

APLICAÇÃO INOVADORA DE SENSORES DE FIBRA ÓTICA EM SOLOS PARA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE RIGIDEZ A MUITO PEQUENAS DEFORMAÇÕES

RICARDO AUGUSTO RODRIGUES E SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professora Doutora Cristiana Maria da Fonseca Ferreira

Coorientador: Professor Doutor António Joaquim Pereira Viana da Fonseca

SETEMBRO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais,

“Não basta adquirir sabedoria; é preciso além disso, saber utilizá-la.”
Cícero

AGRADECIMENTOS

Apresento os meus agradecimentos sinceros à minha orientadora, a Professora Doutora Cristiana Ferreira, e ao meu coorientador Professor Doutor António Viana da Fonseca que se mostraram sempre disponíveis com o intuito de me auxiliar a ultrapassar os inúmeros obstáculos circunstanciais de que este trabalho foi alvo. Aos mesmos agradeço novamente por me terem possibilitado a oportunidade de o realizar no Laboratório de Geotécnica do Departamento de Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Dedico um obrigado entusiástico à Universidade Aveiro, em particular ao Instituto de Telecomunicações, e também ao Professor Doutor Paulo Antunes que apesar da distância física que nos separava demonstrou sempre interesse e disponibilidade em me ajudar naquilo que é o seu domínio, conseguindo acompanhar e potenciar todo o progresso do presente trabalho.

Agradeço à secção de Geotecnia, alunos e professores que me acompanharam neste último ano de curso, assim como a todos aqueles diretamente envolvidos no trabalho de excelência prestado no Laboratório de Geotecnia.

Aos verdadeiros amigos que me acompanharam neste percurso académico, nomeadamente ao Miguel Barbosa, ao Rui Campos, ao André Almeida, ao Ricardo Azevedo, ao Bruno Silva e ao Tiago Barbosa que contribuíram significativamente para a minha qualidade de vida pessoal.

Aos meus pais e aos meus irmãos que sempre me apoiaram até nos meus momentos menos felizes.

RESUMO

A correta definição do módulo de distorção a muito pequenas deformações acarreta enorme relevância, visto que este depende diretamente das deformações que se instalam nos solos. Existem diversos meios tradicionais que possibilitam a determinação deste parâmetro, contudo dada a magnitude de importância deste no projeto geotécnico, é fundamental a inovação e acréscimo de fiabilidade nessa determinação.

O presente trabalho centra-se sobretudo no desenvolvimento e aplicação de um sistema de sensores de deformação óticos, baseados em redes de Bragg gravadas em fibras óticas, para a determinação de parâmetros de rigidez a muito pequenas deformações de um solo arenoso em particular, nomeadamente a areia de “Hostun”. Esta, proveniente de uma região de França, constitui um ótimo material de estudo dado tratar-se de um solo bem conhecido e bem caracterizado, com uma vasta base de dados disponível.

Visa-se a incorporação de um sistema sensorial ótico num aparelho bastante completo, Cubo Triaxial da FEUP, relativamente à determinação da rigidez dos solos assim como à sua capacidade de reprodutibilidade de estados de tensão verdadeiramente tridimensionais, em ambiente laboratorial. Este, como o nome indica, é composto por uma câmara cúbica, sendo capaz de induzir tensões nas três direções ortogonais de forma independente. Posto isto, o sistema de sensores de fibra ótica a ser desenvolvido foca-se na distribuição de sensores de Bragg por estes três eixos.

A possibilidade de incorporar as vantagens inerentes à tecnologia de fibra ótica como elemento sensorial torna inevitável o aprofundamento do seu estudo, daqui advém a exploração da mesma quanto ao seu princípio de funcionamento, componentes associados, vantagens e inconvenientes e aplicações práticas em diversos contextos de âmbito geotécnico.

PALAVRAS-CHAVE: Sensores óticos, redes de Bragg, Cubo Triaxial da FEUP, rigidez do solo, monitorização.

ABSTRACT

The correct definition of the shear modulus at very small strains entails enormous importance, since this parameter is directly dependent of the real deformations on a given soil. There are several traditional methods that allow the determination of this parameter and given its importance in the geotechnical field, innovation and reliability of these methods are fundamental.

This work focuses on developing and implementing an optical strain sensor system, based on fiber Bragg gratings for the determination of stiffness parameters at very small deformations on a particular sandy soil, namely "Hostun" sand. This soil, originally from France, is a very interesting study material, since it is a well-known and well characterized soil, with a vast available database.

The aim of this research includes the implementation of an optical sensor system in a very complete apparatus, the True Triaxial Cube at FEUP, concerning the determination of soil stiffness and its ability of induce stress scenarios comparable to those that take place in real cases. This apparatus consists of a cubical chamber and it is capable of independently applying distinct stresses in the three orthogonal directions. Having said this, the optical fiber sensor system being developed focuses on the distribution of Bragg sensors in these three axes.

The possibility to incorporate the advantages inherent to the use of an optical fiber in the Triaxial Cube as a strain sensor system induces the necessity of furthering the study related to this technology. Thus the development of these studies focused on its main physical and mechanical principles and operating notions, linked components, advantages and disadvantages, and practical applications in different contexts within the geotechnical field.

KEYWORDS: optical sensors, fiber Bragg gratings, FEUPs Triaxial Cube, soil stiffness, monitoring.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ORGANIZAÇÃO	2
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE LUZ E FIBRA ÓTICA	5
2.1.1. DEFINIÇÃO DE LUZ	5
2.1.2. ESPECTRO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	5
2.1.3. REFLEXÃO E REFRAÇÃO	6
2.1.4. ÍNDICE DE REFRAÇÃO ABSOLUTO	7
2.1.5. ÂNGULO CRÍTICO E REFLEXÃO INTERNA TOTAL	8
2.1.6. DISPERSÃO (OU ESPALHAMENTO) E <i>BACKSCATTER</i>	8
2.2. A FIBRA ÓTICA COMO SENSOR	9
2.2.1. A FIBRA ÓTICA	9
2.2.1.1. Propagação da luz numa fibra ótica	11
2.3. CLASSIFICAÇÃO DE SENSORES ÓTICOS	12
2.3.1. CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A NATUREZA DO ELEMENTO SENSOR	13
2.3.2. CLASSIFICAÇÃO COM BASE NA MODULAÇÃO	14
2.3.3. CLASSIFICAÇÃO COM BASE NA LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIDA	14
2.3.3.1. Sensores Pontuais	15
2.3.3.2. Sensores quasi-distribuídos através de multiplexagem	15
2.3.3.3. Sensores Distribuídos	16
2.3.4. MULTIPLEXAGEM	16
2.3.4.1. Endereçamento Temporal	18
2.3.4.2. Endereçamento Espacial	18
2.3.4.3. Endereçamento em Comprimento de Onda	19

2.4. UNIÃO ENTRE FIBRAS ÓTICAS	19
2.4.1. EMENDAS	19
2.4.1.1. Conectores	20
2.4.1.2. Fusões	21
2.4.1.3. Pigtaills	22
2.4.1.4. Perdas do sinal localizadas e interrupções na transmissão do sinal	23
2.5. COMPONENTES DE UM SISTEMA SENSORIAL ÓTICO	24
2.5.1. EQUIPAMENTOS DE INTERROGAÇÃO	24
2.5.2. SENSORES ÓTICOS COMERCIALIZADOS	25
2.6. SENSORES ÓTICOS CORRENTES	27
2.6.1. SENSORES DE BRAGG (FBG)	27
2.6.1.1. Princípio de funcionamento	27
2.6.1.2. Fabricação de redes de Bragg	29
2.6.1.3. Sensibilidade à temperatura e à deformação	32
2.6.1.4. Compensação da temperatura	34
2.6.2. SENSORES DISTRIBUÍDOS BASEADOS NA DISPERSÃO DE BRILLOUIN E RAMAN	35
2.6.3. SENSORES INTENSIMÉTRICOS.....	37
2.6.4. SENSORES INTERFEROMÉTRICOS.....	37
2.7. APLICAÇÕES PRÁTICAS DE SENSORES ÓTICOS EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA	39
2.7.1. SISTEMAS DISTRIBUÍDOS BASEADOS NAS DISPERSÕES BRILLOUIN E RAMAN	40
2.7.2. SISTEMAS PONTUAIS BASEADOS EM REDES DE BRAGG.....	43
2.7.2.1. Redes de Bragg em sistemas de monitorização	43
2.7.2.2. Redes de Bragg aplicadas no âmbito laboratorial	48
2.8. COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE UM SOLO	50
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	53
3.1. O CUBO TRIAXIAL VERDADEIRO	53
3.1.1.1. O Cubo.....	54
3.1.1.2. Actuadores GDS	55
3.1.1.3. <i>Software</i> de controlo e de aquisição.....	56
3.1.1.4. Bender Elements para medições de ondas sísmicas.....	58
3.2. SISTEMA DE SENSORES ÓTICOS DE BRAGG COMPLEMENTAR AO CUBO VERDADEIRAMENTE TRIAXIAL.....	60
3.2.1. COMPONENTES ESSENCIAIS AO SISTEMA SENSORIAL BASEADO EM REDES DE BRAGG	61

3.2.1.1. Interrogador ótico	61
3.2.1.2. Cabo de fibra ótica e gravação de redes de Bragg	63
3.2.2. METODOLOGIA DE INCORPORAÇÃO DO SISTEMA ÓTICO IDEALIZADO NO TTA.....	65
3.2.2.1. Execução do sistema sensorial simplificado.....	66
3.3. MATERIAL: AREIA HOSTUN	74
3.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	74
3.3.2. PREPARAÇÃO E COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA NO CUBO.....	75
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES ÓTICOS DE BRAGG	79
4.1.1. CALIBRAÇÃO À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	79
4.1.2. CALIBRAÇÃO À DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL	81
4.2. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	84
4.2.1. AMOSTRA 1	84
4.2.1.1. Ensaio 1.1	85
4.2.1.2. Ensaio 1.2	86
4.2.1.3. Ensaio 1.3	87
4.2.2. AMOSTRA 2	88
4.2.2.1. Ensaio 2.1	88
4.2.2.2. Ensaio 2.2	90
4.2.2.3. Ensaio 2.3	95
4.2.2.4. Ensaio 2.4	96
4.3. ANÁLISE GLOBAL DE RESULTADOS	99
4.3.1. COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO.....	99
4.3.2. RIGIDEZ ELÁSTICA E SECANTE.....	101
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	104
5.1. CONCLUSÕES.....	104
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Espectro eletromagnético (adaptado de Iten, 2011).....	6
Figura 2.2 - a)Efeito de reflexão; b) Efeito de refração (adaptado de Iten, 2011).....	7
Figura 2.3 – a) Refração; b) Ângulo crítico; c) Reflexão interna total (adaptado de Iten, 2011).....	8
Figura 2.4 – Secção transversal de uma fibra ótica típica (NI, 2011).....	10
Figura 2.5 – Esquema do cone de aceitação.....	11
Figura 2.6 – Modos de propagação da luz: Fibra monomodal (SMF).....	11
Figura 2.7 – Modos de propagação da luz: a) Fibra multimodal (MMF) com índice em degrau b) Fibra multimodal (MMF) com índice de variação gradual.....	12
Figura 2.8 – Esquema de funcionamento de um sensor intrínseco de sinal transmissivo (adaptado de Rodrigues, 2011).....	13
Figura 2.9 – Esquema de funcionamento de um sensor extrínseco de sinal transmissivo (adaptado de Rodrigues, 2011).....	13
Figura 2.10 – Classificação de sensores óticos com base na localização dos pontos de medida: a) sensor pontual; b) sensor quasi-distribuído; c) sensor distribuído (adaptado de Rodrigues, 2011).....	14
Figura 2.11 – Conceito teórico de uma estrutura compacta de redes de Bragg (adaptado de Gwandu <i>et al.</i> ,2001).....	15
Figura 2.12 – Topologias de rede básicas do tipo transmissivo (adaptado de Lobo, 1996).....	17
Figura 2.13 – Esquemas de endereçamento: a) em série; b) em paralelo (adaptado de Rodrigues, 2011).....	18
Figura 2.14 – Exemplo de um endereçamento em comprimento de onda de três sensores FBG (adaptado de Bortolotti <i>et al.</i> , 2012).....	19
Figura 2.15 – Vista do conector e o respetivo ferrule (adaptado de Rodrigues, 2011).....	20
Figura 2.16 – Conectores: a) FC/ APC; b) FC/ PC (adaptado de Iten, 2011).....	20
Figura 2.17 - Processo de emenda de fibras óticas por fusão (Innostruments, 2016).....	21
Figura 2.18 – a) Clivador de alta precisão; b) Descarga de um arco elétrico (adaptado de Rodrigues, 2011).....	22
Figura 2.19 – Exemplo de mangas (Fibracem, 2016).....	22
Figura 2.20 – <i>Pigtail</i> com conector FC/ APC.....	23
Figura 2.21 – FS22 Industrial BraggMETER (HBM, 2016).....	24
Figura 2.22 – FS42 Portable BraggMETER (HBM, 2016).....	25
Figura 2.23 – Exemplo de um acelerómetro baseado em redes de Bragg (HBM, 2016).....	25
Figura 2.24 – Exemplos de transdutores de deslocamento baseados em redes de Bragg: a) & b) sensores de colagem; c) sensor de soldar; d) sensor de fixamento e) sensor de embebimento (HBM, 2016).....	26
Figura 2.25 – Principio básico de funcionamento de uma rede de Bragg (NI, 2011).....	28
Figura 2.26 – Rede de Bragg em pormenor (NI, 2011).....	28
Figura 2.27 – Influência de esforços longitudinais externos à fibra na variação do comprimento de onda central de Bragg (adaptado de Oliveira, 2011).....	29

Figura 2.28 – Interferómetro básico (adaptado de Werneck <i>et al.</i> , 2013).....	30
Figura 2.29 – Escrita de redes de Bragg por máscara de amplitude (adaptado de Marques, 2008).....	31
Figura 2.30 – Escrita de redes de Bragg por máscara de fase (adaptado de Werneck <i>et al.</i> ,2013).....	31
Figura 2.31 – Interferómetro com máscara de fase (adaptado de Werneck <i>et al.</i> ,2013).....	32
Figura 2.32 – Análise espectral dos principais tipos de dispersão da luz (adaptado de Soga <i>et al.</i> ,2015).....	35
Figura 2.33 – Esquema da influência da microdobragem numa fibra óptica (adaptado de Ribeiro, 2009)	37
Figura 2.34 – Bases de funcionamento dos três tipos principais de interferómetros: a) de Michelson; b) de Mach-Zehnder; c) de Fabry-Perot. (adaptado de Rodrigues, 2011).....	38
Figura 2.35 – Esquema típico de um interferómetro de Fabry-Perot (adaptado de Ribeiro, 2009)	39
Figura 2.36 – Esquema de um sistema FO aplicado num talude e num aterro (Ribeiro, 2009).....	41
Figura 2.37 – Caso real de um sistema FO embutido num geotêxtil (TENCATE Geosynthetics, 2016)	41
Figura 2.38 – Instalação de fibra ótica num inclinómetro (Ouyang <i>et al.</i> ,2015)	42
Figura 2.39 – Micro-âncora fixado no solo (Marmota Engineering AG, 2012)	42
Figura 2.40 – Sistema de sensores óticos aplicado diretamente no solo fixado pontualmente por micro-âncoras (Marmota Engineering AG, 2012).....	43
Figura 2.41 – Vista em planta de uma unidade FBG-SD (Ho <i>et al.</i> , 2006)	44
Figura 2.42 – Representação esquemática da obra de escavação e comparação de leituras FBG-SD e IP (adaptado de Ho <i>et al.</i> , 2006)	44
Figura 2.43 – Instalação de um sistema quasi-distribuído FBG num furo (Marmota Engineering AG, 2012).....	45
Figura 2.44 – Geotêxtil com filamentos de FO intrinsecamente instalados no mesmo (Briançon <i>et al.</i> (2004)....	46
Figura 2.45 – Monitorização de assentamentos e deteção de cavidades no solo (adaptado de Loke <i>et al.</i> , 2006) 46	
Figura 2.46 – Reforço e monitorização de um aterro (Loke <i>et al.</i> , 2006).....	47
Figura 2.47 – Monitorização de um talude: a) esquema de aplicação; b) instalação do geotêxtil na trincheira situado no topo do talude. (Loke <i>et al.</i> , 2006)	47
Figura 2.48 – Visão esquemática de uma câmara triaxial típica com sensores FBG incorporados (adaptado de Lee <i>et al.</i> , 2011).....	48
Figura 2.49 – Comparação de medições obtidas entre sensores FBG e sensores eléctricos: a) Tensão de desvio; b) Alterações na matriz de sucção; c) Tensão de desvio. (Adaptado de Lee <i>et al.</i> , 2011).....	49
Figura 2.50 – Degradação da rigidez com o aumento da deformação (adaptado de Santos <i>et al.</i> , 2016).....	50
Figura 3.1 – O Cubo Triaxial Verdadeiro da FEUP (adaptado de Ferreira, 2009)	53
Figura 3.2 – Três pares de faces constituintes do “Cubo”	54
Figura 3.3 – a) Estrutura cúbica; b) Identificação das faces. (Adaptado de Ferreira and Fonseca, 2010)	54
Figura 3.4 – Diagrama de funcionamento de um GDS corrente (GDS Instruments, 2001).....	55
Figura 3.5 – Actuador GDS (à esquerda <i>multiplexer</i>).....	56
Figura 3.6 – Separador de definição de ordens de controlo para cada controlador GDS (Ferreira, 2009)	57

Figura 3.7 – Separador de aquisição de dados e gráficos de medições de pressão e volume (Ferreira, 2009)	57
Figura 3.8 – Face X1 do Cubo Triaxial Verdadeiro com abertura central de instalação dos BE	58
Figura 3.9 – BE com configuração em “T” já instalado numa das faces do Cubo	59
Figura 3.10 - – Equipamento electrónico associado aos sistema de medições de ondas , Osciloscópio Tektronix TDS220	59
Figura 3.11 – Equipamento electrónico associadao ao sistema de medições de ondas, de cima para baixo, multiplexer MUX transmissor, multiplexer MUX receptor e gerador de funções TTI	60
Figura 3.12 – Esquema da disposição dos sensores de Bragg nas três direções ortogonais na câmara cúbica	61
Figura 3.13 – Unidade de interrogação, FS 5600 BraggSCOPE da FiberSensing (actual HBM)	62
Figura 3.14 – Interface gráfico com <i>software</i> iLog da FiberSensing (actual HBM)	62
Figura 3.15 – Especificações gerais do interrogador FS 5600 BraggSCOPE da FiberSensing (actual HBM)	63
Figura 3.16 – Representação esquemática do sistema de gravação de FBG’s utilizado (adaptado de Antunes, 2011)	64
Figura 3.17 – Mesa ótica do sistema de gravação do IT (UA)	64
Figura 3.18 – Esquema de implementação de um sensor de Bragg no Cubo triaxial	65
Figura 3.19 – Pormenor do furo realizado na pedra porosa	66
Figura 3.20 – Representação da fibra ótica a ser inserida numa das faces do Cubo	67
Figura 3.21 – Cenário após a introdução da fibra pelo furo da face Y2	67
Figura 3.22 – Micro-âncoras: a) Dimensões das peças em mm; b) pormenor das peças	68
Figura 3.23 – Instalação das micro-âncoras: a) Recurso à plataforma de translação linear de forma a facilitar o processo de colagem; b) colagem do fio de sediela e a extremidade de jusante final da fibra ótica; c) colagem de um curto segmento de fibra ótica “despida”.	69
Figura 3.24 – Visão geral do processo de colagem de ambas as micro-âncoras isolando um segmento de aproximadamente de 100 mm, no qual se encontra a rede de Bragg	70
Figura 3.25 – Sensor instalado na direção Y do Cubo	70
Figura 3.26 – Peça de suporte com roldana acoplada na sua extremidade	71
Figura 3.27 – Acessório de esticamento instalado na face Y1 do Cubo	71
Figura 3.28 – Fixação de um ponto qualquer da fibra a montante do sensor de Bragg	72
Figura 3.29 – Sistema ótico implementado no Cubo e conectado à unidade de interrogação do sinal	72
Figura 3.30 – Controladores GDS utilizados para estabelecimento de tensões no Cubo	73
Figura 3.31 – Localização dos pares dos elementos <i>bender/ extender</i> nas respetivas faces do Cubo	73
Figura 3.32 - Análise granulométrica da amostra de areia “Hostun”	75
Figura 3.33 – Guias de orientação ao processo de compactação no interior do Cubo	76
Figura 3.34 – Pormenores do processo de compactação: a) remoção da extremidade a jusante da secção 1 da face Y1; b) dispositivo utilizado para compactar a amostra	76

Figura 3.35 – Compactação no local da fibra ótica: a) disposição desejada do sensor; b) camada compactada sobrejacente à fibra.....	77
Figura 3.36 – Desenho ilustrativo do controlo de tensões por parte dos controladores GDS	78
Figura 4.1 - FS 5600 BraggSCOPE a realizar leituras em tempo real do incremento de temperatura imposto na câmara climática.....	79
Figura 4.2 – Câmara climática - FITOCLIMA, Laboratório de Estruturas.....	80
Figura 4.3 – A inclinação que a linha de tendência fornece indica a sensibilidade térmica (sT).....	81
Figura 4.4 - Plataforma de translação linear controlada por um parafuso micrométrico.....	82
Figura 4.5 – Variação do comprimento de onda por <i>microstrain</i> ($\mu\epsilon$).....	83
Figura 4.6 – Comprimento de onda vs extensão fornece a sensibilidade térmica, $s_l = 7.6 \text{ pm}/\mu\text{m}$	83
Figura 4.7 – E1.1: Deformação do sensor FBG.....	85
Figura 4.8 - E1.2: Deformação do sensor FBG.....	86
Figura 4.9 - E1.3: Deformação do sensor FBG, carga.....	87
Figura 4.10 – Cenário hipotético justificativo do comportamento atípico do sensor FBG.....	88
Figura 4.11 – E2.1: Deformação do sensor FBG.....	89
Figura 4.12 – E2.1: Curva de deformação em função da tensão aplicada.....	90
Figura 4.13 - E2.2.1: Deformação do sensor FBG, carga.....	91
Figura 4.14 - E2.2.1: Deformação do sensor FBG com exclusão de pontos, carga.....	91
Figura 4.15 - E2.2.2: Deformação do sensor FBG, descarga.....	93
Figura 4.16 - E2.2.1: Deformação do sensor FBG, carga e descarga.....	93
Figura 4.17 - E2.2: Curva de deformação em função da tensão aplicada.....	94
Figura 4.18 - E2.3: Deformação do sensor FBG, carga.....	95
Figura 4.19 - E2.1: Deformação do sensor FBG, descarga.....	96
Figura 4.20 - E2.4.2: Deformação do sensor FBG, carga.....	97
Figura 4.21 - E2.4: Curva de deformação em função da tensão aplicada.....	98
Figura 4.22 – Curva de deformação em função da tensão aplicada.....	101
Figura 4.23 – Rigidez elástica e secante.....	102
Figura 4.24 – Curva normalizada da rigidez do solo, medida no ensaio E2.2.....	102

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características mecânicas e óticas de uma fibra ótica de sílica corrente (adaptado de Inaudi, 1997)	10
Tabela 2.2 – Modulação da luz e respectivos princípios físicos.....	14
Tabela 2.3 – Valores típicos para uma sílica dopada com germânio	34
Tabela 3.1 – Elementos chave do sistema sensorial e respectivas funções	66
Tabela 4.1 – Variações do comprimento de onda central face a oscilações térmicas	80
Tabela 4.2 – Variação do comprimento de onda em função da deformação longitudinal incutida na fibra	82
Tabela 4.3 – Características intrínsecas do sensor de Bragg utilizado	84
Tabela 4.4 – E1.1: Medições	85
Tabela 4.5 – E1.2: Medições	86
Tabela 4.6 - E1.3: Medições.....	87
Tabela 4.7 - E2.1: Medições.....	89
Tabela 4.8 - E2.2.1: Medições.....	90
Tabela 4.9 - E2.2.2: Medições.....	92
Tabela 4.10 - E2.3: Medições.....	95
Tabela 4.11 - E2.4.1: Medições.....	96
Tabela 4.12 - E2.4.2: Medições.....	97
Tabela 4.13 – Ponto de referência estipulado para a análise global	99
Tabela 4.14 – Compilação de medições (parte 1).....	99
Tabela 4.15 – Compilação de medições (parte 2).....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

APC	Angled Physical Contact
B/ E	Bender/ Extender elements
BOTDA	Brillouin Optical Time Domain Analysis
BOTDR	Brillouin Optical Time Domain Reflectometry
EFPI	Extrinsic Fabry-Perot Interferometer
EMI	Electromagnetic Interference
FBG	Fiber Bragg Grating
FC	Ferrule Connector
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FO	Fiber Optics
GDS	Global Digital Systems
HS	Hostun Sand
IFP	Fabry-Perot Interferometer
IFPI	Intrinsic Fabry-Perot Interferometer
IP	Inclinometer Probe
IT	Instituto de Telecomunicações
LAN	Local Area Network
LC	Lente Cilíndrica
MMF	Multi Mode Fiber
MUX	Multiplexer
NI	National Instruments
OCR	Over Consolidation Ratio
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
PC	Physical Contact
ROTDR	Raman Optical Time Domain Reflectometry
SHM	Structure Health Monitoring
SMF	Single Mode Fiber
TDM	Time Division Multiplexing
TTA	True Triaxial
UV	UltraViolet
UA	Universidade de Aveiro
UWA	University of Western Australia
WDM	Wavelength Division Multiplexing

SÍMBOLOS

c	- Velocidade da luz
c_0	- Velocidade da luz no vácuo
μ_0	- Permeabilidade do vácuo
ϵ_0	- Permissividade do vácuo
E	- Energia de um fóton
v_i	- Velocidade no meio i
h	- Constante de Planck
θ_c	- Ângulo crítico
θ_i	- Ângulo de incidência
θ_{rx}	- Ângulo de reflexão ou de refração no meio x
θ_{ry}	- Ângulo de reflexão ou de refração no meio y
n_x	- Meio de propagação x
n_y	- Meio de propagação y
n_i	- Índice de refração relativo ao meio i
n_{eff}	- Índice de refração efetivo
n_{nu}	- Índice de refração do núcleo
n_{ba}	- Índice de refração da bainha
α_Λ	- Coeficiente de expansão térmica
α_n	- Coeficiente termo-ótico
Δl	- Deformação relativa
ΔT	- Variação de temperatura
$\Delta \lambda$	- Variação diferencial de comprimentos de onda
$\Delta \lambda_0$	- Variação do valor inicial do comprimento de onda
$\Delta \lambda_B$	- Variação no comprimento de onda de Bragg
λ_B	- Comprimento de onda central de Bragg ou condição de Bragg
λ_{UV}	- Comprimento de onda da radiação ultravioleta
λ_0	- Comprimento de onda da luz no vácuo
Λ	- Período de modulação do índice de refração
Λ_{UV}	- Período de modulação do índice de refração da radiação ultravioleta
p_{ij}	- Constante do tensor fotoelástico
p_e	- Constante fotoelástica efetiva

sl	- Sensibilidade à deformação longitudinal da rede de Bragg
sT	- Sensibilidade térmica da rede de Bragg
v	- Coeficiente de Poisson
r	- raio do núcleo de uma fibra ótica
ε	- Elongação relativa
M	- Módulo de Confinamento
$G_{\text{máx}}$ (G_0)	- Módulo de distorção máximo
e	- Índice de vazios
$e_{\text{máx}}$	- Índice de vazios máximo de uma areia
e_{min}	- Índice de vazios mínimo de uma areia
p'	- Tensão média efetiva
t	- Tempo
σ'	- Tensão efetiva
E_0	- Módulo de deformabilidade correspondente a $G_{\text{máx}}$ (G_0)
E_{sec}	- Módulo de deformabilidade secante
E_{tan}	- Módulo de deformabilidade tangente
L	- Comprimento
ρ	- Densidade do solo
V_s	- Velocidade das ondas de corte
V_p	- Velocidade das ondas de compressão
w	- Teor em água
w_0	- Teor em água inicial
W_w	- Peso da água
W_s	- Peso do solo seco
U	- Grau de consolidação
D_{50}	- Diâmetro correspondente a 50% de material passada numa curva granulométrica

1 INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

A evolução de tecnologias referentes às fibras óticas tem-se revelado de uma forma revolucionária no panorama sensorial. O facto de se poder correlacionar perturbações externas a um cabo de fibra com variações de certas grandezas, intrínsecas ao sinal nele transmitido, aliado às inúmeras vantagens que a fibra acresce relativamente a meios de transmissão de sinais convencionais, torna esta tecnologia uma ferramenta poderosa com um enorme potencial em termos de aplicabilidade práticas.

