexto, associada ao progressivo avanço tecnológico, tornou-se crescente a necessidade de criação e aplicação de novos dispositivos sensores em áreas tão fundamentais como a medicina, transportes e vias de comunicação, controlo de poluição e processos de fabrico em geral. Do desempenho e fiabilidade do conjunto dos dispositivos sensores resultarão benefícios ao nível da segurança pessoal e ambiental com implicação imediata no aumento do bem estar. De entre os diferentes tipos de sensores existentes, os sensores ópticos e, em particular, os sensores em fibra óptica apresentam um leque de características que os tornam extremamente atractivos em múltiplas aplicações. De facto, características favoráveis como o peso e dimensões reduzidas, imunidade electromagnética, resistência à degradação ambiental, elevada largura de banda e custo reduzido foram amplamente demonstradas na última década de desenvolvimento, fazendo prever um potencial de crescimento ainda maior nos próximos anos. Neste trabalho são apresentados, em dois domínios distintos, os resultados da aplicação de um grupo específico de sensores em fibra óptica, os designados sensores de Bragg em fibra óptica. Esses domínios são:

- monitorização de ambientes estuarinos e costeiros
- monitorização de obras de arte em Engenharia Civil.

Monitorização de ambientes estuarinos e costeiros

Recentemente a necessidade da monitorização de diferentes parâmetros conduziu ao desenvolvimento de várias arquitecturas capazes de medição em tempo real. Do conjunto dos vários ambientes naturais alvo, os estuários e ambientes costeiros constituem zonas privilegiadas de bio-diversidade, sendo, pela sua natureza, extremamente sensíveis à mudança nas condições fronteira, em particular no que diz respeito às propriedades da água. Neste contexto, especial atenção deverá ser dedicada ao diagnóstico e vigilância destes ecossistemas altamente condicionados pelo excesso de actividade humana e que, entre outras particularidades, constituem regiões de confinamento de fluxos de água

salgada proveniente do oceano e da foz do(s) rio(s) adjacente(s). A variação temporal destes dois fluxos, condicionada naturalmente pela acção das marés e restantes condições meteorológicas, permite estabelecer, nessas regiões intermédias, gradientes espaciais de temperatura e salinidade. O estabelecimento destes gradientes associados aos caudais envolvidos são condicionantes do desenvolvimento (nestes *habitat's*) de diferentes espécies animais e vegetais.

Em Portugal, a *Ria de Aveiro* constitui o exemplo de uma região com as características acima descritas. A Ria é o resultado do recuo do mar, com a formação de cordões litorais que, a partir do séc. XVI, formaram uma laguna que constitui um dos mais importantes e belos acidentes hidrográficos da costa portuguesa.

Estendendo-se ao longo de 47 Km, de Ovar até Mira, e 11 Km de largura máxima no sentido Este-Oeste, que abrangem cerca de 11000ha, 6000ha dos quais permanentemente alagados, nela desaguardam o Vouga, o Antuã e o Boco, tendo como única comunicação com o mar um canal que corta o cordão litoral entre a Barra e S. Jacinto. Destes três rios o Vouga é responsável por aproximadamente 2/3 do fluxo de água doce para o interior da Ria. A *Ria de Aveiro* apresenta-se assim como o candidato ideal à instalação de um sistema com tecnologia óptica para a monitorização de temperatura e salinidade. De facto, associadas às vantagens anteriormente referidas, a possibilidade de efectuar medições "quasi" distribuídas ao longo de vários Km's, em tempo real, com um cabo óptico dedicado, inócuo para o ambiente e altamente resistente à corrosão subaquática, potencia a aplicação desta tecnologia no domínio da monitorização ambiental.

No presente trabalho são apresentados os resultados experimentais obtidos na monitorização da temperatura da água no *Canal de Mira* com recurso a um cabo óptico de 1.4Km de extensão integrando sensores de Bragg em fibra óptica. Em paralelo, foi desenvolvido o projecto de duas cabeças sensoras em fibra óptica para medição simultânea de temperatura e salinidade e posterior interligação ao sistema de medição distribuída de temperatura.

Monitorização de obras de arte em Engenharia Civil

Presentemente, um dos grandes desafios colocados à Engenharia Civil é o desenvolvimento de estruturas inteligentes que, possuindo um sistema integrado de sensores, actuem e aprendam com essa mesma informação. Para uma melhor clarificação, tomemos como exemplo a mão humana; através dela, podemos adequar a força

desenvolvida à carga que transportamos, reposicioná-la na presença de vento por forma a minorar a resistência ao ar ou mesmo ter uma avaliação instantânea de um ferimento quando atingida por um pequeno objecto. Neste sentido, a monitorização em geral, e de obras de arte no domínio da Engenharia Civil em particular, representa a transcrição do natural para o artificial de um conjunto de acções e procedimentos tendentes à optimização da durabilidade, funcionalidade e segurança das construções. A título de exemplo, nos Estados Unidos a *Federal Highway Administration* (dados de 1996) estima que 42% das 578.000 pontes existentes apresentam deficiências estruturais ou funcionais, donde decorrem os enormes benefícios que o acompanhamento permanente do estado da estrutura pode acarretar a um nível sócio-económico.

À semelhança do que acontece na monitorização ambiental, a aplicação de sensores em fibra óptica no domínio da Engenharia Civil tem conhecido nos últimos anos um enorme desenvolvimento. De facto, sendo a monitorização da temperatura e da deformação as duas principais grandezas alvo a estudar, esta tecnologia alia à sua elevada sensibilidade a possibilidade de, uma vez associada a materiais compósitos, os correspondentes sensores poderem constituir parte integrante e permanente da estrutura.

Neste trabalho são também apresentados os resultados experimentais obtidos em campo dos testes efectuados com sensores de Bragg em fibra óptica no contexto da monitorização de obras de arte em Engenharia Civil.

Capítulo 2 - Sensores em fibra óptica

Os sensores em fibra óptica surgiram em meados da década de setenta antes mesmo do aparecimento de fibras de baixa perda. A filosofia condutora do desenvolvimento desta tecnologia é baseada numa abordagem da medição de grandezas físicas através de processos interferométricos ou de polarização, até então pouco explorados e que pela sua própria natureza possibilitaram o alcance de gamas de variação outrora despercebidas. Sem perda de generalidade, é possível afirmar-se que qualquer conjunto de interações externas é “impresso” na fibra e traduzido por diversos mecanismos nos quais estão incluídas variações de fase, intensidade, frequência, polarização e comprimento de onda. Os sensores ópticos podem então ser classificados consoante o seu próprio mecanismo de transdução nos seguintes tipos: intensiométricos, interferométricos, polarimétricos, espectrométricos e modalmétricos⁽¹⁾(*E.Udd-1989*). Os sensores intensiométricos envolvem variações de intensidade à saída de uma fibra promovidas pelo mensurando e são habitualmente construídos em fibra multimodo. Sendo a intensidade uma grandeza habitualmente penalizada por um conjunto de factores intrínsecos ao próprio sistema de medição (conectores, fontes, etc) é comum o uso de mecanismos de referência que salvaguardam o melhor desempenho nas medições⁽²⁾(*G.Murtaça-1994*). Os sensores interferométricos envolvem variações induzidas pelo mensurando na fase da radiação que percorre o interferómetro e são habitualmente construídos em fibra monomodo. Efectuando a comparação entre a fase da radiação da onda de referência com aquela onde actua o mensurando proveniente da mesma fonte é possível estabelecer uma relação linear estável de várias ordens de grandeza entre a fase relativa dessas duas ondas. Habitualmente são usados dois tipos de configurações: interferómetros de duas ondas (Michelson e Mach-Zehnder) ou múltiplas ondas (Fabry-Perot). No interferómetro de Michelson a radiação é dividida por um acoplador direccionado e enviada para dois percursos distintos, sendo um deles actuado pelo mensurando (percurso de sinal) e constituindo o outro o percurso de referência. Ambos os percursos físicos terminam com um espelho incorporado na secção recta da fibra, habitualmente construído a partir da deposição de um filme de prata. Após a passagem de retorno pelo acoplador o sinal de interferência fica disponível para processamento. Na segunda configuração (interferómetro de Mach-Zehnder) são usados dois acopladores (um de divisão e o outro de recombinação), sendo que o mensurando

actua directamente num dos braços do interferómetro. As duas saídas existentes encontram-se em oposição de fase e possuem igual magnitude apenas nos pontos onde a variação da intensidade à saída do interferómetro com a fase é máxima. Estes pontos são designados por pontos de quadratura e são de grande utilidade para o funcionamento no regime de máxima sensibilidade⁽³⁾(L.A.Ferreira-1994).

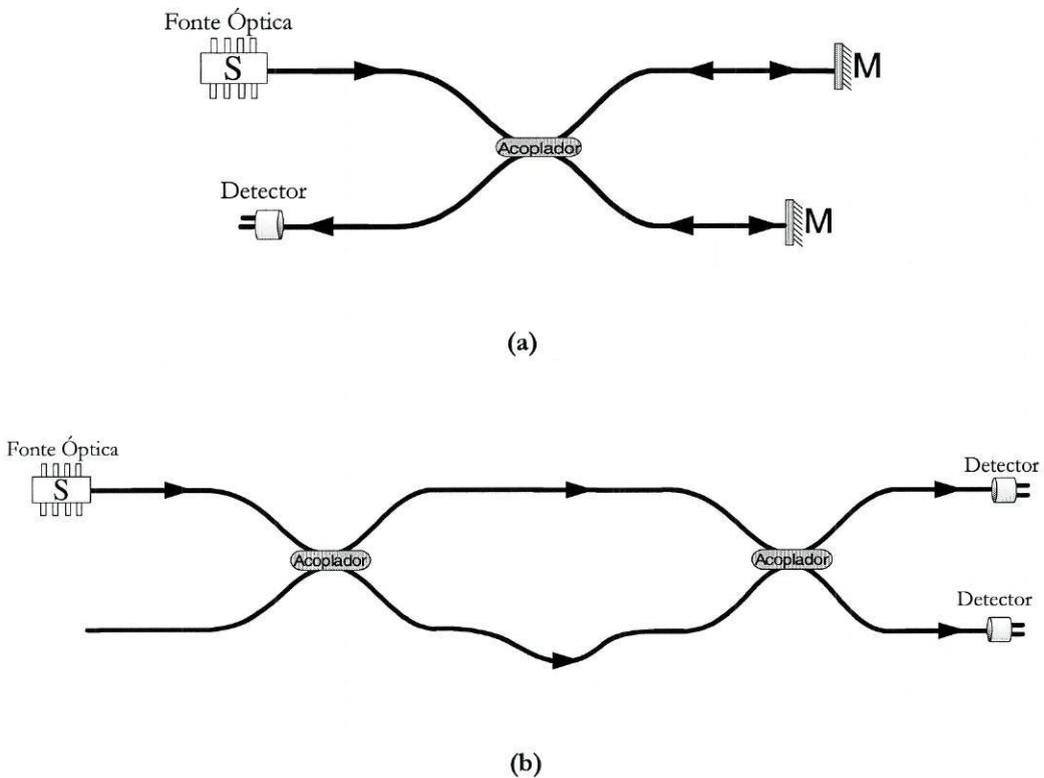


Figura 2.1 - Configurações interferométricas (de duas ondas) em fibra óptica: (a) Michelson (b) Mach-Zehnder .

As duas configurações anteriores possuem a mesma função de transferência indicada na expressão (2.1) e representada na figura 2.2:

$$I_{out} = (I_1 + I_2)[1 + V \cos \phi] \tag{2.1}$$

onde I_1 , I_2 são as intensidades das ondas interferentes, ϕ a diferença de fase entre eles e V a visibilidade ou contraste das franjas de interferência⁽⁴⁾(Hecht- 1991).

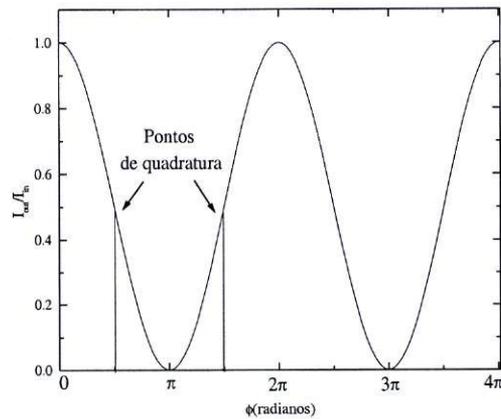


Figura 2.2 - Função de transferência de um interferômetro de duas ondas ($V=1$).

Nesta situação foram assumidas condições ideais de funcionamento correspondentes a uma visibilidade unitária (funcionamento óptimo dos acopladores e inexistência de perdas). Tal como foi anteriormente referido, os interferômetros de múltiplas ondas, também designados na sua versão mais comum por interferômetros de Fabry-Perot, são habitualmente construídos em fibra monomodo; a cabeça sensora resulta do confinamento num pequeno capilar em vidro de duas extremidades de fibra perfeitamente cortadas e equipadas com um filme parcialmente reflector. No volume definido por esta região a radiação percorre várias vezes a sua extensão, o que amplia o efeito de desfasamento introduzido pelo mensurando na radiação devolvida e, deste modo, a sensibilidade do sistema. Com efeito, se considerarmos por exemplo a dilatação térmica, a distância (d) entre as faces espelhadas é alterada induzindo assim a correspondente variação na fase total ϕ contida na função de transferência.

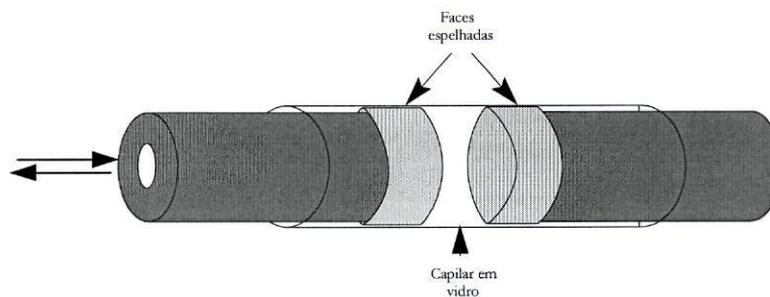


Figura 2.3 - Cavidade de Fabry-Perot em fibra óptica.

A função de transferência em transmissão deste tipo de interferómetros para uma cavidade que tem superfícies espelhadas com reflectividade R é :

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{1 + \left[\frac{4R}{(1-R)^2} \right] \sin^2(\phi/2)} \quad F = \frac{4R}{(1-R)^2} \text{ (coeficiente de finesse)} \quad (2.2)$$

com o valor da fase óptica ϕ dado por:

$$\phi = \frac{4\pi nd}{\lambda} \quad (2.3)$$

A partir da representação da expressão (2.2) (Figura 2.4) importa reter dois aspectos: primeiro, para valores de fase $\phi=2m\pi$ a transmissão é elevada, mesmo para elevados valores de reflectividade; segundo, o ponto de sensibilidade máxima depende do coeficiente de finesse, sendo localizado aproximadamente na região onde $I_{out} = (3/4)I_{max}$ para valores de coeficiente de finesse elevados ou na região onde $I_{out} = (1/2)I_{max}$ para valores reduzidos desta grandeza.

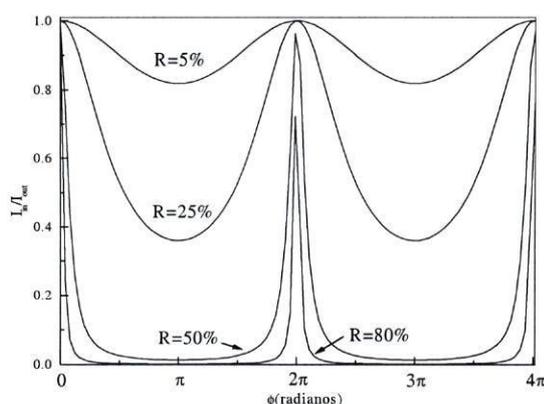


Figura 2.4 - Função de transferência normalizada de um interferómetro de Fabry-Perot para vários valores da reflectividade das superfícies espelhadas.

Na tabela (2.1) estão resumidas as expressões que fornecem o valor da diferença de fase presente na função de transferência das três principais configurações interferométricas implementadas em sensores em fibra óptica.

<i>Tipo de configuração</i>	<i>Fase Óptica</i>
Michelson	$\phi = \frac{4n\pi L}{\lambda}$
Mach-Zehnder	$\phi = \frac{2\pi nL}{\lambda}$
Fabry-Perot	$\phi = \frac{4n\pi d}{\lambda}$

Tabela 2.1 - Diferenças de fase associadas às diferentes configurações interferométricas.

A partir das expressões acima indicadas é facilmente reconhecível que a ligação entre a acção do mensurando e a diferença de fase introduzida é efectuada quer por parâmetros geométricos directos (L , d), quer por alterações do índice de refração (n). Da modificação individual ou conjunta destes dois parâmetros resulta a modificação do percurso óptico entre os percursos de sinal e de referência que sustenta o princípio de funcionamento das configurações apresentadas.

Nos interferómetros polarimétricos e modalmétricos o valor de intensidade à saída é modulado pelas alterações impostas, respectivamente, ao estado de polarização ou distribuição do campo modal provocadas pelo mensurando na região de medição⁽⁵⁾(Blake – 1987). Num sensor polarimétrico a perturbação é reflectida de forma diferente nos dois modos próprios de polarização que, de certa maneira, funcionam de forma análoga ao braço de sinal e de referência de um interferómetro. São construídos em fibra birrefringente de modo que a partir da diferente resposta a cada uma das perturbações dos dois estados de polarização próprios, a alteração do estado de polarização reconstruído à saída possa ser quantificada. A colocação de um polarizador linear à saída permite traduzir em variações de intensidade óptica as flutuações do estado de polarização induzidas pelo mensurando^(6,7)(Varnham-1983, Bock-1989).

Dos diferentes tipos de interferómetros em fibra óptica acima mencionados falta apenas referir os interferómetros do tipo espectrométrico. Aqui o princípio de funcionamento é baseado em dois efeitos: difusão Raman e difusão Brillouin⁽⁸⁾ (*Ashcroft- 1976*). A interacção entre a radiação electromagnética e os diferentes modos de vibração de um sistema material desencadeia três tipos de fenómenos: absorção, reflexão e difusão (“*scattering*”). Sobre a difusão em particular, é possível afirmar-se que é devida à variação da polarizabilidade eléctrica induzida pelas vibrações da rede do sistema material, sendo que em linguagem semiclassical a distinção entre o regime de Raman e de Brillouin é estabelecida quando na interacção com um fóton, ora é envolvido um fonão óptico ou um fonão acústico respectivamente⁽⁹⁾ (*Yariv-1989*).

A geração destes regimes envolve a excitação de um meio material por um campo de bombagem e por um outro de muito menor intensidade designado campo de prova ou de sinal. É possível demonstrar-se que este último é amplificado no meio previamente excitado na situação em que a diferença da sua frequência relativamente à da onda de bombagem é negativa; na situação inversa ocorre absorção, sendo o coeficiente de ganho função dessa própria diferença e ressonante, isto é máximo, na situação em que essa diferença coincide com a frequência própria do modo excitado (perfil de ganho do sistema). A transposição deste mecanismo, em particular no regime de Brillouin, para o domínio dos sistemas sensores em fibra óptica é efectuada exprimindo a diferença das frequências das ondas intervenientes da seguinte maneira⁽¹⁰⁾ (*Horiguchi 1992*):

$$\nu_B = \frac{2nV_a}{\lambda} \quad (2.4)$$

onde V_a é a velocidade do som no vidro, n o índice de refração efectivo da fibra e λ o comprimento de onda da bombagem no vazio. Na expressão (2.4) ν_B é designada por frequência de Brillouin e mais não é do que a frequência própria do modo acústico excitado em determinadas condições de pressão e temperatura. Com efeito, no regime de Brillouin a interacção estabelecida com os fonões da rede é essencialmente modulada pelo estado de temperatura e pressão a que o sistema material está sujeito, que condicionam a densidade local do material, e consequentemente o índice de refração efectivo local. Neste contexto utilizando a técnica (*BOTDA- Brillouin optical time domain analysis*) é possível recolher simultaneamente informação sobre o local e o estado de temperatura/pressão numa determinada localização na fibra óptica⁽¹¹⁾ (*Kurashima 1990*). A adopção desta técnica

à monitorização por fibra óptica exige a utilização de lasers de bombagem e dispositivos de processamento de elevado custo pelo que a sua aplicação tem sido limitada. Actualmente a *Ando Corporation*, dispõe de um analisador de medição de perda em fibra óptica induzida por pressão baseado no efeito Brillouin especialmente projectado para ser aplicado em cabos de fibra óptica embebidos em estruturas de betão.

Técnicas de processamento de sinal em sensores de fibras óptica

Para completar a abordagem até aqui reunida, falta referir o tema que completa o quadro no que diz respeito à definição de um sistema sensor completo implementado em fibra óptica, i.e., o processamento de sinal.

Para o caso dos sensores interferométricos, as técnicas de processamento de sinal têm como principal objectivo traduzir a informação de fase proveniente de um interferómetro num sinal eléctrico proporcional a essa mesma fase para posterior tratamento em circuitos adequados, sendo que a especificidade do processamento de sinal neste tipo de sensores é essencialmente devida á sua saída sinusoidal. As técnicas de processamento de sinal mais comuns utilizadas no domínio dos sensores resultam da adaptação directa daquelas que foram sendo desenvolvidas para os sistemas coerentes de comunicação por fibra óptica ⁽¹²⁾(*Keiser-1989*). Neste tipo de sistemas, imediatamente antes da recepção é adicionada à onda transmitida de sinal uma onda gerada localmente de tal forma que no processo seguinte é a combinação das duas que é detectada. De uma forma geral, considerando um perfeito ajuste de polarização entre a onda de sinal e a gerada pelo oscilador pode-se escrever a seguinte expressão para a onda resultante :

$$P(t) = P_{sinal} + P_{oscilador} + 2\sqrt{P_s P_{osc}} \cos[(\omega_s - \omega_{osc})t + \phi(t)] \quad (2.5)$$

com:

$$\phi(t) = \phi_s(t) - \phi_o(t) \quad (2.6)$$

Na situação em que a frequência do sinal (ω_s) é idêntica à frequência do oscilador local (ω_{osc}) está-se então na presença do modo de detecção homodino no qual, admitindo a estabilidade da fonte de sinal, toda a informação está contida na fase $\phi(t)$. Se esta possuir

uma variação sinusoidal com $\phi_s(t) \ll 1$ então é facilmente demonstrável pela expansão da expressão (2.5) que o sinal de saída é condicionado pelas variações aleatórias da fase interna do oscilador $\phi_o(t)$. Este efeito habitualmente designado por “*signal fading*” encobre por isso as variações de fase efectivamente relacionadas com o sinal, induzindo erros na medição. Do que acaba de ser referido resulta que a adopção deste tipo de processamento requer a utilização de osciladores de fase controlada por realimentação o que torna bastante mais complexo o sistema de detecção. O modo de detecção que ultrapassa esta dificuldade consiste na utilização do modo complementar ao modo homodino, ou seja, o modo heterodino. Neste caso as frequências de sinal e do oscilador não coincidem, gerando-se por isso uma frequência portadora que possibilita a implementação de técnicas habituais de desmodulação RF.

A transposição do que acaba de ser dito no contexto das comunicações ópticas para o domínio do processamento de sinal em dispositivos sensores em fibra óptica, nomeadamente baseados nas configurações de Michelson e Mach-Zehnder anteriormente apresentadas, é imediata. De facto, neste domínio a potência de sinal e do oscilador local na detecção não são mais do que aquelas associadas ao percurso de sinal e de referência em cada uma das configurações.

Como foi referido anteriormente, o ponto preferencial de funcionamento do interferómetro é o ponto de quadratura ou ponto de máxima sensibilidade. A manutenção do interferómetro neste ponto na ausência de qualquer sinal impõe que as flutuações da fase à saída do interferómetro sejam compensadas. Esta compensação pode ser efectuada com recurso a técnicas homodinas activas, ou seja requerem a utilização de elementos activos de actuação para compensação (*feedback*)⁽¹³⁾(*Jackson-1980*), ou homodinas passivas, que como o próprio nome indica dispensam o uso de elementos activos para compensação⁽¹⁴⁾(*Koo-1982*). Apesar da detecção homodina passiva não necessitar de elementos activos de compensação, o que a torna mais atractiva em termos de medição remota, a gama dinâmica e sensibilidades alcançadas ainda não superam aquelas proporcionadas pelo modo homodino activo.

Por fim, importa referir que para além da vantagem em termos de detecção proporcionada pelo modo heterodino, este modo também possibilita uma gama dinâmica e região de operacionalidade subatancialmente superiores às obtidas com o modo homodino activo.

Capítulo 3 - Redes de Bragg

No capítulo anterior foram brevemente descritas as configurações base implementadas em fibra óptica destinadas à medição de diversos parâmetros físicos. Uma nova abordagem no projecto de sistemas sensores baseados em fibra óptica surgiu com o aparecimento das redes de Bragg em fibra óptica e com o conseqüente desenvolvimento de um novo grupo de técnicas de interrogação e multiplexagem capazes de serem integradas a um custo que as tornam potencialmente atractivas. As redes de difracção de Bragg em fibra óptica são estruturas que resultam de uma modulação do índice de refracção do núcleo da fibra óptica. A sua designação é devida à semelhança existente entre o fenómeno de espalhamento de raios X em planos de uma rede cristalina, inicialmente estudado pelo cientista inglês Lawrence Bragg, e a interferência que ocorre entre a onda incidente na estrutura e o conjunto de ondas geradas pela modulação periódica de índice de refracção. As redes de Bragg em fibra óptica constituem por isso um grupo específico de um outro mais geral formado pelas redes de difracção em óptica e cujo comportamento é descrito pela seguinte equação:

$$n \sin \theta_2 = n \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (3.1)$$

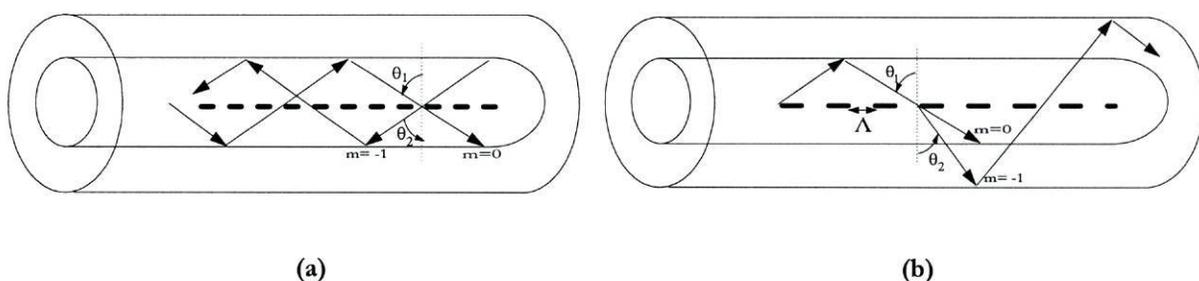


Figura 3.1 - a) Ilustração geométrica representativa de uma rede de Bragg b) ilustração geométrica de uma rede de período longo.

onde θ_1 e θ_2 são os ângulos de incidência e de refracção da radiação, λ é o comprimento de onda e Λ o período espacial da rede indicado na figura 3.1(b). Noutros termos é possível rescrever a equação (3.1) considerando a “reflexão” de um modo com ângulo θ_1 um outro

em propagação na direcção oposta e com um ângulo $\theta_2 = -\theta_1$, vector de onda $\beta = (2\pi/\lambda)n_{eff}$ e $n_{eff1} = n_{co} \sin\theta_1$. Nesta situação a expressão (3.1) adquire a forma:

$$\lambda = (n_{eff1} + n_{eff2})\Lambda \quad (3.2)$$

Inversamente, se a interacção se verificar entre modos propagando-se na mesma direcção o vector de onda β_2 é negativo e como tal:

$$\lambda = (n_{eff1} - n_{eff2})\Lambda \quad (3.3)$$

As equações (3.2) e (3.3) exprimem as condições de ressonância para o comprimento de onda presentes nos dois tipos de redes de difracção em fibra óptica existentes: as redes de Bragg em reflexão (FBG- *Fibre Bragg Grating*) em que é estabelecida uma interacção entre modos contra-propagantes e as redes de Bragg em transmissão ou redes de período longo (LPG- *Long Period Grating*) no qual é estabelecida uma interacção entre modos copropagantes do núcleo e da bainha. Estes dois tipos de redes estão presentes numa grande parte dos sistemas sensores em fibra óptica desenvolvidos actualmente e, em particular, nos dois tipos de configurações apresentadas neste trabalho para a medição simultânea de temperatura e salinidade.

