



Centro de Competências de Ciências Exactas e de Engenharia

Sensores de Pressão em Fibra Óptica para o Estudo dos Fenómenos da Percolação da Água em Solos

Norberto Bruno Serrão de Freitas

Novembro 2010



Centro de Competências de Ciências Exactas e de Engenharia

Sensores de Pressão em Fibra Óptica para o Estudo dos Fenómenos da
Percolação da Água em Solos

Norberto Bruno Serrão de Freitas

*Dissertação submetida à Universidade da Madeira para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Telecomunicações e Redes*

Novembro 2010

Dissertação realizada sob a supervisão de

Professor Doutor José Manuel Rocha Teixeira Baptista

Professor Associado do Centro de Competências de Ciências Exactas e de Engenharia

“Em todas as coisas, o sucesso depende de preparação prévia.”

(Confúcio)

Sumário

Dada a necessidade de obtermos sistemas monitorizados com elevada precisão, de grande durabilidade e resistentes às condições atmosféricas, surgiu a possibilidade de aplicação das fibras ópticas como sensores para monitorização de pressão.

Nesse contexto, as fibras “hetero-core” (fibra óptica composta por uma fibra multimodo entre duas fibras ópticas monomodo) e a utilização de lentes GRIN (“GRaded INdex”) em conjunto com superfícies reflectoras permitem a determinação da pressão e são objecto de estudo desta dissertação.

Em termos de aplicação, o objectivo principal desta tese de mestrado foi de proporcionar o projecto e desenvolvimentos da medida de pressão em 48 pontos para um tanque de estudo dos fenómenos de percolação da água nos solos e que é pertencente à Secção de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Inicialmente, foi caracterizado um sistema contendo uma fibra “hetero-core” à qual foi aplicada uma curvatura, com auxílio de uma carruagem micrométrica. Este sistema permitiu a simulação do mesmo efeito de aplicação de pressão à fibra “hetero-core”.

Na configuração seguinte, usou-se um OTDR (“Optical Time Domain Reflectometer”) para visualização e registo das perdas encontradas durante o processo de dobrar e esticar da fibra “hetero-core”. Ao longo deste registo, várias configurações foram testadas até ser encontrada a cabeça sensora com melhor comportamento para monitorizar a pressão.

A multiplexagem foi conseguida ao colocar dois sensores em série, sendo cada um deles constituído por uma fibra “hetero-core” colocada no fundo de um tubo de água disposto verticalmente. Com a adição da água no tubo de água, a curvatura na fibra “hetero-core” aumentava, notando-se claramente que as perdas também subiam. Os resultados obtidos nesta configuração foram bastante satisfatórios permitindo a independência entre os dois sensores dispostos em série.

Posteriormente, foi testada uma nova configuração sensora, o sensor de fibra óptica para monitorização de pressão foi construído com recurso a uma lente GRIN e uma superfície reflectora. Esta lente, disposta diante de um espelho, permitiu emitir e captar luz de um determinado comprimento de onda devido à reflexão do sinal luminoso no espelho. Com

sucessivos incrementos, afastou-se e aproximou-se a lente ao espelho, registando-se e observando-se as perdas de potência obtidas com auxílio do OTDR.

Também para esta configuração foi testada a multiplexagem de vários sensores, tendo sido utilizadas as seguintes opções: um acoplador de 2:1; um acoplador 4:1 e um comutador óptico. Verificou-se que a utilização de um comutador óptico é o melhor caso para a monitorização de pressão de múltiplos sensores. A multiplexagem com recurso ao comutador foi possível, uma vez que permitia a medição independente de cada sensor de pressão num determinado tempo. Com este resultado, é possível monitorizar 48 sensores com recurso ao OTDR, multiplexados temporalmente.

Toda esta implementação prática da dissertação foi realizada nas instalações da Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos no INESC Porto, onde foram caracterizados e estudados sensores com diferentes características que poderão ser lidas neste documento. A componente teórica foi efectuada na Universidade da Madeira.

Summary

Given the need of obtaining monitored systems with high precision, great durability and water resistant; the possibility of using optical fibers as pressure monitoring sensors arose.

In this context, the “hetero-core” fibers (optical fiber composed of a multimode fiber in between two single mode optical fibers) and the use of GRIN lens (“GRaded Index”) together with reflective surfaces allows us the study of pressure, being that the subject studied in this thesis.

In terms of application, the main objective of this thesis was to provide a measure of pressure at 48 points for a tank, to study the water percolation in soils phenomena, which is owned by the Geotechnical Section of the Department of Civil Engineering, Engineering Faculty of Porto University. Initially, we characterized a system containing a “hetero-core” fiber, to which we applied a curvature, with the aid of a micrometer carriage. This system permitted a simulation with the same effect when applying pressure to the “hetero-core” fiber.

In the next setup, we used an OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*) for monitoring and the recording of losses encountered during the process of bending and stretching of the hetero-core fiber. During this process, various configurations were tested until the sensor head with best performance to monitor pressure was found.

Multiplexing was achieved by placing two sensors in series, each of which consisted by a hetero-core fiber placed in a vertical disposition at the bottom of a water pipe. With the addition of water in the water pipe, the bend in the hetero-core fiber builds up, resulting in an uprise of losses. The results of this configuration were satisfactory, allowing the independence between the two sensors arranged in a series disposition.

The next step was to test a new configuration, where the fiber optic sensor for monitoring pressure was built using a GRIN lens in conjunction with a reflective surface. This lens placed in front of a mirror allowed to emit and capture light with a specific wavelength due to the reflection of the light signal in the mirror.

With successive increments, the lens was moved closer and farther away from the mirror, registering and monitoring power losses obtained with the aid of the OTDR.

Also for this configuration, multiplexing with multiple sensors was tested using the following options: a coupler 2:1; a coupler 4:1 and an optical switch. It was found that the use of an optical switch is the best case for pressure monitoring of multiple sensors. Multiplexing with the use of an optical switch was possible, as it allowed the independent measurement of each pressure sensor in a given time. With this result, it's possible to monitor 48 sensors with the aid of the OTDR, temporally multiplexed.

All practical implementation of this thesis, sensors with different characteristics that can be read in this document was conducted at the premises of the Optoelectronics and Electronic Systems Unit at INESC Porto. The theoretical component was conducted at the University of Madeira.

Palavras-Chave

Sensores de Fibra óptica

Sensores de Pressão

Fibra “hetero-core”

Lentes GRIN

Percolação

Agradecimentos

Neste espaço gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos pelas contribuições e incentivo que me foram dados ao longo da realização desta tese.

Ao Professor Doutor José Manuel Baptista pela oportunidade que me ofereceu em trabalhar no INESC Porto, assim como ter-me proposto este projecto, pelo seu sincero apoio, pela sua confiança nas minhas capacidades e a rápida disponibilidade para discutirmos ao longo deste tempo todo este trabalho.

Ao Professor Doutor Paulo Vicente Marques por ter-me acolhido no INESC Porto na Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos (UOSE).

Ao Professor Doutor José Luís Santos pelo seu apoio e incentivo nos trabalhos desenvolvidos. Pelas oportunidades que me foram concedidas enquanto permaneci no INESC Porto, nomeadamente a presença no SEON'2010, Ciência 2010 e EWOFs 2010.

Ao Doutor Orlando Frazão pelo seu apoio em laboratório, pela sua experiência e domínio na área da Optoelectrónica assim como na ajuda na realização de alguns procedimentos.

À secção de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em coordenação com o INESC Porto para o desenvolvimento do tanque para estudo dos sensores de pressão pela oportunidade de conhecer toda a logística por detrás do tanque de estudo da percolação existente nos seus laboratórios.

Ao INESC Porto pelas instalações e equipamentos dispostos para que fosse possível a realização deste trabalho.

À Universidade da Madeira, e aos docentes pela formação pessoal e académica que me foi proporcionada ao longo destes anos. Com especial agradecimento ao Professor Doutor Amândio Azevedo, ao Professor Doutor Morgado Dias e ao Professor Doutor Luís Gomes.

Aos colegas da Universidade da Madeira e do INESC Porto pela amizade, apoio, colaboração, partilha de conhecimento e experiência. O especial agradecimento à Luísa Mendonça pela amizade e ajuda assim que cheguei ao INESC Porto.

Aos meus pais, irmã e namorada pelo apoio, cumplicidade, carinho, compreensão e encorajamento que sempre me deram. Em particular aos meus pais pela sua presença e empenho na minha formação pessoal, académica e na educação ao longo deste tempo.

Índice

Índice.....	11
Índice de Figuras	13
Glossário.....	17
1. Introdução.....	18
Motivação	18
Objectivos da dissertação	19
Organização da Tese.....	19
2. Fundamento Teórico	21
2.1. Sensores de fibra óptica.....	21
2.1.1 Classificação pelo processo de modulação/desmodulação	22
2.1.2 Classificação por modo de funcionamento	24
2.2. Cabeças Sensoras	25
2.2.1 Fibra “hetero-core”	26
2.2.2 Lentes GRIN em conjunto com superfícies reflectoras	30
2.3. Equipamentos	36
2.3.1. OTDR.....	36
2.3.2. Medidor de Potência – PM 212	40
2.3.3. Fonte óptica – LS-420.....	41
2.4. Percolação	42
3. Sensor de pressão baseado em fibra “hetero-core”	46
3.1. Implementação	46

3.2. Utilização da fonte óptica e de um medidor de potência	49
3.3. Utilização de um equipamento de medida - OTDR	53
3.3.1. Perdas em curvatura	54
3.3.2. Medição de pressão através de coluna de água.....	56
3.3.3. Coluna de água com sensores multiplexados.....	61
4. Sensor de pressão baseado em lentes GRIN em conjunto com superfícies reflectoras	64
4.1. Alinhamento	64
4.2. Teste de sensor único baseado numa lente GRIN e respectiva superfície reflectora .	67
4.3. Multiplexagem de sensores baseados em lentes GRIN e superfícies reflectoras.....	69
4.3.1. Acoplador 2:1.....	69
4.3.2. Acoplador 4:1.....	72
4.3.3. Comutador Óptico.....	73
5. Conclusões	78
Bibliografia.....	82
Anexos	87

Índice de Figuras

Fig. 2. 1 - Princípio de funcionamento de um sensor de intensidade baseado na reflexão de um espelho.	23
Fig. 2. 2 - Sensor extrínseco.	24
Fig. 2. 3 - Sensor intrínseco.	24
Fig. 2. 4 - Exemplo de uma configuração interrompida.	25
Fig. 2. 5 - Exemplo de uma configuração topo usando uma lente GRIN em conjunto com uma superfície reflectora.	26
Fig. 2. 6 - Fibra “hetero-core” com segmento L a verde. a) Fibra com núcleo multimodo. b) Fibra com núcleo monomodo.	26
Fig. 2. 7 - Aplicação de uma fibra “hetero-core” num trinco de uma porta [29].	29
Fig. 2. 8 - Aplicação de uma fibra “hetero-core” numa luva [28,30].	30
Fig. 2. 9 - a) Lente convencional. b) Lente GRIN.	32
Fig. 2. 10 - Distribuição do índice parabólico da lente GRIN.	32
Fig. 2. 11 – Representação da medida de <i>pitch</i> numa lente [42].	33
Fig. 2. 12 - Lente GRIN de 0,25 <i>pitch</i>	33
Fig. 2. 13 - Lente GRIN de 0,23 <i>pitch</i>	34
Fig. 2. 14 - Lente GRIN com 2 variantes. a) Saída colimada da luz. b) Foco após a saída da lente.	34
Fig. 2. 15 - Lente GRIN de 0,29 <i>pitch</i>	35
Fig. 2. 16 – a) Espelho com primeira superfície reflectora. b) Espelho com segunda superfície reflectora.	36
Fig. 2. 17 - Possíveis resultados gráficos no OTDR [51,52].	38
Fig. 2. 18 - Exemplo de uso da função Multi-Trace do OTDR num sensor com uma lente GRIN - A amarelo estado inicial e a vermelho estado final.	39
Fig. 2. 19 - Representação com/sem o reflector APC.	40
Fig. 2. 20 - Medidor de potência PM – 212 [55].	40
Fig. 2. 21 – Conectores usados no PM – 212. a) FC. b) LC. c) SC. d) TE-ADP-250. e) TE-ADP – 125 [55].	41
Fig. 2. 22 - Fonte Óptica LS – 420 [56].	41
Fig. 2. 23 - Tanque para estudo da percolação da água [57].	43
Fig. 2. 24 - Rede plástico para impedimento de passagem de detritos [57].	44

Índice de Figuras

Fig. 2. 25- a) Sistema actual de medição da pressão no tanque - Vista posterior. b) Sistema de fixação dos tubos [57].	45
Fig. 3. 1 - Esquema de uma fibra “hetero-core” com segmento L em fibra multimodo.	47
Fig. 3. 2 – a) Distâncias e medidas de fabrico das fibras “hetero-core”. b) Fibra “hetero-core” visualizada no microscópio electrónico.	48
Fig. 3. 3 - Esquema de montagem para o processo de curvatura e estiramento da fibra “hetero-core”.	49
Fig. 3. 4 - Esquema de ligação entre a fonte óptica e medidor de potência.	49
Fig. 3. 5 - Montagem da fibra “hetero-core” em conjunto com a carruagem micrométrica.	50
Fig. 3. 6 - Potência recebida para comprimento de onda de 1550 nm com um segmento L de 2 mm.	51
Fig. 3. 7 - Potência obtida para o segmento $L=3$ mm com um comprimento de onda de 1550 nm.	52
Fig. 3. 8 – Potência recebida para o comprimento de onda de 1550 nm com um segmento L de 4 mm.	52
Fig. 3. 9 - Potência recebida para o comprimento de onda de 1550 nm com um segmento L de 5 mm.	53
Fig. 3. 10 - Esquema de montagem para medição das perdas na fibra “hetero-core”.	54
Fig. 3. 11 - Esquema de montagem para cálculo da curvatura.	54
Fig. 3. 12 - a) Fibra esticada com nível de referência em 63 mm. b) Fibra dobrada com valor de $h=60$ mm.	55
Fig. 3. 13 - Perdas em função da curvatura para o segmento $L= 3$ e $L = 4$ e $L = 5$ mm.	55
Fig. 3. 14 - Esquema de montagem e medidas aplicadas para a coluna de água. a) Tubo de água. b) Medidas do tubo em acrílico.	57
Fig. 3. 15 - Configuração e implementação da coluna de água.	57
Fig. 3. 16 - a) Vista geral da configuração. b) Fibra “hetero-core” próximo da membrana com segmento L colorido a vermelho.	58
Fig. 3. 17 - a) Tubo em acrílico com adição de água. b) Curvatura exercida quando a altura da água é igual a 290 mm.	59
Fig. 3. 18 - Segmento $L = 4$ mm com as diferentes distâncias das hastes.	59
Fig. 3. 19 - Relação entre a pressão e as perdas para distância de hastes de 70 mm.	60
Fig. 3. 20 - Esquema de montagem para a multiplexagem de sensores com fibra “hetero-core” com duas colunas de água.	61
Fig. 3. 21 - Vista geral da configuração dos sensores em série. b) Duas colunas de água e hastes colocadas.	62

Fig. 3. 22 - a) Sensor 1 sujeito a pressão devido ao aumento da coluna de água; Sensor 2 imobilizado. b) Sensor 2 sujeito a pressão devido ao aumento da coluna de água; Sensor 1 imobilizado.....	62
Fig. 4. 1 - Esquema de montagem entre a lente GRIN com o espelho.	65
Fig. 4. 2 – Correspondência entre a potência e a deformação da membrana. a) Potência referente ao afastamento da lente GRIN em função do deslocamento. b) Previsão da deformação da membrana no orifício do tanque.	66
Fig. 4. 3 - Esquema de montagem do OTDR, lente GRIN e o espelho.	67
Fig. 4. 4 - Exemplo do método de obtenção das perdas da lente GRIN no espectro do OTDR.	67
Fig. 4. 5 - a) Lente GRIN e OTDR. b) Lente GRIN em frente ao espelho.	68
Fig. 4. 6 – Perdas referentes ao afastamento da lente GRIN em função do deslocamento.	68
Fig. 4. 7 - Esquema de montagem com acoplador de 2:1.	69
Fig. 4. 8 - Multiplexagem de sensores com recurso a lentes GRIN e superfícies reflectoras. a) Colocação do sensor 1 próximo ao espelho. b) Setas indicam o sensor 1 e sensor 2 em conjunto com as respectivas carruagens.	70
Fig. 4. 9 – Resultados do OTDR com acoplador 2:1 quando sensor 1 é deslocado.	70
Fig. 4. 10 - Resultados do OTDR com acoplador 2:1 quando o sensor 2 é deslocado.	71
Fig. 4. 11 - Perdas obtidas quando o sensor 2 efectuou nos dois sentidos o deslocamento de 0 a 3,5 mm, enquanto o sensor 1 permaneceu imobilizado.....	71
Fig. 4. 12 - Esquema de montagem com o acoplador de 4:1.	72
Fig. 4. 13 - Montagem experimental dos 4 sensores usados no acoplador de 4:1.	72
Fig. 4. 14 - Resultado obtido no OTDR quando o sensor 1 encontrava-se em deslocamento e os restantes sensores permaneciam imóveis. O traço a vermelho corresponde à situação inicial de mínima perda e o traço a amarelo corresponde à situação final de máxima perda.	73
Fig. 4. 15 - Esquema de montagem para um sensor e uma superfície reflectora.	74
Fig. 4. 16 - Comparação das perdas em cada porta do comutador.	74
Fig. 4. 17 - Esquema de montagem do comutador óptico para dois sensores baseados em lentes GRIN e superfícies reflectoras.	75
Fig. 4. 18 - Independência dos sensores. a) Sensor 1 imposto a deslocamento; Sensor 2 imobilizado. b) Sensor 2 imposto a deslocamento; Sensor 1 imobilizado.....	75
Fig. 4. 19 - Resultado obtido no OTDR quando o sensor 1 se encontrava afastado e próximo do espelho. Linha vermelha indica sensor afastado do espelho, linha amarela sensor próximo do espelho.	76

Índice de Figuras

Fig. 5. 1 - Vista geral do novo tanque de testes e respectivas medidas.....80

Fig. 5. 2 – a) Abertura dos orifícios de teste no fundo do tanque. b) Orifício conectado ao tubo em borracha para medição de referência da pressão hidrostática..... 81

Glossário

APC – *Angled Polish Connectors*

CD – *Compact Disc*

CPU – *Central Processing Unit*

FBG – *Fiber Bragg Gratings*

FC/PC – *Fixed Connector/Physical Connector*

GRIN – *GRaded INdex*

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

LC – *Little Connector*

LED – *Light Emitting Diode*

NA – *Numerical Aperture*

OTDR – *Optical Time Domain Reflectometer*

PCMCIA – *Personal Computer Memory Card International Association*

SC – *Subscriber Connector*

ST – *Straight Tip*

USB – *Universal Serial Bus*

1. Introdução

Em 1854, *John Tyndahl* deu o primeiro passo na descoberta do princípio fundamental da reflexão interna total. *Tyndahl* descobriu que um feixe de luz transmitido ao longo de um jacto de água propagava-se por dentro do jacto de água de acordo com o princípio da reflexão interna total. Em 1952, o físico *Narinder Kapany* descobriu a fibra óptica e desde então o princípio de reflexão interna total foi aplicado nas fibras ópticas para a propagação de luz [1].

A fibra óptica é constituída por um núcleo de material dieléctrico e por uma bainha também de material dieléctrico com um índice de refração ligeiramente inferior ao do núcleo. Existem no mercado dois tipos de fibras ópticas principais, as fibras monomodo e as fibras multimodo. Estas últimas têm um núcleo maior ($> 50 \mu\text{m}$), propagam vários modos de propagação, e são classificadas em índice gradual e índice em degrau. As fibras monomodo devido à pequena dimensão do núcleo ($< 10 \mu\text{m}$), suportam um modo de propagação e são caracterizadas por uma maior capacidade de transmissão [2].

A fibra óptica pode ser usada para o envio de grandes quantidades de informação a grandes distâncias, como é o caso das ligações transatlânticas. Por outro lado e devido às suas propriedades, é possível a sua aplicação em sistemas sensores, que permitem, entre outras aplicações, a monitorização de grandezas físicas como a curvatura, a temperatura, a pressão, a deformação, etc., em ambientes remotos, de alto risco e com elevado grau de precisão.

Motivação

Nos últimos tempos, a investigação e desenvolvimento dos sensores de fibra óptica tem evoluído de forma acentuada. Os sensores de fibra óptica destacam-se pelo seu potencial crescimento em diversas áreas de aplicação tais como na monitorização ambiental, monitorização de estruturas, controlo de qualidade de produtos, processos industriais, entre outras. As suas dimensões reduzidas permitem a sua inclusão no próprio material a ser analisado sem comprometer o funcionamento dos sensores de fibra óptica e proporcionando informações imediatas e remotas do seu estado [3,4].

Com a necessidade crescente de obtermos os sistemas monitorizados, os sensores em fibra óptica, cada vez mais, têm um papel importante na monitorização. De entre os vários tipos de

sensores de fibra óptica, destacam-se os sensores de intensidade pela sua fácil capacidade de aplicação e de implementação.

Esta dissertação de Mestrado surgiu da necessidade do uso de sensores em fibra óptica para a monitorização da pressão num tanque para o estudo dos fenómenos de percolação da água em solos para a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em parceria com a Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos (UOSE) do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto (INESC Porto).

Objectivos da dissertação

Esta dissertação tem como objectivo o estudo e implementação de sensores em fibra óptica para a monitorização da pressão num sistema destinado à análise dos fenómenos de percolação da água em solos para uso pela Secção de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Pretende-se caracterizar dois tipos de sensores com base nas suas perdas de potência para uso na monitorização da pressão especificando todas as técnicas e procedimentos até que seja possível seleccionar a melhor cabeça sensora. Esta escolha será realizada com base no comportamento das perdas de potência em função da pressão aplicada, a qual poderá ser simulada através de um determinado deslocamento.

Após esta selecção, será efectuada a sua leitura por um OTDR permitindo a aquisição simultânea dos valores de vários sensores de pressão, que podem ser dispostos no sistema. Os sensores escolhidos terão que ter reprodutibilidade de valores demonstrando, assim, a sua viabilidade de utilização.

Organização da Tese

O documento encontra-se dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo (Introdução) dá-nos a conhecer a motivação, os objectivos, e a organização da Tese.

No segundo capítulo são apresentados de forma genérica alguns conceitos teóricos que foram estudados ao longo da dissertação e é descrito um estado da arte.

O capítulo seguinte, o terceiro, dá a conhecer todo o procedimento e resultados de testes a um conjunto de cabeças sensoras constituídas pela fibra “hetero-core” terminando com a escolha da cabeça sensora mais adequada para a nossa aplicação e respectiva multiplexagem.

O quarto capítulo investiga o uso de uma lente GRIN em conjunto com uma superfície reflectora para construção de um outro sensor de fibra óptica para medição de pressão. O capítulo termina com os testes de multiplexagem de dois sensores com lentes GRIN em conjunto com superfícies reflectoras.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões relativas à dissertação e o trabalho futuro que poderá ser desenvolvido.

2. Fundamento Teórico

2.1. Sensores de fibra óptica

Nos últimos anos, os sensores de fibra óptica têm sido desenvolvidos em vários laboratórios de investigação e posteriormente aplicados na indústria. Não existe uma classificação única de sensores de fibra óptica, no entanto, podem ser classificados em duas formas distintas: os sensores intrínsecos e os sensores extrínsecos. Nos sensores intrínsecos a luz não sai da fibra óptica no local de medida, enquanto que nos sensores extrínsecos, as fibras ópticas servem apenas como guias de luz entre a fonte e o meio a ser monitorizado [5].

Nos últimos 20 anos, duas grandes áreas, nomeadamente a optoelectrónica e as comunicações ópticas têm vindo a demonstrar um crescimento tecnológico exponencial. Na indústria de optoelectrónica têm surgido imensos produtos, tais como os leitores de CD (*Compact Disc*), impressoras a laser, leitores de códigos de barras, apontadores lasers, etc. Por outro lado, as comunicações de fibra óptica são outra área de grande crescimento, devido às suas características que permitem uma enorme capacidade e distância, sem que haja outro suporte de comunicação com iguais desempenhos.

Toda esta revolução tecnológica, ocorrida nas últimas décadas tem realçado as vantagens da utilização de fibra óptica. Por outro lado, a tecnologia de sensores de fibra óptica tem atraído uma maior atenção ao longo do tempo devido às suas características únicas, tais como: o seu peso e reduzido tamanho, o facto de serem elementos passivos, baixa potência de funcionamento, imunidade às interferências electromagnéticas, alta sensibilidade, grande largura de banda e robustez ambiental. A utilização dos sensores em fibra óptica deve-se, também, em grande parte ao decréscimo do custo de fabrico, exemplo disso é o facto de, em 1979 um metro de fibra óptica custar cerca de 17 €, sendo que actualmente não excede os 0,10 €. Partindo do princípio que a tendência do mercado se mantém, ou seja, que as fibras ópticas continuam a baixar o seu custo de fabrico, os investigadores na área dos sensores de fibra óptica terão cada vez mais possibilidades de desenvolverem produtos mais competitivos, o que leva a crer que esta tecnologia adquira cada vez mais uma posição na vanguarda do mercado dos sensores [6].