Já há umas décadas que este tipo de sensores tem vindo a ser alvo de interesse de diversas comunidades científicas, principalmente na indústria da engenharia civil. Apenas recentemente é que esta tecnologia se tornou suficientemente madura e relativamente acessível a fim de ser aplicada como sistemas fiáveis de controlo e de monitorização em obras de foro geotécnico. Já que os crescentes desafios associados a construções geotécnicas, cada vez mais complexas, urgem desenvolvimentos e inovações constantes.

Dos diversos tipos de sensores óticos existentes no mercado, destacam-se alguns de maior valência já bem divulgados na área, e entre estes salienta-se os sensores baseados em redes de Bragg dado apresentarem baixo custo de produção, elevada sensibilidade a deformações e variações térmicas, facilidade de implementação, capacidade de multiplexagem entre outras vantagens associadas ao próprio meio de transmissão de sinais, a fibra ótica. A título de exemplo referem-se, a imunidade que apresenta face a interferências eletromagnéticas, operabilidade em meios imersos e resiliência suficiente de modo a suportar ambientes severos, comuns em ambientes de obra.

A engenharia geotécnica assenta numa ciência altamente dinâmica daí a necessidade de desenvolver novas teorias e práticas a fim de aprofundar o conhecimento nesta matéria. A determinação de parâmetros de rigidez fiáveis e representativos dos solos contribui para uma previsão mais realista do comportamento dos mesmos aumentando significativamente o grau de confiança e segurança ao nível do dimensionamento e execução de infraestruturas. No que diz respeito à determinação destes parâmetros os meios laboratoriais cumprem um papel fundamental, capazes de desempenhar esta tarefa com rigor e custos relativamente baixos quando comparados com ensaios de campos. Portanto é imperativo inovar estes meios por forma a torná-los mais expeditos e acrescentar uma maior coerência às suas medições. Nesta premissa a implementação de sensores óticos em ensaios laboratoriais de maior relevância potencia a qualidade dos mesmos, podendo mesmo até substituir técnicas de medição convencionais.

1.2. OBJETIVOS

São objetivos gerais desta dissertação: a análise do estado da arte incidente na indústria de sensores de fibra ótica, explorando o funcionamento básico dos diferentes tipos destes sensores, assim como os componentes e técnicas de aplicação envolvidos em sistemas que se baseiam nesta tecnologia; a identificação de vantagens e inconvenientes destes sistemas ao averiguar importantes estudos e investigações na área e ao estudar a condição do mercado atual com o intuito último de validar o seu potencial de utilização e mais-valia que crescem face aos diferentes e crescentes desafios associados à indústria geotécnica.

O primordial objetivo da presente tese foca-se no desenvolvimento de um sistema baseado em sensores óticos de Bragg a ser implementado no Cubo triaxial verdadeiro da FEUP com a finalidade de obter medições válidas e rigorosas que cumprem o propósito de determinar parâmetros de rigidez a pequenas e a muito pequenas deformações, nomeadamente o módulo de distorção máximo, num solo bem conhecido pela comunidade científica e apelativo pela vasta bibliografia existente, a areia “Hostun”; e também proporcionar resultados comparáveis com aqueles adquiridos pelo sistema de medição tradicional concebido juntamente com o verdadeiro triaxial.

O presente trabalho centra-se também no estudo do próprio ensaio, já existente, o Cubo triaxial verdadeiro da FEUP, procurando detalhar com alguma profundidade todo o sistema de medição inerente ao mesmo. Desta forma procura-se explorar diversas alternativas de implementação do sistema sensorial ótico com a finalidade de desenvolver uma que melhor se adapte face às restrições impostas quer pelo Cubo quer pela própria fibra ótica, e assim identificar técnicas, metodologias, componentes e dispositivos mais apropriados para esse fim.

1.3. ORGANIZAÇÃO

O trabalho desenvolvido em ambiente laboratorial engloba no seu total 5 capítulos, sendo o presente capítulo nota introdutória que servirá de enquadramento geral quanto ao interesse e urgência do tema, assim como sensibilizar o leitor da importância da inovação e progresso tecnológico.

O segundo capítulo assume inicialmente um papel elucidativo incidente em princípios físicos básicos que justificam o funcionamento da tecnologia em causa assim como as principais vantagens inerentes à mesma. Referem-se de forma vaga os principais componentes envolvidos na criação de um sistema sensorial ótico. Explora-se os diversos tipos de sensores óticos, especialmente aqueles que obtiveram maior aceitação ao nível da sua aplicabilidade, evidenciando bases teóricas do seu funcionamento e principais fatores que os distinguem. E por fim, dá-se a conhecer um conjunto de aplicações desta tecnologia sensorial em intervenções de foro geotécnico, baseadas em estudos e experiências de outros autores.

Dedica-se ao Capítulo 3 a explanação de todos os equipamentos e acessórios envolvidos no ensaio em causa e que assistem às medições que se pretendem interpretar com o intuito último de caracterizar um dado solo. Para além da instrumentação tradicional associada ao cubo verdadeiramente triaxial acresce-se novos componentes essenciais à implementação de um sistema de sensores óticos, baseado em redes de Bragg. Ainda se discute a exequibilidade de implementação de tal sistema no Cubo Triaxial da FEUP. Desenvolvendo por fim um conceito de aplicação que leva à instalação de novas peças acessórias ao

ensaio. E de seguida explica-se a metodologia levada a cabo com o intuito de executar o sistema ótico exclusivamente concebido para o efeito que visa não só determinar parâmetros de rigidez da amostra a ensaiar como também avaliar o desempenho de sensores FBG neste contexto.

Com a apresentação do Capítulo 4 caracteriza-se o material a ser ensaiado, nomeadamente areia de “Hostun”, a preparação da mesma a fim de ser preparada uma amostra no interior da câmara cúbica. Também se apresenta a metodologia empregue na caracterização dos sensores de Bragg utilizados. Passa-se a revelar o plano de ensaios e os respetivos resultados procurando aprofundar o conhecimento relativo ao comportamento dos sensores óticos envolvidos no processo, assim como avaliar as medições destes com as do sistema convencional do Cubo Triaxial da FEUP.

No último capítulo escrutinam-se as possíveis condicionantes do sistema sensorial baseado em redes de Bragg implementado no cubo verdadeiramente triaxial, procura-se justificar as respostas dos mesmos e sugerem-se ideias com a finalidade de ultrapassar obstáculos inerentes à aplicação em causa. Ditam-se conselhos futuros relativos a intervenções necessárias a fim de estabelecer condições favoráveis a um correto funcionamento dos elementos sensores óticos no panorama laboratorial.

2 ESTADO DA ARTE

2.1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE LUZ E FIBRA ÓTICA

Considera-se necessário introduzir conceitos básicos de luz, como esta é interpretada, como se comporta perante a interação com diferentes meios e como as propriedades destes influenciam o modo de propagação do feixe luminoso.

2.1.1. DEFINIÇÃO DE LUZ

A natureza da luz sempre foi uma questão contraditória no mundo da física, Newton interpretava a luz como um conjunto de partículas que se moviam a grande velocidade enquanto que um dos seus contemporâneos, Huygens, considerava-a um fenómeno ondulatório. Atualmente, a grande maioria dos físicos interpretam a luz como sendo uma entidade quântica podendo esta se comportar como uma onda eletromagnética (transversal mediante a polarização da sua propagação) ou como um aglomerado de fotões.

O campo eletromagnético propaga-se no vácuo com uma velocidade aproximada equivalente a:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \times \mu_0}} \approx 3.0 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.1)$$

A direção de propagação altera-se (é refletida, refratada, etc.) perante a interação desta entre superfícies ou interfaces entre dois meios de propriedades distintas.

2.1.2. ESPECTRO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Os fotões constituem “partículas”, de massa de repouso nula, que possuem energia ($E = h \cdot \nu$) e quantidade de movimento que se encontram intrinsecamente relacionadas com a frequência e comprimento de onda da radiação eletromagnética. Posto isto, as propriedades da radiação podem ser avaliadas pela frequência, comprimento de onda e energia dos fotões incidentes (Alonso and Finn, 1981).

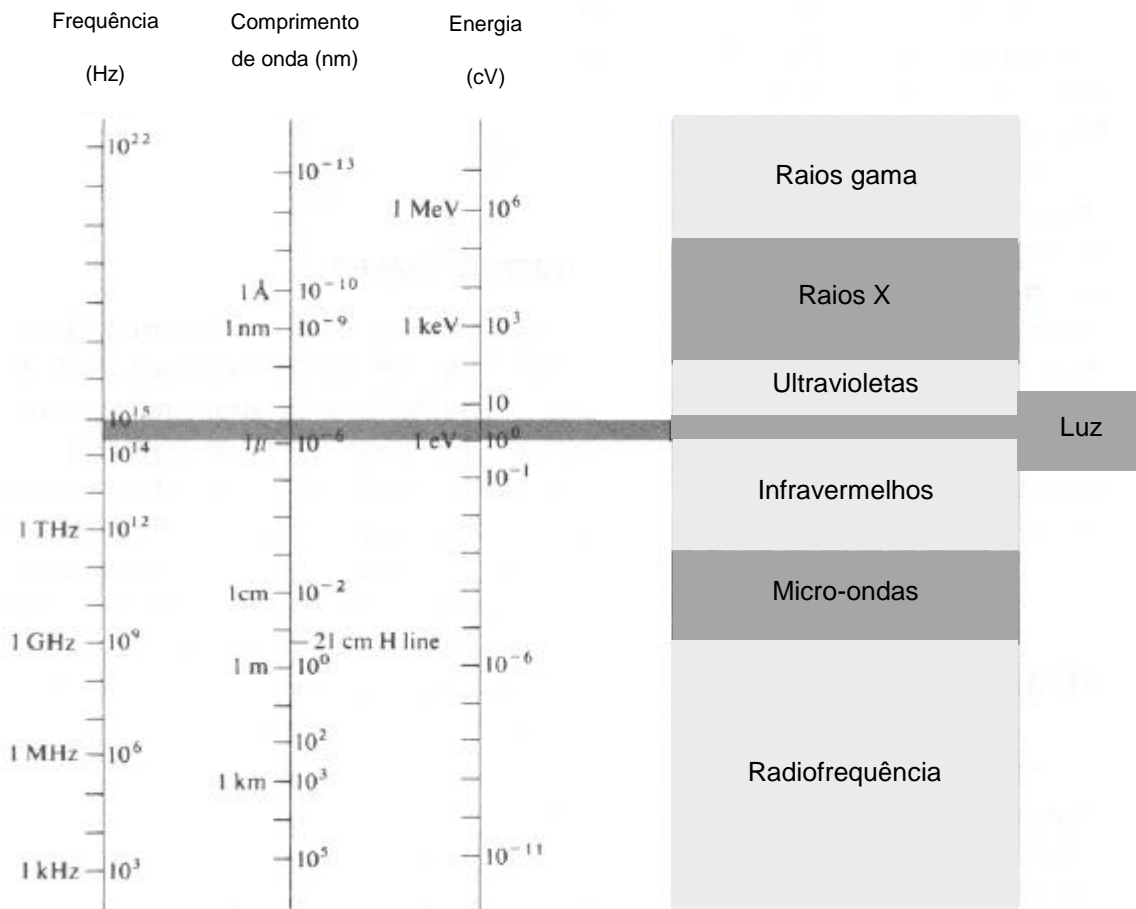


Figura 2.1 - Espectro eletromagnético (adaptado de Iten, 2011)

O espectro visível consiste num diminuto intervalo do leque espectral, presente na Figura 2.1, situado entre as radiações infravermelhas e as radiações ultravioletas.

As fronteiras desta classificação não se encontram muito bem definidas, tendo em conta que diferentes fontes podem produzir ondas em intervalos de frequência que se sobrepõem (Iten, 2011).

2.1.3. REFLEXÃO E REFRAÇÃO

Uma onda eletromagnética ao atravessar uma superfície de separação entre dois meios transparentes, de densidades díspares, dá origem aos fenómenos de reflexão (parcial ou total) e de refração que prevalecem como uma consequência direta da velocidade da onda face às características dos meios, sendo o índice de refração dos meios o fator mais condicionante capaz de relacionar as velocidades nestes.

A onda refletida (θ_{rx}) propaga-se no mesmo meio (n_x) da onda incidente (θ_i) e no mesmo plano desta, enquanto que a onda refratada (θ_{ry}), embora permaneça também no mesmo plano, é transmitida para o segundo meio (n_y), Figura 2.2.

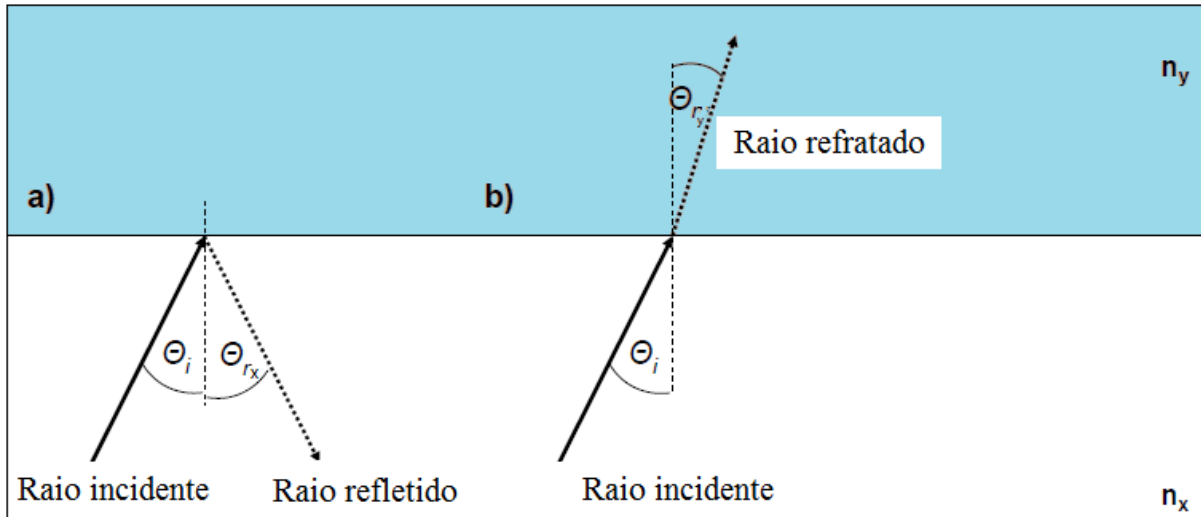


Figura 2.2 - a) Efeito de reflexão; b) Efeito de refração (adaptado de Iten, 2011)

Segundo os autores Alonso and Finn, 1981, os feixes de propagação, raio incidente, raio refletido e raio refratado, relacionam-se pelas seguintes leis comprovadas experimentalmente:

- As direções de incidência, refração e reflexão encontram-se distribuídas num só plano;
- O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, em que $\theta_i = \theta_{rx}$;
- A razão entre o seno do ângulo de incidência e o seno do ângulo de refração é constante e igual ao índice de refração relativo (n_{yx}), que neste caso traduz o índice de refração do meio y em relação ao meio x.

$$n_{yx} = \frac{n_y}{n_x} = \frac{\text{sen}(\theta_i)}{\text{sen}(\theta_r)} = \frac{v_y}{v_x} \quad (2.2)$$

2.1.4. ÍNDICE DE REFRAÇÃO ABSOLUTO

Atendendo à última lei exposta no subcapítulo anterior, a mudança da velocidade da luz ao passar de um determinado meio padrão, onde a luz assume uma velocidade de propagação c , para outro meio qualquer dá origem a um fenómeno denominado de refração, que é medido através do índice de refração absoluto, n , que por sua vez se traduz no quociente entre a velocidade da luz no meio padrão (c) com aquela que assume num determinado material homogéneo e isotrópico (v):

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

2.1.5. ÂNGULO CRÍTICO E REFLEXÃO INTERNA TOTAL

Quando um feixe de luz se propaga num meio portante com um índice relativo de refração elevado (n_y) e atravessa outro cujo mesmo índice é ligeiramente inferior (n_x), nesta medida um aumento do ângulo de incidência (θ_i) resulta num aumento ainda maior do ângulo de refração (θ_r) (Iten, 2011). Esta discrepância entre índices de refração é o que caracteriza a base de funcionamento de uma fibra ótica, em que o núcleo é o meio que apresenta um valor deste índice superior àquele que se verifica na bainha envolvente. A partir do momento em que o ângulo incidente (θ_i) atinge um abertura para com a normal à superfície de modo a garantir um ângulo de refração equivalente a 90° ocorre o fenómeno de reflexão interna total e o ângulo incidente passa a ser crítico (2.4) (Figura 2.3b). Tal ocorrência é garantida pelas fibras óticas e encontra-se explanada na Figura 2.3c.

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_y}{n_x} \quad (2.4)$$

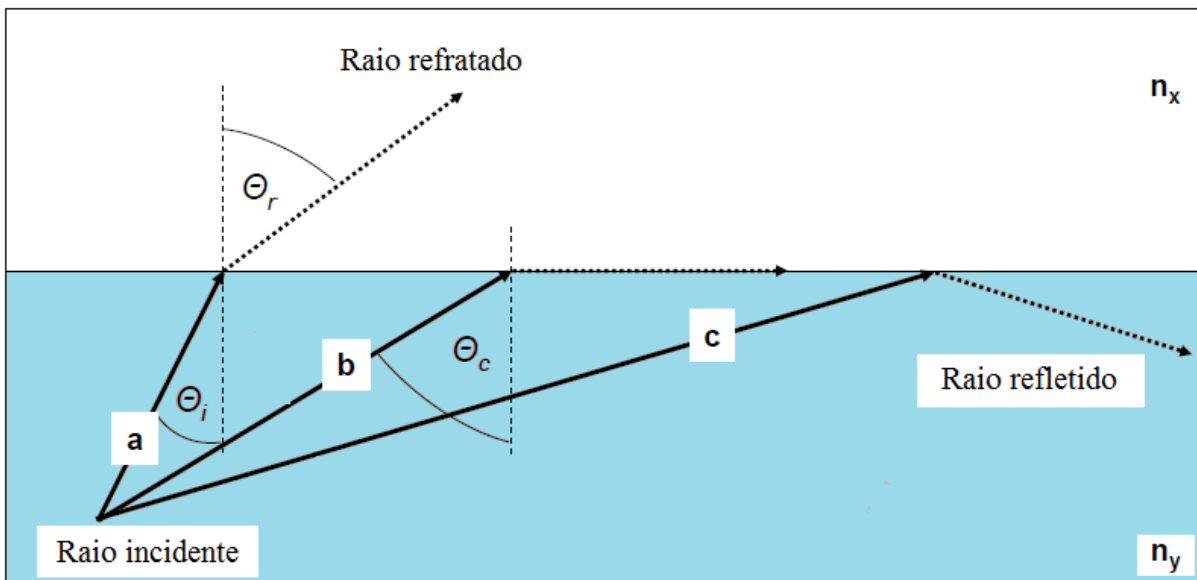


Figura 2.3 – a) Refração; b) Ângulo crítico; c) Reflexão interna total (adaptado de Iten, 2011)

Qualquer raio incidente, cujo ângulo de incidência seja superior ao crítico, reflete-se totalmente internamente num dado meio de propagação. Desta forma, sob estas condições, o fenómeno de reflexão interna total faz com que a luz se propague longitudinalmente por reflexões sucessivas durante a interação desta com meios de índices de refração díspares.

2.1.6. DISPERSÃO (OU ESPALHAMENTO) E BACKSCATTER

Iten M., 2009, dita que a dispersão, ou espalhamento, da luz é uma ocorrência que se dá quando esta interage com partículas de um dado meio e ondas acústicas presentes no mesmo, ou seja, este fenómeno é inerente à propagação da luz em fibras óticas.

Diminutas irregularidades na estrutura molecular do meio transmissor, assim como o fenómeno de absorção (por parte da bainha), consistem na principal fonte de perdas do sinal na fibra ótica devido ao espalhamento originado. Numa fibra ótica continua-se a propagar apenas uma pequena fração de luz, consoante a severidade destas perturbações externas, enquanto que se perde a fração maior para o meio exterior dado o espalhamento ocorrer noutras direções diferentes àquela da propagação do sinal inicial. Caso o espalhamento assuma uma direção de propagação longitudinal, coincidente com a do feixe inicial, continua a ser transmitido com possibilidade de ser detetado em ambas as extremidades da fibra (Rodrigues, 2011).

Dentro deste contexto ocorre um fenómeno, que consiste na dispersão da luz na direção oposta à da propagação inicial do sinal, denominado por “*backscatter*”, que por sua vez assume um papel vital na utilização da fibra ótica como sensor (Iten, 2011).

2.2. A FIBRA ÓTICA COMO SENSOR

A fibra ótica constitui um meio de transmissão de sinais, sob a forma de luz, entre dois pontos distantes entre si. A principal vantagem desta tecnologia, face a sistemas que servem propósito similar, assenta no transporte de maior carga quantitativa de informação ao longo de grandes distâncias de forma mais rápida com o acréscimo de garantia da qualidade do sinal corroborando a diminuta perda do mesmo. Acrescenta-se ainda que o sinal transmitido pela fibra não se deixa afetar por interferências externas, nomeadamente radiações electrostáticas e eletromagnéticas. A própria fibra para além de ser economicamente acessível, dada a massificação da sua produção, e apresentar um peso e tamanho (em diâmetro) diminutos ainda proporciona um isolamento elétrico de grande magnitude dado ser constituída por sílica, podendo esta operar em condições submersas (Lee *et al.*, 2011).

Apenas recentemente é que esta tecnologia se tornou suficiente madura a fim de se tornar um importante foco no panorama sensorial a ser considerado na indústria civil com especial ênfase no ramo de geotecnia, especialmente ao nível da monitorização de obras geotécnicas com o intuito de validar os respetivos dimensionamentos e garantir a segurança de serviço das mesmas. Atualmente desenvolvem-se inúmeros esforços académicos e empresariais incidentes na caracterização dos solos, quanto à sua rigidez e resistência mecânica (englobando ensaios de laboratório e “*in situ*”) através do uso deste tipo de sensores.

É imperativo salientar que o uso da fibra ótica como elemento sensor (sensores intrínsecos) tem como base a influência de determinados fatores externos que se traduzem em alterações das propriedades óticas do sinal transmitido no seu interior. Posto isto, a medição de grandezas inerentes a qualquer radiação eletromagnética, intensidade (ou amplitude), frequência, polarização, fase ou comprimento de onda, torna possível a análise das possíveis alterações do estado envolvente à fibra que induzem variações nestas.

2.2.1. A FIBRA ÓTICA

As fibras óticas (Figura 2.6) são constituídas por duas componentes fundamentais, a primeira consiste num núcleo de sílica (SiO_2), cujo diâmetro deste se equipara ao de um cabelo humano ($9.0 \mu\text{m}$), enquanto que a segunda consiste numa bainha cuja primordial função é garantir o fenómeno de reflexão total interna (no núcleo). Este efeito é conseguido no caso de se acrescentar ao núcleo, aquando o seu

fabrico, elementos dopantes, tais como germânio, boro ou fósforo, o que faz com que este possua um índice de refração ligeiramente superior ao da bainha (Meltz and Hill, 1997). O diâmetro, totalizado por estas duas componentes, não costuma ultrapassar os 125 µm. Todavia um invólucro complementar polimérico é indispensável à proteção das outras componentes, perfazendo um diâmetro global de 250 µm. É de notar que este para além de oferecer uma boa resistência mecânica à fibra consegue ainda mitigar efeitos de perdas oriundos de possíveis microcurvaturas (Rodrigues, 2011).

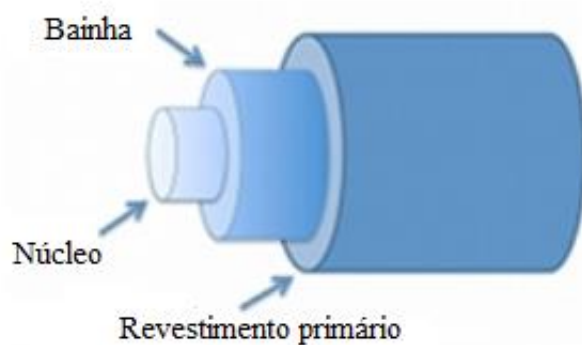


Figura 2.4 – Secção transversal de uma fibra ótica típica (NI, 2011)

Inaudi, 1997, levou a cabo um estudo exaustivo sobre as diferentes tecnologias existentes baseadas em sensores de fibra ótica, para monitorização de estruturas em betão armado, conseguindo condensar as principais características mecânicas e óticas das fibras de sílica, aço e betão. Na Tabela 2.1 encontra-se uma versão adaptada da versão original expondo somente as características relativas à fibra ótica.