Reflectividade de uma rede de Bragg.

Nesta secção é descrito o modelo físico que exprime a função de transferência de uma rede de Bragg. Como foi atrás referido, numa rede de Bragg em fibra óptica ocorre o acoplamento contrapropagante de dois modos na região da modulação de índice. De uma forma simplificada, a variação do índice de refração no núcleo da fibra pode ser expressa na forma de uma função sinusoidal do seguinte tipo:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos(2pz) \quad (3.4)$$

onde n_0 constitui o valor médio de índice de refração do núcleo, Δn a amplitude da modulação e $p \equiv \pi/\Lambda$, em que Λ é o período espacial de modulação. Considerando a

propagação de um campo segundo z a equação de onda resultante pode ser expressa da seguinte forma:

$$E(z,t) = E(z)e^{i\omega t} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial^2 E(z)}{\partial^2 z} = (-n_0 + \Delta n \cos(2pz))^2 k^2 E(z) \quad (3.6)$$

$$E(z) = a_f(z)e^{-ipz} + a_b(z)e^{ipz} \quad (3.7)$$

sendo $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ e a_f , a_b coeficientes associados às amplitudes das ondas propagante e contra propagante respectivamente. Considerando $\Delta n/n \ll 10^{-2}$ (situação habitual), a expansão do termo quadrático na expressão (3.6) permite desprezar o termo proporcional a Δn^2 . Ao mesmo tempo, se na expressão (3.6) forem desprezados os termos em segunda derivada da solução geral para o campo na região perturbada fica então definido o seguinte sistema de equações acopladas de 1ª ordem⁽¹⁵⁾(Erdogan-1997):

$$2ip \frac{\partial a_b}{\partial z} + (\beta^2 - p^2)a_b - \xi a_f = 0 \quad (3.8)$$

$$2ip \frac{\partial a_f}{\partial z} - (\beta^2 - p^2)a_f + \xi a_b = 0 \quad (3.9)$$

Em que:

$$\xi = k^2 n_0 \Delta n \quad (3.10)$$

$$\beta = n_0 k \quad (3.11)$$

O sistema de equações acopladas de 1ª ordem (3.8) e (3.9) foi definido pela a separação dos termos em e^{ipz} e e^{-ipz} . A partir do isolamento de uma das variáveis de amplitude deste sistema é-se conduzido à seguinte equação diferencial de 2ª ordem:

$$\frac{\partial^2 a_b}{\partial^2 z} - \kappa^2 a_b = 0 \quad (3.12)$$

em que:

$$\kappa^2 = \frac{\xi^2}{4p^2} - \frac{(\beta^2 - p^2)^2}{4p^2} \quad (\text{coeficiente de acoplamento}) \quad (3.13)$$

Mais uma vez a solução geral para a equação diferencial de 2ª ordem (3.12) pode ser expressa do seguinte modo:

$$a_b(z) = b_1 e^{ikz} + b_2 e^{-ikz} \quad (3.14)$$

Neste ponto, considerando L_G o comprimento da rede é possível definir as condições fronteira seguintes:

$$\begin{cases} a_b(L_G) = 0 \\ P_f(0) \equiv P_0 \end{cases} \quad (3.15)$$

A partir da manipulação das expressões (3.12 – 3.14) e as respectivas condições fronteira (3.15) a expressão geral resultante para a reflectividade de uma rede de Bragg é a seguinte:

$$R(\kappa L_G) = \frac{\sinh^2(\kappa L_G)}{\left[\frac{(\beta^2 - p^2)}{\xi^2} \sinh^2(\kappa L_G) + \frac{4p^2 \kappa^2}{\xi^2} \cosh^2(\kappa L_G) \right]} \quad (3.16)$$

A figura (3.2) ilustra esta função para $n_0=1.45$, $\Lambda=1072\text{nm}$ e $\Delta n=0.001$.

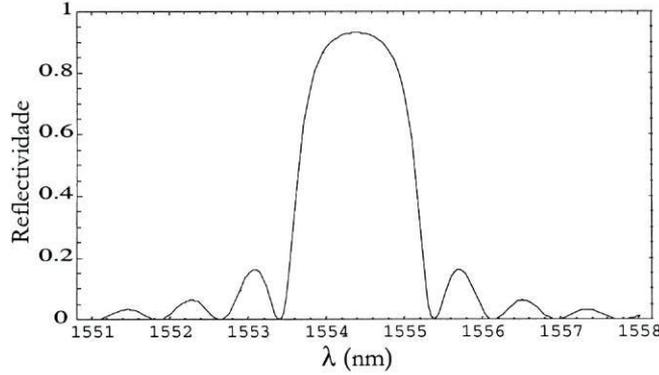


Figura 3.2 - Espectro de reflexão de uma rede de Bragg ($n_0=1.45$; $\Lambda=1072\text{nm}$; $\Delta n=0.001$).

A reflectividade de pico, correspondente à condição de *phase-matching* ($\beta=p$), resulta directamente da expressão (3.16):

$$R_{\max}(\kappa L_G) = \tanh^2(\kappa L_G) = \tanh^2\left(\pi\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)\left(\frac{L_G}{\Lambda}\right)\right) \quad (3.17)$$

Por outro lado, reconhecendo que o primeiro zero da resposta espectral da rede ocorre na situação em que ($\kappa L_G = \pi$), então a partir do modelo anterior é possível de forma aproximada definir a largura espectral de uma rede de Bragg como:

$$\Delta\lambda_w = \lambda_B \sqrt{\left\{\frac{\Lambda}{L_G}\right\}^2 + \left\{\frac{\Delta n}{2n_0}\right\}^2} \quad (3.18)$$

Neste ponto importa reter que a partir das expressões (3.17) e (3.18) é observado que para valores de periodicidade espacial (Λ) crescentes o valor da reflectividade de pico e da largura espectral variam em sentido contrário. Por este motivo é necessário o estabelecimento de um compromisso durante o processo de fabrico da rede de Bragg adequado ao tipo de aplicação a que se destina.

Transmitância de uma Rede de Período Longo.

Como foi atrás referido o segundo tipo de redes de difracção em fibra óptica existentes, as redes de período longo, constituem um grupo de estruturas que efectuam o acoplamento entre o modo propagante do núcleo para um modo da bainha. O formalismo matemático que conduz ao sistema de equações acopladas e respectivas condições fronteira mantém-se válido para o cálculo da função de transmitância de uma rede de período longo. No entanto pelo facto da interacção se verificar entre modos de natureza distinta o coeficiente de acoplamento não pode ser calculado do modo simplificado como o usado para as redes de Bragg de período curto, sendo necessário o cálculo numérico do integral seguinte:

$$K'_{kj}(z) = \frac{\omega}{4} \iint_{\infty} dx dy \Delta \epsilon(x, y, z) \vec{e}_{kz}(x, y) \vec{e}_{jt}^*(x, y) \quad (3.19)$$

Nesta expressão $\Delta \epsilon$ é o valor da diferença de permitividade gerada pela modulação do índice sendo $\vec{e}_{kz}(x, y)$ e $\vec{e}_{jt}^*(x, y)$ os campos que descrevem o modo guiado no núcleo da fibra e o modo da bainha, respectivamente. Na figura (3.3) representa-se a função de transmitância de uma rede de período longo.

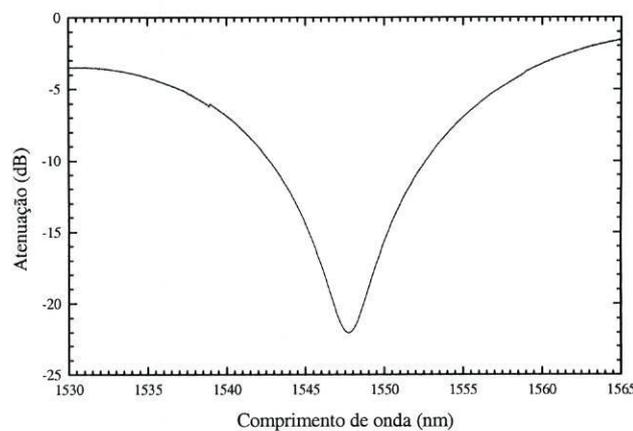


Figura 3.3 - Função de transmitância de uma rede de período longo

Fabricação de redes de Bragg em fibra óptica.

As diversas técnicas de fabricação de redes em fibra óptica têm como objectivo o registo eficiente de alterações de índice de refração localizadas numa extensão definida do núcleo da fibra e, deste modo, a definição de uma rede de difracção. De uma forma geral, é possível afirmar-se que uma técnica de fabricação ideal de redes de Bragg deve ser flexível ao nível da selectividade espectral apresentando simultaneamente um bom nível de repetibilidade. Nos pontos abaixo indicados é feita uma descrição sumária das principais técnicas existentes:

- Método holográfico - Esta técnica utiliza uma configuração interferométrica habitualmente utilizada no fabrico de hologramas de transmissão e constitui a primeira montagem interferométrica projectada para o registo de um padrão de interferência no núcleo da fibra. A definição da periodicidade espacial Λ é efectuada por actuação nos espelhos condicionantes do ângulo φ compreendido entre cada uma das ondas interferentes e a normal ao eixo da fibra. Estes dois parâmetros estão relacionados entre si pela expressão: $\Lambda = \lambda / \varphi^{(16)}$ (Meltz-1989).
- Método da máscara de fase - Neste método a radiação UV incide directamente num elemento difractivo gerador de uma modulação espacial de fase nas ordens difractadas +1 e -1. A fixação da porção de fibra sobre a face oposta à da radiação incidente permite a fotoimpressão da modulação de índice de refração⁽¹⁷⁾ (Hill-1993).
- Método de varrimento fibra/máscara de fase - Neste método a fibra encontra-se posicionada de forma análoga à do método da máscara de fase mas em movimento relativamente a esta. A partir do controlo do movimento relativo estabelecido entre o deslocamento da fibra e o varrimento do feixe UV é possível, com uma única máscara de fase definir o comprimento de onda de Bragg pretendido⁽¹⁸⁾ (Cole-1995).
- Método interferométrico com fonte sintonizável - Esta técnica é em tudo semelhante à anterior excepto no facto de utilizar as ordens +1 e -1 para as ondas interferentes e não a mera divisão de amplitude. O controlo do ângulo entre os

feixes interferentes é efectuado de maneira indirecta pela sintonização do comprimento de onda da fonte o que altera o ângulo de incidência das ordens de difracção incidente em cada um dos espelhos⁽¹⁹⁾(Dockney-1996).

Na figura (3.4) é apresentado um esquema ilustrativo da montagem que implementa o método da máscara de fase utilizada no presente trabalho para a fabricação das redes de Bragg.

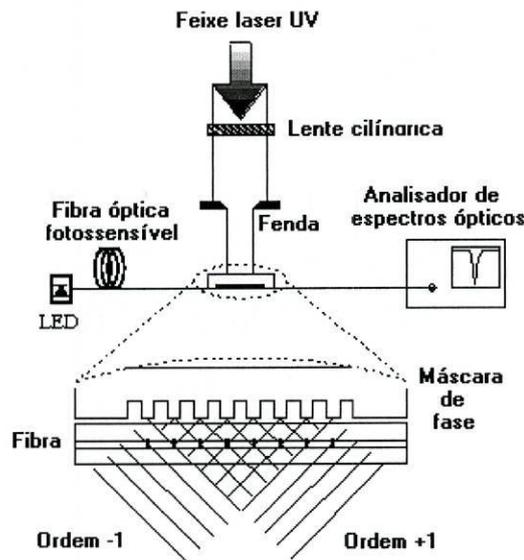


Figura 3.4 - Dispositivo experimental de fabricação de redes de Bragg pela técnica de máscara de fase.

Fabricação de redes de período longo em fibra óptica.

Nas redes de período longo, à semelhança das redes de Bragg é induzida uma modulação periódica do índice de refração. Nos pontos abaixo indicados é feita uma descrição sumária das principais técnicas existentes:

- Técnica da máscara de amplitude – Como o próprio nome indica a fibra é encostada a uma máscara de amplitude com a periodicidade requerida e exposta à radiação UV⁽²⁰⁾(Ashish-1996).
- Técnica de escrita por arco eléctrico – Nesta técnica a fibra é deslocada lateralmente com grande precisão, sendo pontualmente disparados arcos eléctricos

que a atravessam induzindo assim variações locais de índice de refração⁽²¹⁾(G.Rego-2001)

- Técnica de escrita ponto a ponto – Nesta técnica a fibra óptica é também deslocada lateralmente com grande precisão sendo o feixe UV focalizado em pontos específicos durante um intervalo de tempo bem definido⁽²²⁾(Xuewen-2002).

Na figura (3.5) é apresentado um esquema ilustrativo da montagem que implementa o método de escrita por arco eléctrico utilizado no presente trabalho para a fabricação das redes de período longo utilizadas.

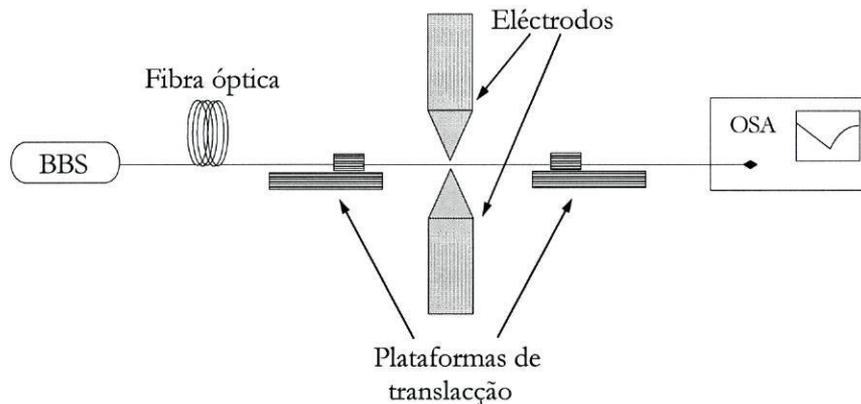


Figura 3.5 - Dispositivo experimental de fabricação de redes de período longo pela técnica do arco eléctrico.

Sensibilidade da fibra óptica à deformação e temperatura.

No capítulo 2 (*sensores em fibra óptica*) foram apresentadas as configurações interferométricas mais comuns utilizadas no processamento do sinal de fase induzido na fibra por actuação simultânea de uma ou várias grandezas físicas. De entre estas, a medição individual ou simultânea de temperatura e deformação assume particular relevo dada a frequência com que surge em diversas situações práticas. Nesta secção é apresentado um tratamento introdutório ao mecanismo intrínseco de sensibilidade da fibra óptica a estas duas grandezas em particular. O tratamento apresentado serve igualmente, como se verá em seguida, para o estabelecimento directo do paralelismo existente entre as variações de

fase e a acção do mensurando no caso dos sensores interferométricos e as variações de comprimento de onda central no caso dos sensores de Bragg.

Como foi anteriormente referido o parâmetro nuclear de actuação em todos os sensores em fibra óptica do tipo interferométrico é o percurso óptico, definido pelo produto do índice de refração do núcleo (n) pela extensão de fibra (L):

$$\zeta = nL \quad (3.20)$$

A expansão da equação anterior à custa dos efeitos da variação de temperatura (T) e deformação (σ) pode então ser expressa do seguinte modo:

$$\Delta\zeta_L = \left\{ n \left[\frac{\partial L}{\partial \sigma} \right]_T + L \left[\frac{\partial n}{\partial \sigma} \right]_T \right\} \Delta\sigma + \left\{ n \left[\frac{\partial L}{\partial T} \right]_\sigma + L \left[\frac{\partial n}{\partial T} \right]_\sigma \right\} \Delta T \quad (3.21)$$

ou de forma equivalente:

$$\Delta\zeta_L = nL \left[\left\{ 1 + \frac{1}{n} \left[\frac{\partial n}{\partial \varepsilon} \right]_T \right\} \frac{\Delta\sigma}{Y_F} + \left\{ \alpha_F + \frac{1}{n} \left[\frac{\partial n}{\partial T} \right]_\sigma \right\} \Delta T \right] \quad (3.22)$$

Nesta expressão Y_F e α_F constituem o módulo de Young e o coeficiente de expansão térmica, sendo o primeiro e segundo termos entre chavetas representativos da sensibilidade da fibra à deformação (S_ε) e temperatura (S_T). A partir da equação (3.22) a variação de índice de refração efectivo do núcleo da fibra óptica em resultado da aplicação de um valor de tensão mecânica a temperatura constante é expressa da seguinte forma:

$$\left[\frac{\partial n}{\partial \varepsilon} \right]_T \Delta\varepsilon = \Delta n \quad (3.23)$$

Por outro lado a relação que descreve a variação de índice de refração induzida na direcção i (Δn_i) por aplicação externa de um valor de tensão na direcção j (ϵ_j) envolve o tratamento complexo do tensor elasto-óptico p_{ij} e foi inicialmente descrita por⁽²³⁾ (Nye-1954).

$$\Delta n_i = -\frac{n_i^3}{2} p_{ij} \epsilon_j \quad (3.24)$$

Em diversas situações práticas os sensores de fibra óptica encontram-se instalados na superfície ou embebidos na estrutura hospedeira. Neste contexto, em muitos casos, é plausível admitir-se que o esforço de tensão transmitido à fibra é essencialmente axial sendo desprezável o acoplamento de esforço nas direcções transversais 2 e 3^(24,25) (Butter-1978, Sirkis-1993b). A partir desta condição a relação *strain gauge* para a deformação de uma fibra óptica de coeficiente de Poisson (ν), homogénea, isotrópica e sujeita a uma variação nula da temperatura pode ser escrita do seguinte modo:

$$\frac{\Delta \zeta_L}{\zeta_L} = G_\epsilon \epsilon_1 \quad (3.25)$$

Com:

$$G_\epsilon \equiv 1 - \frac{n_0^2}{2} P_\epsilon \quad (\text{"strain gauge factor"}) \quad (3.26)$$

$$P_\epsilon \equiv p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}) \quad (\text{coeficiente elasto-óptico efectivo}) \quad (3.27)$$

O parâmetro de *strain gauge* G_ϵ definido na equação (3.25) é perfeitamente geral para o conjunto de sensores em fibra óptica baseados na modulação de fase associada ao percurso óptico. A transposição deste mecanismo para os sensores de Bragg foi inicialmente desenvolvida por⁽²⁶⁾ (Sirkis-1993a) e na sua essência estabelece que a diferença de fase $\Delta\phi$ é proporcional a G_ϵ através do factor de normalização ϕ . Como tal, no caso dos sensores de

Bragg o correspondente desvio do comprimento de onda ressonante, $\Delta\lambda_B$, é proporcional ao mesmo parâmetro através do factor de normalização λ_B .

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \frac{\Delta\zeta_L}{\zeta_L} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (3.28)$$

Em resumo, a partir da expressão (3.22) e na situação de tensão meramente axial o par de equações de sensibilidade para sensores interferométricos em fibra óptica e sensores de Bragg em fibra óptica está indicado nas expressões (3.29) e (3.30). Ao contrário dos sensores interferométricos, onde a medição de fase depende directamente do comprimento L de fibra usada na região sensora, nos sensores de Bragg a extensão da própria rede não tem qualquer influência na resposta em comprimento de onda. Neste sentido o processo de calibração efectuada na região dos 1500nm estabeleceu os valores de $G_\epsilon \approx 0.80 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1}$ para o *strain-gauge factor* e $S_T \approx 6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para a sensibilidade à temperatura numa gama de temperaturas compreendida entre -20°C e $80^\circ\text{C}^{(27)}$ (Alavie-1995).

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = G_\epsilon \Delta\epsilon + S_T \Delta T \quad (3.29)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = G_\epsilon \Delta\epsilon + S_T \Delta T \quad (3.30)$$

As equações (3.29) e (3.30) apresentam no entanto uma limitação fundamental, dado não incluem o efeito térmico aparente. Com efeito, pequenas variações térmicas associadas ao material hospedeiro traduzem-se em deformações induzidas no mesmo, indistinguíveis elas próprias da aplicação efectiva de tensão axial. A tensão axial termicamente induzida pode ser expressa da seguinte forma:

$$\Delta\sigma = Y_F (\alpha_H - \alpha_F) \Delta T \quad (3.31)$$

Mais uma vez Y_F constitui o módulo de Young sendo α_H e α_F os coeficientes de expansão térmica do material hospedeiro e da fibra, respectivamente. A equação (3.22) pode então ser rescrita da seguinte forma:

$$\frac{\Delta \zeta_L}{\zeta_L} = S_\varepsilon \Delta \varepsilon + S_\alpha \Delta T \quad (3.32)$$

$$S_\alpha \equiv S_T + S_\varepsilon (\alpha_H - \alpha_F) \quad \text{- coeficiente aparente de sensibilidade à temperatura} \quad (3.33)$$

A necessidade da medição simultânea de temperatura e da deformação desencadeou nos últimos anos o desenvolvimento de várias técnicas capazes da separação e medição precisa destes dois parâmetros. A técnica mais expedita de separação destes dois efeitos e implementada com sensores de Bragg em fibra óptica consiste na colocação, no mesmo ambiente térmico, de uma rede de Bragg acoplada ao material hospedeiro e de uma outra sem esta restrição que funciona de referência para a compensação de temperatura. Em paralelo, a colocação de uma rede de Bragg de extensão tal que permita a colagem de sensivelmente metade da sua extensão à estrutura hospedeira permite também o desacoplamento dos dois efeitos⁽²⁸⁾(Lo-1997). Uma outra técnica consiste na escrita simultânea de duas redes de Bragg de regiões espectrais distintas na mesma localização da fibra o que permite a elaboração de um sistema de duas equações de sensibilidade cada uma relativa ao correspondente comprimentos de onda. Esta técnica faz uso da dependência espectral dos coeficientes termo e elasto-óptico permitindo, deste modo, a partir do sistema de equações o cálculo dos coeficientes aparentes de sensibilidade à temperatura e, conseqüentemente, a calibração do sensor⁽²⁹⁾(Xu-1994). A mesma filosofia foi aplicada na elaboração de um sistema de duas equações de sensibilidade obtidas a partir de uma cabeça sensora constituída por duas redes de Bragg consecutivas escritas em fibra germânio-silício e germânio silício codopada com boro. A idêntica resposta mecânica e diferente sensibilidade térmica de ambas as redes permite, por isso, a construção de um dispositivo simples de medição simultânea⁽³⁰⁾(Cavaleiro-1999).

Estudo do Efeito da Hidrogenização em Fibras Ópticas

Para completar a abordagem sintetizada das técnicas e princípios físicos de funcionamento das redes de difracção em fibra óptica falta referir um dos aspectos que mais contribui para o aperfeiçoamento destas estruturas nomeadamente, o mecanismo da fotosensibilidade induzida. Por fotosensibilidade induzida entende-se a capacidade de introduzir por acção externa modificações localizadas, permanentes ou temporárias, na matriz de sílica e que conduzam a alterações do índice de refração. Apesar de ainda hoje

subsistir o debate sobre alguns aspectos fundamentais relativos à origem da fotosensibilidade, há determinados aspectos que são consensuais e resumem de uma forma geral todo o conhecimento existente até hoje^(31,32,33) (Kashyap-1994, Erdogan-1994, Araújo-1999). Nesta secção são descritos alguns aspectos teóricos e experimentais da técnica de aumento da fotosensibilidade utilizada no trabalho realizado para a fabricação de redes de Bragg e designada a técnica de hidrogenização.

A hidrogenização em fibras ópticas é um processo de difusão de H_2 na matriz de sílica pura (SiO_2) ou dopada e constitui um processo reversível que conduz ao aparecimento de bandas adicionais de absorção na região do infravermelho⁽³⁴⁾ (Beales-1983). Nas fibras o germânio é o dopante mais comum, sendo o efeito do aumento da fotosensibilidade via hidrogenização mais pronunciado. De facto, a presença de hidrogénio intersticial na matriz de sílica dopada com germânio (Ge-Si-O) desencadeia, por exposição UV, a formação de centros Ge deficitários em oxigénio e grupos Si-OH. A presença dos grupos hidroxilo é responsável em grande parte pela atenuação adicional correspondente aos harmónicos vibracionais do OH na sílica, sendo que o mecanismo de reacção generalizada do hidrogénio com os centros de germânio promove o aumento da fotosensibilidade⁽³⁵⁾ (Nogushi-1985). A explicação do processo de difusão de hidrogénio molecular na matriz de sílica pode ser iniciada a partir da equação clássica de difusão generalizada: $D = D_0 \exp(-E_0 / RT)$, onde D_0 e E_0 constituem a constante de difusão e energia de activação do próprio processo de difusão sendo independentes da pressão e temperatura. A partir deste ponto o processo de difusão para o interior de uma fibra óptica pode ser descrito considerando um cilindro de raio b , com concentração inicial C_0 e concentração superficial nula para tempos positivos. Neste contexto a concentração da substância em difusão é definida pelo seguinte par de expressões⁽³⁶⁾ (Fox.M-1983):

$$C(r, t) = C_0 f(r/b, Dt/b^2) \quad (3.34)$$

$$f(x, y) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(j_n x) \exp(-j_n^2 y)}{j_n J_1(j_n)} \quad (3.35)$$

r e t são a posição radial e o tempo, D é a constante de difusão e j_n é o zero de ordem n da função de Bessel de ordem zero, $J_0(x)$. Por outro lado, a variação do coeficiente de atenuação pode ser escrita como:

$$\Delta\alpha = 2\pi k \int_0^a C(r,t) \exp(-2r^2/w^2) r dr \quad (3.36)$$

onde k constitui o coeficiente de sensibilidade (atenuação.versus.concentração) e w o raio do modo. A partir destas três últimas expressões é possível rescrever a expressão (3.36) da seguinte forma:

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta\alpha_0} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-j_n^2 D t_m / b^2)}{j_n J_1(j_n)} \quad \text{com } t_m = t + \omega^2 / 8D \quad (3.37)$$

O modelo aqui apresentado serve como complemento ao estudo efectuado no decurso deste trabalho para avaliar o efeito da hidrogenização na absorção da fibra na região dos 1300nm. Para tal, foi utilizada uma bobina de fibra monomodo com baixa concentração de germânio *Corning SMF28 1.8% Mol* de 5 Km de extensão, com uma atenuação inicial de 0.33 dB/Km. Essa bobina foi colocada numa câmara de hidrogenização durante 8 dias à temperatura ambiente e à pressão de 100atm. A atenuação medida depois de a fibra ser retirada da câmara foi de 11.6 dB/Km. Foi posteriormente colocada num forno a 50°C e efectuado um registo diário ao longo de sete dias do valor do coeficiente de atenuação a 1310nm. Todo este processo está ilustrado na figura (3.6). A figura (3.7) mostra o registo no OTDR no primeiro e no sétimo dias de tratamento térmico, estando os resultados agregados na figura (3.8).

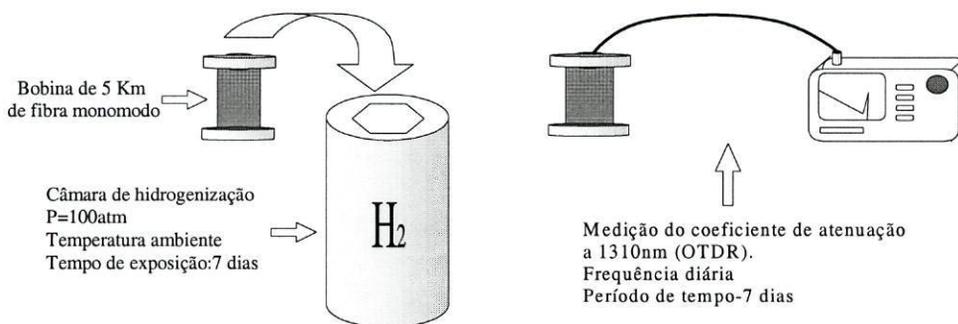
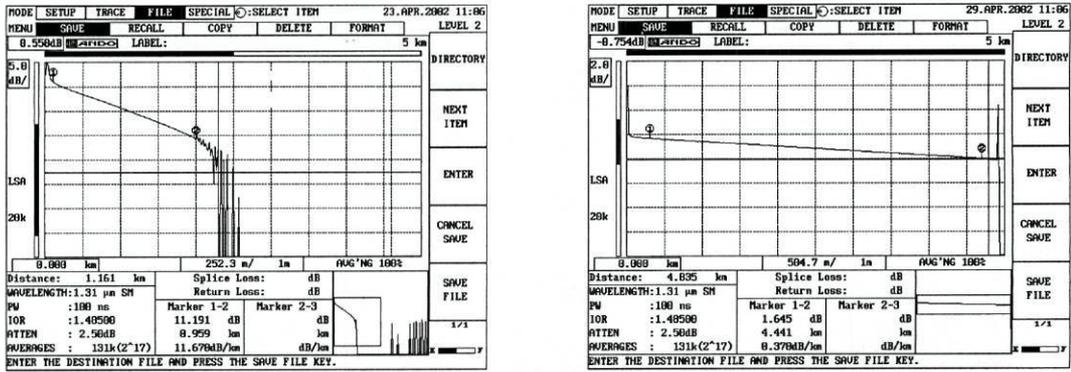


Figura 3.6 - Dispositivo experimental utilizado para investigar o efeito do processo de hidrogenização numa fibra óptica.