Os sensores de fibra óptica podem ser usados para medição de inúmeros parâmetros físicos, entre os quais: rotação, aceleração, vibração, posição linear e angular, curvatura, humidade, viscosidade, medições químicas, etc. [7]. Quando classificados com base na aplicação, estes podem ser: sensores químicos (medição de pH, de oxigénio e de outros gases, estudos de espectroscopia), em sensores físicos (medição da temperatura, deformação da fibra), sensores biomédicos (inseridos através de cateteres ou endoscópios para medição da glicose, fluxo de sangue) [8].

Uma outra classificação pode ser em função do processo de modulação/desmodulação do sinal medido e no tipo de aplicação a que se destina o sensor [9]. No processo de modulação/desmodulação os sensores de fibra óptica podem ser designados como sensores de intensidade ou de amplitude, de fase, de frequência ou de polarização. Os sensores de intensidade são normalmente sensores mais simples e mais baratos.

2.1.1 Classificação pelo processo de modulação/desmodulação

Interferometria

A interferometria é uma técnica que combina ondas coerentes de maneira que o resultado da sua combinação apresente uma característica significativa em função do mensurando. O seu funcionamento pode ser descrito quando duas ondas com a mesma frequência são combinadas e o seu resultado é determinado pela diferença de fase entre ambas ondas. Os sensores interferométricos são sensores que utilizam este conceito, em que a grandeza física que se pretende medir actua na fibra óptica, modulando a fase da radiação transmitida pela fibra [10,11,12].

Comprimento de onda

O princípio básico deste tipo de sensores é de monitorizar a variação do comprimento de onda em função do mensurando. Exemplo disso, são as redes de difracção de Bragg, (*FBG – Fiber Bragg Gratings*), que são constituídas por um pequeno segmento de fibra óptica que reflecte determinados comprimentos de onda e transmite outros. Estas redes são simples elementos intrínsecos e estão incorporadas numa pequena secção da fibra óptica tendo a capacidade de medir qualquer perturbação física sentida. As *FBGs* são escritas nas fibras pela exposição a um padrão de interferência de uma radiação à luz ultravioleta [13,14].

Polarimetria

A polarimetria é uma técnica sensível à mudança da polarização da luz para monitorização de um determinado mensurando. Os sensores de fibra óptica polarimétricos são baseados nesta mudança por uma fibra monomodo que está sujeita a fenómenos externos que irão alterar a polarização da luz, tais como a pressão, a temperatura e a deformação [15,16].

Sensores de intensidade

Os sensores de intensidade são baseados na modulação da intensidade. Neste tipo de sensores, a intensidade luminosa que é transmitida ao longo da fibra óptica pode ser modulada, por exemplo, por reflexão num espelho móvel. Na Fig. 2. 1 podemos verificar que a variação da posição do espelho provocará uma variação na potência luminosa, que será posteriormente captada pela fibra óptica. Este processo simples de modulação da luz contribuiu para que se tornassem na primeira geração de sensores de fibra óptica [3].

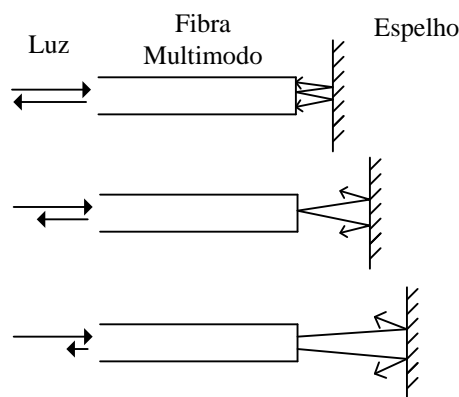


Fig. 2. 1 - Princípio de funcionamento de um sensor de intensidade baseado na reflexão de um espelho.

No entanto, a alteração da intensidade de radiação que se propaga ao longo da fibra óptica poderá ser alterada devido a vários factores, tais como flutuações de potência e/ou as perdas existentes nos componentes ópticos que são usados para a montagem do sistema. Pelo que, poderá ser tomado em conta o uso de um sinal de referência, de forma a garantir a funcionalidade do sensor [10].

Como anteriormente referido, também é possível classificar os sensores de fibra óptica nas seguintes formas: intrínsecos ou extrínsecos.

2.1.2 Classificação por modo de funcionamento

Sensores Extrínsecos

Estes sensores são caracterizados pelo facto da fibra transportar apenas o sinal luminoso até à zona sensora, sendo a cabeça sensora realizada mediante componentes ópticos e/ou mediante componentes electrónicos, externos à fibra óptica. Como se pode verificar na Fig. 2. 2, a fibra óptica é usada como um canal óptico de transporte da radiação luminosa até ao dispositivo de monitorização. Outras variantes deste sensor baseiam-se em tecnologia electrónica em qual o sinal óptico é transportado pela fibra óptica e convertido em energia eléctrica. Neste caso, designa-se de sensor híbrido mas que se enquadra perfeitamente na definição de sensor extrínseco. Em ambos os casos, a informação que advém do sensor é sempre enviada de novo para a fibra óptica [4,6].

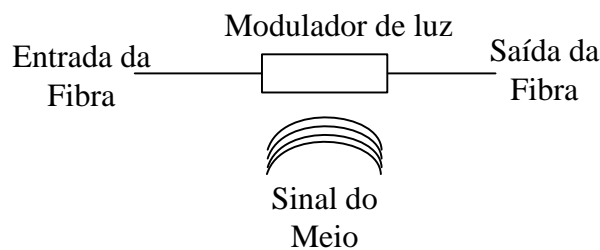


Fig. 2. 2 - Sensor extrínseco.

Sensores Intrínsecos

Nos sensores de fibra óptica intrínsecos, o parâmetro a monitorar actua directamente na fibra que transporta o sinal luminoso (Fig. 2. 3).

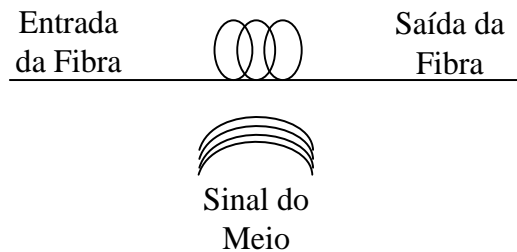


Fig. 2. 3 - Sensor intrínseco.

Neste caso, o elemento sensor é a própria fibra que está no sistema. Dependendo da aplicação do sensor, a sua sensibilidade por vezes é baixa tornando-se insuficiente para a monitorização, o que poderá implicar a utilização de formas de aumentar a sensibilidade da luz guiada na fibra óptica face ao mensurando [3]. Por exemplo, através da melhoria de fabrico da cabeça sensora.

2.2. Cabeças Sensoras

Em sensores de fibra óptica, a cabeça sensora é o elemento que permite a alteração de uma das propriedades da luz em função do mensurando. É uma zona de detecção e pode ter, por exemplo, dois tipos de configurações: configuração interrompida - fibra “hetero-core” e configuração topo - Lente GRIN.

Configuração interrompida – fibra “hetero-core”

Esta configuração, designada de fibra interrompida, faz uso de um outro tipo de fibras para monitorização (Fig. 2. 4).

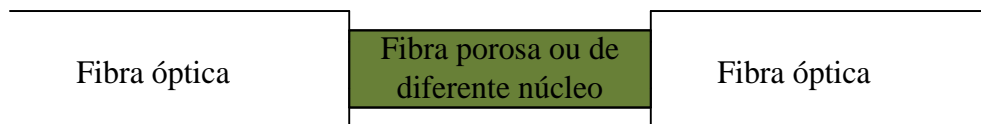


Fig. 2. 4 - Exemplo de uma configuração interrompida.

A região activa está inserida na fibra através de uma secção de fibra óptica com características diferentes [17,18]. Neste género de configuração, também pode ser obtida uma detecção quasi - distribuída por introdução de várias secções sensoras ao longo da fibra. Como é o caso da utilização de várias fibras “hetero-core”.

Configuração topo - Lente GRIN

Num contexto geral, a configuração topo representada na Fig. 2. 5 é a mais utilizada para detecção em regiões onde o acesso é muito restrito. Por exemplo, a utilização de uma lente GRIN com uma superfície reflectora pode criar um sensor de intensidade em configuração topo para medição de deformação da superfície reflectora.

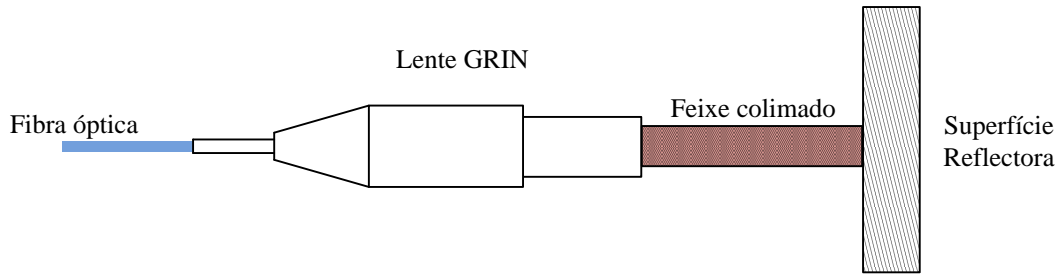


Fig. 2. 5 - Exemplo de uma configuração topo usando uma lente GRIN em conjunto com uma superfície reflectora.

Nesta configuração, a lente GRIN disposta no extremo da fibra óptica, emite um feixe colimado de luz para uma superfície reflectora, como por exemplo, um espelho. O retorno do feixe será captado pela lente e posteriormente guiado pela fibra óptica. As variações de intensidade podem ser registadas quando ocorre uma alteração da forma da superfície reflectora. Assim, devido à baixa dispersão do feixe colimado, torna-se possível obter uma fácil implementação de um sensor de intensidade.

Neste capítulo pretende-se dar a conhecer, em detalhe, as cabeças sensoras com fibra “hetero-core” e com lentes GRIN e respectiva superfície reflectora.

2.2.1 Fibra “hetero-core”

A fibra “hetero-core” consiste num conjunto de fibras ópticas cujos diâmetros diferem (Fig. 2. 6). Usualmente, é caracterizada por um segmento L de fibra multimodo cujo diâmetro é maior que as fibras adjacentes. Neste segmento L é realizada a fusão nos seus extremos a uma fibra monomodo formando assim uma fibra “hetero-core” (Fig. 2.6 a)) [19].

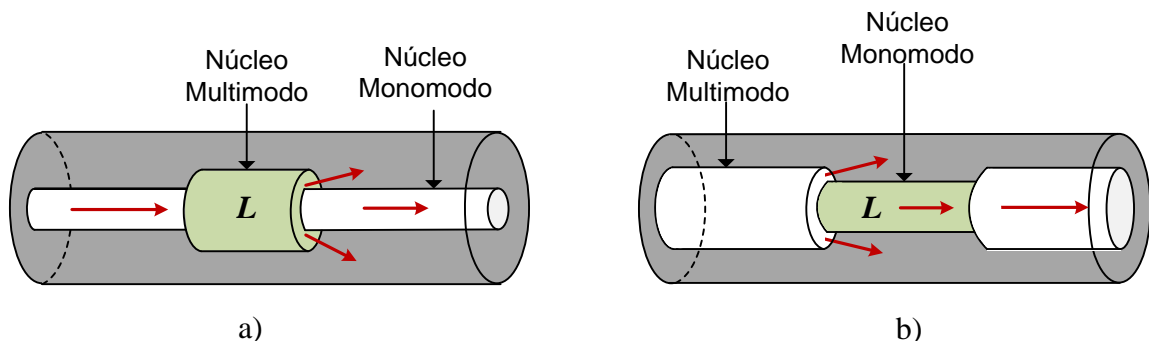


Fig. 2. 6 - Fibra “hetero-core” com segmento L a verde. a) Fibra com núcleo multimodo. b) Fibra com núcleo monomodo.

As dimensões do núcleo entre cada secção da fibra, assim como o tipo de fibra usado podem variar. Dependendo das configurações desejadas, é possível também colocar fibra óptica monomodo no segmento L , (Fig. 2. 6 b)) efectuando nas suas extremidades a fusão entre fibras multimodo. A ideia base é efectuar pelo menos uma fusão de um segmento L com um núcleo de dimensão diferente das fibras adjacentes. A existência de diferentes núcleos permite que parte do raio incidente seja encaminhado para fora do núcleo e outra direccionada para o “novo” núcleo. A maior parte da energia pode passar através desta secção com uma perda relativamente pequena [20]. A importância das fibras “hetero-core” recai no facto de conterem um segmento L de características diferentes à restante linha de transmissão, independentemente do tipo de fibra que é usado [21].

Quando a luz atravessa o pequeno segmento “hetero-core”, uma pequena parte da luz é perdida devido à diferença que existe nos núcleos. É de esperar que esta perda tenda a aumentar consoante for incrementada a curvatura aplicada à fibra e quanto maior for a diferença dos núcleos [22]. Estes segmentos, apresentados na figura anterior, permitem obter uma grande gama de perda óptica e conseqüentemente tornam-se altamente sensíveis a uma curvatura da fibra óptica.

Este tipo de fibras ópticas “hetero-core” tem sido aplicado em variadíssimos géneros de sensores, tais como de deslocamento, de pressão, na análise de movimento, na concentração de líquidos e inclusive na detecção de humidade [23].

Uma das grandes capacidades da fibra “hetero-core” é a reprodutibilidade dos valores das perdas, ou seja, o facto da fibra “hetero-core” sofrer uma curvatura, voltar ao estado inicial e novamente sofrer a mesma curvatura, permite obter valores bastante semelhantes. Esta grande capacidade permite um tempo de vida de uso superior aos outros tipos de fibra que são usados para sensores. Comprovam esta capacidade da fibra “hetero-core”, as experiências elaboradas por *Michiko Nishiyama* e *Kazuhiro Watanabe*, no que respeita, ao uso deste tipo de sensores em luvas para captura de movimentos em tempo real [24]. Outras experiências realizadas, dão conta da aplicação de óleo na zona do segmento L de forma a obtermos uma maior sensibilidade. Este aumento da sensibilidade é possível devido ao índice de refração do óleo ser maior do que o ar, proporcionando uma maior extracção de luz e, conseqüentemente, uma maior perda.

É de referir que o número de sensores a serem introduzidos na linha de transmissão de um sistema de monitorização, poderá ser elevado, estando apenas limitado pela potência que possa chegar ao detector. A capacidade de identificá-los numa linha de transmissão é também possível com a utilização de OTDR, visualizando as fusões da fibra “hetero-core” [25].

O baixo custo de implementação também é outra das vantagens presentes nas fibras “hetero-core” devido ao corte da fibra e a fusão que permitirá uma rápida e fácil introdução em sistemas que requerem sensores de monitorização. A sua capacidade de monitorização é também simplificada visto que o parâmetro de medição apenas se refere à perda de luz que ocorre no segmento L [26].

Comprimento do segmento L

Experiências demonstram que o comprimento do segmento L incorporado na linha de transmissão tem influências no seu comportamento. Este comprimento irá determinar a sensibilidade da fibra “hetero-core” na monitorização dos sistemas face à curvatura [27]. Para valores do segmento L cuja dimensão aumenta, as perdas encontradas tendem a ser maiores. O mesmo sucede com as curvaturas, quanto maior a curvatura a que o segmento for sujeito, maior será a dispersão da luz nesse ponto, e por conseguinte, maior será a atenuação [28].

Casos de aplicação

Com o aparecimento das fibras “hetero-core”, tornou-se possível a sua aplicação em inúmeros sistemas de monitorização. A sua utilização pode ser aplicada no controlo de portas e/ou janelas (Fig. 2. 7) permitindo determinar se estão fechadas ou se estão abertas. A existência de perdas de potência óptica, visíveis aquando da passagem da luz na fibra “hetero-core”, permite identificar o estado da porta e/ou janela.

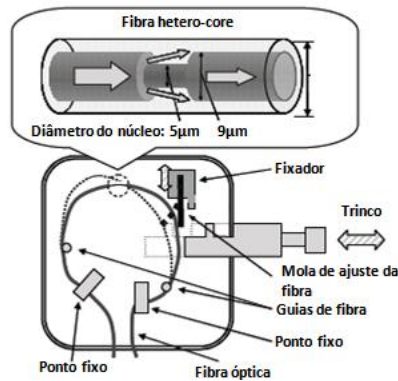


Fig. 2. 7 - Aplicação de uma fibra “hetero-core” num trinco de uma porta [29].

A fibra “hetero-core” é fixa estrategicamente numa fechadura através de pontos de fixação. Quando o trinco é pressionado, a fibra “hetero-core” é forçada gradualmente a efectuar uma curvatura, com auxílio de uma mola de ajuste. Tal situação irá originar uma perda de potência na fibra “hetero-core” o que indica que a porta/janela está aberta. Quando o trinco é pressionado novamente, a mola de ajuste liberta-o e a fibra “hetero-core” volta ao estado original, apresentando os níveis de potência de referência. Com base na comparação do valor da potência óptica inicial e final, será possível determinar o estado da porta e/ou janela [29].

Numa outra situação, poderá ser empregue na comodidade e bem-estar das pessoas. Exemplo disso é a sua implementação num tapete “inteligente” numa casa. O tapete que contém cerca de 40 sensores de pressão constituídos por fibras “hetero-core”, transmitem continuamente os valores da potência para um computador, de modo a verificar a presença de alguém sobre o tapete. Quando o utilizador se encontra descalço e coloca-se sobre o tapete, as fibras “hetero-core” serão sujeitas a uma curvatura resultando num aumento da perda de potência. Um algoritmo identifica através de relação entre perdas-pressão-formato do pé, a identidade da pessoa. Com base neste reconhecimento, torna-se possível dispor das preferências do utilizador, como por exemplo, a temperatura da casa, a intensidade da luz, a activação dos aparelhos electrónicos e a abertura de janelas [30].

Alguns estudos realizados pela Universidade de Soka no Japão por *Michiko Nishiyama* e *Kazuhiro Watanabe* têm contribuído também para os avanços da aplicação da fibra “hetero-core”, como podemos observar na Fig. 2. 8. Nesta aplicação, a fibra “hetero-core” é incorporada numa luva [24,31]. Numa aplicação complexa com recurso à fibra “hetero-core”,

um vasto conjunto de relações entre as perdas de potência, os ângulos de flexão dos dedos e a posição de cada sensor na luva, foi fundamental para que a visualização em tempo real do movimento da mão (Fig. 2. 8).

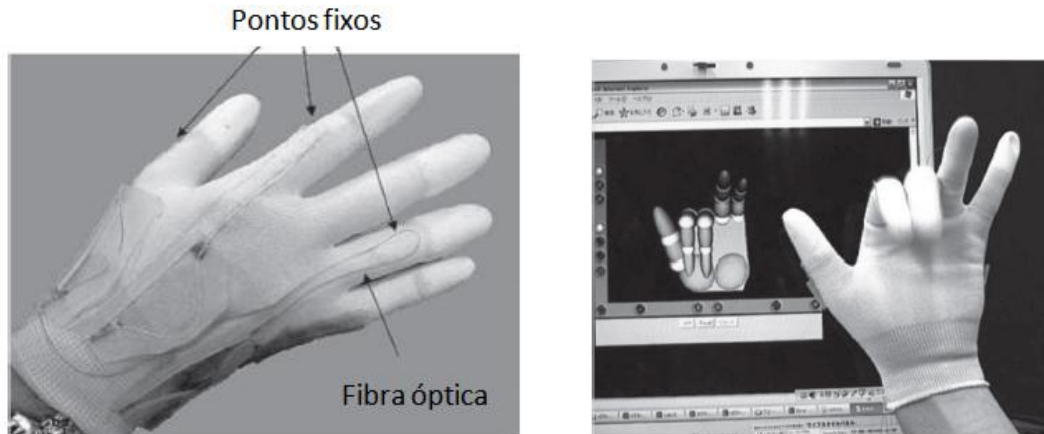


Fig. 2. 8 - Aplicação de uma fibra “hetero-core” numa luva [28,30].

Partindo do mesmo princípio, a fibra “hetero-core” foi sujeita a uma curvatura cada vez que foi efectuada uma flexão do dedo. Esta flexão foi registada pelo software, que identificou o valor das perdas obtidas demonstrando de seguida o resultado em tempo real no ecrã. Tal aplicação é um sucesso, pois permitirá o seu uso em braços mecânicos onde é exigido uma grande precisão dos movimentos e onde até então o uso de *FBGs* têm desvantagens, devido à sua maior sensibilidade de temperatura e aos seus custos elevados de fabricação. O sucesso desta aplicação apresentada, poderá permitir incorporá-la em outros sistemas [28,30,31].

Assim, atendendo a esta característica, facilmente poderão ser colocados na monitorização de sistemas ambientais, em quedas de água, em quedas de neve na floresta ou em qualquer outro espaço ambiental, também poderão ser colocados ao nível da água, no crescimento de plantas e demais informações ambientais. Fora do contexto ambiental poderão ser colocados em túneis, pontes ou outras estruturas que apresentem fendas ou distorções que careçam de monitorização [32,33].

2.2.2 Lentes GRIN em conjunto com superfícies reflectoras

Um meio não homogêneo é um meio em que o índice de refração varia de ponto para ponto. Esta variação ocorre devido às flutuações de densidade, à temperatura ou à composição química do material. Um meio não homogêneo ocorre frequentemente na natureza, como por

exemplo, na atmosfera da Terra (turbulência atmosférica e flutuações de pressão). A possibilidade de usar o meio não homogêneo nos instrumentos ópticos têm sido tomado em conta desde o século passado, mas só recentemente é que tem vindo a ser possível fabricá-los com os materiais apropriados para que a sua utilização possa ser maximizada. Exemplo disso, foi o surgimento das lentes GRIN (“GRaded INdex”) em que o seu índice de refração também varia de forma gradual e não homogênea [34].

Desde o primeiro artigo de pesquisa sobre as lentes GRIN, realizado em 1973 por *Marchand*, que um vasto conjunto de literatura tem surgido lidando com avanços teóricos e tecnológicos nesta área [35]. Actualmente, muita investigação tem sido levada a cabo não só em termos teóricos, como também na evolução de métodos de produção e descoberta dos materiais necessários para uma perfeita fabricação de lentes. A técnica de difusão de iões é a mais usada para o fabrico das lentes GRIN, mas outros processos de fabrico têm sido desenvolvidos tais como, processo sol-gel. As lentes GRIN tornaram-se assim num componente amplamente utilizado na optoelectrónica, designadamente na manipulação e processamento de sinais ópticos nos sistemas de comunicação com fibra óptica, nos sistemas de captura de imagens, em equipamentos médicos e outros [36,37,38].

Estas lentes podem ser conectadas directamente a outros dispositivos ópticos demonstrando que são um componente compacto, sólido, estável e robusto. Também possuem pequenas aberrações que são equivalentes às lentes homogêneas simples resultando em baixas perdas de inserção [39].

Para compreender a natureza das lentes GRIN, considere-se o funcionamento das lentes convencionais. Uma lente de vidro convencional permite que a luz curve na sua superfície. Na interface entre ar e vidro, raios de luz irão mudar de direcção de acordo com a mudança de índice de refração. No seu fabrico, as superfícies das lentes são polidas e cortadas de forma a controlar os raios e direccioná-los para um determinado ponto da lente, Fig. 2. 9 a).

Nas lentes GRIN, ao variar gradualmente o índice de refração dentro do material da lente, os raios de luz terão a capacidade de serem direccionados de forma suave para um ponto focal, Fig. 2. 9 b) [40].

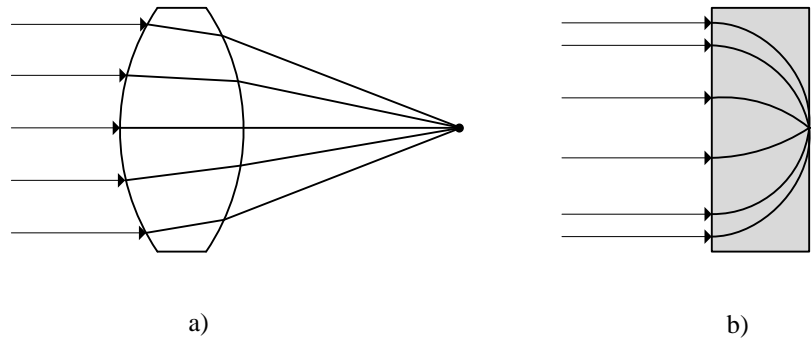


Fig. 2. 9 - a) Lente convencional. b) Lente GRIN.

As lentes GRIN que surgiram na evolução das guias de onda de fibra com índice gradual apresentam uma haste cilíndrica entre 0,2 a 2 mm de diâmetro e um perfil de índice de refração parabólico com uma refração máxima no eixo similar à fibra óptica multimodo de índice gradual (Fig. 2. 10). A utilização deste tipo de perfil permite que o ponto focal ocorra numa distância mais curta que as lentes convencionais.

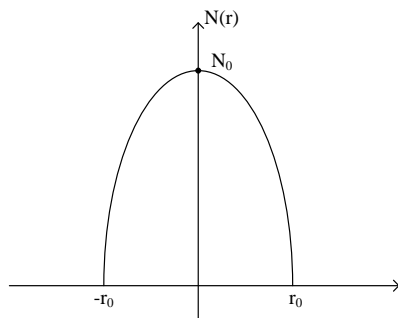


Fig. 2. 10 - Distribuição do índice parabólico da lente GRIN.