Tabela 2.1 – Características mecânicas e óticas de uma fibra ótica de sílica corrente (adaptado de Inaudi, 1997)

Características	Fibra Ótica
Composição Química	SiO ₂
Densidade [10 ³ kg/m ³]	2.2
Tensão de Ruptura [GPa]	5
Módulo de Young [GPa]	72
Coefficiente de Poisson	0.17
Elongação máxima [%]	2 - 8
Coefficiente de Expansão Térmica [10 ⁻⁶ / °C]	0.5
Ponto de Fusão [°C]	1665
Índice de Refração	1.46
Atenuação Típica [dB/ km]	0.3
Dispersão Típica [ps/ (km nm)]	20 (1550 nm)

2.2.1.1. Propagação da luz numa fibra ótica

A propagação da luz numa fibra processa-se, tal como fora mencionado anteriormente, pelo fenómeno de reflexão interna total oriundo da discrepância existente entre os índices de refração associados ao núcleo (n_{nu}) e à bainha que o envolve ($n_{ba} < n_{nu}$). Todavia o ângulo de incidência do sinal assume igual importância no processo.

Na Figura 2.5 introduz-se o conceito de cone de aceitação que reflete o ângulo máximo, ou de aceitação, que define o limite máximo que o ângulo de incidência pode assumir a fim de garantir a reflexão interna total.

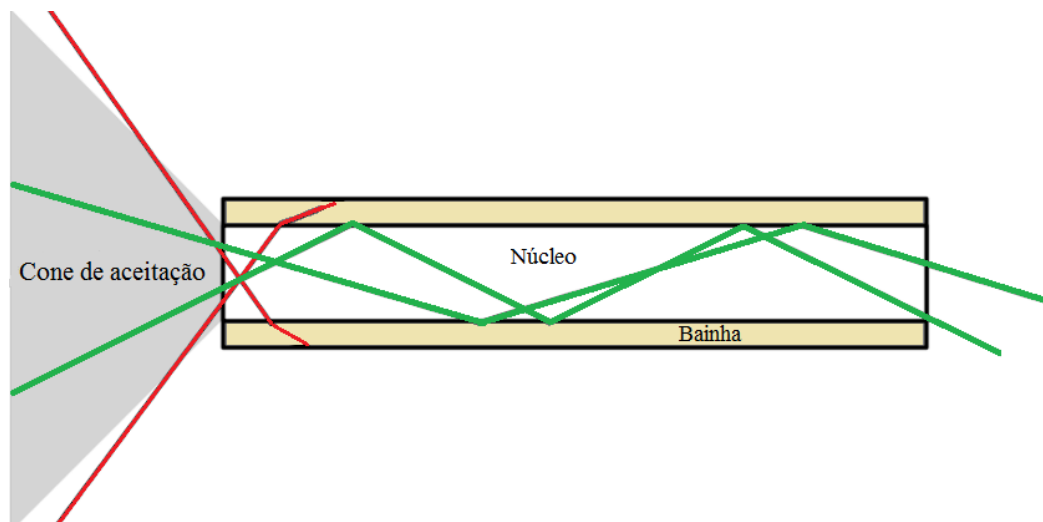


Figura 2.5 – Esquema do cone de aceitação

As fibras óticas caem em duas classes distintas quanto ao seu modo de propagação da luz que permitem, este depende diretamente da dimensão do núcleo das fibras e da razão dos índices de refração das duas camadas internas. Posto isto, o número de diferentes modos (M) propagados numa fibra é dado pela expressão (2.5). Quando V assume valores inferiores a 2.405 apenas um modo é permitido, já valores acima deste limite possibilitam múltiplos modos de propagação.

$$M = \frac{V^2}{2} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{2\pi r}{\lambda_0} \sqrt{n_{nu}^2 - n_{ba}^2} \right) \quad (2.5)$$



Figura 2.6 – Modos de propagação da luz: Fibra monomodal (SMF)

As fibras monomodais (SMF – *Single Mode Fiber* – Figura 2.6) exibem núcleos de diâmetros compreendidos usualmente entre 4 e 10 μm . Dada a reduzida dimensão destes face aos comprimentos de onda da luz, esta só se consegue propagar segundo um único feixe ou modo, desde que V seja menor do que 2.405. Acrescenta-se ainda que neste tipo de fibras é corrente um intervalo de comprimentos de onda situado entre 1300 nm e 1550 nm especialmente no âmbito das telecomunicações (Iten, 2011).

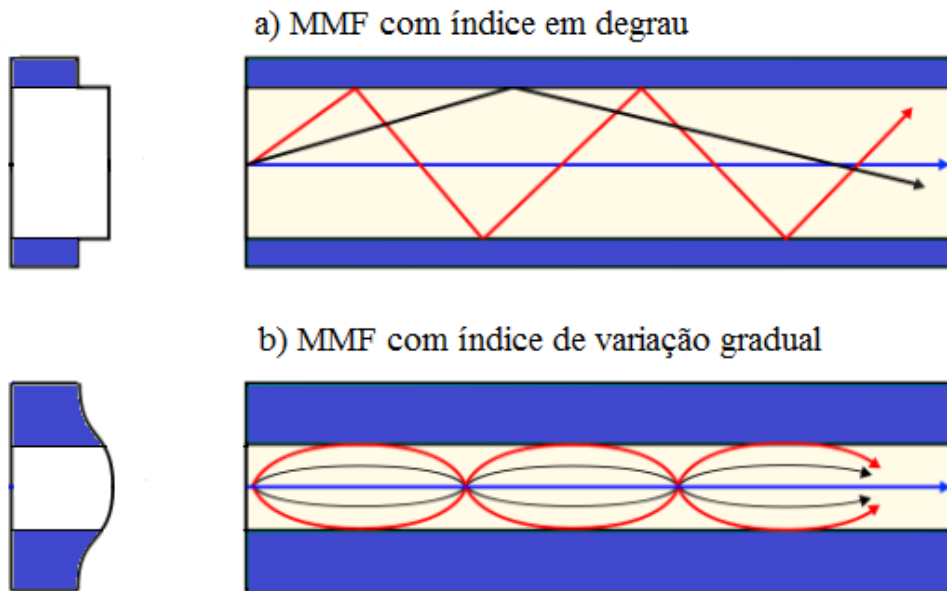


Figura 2.7 – Modos de propagação da luz: a) Fibra multimodal (MMF) com índice em degrau b) Fibra multimodal (MMF) com índice de variação gradual

Já as fibras multimodais (MMF – *Multi Mode Fiber* – Figura 2.7), com V maior do que 2.405, apresentam núcleos maiores em diâmetro partindo dos 25 μm podendo alcançar os 150 μm , possibilitando diferentes modos, na ordem das centenas, de propagação do sinal luminoso (Ribeiro, 2009). O uso comum deste tipo de fibras foca-se nas LAN's (*local area networks*), já que apresentam um custo comparativo inferior e uma dispersão intermodal desprezável, e operam geralmente num intervalo situado entre 850 nm e 1300 nm de comprimento de onda (Iten, 2011).

2.3. CLASSIFICAÇÃO DE SENSORES ÓTICOS

As grandezas físicas inerentes à radiação eletromagnética que servem de objeto de análise neste âmbito obrigam a uma classificação mais ou menos vasta segundo certos critérios (Ribeiro, 2009), entre os quais se destacam aqueles que o autor considera de maior interesse:

- Classificação segundo a natureza do elemento sensor
- Classificação com base na modulação
- Classificação com base na localização dos pontos de medida

2.3.1. CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A NATUREZA DO ELEMENTO SENSOR

Quanto à natureza dos sensores óticos destacam-se duas vertentes, sensores intrínsecos ou extrínsecos. Na Figura 2.8 observa-se um esquema tipo de um sensor intrínseco que se distingue de um extrínseco, Figura 2.9, pelo simples facto do primeiro servir simultaneamente como elemento transmissor e sensorial.

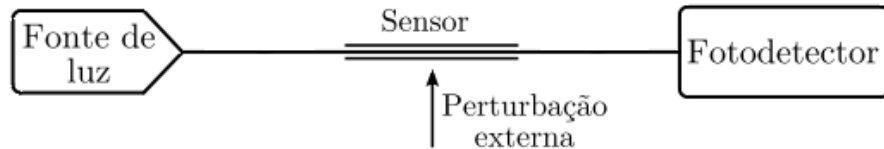


Figura 2.8 – Esquema de funcionamento de um sensor intrínseco de sinal transmissivo (adaptado de Rodrigues, 2011)

Esta característica, pertencente ao grupo dos intrínsecos, justifica-se plenamente na medida em que fatores externos influenciam certas propriedades foto-elásticas da própria fibra ótica e por consequência disto o feixe de luz, que se propaga nesta, é modelado. Sensores baseados em redes de Bragg assim como o interferómetro intrínseco de Fabry-Perot (IFPI) são os exemplos principais nesta categoria, (Rodrigues, 2011). Salienta-se ainda que neste tipo de sensores não existe necessidade de acoplar dispositivos externos à fibra, já que o sinal não sai da fibra, ao contrário daquilo que se verifica nos sensores extrínsecos, constituindo assim uma vantagem dos primeiros face a estes últimos.

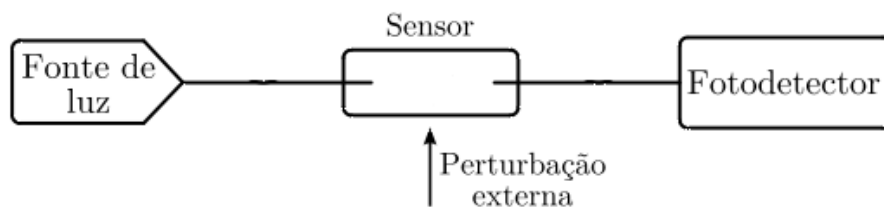


Figura 2.9 – Esquema de funcionamento de um sensor extrínseco de sinal transmissivo (adaptado de Rodrigues, 2011)

Nestes a fibra ótica cumpre exclusivamente o papel de elemento transmissor do sinal luminoso, na medida em que o sinal sai da fibra no ponto de interação com o parâmetro a medir, ou seja, encaminha o sinal desde a fonte de luz até ao dispositivo sensorial e deste até ao fotodetector. No dispositivo a luz sofre uma modulação de acordo com a variação da perturbação externa a medir. Acresce-se ainda a relevância dos extrínsecos na medida em que substituem sistemas convencionais (cablagem de cobre) usufruindo das vantagens da fibra (imunidade às interferências eletromagnéticas, etc.). O interferómetro extrínseco de Fabry-Perot (EFPI) cai neste grupo de sensores.

2.3.2. CLASSIFICAÇÃO COM BASE NA MODULAÇÃO

Nesta classe reinam os sensores intrínsecos, já que a fibra cumpre ambos os papéis de meio transmissor e sensor, em que perturbações externas atuantes na fibra ótica geram modulações nas propriedades do feixe de luz em termos de intensidade, polarização, fase e comprimento de onda. Na Tabela 2.2, adaptada de Rodrigues (2011), estabelece-se a relação entre a modulação das grandezas que caracterizam o feixe luminoso e os respetivos princípios físicos.

Tabela 2.2 – Modulação da luz e respetivos princípios físicos

Modulação	Princípio Físico
Intensidade	Alteração da intensidade devido a variações de absorções, emissões ou dispersões
Polarização	Mudança no tensor de polarização
Fase	Interferência entre o sinal do sensor e um sinal de referência
Comprimento de onda	Influência da reflexão, absorção, emissão e índice de refração no comprimento de onda

2.3.3. CLASSIFICAÇÃO COM BASE NA LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIDA

Os sensores óticos ramificam-se quanto à sua base de medida em três grupos fundamentais, nomeadamente em sensores pontuais, quasi-distribuídos (através de multiplexagem de sensores pontuais) e distribuídos. O princípio de funcionamento básico de cada um destes grupos encontra-se esquematizada na Figura 2.10.

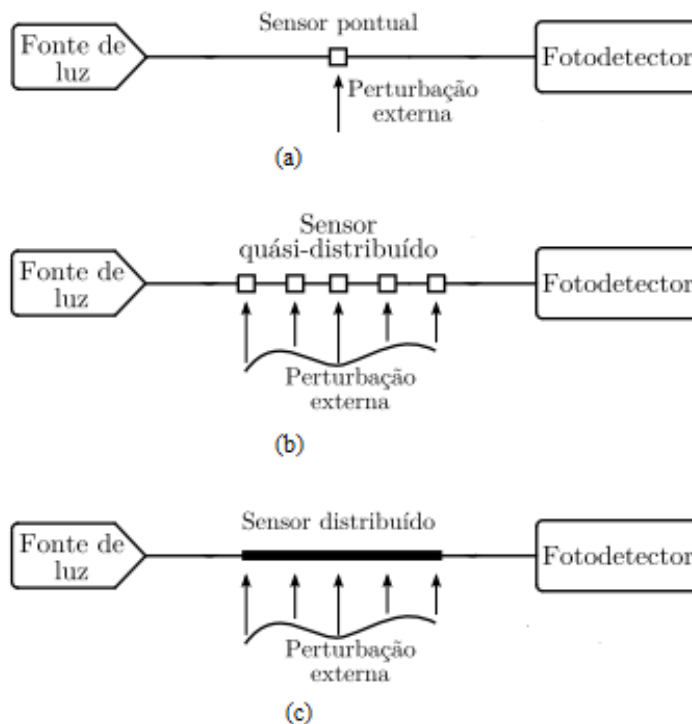


Figura 2.10 – Classificação de sensores óticos com base na localização dos pontos de medida: a) sensor pontual; b) sensor quasi-distribuído; c) sensor distribuído (adaptado de Rodrigues, 2011)

2.3.3.1. Sensores Pontuais

Os sensores pontuais possibilitam o registo medições em pontos específicos conhecidos possuindo uma base de medida na ordem dos milímetros até alguns centímetros, Figura 2.10a. A sua aplicação em ensaios de laboratório ganha especial relevância dado o elevado rigor e diminuta dimensão que estes permitem. No entanto a capacidade destes em se tornarem num sistema quasi-distribuído, por multiplexagem, que consiste basicamente em dispor diversos sensores pontuais numa mesma fibra ótica torna-os bastantes apelativos quanto ao seu potencial de aplicação “*in situ*” viabilizando sistema fiáveis e altamente sensíveis de monitorização a serem implementadas em obras civis.

São exemplos deste tipo de sensores aqueles baseados em redes de Bragg (FBG – *Fiber Bragg Gratings*) e também os interferómetros de Fabry-Perot.

2.3.3.2. Sensores quasi-distribuídos através de multiplexagem

A possibilidade de multiplexagem em série de sensores pontuais permite a obtenção de um sistema quasi-distribuído, que na sua essência consiste numa sequência de sensores óticos pontuais, impressos ao longo da mesma fibra (Figura 2.10b), capaz de fornecer um traçado de perfis espaciais associado a certas grandezas mecânicas. O facto de se conseguir instalar um número vasto de sensores numa só fibra constitui uma grande vantagem já que combate o congestionamento de cablagem de sistemas tradicionais, por outro lado se houver uma quebra na fibra junto da fonte de emissão do sinal os sensores a jusante desta torna-se imediatamente obsoletos. Assim o ideal, aquando a utilização destes sistemas, seria o uso de várias fibras e dada a reduzida dimensão destas, em diâmetro, a vantagem prevalece. Desta forma, pode-se validar as medições realizadas pelo conjunto de fibras incorporadas no sistema e acautela-se o cenário atrás exposto. Os sensores baseados em redes de Bragg são os mais correntes a implementar neste tipo de sistema. A propósito destes menciona-se o trabalho realizado por Gwandu *et al.* (2001) que introduz um novo conceito nesta matéria, *compact FBG grating array* (Figura 2.11), que visa tornar este tipo de multiplexagem num sistema praticamente distribuído com o desenvolvimento de um processo, de alguma complexidade, de fabricação de redes de Bragg contínuas por máscaras de fase em fibras previamente tensionadas. Conseguindo como resultado final uma resolução espacial elevada de 1 mm com uma distribuição de redes de Bragg, com distintos comprimentos de onda, sem lacunas físicas entre elas. O autor considera este estudo de grande interesse e crê no progresso futuro do mesmo, tendo em conta as limitações ainda existentes da aplicabilidade prática do conceito, tais como deficiente resolução espectral e restrição do número de redes de Bragg a serem implementadas.

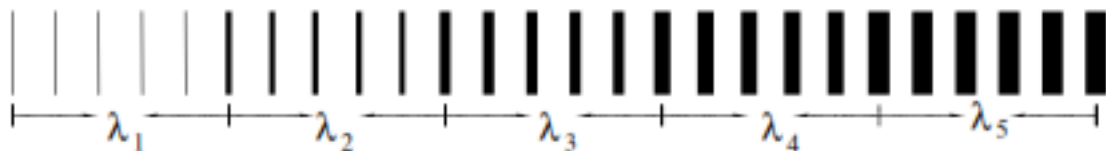


Figura 2.11 – Conceito teórico de uma estrutura compacta de redes de Bragg (adaptado de Gwandu *et al.*,2001)

2.3.3.3. Sensores Distribuídos

No caso dos sensores distribuídos a análise de perturbações externas é feita de forma contínua no espaço, ou seja, qualquer ponto da fibra atua como um sensor, Figura 2.10c. Atualmente consegue-se obter uma resolução espacial de um metro (generalizando), esta encontra-se condicionada pela limitação tecnológica dos aparelhos de aquisição pois estes não possuem capacidade suficiente de interpretar, na sua plenitude, a velocidade de propagação da luz e de estabelecer a localização exata, ao longo da fibra, onde esta sofre ações externas. Esta particularidade pode ser facilmente desprezada tendo em conta que o alcance deste sistema atinge distâncias consideráveis na ordem das dezenas de quilómetros (Iten, 2011). Assim o potencial e vantagens da sua aplicabilidade no âmbito de monitorização de obras estruturais e geotécnicas também não se deixa afetar.

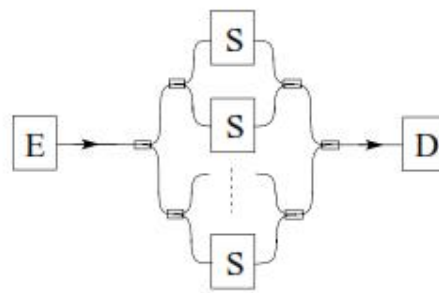
2.3.4. MULTIPLEXAGEM

A multiplexagem de sensores óticos é um aspeto de extrema relevância a ter em conta no panorama sensorial e de grave importância na indústria de engenharia civil. Uma vez que existe a necessidade de implementação de um grande número de sensores em sistemas de monitorização de obras, podendo se analisar inúmeras grandezas físicas ou a mesma grandeza em diversos locais ou pontos estratégicos.

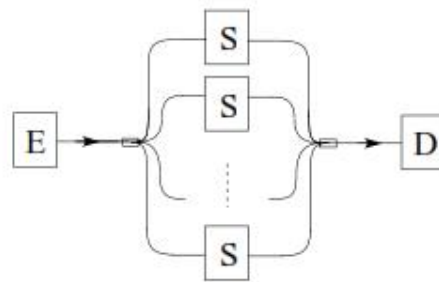
A premissa geral baseia-se na interrogação de um vasto número de sensores dependentes da mesma fonte ótica, o que torna este tipo de sistemas (multiplexados) economicamente apelativos. Pois os interrogadores assumem um peso financeiro significativo uma vez comparados com os restantes componentes óticos essenciais ao sistema sensorial.

Existem dois fatores fundamentais diretamente relacionados com este conceito, o primeiro prende-se com a topologia da rede que descreve fisicamente a interligação dos sensores a fim de gerar uma rede; o segundo diz respeito ao endereçamento dos sensores que reflete a discriminação da informação proveniente de cada sensor envolvido numa rede, que assenta na modulação das propriedades da luz, como a intensidade, comprimento de onda, fase ou polarização (Lobo, 1996).

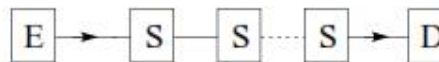
Quanto à topologia da rede esta pode ser, descrevendo-a de forma vaga, em série, em estrela ou em árvore. Na Figura 2.12 observa-se exemplos destas topologias do tipo transmissivo apenas em que E traduz a fonte emissora, S sensor e D fotodetector.



a) **Árvore Transmissiva**



b) **Estrela Transmissiva**



c) **Série Transmissiva**

Figura 2.12 – Topologias de rede básicas do tipo transmissivo (adaptado de Lobo, 1996)

O endereçamento dos sensores é que vale a pena discutir com alguma profundidade, e embora existam diversos tipos de endereçamento tais como em frequência, temporal, comprimento de onda, em coerência, espacial, etc. (Lobo, 1996). O autor faz questão de desenvolver conceitos relativos àqueles que, maior relevância assumiram nos últimos anos no âmbito da indústria civil, estes são:

- Endereçamento Temporal (TDM – *Time Division Multiplexing*)
- Endereçamento Espacial (SDM – *Spatial Division Multiplexing*)
- Endereçamento em Comprimento de Onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*)

2.3.4.1. Endereçamento Temporal

Neste tipo de endereçamento (TDM – *Time Division Multiplexing*) o sinal relativo a cada sensor pertence a uma janela temporal própria e é assim avaliado conhecendo o instante em que este é recebido pela unidade de leitura. O processo baseia-se na modulação temporal da potência ótica que é transmitida ao sistema e é vital assegurar extensões apropriadas de fibra ótica na rede de modo a garantir diferenças de tempo de propagação entre os sinais dos diversos sensores constituintes do sistema (Lobo, 1996). Na Figura 2.13 apresenta-se esquemas de exemplo de funcionamento de uma rede multiplexada quer em série quer em paralelo, em que a cada sensor S_i pertence um instante de tempo t_i .

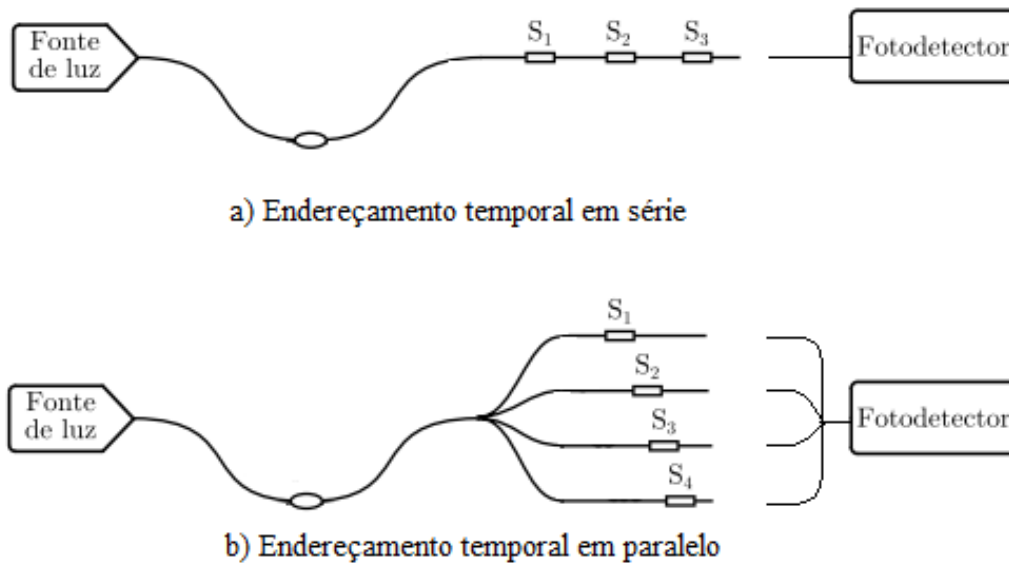


Figura 2.13 – Esquemas de endereçamento: a) em série; b) em paralelo (adaptado de Rodrigues, 2011)

Para que os retornos dos sinais de cada sensor não se sobreponham no tempo é feita uma discriminação dos mesmos através da injeção de impulsos óticos no sistema com um dado intervalo de tempo característico, entre sinais consecutivos, e com uma certa duração específica (Rodrigues, 2011).

2.3.4.2. Endereçamento Espacial

Nos primórdios esta técnica exigia uma fibra ótica de retorno para cada sensor, ou seja, quanto maior o número de sensores no sistema maior o comprimento total de fibra. Deste modo o sistema é isento de “*cross-talk*” com um nível de ruído baixo permitindo ainda a substituição e mesmo a alteração do número de sensores presentes no sistema multiplexado (Lobo, 1996).

Correntemente é exequível usufruir de um equipamento de multiplexagem, comutador ótico (“*switch*”), que possibilita a multiplicação de um canal de fibra por um número vasto de novos canais, por varrimentos sequenciais proporcionando um funcionamento bidirecional do sinal. Desta forma descarta-se a necessidade de fibras óticas de retorno assim como as vantagens associadas a estas.

2.3.4.3. Endereçamento em Comprimento de Onda

Esta técnica de multiplexagem (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) baseia-se na discriminação dos inúmeros sensores, implementados num dado sistema, pelo comprimento de onda refletido ou transmitido (Rodrigues, 2011). Assim conhecendo o comprimento de onda de cada sensor e a respetiva banda de funcionamento, desde que estes não se sobreponham, a identificação do sinal de cada um destes torna-se evidente. Note-se que os esquemas presentes na Figura 2.13 são válidos também para este tipo de endereçamento na medida em que para cada sensor S_i corresponde um dado comprimento de onda, λ_i , respetivo.

Os sensores pontuais de Bragg são utilizados muito frequentemente em sistemas multiplexados endereçados através desta técnica. Tendo cada sensor um comprimento de onda central ou de pico característico, diretamente relacionado com a variação imposta do índice de modulação periódico, assim como uma dada banda de funcionamento, completamente independente, a aplicabilidade deste tipo de multiplexagem é fortemente condicionada pela gama de espectro disponível (Bortolotti *et al.*, 2012). A título de exemplo demonstra-se na Figura 2.14 um sistema multiplexado em série de sensores FBG com índices de modulação periódica distintos (Λ_i) que por sua vez geram picos diferentes de comprimentos de onda.