(a) (b)
 Figura 3.7 - Registo da medição efectuada no OTDR: a) 1º dia; b) 7º dia .

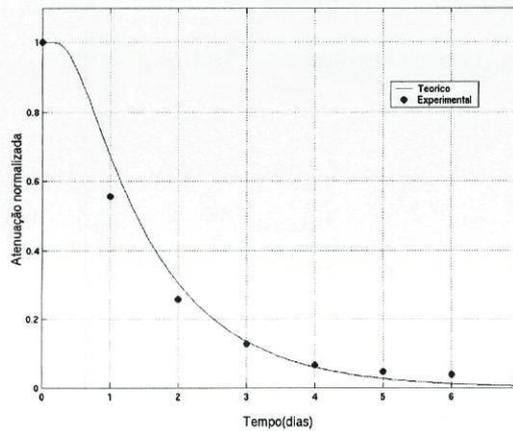


Figura 3.8 - Evolução do valor do coeficiente de atenuação ao longo do tratamento térmico da fibra hidrogenizada (50°C).

Pela análise dos resultados apresentados na figura (3.8) conclui-se de imediato o excelente acordo entre o modelo teórico e os dados experimentais. O ajuste teórico é baseado na equação (3.37) sendo o valor de D obtido a partir da equação de difusão para 323K. Os valores de E_0 e D_0 foram retirados da literatura⁽³⁵⁾(Noguchi-1985) tendo-se considerado $\omega = 5\mu\text{m}$. Destes resultados também decorre que a concepção de sistemas de medição distribuída, baseados em redes de Bragg em fibra óptica, que requeiram a utilização de elevadas extensões de fibra óptica (tipicamente Km) exige a adopção de um compromisso entre o aumento da fotosensibilidade induzida e as perdas adicionais via hidrogenização. Do conhecimento e ponderação destes dois factores decorre o desempenho optimizado do sistema de medição.

Capítulo 4 - Dispositivos sensores para a medição de índice de refração

Introdução

O índice de refração óptico constitui uma propriedade inerente a cada substância e é através dela que, em particular no domínio da monitorização óptica de concentrações de substâncias, se estabelece a comunicação entre as alterações de estado do mensurando e a resposta do sistema sensor. Domínios que percorrem a bioquímica, a análise química, e em especial, o controlo de diferentes parâmetros em ambientes naturais ou industriais constituem os principais alvos para a monitorização do valor de índice de refração. Neste capítulo é feita uma apresentação de diferentes dispositivos que incorporam várias técnicas ópticas bem como dos diferentes princípios físicos que as sustentam. Comum em todas elas é a utilização de fibra óptica como participante directo no elemento sensor ou meramente como meio de transporte de sinal. São igualmente apresentados os resultados experimentais detalhados do conjunto de experiências efectuadas no estudo dos dispositivos sensores que empregam redes em fibra óptica dos dois tipos anteriormente mencionados. Estes dispositivos são destinados à medição simultânea da temperatura e da salinidade.

Método refractométrico

Um dos primeiros dispositivos integrados de medição de índice de refração, isto é que incorpora o conjunto cabeça sensora mais processamento de sinal, usa o princípio do refractómetro diferencial desenvolvido no início da década de cinquenta . A cabeça sensora é baseada na medição do desvio do feixe provocado pela mudança do ângulo de refração na interface de uma célula de vidro que contém o líquido de referência (água destilada) e o líquido a ser medido. Por considerações de óptica geométrica é possível demonstrar-se que o desvio do feixe é, em primeira ordem, proporcional à diferença dos índices de refração intervinientes.

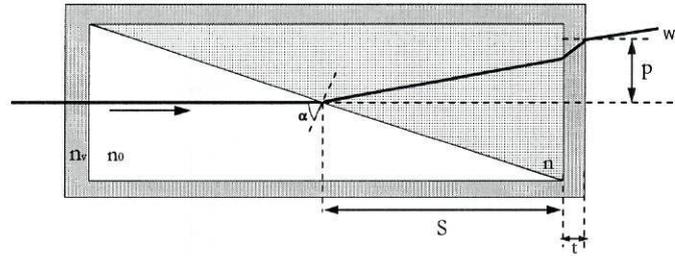


Figura 4.1 - Célula refractométrica

O trajecto do raio de luz que incide normalmente na célula de vidro de índice de refração n_v está indicado na figura 4.1. Considerando α o ângulo de incidência na interface que separa o líquido de referência de índice de refração n_0 do líquido para medição (n) e Ω o ângulo de emergência, então para valores do ângulo de saída inferiores a 1° o valor da diferença de índices pode ser expresso da seguinte forma⁽³⁷⁾(B.A.Brice 1951):

$$\Delta n = n - n_0 = \Omega \cot \alpha + \frac{\Omega^2}{2n} \approx k.P \quad (4.1)$$

$$P = P(n, \alpha) = S \tan \left(\alpha - \sin^{-1} \left[\frac{n_0}{n} \sin \alpha \right] \right) + t. \tan \sin^{-1} \left[\frac{n}{n_v} \sin \left(\alpha - \sin^{-1} \left[\frac{n_0}{n} \sin \alpha \right] \right) \right] \quad (4.2)$$

A partir do modelo descrito pelas equações anteriores o aspecto fundamental que merece ser realçado é a relação linear que é possível estabelecer entre a variação de índices de refração e o correspondente desvio. Habitualmente, a célula refractométrica acima indicada é inserida num bloco compacto que possibilita o funcionamento em reflexão. Com efeito, a radiação incidente proveniente da fibra de iluminação monomodo acoplada à parede lateral da célula é, após a atravessar, retroreflectida por um prisma quadrado e colectada por uma cadeia de fibras ópticas multimodo colocadas paralelamente à fibra de iluminação. A partir da análise da distribuição de intensidade gaussiana do feixe é estimado o desvio do mesmo e, conseqüentemente, o valor da diferença dos índices intervenientes^(38,39)(H. Minato-1989, A.W. Domanski-1997). Mais recentemente, a partir deste modelo foi desenvolvido um dispositivo de medição simultânea de índice de refração e temperatura com a colocação de um filme de GaAs na base do prisma de reflexão⁽⁴⁰⁾(Y.Zhao, 2002). Este

filme, funciona como elemento condicionador da intensidade de luz transmitida na medida em que é opaco à luz visível e transparente à radiação infravermelha; por alterações térmicas, a banda de absorção é deslocada o que condiciona a fracção de luz transmitida, sendo por tal motivo requerido o uso de uma fonte de iluminação com um espectro de emissão que compreenda estas duas regiões espectrais.

Método SPR

Outra técnica presentemente muito utilizada em óptica para o projecto de sistemas de medição remota de índice de refração é o método de excitação de ondas superficiais de plasma na interface entre um dieléctrico e um filme fino de metal. Apesar da sua designação indiciar um princípio físico extremamente recente e sofisticado, a primeira evidência deste fenómeno foi demonstrada em 1957. Ondas superficiais de plasma, *Surface Plasmons*, são ondas de densidade de carga que se propagam ao longo da superfície de um metal promovidas por acoplamento de luz na sua superfície. O processo em causa encontra-se ilustrado na figura 4.2.

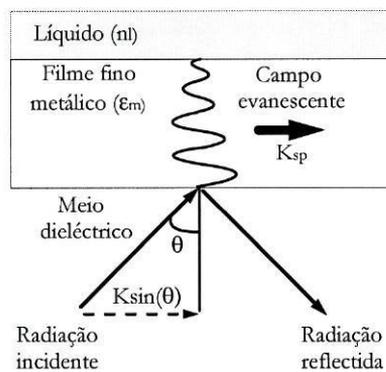


Figura 4.2 - Ilustração do processo SPR.

A propagação do campo evanescente ao longo do metal excita ondas superficiais de plasma na face oposta do filme que está em contacto com um líquido. Esta situação vulgarmente designada por *surface plasmon resonance* (SPR) é altamente dependente da frequência da luz e do ângulo de incidência traduzindo-se na diminuição brusca da reflectividade. A variação do índice de refração externo produz a deslocação espectral do pico de ressonância da

reflectividade. Esta situação ocorre portanto na situação em que o vector de onda da radiação incidente é colinear com a própria onda de carga gerada (*phase-matching*).

$$k_{\text{radiação}} \sin(\theta) = k_{\text{SP}} \quad (4.3)$$

$$\frac{\omega}{c} n_d \sin(\theta) \cong \frac{\omega_p}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m n_l^2}{\epsilon_m + n_l^2}} \quad (4.4)$$

Com base na figura 4.2, na expressão acima indicada θ constitui o ângulo de incidência da radiação na interface dieléctrico/filme metálico, n_d o índice de refração do meio dieléctrico, ϵ_m a permitividade eléctrica do filme metálico, n_l o índice de refração do líquido exterior e ω_p a frequência associada à onda de carga induzida no filme metálico. A integração directa deste mecanismo no projecto de cabeças sensoras em fibra óptica para a medição remota de índice de refração tem conhecido desenvolvimentos significativos nos últimos anos, especificamente no aperfeiçoamento da técnica de deposição de filmes finos metálicos em *tapers* ⁽⁴¹⁾(*A.Tubb,1995*) ou mais recentemente no desenvolvimento de uma cabeça sensora para a medição remota de salinidade por efeito de excitação de ondas superficiais de plasma ⁽⁴²⁾(*Óscar Estéban,1999*).

Fotorefractómetro construído em fibra multimodo

Nas duas técnicas acima indicadas constata-se que a fibra óptica assume uma função auxiliar, no caso do método refractométrico, e forma uma estrutura combinada no caso do método SPR. Em ambos os casos a fibra óptica propriamente dita não está directamente em contacto com o mensurando. A técnica aqui apresentada constitui a primeira, de uma série a seguir discutidas, no qual a região de medição da fibra óptica está em efectivo contacto com o mensurando. O princípio físico de funcionamento de um refractómetro construído em fibra multimodo resulta da exploração simultânea do efeito de perdas por curvatura em transmissão e da redução nessa mesma região do diâmetro da fibra óptica imersa. Este último efeito conduz à alteração das condições locais de guiagem.

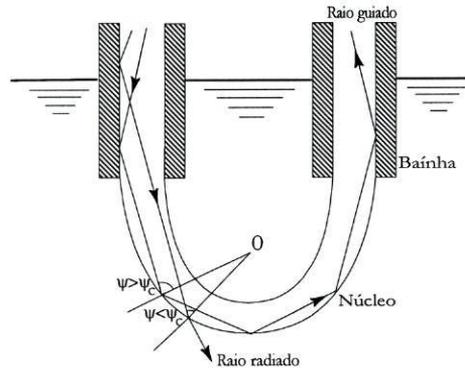


Figura 4.3 - Ilustração da cabeça sensora em fibra óptica deformada em U .

A partir da figura 4.3 é possível concluir-se que as perdas por curvatura acima referidas são, em linguagem de óptica geométrica, condicionadas pelo mecanismo de reflexão total nas interfaces interna e externa, sendo o ângulo crítico definido à custa do índices de refração do núcleo (n_{nuc}) e do meio envolvente (n_m) $\psi_c = \text{sen}^{-1} (n_n/n_{nuc})$. A calibração do sensor é efectuada a partir da monitorização da potência transmitida em função do índice de refração envolvente. Este tipo de cabeças sensoras permite a implementação de sistemas de medição multiponto em reflexão com recurso à técnica de OTDR (*OTDR-Optical Time Domain Reflectometer*) especialmente vocacionados para a medição de gradientes de turbidez ⁽⁴³⁾(Takeo-1992).

Dispositivos em fibra óptica para a medição de índice de refração (LPG e FBG)

Até aqui foi feita uma retrospectiva de alguns dos mais significativos processos utilizados em óptica para a construção de dispositivos de medição remota de índice de refração. Nesta secção são introduzidos dois novos métodos de medição de índice de refração que partilham entre si o facto de explorarem as potencialidades quer das redes de difracção de período longo quer das redes de difracção de Bragg e que constituem uma parte significativa do presente trabalho. No capítulo 3 foram discutidos vários aspectos característicos de ambas as estruturas, sendo por isso apropriado que neste ponto seja dado especial relevo a alguns aspectos teóricos que sustentam o mecanismo de sensibilidade ao índice de refração de ambas as estruturas e que permitiram, por isso, a realização dos dispositivos experimentais. Essencialmente, por estranho que pareça à primeira vista, os

temas abordados na descrição seguinte não são mais do que dois aspectos fundamentais da propagação de radiação em guias de onda circulares (fibras ópticas).

Em primeiro lugar, é feita referência ao modelo de propagação em guias de onda com simetria circular assente nos princípios da óptica geométrica⁽⁴⁴⁾(*Snyder-1983*); em segundo lugar é apresentado o tratamento electromagnético introdutório que conduz à definição das soluções modais do campo em propagação num guia do mesmo tipo⁽¹²⁾(*Keiser-1989*).

Derivação da equação de valores próprios da óptica geométrica

Sempre que num modelo físico é aplicada a terminologia de valor próprio isso significa que estamos na presença de um qualquer tipo de quantificação. Neste caso particular aquilo que está em causa não é mais do que a determinação dos ângulos de aceitação permitidos pelo guia circular de forma a obter-se os raios passíveis de serem guiados pela estrutura (*bound rays*).

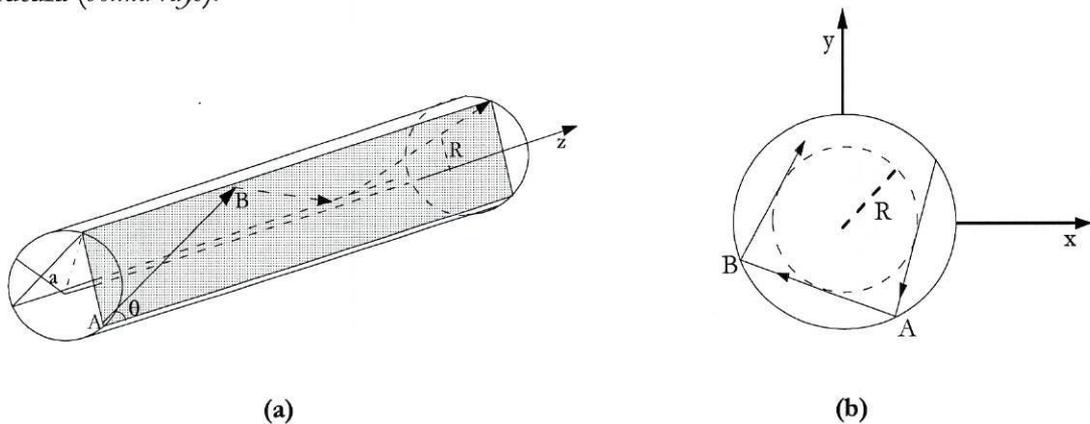


Figura 4.4 - a) Trajectória do raio oblíquo (*Skewed ray*) no guia de onda circular. b) Projecção no plano x.y da trajectória do raio à direcção de propagação; a circunferência interior delimita a superfície cáustica definida pela propagação.

Com base na figura 4.4 a) o modelo proposto por *Snyder* envolve o cálculo da fase acumulada no trajecto AB, sendo apresentados dois modelos de cálculo:

- i) 1º modelo: Este modelo compreende a soma dos três termos correspondentes à fase acumulada devido à extensão do percurso óptico, reflexão na parede externa do guia e o termo de fase gerado por cada passagem tangencial interna na cáustica definida (figura 4.4 b). Esta projecção define um polígono regular não necessariamente fechado.

- ii) 2º modelo: Este modelo compreende a determinação da translação Δz e transformação de rotação $\Delta\phi$ ocorrida no percurso AB. A fase total é a soma da componente de fase de translação calculada pelo produto de Δz com a componente axial do vector de onda e da fase de rotação calculada pelo produto de $\Delta\phi$ com a componente tangencial do vector de onda (k) e o raio (a) do guia.

A equação de valores próprios final é obtida impondo a igualdade do valor de fase obtido pelos dois métodos a menos de um factor de 2π .

A “célula unitária” que focaliza o trajecto AB indicado na figura 4.4 a) é apresentada na figura 4.5 a). Na figura 4.5 b) é apresentada a definição da projecção do raio BC na secção recta circular do guia.

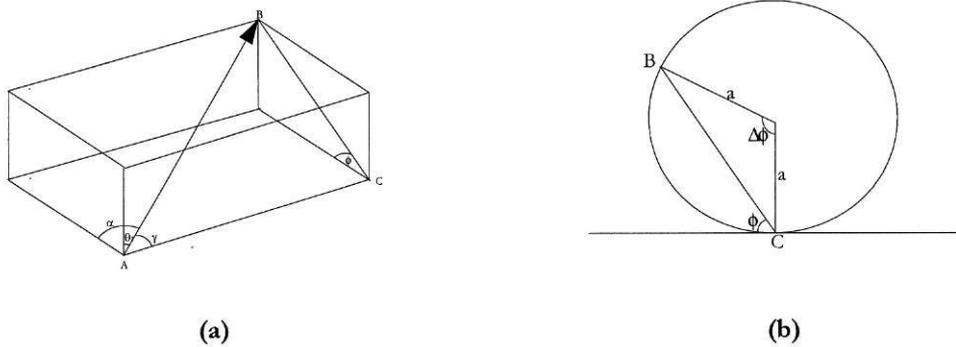


Figura 4.5 - a) Definição geométrica do trajecto AB e a respectiva projecção BC. b) Definição geométrica da projecção BC.

Na figura 4.5 a), θ_1 é o ângulo entre AB e a normal à interface, γ o ângulo entre o segmento AB e a direcção axial z , α o ângulo entre o segmento AB e a direcção tangencial à interface e ϕ o ângulo entre a projecção BC e a direcção tangencial à interface. A partir da figura 4.5 a) é possível então definir as seguintes relações:

$$\text{sen}(\phi) = \frac{\cos(\theta_1)}{\text{sen}(\gamma)} \quad (4.5)$$

$$\cos(\phi) = \frac{\cos(\alpha)}{\text{sen}(\gamma)} \quad (4.6)$$

Por outro lado a partir da figura 4.5 b) verifica-se que a rotação angular $\Delta\phi$ é equivalente à rotação de 2ϕ , pelo que a distância BC pode ser expressa do seguinte modo:

$$BC = 2a \text{sen}(\phi) \quad (4.7)$$

Retomando as expressões (4.5) e (4.6) os segmento AC e AB ficam definidos do seguinte modo:

$$AC = 2a \text{sen}(\phi) \cot(\gamma) \equiv \frac{2a \cos(\theta_1) \cos(\gamma)}{\text{sen}^2(\gamma)} \quad (4.8)$$

$$AB = \frac{2a \text{sen}(\phi)}{\text{sen}(\gamma)} \equiv \frac{2a \cos(\theta_1)}{\text{sen}^2(\gamma)} \quad (4.9)$$

O conjunto de expressões (4.5-4.9) completam a análise geométrica necessária ao cálculo da fase acumulada segundo os dois métodos acima mencionados. Segundo o primeiro método o valor de fase acumulada no trajecto AB é então expresso da seguinte forma:

$$\text{Fase1}(AB) = kn_1(AB) - \delta - \frac{\pi}{2} = \frac{2akn_1 \cos(\theta_1)}{\text{sen}^2 \gamma} - \delta - \frac{\pi}{2} \quad (4.10)$$

Na expressão (4.10), δ é o valor da diferença de fase experimentada pelo raio na reflexão na interface externa do guia sendo que $\pi/2$ constitui o valor de fase introduzido por cada passagem tangencial do raio na superfície da cáustica⁽⁴⁵⁾(Adams-1981).

Tal como foi atrás mencionado o segundo método envolve a sobreposição do valor da fase introduzido pela translação e rotação do raio de luz. Temos então duas componentes:

$$Fase_{rota\c{c}ao} = kn_1 a \cos(\alpha) \Delta\phi = kn_1 a \cos(\alpha) \text{sen}^{-1}\left(\frac{2 \cos(\alpha) \cos(\theta_1)}{\text{sen}^2(\gamma)}\right) \quad (4.11)$$

$$Fase_{translac\c{c}ao} = kn_1 a \cos(\gamma) \Delta z = 2kn_1 a \cos(\theta_1) \cot^2(\gamma) \quad (4.12)$$

Recuperando a definição de que a equação de valores próprios é obtida igualando, a menos de um múltiplo de 2π , o valor de fase acumulado pelos dois métodos, então, após alguns cálculos simplificativos, é possível à custa das expressões (4.10-4.12) obter a seguinte expressão:

$$akn_1 \cos(\theta_1) - akn_1 \cos(\alpha) \cos^{-1}\left(\frac{\cos(\alpha)}{\text{sen}(\gamma)}\right) = \left(N + \frac{1}{4}\right)\pi + \frac{\delta}{2} \quad (N = 0, 1, 2, \dots) \quad (4.13)$$

Nesta etapa, mais do que a quantificação dos ângulos θ_1 passíveis de serem guiados, importa referir o paralelismo que é possível estabelecer entre a equação de valores próprios expressa na equação (4.13) à custa de parâmetros unicamente geométricos com outra perfeitamente análoga em que os parâmetros geométricos são expressos à custa dos parâmetros modais do guia circular. Este aspecto é apresentado na secção seguinte.

Propagação em guias circulares

O ponto de partida para a descrição do fenómeno da propagação de radiação electromagnética em guias de onda sem correntes e cargas eléctricas livres é naturalmente o formalismo introduzido pelas equações de Maxwell.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4.14)$$

$$\nabla \cdot D = 0 \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (4.15)$$

Pela aplicação da operação de rotacional às equações de Maxwell do rotacional e utilizando as equações da divergência (4.15), são geradas as equações de onda para o campo eléctrico e magnético, respectivamente⁽¹²⁾(Keiser-1989).

$$\nabla^2 E = \epsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (4.16)$$

$$\nabla^2 H = \epsilon\mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (4.17)$$

A partir da manipulação das equações de onda anteriores num sistema de coordenadas cilíndricas (r, θ, z) com os correspondentes vectores campo eléctrico (E_r, E_θ, E_z) e campo magnético (H_r, H_θ, H_z) , é possível definir um novo par de equações de onda em coordenadas cilíndricas. Este novo sistema, expresso unicamente nas componentes E_z e H_z introduz um novo parâmetro (q) a seguir definido.

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \theta^2} + q^2 E_z = 0 \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \theta^2} + q^2 H_z = 0 \quad (4.19)$$

Para a definição do parâmetro (q) (acima indicado por antecipação) é útil a apresentação do procedimento habitual de resolução das equações de onda deste tipo, isto é, o método de separação de variáveis. Deste modo, a solução geral para o campo E_z (idêntico para H_z) pode ser escrita da seguinte forma:

$$E_z = AF_1(r)F_2(\theta)F_3(z)F_4(t) \quad (4.20)$$

Para a dependência no tempo (t) e na direcção axial de propagação (z) é plausível admitir-se a dependência harmónica habitual. Por outro lado, dada a simetria circular do guia cada componente do campo permanece inalterável sempre que θ varia de 2π pelo que é possível afirmar-se o seguinte:

$$F_3(z)F_4(t) = e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4.21)$$

$$F_2(\theta) = e^{jv\theta} \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial^2 F_1}{\partial^2 r} + \frac{1}{r} \frac{\partial F_1}{\partial r} + (q^2 - \frac{v^2}{r^2}) F_1 = 0 \quad (4.23)$$

A equação (4.23) constitui uma equação diferencial de Bessel e o conjunto de soluções que a satisfazem constituem o grupo de funções de Bessel do tipo J ($r < a$) e do tipo K ($r > a$), sendo o parâmetro (q) definido do seguinte modo:

$$q^2 = \omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2 = k^2 - \beta^2 \quad (4.24)$$

Importa agora estabelecer a relação entre os valores próprios do modo (β, v) e os ângulos (γ, α) anteriormente definidos. Sendo β a constante de propagação axial definida na expressão (4.21), então a partir da (figura 4.5a) é possível estabelecer a seguinte correspondência:

$$\beta = kn_1 \cos \gamma \quad (4.25)$$

De igual modo, sendo α o ângulo compreendido entre a direcção de propagação e a direcção tangencial (figura 4.5a) a variação azimutal pode ser expressa da forma $\exp[i(kn_1 \cos \alpha)(\theta a)]$, pelo que a partir da expressão (4.22) é possível estabelecer-se:

$$v = akn_1 \cos(\alpha) \quad (4.26)$$

A partir da figura 4.6 a relação entre os ângulos θ_1 , α e γ e os novos parâmetros (β, v) é expressa do seguinte modo:

$$\left(k^2 n_1^2 - \beta^2 - \frac{\nu^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}} = kn_1 \cos(\theta_1) \quad (4.27)$$

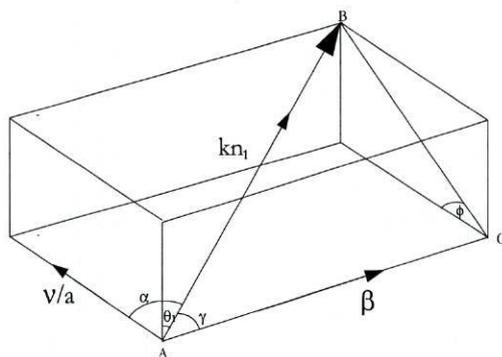


Figura 4.6 - Definição geométrica do trajecto AB expresso na notação alternativa.

Nesta notação a equação de valores próprios indicada na expressão (4.13) tem o seguinte aspecto:

$$\left(u^2 - \nu^2\right)^{\frac{1}{2}} - \nu \cos^{-1}\left(\frac{\nu}{u}\right) = \left(N + \frac{1}{4}\right)\pi + \frac{\delta}{2} \quad (\nu, N = 0, 1, 2, \dots) \quad (4.28)$$

$$u^2 = a^2(k^2 n_1^2 - \beta^2) \quad (4.29)$$

Um procedimento semelhante focalizado na região exterior ao núcleo de índice de refração n_2 e aliado ao tipo de soluções possíveis nesta região (Bessel K) permite, analogamente à definição do parâmetro (u) indicado na expressão (4.29), a definição do parâmetro (w) do seguinte modo:

$$w^2 = a^2(\beta^2 - k^2 n_2^2) \quad (4.30)$$

Em resumo, foi feita uma abordagem introdutória ao fenómeno de guiagem de radiação electromagnética numa perspectiva puramente geométrica e estabelecida a ponte para a descrição mais formal incluída na teoria electromagnética. Como iremos ver mais adiante, a descrição facultada pela equação de valores próprios expressa nos parâmetros modais (u, ν)

(4.28) constitui uma ferramenta interessante à compreensão do mecanismo de sensibilidade das redes de período longo ao índice de refração. Simultaneamente, a apresentação do tipo de soluções que satisfazem a equação de Bessel (4.23), derivadas directamente do formalismo de Maxwell, introduziu o modelo adoptado para a descrição de diferentes aspectos presentes no mecanismo de sensibilidade ao índice de refração de redes de Bragg sujeitas à corrosão química com HF.