A propagação da luz através deste tipo de lentes é determinada quer pela dimensão da lente, quer pelo comprimento de onda da luz (visto que o índice de refração é um parâmetro dependente do comprimento de onda).

Uma lente GRIN tem um índice de refração gradual na direção radial da lente. O índice de refração mais alto está situado no centro da lente e diminui progressivamente.

A equação abaixo ilustrada, (2. 1), demonstra que o índice decresce quadraticamente em função da distância. Devido à constante gradual, o resultado da distribuição do índice parabólico contém um declive acentuado consoante afasta-se de N_0 (centro da lente):

$$(2. 1)$$

$$N(r) = N_0 \left(1 - \frac{A}{2} r^2 \right) \text{ com } A = g^2$$

onde N_0 é o índice de refração da lente, A é a constante gradual, r é o raio da lente, g a constante quadrática.

A constante quadrática, g , é determinada por:

$$g = 2\pi/p \tag{2.2}$$

p representa o comprimento da lente GRIN em *pitch*.

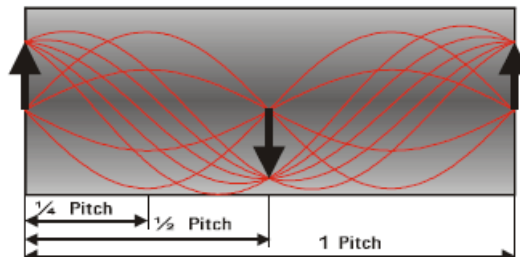


Fig. 2. 11 – Representação da medida de *pitch* numa lente [42].

Como já foi referido, o índice parabólico permite que a lente foque a luz numa distância mais curta do que as lentes esféricas convencionais [41,42,43].

Na Fig. 2. 12, podemos ver uma lente que têm a capacidade de produzir à saída um feixe colimado de luz com um ângulo divergente α entre 1° e 5° .

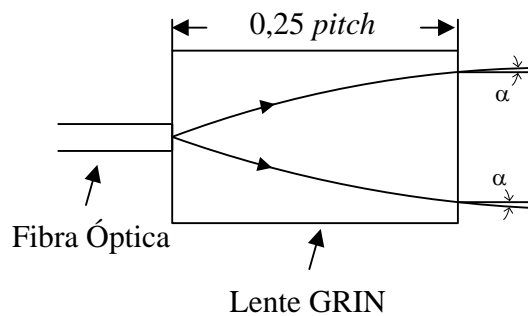


Fig. 2. 12 - Lente GRIN de 0,25 *pitch*.

Pelo contrário, consegue também focar um feixe de luz numa pequena área localizada no centro da face da lente [44].

A variação gradual do índice de refração ao longo da lente faz com que todos os raios de entrada na lente tendam a seguir um caminho parcialmente sinusoidal através do meio.

Tipos de Lentes

As lentes GRIN são fabricadas em vários tamanhos de lentes e são capazes de alcançar várias características de imagem dependendo do *pitch*. Os três tamanhos mais usados são as lentes de 0,23, 0,25 e 0,29 *pitch* [45].

Lentes 0,23 *pitch*

Uma lente de 0,23 *pitch* é projectada de tal forma, que o ponto focal da lente encontra-se fora da lente, originando à saída da lente um feixe perfeitamente colimado, Fig. 2. 13. Muitas vezes são utilizadas para converter um feixe divergente de uma fibra ou díodo laser num feixe colimado.

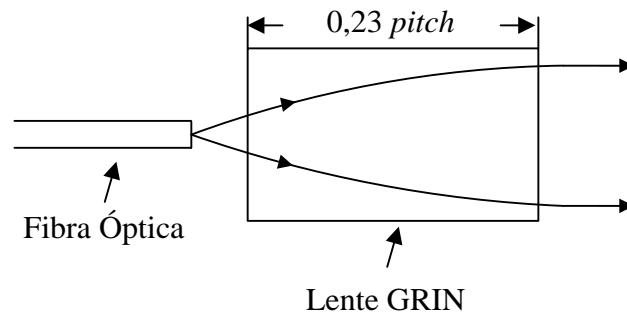


Fig. 2. 13 - Lente GRIN de 0,23 *pitch*.

Lentes de 0,25 *pitch*

A lente de 0,25 irá produzir um feixe de saída perfeitamente colimado quando o feixe de entrada provém de uma fonte focal situada à entrada da lente, Fig. 2. 14 a). Visto de outra forma, quando um feixe de luz é introduzido de forma colimada o extremo oposto da lente irá focar o feixe de luz para um ponto ao centro, Fig. 2. 14 b). Assim, o ponto focal da lente de 0,25 *pitch* coincidirá com uma das faces da lente, o que permitirá uma conectividade eficiente com as fibras ópticas.

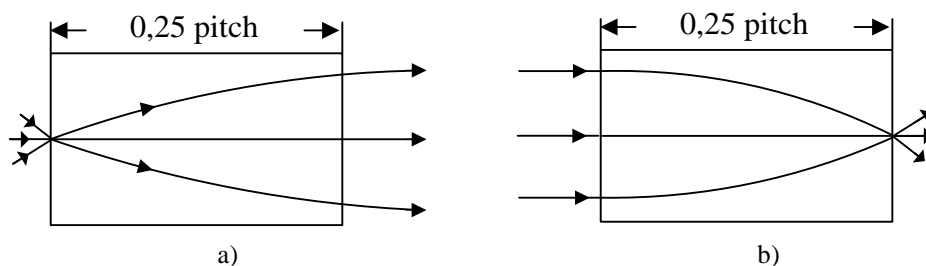


Fig. 2. 14 - Lente GRIN com 2 variantes. a) Saída colimada da luz. b) Foco após a saída da lente.

Esta lente apresentada na Fig. 2. 14 a), é o tipo de lente que será usada em conjunto com uma superfície reflectora para o estudo dos sensores de pressão nesta dissertação.

Lentes 0,29 pitch

Na Fig. 2. 15, verifica-se outro tipo de lente que está desenhada de modo a que dois pontos focais sejam formados fora da lente. É frequentemente usada para converter um feixe divergente de um díodo laser num feixe convergente. Daí que se considere útil para o acoplamento de fontes ópticas com as fibras ópticas.

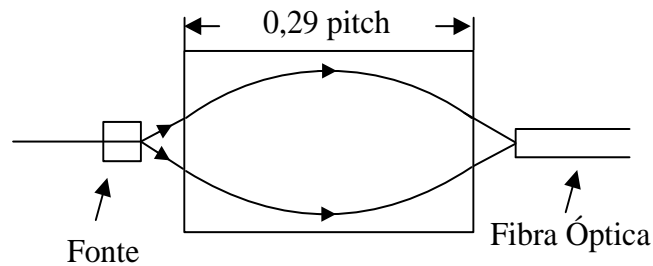


Fig. 2. 15 - Lente GRIN de 0,29 pitch.

A maioria das lentes GRIN, que apresentam diâmetros na ordem dos 0,5 a 2 mm, podem ser utilizadas em conjunto com fibras multimodo ou monomodo. São conhecidas no mercado sob o nome de *SELFOC* devido à empresa que as comercializam. Apresentam aberturas numéricas, (*NA – Numerical Aperture*), de 0,37, 0,46 e 0,6 [46].

Um conjunto de factores podem causar a divergência do feixe de luz colimado, tais como erros no corte da lente, no tamanho finito do núcleo da fibra e/ou na aberração cromática [47]. Como indicado anteriormente, o ângulo de divergência α entre 1° e 5° podem conter perdas na ordem de 1 dB [42,44].

Abertura numérica – NA

Uma característica básica das lentes GRIN é a sua abertura numérica (*NA*) que corresponde à capacidade que a lente tem em captar a luz. É necessário ter em consideração esta capacidade consoante a aplicação que se irá realizar. Quando acopladas a outras lentes, dispositivos ópticos ou próximo de espelhos, necessitam que o seu alinhamento seja exacto, bem como a *NA* de saída deverá ser inferior à *NA* de entrada, para que não ocorra uma perda significativa de luz. Por exemplo, as perdas aumentam quando a luz emitida de uma fonte é acoplada a uma lente ou fibra óptica com um *NA* mais pequena que a fonte [46,48]. As perdas

também podem ocorrer quando um espelho com capacidade de reflexão altera as suas características de reflexão em função de um parâmetro de medida. No capítulo 4 iremos abordar este assunto com mais detalhe.

Reflectores

Existem dois tipos de reflectores, o reflector em que a reflexão ocorre numa superfície primária e outro tipo de reflector em que a reflexão ocorre numa superfície secundária. O reflector com reflexão primária (Fig. 2. 16 a)) é usualmente preferível dado que não origina uma “imagem fantasma” como ocorre no reflector da Fig. 2. 16 b).

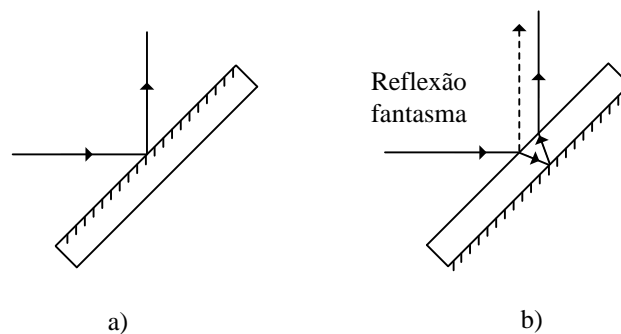


Fig. 2. 16 – a) Espelho com primeira superfície reflectora. b) Espelho com segunda superfície reflectora.

Além disso, o espelho com reflexão secundária exige uma superfície extra no seu fabrico. Por outro lado, necessita também que a luz atravessasse uma pequena camada de vidro a qual pode introduzir aberrações e atenuações [49].

Neste trabalho, foi utilizado o espelho com reflexão primária, (Fig. 2. 16 a)), devido à sua não absorção de luz.

2.3. Equipamentos

2.3.1. OTDR

A luz, ao ser acoplada ao núcleo de uma fibra óptica convencional, viaja ao longo do seu comprimento através da reflexão interna total. O OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*) é um instrumento de medida com capacidade de detectar a luz reflectida em

junções ou conectores, em diferenças na densidade do material, fusões de fibras ópticas e luz retro reflectida devido aos fenómenos de espalhamento de *Rayleigh* e de reflexão de *Fresnel*.

O espalhamento de *Rayleigh* resulta de irregularidades microscópicas causadas por flutuações térmicas ou por flutuações de composição do material. As dimensões físicas destas irregularidades são bastante pequenas comparadas com o comprimento de onda mas que provocam uma flutuação no valor do índice de refração do material ao longo da fibra óptica. Este fenómeno espalha uma pequena porção da luz em todas as direcções, inclusive em sentido contrário ao sentido original de propagação da luz [50].

A reflexão de *Fresnel* é causada por uma mudança súbita no índice de refração quando a luz que percorre um determinado meio encontra de uma forma abrupta um meio diferente, resultando numa reflexão de luz. A intensidade retro reflectida por este fenómeno é superior à intensidade retro reflectida pelo espalhamento de *Rayleigh* (Fig. 2. 17).

Detectando estes espalhamentos e reflexões através do OTDR podemos calcular variadíssimos parâmetros, entre eles, a distância a que se encontram as várias reflexões, as perdas que ocorrem (em conectores, fusões ou curvaturas), permitindo assim uma correcta e eficiente monitorização de um sistema de fibra óptica.

Um OTDR típico consiste numa fonte e receptor ópticos calibrados, um módulo de aquisição de dados, um CPU, uma unidade de armazenamento de informação (memória interna ou disco externo) e um ecrã. Opera por injeção periódica de estreitos impulsos ópticos laser num dos extremos da fibra óptica. A Fig. 2. 17 esquematiza o funcionamento básico de um OTDR que se assemelha a um radar óptico. As propriedades do cabo óptico são então determinadas pela análise das características temporais e de intensidade da onda devido à luz retro reflectida [51].

A aquisição dos resultados poderá ser realizada através da média dos valores obtidos, durante um determinado tempo que é estipulado pelo utilizador, ou em tempo real. Em tempo real, o OTDR está constantemente a enviar os impulsos e a representar os seus ecos no ecrã. Os resultados obtidos surgem sob a forma de um gráfico de potência em função da distância. A Fig. 2. 17 refere-se a um exemplo de resultado que pode ser observado pelo OTDR que retrata as diferentes situações.

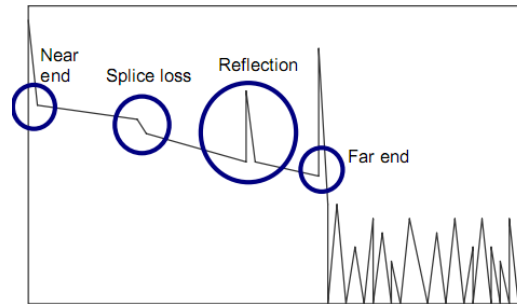


Fig. 2. 17 - Possíveis resultados gráficos no OTDR [51,52].

Near End – É o ponto de ligação do instrumento e do cabo de fibra óptica (ou a sua imediata vizinhança). Devido à existência de um fotodíodo, o impulso recebido requer um tempo para recuperar da região de saturação, daí a existência desta zona morta sem capacidade de obtenção de valores concretos.

Far End – É o extremo distante do cabo de fibra óptica. Tem a capacidade de determinar a distância máxima da fibra óptica, a partir deste ponto deixa de ser possível obter valores da potência. Este pico surge devido à reflexão de *Fresnel*.

Reflection – O fenómeno de reflexão ocorre normalmente em pontos de ligação com conectores, em que a luz passa por diferenças abruptas de índice de refração. Assim, este pico surge também devido à reflexão de *Fresnel* [52,53].

Splice Loss - Resulta no abaixamento de potência devido à passagem da luz por um meio não perfeito provocado pela fusão de fibras ópticas.

Existe no mercado um vasto leque de OTDRs, surgindo, sempre que necessário, novas actualizações. O OTDR usado nesta dissertação foi o *YOKOGAWA* modelo AQ7260 com a versão de software 2.04 que permite que os resultados sejam guardados na memória interna ou externa do OTDR e também para a impressora [51,54].

Monitorização dos sensores aplicados

Face ao exposto, podemos concluir que existe um enorme potencial no OTDR para monitorização dos sistemas baseados em perdas ópticas, sendo este importante no decorrer desta dissertação.

No OTDR a fibra “hetero-core” será monitorizada como sendo um *Splice Loss*, as suas perdas serão medidas perante a diferença entre dois pontos. A monitorização de um conjunto

de sensores em fibra “hetero-core” é realizada em série, ou seja, no OTDR os sensores serão visualizados ao mesmo tempo e espaçados por uma distância mínima. No capítulo seguinte, poderemos ver a multiplexagem deste tipo de sensores e a forma como cada sensor tem que estar separado para a correcta visualização no OTDR.

No que se refere ao sensor com uma lente GRIN e respectiva superfície reflectora, as perdas encontradas pelo sensor serão visualizadas como uma reflexão. Para a multiplexagem deste tipo de sensores, dado a impossibilidade de dispô-los em série, terão que ser dispostos em paralelo, com recurso, por exemplo, a um comutador óptico.

Todavia, uma outra capacidade do OTDR é a função *Multi-Trace* que permitirá fixar o resultado de um dos sensores e compará-lo com outro sensor, Fig. 2. 18. Esta função será importante para a caracterização da multiplexagem dos sensores com lente GRIN e respectiva superfície reflectora como podemos ver na figura seguinte. Aí a perda medida foi de cerca de 5,2 dB.

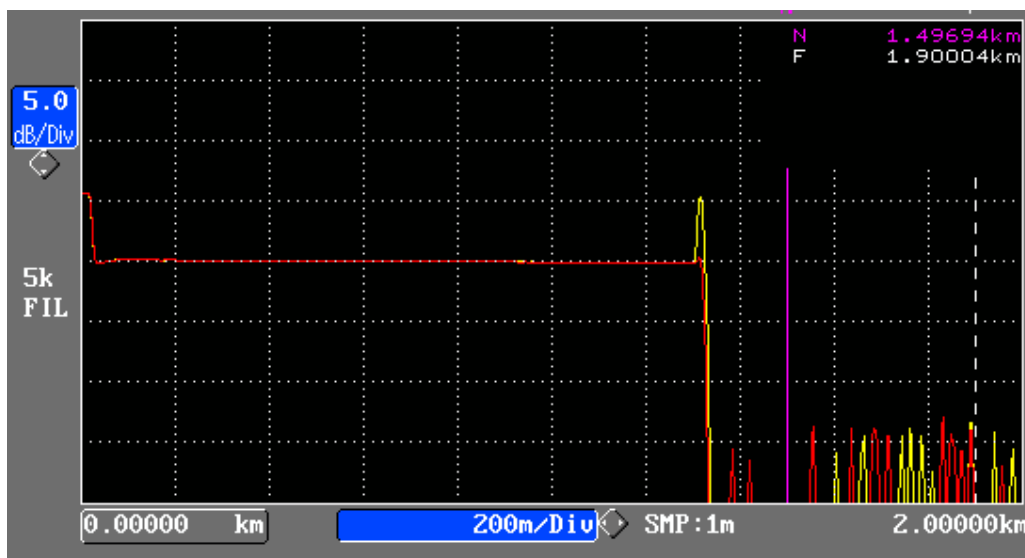


Fig. 2. 18 - Exemplo de uso da função Multi-Trace do OTDR num sensor com uma lente GRIN - A amarelo estado inicial e a vermelho estado final.

Existem determinados conectores que possuem uma face clivada com um ângulo maior que 3,5 °, (Fig. 2. 19), e que não irão permitir que o OTDR identifique a reflexão de *Fresnel*, nomeadamente o conector APC (*Angled Polish Connectors*).

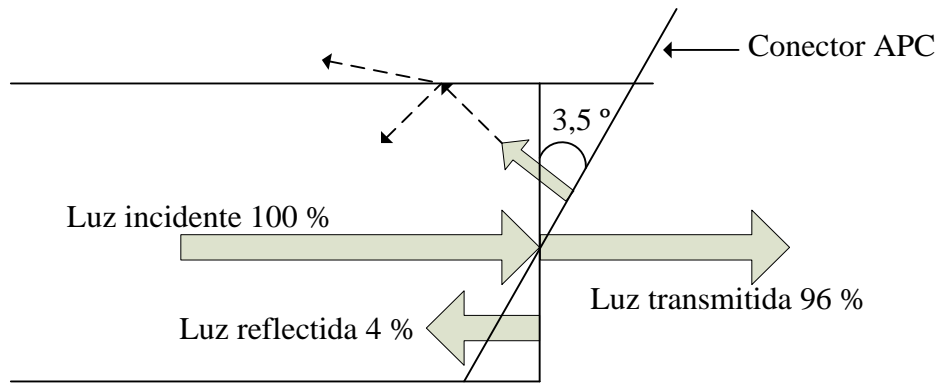


Fig. 2. 19 - Representação com/sem o reflector APC.

A percentagem de luz reflectida de 4%, é tomada em conta para valores comuns de índice de refração da fibra óptica, em que $n_f=1,50$ e $n_0=1,00$ e quando a clivagem do conector é de 90° . Quando a clivagem apresenta um ângulo superior a $3,5^\circ$, o OTDR já não consegue identificar a reflexão [50]. Assim, os conectores que foram utilizados nesta dissertação foram os conectores FC/PC – *Fixed Connector/Physical Contact* visto conterem uma face clivada com um ângulo de 0° .

2.3.2. Medidor de Potência – PM 212

O medidor de potência PM – 212 é um aparelho compacto e versátil (Fig. 2. 20). A sua bateria interna pode ser carregada através de uma porta USB, não necessitando de uma tomada eléctrica em ambientes exteriores onde costumam ser realizadas medições de campo.



Fig. 2. 20 - Medidor de potência PM – 212 [55].

Tem uma capacidade de memorização até 100 medições permitindo posteriormente ser transferido para o computador através de um software específico do fabricante. Apresenta seis

comprimentos de onda de operação (850, 1300, 1310, 1490, 1550 e 1625 nm) obtendo-se desta forma um leque alargado de medições para os diferentes comprimentos de onda [55].

Os diferentes conectores (Fig. 2. 21) permitem a monitorização em vários sistemas.

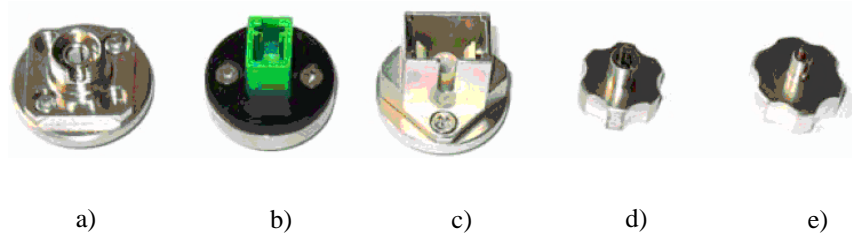


Fig. 2. 21 – Conectores usados no PM – 212. a) FC. b) LC. c) SC. d) TE-ADP-250. e) TE-ADP – 125 [55].

Neste contexto, o medidor de potência PM – 212 tornou-se assim no nosso primeiro equipamento de medição de potência óptica para o estudo do comportamento das fibras “hetero-core” quando sujeitas a uma curvatura.

2.3.3. Fonte óptica – LS-420

É um equipamento compacto e versátil à semelhança do PM – 212 (Fig. 2. 22), dispondo também de um leque variado de emissão de comprimentos de onda de 850, 1300, 1310, 1490, 1550 e 1625 nm.



Fig. 2. 22 - Fonte Óptica LS – 420 [56].

Os comprimentos de onda de 850 e 1300 nm são emitidos por um LED, sendo os restantes comprimentos de onda emitidos por um díodo laser. Atendendo que possui um menu de operações bastante simples, permite uma rápida compreensão do seu funcionamento.

Contendo uma potência de emissão de -20 dBm para alguns comprimentos de onda, o LS-420 foi usado essencialmente em conjunto com o medidor de potência PM – 212. Este conjunto foi também usado em testes de funcionamento do comutador óptico para verificar a existência de perdas ou *crosstalk* nas suas portas. Trata-se assim de um equipamento com grande versatilidade e um ótimo instrumento, tendo sido essencial em várias medições ópticas efectuadas nesta dissertação [56].

2.4. Percolação

A presença de materiais em três estados distintos no solo conferem-lhe uma natureza polifásica. A água e o ar têm a capacidade de preencher os espaços vazios entre as partículas do solo, podendo ocorrer situações em que apenas a água ou o ar preenchem todo o espaço físico. A água encontra-se no solo sob duas formas distintas:

- Água adsorvida
- Água livre

A água adsorvida não é libertável por estar submetida a uma complexa interacção de forças a nível molecular. Define-se adsorção a capacidade que a água ou outro elemento químico tem em aderir a um outro elemento no seu estado sólido.

Considera-se água livre a que está apenas sujeita à acção da gravidade e não é afectada pelas forças da natureza, podendo esta circular entre as várias partículas que constituem o solo.

A circulação da água no solo rege-se por leis gerais da mecânica tais como: a conservação da massa, a conservação da quantidade de movimento e a conservação da energia. Em geral, os espaços vazios que existem entre as partículas de um solo encontram-se interligados numa rede contínua que permitirá a passagem da água. Pelo contrário, nos maciços terrosos a água existente pode encontrar-se em equilíbrio hidrostático ou em movimento.

Todo o elemento no seu estado líquido, tende a movimentar-se em resposta a diferenças de carga hidráulica entre regiões diferentes, deslocando-se no sentido da região com carga inferior. A este movimento da água nos maciços terrosos chamamos de percolação. Estas

diferenças de carga hidráulica surgem naturalmente ou podem ser realizadas pelo Homem alterando as condições de fronteira existentes [57].

Assim, foi concebido pela Secção de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto um equipamento específico para o estudo da percolação da água para fins didáticos, estando disponível na referida faculdade na Secção de Geotecnia para apoio às cadeiras de Engenharia Civil. O equipamento laboratorial, apresentado na Fig. 2. 23, foi desenvolvido em 2008 pelo aluno César Romão C.D.P. Ferreira, orientado pelo Professor Doutor José Manuel Mota Couto Marques com vista a atribuição do grau de Mestre.

A capacidade deste equipamento é muito semelhante às versões comerciais existentes no mercado mas com um custo de fabrico de um quinto do valor comercial. Os valores comerciais deste tipo de equipamento rondam os dez mil euros. É de referir que o seu desenvolvimento permitiu adoptar certas soluções vantajosas e possibilitou também algumas soluções alternativas, como por exemplo a medição da pressão em alguns pontos do equipamento.



Fig. 2. 23 - Tanque para estudo da percolação da água [57].

O equipamento encontra-se dividido em três partes fundamentais: o tanque em acrílico, o suporte metálico e o circuito hidráulico. Tomar-se-á apenas em consideração como é

composto o tanque em acrílico, visto ser esta parte a mais relevante para a nossa aplicação de medição de pressão.

O tanque em acrílico apresenta dimensões generosas ($2,000 \times 0,585 \times 0,200 \text{ m}^3$) de forma a não haver restrições na realização das experiências. Permite com relativa facilidade reproduzir os fenómenos de percolação em barragens de aterro. Para que fosse possível medir pressões dentro do tanque, foi disposta uma malha de 48 orifícios na parede traseira do tanque, sendo aqueles protegidos com uma rede plástica a fim de evitar a passagem de partículas de areia (Fig. 2. 24).



Fig. 2. 24 - Rede plástica para impedimento de passagem de detritos [57].