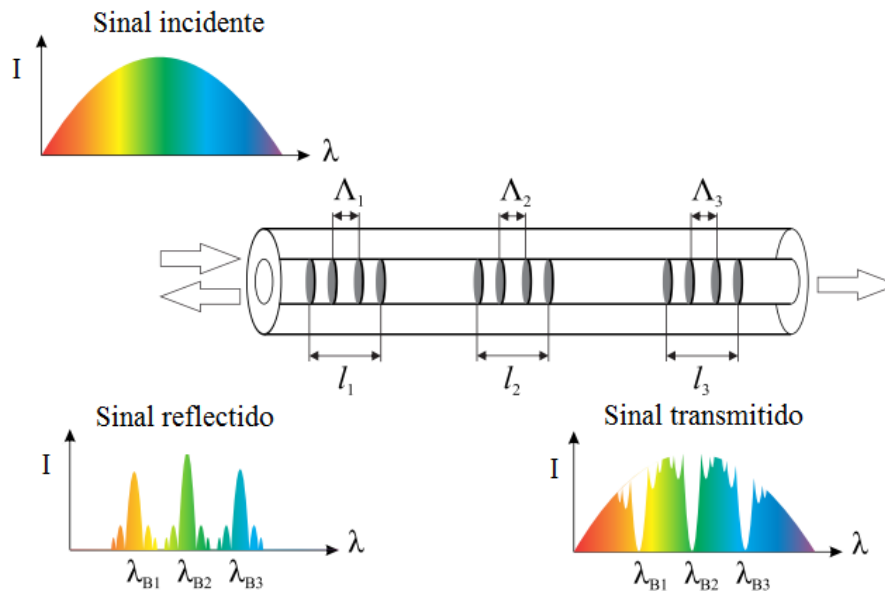


Figura 2.14 – Exemplo de um endereçamento em comprimento de onda de três sensores FBG (adaptado de Bortolotti *et al.*, 2012)

2.4. UNIÃO ENTRE FIBRAS ÓTICAS

O processo de unir fibras óticas é uma necessidade inerente ao manuseamento das mesmas. As causas desta inevitabilidade podem ser várias das quais se destacam alguns exemplos, nomeadamente, reparação de eventuais quebras na fibra, ligação a “*pigtails*”, etc..

2.4.1. EMENDAS

Dentro deste contexto vale a pena mencionar dois tipos distintos de emendas, o primeiro consiste numa via permanente (por fusão) o outro assume um carácter provisório, realizado através de conectores.

As uniões, quer sejam permanentes ou temporárias, devem cumprir certos requisitos evidentes ao apresentarem uma boa resistência mecânica assim como garantir uma transmissão ótima do sinal equivalente àquela que se verifica numa fibra contínua (Iten, 2011). Embora existam sempre perdas de luz associadas a estes processos dependendo da correta execução destes, acrescenta-se ainda que o processo de fusão ganha especial interesse pois as perdas que se verificam nas emendas por fusão são consideravelmente inferiores àquelas que se observam nos conectores.

2.4.1.1. Conectores

O mercado atual fornece um leque extenso de conectores sendo a dimensão e o tipo de ligação mecânica que permitem os principais fatores que os distinguem. Na sua essência um conector caracteriza uma colagem de uma extremidade de uma fibra ótica a um ferrule (Figura 2.15), que por sua vez consiste num dispositivo de alinhamento de alta precisão cuja primordial função é assegurar a concordância do núcleo das fibras a unir.



Figura 2.15 – Vista do conector e o respetivo ferrule (adaptado de Rodrigues, 2011)

Dos inúmeros tipos de conectores existentes destacam-se aqueles que acrescem vantagens relevantes relativas ao seu manuseamento, à sua eficácia de transmissão de sinais e à sua durabilidade. São, então, estes os conectores FC/ PC (*ferrule connectors/ physical contact*) e os conectores FC/ APC (*ferrule connectors/ angled physical contact*). Os primeiros, conectores PC (Figura 2.16a), possuem a face do elemento de ligação “lisa” em cúpula com o objetivo de minimizar reflexões oriundas de pequenas lacunas de ar entre as extremidades da fibra emendada (Iten, 2011). Já os FC/ APC (Figura 2.16b) apresentam um ligeiro corte, com um ângulo de aproximadamente de 8° , no elemento de ligação que visa minimizar o ruído do sinal mitigando reflexões no ponto de contacto em si.

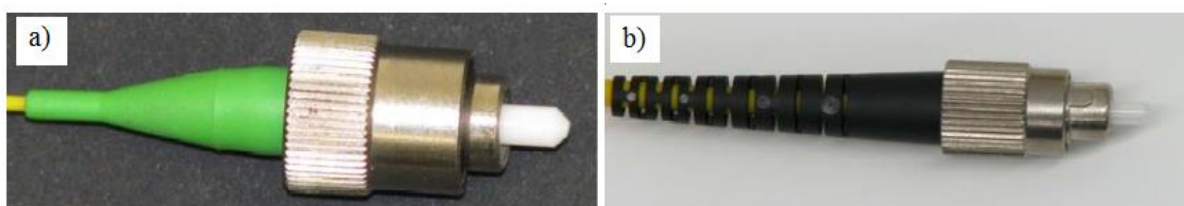


Figura 2.16 – Conectores: a) FC/ APC; b) FC/ PC (adaptado de Iten, 2011)

Salienta-se ainda a grave importância da limpeza dos elementos de ligação, pois a menor impureza nestes condiciona significativamente o correto funcionamento dos conectores comprometendo todo o sistema sensorial no qual se encontram instalados.

2.4.1.2. Fusões

O processo de fusão de fibras óticas dá origem a emendas permanentes garantindo um excelente desempenho destas, aliás muito próximo aquele que se verifica numa fibra ótica contínua. Tal efeito é conseguido através do uso de um equipamento altamente especializado (Figura 2.17), máquina de fusão (*Splicer*), e geralmente bastante automatizado de forma a que o operador deste requeira apenas de noções básicas relacionadas com o seu manuseamento a fim de cumprir a sua função principal. Esta, por sua vez, consiste na união de duas extremidades de fibra, após o devido alinhamento rigoroso dos núcleos, através da descarga de um arco elétrico no ponto de contacto das fibras (Figura 2.18b) ionizando a diminuta lacuna espacial existente neste eliminando o ar e elevando a temperatura até aos 1100 °C (Iten, 2011). Esta tarefa é toda automatizada, inclusive o alinhamento das duas fibras, e permite ao utilizador o seu acompanhamento através de um interface gráfico.



Figura 2.17 - Processo de emenda de fibras óticas por fusão (Innostruments, 2016)

Importante é mencionar que antes da operação que envolve o *Splicer*, as extremidades das fibras têm de ser devidamente descarnadas e cortadas perpendicularmente ao seu eixo. Para esta última etapa recorre-se a um clivador de alta precisão (Figura 2.18a) que efetua o corte de forma rápida e eficiente.

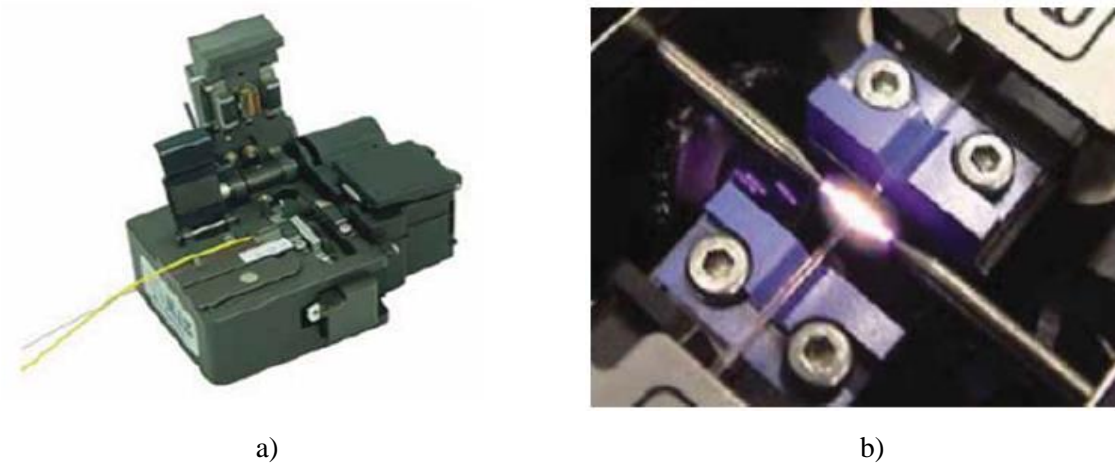


Figura 2.18 – a) Clivador de alta precisão; b) Descarga de um arco elétrico (adaptado de Rodrigues, 2011)

Da conclusão da fusão resulta uma fibra ótica praticamente contínua de alguns centímetros sem qualquer tipo de revestimento, uma vez que as extremidades foram descarnadas para o efeito. Daí haver o fundamento de fortalecer esta zona através de um dispositivo de proteção, que por norma assenta numa manga térmica retráctil (Figura 2.19). É usual possuírem no seu interior uma peça metálica de reforço, a fim de garantir uma boa resistência mecânica à emenda.



Figura 2.19 – Exemplo de mangas (Fibracem, 2016)

2.4.1.3. Pigtails

Os ditos *Pigtails* (Figura 2.20) são segmentos de dimensão variável em comprimento que possuem conectores previamente instalados numa das extremidades da fibra em condições de fábrica controladas. E assim sendo a qualidade da instalação supera a que advém da implementação manual. Para além desta vantagem são também bastante práticos já que se podem unir com facilidade a cabos de fibra ótica através do processo de fusão.

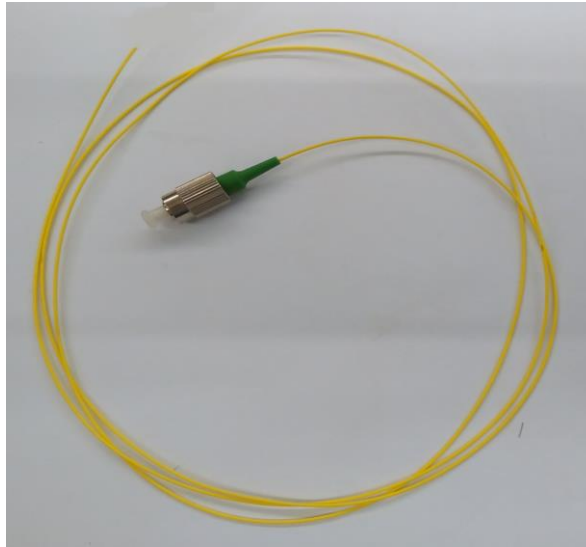


Figura 2.20 – Pigtail com conector FC/ APC

2.4.1.4. Perdas do sinal localizadas e interrupções na transmissão do sinal

Perdas do sinal estão sempre presentes nas emendas, em maior ou menor grau, sejam estas permanentes ou provisórias. Independentemente do tipo da emenda as causas das perdas são sensivelmente as mesmas (Rodrigues, 2011):

- Abertura numérica
- Desalinhamento transversal entre os núcleos
- Desalinhamento angular entre os núcleos
- Diferenças no diâmetro dos núcleos
- Afastamento das extremidades das fibras
- Contaminação por existência de impurezas

Mesmo quando a qualidade das emendas é garantida as emendas permanentes as perdas podem variar entre 0 dB e 0.15 dB, já nas provisórias a perda de luz pode chegar a 1 dB (Iten, 2011).

Tendo em conta as condições severas que um ambiente de obra, especialmente geotécnico, oferece há que ter um cuidado extremo quando se procura implementar um sistema de sensores óticos. Pois a falha na transmissão do sinal compromete todo o seu potencial implicando a inatividade do sistema. Para além dos possíveis problemas oriundos de emendas, permanentes e temporárias, pode ainda ocorrer a quebra do cabo de fibra ótica assim como uma atenuação elevada do sinal (Iten, 2011). Este último aspeto é de grave importância visto que a sua origem assenta em grandes concentrações de esforços no cabo da fibra, um cenário hipotético, mas muito provável em ambientes agressivos que se verificam na maioria das obras civis e portanto deve ser devidamente acautelado por elementos de proteção.

2.5. COMPONENTES DE UM SISTEMA SENSORIAL ÓTICO

Para servir o propósito de um sistema sensorial ótico básico tem de haver uma fonte de luz, um determinado número de sensores óticos (ou sensor contínuo ao longo de toda fibra) e uma unidade de leitura (fotodetector) capaz de interrogar o sinal proveniente da fonte. Incluindo todos os componentes de pormenor abordados em subcapítulos anteriores.

2.5.1. EQUIPAMENTOS DE INTERROGAÇÃO

A interrogação propriamente dita assenta na conversão do sinal, previamente modulado pelos sensores, em grandezas de interesse. O mercado atual fornece equipamentos que cumprem as duas funções essenciais, servem como fontes de emissão luz e como recetores do sinal, para além de apresentarem, cada vez mais, *designs* compactos hipotecando um facilitismo enorme de transporte. De grosso modo, um interrogador ilumina o sensor com um espectro de luz apropriado, consoante o tipo de sensor ótico, e ainda analisa o sinal proveniente deste convertendo-o em unidades de interesse.

Dentro destes equipamentos distinguem-se os de escala industrial dos portáteis, os primeiros (Figura 2.21) apresentam maior robustez e por norma um maior número de canais a serem aplicados em ambientes industriais, enquanto que os portáteis se destinam mais a aplicações em campo. No entanto, a lacuna que os separa em termos de capacidades e de aplicabilidade está a ser progressivamente encurtada, dada a evolução do mercado ótico.



Figura 2.21 – FS22 Industrial BraggMETER (HBM, 2016)

As unidades de interrogação ditas portáteis (Figura 2.22) possuem uma interface tátil permitindo uma análise em tempo real das medições que decorrem e outras funções programáveis, como por exemplo estipulação de horários de funcionamento, definição de alertas, geração de base de dados dos registos efetuados, etc.



Figura 2.22 – FS42 Portable BraggMETER (HBM, 2016)

2.5.2. SENSORES ÓTICOS COMERCIALIZADOS

Dependendo das grandezas que se pretendem medir, tais como extensões mecânicas, variações de temperatura, pressões envolventes, vibrações, etc., e do meio de instalação dos sensores, estes carecem, na sua forma original, de elementos que favorecem a sua proteção e facilitem a sua instalação e exposição às grandezas de medição desejadas. Encontram-se alguns exemplos de sensores de Bragg concebidos para medição de extensões na Figura 2.24 e na Figura 2.23 um transdutor FBG acelerométrico, comercializados pela HBM já dotados de certos elementos desenvolvidos para potenciar os mesmos para um da do fim.

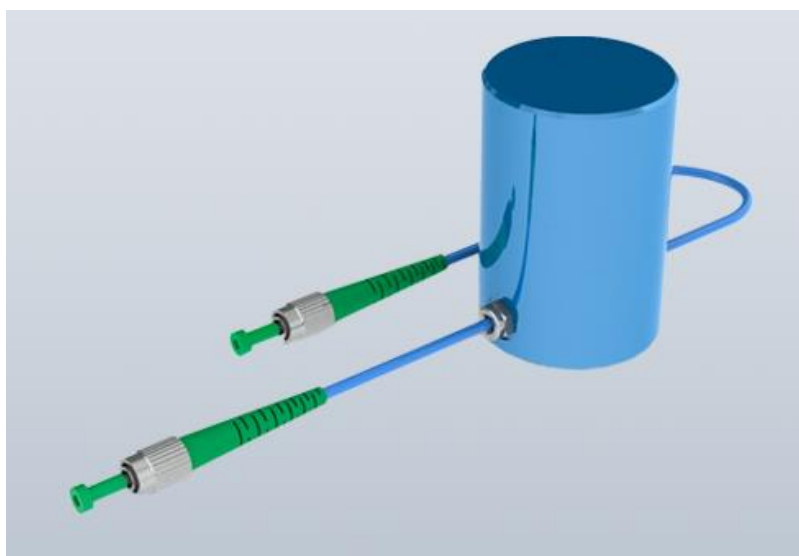


Figura 2.23 – Exemplo de um acelerómetro baseado em redes de Bragg (HBM, 2016)

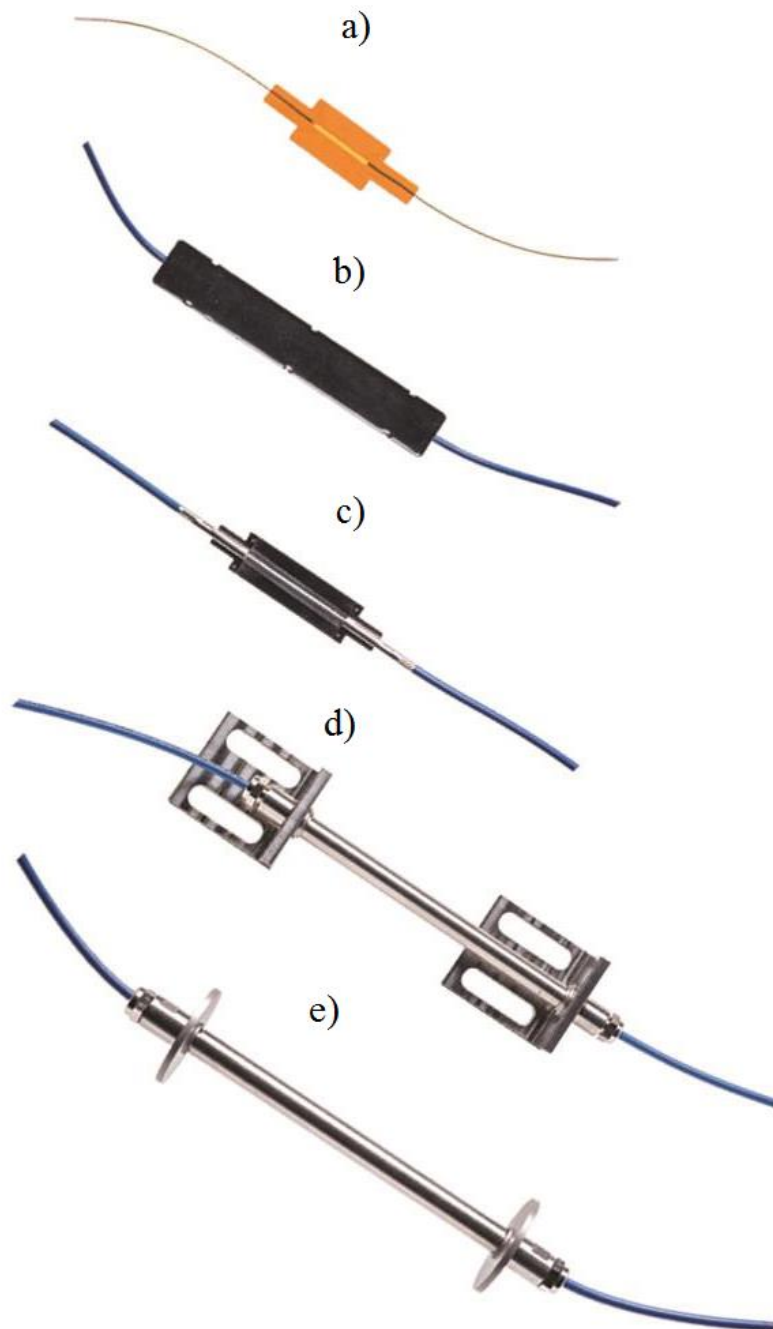


Figura 2.24 – Exemplos de transdutores de deslocamento baseados em redes de Bragg: a) & b) sensores de colagem; c) sensor de soldar; d) sensor de fixamento e) sensor de embebiamento (HBM, 2016)

2.6. SENSORES ÓTICOS CORRENTES

A existência de diferentes tipos de sensores óticos assim como a disparidade das suas características, vantagens e desvantagens tornam determinados tipos mais apelativos para aplicações em obras civis, em particular geotécnicas, dependendo do facilitismo de instalação, viabilidade económica, durabilidade e interpretação dos resultados. De seguida apresentam-se alguns tipos de sensores óticos, sejam estes pontuais ou distribuídos, com enorme potencial de aplicação na área de engenharia geotécnica e de interesse do ponto de vista de investigação.

2.6.1. SENSORES DE BRAGG (FBG)

Uma rede de Bragg, ou FBG (*Fiber Bragg Grating*), consiste numa modulação local e periódica, de carácter permanente e longitudinal, do índice de refração do núcleo da fibra ótica, dando origem a um dado segmento de propriedades refletivas díspares face àquelas que caracterizam a restante fibra. É de salientar que o comprimento físico da rede de Bragg varia entre alguns milímetros até uns centímetros, geralmente entre um milímetro a dois centímetros (Antunes, 2011).

Posto isto, é possível recorrer a uma multiplexagem eficiente destas redes com intervalos curtos entre as mesmas (na ordem dos centímetros), evitando assim a azáfama proveniente da múltipla cablagem associada aos sensores eletrónicos convencionais. Para além desta vantagem, e outras ainda mais importantes, inerentes à própria utilização da fibra ótica, estes sensores apresentam um rácio elevado entre o sinal e o ruído. A excelente relação entre o custo de investimento e o retorno em termos práticos também não se pode descartar.

Na indústria das telecomunicações esta tecnologia é bastante popular no domínio dos filtros e refletores. No entanto a alta sensibilidade que apresenta face a medições de variações de temperatura e de deformação longitudinal assim como um sinal de reflexão relativamente potente torna-a num instrumento de grande apreço plenamente justificado já bem estabelecida no mercado atual como sensores de elevada qualidade.

2.6.1.1. Princípio de funcionamento

A transmissão de um sinal luminoso, que engloba um vasto leque espectral, por um sensor ótico de Bragg vai fazer com que uma fração deste seja refletido por parte da rede de Bragg (FBG). Esta parcela compreende uma região espectral específica do sinal inicial centrada no comprimento de onda de Bragg (λ_B) – condição de Bragg de primeira ordem. Os restantes intervalos espectrais, caracterizados por outros comprimentos de onda, que não verificam esta condição continuam a propagar-se normalmente, na medida em que são refletidos fora de fase com tendência a anularem-se passando pela rede sem serem perturbados pela mesma (Antunes, 2011), conforme a Figura 2.25 ilustra.

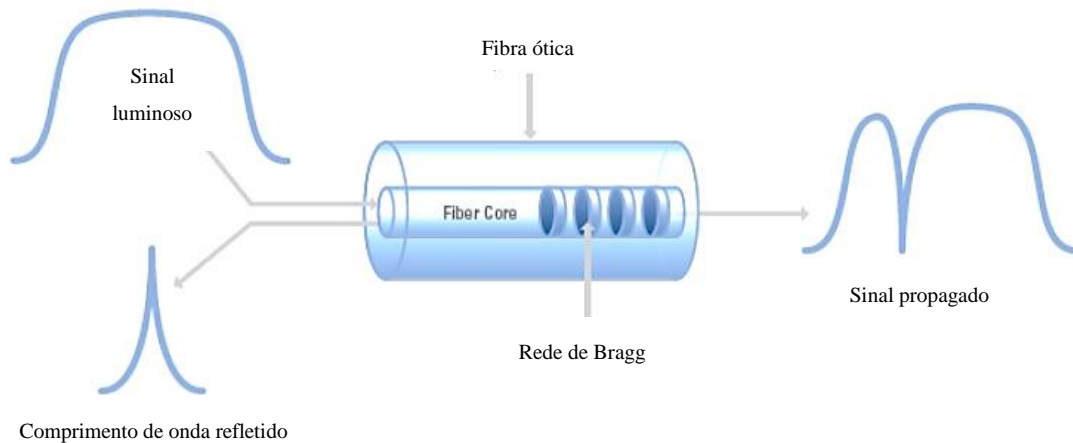


Figura 2.25 – Princípio básico de funcionamento de uma rede de Bragg (NI, 2011)

Nesta medida o sinal refletido de cada rede incorpora um domínio de comprimentos de onda constituído pela soma do comprimento de onda de Bragg (λ_B) com a variação que este experimenta ($\Delta\lambda_B$), esta encontra-se intrinsecamente dependente de esforços longitudinais ($\Delta\lambda_{B, \text{strain}}$) e de variações térmicas ($\Delta\lambda_{B, \text{temperature}}$) que a rede de Bragg experimenta.

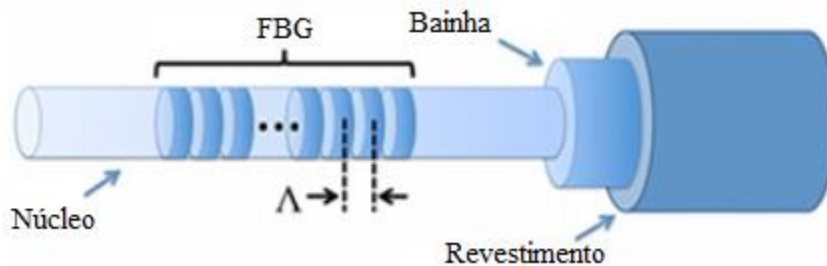


Figura 2.26 – Rede de Bragg em pormenor (NI, 2011)

O comprimento de onda de Bragg ou condição de Bragg de primeira ordem, Equação (2.6), caracteriza-se pela periodicidade espacial do índice de refração (Λ), que constitui literalmente o espaçamento entre as grades (Figura 2.26), e pelo índice de refração efetivo do núcleo da fibra (n_{eff}):

$$\lambda_B = 2 \times n_{eff} \times \Lambda \quad (2.6)$$

O período espacial do índice de refração assim como o índice de refração efetivo encontram-se altamente dependentes das variações de temperatura e de esforços mecânicos, pelo que o comprimento de onda de Bragg se altera consoante estas perturbações que por sua vez induzem variações nas variáveis que o definem.

Atendendo apenas à influência do período espacial e desprezando o efeito de temperatura pode-se afirmar que já que as redes de Bragg são sensíveis a esforços mecânicos longitudinais, apresentam um comportamento distinto, no que diz respeito ao deslocamento do comprimento de onda de Bragg ($\Delta\lambda_{B, \text{strain}}$), uma vez submetidas a esforços de tração ou de compressão.

Um esforço de compressão na fibra induz uma diminuição do período espacial da rede (Λ) fazendo com que λ_B sofra um deslocamento negativo. Se o esforço for de tração acontece precisamente o oposto, um aumento na periodicidade espacial (Λ) e uma variação positiva no deslocamento de λ_B (Oliveira, 2011). Na Figura 2.27 evidencia-se a influência de esforços mecânicos sobre a variação do comprimento de onda de Bragg.

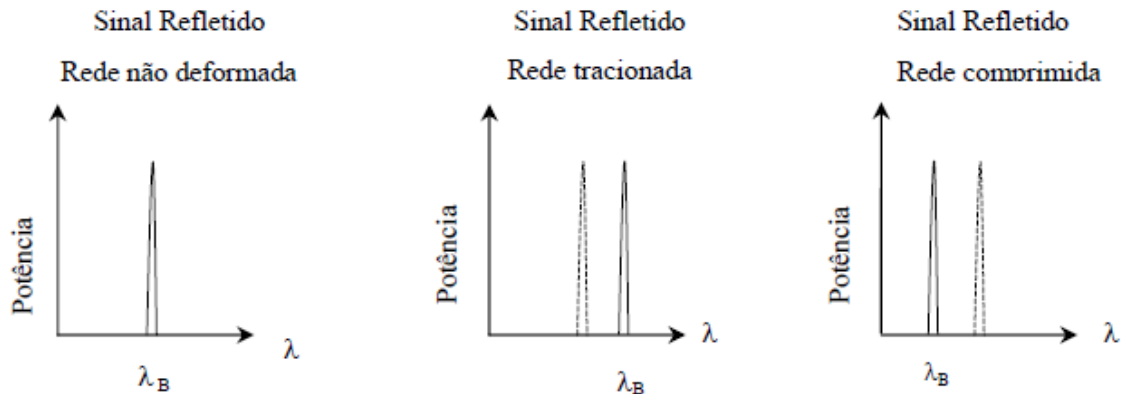


Figura 2.27 – Influência de esforços longitudinais externos à fibra na variação do comprimento de onda central de Bragg (adaptado de Oliveira, 2011)

2.6.1.2. Fabricação de redes de Bragg

Existem diversas técnicas que permitem a escrita de redes de Bragg numa fibra ótica e embora assentem em processos díspares partilham uma premissa geral que por sua vez consiste em expor um dado segmento de fibra a um padrão de radiação UV (ultravioleta) de alta intensidade com o intuito último de gerar um padrão de interferência nesse segmento de fibra. Para tal a fibra deve apresentar uma fotossensibilidade suficiente a fim de se tornar convenientemente suscetível a essa radiação. Como as fibras óticas típicas carecem de uma fotossensibilidade adequada para estas técnicas surge a obrigação de potenciar esta propriedade, o que se consegue através da co-dopagem do núcleo, do aumento da concentração de germânio ou da hidrogenização da fibra. Este último processo tornou-se na via mais apreciada pela comunidade ótica, pela sua simplicidade e eficácia do resultado final (Antunes, 2011).