Redes de período longo – elementos sensores de índice de refração

Tal como foi anteriormente referido no capítulo 3, uma rede de período longo escrita numa fibra óptica monomodo é uma estrutura que efectua o acoplamento de radiação entre o modo fundamental e os modos co-propagantes da bainha. A equação que descreve o seu comportamento ressonante é um caso particular daquela indicada no capítulo 3 para o caso geral:

$$\lambda^{(m)} = (n_{eff} - n_{cl,m})\Lambda \quad (4.31)$$

ou em termos de constantes de propagação,

$$\beta_{01} - \beta_{cl}^{(n)} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (4.32)$$

Os termos n_{eff} e $n_{cl,m}$ constituem, respectivamente, os índices efectivos do modo fundamental e do modo LP_{0m} da bainha. No domínio do projecto de sistemas sensores em fibra óptica as redes de período longo apresentam a interessante capacidade da sua função de transmitância espectral ser sensível ao índice de refração do líquido envolvente à própria fibra. De facto, como foi anteriormente mencionado, o modelo geométrico da equação de valores próprios é um excelente ponto de partida para a descrição do fenómeno que preside à própria sensibilidade das redes de período longo ao índice de refração. O valor de fase (δ) acrescentado à fase de uma onda electromagnética proveniente de um meio de índice de refração n_1 e reflectida numa interface dieléctrica de índice de

refracção n_2 com um ângulo de incidência θ_1 é dado pela seguinte expressão⁽⁴⁾ (Hecht-1991):

$$\delta = 2 \tan^{-1} \left[\frac{(n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}}{n_1 \cos \theta_1} \right] \quad (4.33)$$

A partir da expressão (4.27) a expressão anterior pode ser rescrita da seguinte forma:

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left[\frac{(u^2 - l^2)^{\frac{1}{2}}}{V} \right] \quad (4.34)$$

Na expressão (4.34) o parâmetro V , constitui o habitualmente designado *v-number* e (v) foi, por uma questão de notação alterado, para l . Substituindo finalmente na expressão de valores próprios (4.28) temos:

$$(u^2 - l^2)^{\frac{1}{2}} - l \cos^{-1} \left(\frac{l}{u} \right) = \cos^{-1} \left[\frac{(u^2 - l^2)^{\frac{1}{2}}}{V} \right] + (p - \frac{3}{4})\pi \quad (4.35)$$

Neste ponto, a partir das expressões do comprimento de onda ressonante para uma rede de período longo (4.31) e da equações de valores próprios (4.35) estão reunidas as condições para a descrição da resposta de uma rede de período longo ao índice de refração.

$$\lambda_p = (n_{01}^{nu} - n_{0p}^{cl})\Lambda \quad (4.36)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} D_{nucleo} [(n_{nucleo})^2 - (n_{01}^{nu})^2]^{\frac{1}{2}} - \frac{\pi}{2} = 2 \cos^{-1} \left[\frac{(n_{nu})^2 - (n_{01}^{nu})^2}{(n_{nucleo})^2 - (n_{bai})^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.37)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_p} D_{bainha} [(n_{nucleo})^2 - (n_{0p}^{bai})^2]^{\frac{1}{2}} - (p - \frac{3}{4})2\pi = 2 \cos^{-1} \left[\frac{(n_{bai})^2 - (n_{0p}^{bai})^2}{(n_{bai})^2 - (n_{amb})^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.38)$$

Nas equações (4.36-4.38) acima indicadas n_{amb} constitui o índice de refração do meio ambiente, o par n_{01}^{nu} e n_{0p}^{bai} os índices de refração efectivos dos modos do núcleo e da bainha respectivamente, l a ordem dos modos nas mesmas regiões e o par n_{nucleo} , n_{bainha} os

índices de refração médios habitualmente fornecidos pelo fabricante da fibra. A equação (4.37) deriva directamente da equação (4.35) aplicada à região do núcleo para o modo fundamental LP_{01} ($l=0$). Como se pode constatar, neste modelo foi aplicada a mesma equação na região habitual de guiagem, o núcleo da fibra, e na região da bainha de índice de refração n_2 . Com efeito, em primeira aproximação é possível afirmar-se que nos picos de ressonância da rede de período longo a radiação “transferida” para a região da bainha e que excita os modos nela suportados é também ela transportada num guia definido com índices de refração fronteira correspondentes ao índice do núcleo e índice ambiente e, como tal, condicionada por este último. Este aspecto é particularmente evidenciado pelo facto de a expressão (4.38) ser expressa em termos de λ_p . No gráfico da figura 4.7 são apresentadas as curvas de resposta de uma rede de período longo ao índice de refração para as três primeiras ordens. A partir da equação (4.37) foi calculado o valor de n_{01}^{nu} na gama 1540-1560nm por forma a ser avaliado o correspondente intervalo de variação com o comprimento de onda de iluminação. Os resultados obtidos evidenciam a existência de variações na 4ª e 5ª casas decimais, tendo-se optado por um valor médio fixo inserido na expressão (4.36). Uma vez calculado o valor do índice de refração efectivo do núcleo (n_{01}^{nu}), foram com recurso às expressões (4.36) e (4.37) calculados os valores correspondentes de índice de refração da bainha (n_{0p}^{bai}) para diferentes ordens na gama de variação de índice do meio ambiente. Retomando a expressão (4.36) o cálculo da variação espectral efectuado com referência ao valor obtido para $n_{amb}=1$ é imediato.

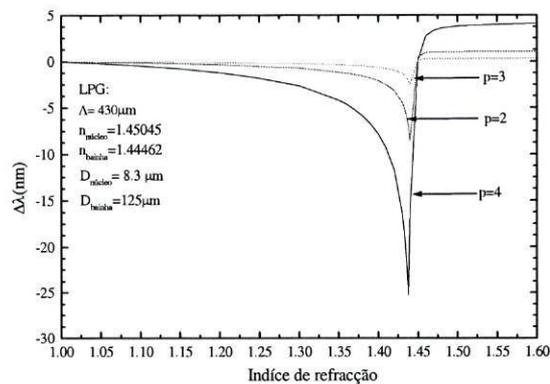


Figura 4.7 - Dependência da resposta de uma rede de período longo ao índice de refração do meio ambiente .

A partir da análise da figura 4.7 resultam duas conclusões imediatas: primeiro, a elevada sensibilidade na região de índice de refração do meio ambiente próximo do valor de índice de refração da bainha; em segundo, a sensibilidade crescente observada para ordens mais elevadas ⁽⁴⁶⁾(B.H.Lee-1997). Na situação em que o índice de refração externo é mais elevado do que o da sílica o regime de guiagem da bainha desaparece e a relação de ressonância (4.31) deixa de ser válida. No entanto, o comportamento ressonante da estrutura mantém-se, ainda que a descrição qualitativa do processo seja distinta. Com efeito, a simples descrição em termos de modos radiactivos é limitada pelo facto de a região da bainha não poder ser considerada infinita, pelo que o modelo mais adequado consiste na introdução da existência de modos da bainha atenuados. O mecanismo de atenuação é assim o resultado do efeito das perdas por refração introduzidas pela fracção de energia reflectida na interface (reflexão de Fresnel). Naturalmente que a sustentação desta classe de modos atenuados na direcção de propagação obriga à sua reconstrução da mesma maneira que os modos guiados ⁽⁴⁷⁾(Dubem-1998). Uma particularidade interessante deste regime resulta do facto de os modos da bainha atenuados não serem sensíveis ao índice de refração externo ao contrário do que acontece com os modos da bainha guiados.

Na figuras 4.8a) e 4.8b) são apresentadas as respostas estimadas das ordens 1 e 4 para uma variação limitada do índice de refração. De uma forma qualitativa, a maior sensibilidade para as ordens crescentes pode ser justificada pelo facto de os modos de ordem mais elevada estarem distribuídos em regiões mais próximas da interface com o meio exterior.

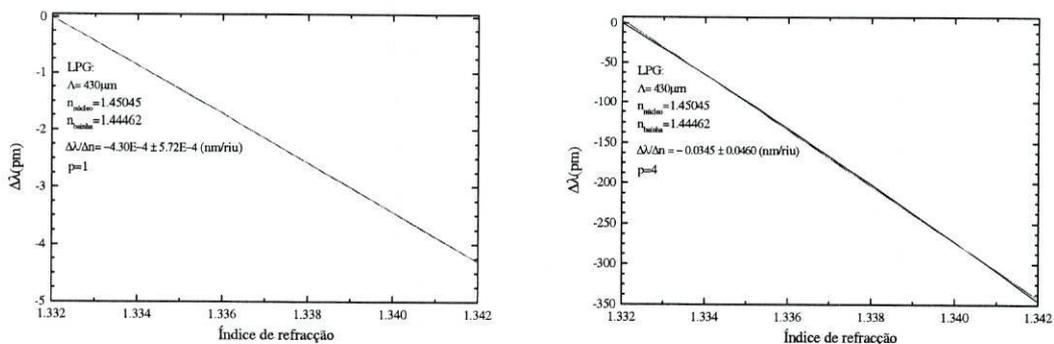


Figura 4.8 - a) Sensibilidade da ordem $p=1$ ao índice de refração do meio ambiente numa gama limitada; b) o mesmo mas agora para a ordem $p=4$.

Sistema sensor implementado com LPG's e FBG's

Até este momento foi descrito um modelo que justifica a resposta espectral típica de uma rede de período longo ao índice de refração. No decurso do trabalho realizado foram inicialmente estudadas duas configurações para a medição remota de índice de refração com recurso a redes de período longo; estas estruturas, além da resposta espectral ao índice do meio envolvente ilustrada na figura 4.7, exibem simultaneamente uma diminuição da amplitude de atenuação em cada uma das ordens para uma mesma variação de índice^(48,49)(Bhatia -1996, Patrick-1998). A manifestação simultânea destas duas respostas permitiu o desenvolvimento de duas configurações em fibra óptica distintas, uma em transmissão e outra em reflexão para a medição simultânea de temperatura e índice de refração. Refira-se que as redes de período longo foram fabricadas em fibra óptica monomodo *Corning SMF 28 3%Ge* mol pelo método do arco eléctrico referido no capítulo 3, e as redes de Bragg pelo método da máscara de fase em fibra do mesmo tipo previamente hidrogenada.

Medição em transmissão

A primeira montagem utilizada está representada na figura 4.9. Nesta montagem é explorada somente a resposta espectral da rede de período longo ao índice de refração (figuras 4.10 a, b), ou seja o parâmetro registado é o deslocamento em comprimento de onda do centro do pico de atenuação da ordem 1 ($p=1$); a compensação do efeito da temperatura é efectuada por uma rede de Bragg, tendo para tal sido efectuado o estudo da resposta simultânea de ambas as estruturas à temperatura, (figura 4.11 a). Ambas as redes foram acondicionadas e fixadas nas extremidades da cabeça sensora construída em acrílico. Deste modo é possível eliminar a influência do efeito cruzado da deformação.

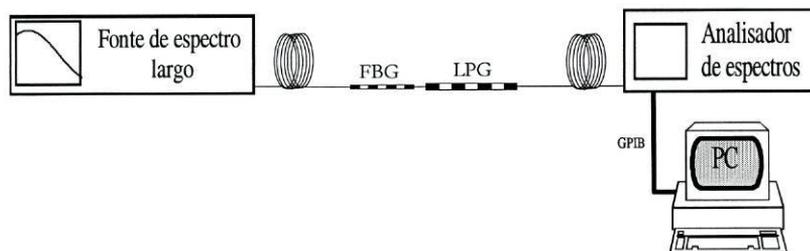


Figura 4.9 - Dispositivo experimental utilizado em transmissão

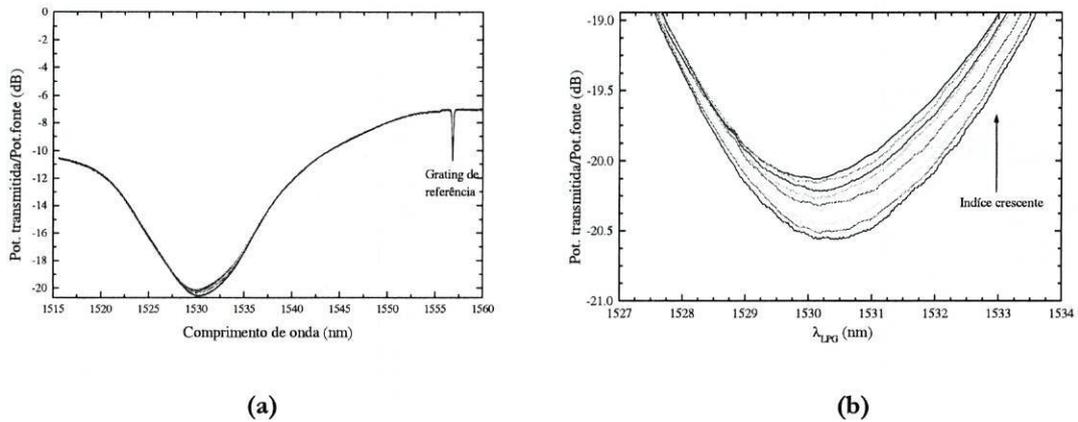


Figura 4.10 - (a)Variação do pico central do LPG (ordem $p=1$) com o índice de refração; (b) Ampliação do gráfico (a) na região em torno dos 1530 nm.

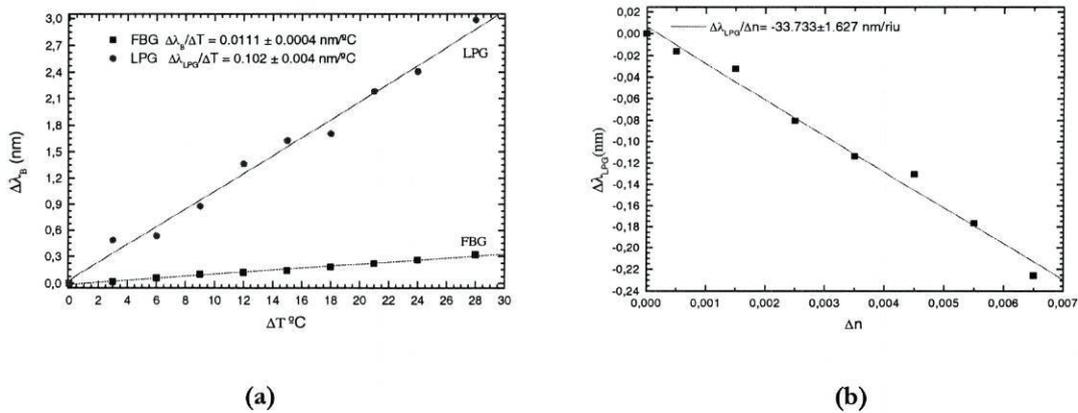


Figura 4.11 - (a)Resposta espectral da rede de período longo e da rede de Bragg à variação da temperatura; (b)Resposta espectral da rede de período longo à variação de índice de refração do meio ambiente.

Nas figura 4.10 a) são apresentados o conjunto de espectros em transmissão obtidos para diferentes valores do índice de refração do meio ambiente, sendo que na figura 4.10 b) é feita uma ampliação da zona de maior sensibilidade correspondente à região do pico de atenuação de cada uma das curvas. O gráfico da figura 4.11 b) deriva directamente da análise do pico central de cada uma das curvas de atenuação apresentadas na figura 4.10 a). Neste contexto é importante referir que as amostras de líquido utilizadas possuem uma gama de índices de refração correspondentes à gama de variação média do teor de salinidade existente em ambientes naturais⁽⁴²⁾(Estéban-1999). As amostras foram sintetizadas com recurso a uma mistura rigorosa de água pura e etileno-glicol (Apêndice 1). Para a compensação dos efeitos térmicos foi medida a resposta de ambas as estruturas à temperatura. Os resultados obtidos, apresentados na figura 4.11 a), revelaram que a diferença encontrada no coeficiente de sensibilidade térmica está de acordo com os

resultados encontrados na literatura e, em primeira análise, deriva das próprias expressões de ressonância para cada uma das estruturas (para o caso das redes de Bragg do produto do índice de refração efectivo pelo período espacial enquanto que para o caso das redes de período longo se trata do produto deste pela diferença de índices efectivos do núcleo e dos modos da bainha)^(48,50)(*Bhatia-1996, Shu-2001*). Uma alternativa consistente relativamente à referenciação de temperatura e, que compacta a própria cabeça sensora, pode ser implementada por amostragem de uma rede de período longo (*SFBG – sampled fiber Bragg grating*)⁽⁵⁰⁾(*Shu-2001*). Esta estrutura é o resultado da escrita simultânea sobre um rede de período longo (com menor modulação espacial) de um rede de Bragg (com maior modulação espacial).

Os resultados obtidos para a sensibilidade espectral ao índice de refração obtidos experimentalmente (figura 4.11 b) e anteriormente estimados (figura 4.8 a) são distintos. Numa primeira análise, tais diferenças podem ser atribuídas à influência crítica que o valor e precisão dos índices de refração dos materiais constituintes da fibra assim como o próprio valor de Λ têm na definição da sensibilidade. Refira-se a título de exemplo que uma diferença de $150\mu\text{m}$ no valor da periodicidade espacial da rede pode alterar por um factor de quatro a sua sensibilidade⁽⁴⁹⁾(*Patrick-1998*). A partir da análise dos espectros de transmissão da fonte e da cabeça sensora é claramente observado o efeito de atenuação na região em volta dos 1530nm provocado pela rede de período longo.

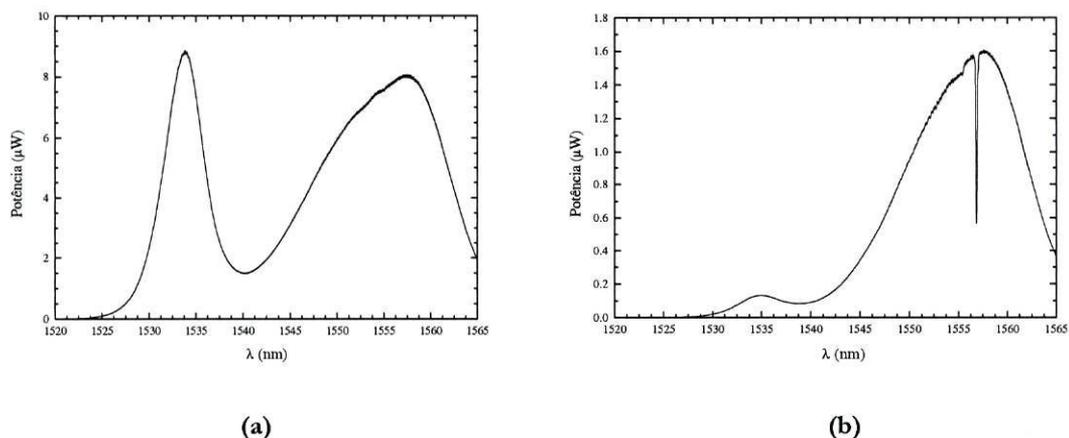


Figura 4.12 - a) Espectro da fonte de érbio utilizada. **b)** espectro em transmissão da cabeça sensora (LPG+FBG)

Na montagem apresentada na figura 4.9 o espectro emitido pela fonte de érbio é parcialmente atenuado nas regiões de ressonância da rede de período longo e no próprio pico de ressonância da rede de Bragg. O conjunto de espectros apresentados nas figuras

4.10a) e 4.10b), expressos em dB, são obtidos recorrendo à expressão (4.39) que efectua a subtracção de cada um dos espectros em transmissão (figura 4.12 b) por aquele relativo à fonte (figura 4.12 a).

$$P(dB) = 10 \text{Log} \left(\frac{P_{transmitida}}{P_{fonte}} \right) \quad (4.39)$$

Os resultados expressos nos gráficos das figuras 4.11a) e 4.11b) podem ser sintetizados no tratamento matricial habitual efectuado nos problemas de medição simultânea com sensores de fibra óptica ^(30,51)(Cavaleiro-1998, Frazão-2001). Como tal, a partir dos coeficientes lineares dos gráficos apresentados nas figuras 4.11a) e 4.11b)

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{LPG} \\ \Delta\lambda_{FBG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Após inversão:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} = -2.67 \begin{bmatrix} 0 & -00111 \\ -33.73 & -0.102 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{LPG} \\ \Delta\lambda_{FBG} \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Medição em reflexão

A montagem em reflexão, ilustrada na figura 4.13, é assim designada porque explora a amplitude do pico de reflexão de uma rede de Bragg especialmente escrita na região “quasi-linear” da curva de transmissão da rede de período longo (figura 4.14a). Esta montagem teve como objectivo, mais do que a demonstração de um procedimento alternativo, avaliar a possibilidade de transposição das leituras efectuadas em termos de comprimento de onda para leituras em termos de potência, com evidentes vantagens em termos de custo total. Com efeito, fruto da grande variedade de produtos existentes no mercado, a implementação de esquemas de processamento de sinal eléctrico para a detecção de níveis reduzidos de potência é relativamente simples e barata. Adicionalmente, como iremos ver

mais adiante a versão em reflexão é sempre preferível na medida em que é mais adequada a um funcionamento tipo “sonda” .

Para além da introdução do acoplador 3 dB a principal diferença desta configuração reside na colocação de uma rede de Bragg na posição espectral ilustrada na figura 4.14 a). Nesta posição foi possível confirmar que as variações de índice de refração ambiente provocam variações detectáveis e quase lineares da potência de pico (refira-se que a colocação de uma rede de Bragg na região mínima de atenuação não permitiu observar o sinal reflectido devido à grande perda introduzida).

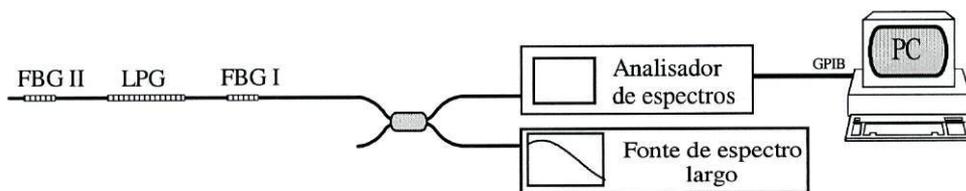


Figura 4.13 - Dispositivo experimental utilizado em reflexão.

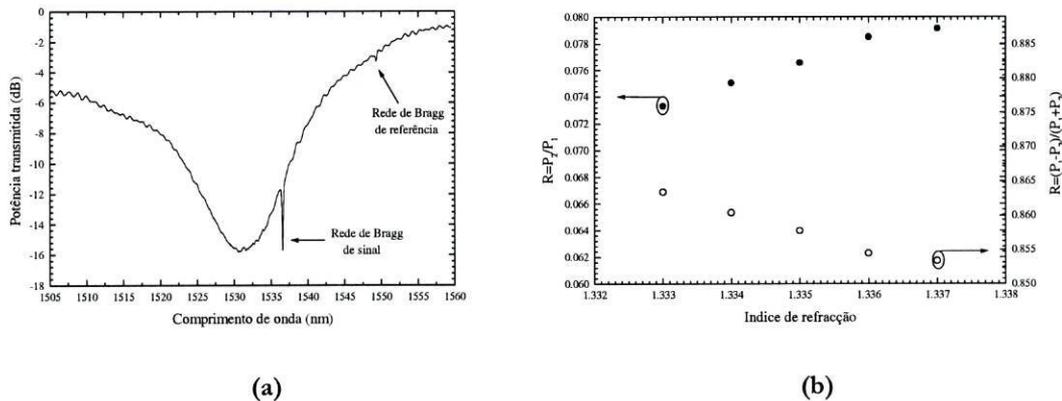


Figura 4.14 - (a)Espectro em transmissão das redes utilizadas (LPG,FBGI e FBGII); (b) Resultados obtidos a partir da medição das potências ópticas reflectidas pelas duas redes de Bragg.

Na figura 4.14 b) é efectuada a divisão dos valores da potência de pico fornecidos por ambos os sensores de Bragg segundo a função aí especificada. Este processamento tem como objectivo anular os possíveis efeitos associados com as variações de potência óptica ao longo do sistema que, de outro modo, conduziriam a resultados errados. Do conjunto de resultados até agora apresentados emerge um pormenor ainda não referido e que resulta do facto de a calibração do índice de refração do conjunto de amostras sintetizadas ter sido efectuada na região espectral do visível (589nm). Com efeito, sendo a região de

operacionalidade das redes utilizadas localizada na região dos 1550 nm é importante perceber se a dependência espectral do índice de refração de cada uma das amostras afectaria os resultados nomeadamente ao nível do comportamento linear registado. O modelo teórico que descreve a dependência espectral do índice de refração de um sistema material, inicialmente desenvolvido por W.Sellmeier no longínquo ano de 1872, exprime no essencial que essa dependência pode ser definida à custa da soma extendida a todas as ressonâncias próprias possíveis desse mesmo sistema. Em concreto, esta soma resulta da extensão a todos os modos próprios da solução geral habitual para o oscilador harmónico amortecido sujeito à incidência de um campo com frequência ω . Esta solução conjuntamente com as definições de polarizabilidade $\alpha(\omega)$ e permitividade $\epsilon(\omega)$ produzem a expressão requerida⁽⁵²⁾(Gowar-1992). Um procedimento habitual de simplificação da expansão de Sellmeier conduz à expressão de Cauchy para a dependência espectral do índice de refração:

$$n^2(\lambda) = 1 + A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad \text{Expressão de Cauchy} \quad (4.42)$$

Nesta expressão, a partir do conhecimento do valor do índice de refração de uma determinada substância para três comprimentos de onda distintos os coeficientes A, B e C ficam univocamente determinados. De regresso à descrição do procedimento experimental foram medidos no refractómetro de Abbe, para cada uma das amostras, os valores do índice correspondente a três comprimentos de onda distintos: 514 nm (linha verde de um laser de Argon); 589nm (risca amarela do sódio) e 632.8nm (risca vermelha de um laser de He-Ne).

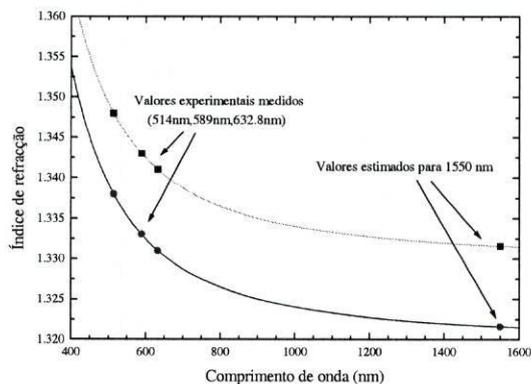


Figura 4.15 - Variação espectral do índice de refração da água pura e da amostra de índice mais elevado.

Na figura 4.15 são apresentados os resultados obtidos com base na expressão (4.42) para as curvas de variação do índice de refração da água pura (curva inferior) e para a amostra utilizada com maior índice de refração. Os resultados discriminados estão indicados no Apêndice 1 e indicam a manutenção aproximada das diferenças relativas do valor do índice de refração entre as amostras ao longo da região espectral apresentada. Este resultado, permite assim manter os valores indicados anteriormente para a sensibilidade ao índice de refração.

Antes da abordagem da nova configuração, é importante referir que através da escrita em fibra óptica de bainha dupla tem vindo, a ser explorada, a melhoria do desempenho das redes de período longo relativamente à sensibilidade ao índice de refração externo. Com efeito neste tipo de fibra a diferente sensibilidade proporcionada nos diferentes modos em circulação, permite a implementação de um sistema de medição simultânea de temperatura e índice de refração. Este aspecto resulta directamente quer, da diferente sensibilidade dos modos de ordem mais elevada relativamente aos de ordem inferior (em circulação na bainha externa/interna respectivamente), quer da sensibilidade intrínseca à temperatura proporcionada pelos LPG's⁽⁵³⁾(*Gwandu-2002*).

Sistema sensor implementado com FBG's

Foi anteriormente referido que o modelo electromagnético que descreve a propagação de radiação em guias de onda circulares é o ponto de partida para a descrição fundamental do mecanismo de sensibilidade das redes de Bragg ao índice de refração. Novamente, mais do que uma alternativa à utilização conjunta dos dois tipos de redes, a nova configuração apresentada nesta secção, ilustra como num contexto de medição simultânea distribuída da salinidade e da temperatura é possível unicamente com recurso a sensores de Bragg efectuar medidas rigorosas.

Neste ponto, é apropriado serem referidos alguns aspectos que efectivamente concretizam a relação que é possível estabelecer-se entre o índice de refração e a água do mar. Primeiro, a relação entre a variação de salinidade e o índice de refração a temperatura constante é aproximadamente 2×10^{-4} por 1‰ de teor de salinidade (gramas de sal por quilograma de água do mar); segundo o índice de refração diminui com a temperatura à razão de 5×10^{-5} para temperaturas em torno de alguns °C, valor esse que aumenta para

1×10^{-4} para temperaturas próximas dos 20°C ⁽³⁸⁾(Minato-1989). O gráfico representado na figura 4.16 a) apresenta a relação observada entre o teor de salinidade e a gama de variação de índice de refração que lhe corresponde. Estes resultados, provenientes da medição directa no refractómetro de Abbe de um conjunto de amostras calibradas de água salgada colhidas em ambiente natural e fornecidas pela Universidade de Aveiro, confirmaram em absoluto aquilo que foi anteriormente referido relativamente à região e intervalo de variação esperado. Refira-se que a utilização de amostras reais de água salgada foi posterior à utilização da solução de etileno glicol. O gráfico da figura 4.16 b) representa a variação do índice de refração da água pura com a temperatura e foi elaborado a partir da tabela de valores de variação térmica do índice de refração da água pura fornecida no manual anexo ao refractómetro de Abbe. A sua inclusão é motivada apenas para fornecer uma indicação visual da forma e variação numérica registadas para o intervalo de temperatura $[10,30]^\circ\text{C}$.