A Fig. 2. 25 mostra os tubos ligados e fixos à parte posterior do tanque e como estes servem de piezómetros durante as experiências ensaiadas neste trabalho, podendo ser ajustados como sensores de pressão.

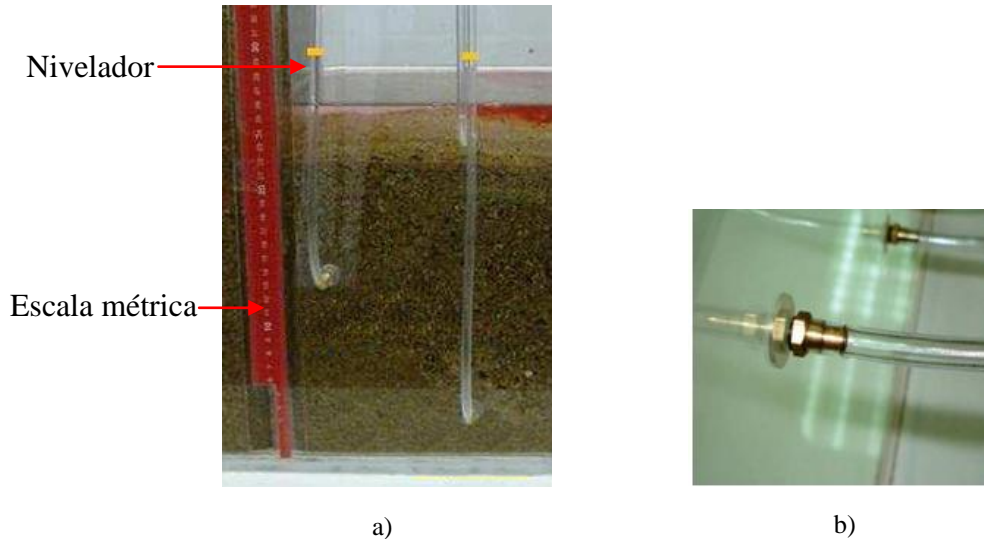


Fig. 2. 25- a) Sistema actual de medição da pressão no tanque - Vista posterior. b) Sistema de fixação dos tubos [57].

Para obter o valor da pressão que está ser exercida num dos 48 orifícios, foi instalada uma escala métrica próxima do tubo de forma a verificar a altura a que o nivelador se encontra. Através da fórmula da hidrostática, numa relação entre altura e pressão atmosférica, é possível determinar a pressão existente em cada um dos orifícios.

$$P - P_0 = \rho gh \quad (2. 3)$$

Com P a pressão hidrostática, P_0 a pressão atmosférica, ρ a densidade da água, g a força de gravidade da Terra e h a altura.

Por vezes, ao processo de medição da pressão é induzido em erro devido à presença de bolhas de ar no tubo, resultando numa medição incorrecta da pressão. Nesta situação, o valor da pressão obtido é superior ao valor real, dada a presença da bolha de ar no tubo, forçando o nivelador a subir [57].

Com intuito de medir a pressão com uma maior exactidão, e de forma automatizada, surgiu a ideia de utilização de fibras ópticas para a realização de sensores de pressão para o estudo dos fenómenos da percolação da água em solos.

3. Sensor de pressão baseado em fibra “hetero-core”

Antes de dar a conhecer o procedimento efectuado para a escolha do melhor sensor de medição de pressão, com base em fibra “hetero-core”, que apresentasse a melhor sensibilidade, valorizou-se a necessidade de explicar alguns métodos impostos e toda a logística de preparação da experiência.

Posteriormente, todo o restante procedimento destina-se à descoberta da melhor fibra “hetero-core” com um determinado comprimento de segmento L e com a melhor característica de propagação da fibra óptica multimodo para medição de pressão.

A primeira abordagem ao nosso estudo centrou-se nas medições da fibra “hetero-core” com uso de uma fonte óptica, LS – 420, e o medidor de potência, PM – 212, para cálculo da potência numa pequena configuração. Esta abordagem foi efectuada para um comprimento de onda de 1550 nm.

Ao longo do procedimento eliminaram-se determinados segmentos L que em nada contribuem e/ou satisfazem as nossas necessidades como sensor de pressão devido às perdas elevadas ou por fácil ruptura da fibra. Por fim, efectuou-se a multiplexagem em série de sensores de pressão baseados em fibra “hetero-core”.

3.1. Implementação

Ao longo da literatura foi dado a conhecer alguns casos onde se realizou aplicações com um segmento L com fibra monomodo ladeada por fibra monomodo de dimensões de núcleo superiores. Contudo, também foi dado a conhecer que a fibra “hetero-core” pode conter um segmento L com fibra multimodo. Este é o tipo de segmento escolhido para a implementação de um sensor de pressão. Assim, construíram-se várias fibras “hetero-core” com segmentos L de comprimento a variar entre 1 e 5 mm.

O sensor de pressão, terá de registar valores aproximados entre 101,30 kPa e 104,25 kPa, referindo-se à altura de água entre 0 e 300 mm, respectivamente. É com base neste intervalo de pressões que se pretende encontrar um sensor de pressão baseado numa fibra “hetero-core”.

Na figura seguinte, observam-se um esquema do segmento L e as várias medidas impostas na primeira abordagem ao estudo da perda de potência numa fibra “hetero-core”. A fibra multimodo de índice em degrau de (50/125 μm) foi colocada como segmento L e as fibras adjacentes eram fibras monomodo (9,65/125 μm).

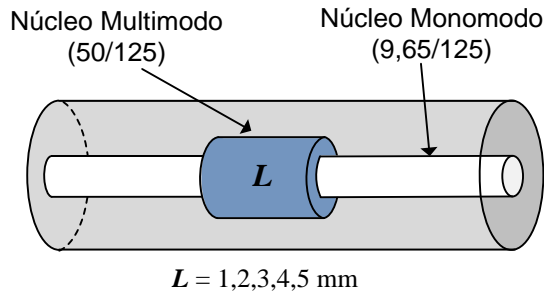


Fig. 3. 1 - Esquema de uma fibra “hetero-core” com segmento L em fibra multimodo.

O tamanho do segmento L foi conseguido da seguinte forma:

- Cortou-se uma fibra monomodo com núcleo de 9,65 μm com extensão de 300 mm aproximadamente.
- A fibra monomodo foi cortada com precisão na máquina de corte, ficando uma distância de referência entre o corte efectuado e o revestimento da fibra óptica.
- A fibra multimodo de diâmetro superior, (50/125 μm), foi cortada e colocada na máquina de fusão.
- Após a fusão tomou-se em consideração a distância em b) e na máquina de corte marcou-se o valor do tamanho do segmento L , cortando de seguida.
- Finalmente efectuou-se a fusão com a outra extensão de fibra de 300 mm.

Na Fig. 3. 2 é possível visualizar o resultado final deste método e as respectivas medidas impostas para todas as fibras “hetero-core” construídas.

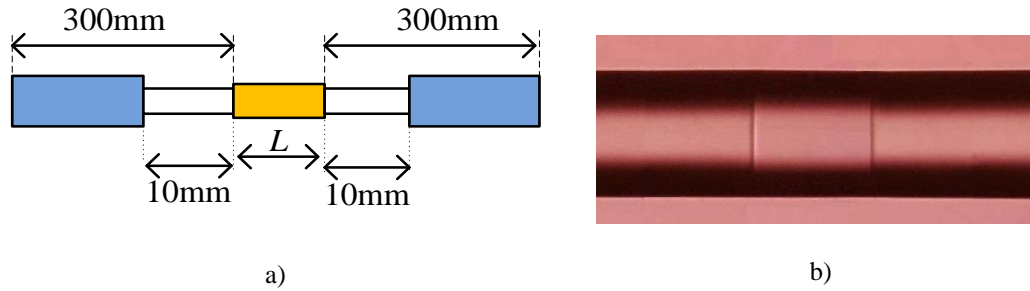


Fig. 3. 2 – a) Distâncias e medidas de fabrico das fibras “hetero-core”. b) Fibra “hetero-core” visualizada no microscópio electrónico.

Método de curvatura e fixação da fibra numa carruagem para simulação de pressão

A aplicação de pressão a uma fibra “hetero-core” produz o mesmo efeito que a aplicação de uma curvatura. Assim, as curvaturas impostas, referidas ao longo deste capítulo, foram aplicadas com auxílio de uma carruagem de elevada precisão. Fixou-se a fibra “hetero-core” em dois pontos distanciados inicialmente de 35 mm, conseguindo-se em segurança, sem quebrar a fibra, curvÁ-la até os 33 mm de distância para qualquer segmento L . O facto de não se diminuir esta distância para valores abaixo de 33 mm, deveu-se à fragilidade que se descobriu existir no segmento L . Há um perigo substancial de ruptura da fibra para segmentos L iguais ou inferiores a 2 mm. O facto de se forçar a deformação ao máximo para qualquer segmento da fibra “hetero-core, permite-nos compreender melhor o seu comportamento, assim como, os intervalos de deslocamento que poderão, eventualmente, ser aplicados como sensor de pressão.

Este método de curvatura e fixação da fibra numa carruagem usou-se nesta primeira parte do estudo da fibra “hetero-core”. Assim, elaboraram-se dois processos que irão verificar a reprodutibilidade dos valores: o processo de curvatura e o de estiramento da fibra, ilustrados na Fig. 3. 3.

Processo de curvatura da fibra – Este processo ocorre quando a fibra no seu estado inicial de 35 mm entre os pontos fixos, é forçada com auxílio da carruagem a atingir o estado final de máxima curvatura, que corresponde à distância entre pontos fixos de 33 mm.

Processo de estiramento da fibra – Este processo é caracterizado quando a fibra no seu estado final de máxima curvatura, 33 mm entre as extremidades fixas da fibra, consegue retomar o estado inicial de 35 mm.

O esquema de montagem da figura seguinte demonstra a forma como é colocada a fibra "hetero-core" numa carruagem, para os processos acima descritos. Esta configuração foi interrogada através de uma fonte óptica e de um medidor de potência.

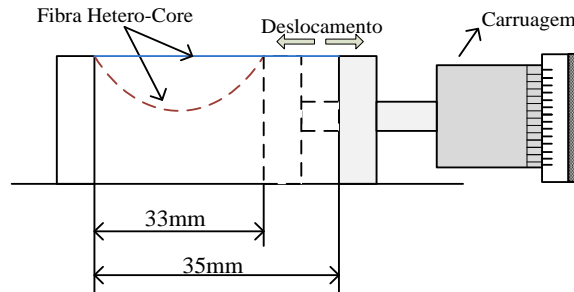


Fig. 3. 3 - Esquema de montagem para o processo de curvatura e estiramento da fibra "hetero-core".

O segmento L colocou-se de forma a que fique sempre no centro da distância máxima, ou seja, a 17,50 mm, para que a curvatura fosse aplicada exactamente sobre a cabeça sensora.

Será tomado em consideração que:

Deslocamento de 0 mm – indica que a fibra "hetero-core" se encontra no estado inicial, ou seja, esticada.

Deslocamento de -2 mm – indica que a fibra "hetero-core" se encontra no estado final, ou seja, curvada.

3.2. Utilização da fonte óptica e de um medidor de potência

Tendo em vista os métodos acima descritos, começou-se por implementar a seguinte configuração, representada na Fig. 3. 4, para verificar a existência de reprodutibilidade do processo de curvatura e de estiramento da fibra.

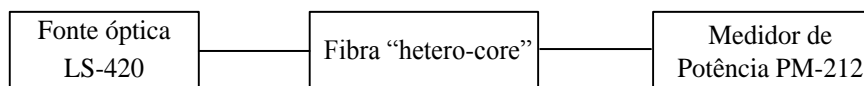


Fig. 3. 4 - Esquema de ligação entre a fonte óptica e medidor de potência.

Utilizou-se a fonte óptica LS-420 com o comprimento de onda 1550 nm (Laser) seguindo-se a fibra "hetero-core" conectada ao medidor de potência PM-212. A figura

seguinte mostra a montagem real da fibra “hetero-core” em conjunto com a carruagem micrométrica.

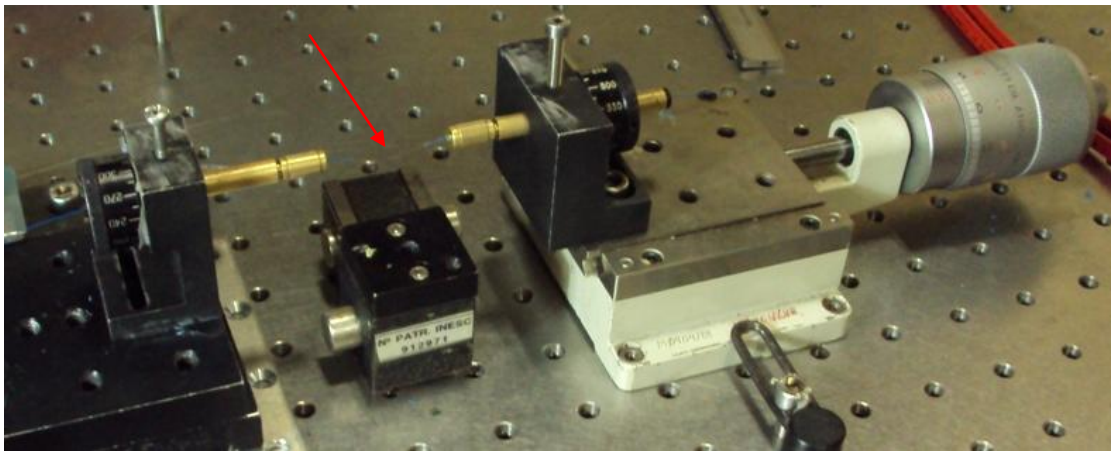


Fig. 3. 5 - Montagem da fibra “hetero-core” em conjunto com a carruagem micrométrica.

Para esta experiência foram usados segmentos L de 1 até 5 mm constituídos por fibra multimodo (50/125 μm) com fibras adjacentes monomodo (9,65/125 μm), a serem testados para o comprimento de onda de 1550 nm. O passo da carruagem foi de 0,1 mm, efectuando na sua totalidade um deslocamento de -2 mm (35 mm a 33 mm) para cada segmento. Pretendeu-se com a utilização do PM-212, averiguar a potência recebida no PM-212 e a reprodutibilidade dos processos usando a fibra “hetero-core”.

Para um segmento L de 2 mm, o deslocamento da carruagem foi menor em relação aos outros segmentos, como podemos constatar na Fig. 3. 6. É de referir que entre cada valor registado, aguardou-se uns instantes para que a curvatura induzida à fibra pudesse estabilizar.

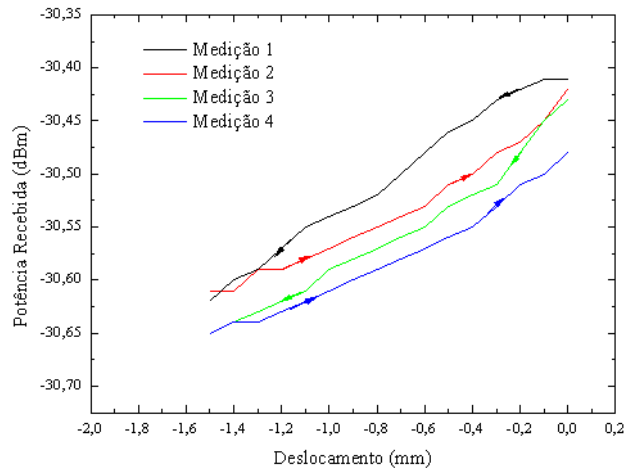


Fig. 3. 6 - Potência recebida para comprimento de onda de 1550 nm com um segmento L de 2 mm.

Com o processo de curvatura e estiramento da fibra “hetero-core”, notou-se que o deslocamento da carruagem foi menor e que a fibra quebrou-se constantemente após várias réplicas. Assim, para este segmento optou-se por um deslocamento de apenas $-1,5$ mm. As medições 1 e 3 referem-se ao processo de curvatura e as medições 2 e 4 ao processo de estiramento. A medição da potência foi em primeiro lugar para o processo de curvar (Medição 1), de seguida tratou-se do estiramento da fibra “hetero-core” (Medição 2). Para averiguar a reprodutibilidade, repetiram-se os mesmos processos da mesma forma (Medição 3 e Medição 4) com as setas a indicar o sentido do deslocamento. Notou-se que entre as medições ocorreu uma certa discrepância, uma vez que o segmento quebrou-se na transição de processos por várias vezes. Não sendo um defeito de fabrico da cabeça sensora, verificou-se que este segmento é limitado e com grande risco de quebra, devido ao pequeno comprimento do segmento.

Também tentou-se efectuar a mesma experiência para um segmento L de 1 mm resultando frequentemente em quebras da fibra “hetero-core”. Assim, se concluiu que quando o segmento L é pequeno, a fibra “hetero-core” torna-se demasiado frágil levando a que seja difícil a sua utilização como sensor de pressão.

Posteriormente, implementou-se o segmento $L = 3$ mm com fibra multimodo (50/125 μm).

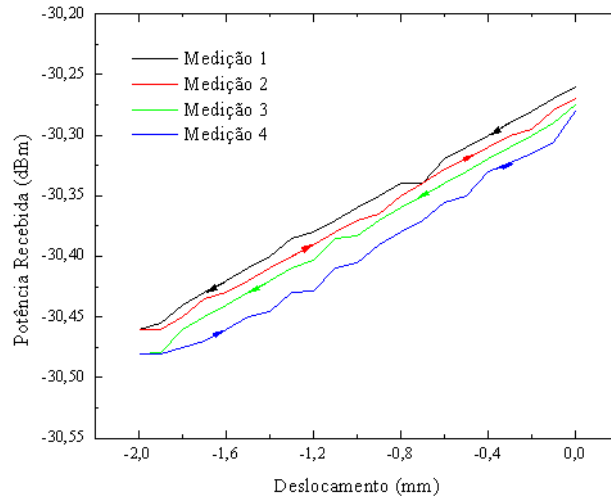


Fig. 3. 7 - Potência obtida para o segmento $L = 3$ mm com um comprimento de onda de 1550 nm.

O segmento $L = 3$ mm foi o primeiro segmento que se obteve melhores resultados para um deslocamento até -2 mm. Contudo, para este segmento observou-se uma baixa reprodutibilidade nos processos de estiramento e curvatura.

Para o segmento L de 4 mm e com um comprimento de onda de operação de 1550 nm, mediu-se a potência obtida da “fibra hetero-core” em função do deslocamento, como podemos ver na Fig. 3. 8.

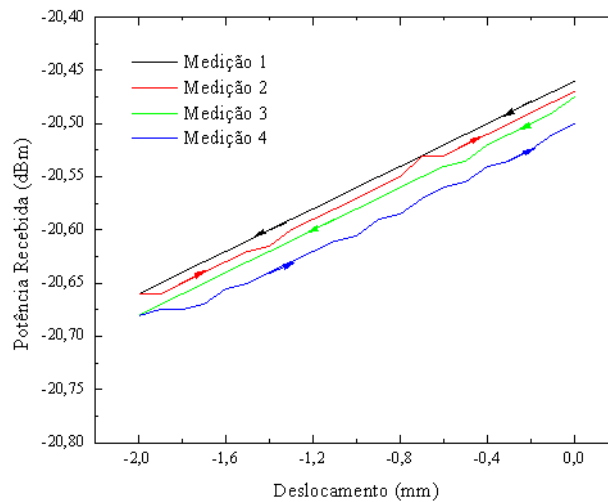


Fig. 3. 8 – Potência recebida para o comprimento de onda de 1550 nm com um segmento L de 4 mm.

Todas as medições apresentaram uma diminuição de potência recebida com o deslocamento, ou seja, aumento da curvatura. Em termos de reprodutibilidade, os resultados estão próximos do desejado.

Na Fig. 3. 9, apresentam-se os resultados para um L de 5 mm, usando um comprimento de onda de 1550 nm.

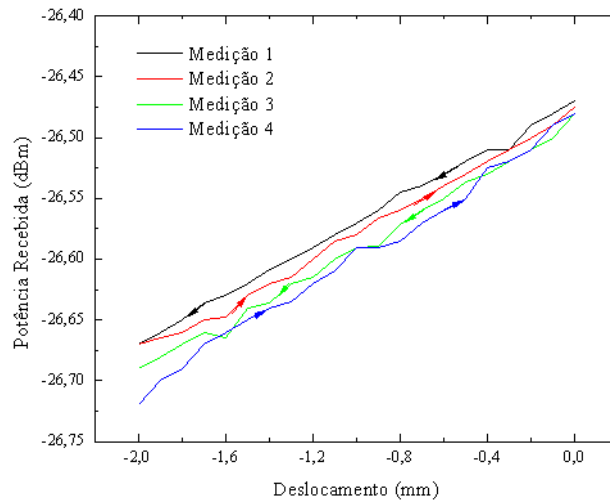


Fig. 3. 9 - Potência recebida para o comprimento de onda de 1550 nm com um segmento L de 5 mm.

Nestas experiências, o segmento com $L = 2$ mm revelou ser o mais frágil de utilização quando sujeito a curvatura, tendo, inclusivamente, quebrado por diversas ocasiões. Por isso, os segmentos $L = 3$ mm, $L = 4$ mm e $L = 5$ mm, constituídos por uma fibra multimodo – índice em degrau ($50/125 \mu\text{m}$) com fibras adjacentes monomodo ($9,65/125 \mu\text{m}$), foram os segmentos escolhidos para o prosseguimento de estudo, com recurso ao OTDR.

3.3. Utilização de um equipamento de medida - OTDR

De seguida, usou-se o OTDR para visualizar o sinal óptico retro reflectido e simultaneamente anotaram-se as perdas. Como o OTDR apresenta inicialmente uma zona cega, a montagem que tinha vindo a ser utilizada até agora, tornou-se insuficiente para o nosso estudo. A fim de ultrapassar este obstáculo, utilizou-se uma extensão de fibra óptica monomodo antes da fibra “hetero-core”, como mostra a Fig. 3. 10, e uma outra extensão posterior para que o OTDR conseguisse detectar a fibra “hetero-core” e esta não fosse mascarada pela reflexão de *Fresnel* associada ao fim da fibra.

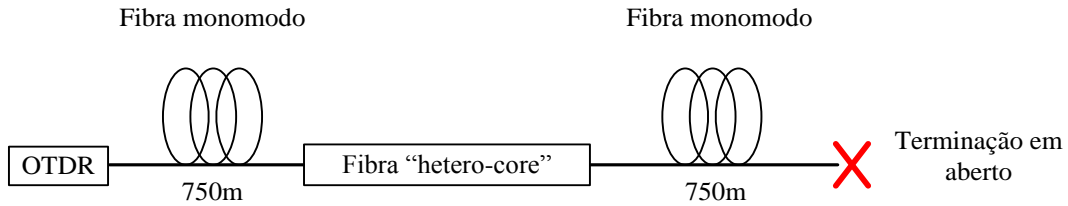


Fig. 3. 10 - Esquema de montagem para medição das perdas na fibra “hetero-core”.

3.3.1. Perdas em curvatura

Seguidamente, implementou-se a montagem para o cálculo da curvatura imposta aos segmentos de comprimento L igual a 3, 4 e 5 mm constituídos por uma fibra multimodo – índice em degrau (50/125 μm) ladeada por fibra monomodo (9,65/125 μm). A escolha destes segmentos deve-se aos resultados obtidos anteriormente. A Fig. 3. 11 ilustra o esquema de montagem para os testes de curvatura.

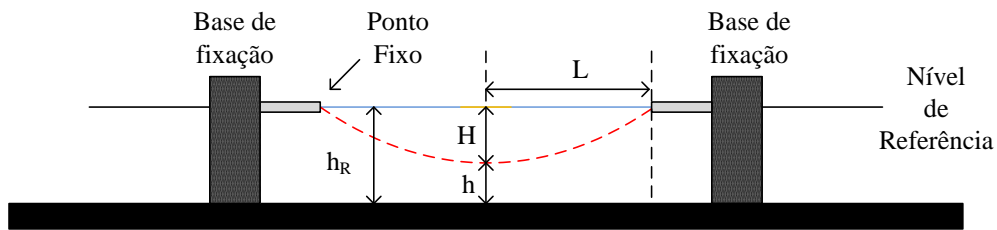


Fig. 3. 11 - Esquema de montagem para cálculo da curvatura.

A curvatura de uma fibra óptica é inversamente proporcional ao seu raio. A expressão que permite obter a curvatura a que é sujeita a fibra “hetero-core” é dada por:

$$C = \frac{1}{R} = \frac{2 \times H}{H^2 + L^2} \text{ com } H = h_R - h \quad (3.1)$$

C - Curvatura

h - Altura da fibra consoante a posição da carruagem

h_R - Altura de referência quando a fibra está esticada

L - Metade da distância entre os 2 pontos fixos da fibra

R - Raio de curvatura

Através da equação (3.1), foi possível obter o raio de curvatura da fibra “hetero-core” quando é sujeita ao decremento da distância entre as extremidades fixas da carruagem. O

valor de H refere-se à diferença entre a altura de referência e o valor mínimo de altura da fibra para diferentes posições da carruagem.

A altura de referência (h_r) foi obtida quando a fibra “hetero-core” apresentava-se esticada e fixa nas extremidades (Fig. 3. 12 a)). De seguida e consoante o deslocamento, a fibra efectuou uma curvatura com os sucessivos decrementos da carruagem (Fig. 3. 12 b)).