Em 1989, G. Meltz conseguiu gravar uma rede de Bragg numa fibra fotossensível exposta de forma transversal com o auxílio de uma instalação interferométrica holográfica (Figura 2.28) (Zhou *et al.*, 2003). Esta técnica interferométrica é alcançada ao dividir um feixe de radiação UV, através de um divisor de feixe ou prisma, em dois feixes coerentes que posteriormente são refletidos em espelhos a fim de se recombinarem num segmento de fibra gerando assim um padrão de interferência no mesmo. A vantagem deste método tem como base a facilidade de ajuste dos espelhos permitindo o controlo do ângulo entre os dois feixes de radiação e deste modo fazer variar o índice de periodicidade espacial da rede Bragg (Λ) a gravar, com influência direta no seu comprimento de onda (λ_B), (Marques, 2008, Werneck *et al.*, 2013, Zhou *et al.*, 2003), ou seja, o período espacial da rede (Λ) é completamente independente do comprimento de onda da radiação UV (λ_{UV}), conforme se averigua na seguinte equação:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2 \sin(\varphi)} \quad (2.7)$$

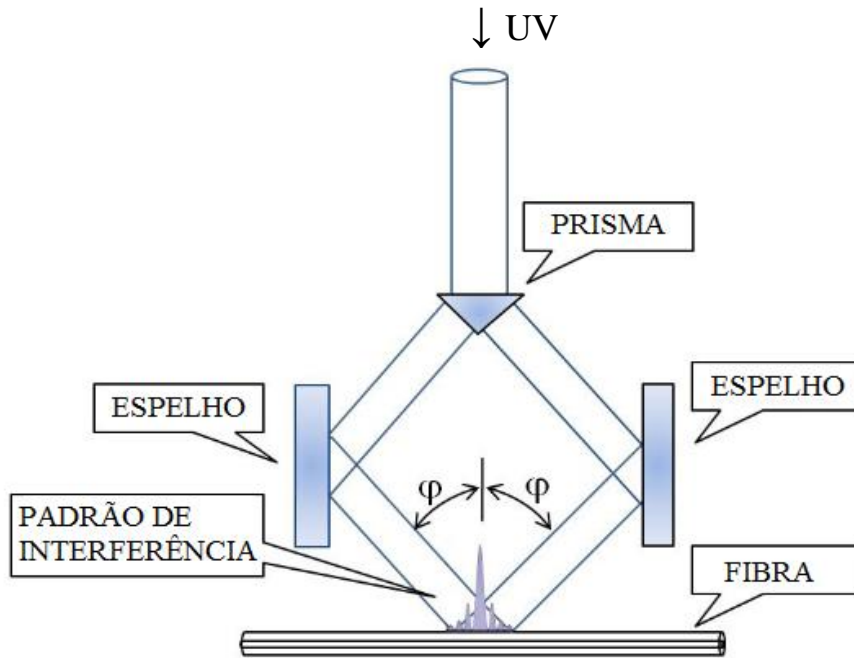


Figura 2.28 – Interferômetro básico (adaptado de Werneck *et al.*, 2013)

As desvantagens inerentes ao método holográfico consistem, entre outras, na dificuldade em alinhar os feixes de radiação, vibrações mecânicas e alcançar uma boa coerência espacial associada à fonte de luz (Marques, 2008).

Em 1998 Hill *et al.* pôs em prática um novo método de fabricação de redes de Bragg ao incorporar uma máscara de fase (Zhou *et al.*, 2003). Esta consiste num elemento ótico de difração capaz de modular espacialmente o feixe de radiação UV com um dado período (Λ_{UV}). São feitas de um substrato de sílica cuja superfície é ocupada por um conjunto de depressões longitudinais e podem ser produzidas por meios holográficos ou por meios litográficos (Antunes, 2011, Werneck *et al.*, 2013). A utilização de uma máscara de fase pertence ao grupo de técnicas não-interferométricas, assim como a utilização de máscaras de amplitude. Estas são também compostas por um substrato de sílica mas distinguem-se das outras por suportarem um aglomerado de linhas, paralelas entre si, opacas à radiação UV (Marques, 2008) Todavia a combinação do processo interferométrico com máscaras de fase é bastante usual e elimina certas desvantagens presentes no caso da sua exclusão, conforme se confirmará após detalhar esta técnicas não-interferométrica.

Tendo em consideração as características de uma máscara de amplitude, a projeção de um feixe UV pela mesma proporciona alterações no índice de refração do núcleo no qual incide, usufruindo de um sistema de lentes com redução de imagem (Figura 2.29) (Marques, 2008). Esta técnica exige um contacto direto entre o sistema de lentes e o segmento de fibra a ser inscrito.

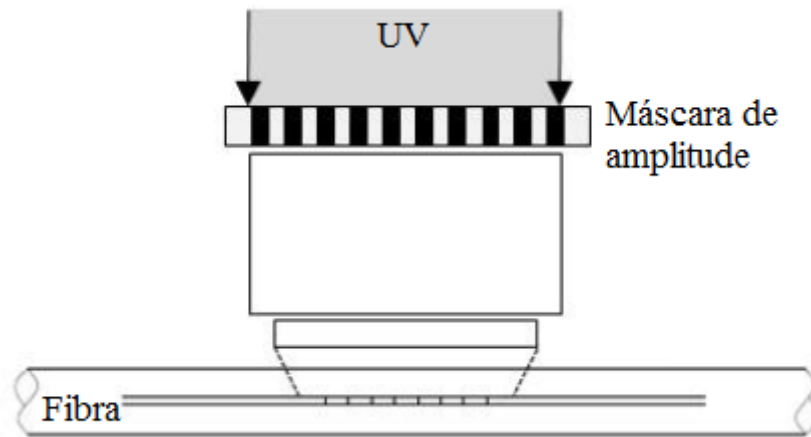


Figura 2.29 – Escrita de redes de Bragg por máscara de amplitude (adaptado de Marques, 2008)

No caso da gravação de redes de Bragg com recurso a máscaras de fase a criação do padrão de interferência no núcleo da fibra tem origem na difração da radiação UV em três ordens principais quando esta trespassa a máscara. As máscaras de fase recentes conseguem suprimir a ordem zero a uma percentagem inferior a 3%, permanecendo apenas duas ordens, -1 e +1, conservadoras de grande parte da energia da radiação, (Antunes, 2011, Werneck *et al.*, 2013). Sem o auxílio de um sistema interferométrico a máscara de fase é colocada em contacto ou pelo menos muito próxima do segmento de fibra ótica, (Figura 2.30), onde as duas ordens divergentes incidem criando então um padrão de interferência com um período ditado pela respetiva máscara de fase (2.8). Posto isto, a fabricação de redes de Bragg com comprimentos de onda de pico distintos só é viável com a utilização de máscaras de fase diferentes, o que constitui uma ligeira restrição ao uso desta técnica (Marques, 2008).

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2} \quad (2.8)$$

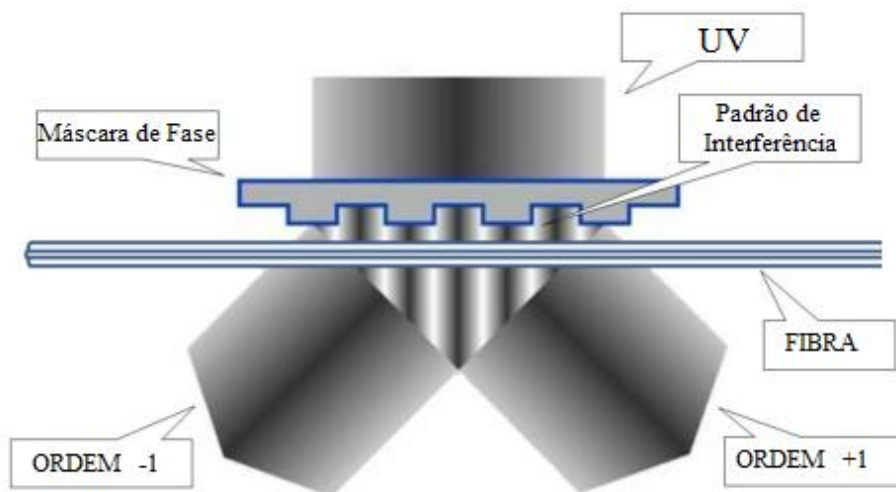


Figura 2.30 – Escrita de redes de Bragg por máscara de fase (adaptado de Werneck *et al.*,2013)

Ao utilizar este tipo de máscaras o processo é relativamente simples, descarta-se a utilização de espelhos e não existe a preocupação da radiação exibir ou não uma boa coerência. Contudo a fragilidade que estes elementos exibem torna-os alvo de dano uma vez na proximidade da fibra e se porventura se recorrer ao afastamento das duas componentes em causa, por alguns milímetros, a região da fibra afetada pela interferência tornar-se-ia consideravelmente mais estreita. Por estes motivos é usual incorporar máscaras de fase em sistemas interferométricos (Figura 2.31) (Werneck *et al.*, 2013).

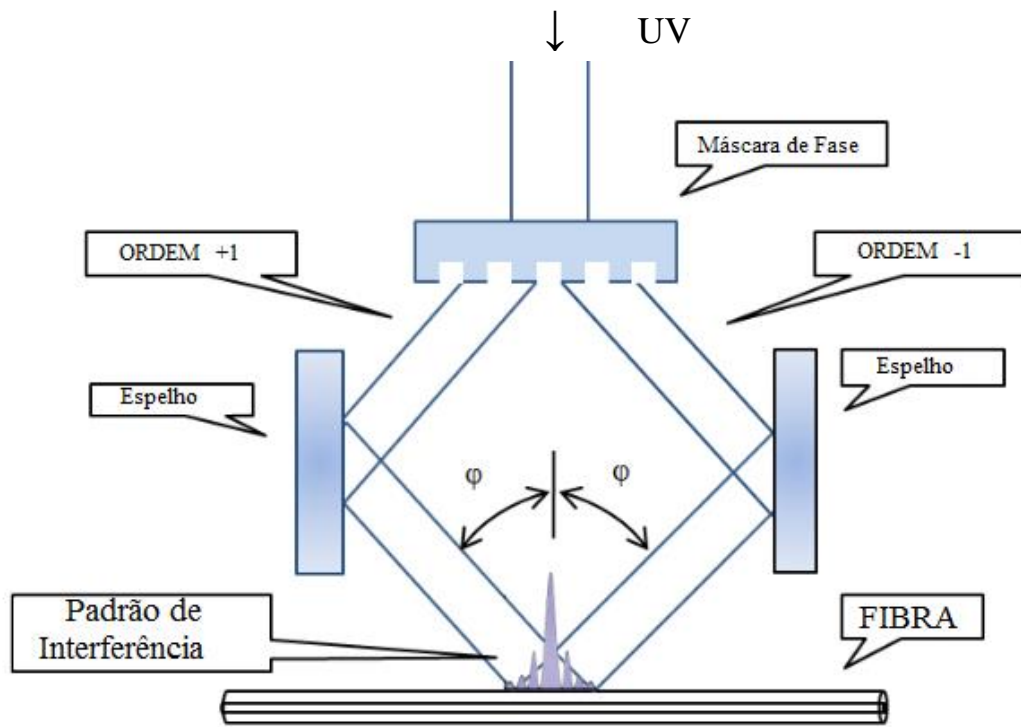


Figura 2.31 – Interferómetro com máscara de fase (adaptado de Werneck *et al.*, 2013)

O uso de uma máscara de fase num sistema interferométrico ao invés de um divisor de feixe ou de um prisma (Figura 2.27) mitiga a dificuldade de alinhamento dos feixes de radiação, neste caso das ordens -1 e +1 (Antunes, 2011).

2.6.1.3. Sensibilidade à temperatura e à deformação

Uma rede de Bragg uma vez sujeita a deformações longitudinais (Δl) ou a variações de temperatura (ΔT) sofre alterações na periodicidade espacial do seu índice de refração, da rede, e consequentemente é induzido uma variação do comprimento de onda de Bragg ($\Delta \lambda_B$). As relações, presentes nas equações (2.9) e (2.10) refletem essa variação incluindo constantes dependentes das propriedades foto-elásticas de uma fibra ótica corrente (Lee *et al.*, 2011).

$$\Delta \lambda_{B, strain} = \lambda_B \times \Delta l \times 0.74 \quad (2.9)$$

$$\Delta\lambda_{B,temperature} = \lambda_B \times \Delta T \times 8.9 \times 10^{-6} \quad (2.10)$$

De uma forma geral e atendendo às componentes foto-elásticas da fibra a variação do comprimento de onda de Bragg pode ser traduzido em função dos parâmetros aos quais é sensível, nomeadamente variações de temperatura (ΔT) e deformações longitudinais (Δl) (Oliveira, 2011), conforme se exhibe em (2.11).

$$\Delta\lambda_B = 2 \times \left(\lambda \times \frac{dn_{eff}}{dT} + n_{eff} \times \frac{d\lambda}{dT} \right) \times \Delta T + 2 \times \left(\lambda \times \frac{dn_{eff}}{dl} + n_{eff} \times \frac{d\lambda}{dl} \right) \times \Delta l \quad (2.11)$$

O primeiro termo, da Equação (2.11), diz respeito ao deslocamento que o comprimento de onda de Bragg experimenta com variações de temperatura, já o segundo reflete a dependência do mesmo face às deformações longitudinais, sejam estas de tração ou de compressão.

Antunes, 2011, afirma que quando uma rede de Bragg se encontra sujeita apenas a variações de temperatura ($\Delta l=0$) a variação $\Delta\lambda_B$ traduz-se por:

$$\Delta\lambda_B = sT \times \Delta T \quad (2.112)$$

$$sT = \lambda_B \times (\alpha_\lambda + \alpha_n) \quad (2.13)$$

Do mesmo modo se se avaliar uma rede de Bragg sujeita apenas a deformações longitudinais ($\Delta T=0$) a variação do seu comprimento de onda exprime-se pela equação (2.14).

$$\Delta\lambda_B = sl \times \Delta l \quad (2.14)$$

$$sl = \lambda_B \times (1 * p_e) \quad (2.15)$$

Sendo sl a sensibilidade da fibra face á deformação longitudinal e p_e uma constante foto-elástica efetiva, este ultimo parâmetro encontra-se dependente de:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} \times [p_{12} - \nu \times (p_{11} + p_{12})] \quad (2.16)$$

Na Tabela 2.3 apresentam-se valores representativos, para uma fibra ótica constituída por sílica dopada com germânio, diretamente relacionados com as equações (2.12), (2.13), (2.14) e (2.16), segundo Antunes (2011).

Tabela 2.3 – Valores típicos para uma sílica dopada com germânio

Redes de Bragg numa proximidade espectral de 1550 nm		
α_A	Coeficiente de expansão térmica	$0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
α_n	Coeficiente termo-ótico	$8.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
p_{11}	Componente do tensor foto-elástico	0.113
p_{12}	Componente do tensor foto-elástico	0.252
ν	Coeficiente de Poisson	0.16
s_T	Sensibilidade térmica	$13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$
s_l	Sensibilidade à deformação	$1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$

2.6.1.4. Compensação da temperatura

Como a translação do comprimento de onda de Bragg, numa análise espectral, traduz a influência de variações térmicas e deformações longitudinais em simultâneo, consoante o demonstrado pela equação (2.11). Se se pretende medir variações de temperatura apenas pode-se proteger a rede de Bragg contra possíveis deformações. Tarefa esta de relativo facilitismo, pois basta inserir e colar o segmento portador do sensor numa tubagem rígida por exemplo. Já o cenário inverso, medir somente deformações, constitui maior dificuldade. Daí surgir uma necessidade imperativa de compensar o efeito de temperatura a fim de discriminar o mesmo e assim obter variações do comprimento de onda relativos apenas a esforços mecânicos.

A via mais óbvia é implementar um termistor (transdutor de medição de temperatura) sujeito às mesmas variações de temperatura do sensor de Bragg, assim pode-se calcular a variação do comprimento de onda relativa às variações de temperatura ($\Delta\lambda_{B,temperature}$) através da equação (2.10) e de seguida subtrair este valor à variação do comprimento de onda reflexo de ambas as perturbações externas, consoante a equação (2.11) e de forma simplificada na expressão (2.17). Todavia esta técnica nem sempre é viável, pois o meio envolvente pode não ser próprio para o transdutor elétrico, por ser um meio de elevada voltagem ou mesmo apresentar altas interferências eletromagnéticas (Werneck *et al.*, 2013).

O método mais usual de compensação de temperatura assenta na utilização de pelo menos dois sensores de Bragg em que um deles é sujeito a variações de temperatura e a deformações longitudinais em simultâneo registando assim uma variação do comprimento de onda central dependente destas perturbações externas ($\Delta\lambda_{B, strain + temperature}$). O outro sensor, presente na mesma fibra, no caso do sistema ser multiplexado, é instalado de modo a medir apenas as variações de temperatura, isento de sofrer deformações longitudinais ($\Delta l=0$), fornecendo um registo de variância de comprimentos de onda relativo apenas a possíveis oscilações de temperatura ($\Delta\lambda_{B,temperature}$). É de grave importância salientar que a este último é garantido a proteção contra possíveis deformações longitudinais e que sofra oscilações térmicas próximas daquelas a que o primeiro (FBG) se encontra sujeito.

A variação do comprimento de onda relativa apenas à deformação é conseguida através da seguinte subtração:

$$\Delta\lambda_{B, strain} = \Delta\lambda_{B, strain+temperature} - \Delta\lambda_{B, temperature} \quad (2.17)$$

2.6.2. SENSORES DISTRIBUÍDOS BASEADOS NA DISPERSÃO DE BRILLOUIN E RAMAN

Atendendo à breve introdução, no subcapítulo 2.1.6, quanto aos fenômenos de dispersão e “backscatter” torna-se evidente que a origem destes advêm da interação do feixe luminoso com irregularidades moleculares presentes na fibra oriundas de perturbações externas atuantes no meio transmissor, tais como temperatura, deformação, vibração e ruído acústico. Dentro do contexto de sensores distribuídos é relevante mencionar que a dispersão, ou espalhamento, que autoriza e valida esta tecnologia, é aquela que se continua a propagar na direção longitudinal da fibra e por consequência disto pode ser detetada e interpretada por parte de equipamentos capazes de desmodular o sinal. A técnica conhecida por OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*) é que usual se emprega neste tipo de cenário e permite determinar o perfil de grandezas, às quais estes sensores são sensíveis, ao longo de toda a fibra.

Distinguem-se três tipos principais de dispersão, Rayleigh, Brillouin e Raman, conforme se observa na Figura 2.32. De grosso modo, a dispersão de Raman é causada por vibrações moleculares de gênese térmica sendo sensível apenas a variações de temperatura; a dispersão Brillouin tem origem em ondas acústicas dependentes, também, de efeitos térmicos e ocorre segundo um domínio de frequências na ordem dos GHz presente na fibra. Este tipo de dispersão apresenta uma sensibilidade a variações de temperatura assim como a deformações (Iten, 2011)

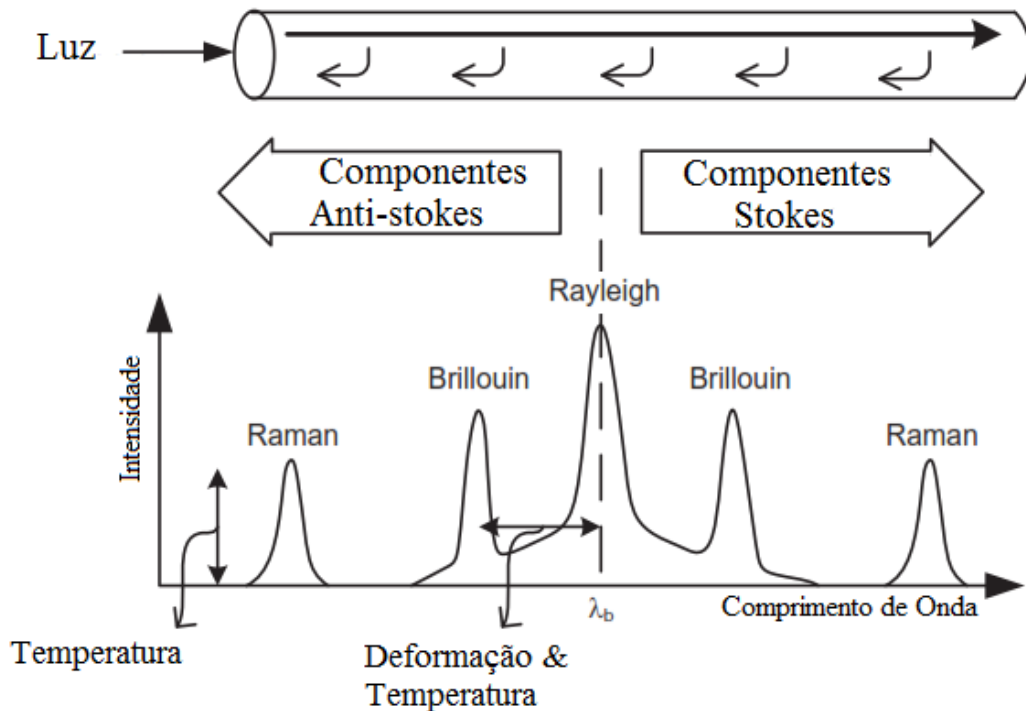


Figura 2.32 – Análise espectral dos principais tipos de dispersão da luz (adaptado de Soga *et al.*,2015)

Já a dispersão Rayleigh é devida à presença de irregularidades existentes na estrutura molecular do núcleo da fibra e portanto constitui uma constante de perda do sinal independentemente da influência de perturbações externas no meio transmissor. Salienta-se ainda que não é sensível às grandezas que afetam as dispersões Raman e Brillouin pois revela sempre o mesmo comprimento de onda (λ_0) do sinal inicial, (Rodrigues, 2011), como se pode constatar na Figura 2.32.

O fenómeno de “*backscattering*” associado à dispersão de Rayleigh constitui uma agravante na perspetiva das telecomunicações, todavia é precisamente esta ocorrência que serve de base à tecnologia OTDR (Ouyang *et al.*, 2015). De uma forma geral uma fração de um dado impulso de luz é espalhado pela fibra e parte desta sofre “*backscatter*”, ou seja, é refletida no sentido contrário da propagação inicial. Podendo analisar esta energia e calcular a variação da intensidade assim como o coeficiente de dispersão torna-se exequível determinar a localização na fibra da perturbação que induziu o “*backscatter*” (Ribeiro, 2009). A análise OTDR com base na dispersão Rayleigh teve origem em meados de 1976, um método desenvolvido por Barnoski e Jensen, (Iten, 2011). Atualmente existem diversos métodos desenvolvidos a partir deste não só em função do tempo mas também em função da frequência (OFDR – *Optical Domain Frequency Reflectometry*) como ainda deu azo aos métodos BOTDR (*Brillouin Optical Time Domain Reflectometry*), BOTDA (*Brillouin Optical Time Domain Analysis*) e ROTDR (*Raman Optical Time Domain Reflectometry*) (Soga *et al.*, 2015), ambos indispensáveis e potenciadores dos sensores óticos distribuídos com base nas dispersões Brillouin e Raman.

De regresso à interpretação da Figura 2.32, acrescenta-se que os componentes de dispersão, Raman e Brillouin, são simétricos face ao eixo onde se situa comprimento de onda inicial (λ_0) correspondente à dispersão Rayleigh. À direita deste encontram-se os componentes Stokes e à esquerda os componentes Anti-Stokes, de maior e de menor comprimentos de onda, respetivamente, face ao λ_0 .

As posições dos picos de Raman mantêm-se fixas, apenas a temperatura faz alterar a intensidade nos Anti-stokes enquanto os Stokes não se deixam afetar pela mesma. Posto isto, ao comparar ambos os picos de Raman, através do método ROTDR, consegue-se obter informação relativa à temperatura registada num dado ponto da fibra (Iten, 2011). A localização da perturbação calcula-se conhecendo a velocidade de propagação da luz e o instante de chegada do sinal, permitindo traçar perfis de temperatura ao longo de toda a fibra. Como a intensidade da dispersão é baixa aconselha-se a utilização de fibras multimodais já que permitem aumentar o sinal de retorno com a agravante de incrementar a atenuação ao longo da fibra limitando a extensão do sistema a uma distância de 8 a 10 km (Ribeiro, 2009). O aumento do “*backscattering*”, oriundo do uso de fibras multimodais, advém da maior interação da luz com as irregularidades moleculares existentes no meio de transmissão, ou seja, é devido aos inúmeros modos de interação que este tipo de fibras óticas possibilitam.