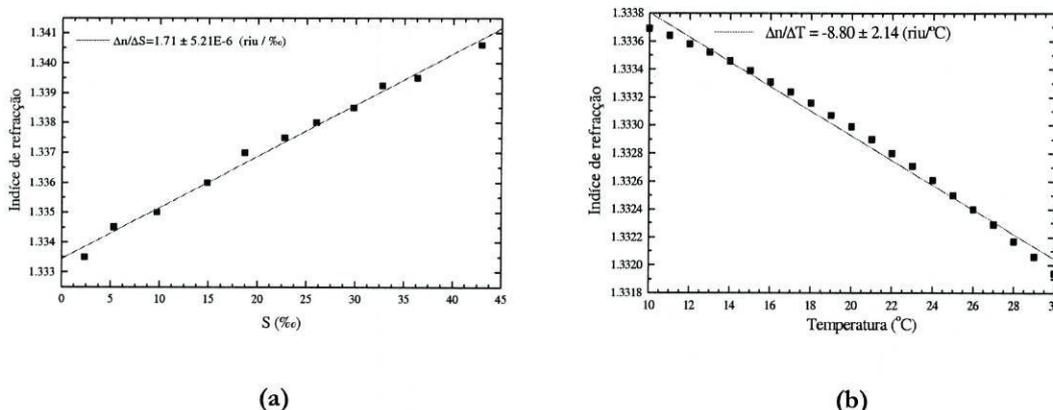


Figura 4.16 - (a) Relação entre o índice de refração e o teor de salinidade.(b) variação do índice de refração da água com a temperatura.

A cabeça sensora propriamente dita é composta por duas redes de Bragg em fibra óptica, uma das quais é sensível unicamente à temperatura e a restante sensível quer à temperatura quer ao teor de salinidade. Analogamente às redes de período longo, a sensibilidade à salinidade advém das mudanças associadas ao índice de refração da amostra do líquido envolvente ao próprio sensor. Para a compreensão do fenómeno em causa é útil recuperar a equação de Bragg e a expressão para a sensibilidade das redes de Bragg à temperatura introduzidas no capítulo 3:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (4.43)$$

onde mais uma vez n_{eff} e Λ representam o índice de refração efectivo do modo em propagação e a periodicidade espacial da rede. Tal como foi referido nesse capítulo, a sensibilidade à temperatura do comprimento de onda ressonante de Bragg provém directamente do coeficiente de expansão térmica da sílica, α , e do efeito termo-óptico do material quantificado pelo parâmetro ξ na expressão seguinte:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right) = \lambda_B (\alpha + \xi) \Delta T \quad (4.44)$$

Típicamente, para a sílica os valores de α e ξ são $0.55 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ e $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ respectivamente, o que indica que a resposta em temperatura do FBG ($\approx 11 \text{pm}/^\circ\text{C}$ a 1550 nm) é dominada pela dependência térmica do índice de refração⁽⁵⁴⁾ (Higuera, 2002). No trabalho desenvolvido a medição de índice de refração é conseguida por corrosão (*etching*) da bainha da fibra na região da rede de tal maneira que o campo evanescente do modo em propagação interactua com o meio envolvente. Nesta situação, o valor do índice de refração efectivo do modo do guia é directamente afectado pelo índice de refração do meio onde a fibra está imersa. Sempre que a fibra óptica é corroída até ao ponto em que o modo fundamental do guia é afectado, a alteração na constante de propagação correspondente pode ser descrita pela seguinte expressão⁽⁵⁵⁾ (Asseh-1998):

$$\beta = \beta_0 + k\eta_p (n_{amb} - n_{bai}) \quad (4.45)$$

onde $\beta_0 = (2\pi/\lambda)n_{eff}$ é a constante de propagação em condições normais, n_{amb} é o índice de refração do meio envolvente, n_{bai} o da bainha e k o vector de onda. O factor η_p é a fracção da potência total do modo não perturbado que circula na região corroída, sendo por tal motivo perdida para o meio envolvente. Se A_p é a área da secção recta da região corroída, então η_p pode ser definido da seguinte maneira⁽⁴⁴⁾ (Snyder-1983).

$$\eta_p = \frac{\int_{A_p} \psi^2 dA}{\int_{A_w} \psi^2 dA} \quad (4.46)$$

sendo A_∞ a área da secção recta total da fibra intacta. Para o modo fundamental e considerando a aproximação de guiagem fraca o valor de ψ é expresso como:

$$\psi = \frac{J_0(UR)}{J_0(U)}, \quad 0 \leq R \leq 1 \quad (4.47)$$

$$\psi = \frac{K_0(WR)}{K_0(W)}, \quad 1 < R \leq \infty \quad (4.48)$$

Nestas duas últimas expressões $R = r/\rho$, sendo r o raio da fibra, ρ o raio do núcleo, J_0 a função de Bessel de primeira ordem e K_0 a função de Bessel modificada também de 1ª ordem. U e W são os parâmetros modais para o núcleo e bainha respectivamente tal como definidos pelas expressões (4.29) e (4.30) anteriormente indicadas. É precisamente neste contexto que o modelo electromagnético para a propagação anteriormente referido “encaixa” na definição do coeficiente η_p . Devido à perda de potência que ocorre na região corroída da fibra, a reflectividade da rede de Bragg diminui à medida que o valor de r decresce. Por outro lado, a partir de um determinado ponto o processo de corrosão afecta igualmente o comprimento de onda de Bragg da rede através da mudança operada no índice de refração efectivo do modo. Para quantificar este efeito, consideremos η_{p_1} e η_{p_2} os valores do parâmetro η_p relativos a dois diferentes diâmetros de fibra corroída. A partir de (4.45) a variação associada à constante de propagação modificada do modo fundamental pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\beta_2 - \beta_1 = k(n_{amb} - n_{bai})(\eta_{p_1} - \eta_{p_2}) \quad (4.49)$$

Partindo da definição de constante de propagação, esta equação indica então que a variação do índice de refração efectivo do modo do guia é expressa da seguinte forma:

$$\partial n_{eff} = \partial n \partial \eta \quad (4.50)$$

onde $\partial n = n_{amb} - n_{bai}$ e $\partial \eta = \eta_{p_1} - \eta_{p_2}$. Pela relação (4.43), podemos então constatar que associado ao processo de corrosão ocorre uma variação do comprimento de onda de Bragg da rede dado por:

$$\partial \lambda_B = 2\Lambda \partial n_{eff} \quad (4.51)$$

Na figura (4.17) está indicada a cabeça sensora desenvolvida que é constituída por duas redes de Bragg escritas sequencialmente na mesma fibra pelo método da máscara de fase. No processo de escrita foi usado um laser de excímeros KrF com uma fluência de $400\text{mJ}/\text{cm}^2$ a 20Hz sendo que, mais uma vez, por forma a catalisar a fotossensibilidade no processo de escrita dos sensores colocou-se a fibra numa câmara de hidrogenização à pressão de 100 atm e temperatura ambiente durante uma semana.

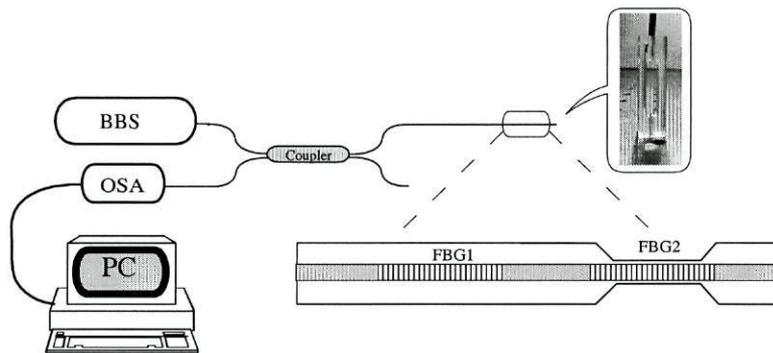


Figura 4.17 - Dispositivo experimental (BBS – Fonte de espectro largo; OSA – analisador de espectros óptico).

Para o processo de sensibilização da segunda rede de Bragg ao campo evanescente foi efectuado o processo de ataque químico com uma solução a 40% de ácido fluorídrico. Durante este processo, foi monitorada em tempo real a evolução do espectro do sensor de tal modo que, uma vez atingido um determinado valor de reflectividade e deslocamento espectral, o processo fosse parado. Deste modo foi assegurado que o sensor produzido assegurava, simultaneamente, a sensibilidade ao índice requerida sem comprometer a própria resistência mecânica do sensor. Na figura 4.18 é apresentado o gráfico de evolução no tempo do valor do diâmetro da fibra durante o processo de ataque químico, determinado por sucessivas medições no microscópio de fibras do mesmo tipo que as usadas na fabricação dos sensores.

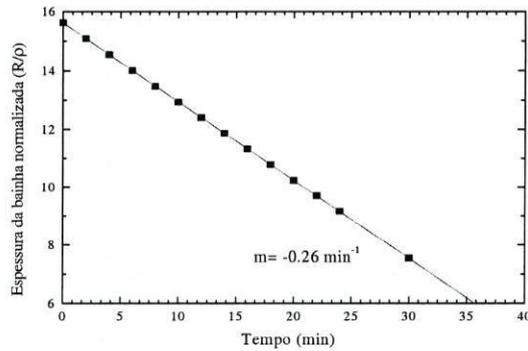


Figura 4.18 - Evolução temporal do diâmetro da fibra mergulhada na solução HF 40%.

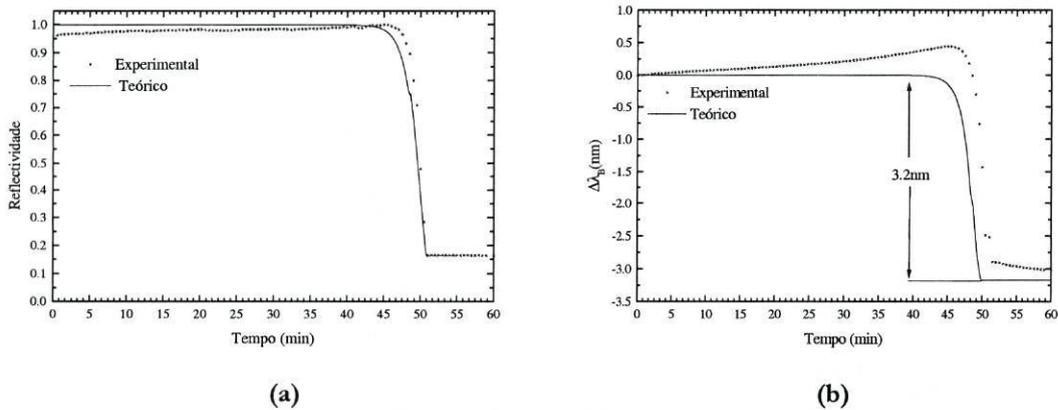


Figura 4.19 - (a) Evolução no tempo da reflectividade normalizada do FBG (teórico e experimental) durante o processo de ataque químico HF a 40% .(b) Evolução no tempo do desvio espectral do FBG (teórico e experimental) durante o processo de ataque químico HF a 40%.

Nas figuras 4.19a) e 4.19b) são apresentadas as curvas características proporcionadas pelo processo experimental e pelo modelo teórico para o valor da reflectividade e desvio espectral, medidos simultaneamente. A imersão demora aproximadamente 50 min até ocorrer uma forte queda da reflectividade e do comprimento de onda de ressonância. Isto acontece no momento em o ácido se aproxima da interface núcleo/baínha. Em seguida o sensor é mergulhado numa base para a anulação rápida da corrosão ácida residual.

Neste ponto importa referir que para o cálculo de ∂n indicado na expressão (4.50) foram usados os valores tabelados⁽⁵⁶⁾ de 1.1574 para o HF e 1.3333 para a água; a partir destes valores o cálculo do índice de refração de uma solução de 40% de HF é imediato e corresponde ao valor 1.2629. Os valores de $\partial \eta$ para $\partial n(\text{fixo})$ usados nas expressões (4.50) e (4.51) foram calculados a partir da subtração de pares adjacentes de valores de η

determinados anteriormente para a curva teórica da potência. Mais uma vez, a partir da equação (4.50) mas agora para um valor fixo de η , obtém-se:

$$\partial n_{eff} = \eta \partial n \quad (4.52)$$

A partir desta expressão é possível o cálculo da variação induzida de índice de refração efectivo bem como os desvios espectrais induzidos pela mudança do índice de refração do líquido envolvente. Na figura 4.20 são apresentados os perfis inicial e final da resposta espectral do sensor de Bragg após o processo de ataque químico.

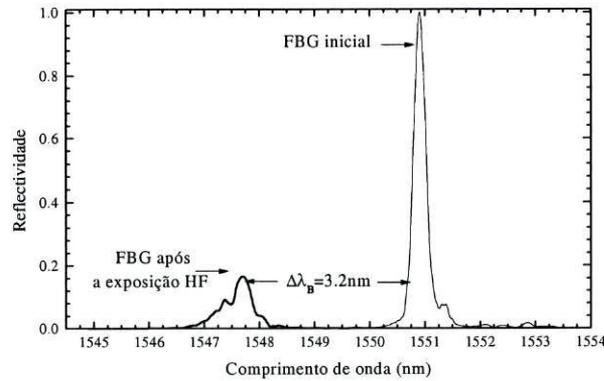


Figura 4.20 - Resposta espectral da rede de Bragg antes e depois de exposta ao ataque químico por HF.

Para o processo de calibração em temperatura dos dois sensores, foi analisada a resposta espectral de ambos na gama de variação compreendida entre 10°C e 30°C utilizando um termopar do tipo K (cobre/constantan) como referência (Figura 4.21).

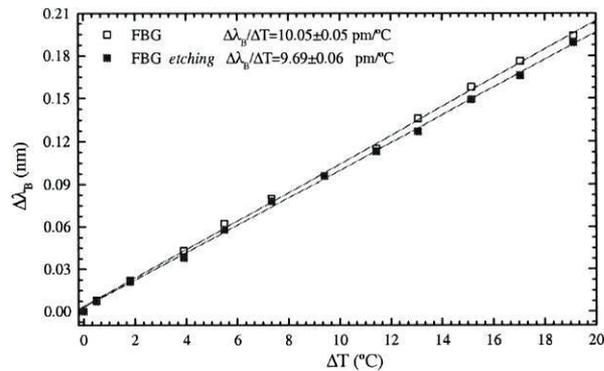


Figura 4.21 - Resposta à temperatura dos dois sensores de Bragg.

Tal como esperado, a resposta à temperatura é similar nos dois casos. Isso é devido ao facto de a dependência funcional desta grandeza se manifestar unicamente nos coeficientes de expansão térmica e termo óptico, os quais são intrínsecos do material e independentes da geometria. A resposta ao índice de refração foi obtida a partir de um conjunto de amostras calibradas de água salgada à temperatura ambiente. De facto, a partir da relação linear existente entre o índice de refração e o respectivo teor de salinidade o gráfico da figura 4.22 b) é imediato. De referir mais uma vez, que no início desta experiência foi usado o refractómetro de Abbe por forma a ser obtido o valor da razão de variação entre o índice de refração e o teor de salinidade. O valor obtido (1.71×10^{-4}) está em excelente acordo com os fornecidos na literatura^(38,40) (Minato 1989, Zhao 2002).

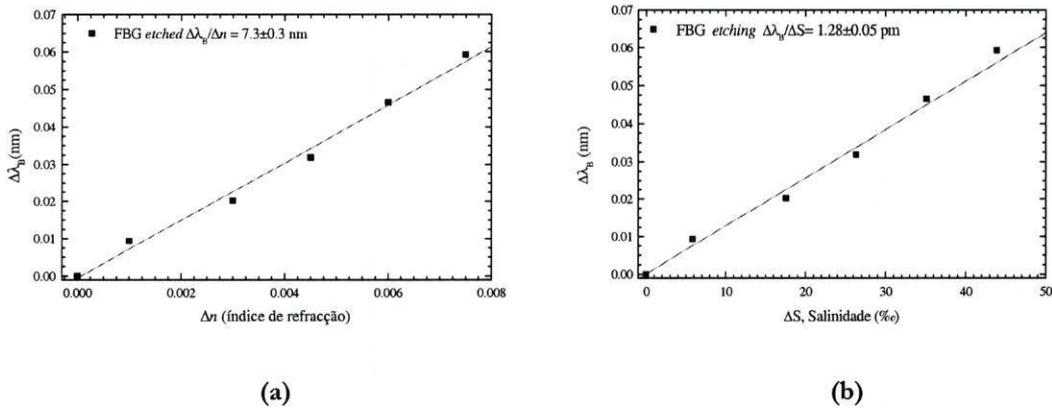


Figura 4.22 - Resposta do sensor ao; (a) índice de refração; (b) teor de salinidade

Uma vez obtidos os coeficientes de calibração à temperatura e salinidade é efectuado o tratamento matricial análogo ao concretizado no caso anterior.

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta S \end{bmatrix} = 77 \begin{bmatrix} 1.28 & 0 \\ -9.69 & 10.05 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

A resolução global é calculada a partir dos desvios *rms* das dependências na temperatura e na salinidade dos comprimentos de onda de ressonância das redes de Bragg, bem como do tempo de integração associado com o sistema de aquisição. Os desvios *rms* encontrados foram respectivamente $\pm 1.3\%$ e $\pm 0.16^\circ\text{C}$, o que num sistema de leitura de leitura com tempo de integração (1/40)s se traduz em resoluções $\pm 0.06^\circ\text{C}/\sqrt{\text{Hz}}$ e $\pm 0.2\%/ \sqrt{\text{Hz}}$. Para o cálculo dos desvios padrão foram registados os desvios de temperatura e teor de

salinidade presentes aquando da execução de um ciclo de patamares crescente e decrescente entre as amostras de índice de refração. Os valores utilizados foram aqueles fornecidos pelo tratamento matricial acima indicado, sendo que o tempo de integração foi estimado a partir do intervalo de tempo de leitura por píxel do CCD do analisador de espectros. É de acreditar que estes resultados são essencialmente determinados pela resolução intrínseca do analisador de espectros. Um tratamento de erro semelhante não foi efectuado no procedimento matricial relativo à primeira configuração com redes de período longo pois neste caso o que se pretendeu foi simplesmente a comprovação do conceito proposto.

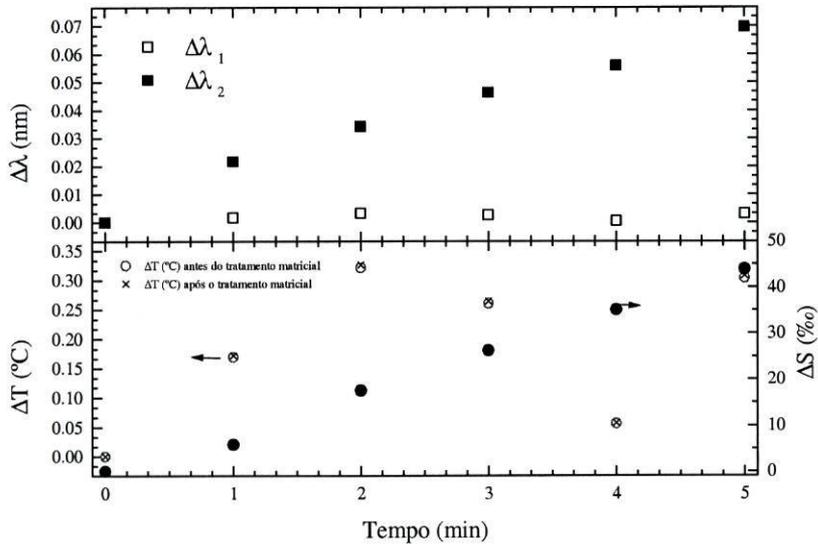


Figura 4.23 - Resultados experimentais da medição simultânea em função do tempo.

Na figura 4.23 é indicado o resultado da medição simultânea obtida para as diferentes amostras utilizadas a partir do tratamento matricial indicado na expressão (4.53). As variações de temperatura registadas são aquelas verificadas entre as amostras disponíveis no laboratório sendo por tal motivo de reduzido valor.

Monitorização distribuída da temperatura com um cabo de fibra óptica incorporando redes de Bragg

Na secção final deste capítulo são apresentados os resultados preliminares dos primeiros testes efectuados em campo com o cabo de fibra óptica inicialmente projectado (pré-prótipo) dedicado à medição distribuída da temperatura da água no canal de *Mira*, situado na *Ria de Aveiro*, tal como referido no capítulo 1.

O cabo óptico utilizado do tipo (*TON G1HERE L6U4ST*) foi fabricado pela empresa *CABELTE S.A* e possui seis fibras ópticas independentes (*Corning SMF 28[®]*), em quatro das quais foram registados nove sensores de Bragg. As restantes duas fibras, que não possuem redes de Bragg incorporadas, possibilitam o registo de perdas ópticas eventualmente induzidas em localizações específicas do cabo, funcionando assim como referência. A utilização de quatro fibras ópticas teve como objectivo possibilitar, através do registo fornecido pelos quatro sensores na mesma localização do cabo, a elaboração de tratamento estatístico. A descrição mais pormenorizada sobre o cabo óptico que acondiciona as fibras ópticas é fornecida no Apêndice 2. O cabo óptico foi instalado junto à ponte da *Vagueira*, no *Canal de Mira*, próximo da *Costa Nova* numa extensão de 1.4 Km, 850m dos quais efectivamente intercalados pelos sensores (figura 4.24). Deve ser ainda salientado que para a sua instalação sobre o leito do canal foi necessário o seu ancoramento em suportes de betão desenvolvidos e construídos para o efeito. O ancoramento do cabo foi efectuado ao longo de todo o seu comprimento, nos troços onde estão localizados os sensores de Bragg.

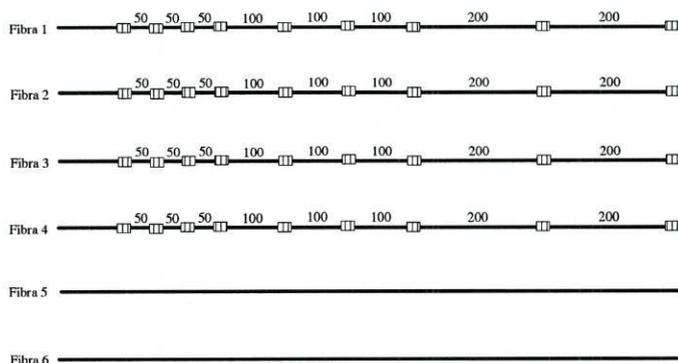


Figura 4.24 - Distribuição espacial (metros) dos sensores de Bragg nas seis fibras incorporadas no cabo óptico .



Figura 4.25 - Mapa da localização do cabo óptico no ecossistema da Ria de Aveiro

Nas figuras seguintes estão indicadas as infra-estruturas implementadas para a fabricação das redes de Bragg no conjunto de fibras ópticas que compõe o cabo óptico. É igualmente indicada (na sequência dos resultados já anteriormente apresentados no capítulo 3) a câmara de hidrogenização utilizada no processo de aumento de fotosensibilidade das bobinas de fibra. Com efeito, a necessidade do fabrico das redes de Bragg em posições específicas nas diversas bobinas de fibra motivou a opção pela utilização de uma câmara de maiores dimensões possibilitando, deste modo, o acondicionamento directo de uma bobina de fibra padrão no seu interior.

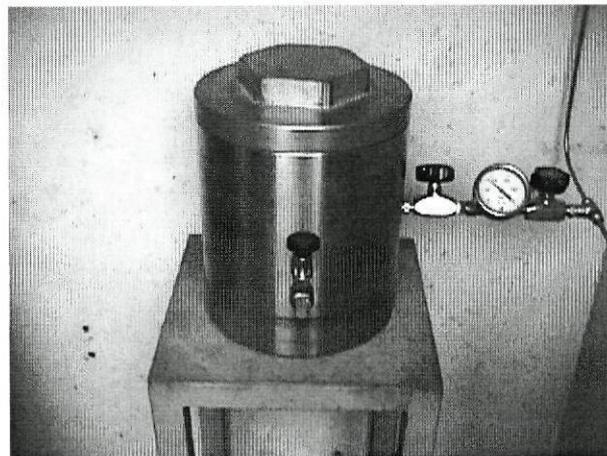


Figura 4.26 - Câmara para hidrogenizar a alta pressão fibra óptica enrolada em bobina.

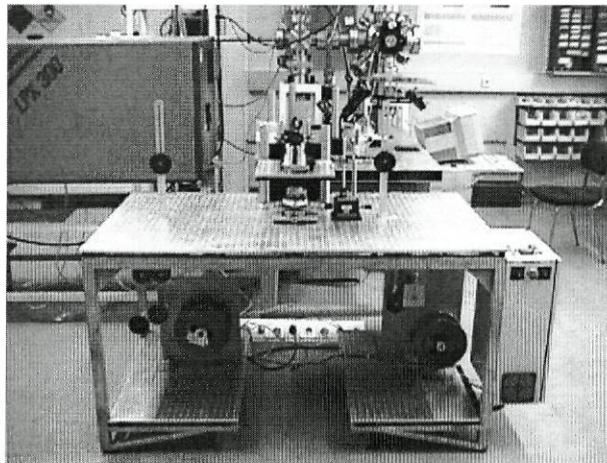


Figura 4.27 - Fotografia do grupo de transferência de fibra óptica. Em fundo pode observar-se o laser de excímeros utilizado para escrever os sensores de Bragg na fibra.

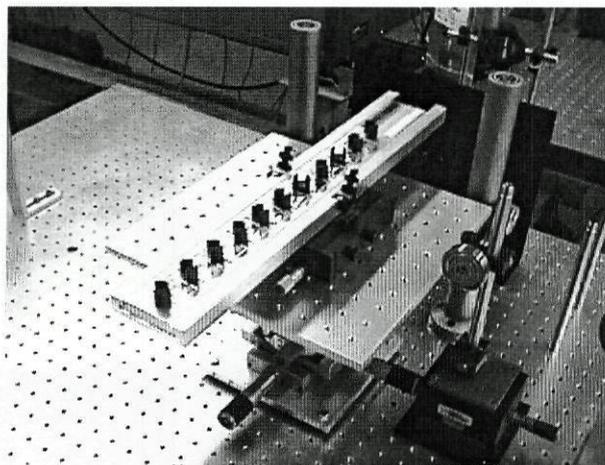


Figura 4.28 - Perspectiva do suporte contendo as máscaras de fase.

A organização do processo de escrita das redes de Bragg implementado após a hidrogenização da bobina em extensões de fibra óptica com centenas ou mesmo milhares de metros para a sua posterior cablagem, conduziu à concepção de um sistema de enrolamento/desenrolamento da fibra óptica em bobinas. Este equipamento designado grupo de transferência (figura 4.27) permite enrolar/desenrolar fibra óptica e efectuar a paragem em qualquer ponto ao longo de todo o comprimento daquela. O sistema implementado proporciona, assim, a fabricação das redes sensoras com algum grau de automatismo na medida em que a fibra é passada da bobina de emissão para a bobina de recepção, podendo-se programar os pontos de paragem que correspondem às localizações

onde se vai fazer a escrita da rede. Após a paragem, é possível manusear a fibra de forma a operar a remoção do revestimento primário e posicionar a máscara de fase para escrita da rede (figura 4.28). Os procedimentos e equipamentos que efectuam a interrogação dos sensores de Bragg são comuns aos utilizados na leitura do mesmo tipo de sensores no contexto da monitorização estrutural, pelo que a sua descrição é parte integrante do Capítulo 5.

Neste ponto, é mais uma vez útil relemburar que neste tipo de ambiente a temperatura da água é essencialmente condicionada pela própria dinâmica das marés e dos fluxos de água doce que confluem para a Ria. A partir da análise dos resultados expressos na figura 4.29 foi registada uma modulação periódica da temperatura da água com um período aproximado de 12h25m, correspondente ao período lunar principal condicionador da corrente M_2 , (M_2 é a designação da corrente principal constituinte da *Ria de Aveiro*,⁽⁵⁷⁾(Dias-1999). Os valores máximos foram registados nos períodos de maré baixa e os valores mínimos nos períodos de maré alta. Na época do ano em que está inserido o período de medição, o fluxo de água proveniente do oceano e que se propaga ao longo do Canal de Mira tem uma temperatura inferior ao fluxo de água doce e à própria água localizada em regiões mais interiores da Ria, pelo que os resultados observados estão em bom acordo com a dinâmica própria do ecossistema⁽⁵⁸⁾(Dias-2000). Adicionalmente, através do atraso temporal entre a ocorrência dos máximos e mínimos semi-diurnos de temperatura relativamente às ocorrências da baixa-mar e preia-mar na embocadura da Ria de Aveiro, é possível caracterizar a propagação da maré ao longo do *Canal de Mira*.