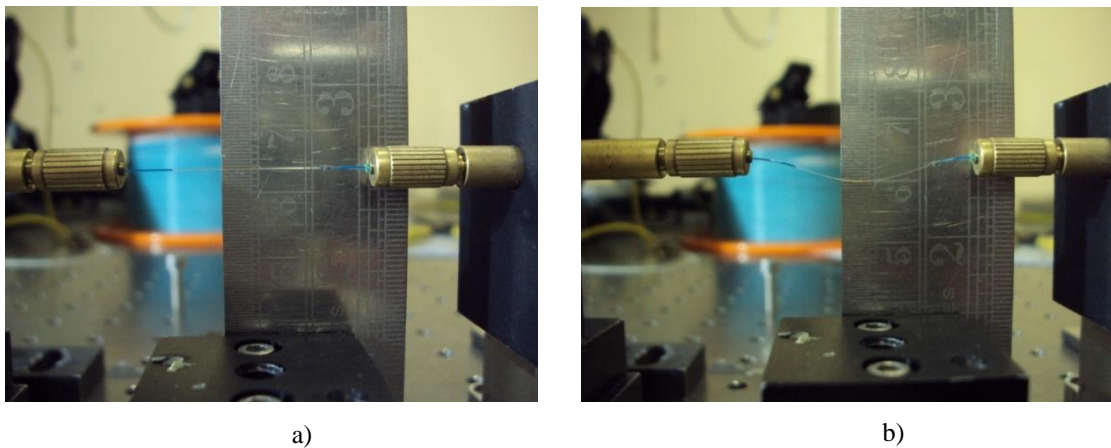


Fig. 3. 12 - a) Fibra esticada com nível de referência em 63 mm. b) Fibra dobrada com valor de $h = 60$ mm.

Como se pôde ver nas figuras anteriores, as medições das variáveis H , h e h_R , foram obtidas com auxílio de uma régua colocada verticalmente. Após ter anotado o valor de h_R , deformou-se a fibra “hetero-core” com o auxílio da carruagem e registaram-se os diferentes valores de h , consoante ocorreu o processo de curvatura da fibra. Desta forma, conseguiu-se obter o valor das perdas em função da curvatura aplicada à fibra “hetero-core” (Fig. 3. 13).

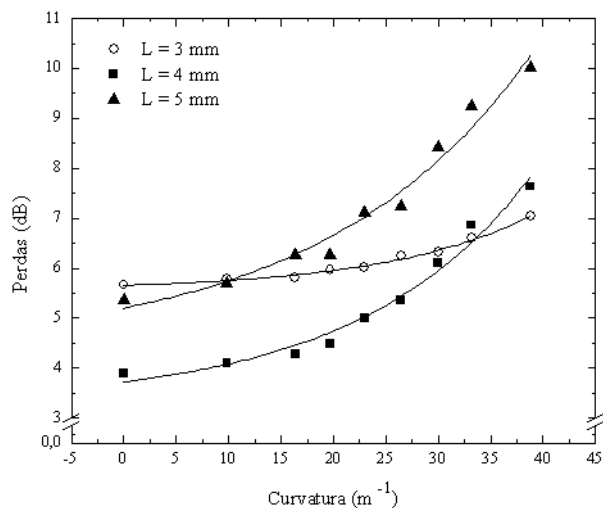


Fig. 3. 13 - Perdas em função da curvatura para o segmento $L = 3$ mm e $L = 4$ mm e $L = 5$ mm.

Na Fig. 3. 13, observam-se os resultados das fibras “hetero-core” com segmentos de $L = 3$ mm, $L = 4$ mm e $L = 5$ mm com curvaturas entre 0 e 40 m^{-1} que correspondem a um deslocamento entre 0 e -2 mm, respectivamente.

Para os segmentos $L = 4$ mm e $L = 5$ mm, as perdas aumentam numa gama de cerca de 4 e 5 dB, respectivamente, face à curvatura. No entanto, e para o segmento $L = 3$ mm as perdas encontradas entre o estado inicial e o final de curvatura são apenas de 1 dB, apresentando, por conseguinte, uma sensibilidade menor.

O segmento $L = 5$ mm apresenta uma perda máxima de 10,5 dB tornando-o pouco prático para a multiplexagem, ou seja, a gama dinâmica do OTDR é cerca de 35 dB o que apenas permite usar três sensores de fibra “hetero-core” em série. Por este motivo, o uso do segmento $L = 5$ mm é eliminado visto que pretende-se a utilização de um maior número possível de sensores em série. O segmento $L = 4$ mm como apresenta uma perda máxima de 7 dB será alvo de outra medição de pressão através de uma coluna de água.

3.3.2. Medição de pressão através de coluna de água

Posicionou-se um tubo em acrílico com 300 mm de altura e 30 mm de diâmetro, suspenso e em posição vertical com ajuda de um braço (Fig. 3. 14). A parte inferior do tubo foi selada com uma membrana elástica estando em contacto com a fibra “hetero-core”. Pela parte superior do tubo adicionou-se água, com auxílio de uma pipeta em intervalos de 5 mm, até atingir 300 mm de altura. Esta altura corresponde à medição da pressão no tanque de estudo de percolação da água nos solos. Assim para uma altura de 300 mm temos uma pressão máxima de 104,50 kPa, ou seja, equivalente à pressão existente no tanque.

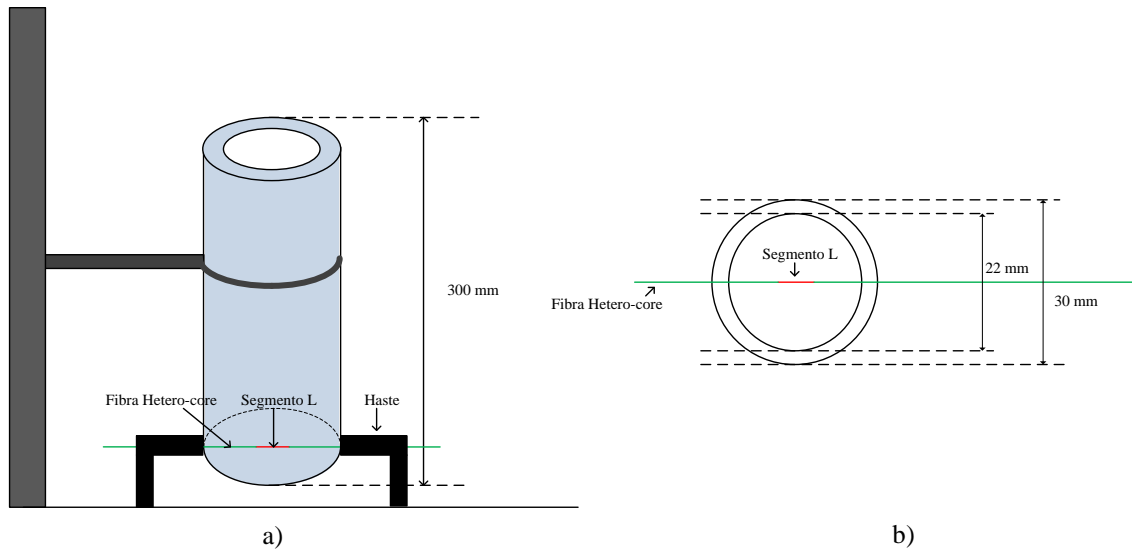


Fig. 3. 14 - Esquema de montagem e medidas aplicadas para a coluna de água. a) Tubo de água. b) Medidas do tubo em acrílico.

Com uma nova configuração, Fig. 3. 15, utilizou-se o segmento $L = 4$ mm com fibra multimodo – índice em degrau para um comprimento de onda de 1550 nm e colocou-se próximo do fundo da coluna de água.

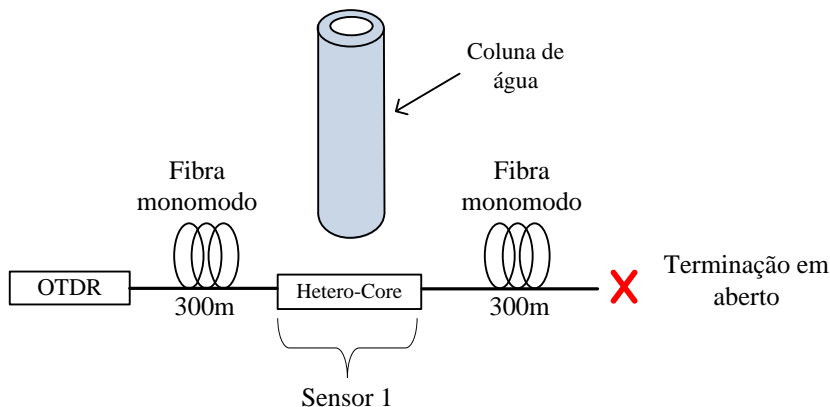


Fig. 3. 15 - Configuração e implementação da coluna de água.

Numa primeira abordagem à experiência, (Fig. 3. 16 b)), colocaram-se as hastes com uma distância de 50, 70 e 100 mm entre si e registaram-se os resultados.

Na Fig. 3. 16 a) pode-se visualizar a configuração real com duas bobines de fibra (uma bobine de fibra monomodo antes da fibra “hetero-core” e outra depois), o OTDR para emissão de luz e cálculo das perdas, uma haste com um braço, que está fixo ao tabuleiro para o suporte do tubo em acrílico e as hastes para posicionar a fibra “hetero-core” junto a esse tubo.

Na Fig. 3. 16 b) observa-se que as hastes estão encostadas ao tubo de acrílico revestido com as membranas elásticas e com a fibra “hetero-core” esticada, com o segmento L ao centro.

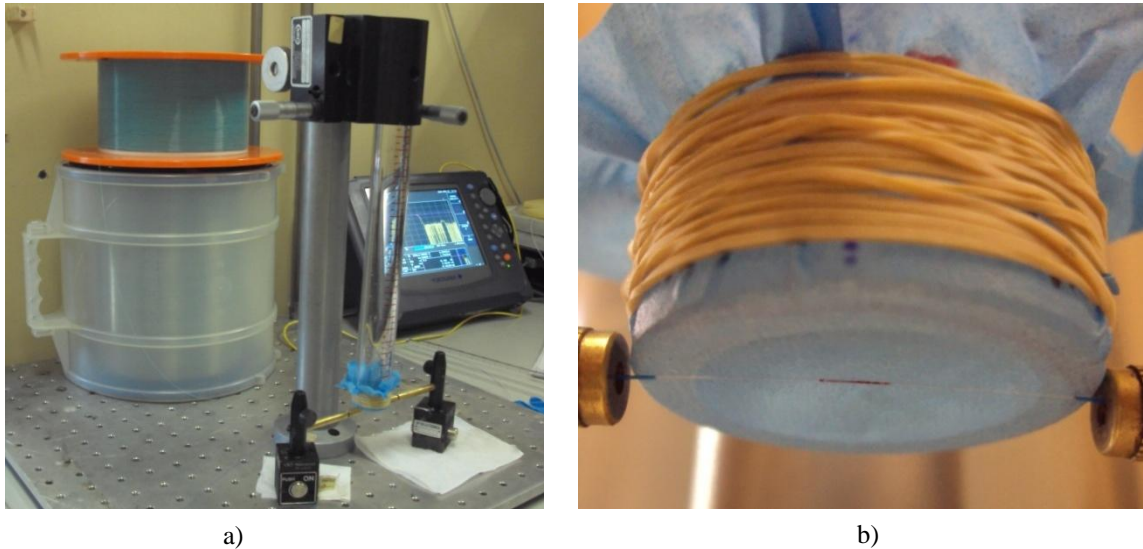


Fig. 3. 16 - a) Vista geral da configuração. b) Fibra “hetero-core” próximo da membrana com segmento L colorido a vermelho.

Para cálculo da pressão da água, foi tomado em consideração a altura da água e através da equação (2. 3) referente à pressão hidrostática, calculou-se a pressão da água que foi exercida sobre a membrana.

Com a adição da água, notou-se que a deformação da membrana aumentava consoante a altura da água. Em consequência, a fibra “hetero-core”, contígua às membranas elásticas, acompanhou a deformação da membrana (Fig. 3. 17 a)).

Com a extracção da água do tubo, a fibra “hetero-core” não acompanhou a membrana visto que as hastes apenas tinham como função suportar e fixar a fibra “hetero-core” próximo ao tubo. Para que a fibra “hetero-core” retornasse à posição original, seria necessário um outro mecanismo de suporte. Possivelmente, a colocação de um peso numa das extremidades da fibra “hetero-core” facilitaria o reposicionamento e resolveria este problema.

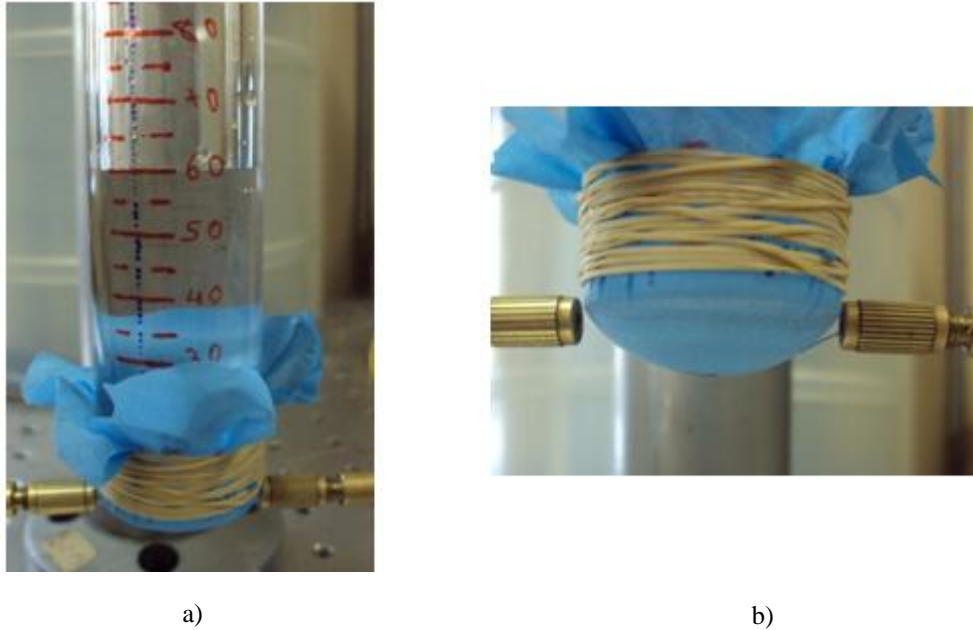


Fig. 3. 17 - a) Tubo em acrílico com adição de água. b) Curvatura exercida quando a altura da água é igual a 290 mm.

Os resultados seguintes (Fig. 3. 18) referem-se às distâncias de hastes de 50, 70 e 100 mm e para o segmento $L = 4$ mm.

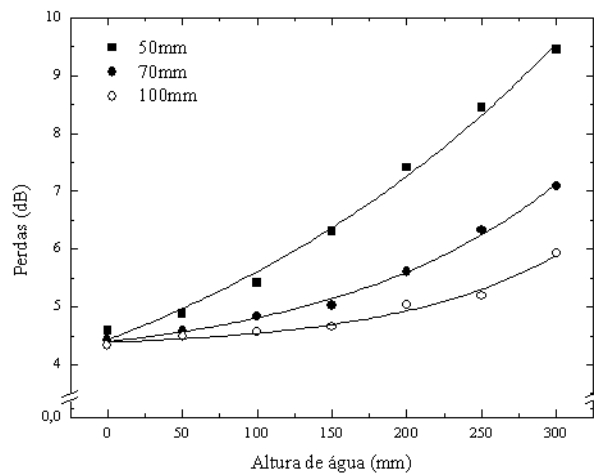


Fig. 3. 18 - Segmento $L = 4$ mm com as diferentes distâncias das hastes.

Devido ao aumento de pressão, as perdas tiveram um aumento correspondente, sendo que ocorreu uma perda mais acentuada para a situação em que as hastes se encontravam a uma menor distância (50 mm), apresentando, por conseguinte, uma maior sensibilidade. Este comportamento foi o esperado, uma vez que quando o distanciamento das hastes é menor, a fibra “hetero-core” acompanha melhor as alterações da membrana.

Por outro lado, e como foi referido anteriormente, a gama dinâmica que o OTDR apresenta para um comprimento de onda de 1550nm é de 35 dB, resultando na possibilidade de utilizar apenas três sensores dispostos em série, utilizando um espaçamento de hastes de 50 mm. Para a distância das hastes de 100 mm, a variação das perdas foi pouco significativa, 1,5 dB, ou seja, apresentou a menor sensibilidade. Devido a estes factores, não foram usados os distanciamentos de 50 e 100 mm.

Assim, na Fig. 3. 19 comparou-se o comportamento entre as perdas e a pressão para o segmento de 4 mm com distância de hastes de 70 mm.

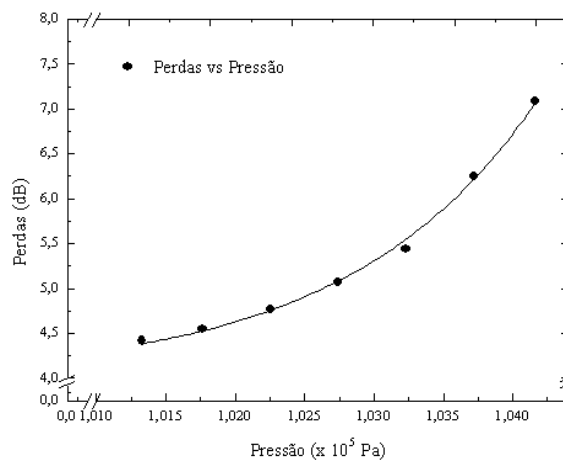


Fig. 3. 19 - Relação entre a pressão e as perdas para distância de hastes de 70 mm.

Relativamente às perdas encontradas em função da pressão, verificou-se que tal como esperado a pressão é directamente proporcional à altura da água. Por exemplo, quando uma fibra “hetero-core” apresenta uma perda de 5 dB, a pressão exercida é cerca de 102,55 kPa correspondendo a uma altura de água aproximada de 150 mm. Quando se encontra a 300 mm de altura, a pressão encontrada foi de 104,50 kPa.

As perdas obtidas quando a fibra “hetero-core” com segmento $L = 4$ mm foi curvada com o deslocamento de uma carruagem (Fig. 3. 13) aproximam-se das perdas encontradas quando a fibra é sujeita a uma deformação devido à altura de água, por este motivo, comprova-se que o deslocamento entre 0 e -2 mm é semelhante à altura de água de 0 a 300 mm.

3.3.3. Coluna de água com sensores multiplexados

De acordo com os resultados até agora obtidos e dando seguimento ao desenvolvimento da nossa aplicação, decidiu-se implementar o seguinte esquema demonstrado na Fig. 3. 20, usando sempre a mesmo segmento ($L= 4$ mm em fibra multimodo – índice em degrau com fibras adjacentes monomodo).

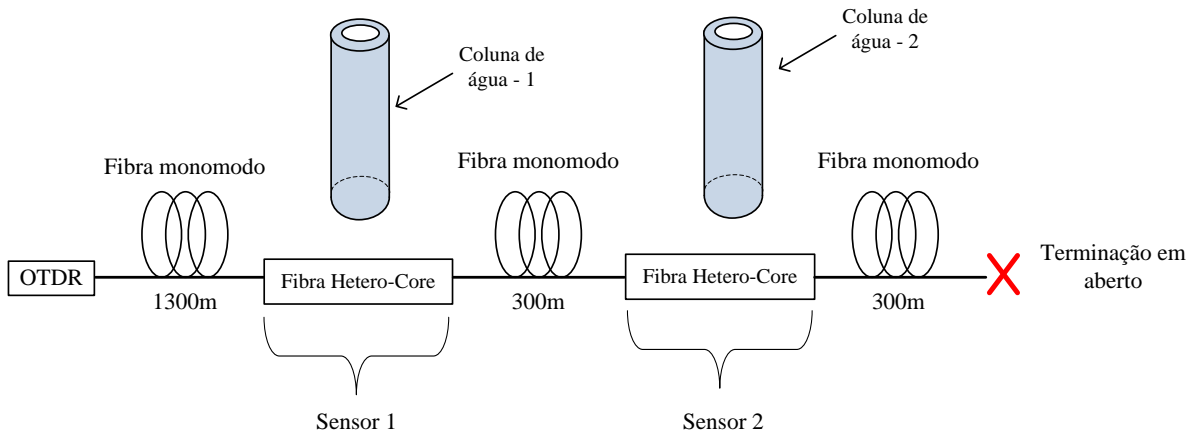


Fig. 3. 20 - Esquema de montagem para a multiplexagem de sensores com fibra “hetero-core” com duas colunas de água.

Adicionou-se uma segunda coluna de água idêntica à primeira, para a colocação de mais um sensor com fibra “hetero-core” em série, sensor 1 e sensor 2.

A distância usada entre as hastes para suporte da fibra “hetero-core” foi de 70 mm. Na Fig. 3. 21 a) é possível verificar o material usado para a multiplexagem. Na Fig. 3. 21 b) visualizam-se os tubos de acrílico com as hastes distanciadas de 70 mm e próximas do fundo do tubo.

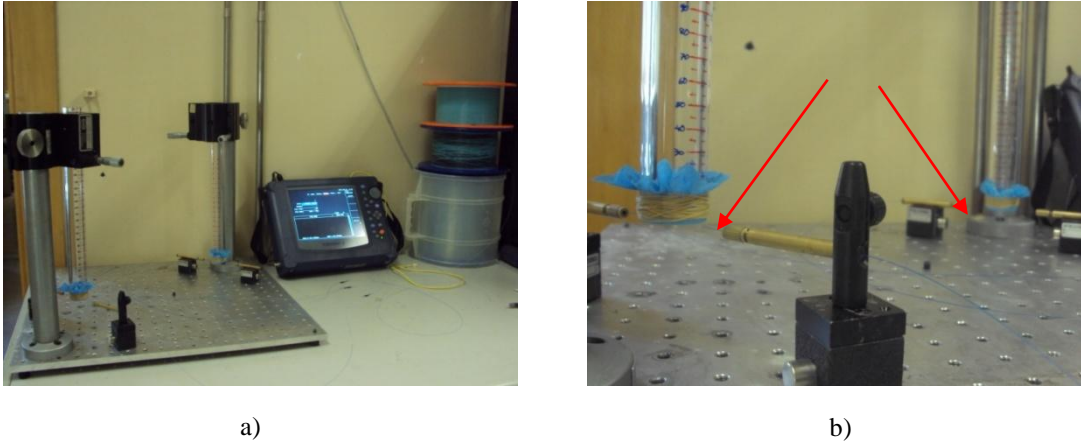


Fig. 3. 21 - Vista geral da configuração dos sensores em série. b) Duas colunas de água e hastes colocadas.

Para distância de hastes de 70 mm, aplicando-se água apenas no tubo cilíndrico que continha o sensor 1 (Fig. 3. 22 a)), observou-se, de acordo com o esperado, que as perdas no sensor 1 aumentaram consoante o aumento da altura de água no tubo. O tubo cilíndrico que continha o sensor 2 não foi sujeito a nenhuma acção, daí que as suas perdas se tenham mantido constantes e próximas dos 4,5 dB (Fig. 3. 22 a)). Com este resultado, notou-se que os sensores são independentes entre si, havendo a possibilidade de inclusão de mais sensores com fibra “hetero-core”.

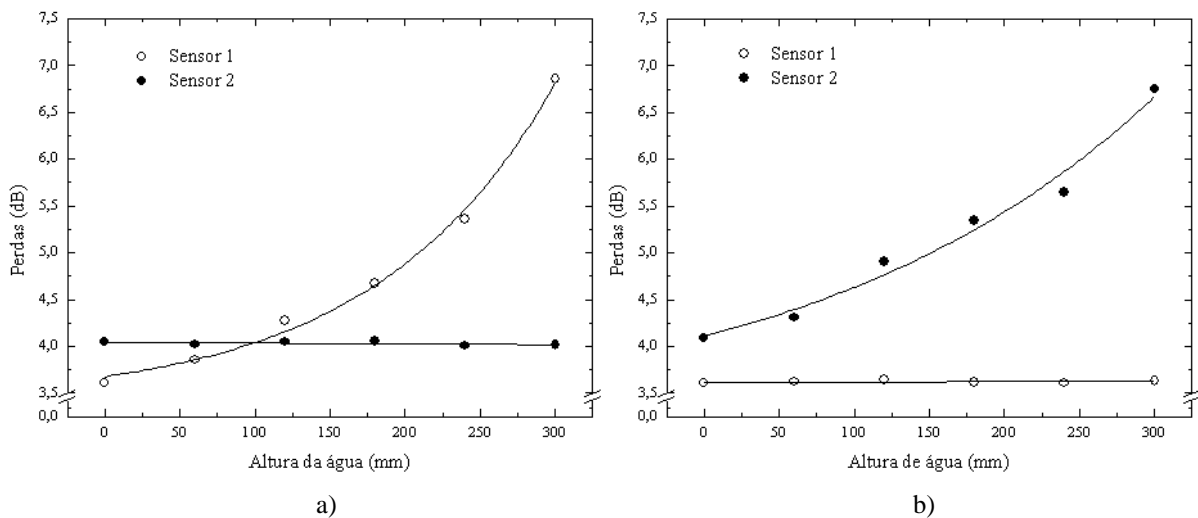


Fig. 3. 22 - a) Sensor 1 sujeito a pressão devido ao aumento da coluna de água; Sensor 2 imobilizado. b) Sensor 2 sujeito a pressão devido ao aumento da coluna de água; Sensor 1 imobilizado.