No caso da dispersão Brillouin os picos não são fixos, como acontece no contexto de Raman, mas sim altamente dependentes de variações de temperatura e deformações, que por sua vez obrigam a uma translação, em frequência, dos mesmos. Esta dependência advém do facto da velocidade das ondas termo-acústicas dependerem da densidade do meio de transmissão, cujas propriedades se encontram intrinsecamente relacionadas com as condições de temperatura e deformação a que se encontra sujeita, (Iten, 2011). Embora a dispersão Brillouin ocorra de uma forma natural, dita espontânea, o rácio entre o sinal recebido e o nível de ruído é diminuto. Com a finalidade de intensificar o sinal surgiram técnicas que induzem uma dispersão estimulada e caracterizam-se pela introdução de um segundo feixe luminoso com uma frequência idêntica à da frequência espontânea de Brillouin que se propaga no sentido inverso daquele que o feixe inicial assume (Rodrigues, 2011). Como forma de processar a informação proveniente do sinal utilizam-se os métodos BOTDR ou BOTDA cumprindo o papel de estabelecer perfis de temperatura e de deformação ao longo de várias dezenas de quilómetros. Tendo em conta que neste sistema é usual as fibras monomodais de abertura numérica menor e portanto verifica-se uma atenuação subtil ao longo de toda a fibra, podendo alcançar uma distância de 50 km até 85 km, (Ouyang *et al.*, 2015). O sistema BOTDR permite um rigor de medição entre os 20 $\mu\epsilon$ e os 40 $\mu\epsilon$ enquanto o BOTDA tem um alcance de 2 $\mu\epsilon$ até 10 $\mu\epsilon$ exigindo uma configuração em *loop*, ambos possuem uma resolução espacial de aproximadamente de 1 metro. Esta pode ser reduzida ao sacrificar a distância máxima de alcance (Alexander *et al.*, 2010)

2.6.3. SENSORES INTENSIMÉTRICOS

Estes sensores têm como base de funcionamento a avaliação da intensidade da luz, que se propaga na fibra, que é modulada consoante a atuação de pressões externas na fibra. A sua utilização encontra-se geralmente associada a um transdutor que sofre perturbações externas e as transmite à fibra (Figura 2.33). Estas perturbações podem ser oriundas de variações de temperatura, pressões e forças de esmagamento que induzem microdobragens na fibra inculcando uma diminuição da intensidade da luz que se propaga nesta, ou seja, faz com que parte da energia da radiação se perca na bainha deixando de haver reflexão interna total (Ribeiro, 2009). É uma solução eficiente de poucos requisitos nomeadamente uma fonte de luz com boa estabilidade e potência adequada, são bastantes acessíveis dada a sua simplicidade e de uso frequente em SHM, como por exemplo deteção de danos de fendilhação e de ataques químicos em estruturas de betão (Rodrigues, 2011).

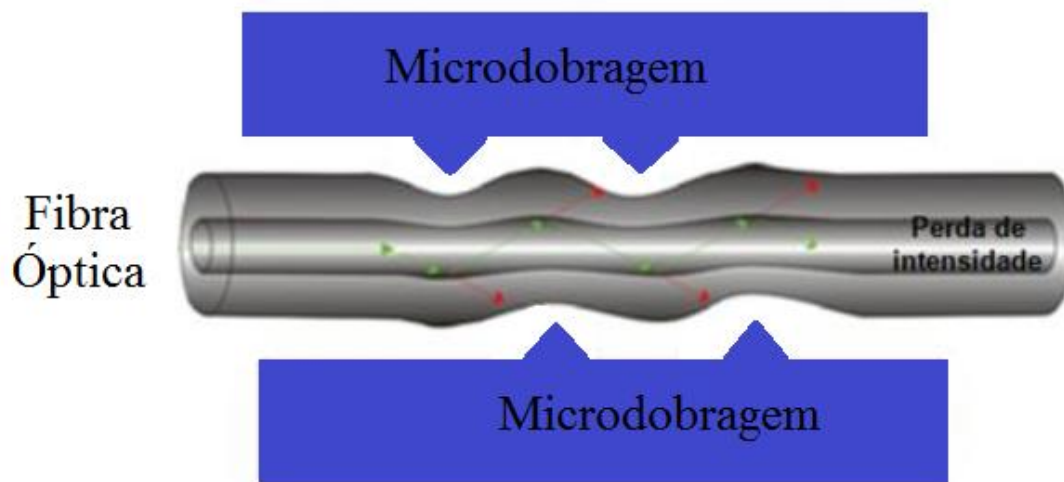


Figura 2.33 – Esquema da influência da microdobragem numa fibra ótica (adaptado de Ribeiro, 2009)

As medições destes sensores podem ser tidas em conta em sistemas de transmissão ou de reflexão, neste último caso pode ser implementada uma unidade de leitura denominada como OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*), técnica usada também em sensores distribuídos baseados no espalhamento Raman e Brillouin (Inaudi, 1997)

2.6.4. SENSORES INTERFEROMÉTRICOS

Os sensores interferométricos baseiam-se num princípio de sobreposição ao combinar duas ondas distintas de igual frequência, que percorrem dois caminhos díspares, de modo a possibilitar uma análise de estado do sensor por correlação da fase das mesmas (Iten, 2011). Este grupo de sensores ramifica-se em três categorias primordiais (Inaudi, 1997):

- Interferómetro de Michelson
- Interferómetro de Mach-Zehnder
- Interferómetro de Fabry-Perot

Os dois primeiros partilham uma base de funcionamento geral que consiste na divisão de feixes de luz, em pelo menos dois braços, um de referência e outro de atividade, com a finalidade de avaliar a alteração de fase relativa da luz em ambos os percursos oriunda da diferença do comprimento dos braços (Inaudi, 1997, Rodrigues, 2011). O interferómetro de Fabry-Perot (IFP) distingue-se dos outros, embora apresente uma base de funcionamento similar, na medida em que descarta a utilização de dois braços ao incorporar um refletor parcial no único percurso de propagação existente no sistema. A título elucidativo dá-se a conhecer as configurações esquemáticas, dos três sistemas interferométricos, de Rodrigues (2011), dado o seu carácter simples e perceptível (Figura 2.34). Dos três interferómetros mencionados o de Fabry-Perot é aquele que mais amplamente é utilizado para fins de monitorização estrutural e geotécnica (Iten, 2011). Por esta razão se detalha com algum pormenor o funcionamento deste no presente subcapítulo. Ainda se acresce que qualquer um destes interferómetros apresentam uma sensibilidade elevada podendo ser multiplexados sob formas topológicas distintas uma vez se classificarem como sensores pontuais (Inaudi, 1997).

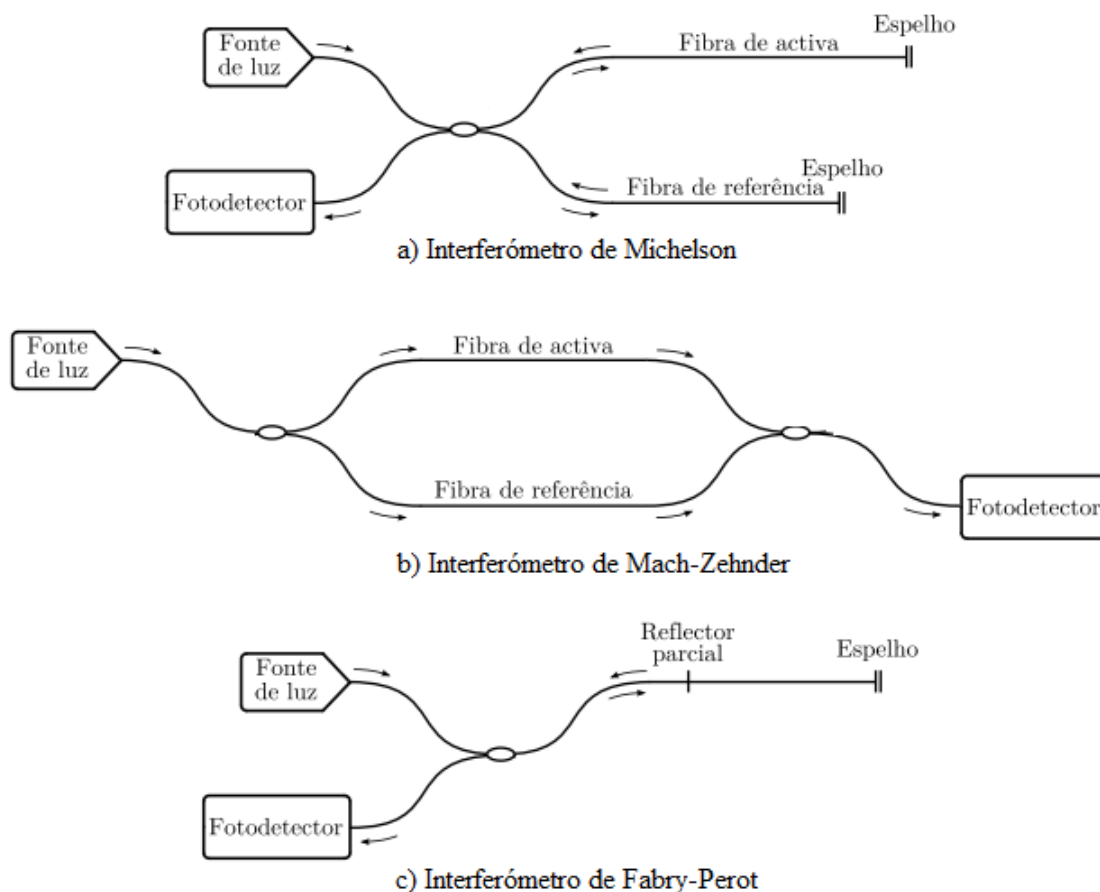


Figura 2.34 – Bases de funcionamento dos três tipos principais de interferómetros: a) de Michelson; b) de Mach-Zehnder; c) de Fabry-Perot. (adaptado de Rodrigues, 2011)

Num interferómetro Fabry-Perot (Figura 2.35) recorre-se apenas a uma fibra ótica pelo que a divisão de feixes de luz é obtida através de uma cavidade espacial antes de ocorrer a recominação dos mesmos na

proximidade da unidade de leitura. Esta cavidade dá origem a duas fronteiras, distanciadas entre si de alguns micrómetros, com propriedades refletivas formando dois espelhos (de reflexão parcial) nas duas interfaces fibra/ ar e ar/fibra (Iten, 2011). A fibra, clivada a 90 graus, é alinhada com o auxílio de um tubo de sílica com um comprimento próximo dos 10 mm e um diâmetro pouco maior àquele que a fibra ótica presente (250 μm). As interações que se verificam entre um feixe de luz com a primeira interface (fibra/ ar) e outro com a segunda interface (ar/ fibra) resulta numa diferença de fase dependente da variação do comprimento que a cavidade ótica sofre, oriunda de fatores externos.

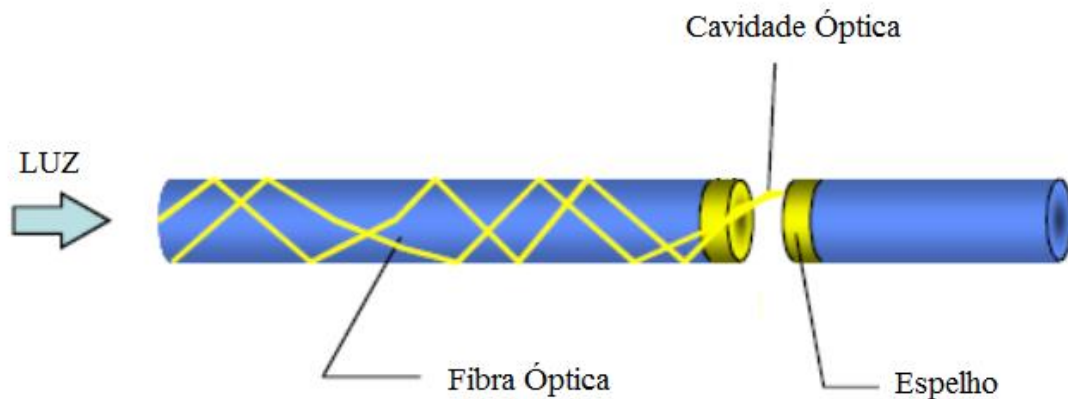


Figura 2.35 – Esquema típico de um interferômetro de Fabry-Perot (adaptado de Ribeiro, 2009)

2.7. APLICAÇÕES PRÁTICAS DE SENSORES ÓTICOS EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Pelo estudo do autor constata-se que nos primórdios do século XXI a tecnologia de sensores óticos sofreu uma forte evolução orientada para propósitos de segurança social e qualidade nas construções e tem vindo a ser gradualmente, e de forma bem-sucedida, implementada e estudada pela comunidade da engenharia numa escala global. Já é bastante frequente encontrar sistemas de sensores óticos incorporados em sistemas SHM (*Structure Health Monitoring*) assim como em obras de foro exclusivo geotécnico, também como sistemas de monitorização e prevenção. As infraestruturas assumem um papel vital face ao crescimento económico-social de qualquer país, como tal a validação de critérios de projeto, assim como a otimização dos mesmos, e a garantia de funcionalidade, segurança e durabilidade devem ser asseguradas. Daí a grave necessidade de desenvolver tecnologias cada vez mais capazes de cumprir estes objetivos com intuito de fomentar sistemas atuais com redução de custo envolvido no investimento destes. De seguida revelam-se alguns exemplos práticos e principais vantagens do uso de certos tipos sensores óticos no panorama geotécnico, concebendo especial importância a sistemas distribuídos, baseados nas dispersões de Brillouin e Raman, a sistemas pontuais baseados em redes de Bragg e a sistemas quasi-distribuídos concebidos pela multiplexagem de redes de Bragg, dado potencial económico e vantagens acrescidas face a sistemas ditos tradicionais.

2.7.1. SISTEMAS DISTRIBUÍDOS BASEADOS NAS DISPERSÕES BRILLOUIN E RAMAN

Ouyang *et al.* (2015) corroboram a aplicação de sensores óticos, baseados na dispersão estimulada de Brillouin, ao dar a o conhecer um leque de aplicações no campo da geotecnia, especificamente no Reino Unido, onde se aplicaram sistemas BOTDR/ A. Tirando proveito das principais vantagens inerentes ao uso da fibra ótica, lembrando-os, menciona-se a elevada resistência que apresenta à corrosão e ataques químicos, completamente inertes face a interferências eletromagnéticas, robustez e baixo custo. Com o principal acréscimo de que um só cabo de fibra ótica é capaz de agir todo ele como um sensor contínuo e assim substituir milhares de sensores pontuais convencionais, torna-se na tecnologia ideal para fins de monitorização a curto e longo prazo. De seguida apresenta-se um conjunto de casos práticos elaborado por (Ouyang *et al.*, 2015).

Tem-se o primeiro exemplo aplicado desta tecnologia em fundações profundas revelado em 2008 por Mohamad, em que se selecionou uma estaca de carga (perto do Rio Tamisa) para ser alvo de monitorização a longo prazo. As medições distribuídas foram capazes de localizar pequenas fissuras ao longo da estaca. Após este teste realizaram-se outros diversos, em Londres, em diferentes tipos de estacas em serviço sob condições de carga díspares que serviu de base para a averiguação da capacidade de carga das mesmas para futura reutilização.

A monitorização em túneis e dos efeitos da sua escavação é de fundamental importância, dado o grau de incerteza associado aos trabalhos de prospeção e o risco de ocorrência de deformações excessivas nem sempre estáveis. Mais uma vez Mohamad (2008) relata um caso bem sucedido de monitorização de um túnel antigo de alvenaria sujeito a efeitos de uma nova construção localizada a 4.0 metros deste. Um aspeto de interesse mencionado neste estudo assenta no facto de as medições serem de qualidade e poderem ser registadas e avaliadas de forma remota. Outros casos de sucesso focam-se no embebimento de sensores óticos em aduelas e na robustez que estes apresentam no caso do revestimento temporário de betão projetado.

Entre 2005 e 2007, em Londres, Mohamad monitorizou uma parede de diafragma ao instalar sensores óticos na armadura da mesma com o intuito de comparar estas medições com valores registados por inclinómetros tradicionais tendo-se estabelecido equivalências entre os dois sistemas na análise dos momentos fletores e de corte. Este exemplo acrescentou confiança à noção de substituição de sensores tradicionais elétricos por sensores óticos em diversos tipos de instrumentação corrente.

E assim se conclui alguns casos históricos de aplicação de sistemas BOTR/ A compilados por Ouyang *et al.* (2015).

O caso de monitorização de taludes e a aplicabilidade desta tecnologia torna-se avassaladora tendo em conta o seu potencial de medição contínua e o alcance de que é capaz, a título de exemplo mostram-se as Figuras 2.36 e 2.37. Neste âmbito a deteção precoce de movimentos de solo é essencial à salvaguarda de qualquer infraestrutura do género, fomentando a segurança e confiança social.

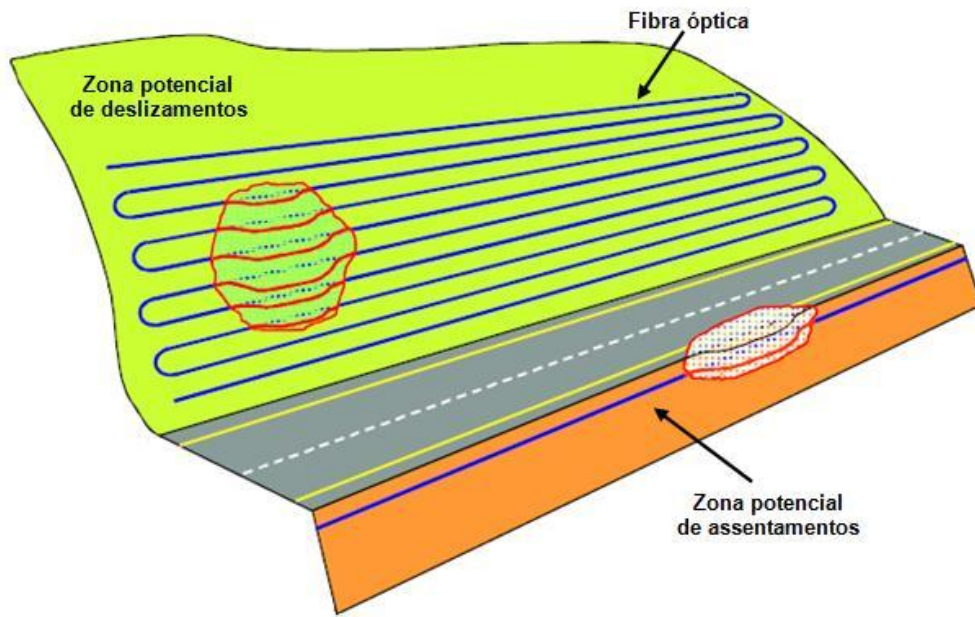


Figura 2.36 – Esquema de um sistema FO aplicado num talude e num aterro (Ribeiro, 2009)



Figura 2.37 – Caso real de um sistema FO embutido num geotêxtil (TENCATE Geosynthetics, 2016)

Também neste cenário já se encontra o conceito de inclinómetros munidos de sensores óticos (Figura 2.38) assim como fibra ótica embutida diretamente no solo fixada por pequenos elementos denominados por micro-âncoras (Figura 2.39) para fins de controlo de aterros por exemplo. O facto de os inclinómetros, instalados na vertical, possibilitarem assim um registo contínuo de deformações elimina por completo o risco de falhar uma possível superfície de deslizamento, hipótese provável nos sistemas tradicionais, mitigando de forma significativa a eventual catástrofe. O mesmo se pode afirmar no caso da fibra se instalar diretamente no solo (Figura 2.40).

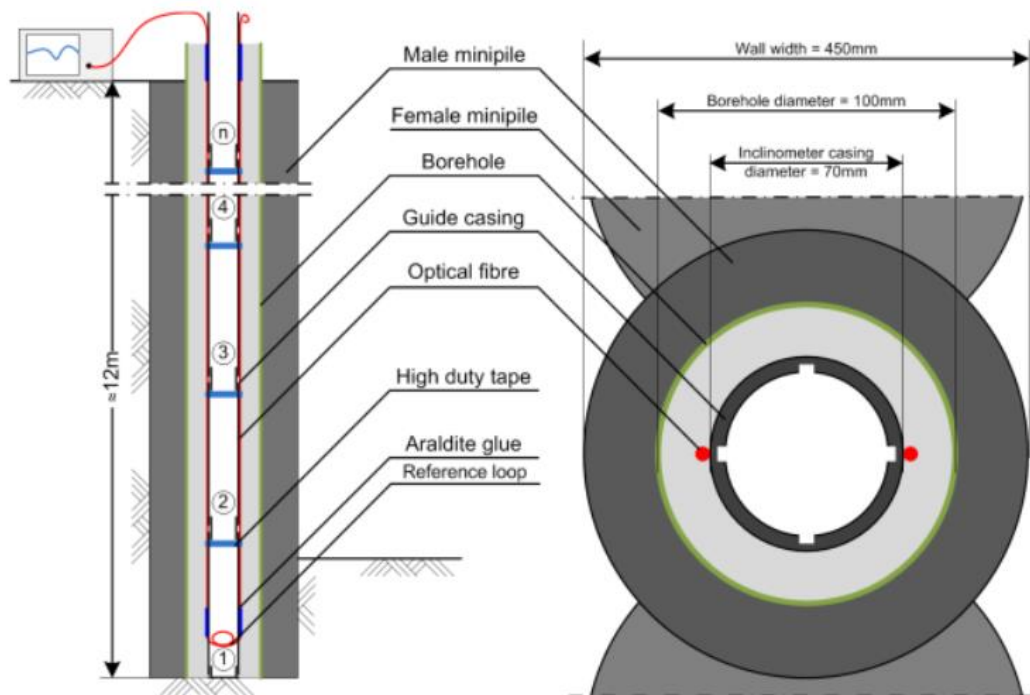


Figura 2.38 – Instalação de fibra ótica num inclinómetro (Ouyang *et al.*, 2015)



Figura 2.39 – Micro-âncora fixado no solo (Marmota Engineering AG, 2012)

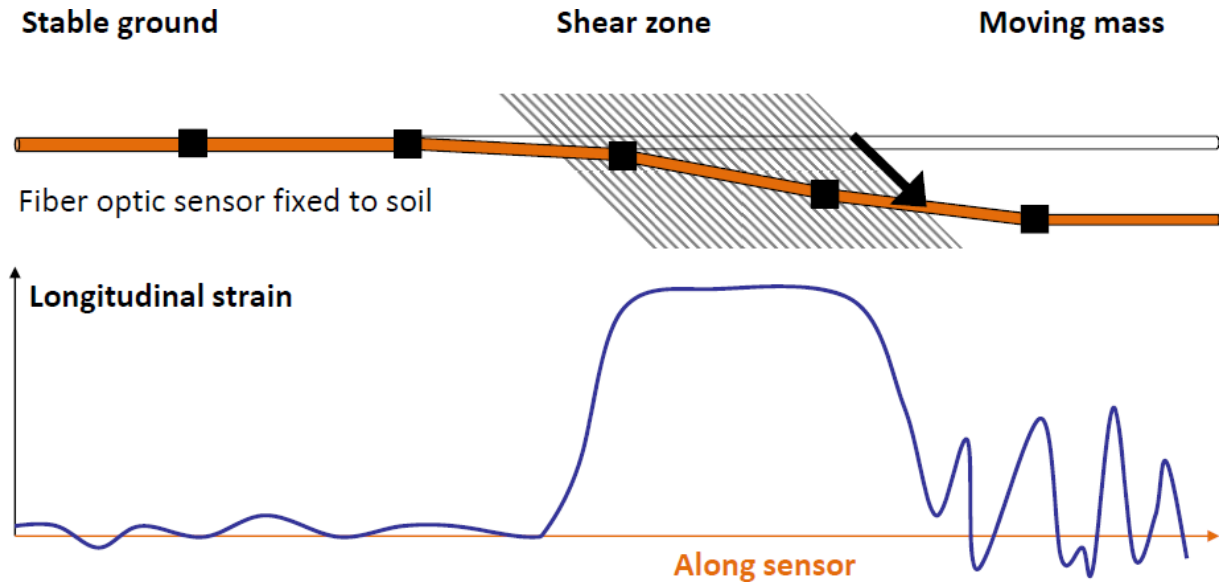


Figura 2.40 – Sistema de sensores óticos aplicado diretamente no solo fixado pontualmente por micro-âncoras (Marmota Engineering AG, 2012)

No caso das barragens de aterro o sistema distribuído de Raman é ideal uma vez que a medição de variações de temperatura, ao qual este tipo de dispersão é sensível, permite detetar percolações excessivas no núcleo da barragem oriunda da subida do nível de saturação (Ribeiro, 2009).

Note-se que grande parte dos exemplos atrás expostos podem ser obtidos por sistemas de monitorização baseados não só na dispersão estimulada de Brillouin e na dispersão Raman como também por sistemas quasi-distribuídos obtidos por multiplexagem de sensores pontuais, tais como redes de Bragg. Embora estes últimos não permitam uma avaliação de perturbações completamente continua ao longo da fibra existem em progresso desenvolvimentos que visam aumentar a sua resolução espacial (Gwandu *et al.*, 2001).

2.7.2. SISTEMAS PONTUAIS BASEADOS EM REDES DE BRAGG

Pelo que já foi referido este tipo de sistemas cativam a comunidade sensorial pela sua versatilidade quanto à sua aplicação em sistemas quasi-distribuídos, por multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM), no âmbito de instrumentação de monitorização de obras geotécnicas. De seguida revelam-se alguns exemplos desta versatilidade associada aos sensores de Bragg, enfatizando dois produtos desenvolvidos com base nesta tecnologia de grande interesse prático.

Ainda neste subcapítulo apresenta-se um estudo desenvolvido em ambiente laboratorial que demonstram o enorme potencial inerente ao uso desta tecnologia neste domínio.

2.7.2.1. Redes de Bragg em sistemas de monitorização

A monitorização ligada a deslocamento de terras é realizada, há décadas, maioritariamente através de inclinómetros (IP – *Inclinometer Probe*), todavia este tipo de instrumentação acarreta um custo elevado e ainda apresenta problemas relacionados com a transmissão de sinais elétricos, sendo as interferências electromagnéticas dos fatores que mais restringem o seu uso a longo prazo assim como a sua instalação em massa. Ho *et al.* (2006) procuraram implementar sensores baseados em redes de Bragg em IP's

tradicionais com intuito de substituir os sensores convencionais presentes nestes até à data. Conceito que já é posto em posto prática atualmente pela Marmota Engineering AG, todavia faz-se referência a este mecanismo concebido em 2006 por validar a exequibilidade do sistema. Na Figura 2.41 revela-se um segmento flexível de fibra já com um sensor de Bragg instalado a ser incorporado num tubo inclinométrico, dadas as suas características os autores passaram a designar esta unidade por FBG-SD (*Fiber Bragg Grating – Segmented Deflectometer*). Note-se que o sensor de Bragg encontra-se no diminuto segmento de fibra situado na zona de livre movimento nomeadamente na região de articulação do mecanismo.

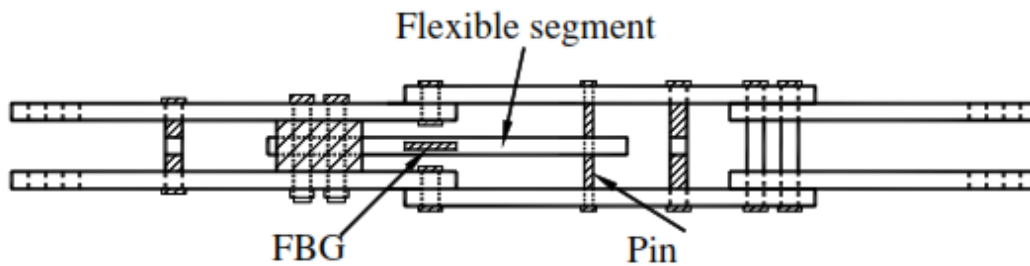


Figura 2.41 – Vista em planta de uma unidade FBG-SD (Ho *et al.*, 2006)

Foi feito um acompanhamento de uma escavação ao longo de quatro meses, duração da mesma, com 3 pares de inclinómetros convencionais e outros 3 pares de inclinómetros instrumentados pelos FBG-SD, o esquema do perfil da obra e os correspondentes resultados encontram-se na Figura 2.42.