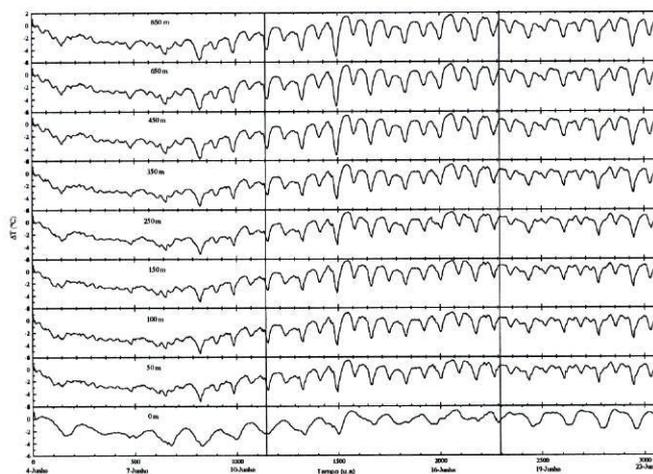


Figura 4.29 - Resultados experimentais obtidos no período compreendido entre 4 de Junho de 2002 e 23 de Junho de 2002.

A partir da análise mais pormenorizada da figura 4.29 é notório o padrão distinto fornecido pelo primeiro sensor (primeiro a contar da esquerda na figura 4.24). Este aspecto pode ser justificado pela presença excessiva de sedimentos na localização deste sensor, condicionando deste modo a variação térmica local. Relativamente aos restantes sensores constata-se que as variações fornecidas de temperatura apresentam algumas diferenças entre a primeira semana e o restante período de amostragem. Estes dados estão em bom acordo com as condições meteorológicas registadas na altura na medida em que este intervalo de tempo constituiu um período de marés mortas, a que acresce a existência de nebulosidade e a ocorrência de precipitação. O resultado global conduz por isso a uma maior entrada de água doce (mais quente) para o interior da Ria. Após a primeira semana o cessar da precipitação e a diminuição da nebulosidade traduziu-se num aumento médio da temperatura da água.

Com a apresentação destes resultados está concluída a primeira parte deste trabalho que, tal como referido, se enquadra no tema mais abrangente que constitui a monitorização de ambientes estuarinos e costeiros. No capítulo seguinte são introduzidos conceitos e resultados que, de alguma forma, estabelecem a relação entre os reais problemas que surgem no processo de monitorização estrutural e a resposta que a tecnologia dos sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica pode fornecer. Do que acaba de ser dito resulta uma simples ideia: os sensores de Bragg em fibra óptica como denominador comum presente em diferentes domínios receptores de desenvolvimentos tecnológicos avançados.

Capítulo 5 – Aplicação de sensores em fibra óptica para a monitorização estrutural

Introdução

A breve introdução sobre a monitorização de obras de arte em Engenharia Civil com recurso a sensores de Bragg em fibra óptica, inicialmente referida no capítulo 1, é o ponto de partida para uma descrição mais detalhada sobre os diferentes aspectos deste tema e que constituem a segunda parte deste trabalho. A necessidade da monitorização de estruturas de Engenharia Civil, particularmente estruturas rodoviárias, tornou-se progressivamente crescente, não só devido ao extraordinário aumento do número de construções e volume de tráfego mas, de igual modo, devido ao próprio envelhecimento de muitas dessas estruturas, que nos países mais desenvolvidos foram em grande parte edificadas desde a década de 60 até meados da década de 80 ⁽⁵⁹⁾ (Moerman-2001). Neste capítulo é apresentado um levantamento do estado da arte actual no domínio da aplicação de sensores em fibra óptica para a monitorização estrutural, em particular os sensores de Bragg, centrado sobretudo nos seguintes tópicos: tipos de cabeças sensoras, instalação das cabeças sensoras, processamento do sinal de medida e comparação com a tecnologia hoje em dia mais utilizada, a extensometria de resistência eléctrica. Os resultados experimentais apresentados são o resultado do estudo comparativo efectuado entre os sensores de Bragg e os sensores de resistência eléctrica em dois ensaios de carga distintos realizados, um no Viaduto de S.Roque e o outro na Ponte LuizI na cidade do Porto. Estas medições com base em sensores ópticos são, até à data, as primeiras realizadas em campo e em Portugal com recurso a esta tecnologia.

Cabeças sensoras

Cabeças metálicas

A fibra óptica por si só ou incorporando redes de Bragg é extremamente limitada na sua efectiva utilização em campo dada a sua fragilidade. Este aspecto foi desde sempre o motor do desenvolvimento de técnicas de fabrico e processos de “empacotamento” (*packaging*) dos próprios sensores, de tal modo que assegurando a resistência mecânica indispensável

não fosse afectado o seu desempenho ^(60,61)(Hayes-1997,Kang-2000). No decurso deste trabalho foram projectadas para a sua posterior utilização em campo dois tipos de cabeças sensoras: cabeças sensoras metálicas e cabeças sensoras em material compósito. Um aspecto das cabeças sensoras do primeiro tipo encontra-se ilustrado na figura 5.1.

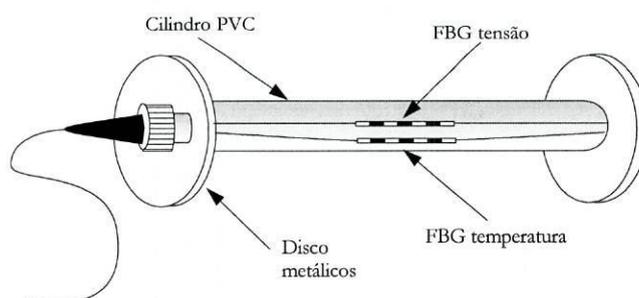


Figura 5.1 - Cabeças sensoras do tipo metálico incorporando sensores de Bragg em fibra óptica.

Como é facilmente perceptível estas cabeças são essencialmente constituídas por um tubo em PVC ao qual estão enroscados nas extremidades dois discos metálicos axialmente perfurados. No interior do tubo existem duas fibras com sensores de Bragg, uma delas solta para a medição da temperatura e a restante pré-tensionada entre as extremidades do tubo para a medição da deformação. A fixação da fibra nas extremidades foi efectuada por colagem com recurso a uma cola do tipo epoxy rápida sendo que, por forma a minorar o risco de rotura da própria fibra na extremidade de ligação ao cabo, foi efectuada a colagem de uma pequena porção do cabo no interior do cilindro metálico do disco de entrada. O desenho destas cabeças sensoras segue em grande parte o modelo comercial já existente e desenvolvido pelas companhias *ElectroPhotonics Corporation* e *Roctest*. Posteriormente, foi introduzida uma pequena inovação que consistiu na colocação de um sistema reversível de ajuste e fixação da pré-tensão requerida. Um dos aspectos relevantes na utilização deste tipo de cabeças metálicas resulta do facto de o comprimento do tubo que as constituem poder ter um valor que proporcione medidas de deformação médias “integradas” sobre esse mesmo comprimento e, portanto, livres de erros que a medição mais localizada, em meios que possuem grãos com dimensões da mesma ordem de grandeza por exemplo, podem provocar. Um exemplo claro destes meios é naturalmente o tipo de betão utilizado nas diferentes estruturas. Este último aspecto é referenciado no contexto da monitorização estrutural por fibra óptica de padrão longo (*long gauge*) ou curto (*short gauge*), assunto que será desenvolvido mais adiante neste capítulo.

Cabeças compósitas

O segundo tipo utilizado de cabeças sensoras tem por base a utilização de material compósito. De facto, dado o enorme desenvolvimento que nos últimos anos se tem verificado na elaboração e aplicação em diferentes domínios de materiais poliméricos construídos com base em fibra de carbono (CFPR- *carbon fiber reinforced polymer*), parece natural que também no domínio do projecto de cabeças sensoras, incorporando sensores em fibra óptica, esta constitua uma opção válida⁽⁶²⁾(Okabe-2000). A figura 5.2 ilustra uma configuração utilizada neste trabalho e que integra estes materiais poliméricos.

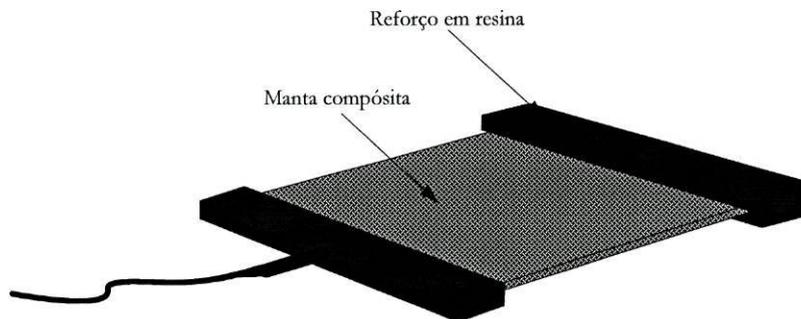


Figura 5.2 - Cabeças sensoras em fibra óptica incorporando materiais poliméricos.

Nesta estrutura, ao contrário das cabeças sensoras metálicas, é utilizada habitualmente uma única fibra possuindo duas redes de Bragg. A fibra óptica é colocada entre duas “mantas” de uma camada filiforme paralelamente à direcção desses mesmos filamentos, sendo posteriormente aplicada a mistura de resina que, após um período de cura de aproximadamente 24 horas, confere a rigidez final. A colocação da fibra segundo a orientação referida resulta do facto de a sua colocação numa outra orientação promover a acumulação excessiva de resina na região envolvente à própria fibra o que, por sua vez, pode originar estados de tensão locais indesejáveis⁽⁶³⁾(Dasgupta-1992). A colocação dos dois sensores em série, para além da simplificação que acarreta, obriga à utilização de um capilar metálico para acomodar o sensor de temperatura de uma forma que o proteja da acção da deformação. Um outro aspecto ainda não referido tem a ver com a perturbação que a inclusão de um elemento estranho, neste caso a fibra óptica, no meio filiforme compósito. Estudos efectuados anteriormente⁽⁶⁴⁾(Measures-1989) revelaram que a inclusão da fibra óptica paralelamente à orientação das fibras da manta não originara qualquer degradação do seu desempenho em termos mecânicos. No entanto, embora não haja estudos directos

relativamente ao efeito da presença do capilar metálico, houve especial cuidado na sua colocação, nomeadamente ao não desalinhar os filamentos da “manta” na região de contacto. À semelhança das cabeças sensoras metálicas, reforçou-se o local da transição da fibra embebida para o cabo de ligação, tendo-se optado no início pela inclusão de um capilar em borracha e, mais tarde, com o registo dos sensores na fibra constituinte dos conectores padrão de fibra óptica (APC ou PC) pela inclusão de parte do seu revestimento na região próxima do bordo da manta compósita.

Categorias de medição

Foi anteriormente referido que a monitorização estrutural pode ser dividida em duas categorias: a monitorização de padrão longo (*long gauge*) e a monitorização de padrão curto (*short gauge*). De facto, um critério globalmente aceite define que um sensor de padrão longo integra um comprimento maior ou igual a 5cm e um de padrão curto o intervalo compreendido entre 2mm e 5cm. Sendo, em muitos casos, a própria granulidade do betão o elemento de escala condicionante do tipo de sensores a aplicar, é sempre possível considerar a variação de tensão (extensão) como uma variação local que contribui, uma vez integrada, para a variação geral da estrutura, isto é, para a deformação⁽⁶⁵⁾ (*Measures-2001*).

Em grande parte dos testes é precisamente a monitorização de padrão longo que é requerida, sendo por isso apropriada a utilização de sensores inseridos nesta categoria. Com efeito, e tendo em atenção que as dimensões dos dois tipos de cabeças sensoras apresentadas, metálicas e compósitas, são superiores a 5cm, é útil a sua classificação em dois tipos, respectivamente: *extensómetros*, no qual a fibra óptica acomodada é fixada em dois pontos distintos numa estrutura intermédia posteriormente acoplada à própria estrutura; e o *sensor estrutural integrado em fibra óptica de padrão longo*, no qual toda a extensão do sensor está acoplada à estrutura (sensor compósito).

Se até aqui foram discutidos sobretudo aspectos relacionados com as cabeças sensoras e a sua funcionalidade, interessa agora introduzir um outro aspecto que diz respeito ao tipo de medição pretendida, relativa ou absoluta. Pela medição absoluta pretende-se conhecer a evolução do estado de deformação da estrutura no longo prazo, exigindo por isso a instalação dos sensores durante o processo de construção; a instalação numa fase posterior à conclusão da estrutura permite apenas o acesso a medidas relativas. Neste contexto é importante mais uma vez referir o carácter absoluto das medições efectuadas com sensores

de Bragg em fibra óptica, a exemplo do que também acontece com sensores em fibra óptica baseados na interferometria de baixa coerência⁽⁶⁶⁾ (Inaudi-1997).

Processamento de sinal e desmodulação

Nos capítulos 2 e 3 foi feita uma apresentação de um conjunto de técnicas de processamento de sinal e das redes de Bragg como elemento sensor que, em conjunto, constituem a base de grande parte dos sistemas de desmodulação construídos em fibra óptica para a medição de deformação e temperatura⁽⁶⁷⁾ (Kersey-1997). Neste ponto, é útil reunir alguns desses aspectos para a apresentação de um dos dois métodos utilizados para as leituras efectuadas nos ensaios de monitorização: o método de leitura por sintonização de um filtro de Fabry-Pérot em fibra óptica (FFP-fibre Fabry Pérot), efectuado por um modelo comercial desenvolvido pela *Micron Optics Inc.* O segundo método envolve, à semelhança das experiências anteriormente efectuadas, a utilização directa do analisador de espectros óptico (OSA). O diagrama de desmodulação de redes de Bragg por varrimento de um (FFP) encontra-se representado na figura 5.3.

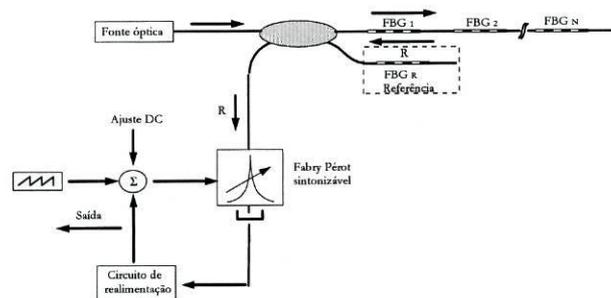


Figura 5.3 - Diagrama de implementação da técnica FFP de interrogação de redes de Bragg.

O conjunto dos sinais reflectidos pelos sensores de Bragg atravessa um filtro (FFP) com uma banda espectral livre (*free spectral range*) suficientemente larga de modo a garantir um intervalo de sintonia relativamente extenso com as ressonâncias das redes de Bragg. O controlo piezoeléctrico do espaçamento entre os espelhos que constituem o FFP permite a sintonização do comprimento de onda ressonante de uma particular rede de Bragg. O esquema mais simples para a detecção resulta da aplicação directa de uma onda dente de serra ao dispositivo piezoeléctrico. Quando o sinal gerado pelo detector passa por um máximo está-se na situação de sintonia de um sensor de Bragg sendo o seu valor

determinado a partir da tensão aplicada ao piezoeléctrico. Uma alternativa mais sofisticada a este esquema de desmodulação envolve a formação da derivada efectiva do sinal do detector durante o período de tempo de varrimento do filtro (FFP). Este processo é o implementado pelo sistema de medição utilizado neste trabalho. Com efeito, é conhecido que a capacidade de um filtro de Fabry-Pérot separar dois comprimentos de onda muito próximos está condicionada pelo seu perfil em termos de largura espectral mínima, a qual é função quer do seu coeficiente de *finesse* quer da própria distância entre os espelhos. A implementação de um módulo electrónico que implementa a derivada do sinal melhora significativamente este aspecto na medida em que a derivada de uma função amplia o efeito das alterações ocorridas no sinal produzido por cada um dos sensores⁽⁶⁸⁾ (Kersey-1993). Essencialmente a derivada do sinal é processada digitalmente pela subtracção entre valores consecutivos dividida pelo intervalo de tempo definido pelo circuito de atraso. Em termos numéricos, para uma banda espectral livre típica de 50nm e com a modulação em dente de serra gerada num conversor analógico-digital de 16 bits é possível obter-se uma resolução espectral de 0.8pm (último bit significativo) ou equivalentemente em termos de deformação um valor de 0.8 $\mu\epsilon$. O sistema utilizado tem capacidade para a leitura simultânea com uma resolução de 1 $\mu\epsilon$ e precisão de 4 $\mu\epsilon$, numa frequência de varrimento de 50 Hz, de 31 sensores de Bragg com ressonâncias em torno de 1530nm dispostos na mesma fibra óptica. Os valores absolutos dessas estruturas espectrais são obtidos a partir da leitura de uma rede de Bragg de referência, colocada na segunda porta de saída do acoplador direccional de iluminação dos sensores (figura 5.3). Estas características tornam este equipamento perfeitamente adequado à medição do tipo de deformações estáticas e dinâmicas presentes em estruturas de Engenharia Civil.

Na figura 5.4 encontra-se representado o diagrama do sistema de monitorização estrutural utilizado pela companhia *Smartec* e que se baseia no conceito de interferometria de baixa coerência.

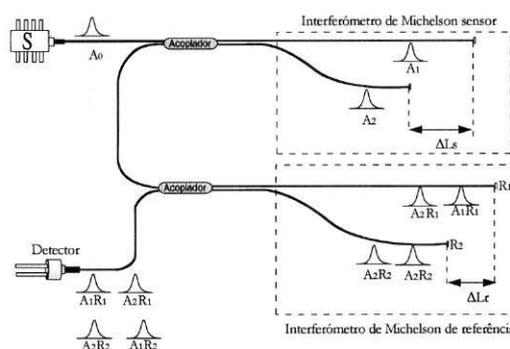


Figura 5.4 - Sistema sensor interferométrico que implementa a técnica de baixa coerência.

O sistema interferométrico é constituído por dois interferómetros de Michelson em fibra óptica ligados entre si. O interferómetro directamente ligado à fonte de radiação, o interferómetro sensor, produz dois sinais desfasados entre si; um deles (A_1), proveniente do braço de referência e isolado de qualquer tipo de tensão e o complementar (A_2), proveniente do braço de sinal e modulado em fase pela actuação directa do esforço mecânico na dimensão longitudinal da fibra. Na situação em que o não balanceamento de cada um dos interferómetros é sensivelmente o mesmo ($\Delta L_R \approx \Delta L_S$) é possível demonstrar-se que a potência óptica detectada à saída do sistema pode ser expressa da seguinte forma⁽⁶⁹⁾ (Lobo Ribeiro -1996):

$$I_D \approx \frac{I_0}{4} \left[1 + \frac{1}{2} \cos \left(\frac{2\pi n}{\lambda} (\Delta L_S - \Delta L_R) \right) \right] \quad (5.1)$$

Ou seja, o conjunto formado pelos dois interferómetros funciona como um único interferómetro com não-balanceamento $\Delta L_S - \Delta L_R$. Deste modo, a partir do conhecimento do não-balanceamento ΔL_R , é possível determinar a acção do esforço mecânico aplicado num dos braços do interferómetro sensor (ΔL_S) o que, mediante a calibração adequada, permite quantificar em resultados numéricos a acção desse mesmo esforço. Um aspecto ainda não referido resulta do facto de, com base na expressão (5.1), se concluir que independentemente do tipo de fonte utilizada (desde que com um comprimento de coerência $L_c \ll \Delta L_S, \Delta L_R$) a função de transferência é apenas condicionada pela diferença de não-balanceamentos existente entre os dois interferómetros. Este aspecto permite relançar as condições sobre o tipo de fonte óptica a utilizar desde que o critério base como indicado seja satisfeito.

Do que foi até agora referido relativamente aos sensores de Bragg, relativamente à interferometria de baixa coerência, é possível reconhecer que no contexto da monitorização estrutural os dispositivos sensores de padrão curto, como o são os sensores de Bragg em fibra óptica, fornecem medições mais localizadas exigindo por tal motivo a sua distribuição em série (multiplexagem). Os sensores de padrão longo identificados, neste caso em particular, pelos sistemas sensores em fibra óptica de baixa coerência, permitem bases de medição de alguns metros (1m-10m) sendo, por tal motivo, adequados ao estudo do comportamento integrado da estrutura. Neste contexto o tipo de estudo que se pretende fazer é determinante na escolha da arquitectura sensora mais adequada⁽⁶⁵⁾ (Measures-2001).

Resultados experimentais

Nesta secção são apresentados os resultados experimentais recolhidos em campo nos dois ensaios de carga realizados na Ponte Luiz I e no Viaduto de S.Roque, estruturas localizadas na cidade do Porto. Estas duas estruturas, construídas em aço e betão armado respectivamente, e portanto com comportamentos às cargas dinâmicas e estáticas fundamentalmente distintos, possibilitam o conhecimento efectivo da resposta dos sensores de Bragg no processo de monitorização em situações reais. Paralelamente aos ensaios de carga realizados foi ainda efectuado um ensaio de medição de tráfego por um período de 24 horas na Ponte Luiz I. Em todos os casos são apresentados os resultados comparativos do comportamento dos sensores ópticos em relação aos sensores eléctricos convencionais.

Ponte Luiz I - Instalação dos sensores

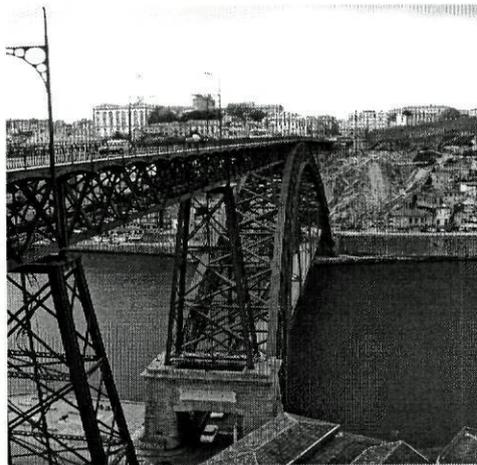


Figura 5.5 - Panorâmica da ponte Luiz I que une as margens de Gaia e do Porto.

A instalação de sensores de Bragg em fibra óptica em estruturas construídas em aço só pode ser feita à superfície. Neste caso em particular a solução adoptada consistiu na colagem directa da região da fibra onde o sensor de Bragg está escrito sobre o aço na localização pretendida. O processo de colagem exigiu o prévio tratamento da superfície localizada no aço por lixamento de forma a ser minimizada a rugosidade. A colagem dos sensores foi efectuada com cola do tipo epoxy rápida. Cada um dos três sensores instalados possui um cabo em fibra óptica individual com várias dezenas de metros até ao posto de observação.

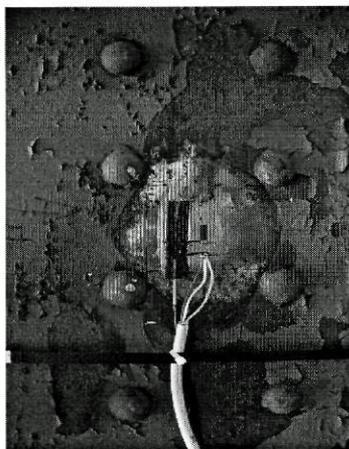


Figura 5.6 - Aspecto da região de colagem da cabeça sensora compósita e do extensómetro de resistência eléctrica na secção metálica do tabuleiro ET-I1.

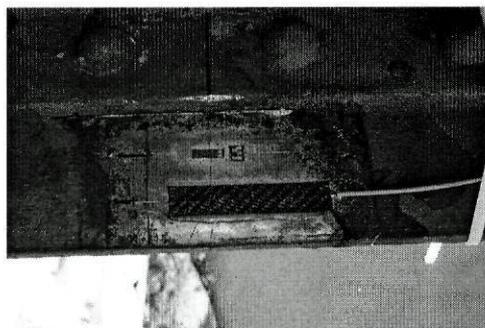


Figura 5.7 - Pormenor da região de colagem da cabeça sensora compósita e do extensómetro de resistência eléctrica na secção EA-I5 localizada no arco central da estrutura.

O dispositivo de leitura dos sensores é constituído por uma fonte de espectro largo, um comutador óptico, um analisador de espectros ópticos e um computador portátil. A saída da fonte de espectro largo é ligada ao comutador óptico que, como o próprio nome indica, efectua a comutação entre as entradas dos diferentes sensores a ele ligados. O sinal de reflexão proveniente de cada um dos sensores é devolvido ao comutador e, através do acoplador interno, reencaminhado para o analisador de espectros (*OSA*). O processo de aquisição de dados dos diferentes sensores é feito de forma automática por controlo remoto do comutador óptico e do analisador de espectros através de um programa elaborado para o efeito em LabView. Como foi anteriormente mencionado foi também utilizado o equipamento de leitura da *Micron Optics* com uma taxa de aquisição de 1 segundo destinado ao registo de medições dinâmicas.

Ponte Luiz I- Resultados comparativos do ensaio de carga realizado no dia 6 de Abril de 2002

O ensaio de carga realizado na ponte Luiz I foi realizado no âmbito de um estudo requerido ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) pela Sociedade Metro do Porto (futura utilizadora da estrutura). O programa do ensaio foi executado definindo a velocidade e paragem de dez veículos pesados de tara idêntica ao longo do tabuleiro. Nas figuras (5.8) e (5.9) estão indicados os resultados comparativos fornecido pelos sensores de Bragg em fibra óptica e os sensores convencionais de resistência eléctrica nos períodos de acontecimentos relevantes.

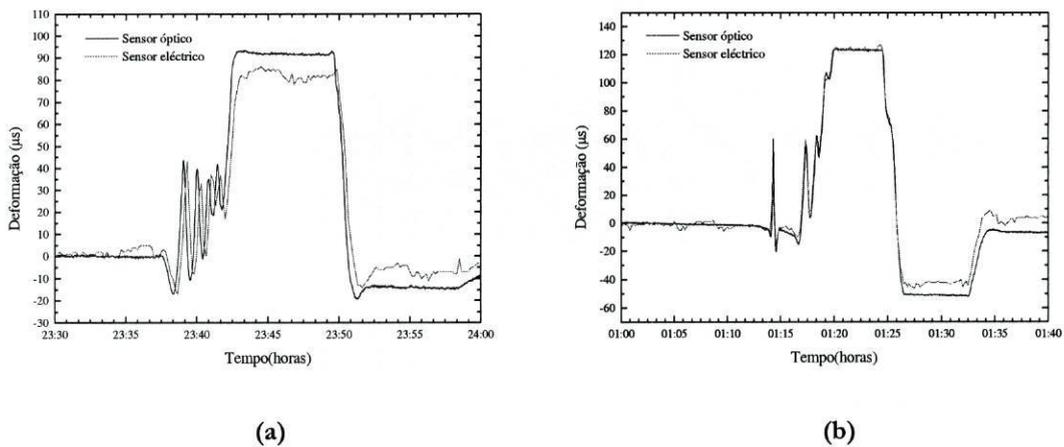


Figura 5.8 - (a) Leitura registada na aproximação e paragem dos 10 veículos dispostos no tabuleiro da ponte no sentido Gaia-Porto em posições pré-definidas; (b) Leitura registada na deslocação de 2 veículos no sentido Porto-Gaia e aproximação e paragem dos restantes 8 veículos dispostos no tabuleiro no sentido Porto-Gaia.

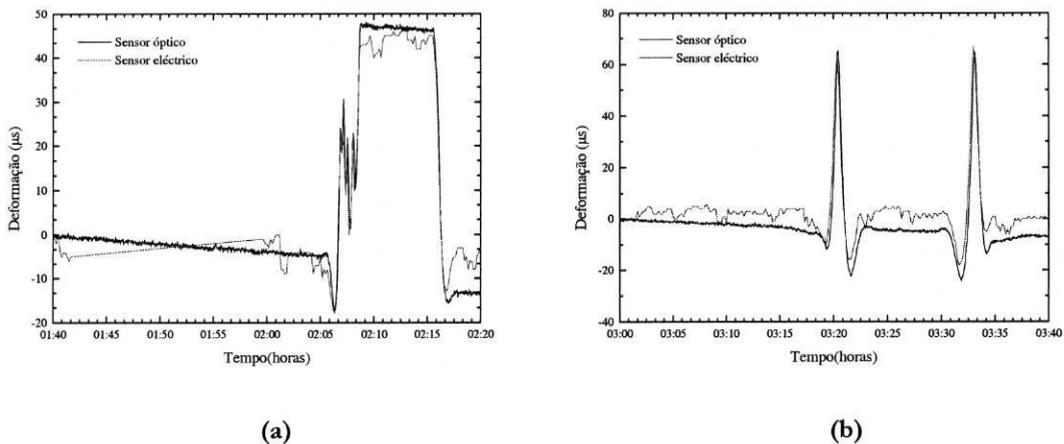


Figura 5.9 - (a) Leitura registada na aproximação e paragem de 5 veículos no lado jusante do tabuleiro no sentido Gaia-Porto; (b) Leitura registada do avanço em marcha lenta a par de dois veículos no sentido Porto-Gaia.