Ao introduzirmos apenas água no tubo cilíndrico do sensor 2, obteve-se um aumento das perdas e da pressão consoante o aumento da altura de água no tubo cilíndrico. O sensor 1 manteve-se ao longo deste processo com perdas de 3,8 dB, conforme ilustra a Fig. 3. 22 b).

O número de sensores possíveis de introduzir num sistema em série como o apresentado irá depender principalmente da perda máxima que cada sensor é sujeito e pela gama dinâmica do OTDR. Neste caso, para uma gama dinâmica do OTDR de 35 dB, para o comprimento de onda de 1550 nm e uma perda máxima de 7 dB por sensor, conclui-se que o sistema apresentado tem capacidade de suportar cinco sensores idênticos em série, capazes de serem monitorizados de forma independente.

Em síntese, demonstrou-se que com o uso da fibra “hetero-core” é possível haver reprodutibilidade entre os processos de curvatura e de estiramento num deslocamento de -2 mm. Ao longo deste estudo excluíram-se alguns segmentos L devido à sua fragilidade quando impostos a curvaturas, como foi o caso dos segmentos $L = 1$ mm e $L = 2$ mm.

Através das várias experiências, encontrou-se o segmento ideal, o segmento $L = 4$ mm constituído por uma fibra multimodo – índice em degrau (50/125 μm) sendo o que apresentou uma melhor relação entre sensibilidade e perda induzida.

Além disso, verificou-se a possibilidade de multiplexação independente das fibras “hetero-core”, sendo possível, numa configuração similar à implementada, dispor de um máximo de cinco sensores em série. Este sensor de pressão baseado na curvatura de uma fibra “hetero-core” demonstrou que é possível relacionar a pressão com as perdas de potência.

No entanto, ao longo das experiências efectuadas, a implementação das fibras “hetero-core” no tanque de percolação tornam-se numa solução pouco viável. Por um lado, as fibras “hetero-core” não são fáceis de reproduzir de forma igual, ainda mais para 48 sensores. Por outro lado, a necessidade de fixar a fibra em duas extremidades e a obrigatoriedade de um mecanismo elástico para retornar à sua posição inicial foram factores desfavoráveis para a implementação de sensores de pressão, baseados em fibras “hetero-core”, no tanque de percolação existente na FEUP.

Dado a estes factores, progredimos o estudo para um sistema de lentes GRIN em conjunto com superfícies reflectoras para monitorização da pressão no tanque de percolação.

4. Sensor de pressão baseado em lentes GRIN em conjunto com superfícies reflectoras

A utilização das fibras “hetero-core” num tanque de testes de fenómenos de percolação da água nos solos tornar-se-ia difícil de implementar, dado o número de componentes de sustentação do sensor. Por outro lado, as lentes GRIN em conjunto com superfícies reflectoras permitem ultrapassar estas dificuldades. As lentes GRIN em conjunto com superfícies reflectoras não necessitam de hastes, nem de mecanismos elásticos para fazer retornar a fibra ao seu estado original (esticada).

Com recurso a uma lente GRIN e um espelho pretendeu-se inicialmente alinhá-los, para que o feixe óptico que atravessa a lente seja capaz de ser captado novamente depois de atingir a superfície reflectora. O movimento do espelho simula a aplicação de pressão a uma superfície reflectora. Ou seja, o efeito de pressão fará deslocar o espelho. O OTDR foi o equipamento escolhido para determinar a potência obtida por esta configuração.

Com base neste princípio, tentou-se encontrar a melhor configuração para que possa ser usada como um sensor de pressão/intensidade numa aplicação onde terá de existir a multiplexagem de vários sensores. Esta multiplexagem irá ser testada utilizando acopladores e um comutador óptico.

Como já foi referido, a emissão e monitorização ficou a cargo do OTDR com um comprimento de onda da luz emitida de 1550 nm. A fibra óptica usada para ligar o OTDR à lente GRIN foi uma fibra óptica monomodo (9,65/125 μm).

4.1. Alinhamento

A lente GRIN escolhida tem um comprimento de onda de operação de 1550 nm, colima o feixe óptico e permite uma potência óptica máxima de 300 mW. Assim, colocou-se diante da lente GRIN um espelho plano com capacidade de redireccionar o feixe óptico de volta para a lente. É possível deslocar o espelho para a esquerda e para direita, para cima e para baixo, assim como para trás e para a frente. É também possível variar a sua inclinação (Fig. 4. 1).

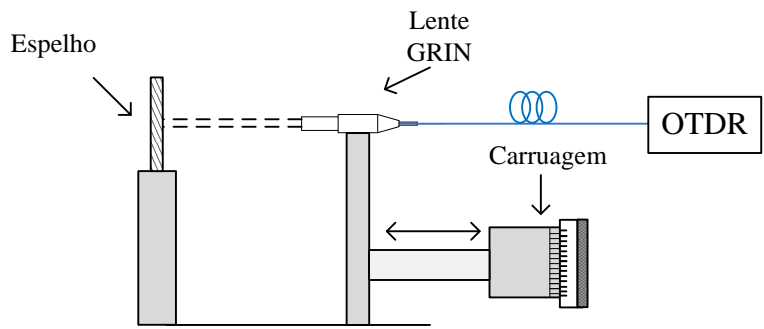
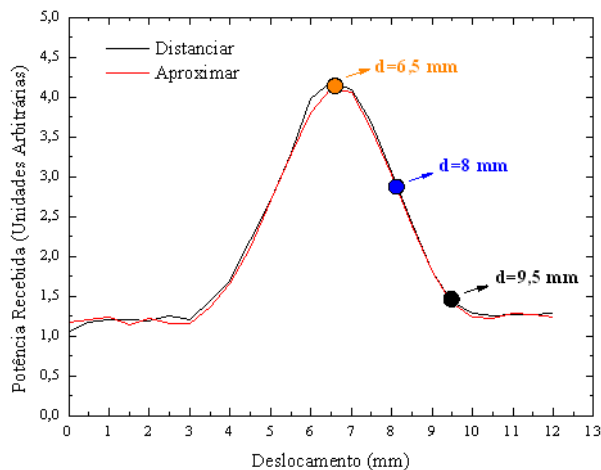


Fig. 4. 1 - Esquema de montagem entre a lente GRIN com o espelho.

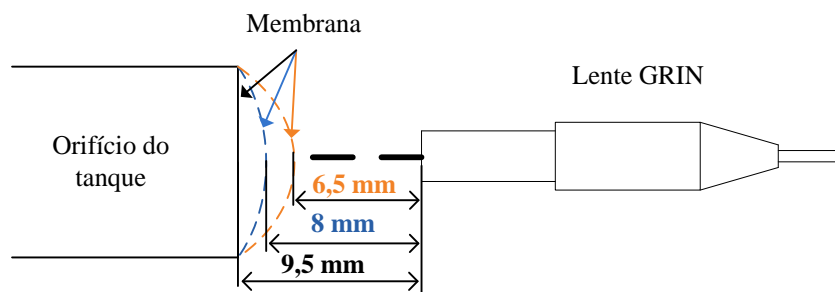
O espelho é plano e tem uma superfície reflectora primária (Fig. 2. 16 b)) encontrando-se fixo a uma haste metálica assim como a lente GRIN. O seu alinhamento é crucial para que esta implementação resulte, visto que parte do feixe óptico em função da pressão necessita de ser captado pela lente para que o OTDR identifique, sob a forma de reflexão, a potência do sinal óptico reflectido (Fig. 4. 2 a)). A distância que a lente GRIN percorre na carruagem pretende simular a deformação de uma membrana com superfície reflectora devido à alteração de pressão.

Torna-se necessário relacionar os parâmetros de pressão, potência e deslocamento para que possamos obter uma correcta monitorização do sensor e para que seja possível avaliar o desempenho individual de cada sensor numa rede de sensores.

Numa primeira abordagem, com os componentes da configuração da Fig. 4. 1, tratou-se de otimizar o alinhamento entre o espelho e a lente, afastando-se a lente GRIN do espelho em pequenos decrementos, Fig. 4. 2.



a)



b)

Fig. 4. 2 – Correspondência entre a potência e a deformação da membrana. a) Potência referente ao afastamento da lente GRIN em função do deslocamento. b) Previsão da deformação da membrana no orifício do tanque.

Os resultados de potência na Fig. 4. 2 a) foram obtidos quando uma lente GRIN se distancia e aproxima de um espelho, demonstrando a sua reprodutibilidade. Verificou-se que a potência é máxima quando a lente se encontra a 6,5 mm do espelho, o que em termos de implementação da lente no tanque indica-nos que a membrana estará mais próxima da lente GRIN. Quando a potência for mínima corresponderá à distância 9,5 mm. Quando a deformação da membrana estiver distanciada de 8 mm da lente GRIN será o ponto intermédio do declive (Fig. 4. 2 b)).

Como já foi referido, a distância que uma lente GRIN percorre com auxílio de uma carruagem pretende simular o deslocamento da membrana reflectora. Apesar da configuração testada ser uma aproximação da configuração final, ela permite uma maior facilidade de teste.

Assim, para qualquer configuração que usarmos no futuro, começaremos por alinhar a lente GRIN e o espelho a uma distância de 6,5 mm, uma vez que esta distância é a que nos

garante que a lente ao afastar-se do espelho, a potência recebida irá diminuir e que ao aproximar-se a potência irá aumentar gradualmente. Esta distância ideal de 6,5 mm será de agora em diante o nosso ponto inicial (0 mm) para a caracterização do desempenho das lentes GRIN em conjunto com uma superfície reflectora.

4.2. Teste de sensor único baseado numa lente GRIN e respectiva superfície reflectora

Após termos preparado os componentes, tratou-se de implementar a configuração da Fig. 4. 3.

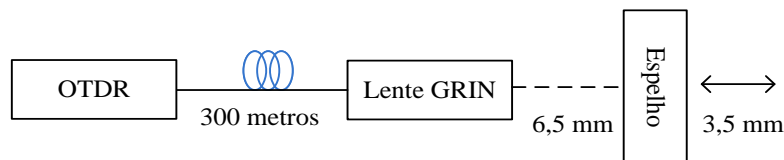


Fig. 4. 3 - Esquema de montagem do OTDR, lente GRIN e o espelho.

O comprimento do rolo de fibra óptica, que estava conectada entre o OTDR e a lente GRIN não excedeu os 300 metros. Este comprimento de fibra óptica destina-se a ultrapassar a zona morta do OTDR. No sinal de retorno do OTDR a zona de interesse foi a reflexão de *Fresnel* associada ao final da fibra, como mostra a figura seguinte. As perdas obtidas, em função da distância entre o espelho e a lente GRIN, são calculadas através da diferença entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo da reflexão, tal como indicado na Fig. 4. 4.

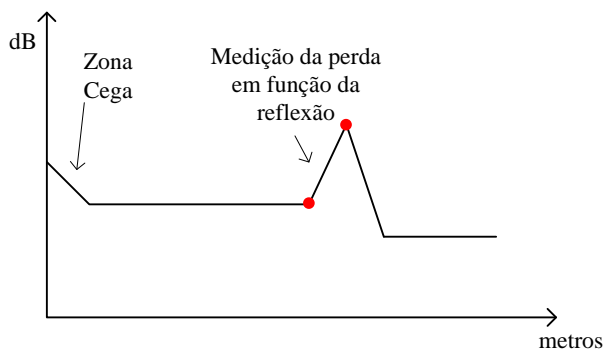


Fig. 4. 4 - Exemplo do método de obtenção das perdas da lente GRIN no espectro do OTDR.

Dispondo os componentes como ilustra a Fig. 4. 5, começou-se por alinhar a lente GRIN. Para este caso afastou-se a lente do espelho como também aproximou-se a lente com o mesmo incremento e com auxílio de uma carruagem. Tal como referido anteriormente, a posição de 0 mm corresponde à distância inicial de 6,5 mm entre a lente GRIN e o espelho.

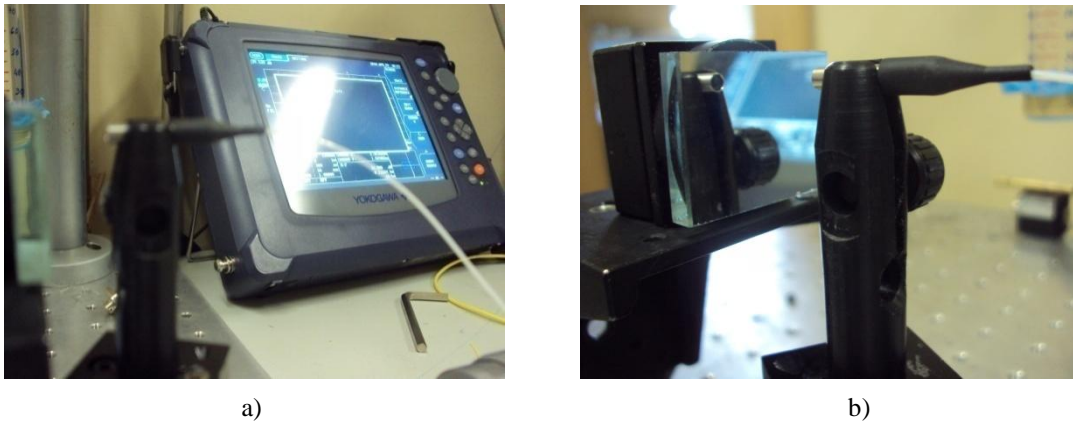


Fig. 4. 5 - a) Lente GRIN e OTDR. b) Lente GRIN em frente ao espelho.

Houve necessidade mais uma vez de verificar a reprodutibilidade dos resultados apenas para o deslocamento de 3,5 mm. Os resultados estão apresentados na Fig. 4. 6, onde se mostra as perdas em função do deslocamento.

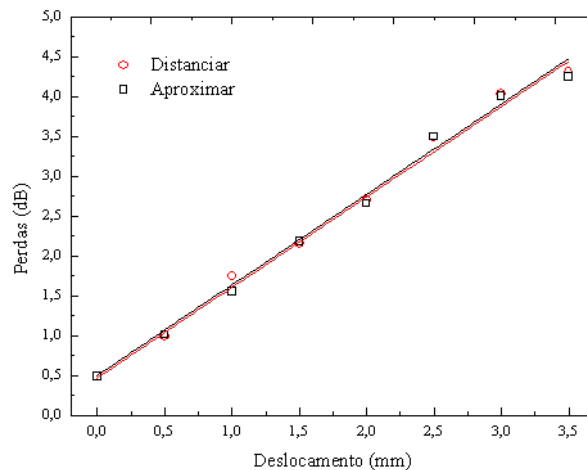


Fig. 4. 6 – Perdas referentes ao afastamento da lente GRIN em função do deslocamento.

Nesta experiência de um sensor único obteve-se uma boa reprodutibilidade dos resultados comprovando que o processo de distanciar e aproximar o comportamento das perdas é idêntico e mais estável que a fibra “hetero-core”. Também observou-se que ocorreu um aumento das perdas quando a lente afastou-se do espelho. Assim, para uma perda de cerca de

4,3 dB (aproximadamente) indicará que a membrana se encontra no estado inicial sem qualquer tipo de deformação (Fig. 4. 2 b)) e que a pressão indicada será de 101, 30 kPa. Para uma perda de 1,1 dB a membrana encontrar-se-á a 6,5 mm de distância da lente GRIN e com uma pressão máxima.

4.3. Multiplexagem de sensores baseados em lentes GRIN e superfícies reflectoras

Com vista a utilização de vários sensores, com recurso às lentes GRIN em conjunto com superfícies reflectoras, foram utilizados acopladores de 2:1 e 4:1 e um comutador óptico. Pretende-se verificar a independência dos sensores para a utilização nos 48 orifícios do tanque de estudo dos fenómenos de percolação da água nos solos.

4.3.1. Acoplador 2:1

O acoplador opera no comprimento de onda de 1550 nm, sendo este o comprimento de onda que foi emitido pelo OTDR. Utilizaram-se duas lentes GRIN com as mesmas características e distanciadas de 90 metros para que as reflexões não estivessem sobrepostas, tal como se apresenta na Fig. 4. 7. Em ambos os casos, como posição inicial de medida, colocaram-se os sensores a 6,5 mm de distância entre a lente GRIN e o espelho, à semelhança do que já tínhamos referido no sub-capítulo 4.1.

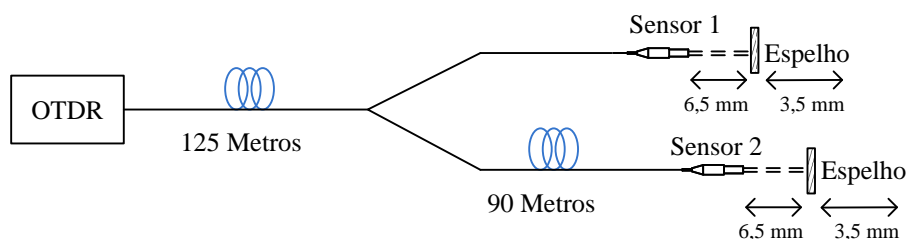


Fig. 4. 7 - Esquema de montagem com acoplador de 2:1.

Os componentes usados em laboratório podem ser visualizados na Fig. 4. 8 na fase de colocação na carruagem e preparação para distanciar do espelho.

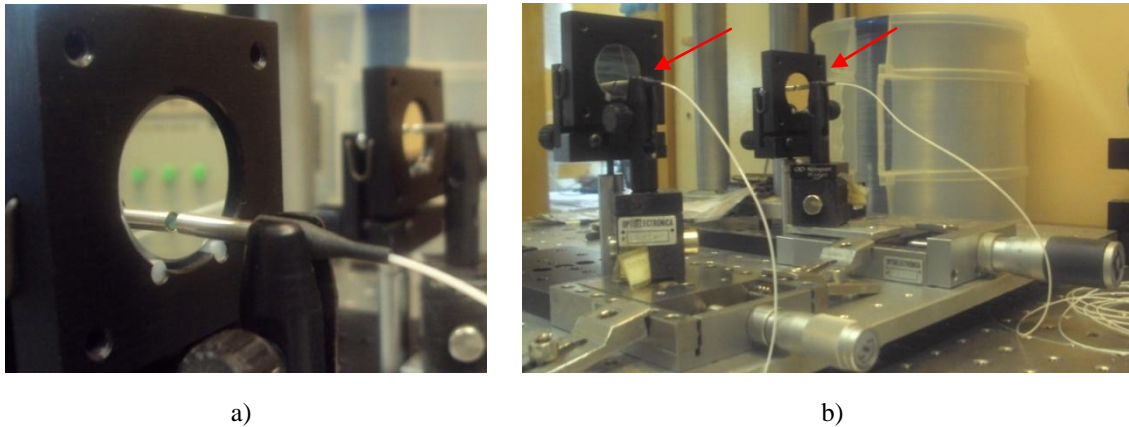


Fig. 4. 8 - Multiplexagem de sensores com recurso a lentes GRIN e superfícies refletoras. a) Colocação do sensor 1 próximo ao espelho. b) Setas indicam o sensor 1 e sensor 2 em conjunto com as respectivas carruagens.

Em primeiro lugar, dispuseram-se as lentes a 6,5 mm de distância dos espelhos e de seguida aplicou-se um incremento à carruagem que continha o sensor 1 afastando-o do espelho até um deslocamento suplementar de 3,5 mm e deixou-se o sensor 2 totalmente imobilizado à distância de 6,5 mm do espelho.

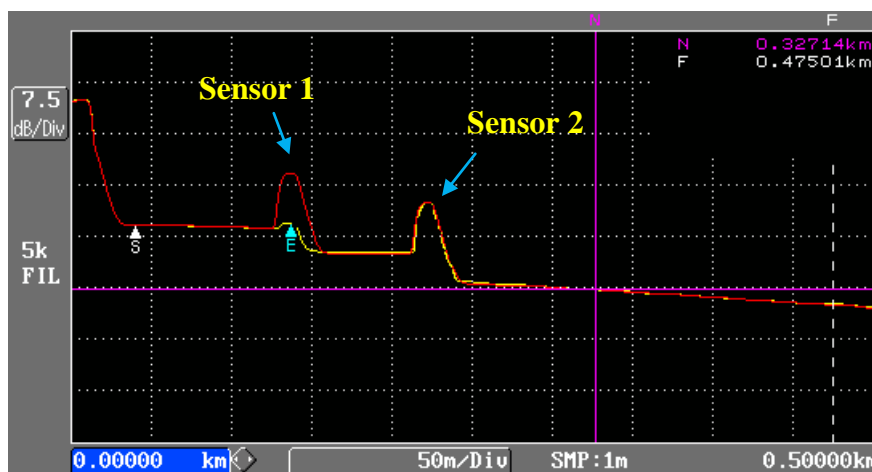


Fig. 4. 9 – Resultados do OTDR com acoplador 2:1 quando sensor 1 é deslocado.

A linha amarela indica o estado final do deslocamento e a linha vermelha o estado inicial do processo. De seguida, o sensor 2 foi deslocado e o sensor 1 imobilizado.

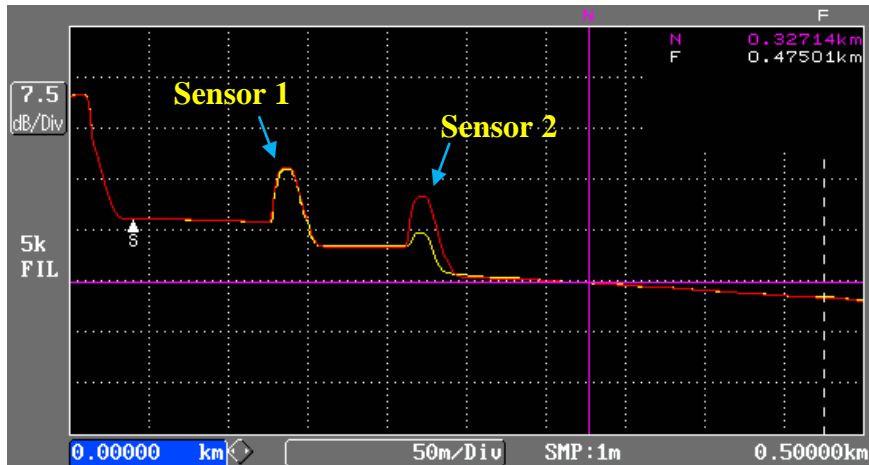


Fig. 4. 10 - Resultados do OTDR com acoplador 2:1 quando o sensor 2 é deslocado.

Nestas figuras, o traço a vermelho corresponde à situação inicial de mínima perda e o traço a amarelo corresponde à situação final de máxima perda. Relativamente aos valores de perdas de potência para o sensor 2 em função do deslocamento imposto, verificou-se que foram bastante semelhantes quer na direcção de afastamento da lente ao espelho, quer na direcção de aproximação da lente ao espelho, tal como se ilustra na Fig. 4. 11.

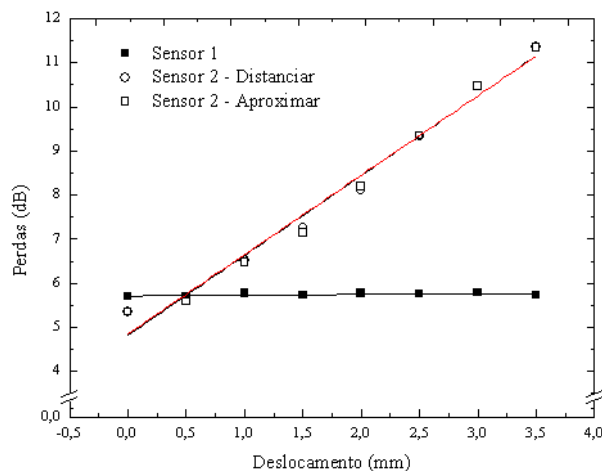


Fig. 4. 11 - Perdas obtidas quando o sensor 2 efectuou nos dois sentidos o deslocamento de 0 a 3,5 mm, enquanto o sensor 1 permaneceu imobilizado.

Verificou-se que o sensor 1 e o sensor 2 têm comportamentos independentes, o que faz com que seja possível o seu funcionamento sem que o comportamento de um interfira no outro. Por outro lado, quando se moveram os dois sensores ao mesmo tempo, verificou-se

também que não ocorreram interferências de sinal, mantendo a sua independência e validando a sua multiplexagem.

4.3.2. Acoplador 4:1

Experimentou-se também a utilização de um acoplador de 4:1, de comprimento de onda de operação de 1310 nm, com o mesmo tipo de lentes GRIN e superfícies reflectoras, anteriormente utilizadas. Nesta configuração, em vez de dois sensores, utilizaram-se quatro sensores, de acordo com o que é apresentado na Fig. 4. 12.