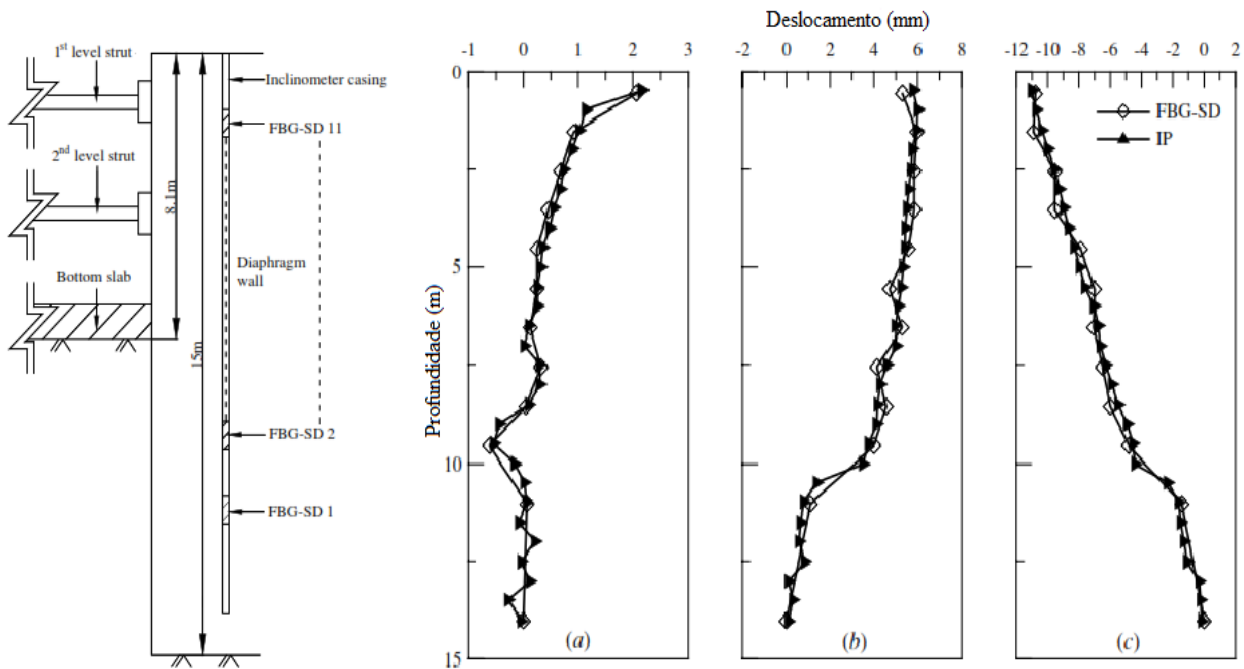


Figura 2.42 – Representação esquemática da obra de escavação e comparação de leituras FBG-SD e IP (adaptado de Ho *et al.*, 2006)

Os deslocamentos laterais provêm de ângulos rotacionais medidos pelos sensores óticos situados nas articulações dos mecanismos FBG-SD, o erro associado às leituras aumenta com o aumento da distância em profundidade dos mesmos, o que impede a sua aplicação a grandes profundidades (Ho *et al.*, 2006).

A entidade empresarial Marmota Engineering AG descarta a utilização de casulos inclinométricos inserindo a fibra ótica, pré-tensionada, em cablagens de proteção igualmente influenciáveis às deformações que se pretendem medir e fixando as mesmas com betão projetado nas paredes de furos ou poços a fim de cumprir fins similares aos das unidades FBG-SD. A título demonstrativo apresenta-se, na Figura 2.43, um exemplo real de aplicação levado a cabo pela entidade em causa.



Figura 2.43 – Instalação de um sistema quasi-distribuído FBG num furo (Marmota Engineering AG, 2012)

Outra entidade revelante nesta indústria, TenCate Geosynthetics, dispõe de um sistema de monitorização e de alarme, desenvolvido pela Bidim geosynthetics e ID-FOS, extremamente versátil e conceptualmente muito simples. Este consiste num geotêxtil dito “inteligente” por incorporar cabos de fibra ótica portadores de sensores FBG por WDM ao longo de filamentos reforçados, Figura 2.44. Inúmeros testes, principalmente testes de carga e de corte, foram cumpridos por Briançon *et al.* (2004) numa caixa de corte em que o geotêxtil se encontrava sob e sobre camadas de brita. Após a conclusão destes testes preliminares concluiu-se que a rotura da fibra ocorria na gama de deformações máximas suportadas por geotêxtis de reforço tradicionais

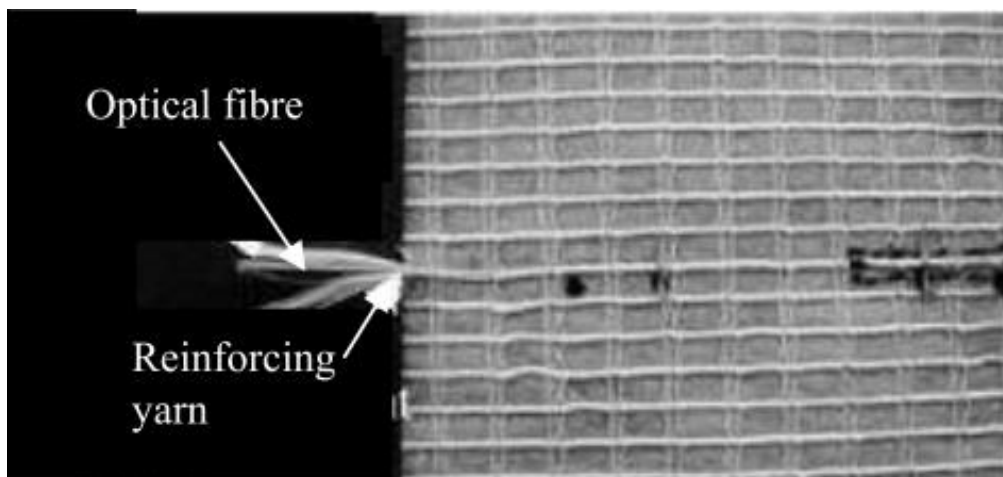


Figura 2.44 – Geotêxtil com filamentos de FO intrinsicamente instalados no mesmo (Briançon *et al.* (2004)

Briançon *et al.* (2004) confirma que os testes efetuados destacaram uma excelente resistência por parte da fibra ótica sendo esta capaz de suportar até 6% da tensão aplicada ao geotêxtil. O sistema de alerta foi testado no momento da sua instalação sob condições severas de compactação envolvendo materiais agressivos.

Ao provar a sustentabilidade e durabilidade do produto face a ambientes ásperos comuns na área da geotecnia potenciou-se a utilização do mesmo por parte da empresa detentora da patente TenCate Geosynthetics. De seguida apresentam-se alguns exemplos de aplicação, Figuras 2.45, 2.46 e 2.47, deste geotêxtil que cumpre a dupla funcionalidade de reforço e monitorização/ alerta de obras geotécnicas, que se encontram explanadas no trabalho de Loke *et al.* (2006).

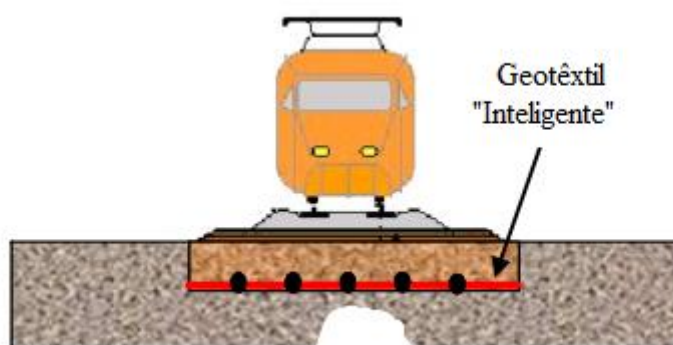


Figura 2.45 – Monitorização de assentamentos e deteção de cavidades no solo (adaptado de Loke *et al.*, 2006)

A versatilidade de aplicação e simplicidade do geotêxtil “inteligente” acrescenta confiança e segurança na construção civil no geral, ao controlar a longo prazo o comportamento de aterros, vias de comunicação, taludes, assentamentos, etc.. Com um retorno satisfatório face ao investimento inicial adquirindo remotamente informação vasta em qualidade e quantidade capaz de mitigar catástrofes de grande porte dada a sensibilidade sensorial do sistema, esta tecnologia deve ser explorada e desenvolvida futuramente no prisma do autor.



Figura 2.46 – Reforço e monitorização de um aterro (Loke *et al.*, 2006)

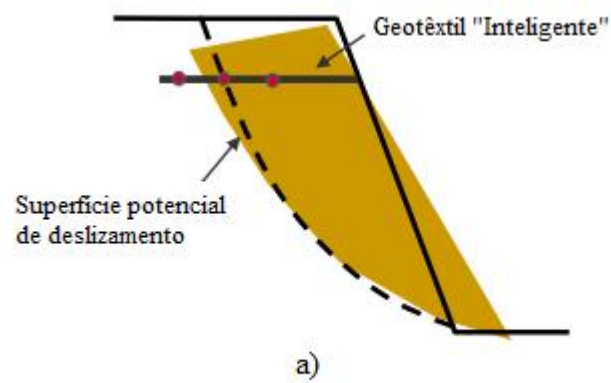


Figura 2.47 – Monitorização de um talude: a) esquema de aplicação; b) instalação do geotêxtil na trincheira situado no topo do talude. (Loke *et al.*, 2006)

2.7.2.2. Redes de Bragg aplicadas no âmbito laboratorial

Lee *et al.* (2011) exploraram a possibilidade de substituir toda a instrumentação convencional associada ao ensaio triaxial, nomeadamente transdutores de pressão e de deslocamento linear com a finalidade última de eliminar os inconvenientes da outra. Sendo esta composta por sensores elétricos o risco de curto-circuito uma vez imersos é um receio grave, assim como, mais uma vez, a afetação dos resultados por EMI também constitui uma constante. Os autores procederam a medições via FBG como sistema quasi-distribuído e medições obtidas pelo sistema tradicional para feitos comparativos, tirando partido da capacidade de multiplexagem por comprimentos de onda destes sensores e proveito de conceitos e mecanismos já desenvolvidos, como FBG-SD e transdutores de pressão FBG, por Ho *et al.* (2006). O esquema apresenta na Figura 2.48 indica o posicionamento dos sensores FBG num corte transversal de uma câmara triaxial típica.

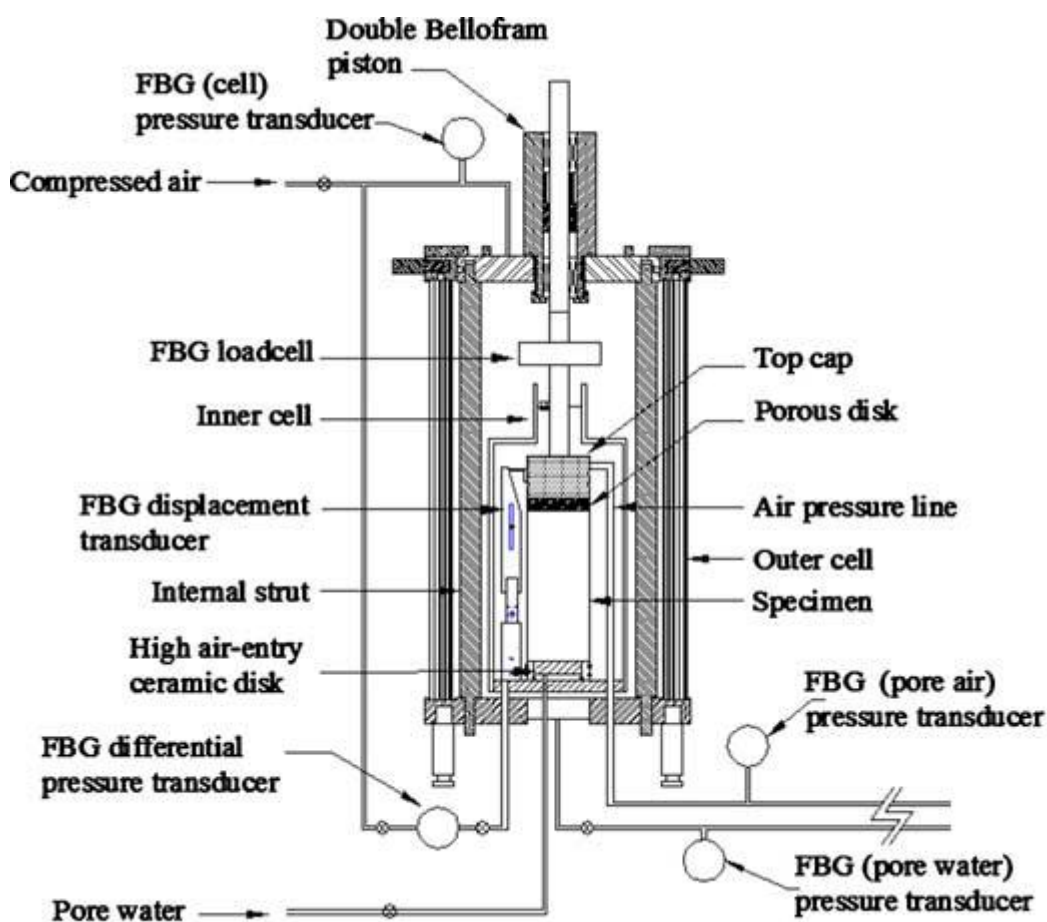


Figura 2.48 – Visão esquemática de uma câmara triaxial típica com sensores FBG incorporados (adaptado de Lee *et al.*, 2011)

O ensaio foi realizado num provete de areia, Yu Feng, não saturada e parte dos resultados comparativos são revelados na Figura 2.49 e pela análise desta constata-se que as medições dos sensores FBG são equiparáveis àquelas registadas pelos sensores elétricos.

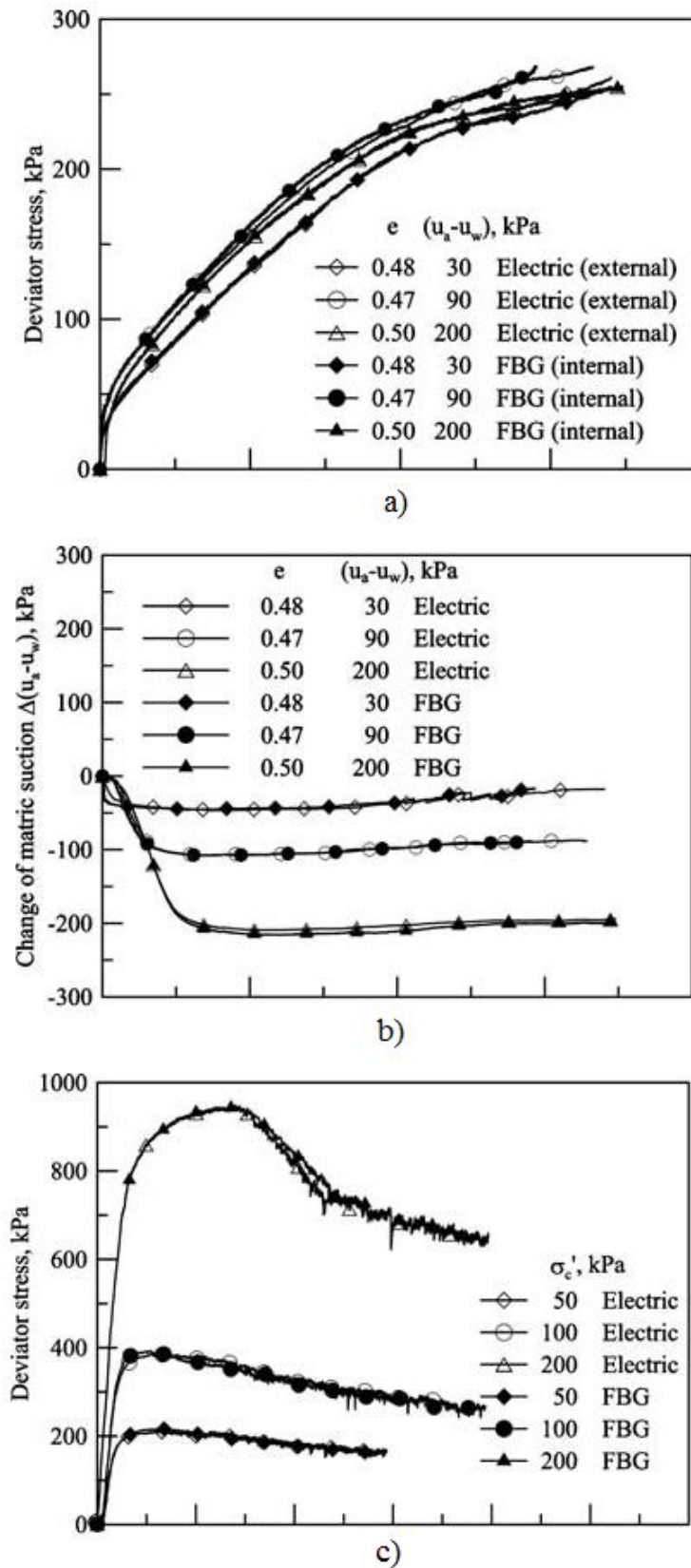


Figura 2.49 – Comparação de medições obtidas entre sensores FBG e sensores elétricos: a) Tensão de desvio; b) Alterações na matriz de sucção; c) Tensão de desvio. (Adaptado de Lee *et al.*, 2011)

Após a validação das medições por parte dos sensores de Bragg acresce-se ainda as vantagens inerentes a estes, validando assim a supremacia desta tecnologia. Para aprofundar o conhecimento relativo aos sensores de Bragg aplicados neste ensaio, FBG como célula de carga, FBG como transdutor de pressão e FBG como transdutor de deformação aconselha-se o estudo do trabalho realizado por Lee *et al.* (2011).

2.8. COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE UM SOLO

A engenharia geotécnica assenta numa ciência altamente dinâmica daí urgir constantes desenvolvimentos de novas teorias e práticas a fim de aprofundar o conhecimento nesta matéria. A determinação de parâmetros de rigidez fiáveis e representativos dos solos contribui para uma previsão mais realista do comportamento dos mesmos aumentando significativamente o nível de confiança e segurança em obras geotécnicas. Estes parâmetros relacionam-se com a expressão básica revelada em (2.17), esta representa o índice de vazios em função da tensão efetiva e tempo, variações em ambos estes fatores traduzem deformações diretamente relacionadas a um dado estado inicial.

$$e = f(\sigma', t) \tag{2.17}$$

A noção que os solos demonstram um comportamento linear já se encontra há muito ultrapassada, atualmente é de conhecimento de toda a comunidade envolvida que as relações tensão-deformação dos solos assumem um carácter altamente não linear, conforme se prova pela análise da Figura 2.50.

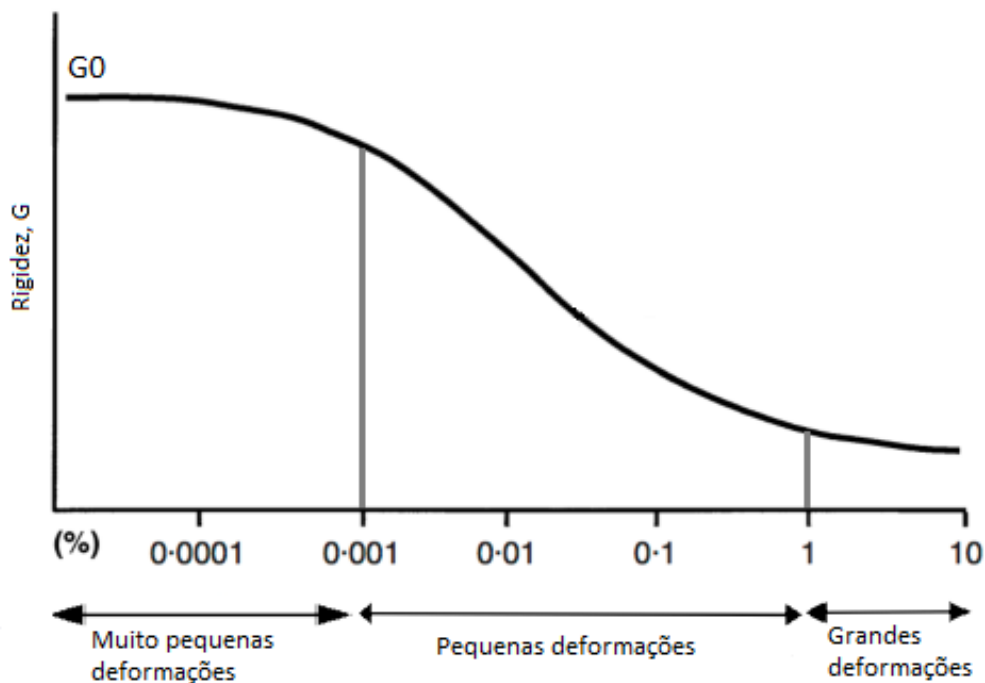


Figura 2.50 – Degradação da rigidez com o aumento da deformação (adaptado de Santos *et al.*, 2016)

Através da observação da Figura 2.50 constata-se que a degradação da rigidez permanece severa face a ligeiros incrementos de deformação (Santos *et al.*, 2016), pelo que se distinguem três patamares relacionados com o estado de tensão aplicado. O primeiro diz respeito a muito pequenas deformações, geralmente inferiores a 0.001 %, neste considera-se ainda um comportamento linear do solo dado que o módulo de rigidez inicial, G_0 , mantêm-se praticamente constante e assume o seu valor máximo, daí ser referido também como o módulo de distorção máximo, G_{max} . O segundo patamar compreende deformações entre 0.001 % e 1 % onde se instala um comportamento não linear refletido pelo decréscimo acentuado do módulo de distorção, G . O último patamar refere-se a grandes deformações, geralmente superiores a 1 %, em que G assume valores muito baixos dado que o solo se aproxima da rotura (Amat, 2007).

O valor do módulo de rigidez máximo (G_{max}), ou inicial, depende de um número alargado de fatores, pressão média efetiva (p'), índice de vazios (e), grau de sobreconsolidação (OCR – *Over Consolidation Ratio*), pressão atmosférica (P_a), entre outros. Posto isto destaca-se a expressão (2.19) que consiste numa simplificação da original (2.18), estipulada por Hardin & Blanford (1989), concebida exclusivamente para amostras reconstituídas em areias, em que algumas variáveis não se contabilizam pelo diminuta ou nula influência nos parâmetros que se pretende determinar (Santos *et al.*, 2016). Sendo $f(e)$ uma função do índice de vazios que reflete a densidade relativa do solo, A e m fatores de ajuste.

$$G_{ij}^{max} = \frac{OCR^k}{f(e)} \times \frac{S \times Pa^{(1-n)}}{2 \times (1 + \nu)} \times (\sigma_i \times \sigma_j) \quad (2.18)$$

$$G_{max} = A \times f(e) \times \left(\frac{p'}{Pa} \right)^m \quad [MPa] \quad (2.19)$$

Dado o corrente uso de ferramentas informáticas que permitem análises numéricas complexas a fim de simular futuras intervenções geotécnicas, a correta definição do módulo de distorção a pequenas e muito pequenas deformações acarreta enorme relevância, visto que este depende diretamente das deformações que se instalam nos solos. Existem diversos meios que possibilitam a determinação deste parâmetro baseados em aplicações de campo, “*in situ*”, ou em ensaios laboratoriais. A grande vantagem dos ensaios realizados em campo consiste na integridade da amostra e conservação do seu estado de tensão, todavia as medições destes são suscetíveis de erros e os próprios ensaios são na sua maioria bastante onerosos (Amat, 2007). Pelo que se têm dado maior importância aos ensaios laboratoriais a fim de cumprir a mesma tarefa, já que as medições apresentam maior rigor e fiabilidade englobando técnicas estáticas e dinâmicas. Estas últimas e a sua aplicação têm-se tornado cada vez mais expeditas, refere-se o método que mais revolucionou este âmbito, nomeadamente, a medição de ondas sísmicas por *bender/ extender elements*. Estes são transdutores piezoelétricos capazes de transmitir e receber ondas sísmicas, permitem a determinação da velocidade das mesmas ao conhecer previamente a dimensão da amostra (L) e ao fornecerem o tempo (t) que as ondas necessitam a fim de percorrer esta distância.

Os elementos *bender* (de flexão) geram ondas de corte (S waves) e possibilitam o cálculo do módulo de distorção máximo, ou seja, a muito pequenas deformações, equações presentes em (2.20), sendo ρ a densidade do solo

$$V_s = \frac{L}{t_s} \qquad G_{max} = \rho \times V_s^2 \qquad (2.120)$$

Já os elementos *extender* (de compressão/ extensão) emitam ondas de compressão (P waves) e permitem o cálculo do módulo confinado, equações (2.21).

$$V_p = \frac{L}{t_p} \qquad M = \rho \times V_p^2 \qquad (2.21)$$

3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. O CUBO TRIAXIAL VERDADEIRO

O sistema triaxial verdadeiro do Laboratório de Geotecnia da FEUP (Figura 3.1), ou TTA (*True Triaxial Apparatus*), foi desenvolvido em colaboração com a UWA (*University of Western Australia*) e consiste num aparelho cubico que acarreta um largo leque de instrumentação conforme se detalha ao longo deste capítulo. É um equipamento de alguma complexidade, associada à sua montagem e manuseamento, e daí ser menos comum a sua utilização em grande parte dos laboratórios geotécnicos. Porém este é digno da sua designação de ser um “verdadeiro” triaxial uma vez que permite a manipulação de tensões nas três direções ortogonais de forma independente e assim incutir diferentes modos de anisotropia nas amostras a ensaiar com a finalidade última de simular diferentes cenários próximos daqueles que se verificam na realidade.