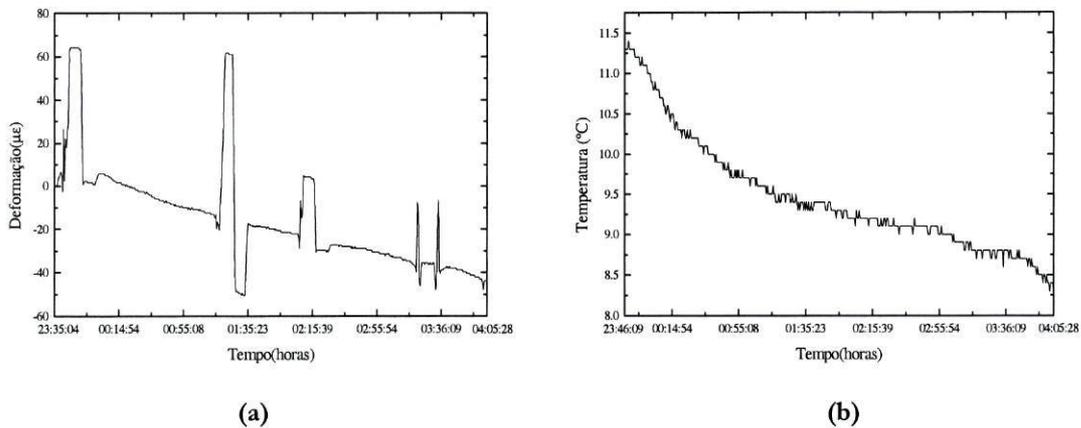


Figura 5.10 - (a)Característica geral do ensaio obtida no sensor instalado na secção ET-I1. (b) Evolução da temperatura fornecida pelo sensor instalado no arco (secção EA-I5).

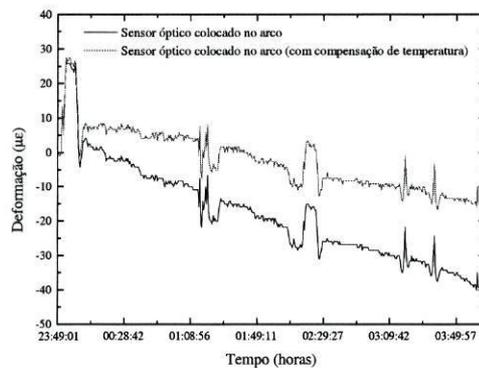


Figura 5.11 - Característica geral do ensaio obtida pelo sensor de deformação instalado no arco na secção EA-I5 com e sem compensação de temperatura.

Estes resultados evidenciam a excelente concordância (entre os sensores ópticos e os sensores eléctricos) existente no registo individual de cada um dos acontecimentos do ensaio de carga. A pendente registada no gráfico geral do ensaio de carga apresentado na figura 5.10(a) é devida à acção conjunta do efeito directo da temperatura no sensor, identificada pela alteração provocada no índice de refacção efectivo por efeito térmico (expressão 3.21), e do efeito indirecto através da deformação induzida na estrutura de aço. Estas conclusões são suportadas pelos resultados apresentados na figura 5.11, na qual a mera compensação de temperatura não produz a anulação da pendente. A este resultado deve ser acrescentado o facto de a diferença entre o estado final e inicial da estrutura, registada após a compensação e que se situa à volta dos $25\mu\epsilon$ (figura 5.11) estar ajustada aos dados fornecidos pelo Laboratório de Estruturas da FEUP. Com efeito, tendo em atenção a especificidade do tipo de aço presente, a modelização numérica da estrutura

produziu para a variação registada de 3°C na temperatura durante o ensaio (figura 5.10 b) uma deformação de 24µε. A monitorização da temperatura foi realizada por um sensor de Bragg em fibra óptica do mesmo tipo dos restantes mas desacoplado da estrutura. Tal como seria de esperar, as deformações registadas durante as várias etapas do ensaio pelo sensor instalado no arco são muito inferiores às registadas no tabuleiro.

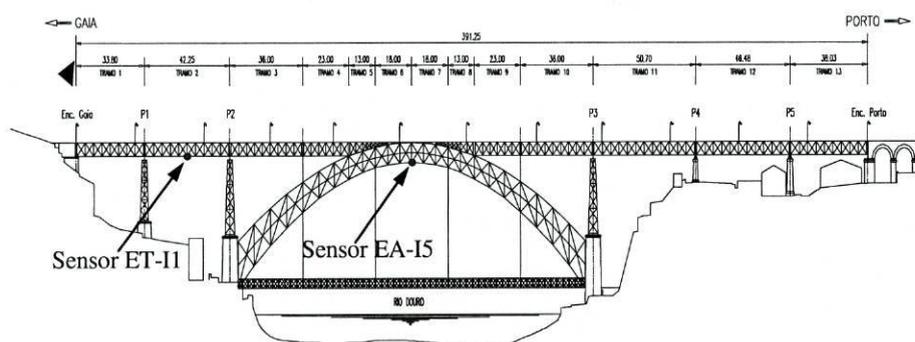


Figura 5.12 - Alçada da Ponte D.LuizI com a respectiva localização dos sensores (O sensor localizado em EA-I5 era duplo, permitindo o registo da evolução da temperatura).

Ponte LuizI - Resultados experimentais obtidos no teste de monitorização de tráfego no dia 9 de Abril de 2002

Nesta secção é apresentado o resultado do teste de monitorização de tráfego efectuado em 9 de Abril de 2002 na Ponte Luiz I. A cabeça sensora é formada por uma rede de Bragg escrita pela técnica de máscara de fase com um comprimento de onda central de 1548 nm ⁽⁷⁰⁾(Ho-2002). A rede de Bragg foi embebida por duas camadas de tecido de carbono e matriz epóxida (PRFC) formando assim uma estrutura inteligente. O equipamento de medição utilizado foi aquele da *Micronoptics* anteriormente referido e baseado na utilização de um filtro sintonizável de Fabry-Perot referenciado a uma rede de Bragg interna e que permite uma resolução de 1pm. O sensor foi instalado longitudinalmente na plataforma inferior do tabuleiro superior da ponte (sensor ET-I1 na figura 5.12). São a seguir apresentados os resultados compilados durante um período de medição de 22 horas.

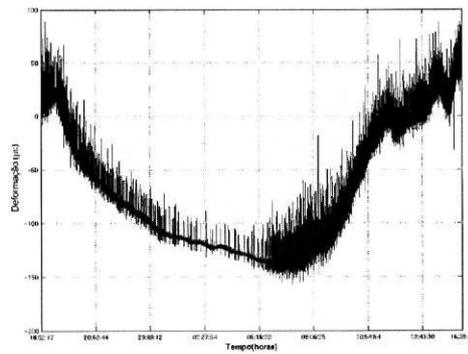
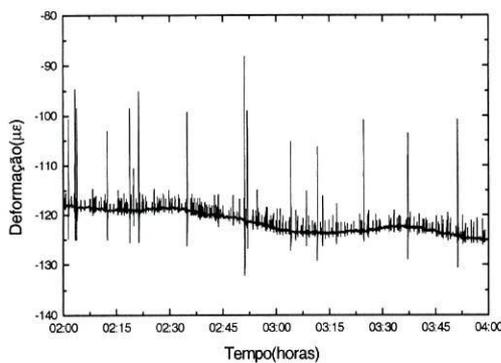
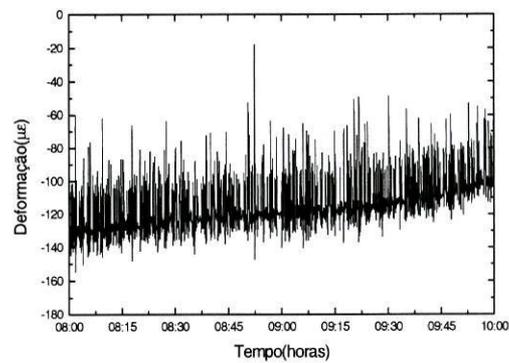


Figura 5.13 - Resultados obtidos durante o período de medição de 22 horas.

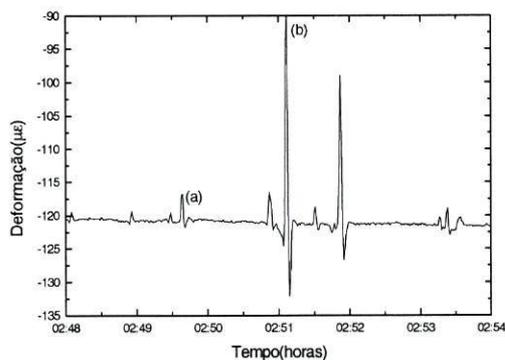


(a)

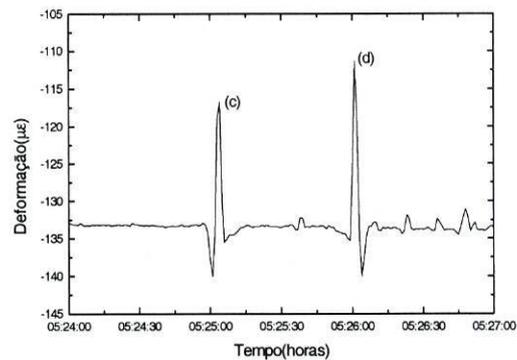


(b)

Figura 5.14 - Registo relativo ao período: (a) 2h-4h da madrugada; (b) 8h-10h da manhã.



(a)



(b)

Figura 5.15 - Leituras ampliadas relativas ao período da madrugada.

A partir dos gráficos acima indicados é possível recolher informação simultânea sobre um leque variado de aspectos: a distribuição temporal do volume de tráfego, o ciclo diário de deformação da estrutura, a deformação instantânea provocada por um veículo em circulação, a classificação do veículo e, inclusive, o sentido de circulação. De facto, pela

observação directa do gráfico apresentado na figura 5.13 é notória a deformação diária da estrutura metálica devido ao efeito térmico. De igual modo são claramente destacados os períodos esperados de maior e menor volume de tráfego, respectivamente o início da manhã e o período da madrugada, tal como é ilustrado nos gráficos das figuras 5.14(a) e 5.14(b). A partir do gráfico apresentado na figura 5.15(a) é possível retirar informação acerca da deformação instantânea, ou assinatura individual, imposta por diferentes tipos de veículos (ligeiro.vs.pesado). Dada a localização assimétrica do sensor foi sistematicamente observado que o mesmo tipo de veículo provocava uma evolução da característica de deformação instantânea distinta em função do sentido de circulação. Este último aspecto encontra-se evidenciado nos picos (c) e (d) da figura 5.15(b).

Ponte LuizI- Estimativa do volume de tráfego de pesados registado nos dias 8 e 9 de Abril de 2002 efectuada a partir dos resultados obtidos no teste de 24 horas

A incidência do volume de tráfego em circulação numa determinada estrutura, em especial o de veículos pesados, constitui uma fonte de informação importante em termos de estimativa de desgaste da estrutura e correspondente planeamento das intervenções. A partir dos resultados apresentados nas figuras 5.14(a) e 5.14(b) procedeu-se ao tratamento dos dados estendido à totalidade do período de medição e que mais não é do que um processo de contagem de passagens. Os resultados obtidos estão indicados nas figuras seguintes para o caso de veículos pesados em que a contagem de um evento individual só é efectiva se a deformação associada ultrapassar um determinado limiar.

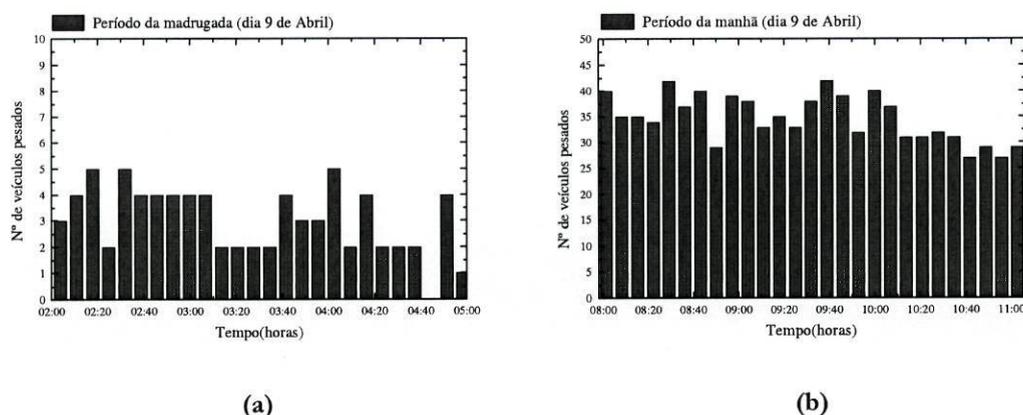


Figura 5.16 - Estimativa do tráfego de veículos pesados nos dois sentidos: (a) durante a madrugada; (b) durante a manhã.

A partir dos resultados apresentados na figura (5.16) é evidenciado o potencial deste tipo de sensores ao nível da medição simultânea de diferentes parâmetros complementares da

própria medição de deformação e temperatura. Adicionalmente, é de igual modo possível o registo das velocidades individuais de cada veículo possibilitando, assim, a elaboração de sistemas de medição distribuída em tempo real altamente atractivos no domínio da monitorização e controlo de tráfego.

Viaduto de S.Roque

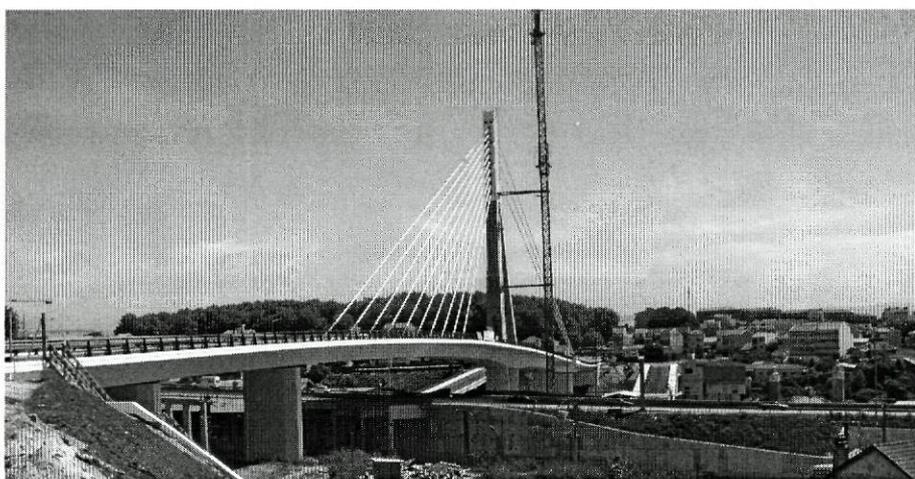
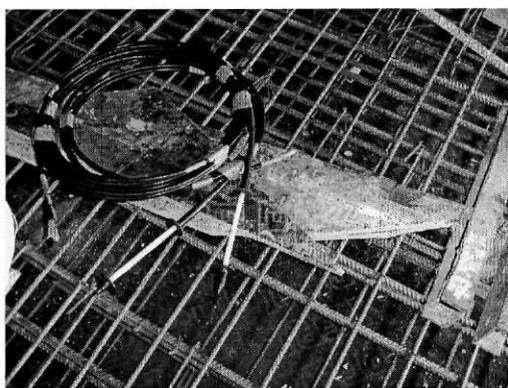


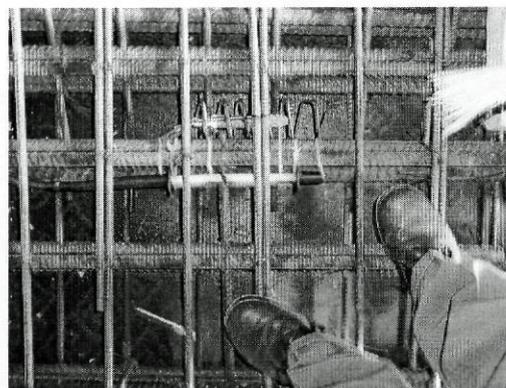
Figura 5.17 - Vista geral do viaduto de S.Roque na fase final de construção.

A instalação de sensores ópticos no Viaduto de S.Roque teve como objectivo não só a avaliação comparativa sensores ópticos/sensores eléctricos noutra ambiente que não o de uma ponte metálica, mas também perceber até que ponto as cabeças sensoras dos dois tipos se comportavam (uma vez inseridas dentro do próprio betão). Neste contexto convém referir que a instalação de sensores embebidos no betão próximos do reforço em aço (armadura) permite, em muitas situações, antecipar a detecção de fendas na medida em que o processo de corrosão provoca o aumento local de volume e, conseqüentemente, o aumento da pressão interna. O processo de instalação dos sensores embebidos foi realizado durante o período de construção em duas secções do viaduto, tendo para tal sido instaladas 4 cabeças metálicas e uma compósita. Este processo compreende quatro etapas: fixação à armadura, enchimento da armadura, compactação e secagem (cura) do betão. O aspecto de

algumas das cabeças sensoras utilizadas e o modo como foram fixadas à armadura é ilustrado nas figuras 5.18 a), 5.18b) e 5.19).



(a)



(b)

Figura 5.18 - (a) Aspecto das cabeças metálicas utilizadas; (b) Colocação das cabeças sensoras na estrutura ao lado dos sensores de resistência eléctrica.

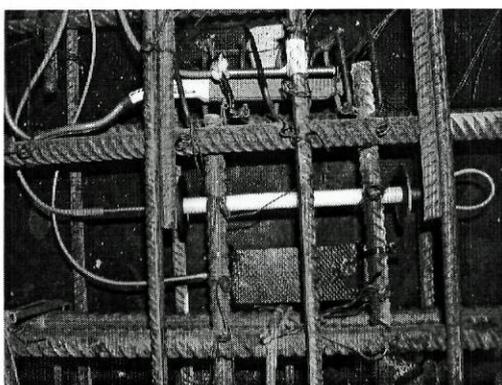


Figura 5.19 - Aspecto do local de instalação dos dois tipo de cabeças sensoras (metálicas/compósitas) e do sensor de resistência eléctrica.

Na primeira secção instrumentada foram instaladas três cabeças metálicas nas posições indicadas na figura (5.20). A ideia inicial da completa instrumentação da secção com sensores ópticos colidiu com o insucesso constatado no momento dos testes preliminares. De facto, veio a concluir-se que a rotura ocorrida em todos os sensores na fibra pré-tensionada foi devida aos enormes esforços a que os sensores foram sujeitos no momento da compactação do betão no qual os movimentos de agitação e vibração executado por um equipamento específico pesado se revelaram excessivos. A solução imediata adoptada para contornar este obstáculo foi a de eliminar o valor fixo de pré-tensão na fibra e introduzir

uma ligeira alteração na cabeça sensora que permitia o ajuste manual da tensão. Com esta alteração pretendia-se, uma vez fixado o sensor à estrutura, ajustar o valor de tensão mínimo que não compromettesse o funcionamento do próprio sensor em termos de extensão ou compressão e, ao mesmo tempo, resistisse ao processo da compactação. Escusado será dizer, que como em tantas outras situações, a primeira solução nem sempre é a melhor pelo que este sensor acabou por ter o mesmo destino. Todavia, apesar do desconhecimento que na altura dos acontecimentos (Dezembro 2001) existia sobre os esforços realizados, reflexões posteriores concluíram da necessidade da monitorização em tempo real do processo de compactação e vibração o que, no mínimo, seria uma experiência vibrante! Do conjunto de sensores anteriormente referido resta portanto o sensor compósito. Posteriormente foi instalado um outro sensor de superfície na diagonal metálica da secção, tal como indicado na figura 5.21. Estes sensores foram utilizados no ensaio de carga realizado no dia 16 de Maio de 2002. De referir que o sensor compósito era duplo, possibilitando assim a compensação do efeito intrínseco da temperatura na resposta espectral das redes de Bragg sujeitas à deformação.

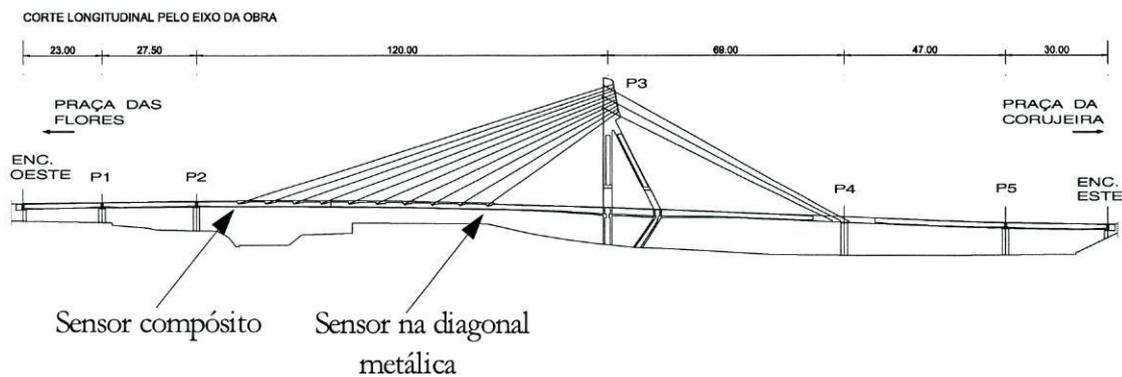


Figura 5.20 - Alçado do Viaduto de S.Roque com a respectiva localização dos sensores

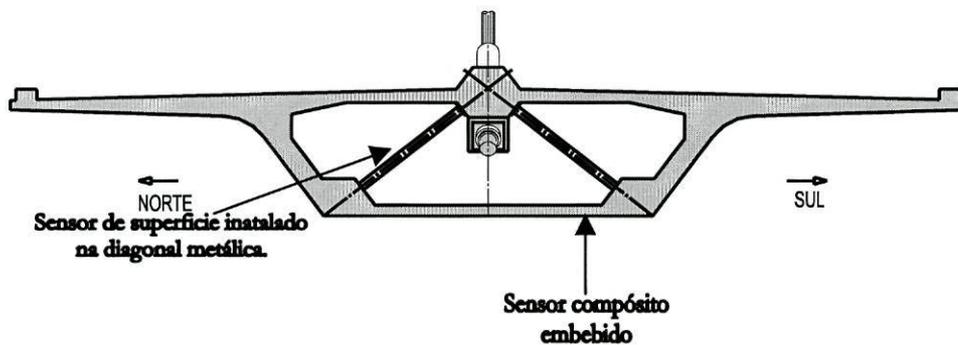


Figura 5.21 - Corte transversal da secção do viaduto.

Resultados experimentais

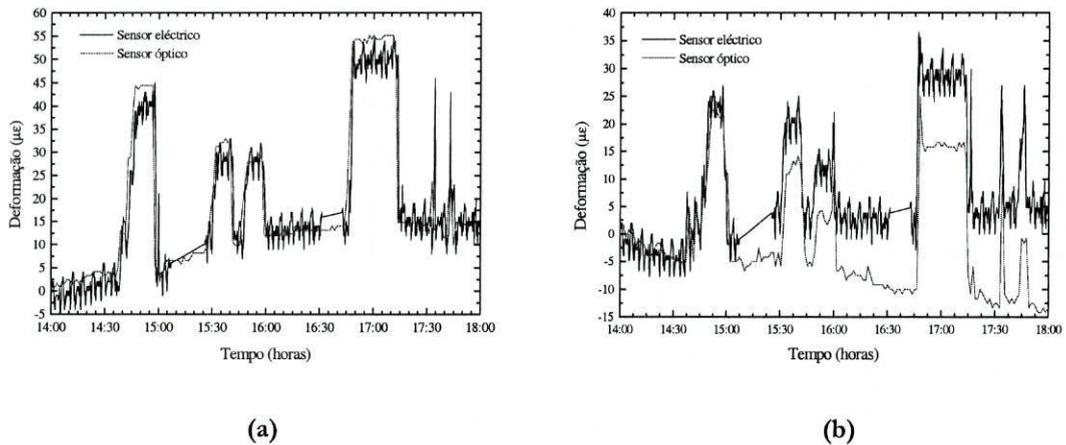


Figura 5.22 - (a) Resposta do sensor compósito embebido na secção S1. (b) Resposta do sensor de superfície instalado na diagonal metálica.

Na figura 5.22 (a) estão indicados os resultados fornecidos durante o ensaio pelos sensores ópticos e pelos sensores eléctricos (realizado nos mesmos moldes que aquele efectuado na ponte Luiz I) tendo sido estabelecida a compensação de temperatura para o caso do sensor compósito. O sensor instalado na diagonal metálica não possui referenciação de temperatura, tal como é evidenciado na figura 5.22(b). Durante todo o ensaio não foram registadas descontinuidades indicativas da formação de fendas internas. Novamente é de registar o excelente acordo entre os resultados obtidos pelos dois tipos de sensores.

O trabalho realizado no contexto da aplicação da tecnologia das redes de Bragg à monitorização estrutural em Engenharia Civil permite concluir do seu enorme potencial, sendo realista antever um crescente envolvimento desta tecnologia num futuro próximo. Vários aspectos condicionantes dessa aplicação foram abordados neste capítulo, como sejam o tipo de cabeças sensoras para utilização embebida ou externa, a multiplexagem dos sensores e a interrogação das assinaturas espectrais dos mesmos. Adicionalmente à medição de deslocamentos longitudinais, a diversificação do tipo de estudo para a medição transversal (correntemente designada como *flecha*), medição de curvatura e monitorização de estados de pressão interna nas estruturas são passíveis de serem concentradas neste tipo de tecnologia. No entanto, para a plena concretização deste último aspecto torna-se necessário a maturação dos sistemas/sub-sistemas constituintes deste tipo de sensores de fibra óptica, pelo que o aproveitar de oportunidades de serem realizados testes de campo adicionais se afigura de grande importância

Capítulo 6 - Conclusões

O conjunto de experiências e procedimentos realizados no âmbito deste trabalho teve, mais do que o alcance de resultados definitivos (porque em ciência nada é definitivo), o mérito de alertar para as dificuldades que, mesmo nas situações mais simples, podem ocorrer, quer no trabalho laboratorial, quer no trabalho de campo. Se bem que em muitas situações a objectividade de um trabalho esteja na concretização unívoca de uma solução para um problema, e não no levantamento de novos problemas decorrentes desse mesmo processo, é indiscutível que o conjunto de informação recolhido nesse intervalo é quase sempre extremamente valioso. Neste sentido, a primeira parte do presente trabalho exprime essa mesma situação. Com efeito, as duas arquitecturas estudadas para o projecto do sensor de medição simultânea da temperatura e da salinidade, totalmente em fibra óptica, estão ainda “amputadas” da sua real funcionalidade pelo facto da não realização dos testes em campo. Todavia, os resultados obtidos fornecem indicações claras da sua potencialidade ao nível da sensibilidade, gama de medição e flexibilidade do tipo de processamento. Apesar de não muito explorada, a possibilidade de implementar esquemas de detecção alternativos baseados unicamente na modulação da potência óptica é, como já foi anteriormente referido, extremamente atractiva em termos de custos totais do sistema.