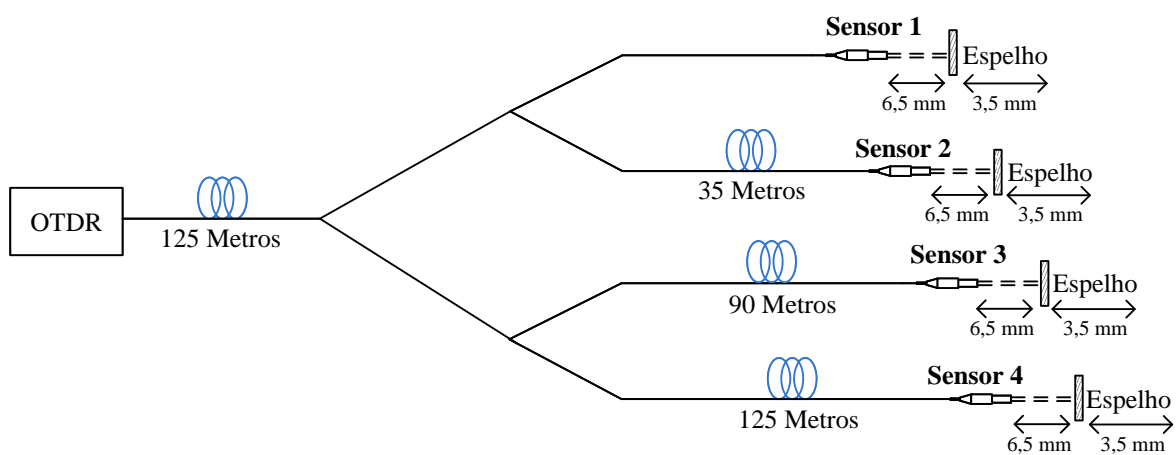


Fig. 4. 12 - Esquema de montagem com o acoplador de 4:1.

Usaram-se quatro carruagens e quatro lentes GRIN em conjunto com diferentes comprimentos de fibra óptica para não haver sobreposição de leitura dos sensores no OTDR. Na figura seguinte apresentam-se as quatro lentes GRIN diante dos respectivos espelhos.

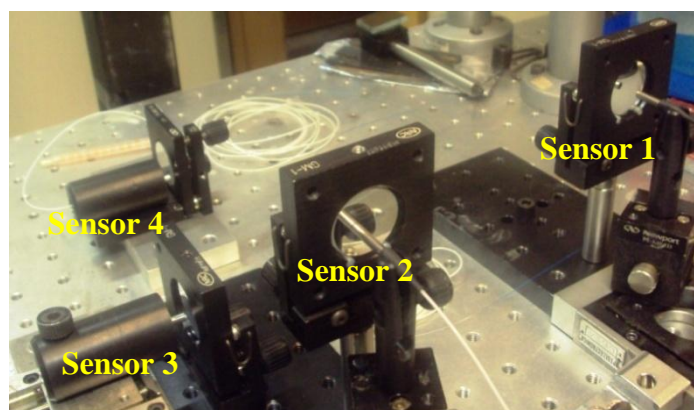


Fig. 4. 13 - Montagem experimental dos 4 sensores usados no acoplador de 4:1.

Tal como aconteceu anteriormente, tratou-se de afastar a lente referente ao sensor 1 com um deslocamento suplementar de 3,5 mm, as outras três lentes imóveis à distância de 6,5 mm do espelho (0 mm). Repetiu-se o mesmo procedimento para cada uma das lentes e verificou-se a possibilidade da multiplexagem dos vários sensores através das lentes GRIN com superfícies reflectoras. Obteve-se o seguinte resultado do OTDR, expresso na Fig. 4. 14.

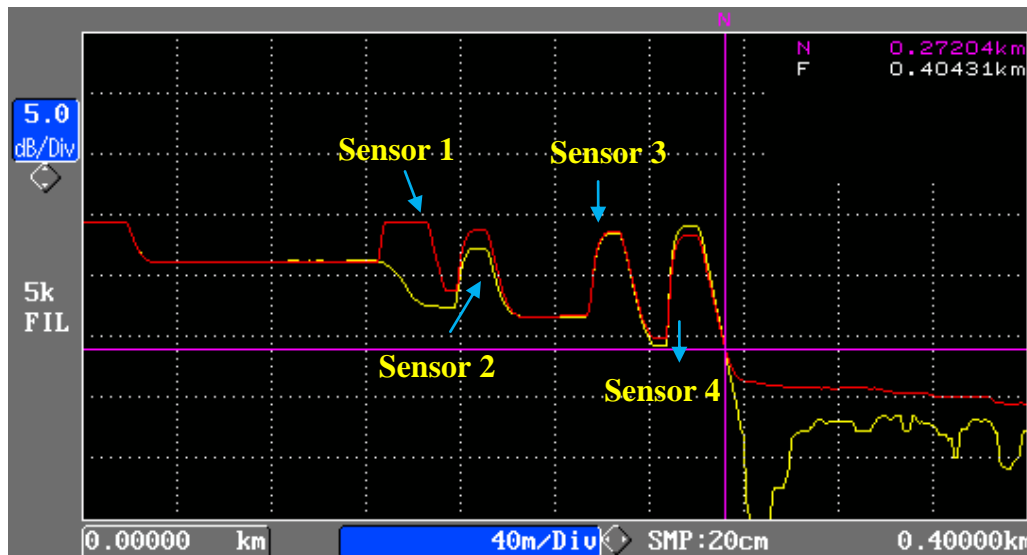


Fig. 4. 14 - Resultado obtido no OTDR quando o sensor 1 encontrava-se em deslocamento e os restantes sensores permaneciam imóveis. O traço a vermelho corresponde à situação inicial de mínima perda e o traço a amarelo corresponde à situação final de máxima perda.

Sobrepondo os gráficos, com a linha vermelha a demonstrar a situação inicial e a linha amarela quando o sensor 1 encontrava-se no máximo deslocamento (3,5 mm), notou-se que alguns sensores, nomeadamente o sensor 2 e sensor 4, diminuíram quando sensor 1 foi deslocado.

Devido à comprovada existência de *crosstalk* entre os sensores, na utilização da configuração com o acoplador de 4:1, optou-se pela utilização de um comutador óptico que a seguir se descreve.

4.3.3. Comutador Óptico

O comutador óptico utilizado possui um elemento óptico móvel, lente interna, como mecanismo de comutação. Este mecanismo permite comutar a luz guiada por uma fibra para

uma ou mais portas alternativas com recurso a um motor eléctrico de passo. Existem no mercado comutadores ópticos que facilmente satisfazem os nossos requisitos.

O comutador óptico utilizado neste trabalho foi o *JDS SC SERIES Fiber Optic Series* que contém 9 portas disponíveis para comutação com uma perda máxima de inserção de 0,7 dB. Os comprimentos de onda de funcionamento foram de 1310 e 1550 nm.

Em primeiro lugar, testaram-se todas as portas do comutador óptico para verificar se todas as portas apresentavam o mesmo comportamento. Como forma de teste, conectou-se um sensor em cada uma das portas de saída (Fig. 4. 15) e procedeu-se ao afastar de uma lente GRIN de um espelho à semelhança do que já tínhamos realizado anteriormente.

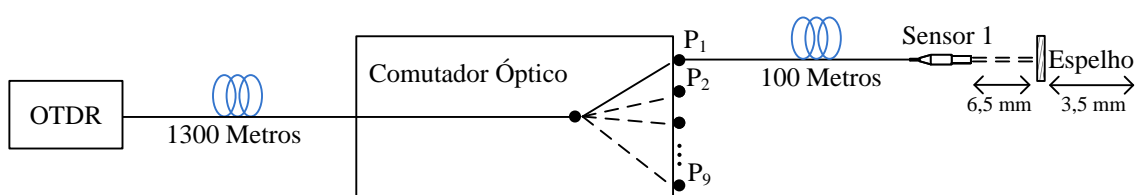


Fig. 4. 15 - Esquema de montagem para um sensor e uma superfície reflectora.

Utilizou-se o OTDR para visualizar os resultados desta experiência, o comprimento de onda usado foi de 1550 nm.

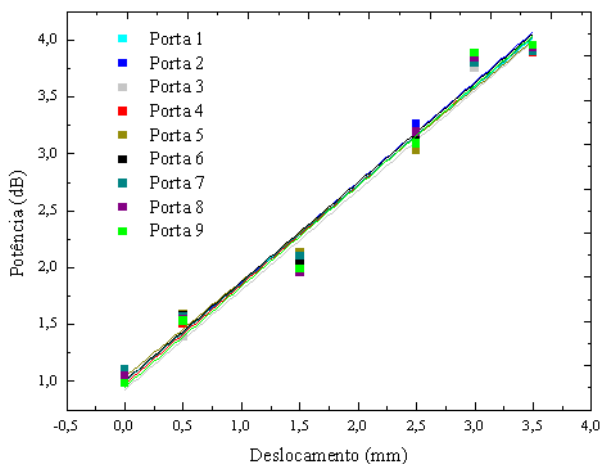


Fig. 4. 16 - Comparação das perdas em cada porta do comutador.

Verificou-se que as perdas obtidas no sensor nas diferentes portas do comutador óptico foram bastante semelhantes. Os resultados obtidos comprovam o bom funcionamento do

comutador assim como a reprodutibilidade das perdas do sensor nas diferentes portas do comutador óptico.

Em seguida, utilizou-se o comutador óptico conectando a dois sensores baseados em lentes GRIN e superfícies reflectoras conectados em portas distintas. Se com dois destes sensores se conseguir obter independência face às várias portas existentes, é expectável que ao introduzirmos um maior número de sensores também estes serão independentes. A Fig. 4. 17 ilustra o esquema de montagem da experiência.

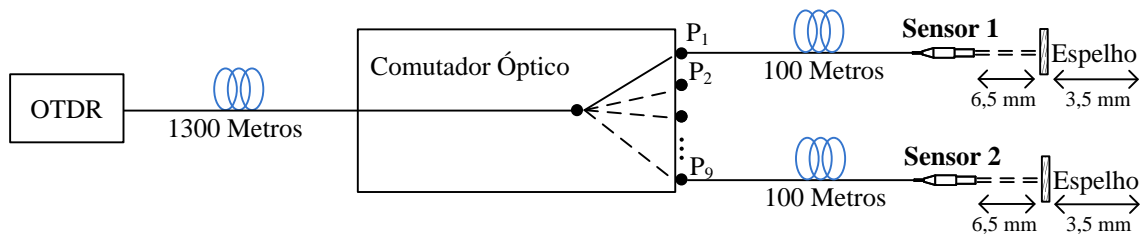


Fig. 4. 17 - Esquema de montagem do comutador óptico para dois sensores baseados em lentes GRIN e superfícies reflectoras.

Deslocou-se o sensor 1 ao longo da carruagem e o sensor 2 fixou-se a 6,5 mm de distância do espelho. Inverteram-se as situações deslocando o sensor 2 ao longo da carruagem e o sensor 1 fixou-se a 6,5 mm de distância do espelho. Os resultados podem ser vistos na Fig. 4. 18.

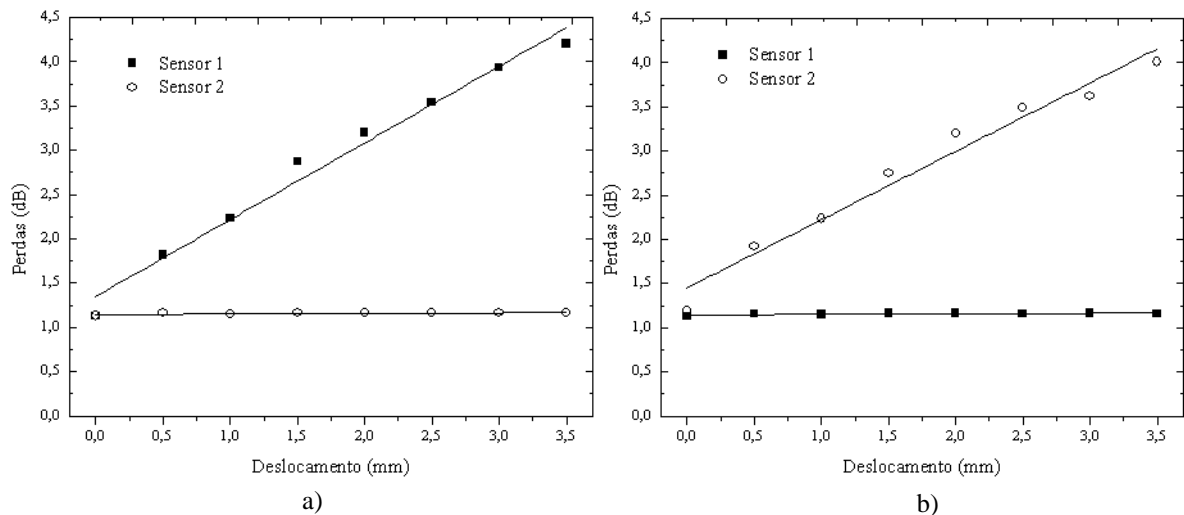


Fig. 4. 18 - Independência dos sensores. a) Sensor 1 imposto a deslocamento; Sensor 2 imobilizado. b) Sensor 2 imposto a deslocamento; Sensor 1 imobilizado.

Como era esperado, observou-se total independência entre os sensores 1 e 2. Notou-se que na utilização do comutador óptico para a multiplexagem, as perdas em cada sensor são mais baixas comparativamente à utilização de um acoplador de 2:1, uma vez que a sua perda por inserção devido à divisão de potência é menor. Na Fig. 4. 19, é possível verificar o resultado obtido no OTDR para esta configuração.

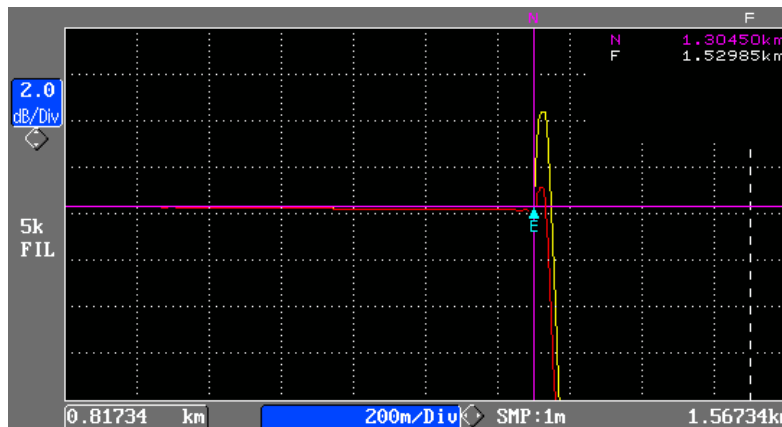


Fig. 4. 19 - Resultado obtido no OTDR quando o sensor 1 se encontrava afastado e próximo do espelho.

Linha vermelha indica sensor afastado do espelho, linha amarela sensor próximo do espelho.

Se pensarmos sob o ponto vista de implementação no tanque de estudo dos fenómenos de percolação da água nos solos, uma pequena deformação que a membrana irá obter devido à pressão da água será registado pelo OTDR através das perdas. Em termos de valores de pressão, para uma perda máxima de cerca de 4 dB representará uma pressão de 101,30 kPa. Para uma perda mínima de cerca de 1,5 dB representará uma pressão de 104,50 kPa.

Concluindo, para o uso do sensor no tanque de estudo da percolação da água nos solos, escolheu-se o comutador óptico como a melhor configuração para monitorização da pressão.

Neste capítulo, a utilização de lentes GRIN com superfícies reflectoras permitiu uma operação intrinsecamente mais estável e mais reproduzível. Assumiu-se que esta aproximação e distanciamento da lente GRIN ao espelho é semelhante ao afastarmos a superfície reflectora e fixarmos a lente GRIN.

Assim, dispendo-se num orifício uma membrana elástica com capacidade de reflectir um feixe óptico de novo para a lente, o OTDR registará essas perdas. Posteriormente, com recurso à equação (2. 3), será efectuado a calibração entre a pressão exercida, a altura de água

e as perdas obtidas. À partida, só foi possível determinar a pressão para 0 mm de deslocamento que corresponde a 101,30 kPa.

Conseguiu-se também verificar a independência da multiplexagem através do uso de acopladores de 2:1 e de 4:1. No entanto, a presença de *crosstalk* no acoplador de 4:1 foi um factor determinante para que a sua utilização fosse rejeitada.

Com o uso de um comutador óptico, também verificou-se a possibilidade de monitorizarmos vários sensores de forma totalmente independente e sem necessidade de utilização de rolos de fibra extra, elegendo-se a utilização do comutador como a melhor configuração de multiplexagem para aplicar no tanque de estudo dos fenómenos de percolação da água nos solos.

5. Conclusões

Esta dissertação consistiu no estudo e procura do melhor sensor de pressão para ser incorporado num tanque que serve de estudo para os fenómenos de percolação.

A fibra “hetero-core” revelou-se como sendo um sensor de realização fácil e de baixo custo. O longo processo de escolha do melhor segmento levou-nos a escolher o segmento L que é constituído por uma fibra multimodo de índice em degrau (50/125 μm) e de 4 mm de comprimento. As fibras adjacentes são fibras monomodo de 9,65/125 μm . As fibras “hetero-core” com segmentos inferiores a 3 mm apresentam um risco de quebra substancial. Por outro lado, os segmentos maiores apresentam uma elevada perda de inserção.

Foi ainda possível demonstrar a capacidade de multiplexação com este tipo de sensor. No entanto, a necessidade de fixar este sensor em duas extremidades, afastadas de 70 mm, revelou ser um facto negativo para a sua implementação no tanque de estudo dos fenómenos de percolação da água nos solos, uma vez que os orifícios existentes no tanque não ultrapassam os 10 mm.

Todavia, os resultados obtidos poderão ser interessantes para outras implementações em que se exija um sensor de pressão de fácil montagem, com baixos custos e onde exista pelo menos a possibilidade de fixação das hastes.

Com o intuito de encontrar outro sensor com baixo custo de implementação, surgiu a possibilidade de utilização das lentes GRIN em conjunto com superfícies reflectoras. Esta configuração é de fácil montagem e apresenta uma boa resposta aos parâmetros de medida pretendidos. Embora seja necessário algum tempo para o seu alinhamento, após ultrapassado este ponto todo o restante processo tornou-se bastante simples.

Para a multiplexagem de um elevado número de sensores, a utilização de um comutador óptico poderá ser uma boa opção. Em especial, pelo facto de se poder efectuar a leitura de cada sensor de forma individual, garantindo, desde logo, uma medição independente e sem *crosstalk*. Por outro lado, esta configuração permite também a utilização de sensores com uma maior gama dinâmica de medida.

Conclusões

A necessidade de inovar o método de medição de pressão no tanque de estudo da percolação da água em solos pela utilização de sensores em fibra óptica foi o principal objectivo deste projecto. Assim, este trabalho compreendeu o estudo de sensores de pressão baseados em fibras “hetero-core” e na utilização de lentes GRIN com superfícies reflectoras, bem com a respectiva multiplexação deste tipo de sensores. Contudo, este trabalho irá ser continuado com a utilização de um novo tanque, tendo em conta os resultados apresentados nesta dissertação. Nesse sentido, o novo tanque foi projectado tendo em vista a utilização de sensores ópticos de pressão baseados em lentes GRIN e superfícies reflectoras.

Trabalho Futuro

Pretende-se dar a conhecer algumas propostas de continuação deste projecto sendo possível visualizar na Fig. 5. 1 o tanque de testes, recentemente construído, e realçar alguns aspectos da sua construção.

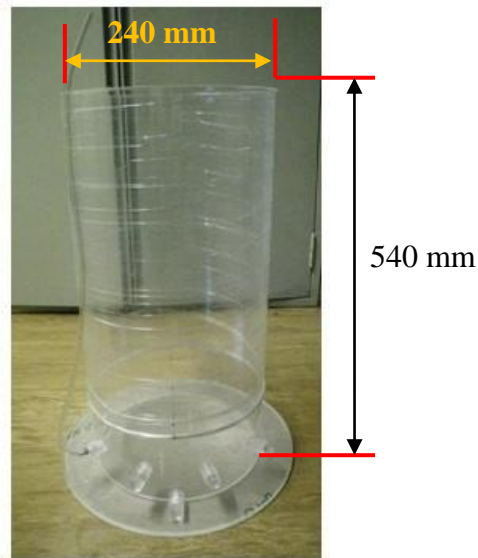


Fig. 5. 1 - Vista geral do novo tanque de testes e respectivas medidas.

O tanque de testes apresenta uma forma cilíndrica com uma altura de 540 mm com cinco orifícios no seu fundo, estando quatro deles ao mesmo nível, como se mostra na Fig. 5. 2 a). Num dos orifícios está conectado um tubo em borracha que servirá de referência à pressão existente no tanque, (Fig. 5. 2 b)).

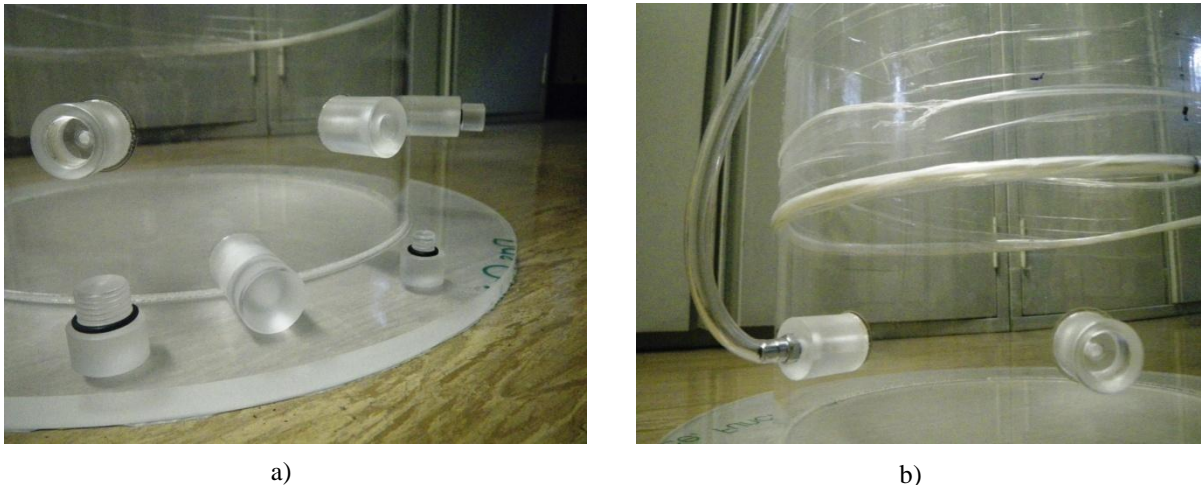


Fig. 5. 2 – a) Abertura dos orifícios de teste no fundo do tanque. b) Orifício conectado ao tubo em borracha para medição de referência da pressão hidrostática.

Os restantes orifícios apresentam larguras diferentes para que fosse dada liberdade de monitorização e colocação de diferentes tipos de membranas. As medidas detalhadas de toda a estrutura poderão ser visualizadas no Anexo E.

Sendo um projecto de dissertação exploratório e que terá continuidade, em futuros projectos, irá proceder-se à realização de testes neste tanque com os sensores de pressão com base em lentes GRIN e superfícies reflectoras. Pretende-se que a lente GRIN esteja fixa e próxima do orifício de forma a emitir um feixe colimado. A membrana que contém uma superfície reflectora, deformará consoante a altura de água que existir dentro do tanque - o exemplo desta deformação já foi visualizado no sub-capítulo 4.1, Fig. 4. 2. A lente GRIN captará esse feixe e será registado por um equipamento óptico de medida de potência óptica. Por fim, será calibrado em função das perdas/deformação da membrana/altura de água.

Não só a implementação dos sensores, bem como os respectivos testes neste tanque, são vistos como uma futura proposta, mas também a realização de um software com capacidade de leitura automática das perdas, tratamento, armazenamento e visualização dos dados poderá constituir uma mais-valia para futuros trabalhos.

Bibliografia

- [1] Jain, S. D., and Sahasrabudhe, G., *Engineering Physics*, 1st ed., India, Universities Press, 2010, pp. 608.
- [2] (Março, 2010) Inforede. [Online]. Disponível em:
http://www.inforede.net/Technical/Layer_1/Cabling/Fiber_Optic_1_%28POR%29.pdf
- [3] Ribeiro, A.B.L., *Esquemas de Multiplexagem de Sensores de Fibra Óptica*, FEUP, Porto, Doutorado, 1996.
- [4] Gouveia, C.J., *Sensores em Fibra óptica para Monitorização Ambiental*, Universidade da Madeira, Mestrado, 2008.
- [5] Pinto, S. R. A., *Monitorização de Infra-Estruturas Físicas usando Redes Sensoriais (Foco na Rede de Transporte e Distribuição de Gás Natural)*, ISEP - Departamento Engenharia Electrónica, Mestrado, 2009.
- [6] Yu, F.T.S., and Yin S., *Fiber Optics*, 1st ed., Pennsylvania, CRC Press, 2002, pp. 449.
- [7] Melashvili, U., Lagundaridze, G. and Tsikarishvili, M., *Controlled Structures with Electromechanical & Fiber Optical Sensor*, New York: Nova Science, 2009, pp.16.
- [8] Gholamzadeh, B. and Nabovati, H., *Fiber Optic Sensors*, World Academy of Science - Engineering and Technology, Vol. 42, 2008.
- [9] (Junho, 2010) Wtec - Optical Sensor Technologies. [Online]. Disponível em:
http://www.wtec.org/loyola/opto/c6_s3.htm.
- [10] Caldas, P. S. A., *Sensores de Fluorescência em Fibra Óptica*, Departamento de Física - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Mestrado, 2003.
- [11] Bunch, B. and Hellemans A., *The History Of Science And Technology*, Houghton Mifflin Harcourt, 2004.
- [12] Bishnu, P., *Fundamentals of Fibre Optics in Telecommunication and Sensor Systems Book Description*, New Age International, 2002.
- [13] Oliveira, J., Ramos, C. A., Frazão, O. and Marques, A. T., *Aplicação de Sensores em Fibra Óptica Embebidos para a Monitorização da Saúde de Estruturas Compósitas*, Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Vol 14, 2007, pp. 89.
- [14] Kashyap, R., *Fiber Bragg Grating*, Academic Press, 1999, pp.117.
- [15] Constantin, G., C., Perrone, Abrate, G. S. and Puscas, N. N., *Fabrication and Characterization of Low-Cost Polarimetric Fiber-Optic Pressure Sensor*, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol.

- 8, 2006, pp. 1635.
- [16] Domanski, A.W., Gorecki, A. and Swillo, M., *Dynamic Strain Measurements by Use of the Polarimetric Fiber Optic Sensors*, Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1995, pp. 816.
- [17] Bock, W.J., Nawrocka, M.S. and Urbanczyk, W., *Highly Sensitive Fiber-Optic Sensor for Dynamic Pressure Measurements Instrumentation and Measurement*, Vol. 50, 2001, pp. 1085.
- [18] Krihak, M. K. and Shahriari M.R., *Highly Sensitive - All Solid State Fibre Optic Oxygen Sensor Based on the Sol-Gel Coating Technique*, Electronics Letters, Vol. 32, 1996, pp. 240.
- [19] Ding, J.Y., Shahriari, M.R. and Sigel, G.H., *Fiber Optic pH Sensors Prepared by Sol-Gel Immobilisation Technique*, Electronics Letters, Vol. 27, 1991, pp. 1560.
- [20] Nishiyama, M., Sasaki, H. and Watanabe, K., *A Deformation Sensitive Pad-Structure with the Hetero-Core Optic Fiber Sensors*, Sensors and Actuators: Physical, Vol. 136, 2007, pp. 205.
- [21] Watanabe, K. and Kubota, Y. *Macrobending Characteristics of a Hetero-Core Splice Fiber Optic Sensor for Displacement and Liquid Detection*, Special Issue on Optical Fiber Sensors, 2000, pp. 309.
- [22] Hiroyuki Sasaki et al., *A Fused System of Sensing and Communication with Hetero-Core Spliced Fiber Optic Sensors*, Electrical Engineering in Japan, Vol. 173, Novembro 2010, pp. 40.
- [23] Okazaki, H., Nishiyama, M. and Watanabe, K., *Specific Vibration Frequency Detection Based on Hetero-Core Fiber Optic Sensing Scheme for Security Environment Monitoring*, IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments, Novembro 2009, pp. 53.
- [24] Nishiyama, M. and Watanabe, K., *Wearable Sensing Glove With Embedded Hetero-Core Fiber-Optic Nerves for Unconstrained Hand Motion Capture*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, 2009, pp. 3995.
- [25] Watanabe, K. and Sasaki, H., *Optical Fiber Sensor Connected to Optical Fiber Communication Line*, Junho, 2009.
- [26] Nishiyama, M., Sasaki, H. and Watanabe, K., *Optical Intensity-Based Measurement of Multipoint Hetero-core Fiber Sensors by the Method of Time-Differentiation in Optical Loss*, IEEE Sensors Journal, Vol. 8, 2008, pp. 1055.
- [27] Nishiyama, M and Watanabe, K., *Single-mode Hetero-core Fiber Optic Bending Sensor Dipped the Liquid with the High Refractive Index*, International Conference on Materials for Advanced Technologies, 2009.
- [28] Abe, N., Shinomiya, N. and Teshigawara, Y., *Optical Fiber Sensor Network Integrating Communication and Sensing Functions Using Hetero-core Spliced Fiber Optic Sensor*, International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2009, pp. 749.

- [29] Arai, Y., Nishiyama, M. and Watanabe, K., *Hetero-core Fiber Optic Binary Sensors Based on Pulse Loss Change With Tandem Connection for Security Network*, IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments, pp. 64, 2009.
- [30] Nose S., Shimono, M., Nishiyama, M. and Kon, T., *Personal Identification Based on Sole Pressure Distribution Using a Hetero-core Optical Fiber Sensor Network for Personal Web Services*, World Conference on Services, 2009.
- [31] Nishiyama, M., Sasaki, H. and Watanabe, K., *Wearable Sensing Clothes Embedding a Hetero-core Optic Fiber for Recognizing Arm Segment Posture and Motion*, 5th IEEE Conference on Sensors, 2006, pp. 1519.
- [32] Norikazu Kumekawa et al., *Detection of Surfactants in Yachi-River Water by Using a Hetero-Core Structured Optical Fiber*, Proceedings of the 46th Chemical Sensor Symposium, Vol. 24, 2008.
- [33] Emiko Kond et al., *Characteristics of Hetero-Core Spliced Fiber Optic Sensor in Simultaneous Utilization of Chemical Sensing and Communications for Monitoring Natural Environment*, Proceedings of the 46th Chemical Sensor Symposium, Vol. 24, 2008.
- [34] Marchand, E. W., *Gradient Index Optics*. Nova Iorque: Academic Press, 1978, pp. vii.
- [35] Wang, H., *Fiber Optic Accelerometer Employing a GRIN Rod Lens*, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 1994, pp. 220.
- [36] Higuera, J. M. L., *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, Technology & Engineering, 2002.
- [37] Driggers, R. G., Hoffman, C. and Driggers, R., *Encyclopedia of Optical Engineering*, Taylor & Francis, 2003, pp. 675.
- [38] Marchand, E. W., *Gradient Index Optics*, 1978, pp. 43.
- [39] Tomlinson, W. J., *Applications Of GRIN Rod Lenses In Optical Fiber Communications System.*, 1980.
- [40] NSG America, *SELFOC Lens Array Technical Notes*. Philadelphia, 1996, pp. 2.
- [41] Sorebo, J.H. and Lorenz, R.D., *Web Inspection Using Gradient-Indexed Optics*, Conference Record of 2005 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2005, pp. 295.
- [42] Gomez, R. C., Perez, M.V. and Bao, C., *Gradient-Index Optics: Fundamentals and Applications*: Springer, 2002, pp. 41.
- [43] (Outubro, 2010) Gradient Index Lens Technology. [Online]. Disponível em :
http://www.grintech.de/gradientenoptik.html?file=tl_files/content/downloads/Introduction_GRIN_Lenses.pdf

- [44] Senior, J. M., *Optical Fiber Communications - Principles and Applications*, 3rd ed., 2009, pp 253.
- [45] Higuera, J. M.L., *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, 2002, pp. 92.
- [46] Senior, J. M. and Jamro, M. Y., *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, 3rd ed., Prentice Hall, 2008, pp. 17.
- [47] Lee, H. C., *Introduction to Color Imaging Science*, Cambridge University Press, 2005, pp.257.
- [48] Higuera, J. M. L., *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*: Maio 2002, pp. 97.
- [49] Warren, J. S., *Modern Optical Engineering: The Design Of Optical Systems*, 4th ed., McGraw Hill, 2007, pp 147.
- [50] Rocha, A. L. and Caputo, M. R. C., *Aplicação do OTDR na Análise de Problemas de Atenuação em Fibras ópticas: Estudo de Casos*, Revista Científica Periódica – Telecomunicações, Vol. 2, 2002.
- [51] Salgado, H. M. C. F. (DEEC - F.E.U.P) H M Salgado. [Online]. Disponível em:
<http://paginas.fe.up.pt/~hsalgado/co/OTDR.pdf>
- [52] Sairam, K.V.S.S.S.S., *Optical Communications*, Laxmi Publications, 2007, pp. 134.
- [53] Kaminow, I. P., Li, T. and Willner, A. E., *Optical Fiber Telecommunications V - Systems and Networks- Volume B*, Academic Press, 2008, pp. 246.
- [54] (Março, 2010) Datasheet Yokogawa. [Online]. Disponível em:
<http://webhard.ajurental.com/support/Manual/AQ7260.pdf>
- [55] (Março, 2010) Datasheet Optokon. [Online]. Disponível em:
http://www.optokon.cz/datasheets/D-Installation_&_Measurements/D1-Test_equipment/D11-OPTOKON_optical_tester/D-111%20800%20series/TEQ_06-07_EN-PM212.pdf
- [56] (Março, 2010) Datasheet Optokon. [Online]. Disponível em:
http://www.comsvit.com.ua/tinyupload/File/Optical_Light_Source_LS_420.pdf
- [57] Ferreira, C. R. C. D. P., *Desenvolvimento de um Equipamento Laboratorial para o Estudo de Problemas de Percolação em Modelo Reduzido*, FEUP, Porto, Mestrado, 2008.
- [58] (Setembro, 2010) WIKA Instruments. [Online]. Disponível em:
http://www.wika.us/home_en_us.WIKA
- [59] Murtagh, M.T., Ackley, D.E. and Shahriari, M.R., *Development of a Highly Sensitive Fibre Optic O₂/DO Sensor Based on a Phase Modulation Technique*, *Electronics Letters*, Vol. 32, 1996.

Bibliografia

- [60] Ye, C., McLeod, R.R., *GRIN Lens and GRIN Lens Array Fabrication With Diffusion-Driven Photopolymer*, Conference on Lasers and Electro-Optics, Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference , 2009, pp. 1.
- [61] Laikin, M., *Lens Design*. CRC PRESS, 2006, pp. 432.
- [62] SELFOC, NSG America, 1984, pp. 11.

Anexos

- A. Comunicações e Publicações decorrentes do trabalho efectuado
- B. Artigo apresentado no “*Symposium On Enabling Optical Networks and Sensors*” – SEON 2010
- C. Poster apresentado à Física 2010
- D. *Datasheet* de uma Lente GRIN
- E. Medidas do novo tanque de estudo dos fenómenos de percolação da água nos solos

A

Comunicações e Publicações decorrentes do trabalho efectuado

Desta dissertação foi possível compilar as seguintes publicações que foram submetidas em Conferências Científicas:

N. Freitas, O. Frazão, J. M. Baptista, J.L. Santos, “*Pressure Sensor based on a Hetero-core Fiber*” apresentado à Symposium On Enabling Optical Networks and Sensors – SEON 2010

Publicação de poster do artigo “*Sensor de Pressão baseado numa fibra “hetero-core”*” Física2010.

B

Artigo apresentado no “Symposium On Enabling Optical Networks
and Sensors” – SEON 2010

Pressure Sensor based on a Hetero-core Fiber

N. Freitas, O. Frazão, J. M. Baptista, J.L. Santos

Abstract — In this paper, we propose a new method of measuring water pressure in a tube with a OTDR and a hetero-core fiber. The water pressure induces strain in the fiber and the OTDR reads those losses. It will be demonstrated its ability to multiplex two sensing devices in series.

This implementation is an interesting alternative for monitoring the pressure of water or other liquids in systems where the accuracy and speed of obtaining the measurement values are important factors.

Keywords- hetero-core; fiber sensor; curvature; pressure; multiplexing;

I. INTRODUCTION

THE hetero-core fiber is a set of optical fibers whose core diameters differs. Usually, it is characterized by a segment L of multimode optical fiber whose diameter is higher than the adjacent fibers. This segment L , is fusion in both extremes to a single-mode fiber thus forming a hetero-core fiber (Fig. 1.1).

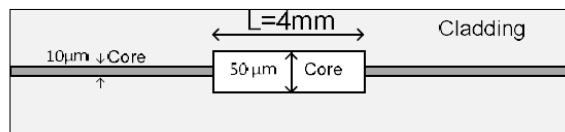


Fig. 1. 1 – Hetero-core fiber structure.

Applying curvature to the hetero-core fiber part of the guided light is lost and attenuation increases. This effect is amplified if the difference between the fiber cores is higher [1].

Such sensors are very flexible, have immunity to interferometric interference, can be used in harsh environments and are insensitive to perturbations of temperature [2].

The OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*) is a measuring instrument which has the ability to detect reflected light due to the phenomenon of Rayleigh scattering or due to reflections, such as the Fresnel reflection.

This measurement instrument sends pulses of light with a wavelength of 1330 nm e 1550 nm, receiving the echoes produced along the fiber.

Manuscript received June 15, 2010. All authors are with the INESC Porto Optoelectronics Unit, Rua do Campo Alegre 687, 4169 007 Porto, Portugal. (Orlando Frazão, +351220402301, ofrazao@inescporto.pt) and J.L. Santos are also with Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. J. M. Baptista and N. Freitas are with the Universidade da Madeira.

II. PROCEDURES AND RESULTS

A. Mounting pressure sensor - hetero-core

An acrylic tube with 300 mm high and 30 mm in diameter was suspended and placed upright with the help of an arm.

The bottom end of the acrylic tube is capped by a rubber membrane with deformation capacity. Along with this membrane is a hetero-core fiber at a distance less than 0.5 mm, placed in order to deform along with the weight of water (Fig. 1.2).

At the top of the tube water was added with a pipette at interval heights of 5 mm up to 290 mm high. At each interval height the value of the losses of the hetero-core fiber was recorded.

The segment L used is made of multimode fiber with core diameter of 50 μm and 4 mm size.

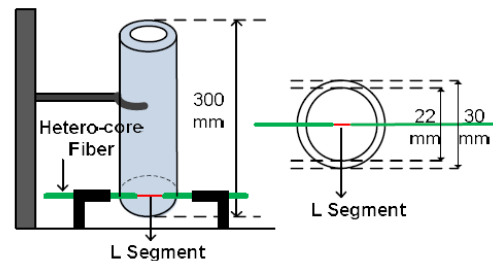


Fig.1. 2 – Pressure sensor device.

The first tests began by placing the rods that support the hetero-core fiber with a distance of 30mm between them, later with a distance of 50 mm, 70 mm and 100 mm. The obtained results were registered and compared.

The wavelength emitted by the laser in OTDR was 1550 nm.

To calculate the water pressure, it was considered the height of the water and with the formula of hydrostatic pressure (equation 1), it was possible to calculate the water pressure that was exerted on the membrane.

$$P - P_0 = \rho gh \quad (1)$$

Being p the water density, g , the gravity, h , the water height, P_0 , the atmospheric pressure ($1,01325 \times 10^5$ Pa) and P the pressure caused by the water.

With the addition of water, it was noted clearly that the higher the water level reached, the greater the deformation of the membrane. Consequently, the hetero-core fiber that was located in the bottom end of the acrylic tube slowly followed the deformation of the membrane as shown in Fig. 1.3.

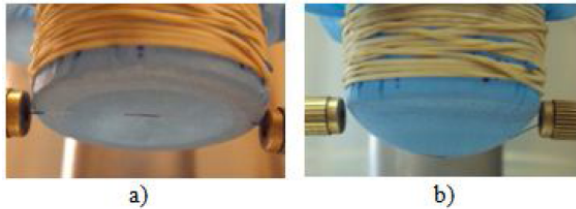


Fig. 1. 3 - Hetero-core fiber and rods. a) Initial state. b) Final state with maximum pressure.

The results obtained for this sensing configuration with a 4 mm segment of multimode fiber and with a 50, 70 and 100 mm distance between rods, respectively, are presented in Fig.1.4.

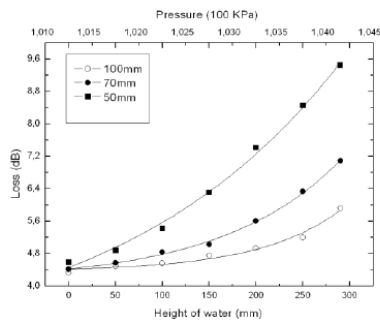


Fig. 1. 4 – Losses for 50 mm, 70 mm and 100 mm distance between rods as function of the water height.

It was found as expected, that with increasing height of water pressure the attenuation in the hetero-core fiber also increased. Similarly, the higher sensitivity was found when the rods were 50 mm away.

It was noted that with increasing distance of the rods, the sensitivity of the sensor was lower.

B. Multiplexing sensing devices

In order to verify the multiplexing capabilities of this type of sensor, two sensing devices S1 and S2 were placed in series.

The sensors were separated by a distance of 100 meters for proper monitoring by the OTDR.

In this configuration, the distance of the rods that support the hetero-core fiber in both sensing devices was 70 mm and the addition of water in the tubes was performed in the same way as previously described.

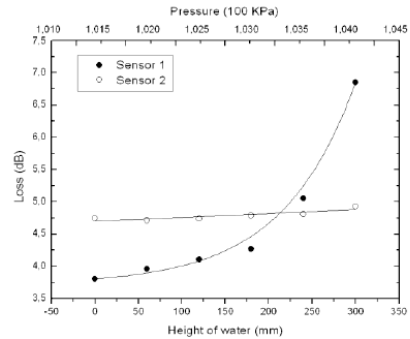


Fig. 1. 5 – Multiplexing sensor 1 and sensor 2.

The cylindrical tube containing sensor 2 was not subject to any action and its losses remained approximately constant (4.75 dB) as it can be seen in Fig.1.5.

By introducing only water in the cylindrical tube sensor 1, we obtained an increase in losses and pressure as the height of water increased in the cylindrical tube. The first sensor kept throughout the process, a loss of 4.1 dB.

With this result it was noted that the sensors are mutually independent, with the possibility of adding more sensors with hetero-core fiber.

III. CONCLUSION

In a single use, the pressure sensor behaved as expected in obtaining an increase in losses and attenuation as the pressure increased.

The best configuration occurs when the rods were 50 mm distance away from each other. Losses quickly grow as the height of water in the acrylic tube increases, getting higher sensibility of the system.

We also multiplexed two sensing devices and they behaved independently. It is expected to multiplex 5 sensing devices, approximately, considering the OTDR dynamic range of around 33 dB and a maximum loss per sensing device of around 7 dB.

Using hetero-core fiber as a pressure sensor, proved to be very reliable, easy to implement, low cost and the capable of multiplex.

In both cases, the sensitivity obtained with the hetero-core fiber may be very interesting in pressure monitoring, for example, in a remote environments or with difficult access.

REFERENCES

- [1] Hiroyuki Sasaki, Michiko Nishiyama, Emiko Kondo, Yuko Ito, Norihiko Shinomiya, Kazuhiro Watanabe, "A Fused System of Sensing and Communication with Hetero-Core Spliced Fiber Optic Sensors", pp.1535-1542.
- [2] Michiko Nishiyama, Hiroyuki Sasaki, and Kazuhiro Watanabe, "Optical intensity based measurement of multipoint hetero-core fiber sensors by the method of time differentiation in Optical Loss", IEEE Sensors Journal, Vol. 8, N. °. 7, July 2008.

C

Poster apresentado à Física 2010



Sensor de Pressão Baseado Numa Fibra Hetero-Core

N. Freitas¹, O. Frazão², J. M. Baptista³, J.L. Santos⁴

^{1,4} Centro de Competências de Ciências Exactas e da Engenharia - Universidade da Madeira

^{2,4} Departamento de Física, Faculdade de Ciências - Universidade do Porto

^{1,2,3,4} INESC Porto - Unidade de Optoelectrónica - Rua do Campo Alegre 687, 4169-007

Email: norberto.s.freitas@inescporto.pt

SUMÁRIO

Propomos um novo método de medição da pressão da água num tubo através do OTDR e uma fibra hetero-core. A pressão da água induz uma curvatura à fibra e o OTDR trata da leitura das perdas devido a essa curvatura. Será demonstrado também a multiplexagem de dois sensores em série com a fibra hetero-core.

Esta implementação é uma alternativa interessante para a monitorização da pressão da água ou de outros líquidos em sistemas onde a precisão e a velocidade na obtenção dos valores são factores importantes.

1. INTRODUÇÃO

A fibra hetero-core é um conjunto de fibras ópticas cujos diâmetros diferem entre si. Usualmente, é caracterizada por um segmento L de fibra óptica multimodo cujo diâmetro é maior que as fibras adjacentes. A este segmento L é efectuada a fusão em ambas extremidades com uma fibra óptica monomodo, formando assim uma fibra hetero-core.

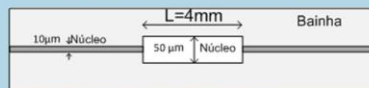


Fig. 1.1. – Estrutura de uma fibra hetero-core.

Estes sensores são bastante flexíveis e apresentam imunidade à interferência interferométrica. Podem ser utilizados em ambientes hostis e são insensíveis a perturbações de temperatura.

2. PROCEDIMENTOS E RESULTADOS

O fundo do tubo em acrílico foi envolvido por uma membrana de borracha com capacidade de deformação. Ao longo desta membrana encontra-se a fibra hetero-core a uma distância máxima de 0.5mm de forma que deforme consoante o peso da água que adicionamos ao tubo.

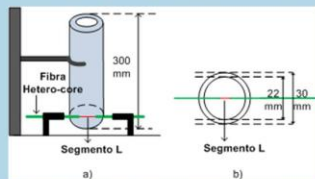


Fig. 1.2. – Dispositivo de sensor de pressão.

O segmento L usado é de fibra multimodo com um diâmetro de 50 μm e 4mm de comprimento. O comprimento de onda emitido pelo OTDR foi de 1550nm. O primeiro teste começou pela colocação das hastes que suportam a fibra hetero-core distantes de 30mm entre si, posteriormente com uma distância de 50,70 e 100mm. Os resultados obtidos foram registados e comparados.

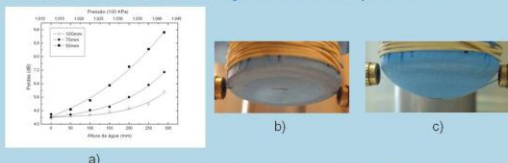


Fig. 1.3. – Fibra hetero-core e hastes. a) Perdas de 50, 70 and 100mm. b) Estado inicial. c) Estado final.

A fim de verificar a capacidade de multiplexagem deste tipo de sensor, dois sensores S1 e S2 foram colocados em série.

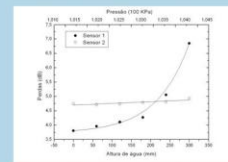


Fig. 1.4. - Multiplexagem sensor 1 e sensor 2.

O tubo em acrílico contendo o sensor 2 não foi sujeito a qualquer adição de água obtendo-se perdas aproximadamente constantes. Ao introduzirmos água no tubo em acrílico que continha o sensor 1, obteve-se um aumento das perdas como também o aumento da pressão consoante o aumento da altura de água no tubo.

3. CONCLUSÃO

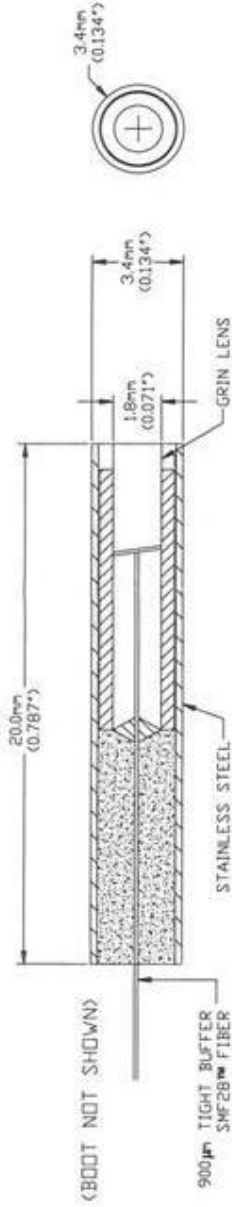
No modo singular da aplicação, o sensor de pressão teve um comportamento esperado, obtendo-se um aumento das perdas e atenuação consoante o aumento da pressão. A melhor configuração ocorreu quando as hastes encontravam-se a 50 mm de distância entre si.

Demonstrou-se a multiplexagem de dois sensores com comportamentos independentes. É possível conter 5 sensores em série. O uso da fibra hetero-core como sensor de pressão demonstrou ser de fácil implementação, confiável e com capacidade de multiplexagem.

D

Datasheet da Lente GRIN

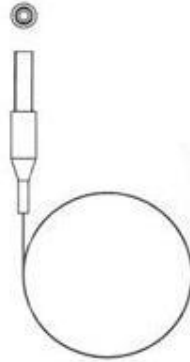
COPYRIGHT © 2000 BY THORLABS INC.



50-1550 - SCALE 5X

SPECIFICATIONS:

CENTRAL WAVELENGTH:	1550nm
OPTIMIZED WORKING DISTANCE:	20mm
SPECTRAL BANDWIDTH:	60nm
INSERTION LOSS:	MIN: 0.15dB MAX: 0.2dB
RETURN LOSS:	65dB
ACCEPTANCE ANGLE:	0.15°
BEAM DIVERGENCE:	0.25°
BEAM DIAMETER:	0.5mm FWHM MAX
OPTICAL POWER:	300mW MAX
TENSILE LOAD:	5N
OPERATING TEMPERATURE:	-20°C TO +60°C
STORAGE TEMPERATURE:	-40°C TO 85°C
FIBER LENGTH:	2.0m



ACTUAL SIZE

THORLABS PD BOX 36
 5115 ENGINEERING SUPPORT NEWTON, NJ
 TEL: XXXXX-XXXX-XXXX FAX: XXXX-XXXX-XXXX
 WWW: WWW.THORLABS.COM
 PART FINISH: 40/20 UNLESS NOTED
 DRAWN: JCM ENGINEER JCM APPROVED: JCM
 MATERIAL: VARIOUS
 DATE: 10/27/00
 SHEET: 1 of 1
 DRAWING SCALE: 1mm = 1µm

INFORMATION ONLY, NOT FOR MANUFACTURING

E

Medidas do tanque de testes dos fenómenos de percolação da água nos
solos