A utilização de cabeças sensoras híbridas (*LPG's+FBG's*) do tipo daquela utilizada neste trabalho tem vindo a generalizar-se progressivamente. De facto, a vantagem que se consegue ao incluir no mesmo meio (fibra óptica) diferentes funcionalidades sem que seja necessária a extracção/reinjecção do sinal da fibra, aumenta significativamente a versatilidade e qualidade do sinal disponibilizado pelo sistema. Seguindo este raciocínio, parece natural que uma solução complementar às apresentadas para a medição simultânea da temperatura e da salinidade faça uso das vantagens intrínsecas da técnica que recorre ao uso de *LPG's* e a que incorpora o processo de ataque químico com HF de redes de Bragg. Em qualquer dos casos, há ainda um percurso a ser percorrido ao nível da integração destes sistemas sensores em ambientes naturais, nomeadamente ao nível da sua protecção, sem que o seu desempenho seja afectado. Este aspecto foi, com grande sucesso, ultrapassado no projecto do cabo submarino sensor incorporando redes de Bragg em fibra óptica e, igualmente (embora com algumas dificuldades remanescentes), na incorporação de cabeças sensoras nas estruturas de Engenharia Civil. Estes dois alvos de aplicação partilham entre si o facto de, apesar de serem dois ambientes “hóspedes” distintos para este tipo de sensores,

fornecerem um conjunto de resultados altamente encorajadores. Os resultados preliminares obtidos com o cabo óptico no ecossistema estudado forneceram um conjunto de indicações ao nível da monitorização distribuída da temperatura da água, as quais possibilitam a elaboração de estudos complementares ao nível da monitorização das correntes e, das condições de bio-sobrevivência das diferentes classes de espécies vegetais e piscícolas. Por seu lado, a implementação de um sistema paralelo dedicado à monitorização do teor da salinidade reforça os aspectos anteriores não só ao nível das condições físico-químicas proporcionadas, mas, de igual modo, ao nível da monitorização de correntes. Este último aspecto é consequência do facto do teor da salinidade ser um indicador do nível de condutividade eléctrica da água. De facto, a partir da monitorização do campo magnético gerado pelas correntes eléctricas que resultam do movimento das massas de água (presença iónica) é possível o registo de informação sobre a evolução dessas mesmas correntes de água no ecossistema.

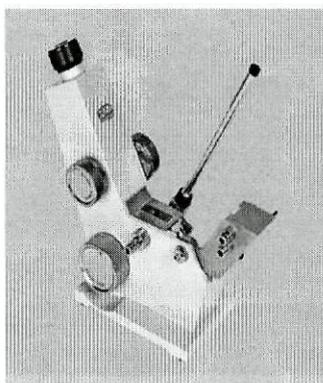
Relativamente ao segundo domínio de aplicação dos sensores de Bragg em fibra óptica presente neste trabalho, a monitorização de estruturas de Engenharia Civil, é possível serem destacados vários aspectos. Se bem que em nenhuma das duas estruturas onde estes sensores foram instalados seja feito um estudo geral da estrutura, os resultados obtidos confirmam o seu potencial de aplicação nestes ambientes. Esta característica deverá ser significativamente ampliada com a inclusão directa de uma ou várias fibras ópticas que integrem vários sensores em série (multiplexagem); desta forma é possível a obtenção de avaliações gerais do comportamento das estruturas. Em paralelo, a colocação deste tipo de sensores em materiais compósitos veio a revelar-se bastante eficiente, pelo que a adopção de medidas de pré-instalação em série e em obra destas cabeças sensoras, não só poderá desde muito cedo estar apta a fornecer um historial de evolução da própria construção, como estabelecer uma plataforma permanente de acesso a informação. A elevada imunidade e resistência à corrosão ambiental, simplicidade do sistema sensorial (material compósito/fibra óptica), carácter absoluto das medições, capacidade de medição simultânea e a dispensa de serem periodicamente efectuadas inicializações (“reset”) do conjunto sensores/sistema de leitura estabelecem mais-valias relativamente à tecnologia baseada nos sensores de resistência eléctrica. Estas características preconizam (à semelhança do que já se efectua em diversos países no mundo) a aplicação deste tipo de tecnologia a um conjunto mais alargado de estruturas em Portugal.

Apêndices

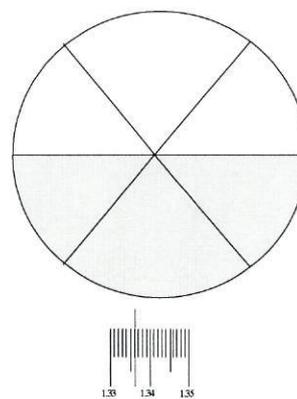
Apêndice 1- Refractómetro de Abbe

Neste apêndice é apresentada uma descrição sumária do princípio de funcionamento do refractómetro de Abbe utilizado no decurso deste trabalho, bem como do procedimento de elaboração das amostras de índice de refração utilizadas inicialmente para a calibração do sensor de salinidade. É, de igual modo, apresentado o conjunto de resultados obtidos para os coeficientes de *Cauchy* A,B e C.

O princípio de funcionamento do refractómetro de Abbe, correntemente utilizado em laboratório para a medição do índice de refração de líquidos, consiste, em termos gerais, na colocação de uma pequena quantidade do líquido que se pretende medir na superfície de separação entre dois prismas. Sobre o prisma de iluminação, construído com um vidro de elevado índice de refração, é incidida a luz da fonte interna. A situação limite que corresponde à situação típica derivada da lei de Snell para a refração da ocorrência de um ângulo crítico, limita a excursão angular a partir do qual não há mais luz transmitida para o segundo prisma (prisma colector). Torna-se deste modo possível a partir da recolha e ajuste da luz à saída do segundo prisma (efectuada por intermédio de um sistema de lentes do tipo telescópico), definir no campo de visão duas zonas de luminosidade distinta (semicírculos). Neste ponto, sendo o campo angular da luz transmitida condicionado pelo índice de refração do líquido na interface de separação entre os dois prismas, a calibração adequada do sistema óptico a jusante do prisma colector permite definir com bastante rigor o valor de índice de refração presente na amostra na região espectral da fonte interna.



(a)



(b)

Figura A.1.1 - (a) Refractómetro de Abbe utilizado; (b) ilustração do campo de visão do instrumento (o índice de refração a medir corresponde à situação de contraste máximo do retículo na intersecção dos eixos diagonais).

Solução de etileno-glicol

O procedimento adoptado para a determinação da quantidade volúmica de etileno glicol com vista à síntese dos vários índices de refração está indicado nas seguintes expressões empíricas (Estéban-1999).

$$n(T) = n_{H_2O}(T) + 0.111 \frac{V_{eth}}{V_{tot}};$$

$$\frac{n(T) - n_{H_2O}(T)}{0.111} = \frac{V_{eth}}{V_{tot}} = \frac{V_{eth}}{V_{eth} + V_{H_2O}} = V;$$

$$V(V_{eth} + V_{H_2O}) = V_{eth};$$

$$VV_{H_2O} = V_{eth}(1 - V);$$

$$\frac{V}{(1 - V)} V_{H_2O} = V_{eth};$$

$$V_{H_2O} = 0.1 l$$

Nº da amostra	n(T)	$V = V_{eth}/V_{tot}$	V_{eth} (ml)
1	1.332	0	0
2	1.333	9×10^{-3}	0.9
3	1.334	1.8×10^{-2}	1.8
4	1.335	2.7×10^{-2}	2.7
5	1.336	3.6×10^{-2}	3.6
6	1.337	4.5×10^{-2}	4.5
7	1.338	5.4×10^{-2}	5.4
8	1.339	6.3×10^{-2}	6.3
9	1.340	7.2×10^{-2}	7.2
10	1.341	8.1×10^{-2}	8.1
11	1.342	9.0×10^{-2}	9.0
12	1.343	9.9×10^{-2}	9.9

Coeficientes de Cauchy

$$n^2(\lambda) = 1 + A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$

Fórmula de Cauchy

Tabela dos valores experimentais medidos

Amostra	Índice de refração $\lambda=514\text{nm}$	Índice de refração $\lambda=589\text{nm}$	Índice de refração $\lambda=632\text{nm}$	A (s/dim)	B (nm^2)	C (nm^4)	Índice de refração $\lambda=1550\text{nm}$
I	1.338	1.333	1.331	0.742419	9796.88	7.49867E+8	1.3216
II	1.341	1.336	1.334	0.750348	9819.31	7.51488E+8	1.3246
III	1.343	1.338	1.336	0.755644	9834.26	7.52568E+8	1.3266
IV	1.345	1.340	1.338	0.760948	9849.22	7.53649E+8	1.3286
V	1.3465	1.3415	1.3395	0.764931	9860.43	7.5446E+8	1.3301
VI	1.348	1.343	1.341	0.768919	9871.75	7.5527E+8	1.3316

Apêndice 2 – Cablagem sensora (especificações)

A adoção de um cabo óptico dedicado que incorpore sensores de Bragg impõe que sejam cumpridos uma série de requisitos. Nos pontos seguintes são indicados os mais relevantes:

- Integração das fibras ópticas com os respectivos sensores de Bragg num tipo de construção adequada à medição de temperatura, garantindo a não transdução para as fibras de eventuais solicitações de ordem mecânica a que o cabo possa ficar sujeito, assim como mantendo as variações elásticas (contrações, dilatações) dos tubos dentro de determinados limites.
- Obter uma construção adequada às condições da instalação e ao tipo de solicitações a que o cabo vai estar sujeito, quer na fase da instalação, quer durante o tempo de operação: permanência em água salgada, esforços de tracção, de torção, de esmagamento, impacto, exposição a U.V., entre outros.
- Promover a protecção mecânica do núcleo óptico, sem contudo isolar as fibras do meio envolvente, neste caso a água, da qual se pretende medir a temperatura.

No cabo as fibras são alojadas num núcleo óptico de topologia *loose*, onde é assegurada uma completa estanquicidade, tanto longitudinal através do preenchimento de todos os espaços vazios com compostos de geleia, como transversal através da aplicação de uma fita de alumínio em forma de tubo, revestida em ambas as faces com uma camada de polímero que adere à bainha exterior em polietileno de alta densidade. Este cabo óptico é protegido mecanicamente através de uma armação de fios de aço isolados, torcidos em seu redor, mas não juntivos, de forma a permitir a circulação de água na proximidade das fibras. A figura A2.1 mostra a secção transversal do cabo referenciado como TON G1HERE L6U4ST. As características mecânicas do mesmo são sistematizadas na Tabela A2.1.

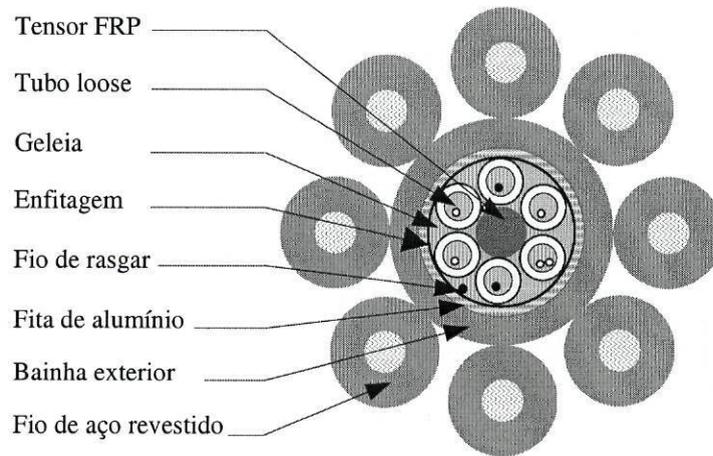


Figura A.2.1 - Desenho esquemático da secção transversal do cabo TON G1HERE L6U4ST

Peso	230 kg/km
Diâmetro exterior	15,5 mm
Raio mínimo de curvatura	380 mm
Tracção máxima	250 kgf

Tabela A2.1 - Características mecânicas do cabo óptico instalado no canal de Mira.

Mais recentemente uma inovação importante relativamente ao pré-protótipo do cabo óptico está em que no novo protótipo é efectuado o revestimento (*recoating*) da fibra na zona onde são impressas as redes de Bragg. A escrita das redes implica a necessidade de retirar o revestimento original de polímero que rodeia o vidro da fibra óptica já que esse material absorve fortemente a radiação ultravioleta. Naturalmente que nessa região a fibra fica com grande debilidade mecânica, sendo necessários procedimentos cuidados para que a fibra não parta no processo de cableamento. Recentes desenvolvimentos tecnológicos permitiram a construção de equipamentos que possibilitam repor esse revestimento. As figuras seguintes mostram esse equipamento, assim como uma fotografia da fibra na zona

onde é impressa a rede de Bragg antes de se lhe retirar o revestimento, após a fabricação da rede e logo depois de se ter efectuado o *recoating*.

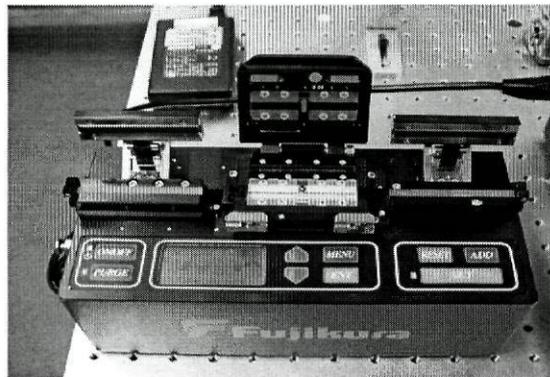


Figura A2.2 - Máquina que permite fazer o *recoating* das fibras ópticas

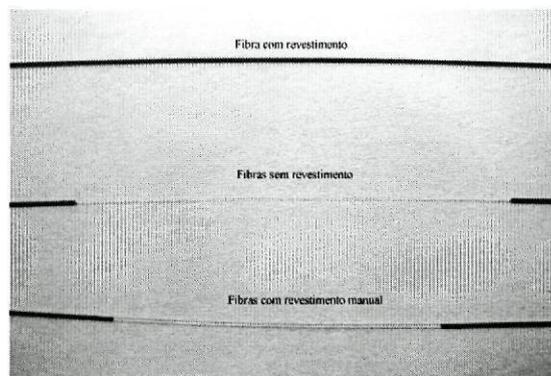


Figura A2.3 - Aspectos da fibra com e sem revestimento (condição necessária para a escrita das Redes de Bragg) e após o *recoating*.

Apêndice3-Comunicações decorrentes do trabalho realizado

- XI Seminário Ibérico de Química Marinha, D.A.Pereira, O.Frazão e J.L.Santos “*Tecnologia Óptica para a Monitorização de Sistemas Estuarinos e Costeiros*” .Universidade do Algarve – 2,4 Abril 2002.
- Conferência Nacional de Física 2002, D.A.Pereira, O.Frazão, V.Barbosa e J.L.Santos, “*Estudo do efeito de hidrogenização em fibras ópticas*”. Universidade de Évora – 6,10 Setembro 2002.
- Conferência Nacional de Física 2002, D.A.Pereira, O.Frazão, J.Ferreira, I.Dias e J.L.Santos “*Controlo de Tráfego em estruturas Cívís com recurso a sensores de Bragg em fibra óptica*”. Universidade de Évora – 6,10 Setembro 2002.
- Cruz,P.J, D.A.Pereira, O.Frazão, J.L.Santos e A.Güemes. “*Fiber optic sensing of steel bolts*” Eurostell – 3rd European Conference of Steel Structures, Coimbra 19-20 Setembro.
- D.A.Pereira, O.Frazão e J.L.Santos, “*Sensor for simultaneous measurement of temperature and salinity based on optical fibre gratings*”, submitted to *Optical Engineering*.

Referências

- [1] Udd.E Fiber; “*Fiber Optic Sensors-An Introduction for Engineers and Scientists*”, Jonh Wiley & Sons, Inc.(1989).
- [2] Murtaza.G and J.M.Senior, “*Referenced Intensity based optical fiber sensor*”, *International Journal of Optoelectronics*, vol.9, pp-339-348, (1994).
- [3] Ferreira.L.A , “*Interferometria e processamento de sinal em sensores de fibra óptica*”, Tese de Mestrado, FCUP, Universidade do Porto (1994).
- [4] Hecht.E, “*Óptica*”, Edições Calouste Glubenkian, (1991).
- [5] Blake.J.N, S.U.Huang, B.Y.Kim and H.J.Shaw, “*Strain effects on highly elliptical core two-mode fibers*”, *Opt.Lett.*12, pp-732-734, (1987).
- [6] Varnham.M.P., A.J.Barlow, D.N.Payne and K.Okamoto, “*Polarimetric strain gauges using high birefringence fibres*”, *Electron.Lett.*19, pp-699-700, (1983).
- [7] Bock.W.J, “*High hydrostatic pressure effects of highly birefringent optical fibers*”, *J.Lighwave.Technol.*7, pp-1279-1283, (1989).
- [8] Ashcroft.N.W and N.D.Mermin, “*Solid State Physics*”, Saunders College Publishing, (1976).
- [9] Yariv.A, “*Quantum Electronics*”, John Wiley & Sons, 3rd edition, (1989).
- [10] Horiguchi.T, T.Kurashima and Y.K.Koyamada, “*Brillouin characterization of fiber strain in bent slot-type optical fiber cables*”, *J.Lighwave.Technol.*10, pp-1196-1201, (1992).
- [11] Kurashima.T, “*Distributed temperature sensing using stimulated Brillouin scattering optical silica fibers*”, *Opt.Lett.*15, pp-1038-1040, (1990).
- [12] Keiser.G, “*Optical Fiber Communications*”, McGraw Hill International Editions, 2nd edition, (1989).
- [13] Jackson.D.A., A.Dandridge and S.K.Sheem, “*Measurement of small phase phase shifts using single mode optical fibre interferometer*”, *Opt.Lett.*5, pp-139-141, (1980).
- [14] Koo.K.P, A.B.Tveten and A.Dandridge, “*Perfomance stabilisation scheme for fibre optic interferometers using (3x3) fibre directional couplers*”, *Appl.Phys.Lett.*41, pp-616-618, (1982).
- [15] Erdogan.T, “*Fiber Grating spectra*”, *J.Lighwave.Technol.*15, pp-1277-1294, (1997).
- [16] Meltz.G, W.W.Morey and W.H.Glenn, “*Formation of Bragg gratings in optical fibre by a transverse holographic method*”, *Opt.Lett.*14, pp-823-825, (1989).
- [17] Hill.K.O, B.Malo, F.Bilodeau, D.C.Johnson and J.Albert, “*Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fibre by UV exposure through a phase mask*”, *Appl.Phys.Lett.*32, pp-1035-1037, (1993).
- [18] Cole.M.J, W.H.Loh, R.I.Laming, M.N.Zervas and S.Barcelos, “*Moving fibre/phase mask-scanning beam technique for enhanced flexibility in produced fibre gratings with uniform phase mask*”, *Electron.Lett.*31, pp-1488-89, (1995).

- [19] Dockney. M.L, S.W.James and R.P.Tatam, “*Fibre Bragg gratings fabricated using a wavelength tunable laser source and a phase mask based interferometer*”, *Meas.Sci.Technol*, 7, pp-445-448, (1996).
- [20] Vengsarkar.A.M, P.J.Lemaire, J.B.Judkins, V.Bhatia, T.Erdogan and J.E.Sipe, “*Long-period fiber gratings as band-rejection filters*”, *J.Lighwave.Technol*.14, No1, pp-58-65, (1996).
- [21] Rego.G, O.Okhotnikov and E.Dianov, “*High-temperature stability of long-period fiber gratings produced using an electric arc*”, *J.Lighwave.Technol*.19, No10, pp-1574-1579, (2001).
- [22] Xuewen.S, L.Zhang and I.Bennion, “*Fabrication and characterization of ultra long period fibre gratings*”, *Opt.Commun*.203, pp-277-281, (2002).
- [23] Nye, S.F, “*Physical Properties of Crystals*”, Oxford Press London, (1954).
- [24] Butter.C.D and G.P.Hocker, “*Fiber optics strain gauge*”, *Appl.Opt*.17, pp-2867-2869, (1978).
- [25] Sirkis.J.S, “*Unified Approach to phase-strain temperature mode for smart structure interferometric optical fiber sensors: partII- applications*”, *Opt.Eng*. 32(4), pp-763-773, (1993b).
- [26] Sirkis.J.S, “*Unified Approach to phase-strain temperature mode for smart structure interferometric optical fiber sensors: partI- development*”, *Opt.Eng*. 32(4), pp-752-763, (1993a).
- [27] Alavie.A.T, R.Maaskant, R.Stubbe, A.Othonos, M.Ohn, B.Sahlgren and R.M.Measures, “*Characterization of fibre grating sensors and their relation to manufacturing techniques*”, *SPIE* 2444, pp-528-535, (1995).
- [28] Lo.Y.L and J.S.Sirkis, “*Simple method to measure temperature and axial strain simultaneously using one in-fiber Bragg-grating sensor*”, *Smart.Struct.Mat*, SPIE 3042, pp-237-243, (1997).
- [29] Xu.M.G, J.L.Archambault, L.Reekie and J.P.Dakin, “*Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors*”, *Electron.Lett*, 29, pp-1510-1511, (1994).
- [30] Cavaleiro.P.M, F.M.Araújo, L.A.Ferreira, J.L.Santos and F.Farahi, “*Simultaneous measurement of strain and temperature using Bragg gratings written in Germanosilicate and Boron-codoped Germanosilicate fibers*”, *IEEE Photon.Technol.Lett*.11, No12, pp-1635-1637, (1999).
- [31] Kashyap.R, “*Photosensitive optical fibers: devices and applications*”, *Optical Fiber Technol*.1, pp-17-24, (1994).
- [32] Erdogan.T. V.Mizrahi, P.J.Lemaire and D.Monroe, “*Decay of ultraviolet~induced fiber Bragg gratings*”, *J.Appl.Phys*.76, pp-73-80, (1994).
- [33] Araújo.F.M, “*Redes de Bragg em fibra óptica*”, Tese de Doutorado, FCUP, Universidade do Porto, (1999).
- [34] Beales.K.J, D.M.Cooper and J.D.Rush, “*Increased attenuation in optical fibres caused by diffusion of molecular hydrogen at room temperature*”, *Electron.Lett*, 19, pp-917-919, (1983).
- [35] Noguchi.K, N.Shibata, N.Uesugi and Y.Negishi, “*Loss increase for optical exposed to hydrogen atmosphere*”, *J.Lighwave.Technol*, Vol LT-3, No2, pp-236-243, (1985).
- [36] Fox.M, S.J.Standard-Powell, “*Attenuation changes in optical fibres due to hydrogen*”, *Electron.Lett*.19, pp-916-917, (1983).
- [37] Brice.B.A, M.Hawler, “*A differential refractometer*”, *J.Opt.Soc.Amer*, vol 4, pp-1033-1037, (1951).
- [38] Minato.H, Y.Kakui, A.Nishimoto and M.Nanjo, “*Remote refractive index difference for salinity sensor*”, *IEEE Transactions on Instrum.and Measur*.vol 38, No 2, pp-608-612, (1989).

-
- [39] Domanski.A.W., M.Roszko and Swillo, “*Compact optical fiber refractive differential sensor for salinity measurements*”, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Canada, (1997), pp-953-956.
 - [40] Zhao.H and Y.Liao, “*Novel optical fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and salinity*”, Sens.Actuators B, 4298 (article in press), (2002)
 - [41] Tubb.A, F.P.Payne, R.B.Millington and C.R.Lowe, “*Single-mode optical fibre surface plasma wave chemical sensor*”, Sens.Actuators B, 41, pp-71-79, (1997).
 - [42] Esteban.O, M.C.Navarrete, A.G.Cano and E.Bernabeu, “*Measurement of the degree of salinity of water with a fiber-optic sensor*”, Appl.Opt, No 25, vol 38, pp-5267-5271, (1999).
 - [43] Takeo.T and H.Hattori, “*Silica glass photorefractometer*”, Appl.Opt, No 1, vol 31, pp-44-50, (1992).
 - [44] Snyder.A.W and J.D.Love, “*Optical waveguide theory*”, Chapman and Hall London, (1983).
 - [45] Adams.M.J., “*An introduction to optical waveguides?*”, John wiley & Sons, (1981).
 - [46] Lee.B.H, Y.Liu, S.B.Lee and S.S.Choi, “*Displacements of the resonant peaks of a long period fiber grating induced by a change of ambient refractive index?*”, Opt.Lett.,No 23, vol 22, pp-1769-1771, (1997).
 - [47] Duhem.O, J.F.Henniot, M.Warenghem and M.Douay, “*Demonstration of long period-grating efficient couplings with an external medium of refractive index higher than that of silica*”, Appl.Opt, No 31, vol 37, pp-7223-7228, (1998).
 - [48] Bhatia.V and A.S.Vengsarkar, “*Optical fiber long-period grating sensors*”, Opt.Lett.,No 9, vol 21, pp-692-694, (1996).
 - [49] Patrick.H.J, G.M.Williams, A.D.Kersey, J.R.Pedrazzani and A.M.Vengsarkar, “*Hybrid fiber Bragg grating/ long period fiber grating sensor for strain/ temperature discrimination*”, IEEE Photon.Technol.Lett.,No 9, vol 8, pp-1223-1225, (1996).
 - [50] Shu.X, B.A.L.Gwandu, Y.Liu and I.Bennion, “*Sampled fiber Bragg grating for simultaneous refractive index and temperature measurement*”, Opt.Lett.26. No11, pp-774-776, (2001).
 - [51] Frazão.O, R.Romero, G.Rego, P.V.S.Marques, H.M.Salgado and J.L.Santos, “*Sampled fiber Bragg grating sensors for simultaneous strain and temperature measurement*”, Electron.Lett.38, pp-693-694, (2002).
 - [52] Gowar.J, “*Optical communications systems*”, 2nd edition, Prentice Hall, (1992).
 - [53] Gwandu.B.A.L, X.Shu, T.D.P.Allsop, W.Zhang, L.Zhang and I.Bennion, “*Simultaneous refractive index and temperature measurement using cascade long-period grating in double-cladding fibre*”, Electron.Lett.,38, pp-695-696, (2002)
 - [54] Higuera.J.M.L (Editor), “*Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*”, John Wiley & Sons, (2002).
 - [55] Asseh.A, S.Sandgren, H.Ahlfeldt, B.Sahlgren and G.Edwall, “*Fibre Optical Bragg Refractometer*”, Fibre and Integrated Optics, 17, pp-51-62, (1998).
 - [56] CRC *Handbook of Chemistry and Physics* (3rd Electronic Edition)
 - [57] Dias.J.M, J.F.Lopes and I. Dekeyser, “*Hydrological characterisation of Ria de Aveiro, Portugal, in early Summer*”, Oceanologica Acta, 22, No5, pp-473-485, (1999).
-

-
- [58] Dias.J.M, J.F.Lopes and I.Dekeyser, “*Tidal Propagation in Ria de Aveiro Lagoon, Portugal*”, Physics and Chemistry of the Earth, 25, No4, pp- 369-374, (2000).
 - [59] Moerman.W, L.Taerwe, W.De Waele, J.Degrieck and R.Baets, “*Applications of optical fibre sensors for monitoring civil engineering structures*”, Structural Concrete.2, No 1, pp-63-71, (2001)
 - [60] Hayes.S, T.Liu, D.Brooks, S.Monteith, B.Ralph, S.Vickers and C.F.Fernando, “*In situ self-sensing fibre reinforced composites*”, Smart Mater.Struct.6, pp-432-440, (1997).
 - [61] Kang.H.K, J.W.Park, C.Y.Ryu, C.S.Hong and C.G.Kim, “*Development of fibre optic ingress/egress methods for smart composite structures*”, Smart Mater.Struct.9, pp-149-156, (2000).
 - [62] Okabe.Y, S.Yashiro, T.Kosaka and N.Takeda, “*Detection of transverse cracks in CFRP composites using embedded fiber Bragg grating sensors*”, Smart Mater.Struct.9, pp-832-838, (2000).
 - [63] Dasgupta.A, Y.Wan and J.S.Sirkis, “*Prediction of resin pocket geometry for stress analysis of optical fibers embedded in laminated composites*”, Smart.Mater.Struct I, pp 101-107, (1992).
 - [64] Measures.R.M, N.D.Glossop, J.Lymer, M.LeBlanc, J.West, S.Dubois, W.Tsaw and R.Tennyson, “*Structurally integrated fiber optic damage assessment systems for composite materials*”, Appl.Opt, vol 28, pp-2626-2633, (1989).
 - [65] Measures.R.M, “*Structural Monitoring with fiber optic technology*”, Academic Press (2001).
 - [66] Inaudi.D, A.Elamari, L.Pflug, N.Gisin, J.Breguet and S Vurpillot, “*Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil-engineering structures*”, Sens.Actuators A, 44, pp-125-130, (1994).
 - [67] Kersey.A.D, M.A.Davis, H.J.Patrick, M.LeBlanc, K.P.Koo, C.G.Askins, M.A.Putnam and E.J.Friebele, “*Fiber grating sensors*”, J.Lighwave.Technol.15, pp-1442-1463, (1997).
 - [68] Kersey.A.D, T.A.Berkoff and W.W.Morey, “*Multiplexed fiber Bragg grating sensor –system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter*”, Opt.Lett.18, pp-1370-1372, (1993).
 - [69] Ribeiro.A.B.L, “*Esquemas de multiplexagem para sensores em fibra óptica*”, Tese de Douturamento, FCUP, Universidade do Porto (1996).
 - [70] Ho.H.L, W.Jin, C.C.Chan, Y.Zhou and X.W.Wang, “*A fiber Bragg grating for static and dynamic measurands*”, Sens.Actuators A, 96, pp-21-24, (2000).