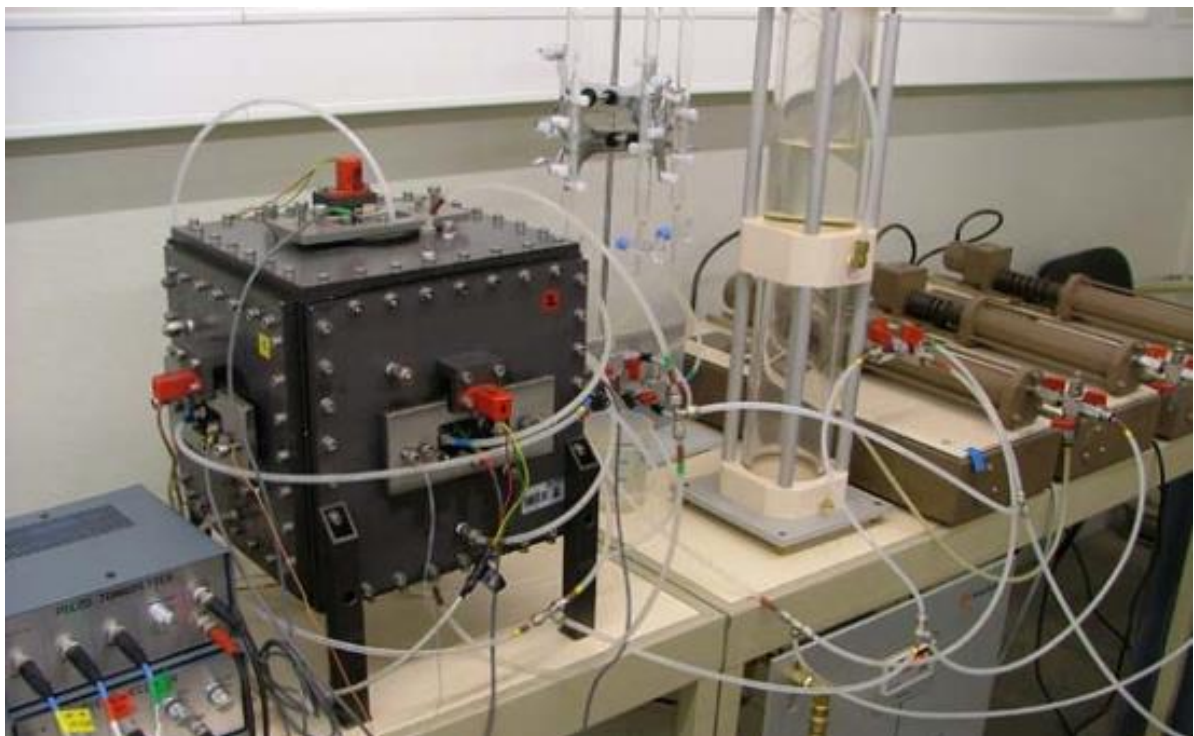


Figura 3.1 – O Cubo Triaxial Verdadeiro da FEUP (adaptado de Ferreira, 2009)

3.1.1.1. O Cubo

Este equipamento, todo ele composto por alumínio anodizado, consiste numa estrutura cúbica de aresta interior equivalente a 250 mm (Figura 3.3a) à qual se incorpora três pares de faces rígidas (Figura 3.2), estas identificam-se segundo os três eixos ortogonais, dois pares horizontais X e Y e um par vertical Z (Figura 3.3b). Cada uma destas faces engloba três componentes essenciais, uma placa interior que serve de pistão aplicando tensões no provete, uma placa externa e por fim uma membrana resiliente de borracha que separa estas duas. A tensão imposta no pistão, placa interior de cada face, provém da pressão hidráulica instalada entre a placa exterior e a membrana de borracha que por sua vez é ditada por um actuador GDS de alta precisão. Assim a fim de individualizar cada eixo são necessários três destes actuadores.

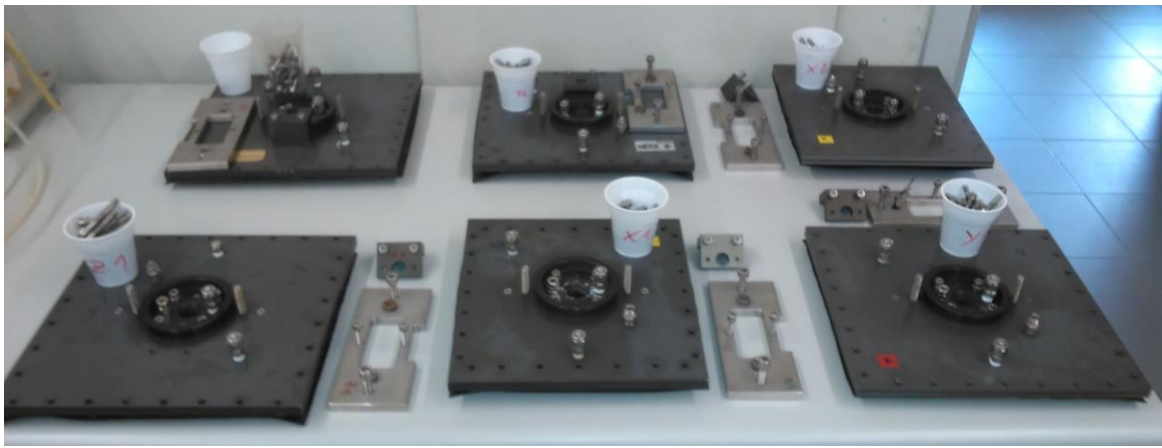
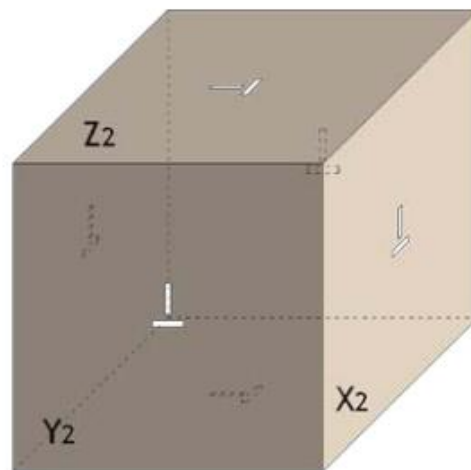


Figura 3.2 – Três pares de faces constituintes do "Cubo"



a)



b)

Figura 3.3 – a) Estrutura cúbica; b) Identificação das faces. (Adaptado de Ferreira and Fonseca, 2010)

Note-se que cada pistão encontra-se limitado a um deslocamento interno de 10 mm, desta forma a amostra, condicionada a uma dimensão inicial de 250 mm³, está sujeita a uma deformação máxima de 8 % em cada direção. Existe a possibilidade de incorporação de transdutores de deslocamento potenciométricos, para medição dos deslocamentos de cada face, em contacto com uma peça guia que se move consoante o deslocamento da placa interna à qual se associa (Ferreira and Fonseca, 2010). Salienta-se ainda a possibilidade de drenagem da amostra através da existência de pedras porosas, de 8 mm de diâmetro, situadas em cada uma das seis faces, podendo medir a variação de volume com o auxílio de três buretas independentes (Costa *et al.*, 2008).

3.1.1.2. Actuadores GDS

Os actuadores GDS assumem um papel fundamental neste sistema, já que as tensões aplicadas na amostra são controladas pelos mesmos ao pressurizar água destilada, ou óleo, na respetiva câmara cilíndrica, através da compressão realizada por parte de um pistão conforme se ilustra na Figura 3.4. O controlo é feito em circuito fechado permitindo uma variação de baixa gama, perto de 1 mm³ por cada passo do motor, com uma sensibilidade de 1 MPa (Ferreira, 2009).

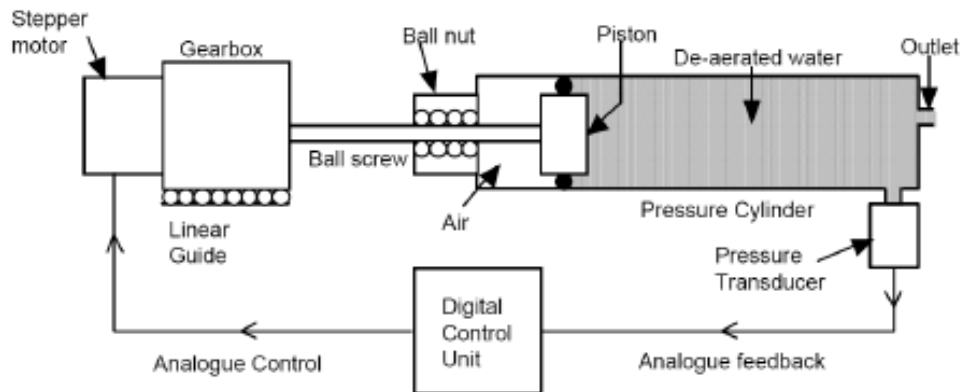


Figura 3.4 – Diagrama de funcionamento de um GDS corrente (GDS Instruments, 2001)

O dispositivo consegue manter qualquer pressão imposta, funcionar como uma bomba hidráulica controlar variações volumétricas e até mesmo actuar como uma pipeta digital. Adianta-se ainda dois métodos de controlo, o primeiro consiste no controlo manual feito através de um pequeno teclado digital ou via PC. Este último requer um *hardware* específico a fim de estabelecer a desejada comunicação com um computador como também um *software* previamente programado para finalidade em causa. Desta forma pode-se introduzir seqüências de ordens de pressão (ou de volume), fazendo-a aumentar ou diminuir de forma linear, introduzir um valor específico ou então mantê-la constante, e associar um dado tempo a cada ordem. Ainda possibilita arquivar, num documento Excel, o registo de pressões e de volume ao longo do tempo.

Como o sistema TTA requer tensões díspares nas três direções é mandatório a utilização de três actuadores GDS, para tal utiliza-se um *multiplexer* com uma capacidade de conectar no máximo quatro aparelhos deste tipo, este liga-se ao computador via porta RS232 (GDS Instruments 2001).



Figura 3.5 – Actuador GDS (à esquerda *multiplexer*)

Como nota última acrescenta-se que é absolutamente vital que as condutas de ligação entre os controladores GDS e as faces do Cubo sejam devidamente purgadas, pois a existência de bolsas de ar nas mesmas tornam as leituras falaciosas pelo que se deixa de controlar devidamente o estado de tensão imposto na amostra.

3.1.1.3. *Software* de controlo e de aquisição

A fim de simplificar a tarefa de controlo dos três actuadores GDS em simultâneo e atendendo à carga quantitativa de informação proveniente dos mesmos cresceu a urgência de desenvolver um *software* de modo a responder a estes desafios otimizando todo o sistema de comandos e monitorização, processo de aquisição de dados e estabelecer a devida comunicação entre os diferentes hardwares envolvidos. O mesmo foi concebido por Costa *et al.* (2008), a carência de programas comerciais próprios fez com que surgisse a este autor a proposta de conceber um adequado aos desafios encontrados. A plataforma de programação que serviu de base ao projeto foi o LabVIEW™ por permitir uma manipulação acessível de todas as variáveis envolvidas e possibilitar futuros ajustes caso a circunstância o exija.

O produto final deu origem a um interface intuitivo composto por quatro separadores. O primeiro separador permite ao utilizador obter informações de cada controlador GDS ligado ao sistema e configurar as comunicações com o PC, para que a comunicação seja válida os parâmetros característicos dos controladores devem ser iguais, estes são velocidade, paridade e Bits. O segundo separador consiste na introdução de ordens sequenciais para cada actuador (Figura 3.6), tal como fora referido consistem em fazer variar a pressão ou volume de forma linear, estipular um valor qualquer ou manter um dado valor constante. O terceiro separador diz respeito à aquisição de dados provenientes dos actuadores GDS, estes consistem nas medições de pressão e de volume e são registados de forma contínua, também permite a gravação de dados oriundos de transdutores de deslocamento caso existam nas diferentes faces do Cubo. Este separador ainda fornece dois gráficos, um relativo ao registo de pressões (à esquerda Figura 3.7) e outro relativo às medições de volume (à direita Figura 3.7) de todos os actuadores ligados ao *multiplexer*. Por fim, o quarto separador fornece uma visualização/ monitorização geral de todos os parâmetros a serem controlados em tempo real.

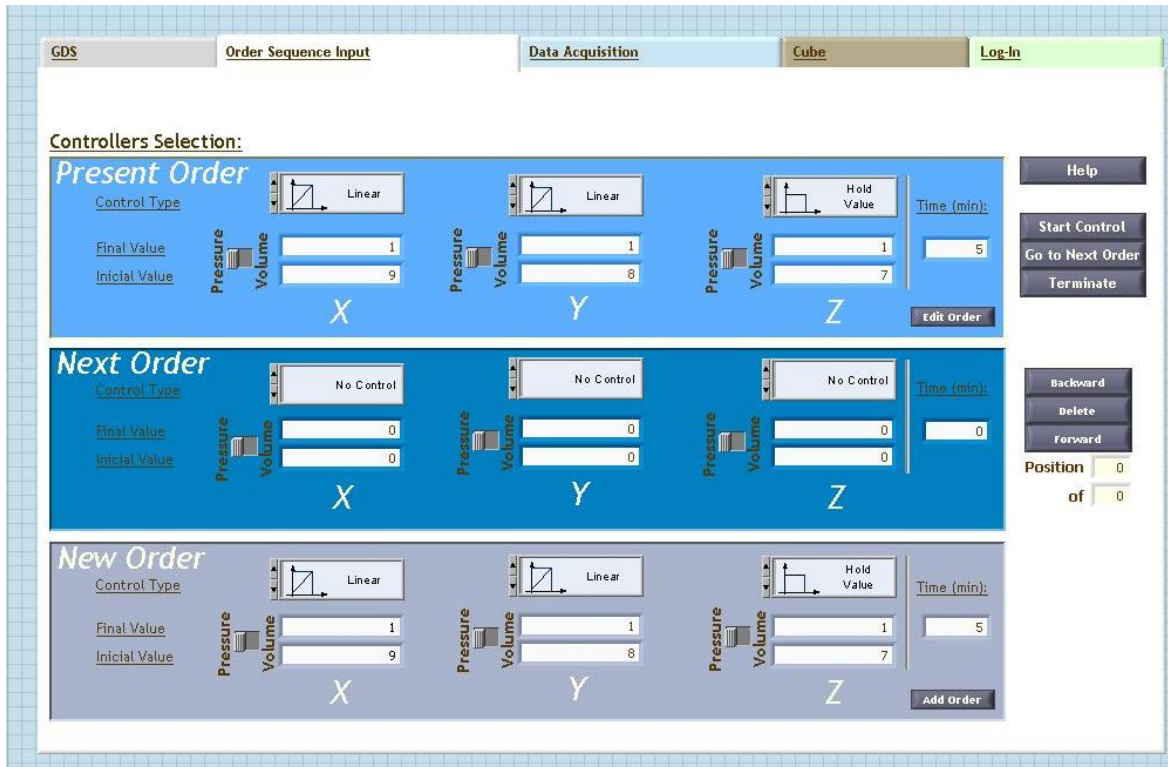


Figura 3.6 – Separador de definição de ordens de controlo para cada controlador GDS (Ferreira, 2009)

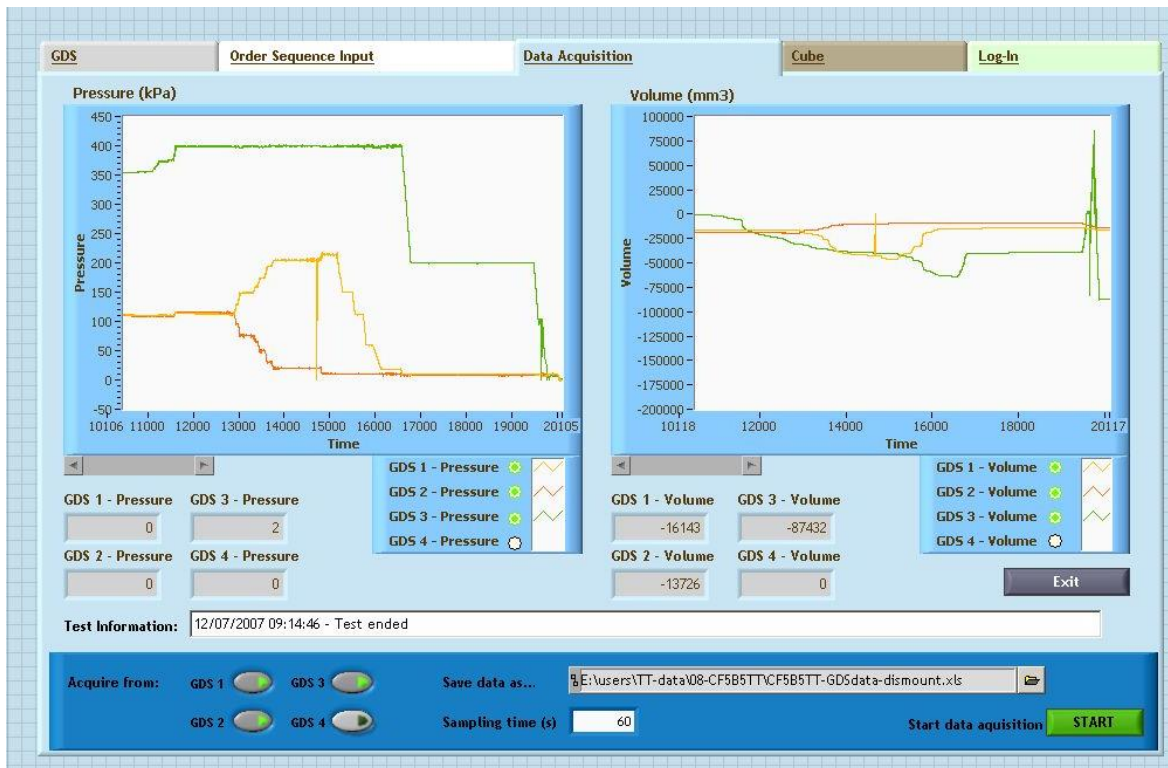


Figura 3.7 – Separador de aquisição de dados e gráficos de medições de pressão e volume (Ferreira, 2009)

3.1.1.4. Bender Elements para medições de ondas sísmicas

Os *bender-extend elements* (BE), são transdutores piezoelétricos de flexão e de compressão-extensão que permitem a emissão e recepção de ondas de corte (V_s) e ondas de compressão (V_p), respetivamente, todas elas ondas sísmicas, visando a obtenção de parâmetros de rigidez de uma dada amostra, (Ferreira and Fonseca, 2010). Estes dispositivos são constituídos por duas diminutas peças piezocerâmicas, rigidamente ligadas a uma placa metálica circular e conectadas aos respetivos elétrodos. Como os BE são extremamente frágeis a placa ao qual se liga cumpre os papéis de reforço, manuseamento e de fixação ao meio desejado, as peças piezocerâmicas em si são banhadas previamente à sua utilização numa resina epoxy rígida por fim de as isolar eletricamente e conferir um grau de proteção às mesmas, pois o contacto destas com o solo e água é requerido (Ferreira, 2003).

A incorporação deste sistema de medição no ensaio verdadeiramente triaxial constitui uma ferramenta poderosa uma vez que possibilita a medição de velocidade de ondas sísmicas (V_s e V_p) em todas as direções do Cubo. A instalação dos BE na câmara cúbica processa-se com facilitismo pois cada face dispõe de uma abertura cilíndrica no seu centro (Figura 3.6, delimitada a vermelho), podendo ser fechada através de uma junta cega caso a circunstância o exija. Salienta-se ainda a importância do alinhamento de cada par de transdutores piezoelétricos, caso esta não se cumpra este critério o rigor das medições torna-se deficiente.

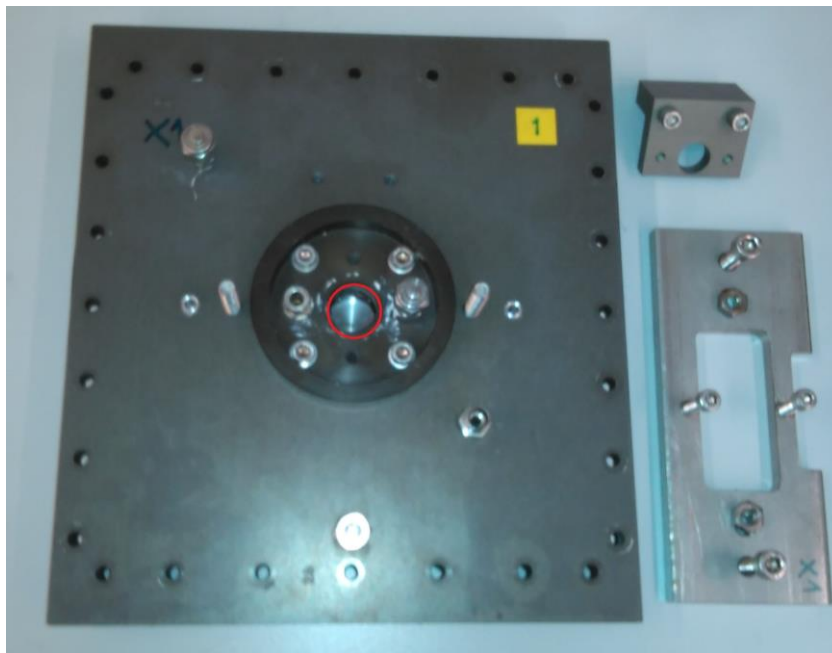


Figura 3.8 – Face X1 do Cubo Triaxial Verdadeiro com abertura central de instalação dos BE

Um aspeto de grande utilidade da configuração em “T” dos BE (Figura 3.9) aplicados em todas as seis faces do Cubo é que possibilita o registo das ondas não só em todas as direções ortogonais como também em direções inclinadas. Embora a combinação das leituras seja redundante acaba por ser uma mais-valia na medida em que valida e mitiga a subjetividade associada à interpretação das mesmas. Pois apesar do processo de instalação e de execução deste sistema seja mais ou menos expedito os sinais são gravemente afetados pela qualidade do isolamento, contacto entre o solo e os BE, por ruído ambiental e interferências eletromagnéticas, as quais se procuram reduzir ao implementar uma rede de cabos terra

(Ferreira and Fonseca, 2010). Posto isto a determinação do tempo de chegada é condicionado por estes fatores e a sua correta interpretação é fulcral a fim de adquirir medições válidas. Dentro deste contexto de inconveniências refere-se ainda a possibilidade de ocorrência do fenómeno “*near-field effect*”, que assenta no facto das ondas de compressão se propagarem em maior velocidade no meio face às ondas de corte e como tal chegam primeiro ao recetor, sendo ambas emitidas no mesmo instante (António *et al.*, 2016).



Figura 3.9 – BE com configuração em “T” já instalado numa das faces do Cubo

O equipamento eletrónico essencial ao sistema de medição de ondas revelam-se nas Figura 3.10 e 3.11, consistem em dois multiplexers de 6 canais (MUX) com capacidade de amplificação do sinal, um osciloscópio (Tektronix TDS 220) e por fim um gerador de funções (TTi) capaz de emitir sinais consoante a configuração inicial imposta, por norma sinusoidal.

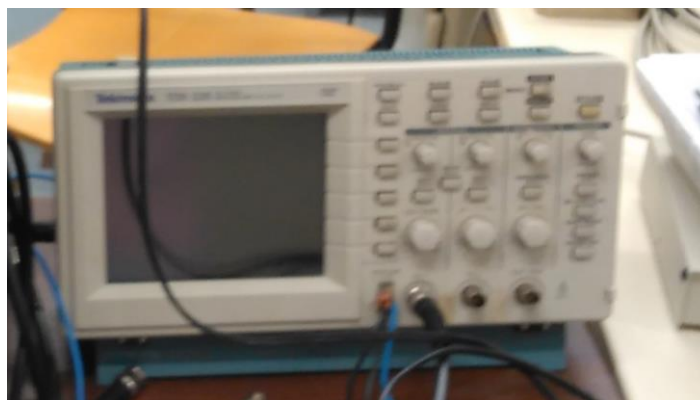


Figura 3.10 - – Equipamento eletrónico associado aos sistema de medições de ondas , Osciloscópio Tektronix TDS220



Figura 3.11 – Equipamento electrónico associado ao sistema de medições de ondas, de cima para baixo, multiplexor MUX transmissor, multiplexor MUX receptor e gerador de funções TTI

3.2. SISTEMA DE SENSORES ÓTICOS DE BRAGG COMPLEMENTAR AO CUBO VERDADEIRAMENTE TRIAXIAL

O grande desafio e um dos principais focos deste trabalho concentra-se na tentativa de incorporar sensores óticos baseados em redes de Bragg nas direções ortogonais do Cubo verdadeiramente triaxial da FEUP.

A ideia geral inicial do sistema de sensores óticos FBG a implementar no Cubo Triaxial Verdadeiro consiste na disposição de quatro sensores óticos dos quais três suscetíveis a deformações longitudinais e irremediavelmente a variações de temperatura abrangentes dos três eixos do cubo (dois horizontais, X e Y, e um vertical, Z) e outro exposto unicamente a possíveis oscilações térmicas, ou seja, livre de sofrer esforços mecânicos, com a finalidade de discriminar o efeito de temperatura nas medições efetuadas pelos restantes três sensores. Este último tem de estar sujeito a oscilações térmicas idênticas das que os outros sensores experimentam a fim de compensar devidamente o efeito térmico, pois tal como fora referido as redes de Bragg são suscetíveis a extensões mecânicas e a variações de temperatura. Todavia o facto de ter os três sensores embebidos na amostra de dimensões razoáveis e ainda esta última estar dentro da câmara cúbica, as variações térmicas previstas são diminutas, ou mesmo quase nulas. E também atendendo à resolução do interrogador, que assenta nos 0.1 pm, descarta-se a necessidade de compensar o efeito de temperatura, assim como aquele quarto sensor cujo propósito único seria discriminar este efeito. Portanto o sistema idealizado assenta apenas na incorporação de três sensores de Bragg gravados em três fibras individuais, uma para cada direção ortogonal do Cubo. Na Figura 3.12 dispõe-se de um esquema básico e elucidativo quanto à disposição dos mesmos no interior da câmara cúbica.

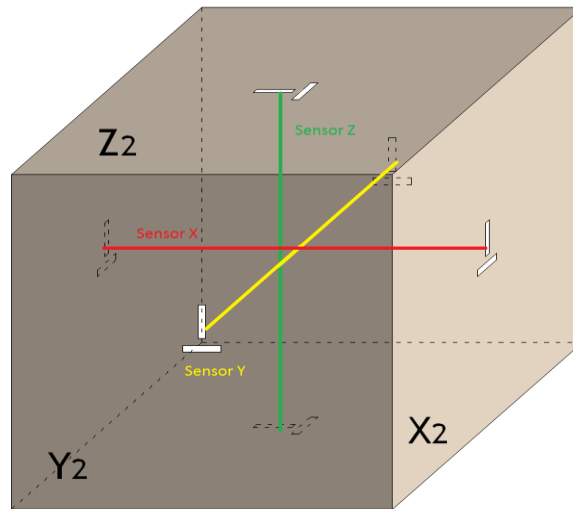


Figura 3.12 – Esquema da disposição dos sensores de Bragg nas três direções ortogonais na câmara cúbica

O acréscimo de sensores de Bragg neste aparelho, dada a sua elevada sensibilidade a deformações longitudinais, permite a determinação de parâmetros de rigidez a muito pequenas deformações. Com o intuito de comparar estes valores com aqueles medidos pelo sistema convencional desenvolvido aquando a construção do TTA.

3.2.1. COMPONENTES ESSENCIAIS AO SISTEMA SENSORIAL BASEADO EM REDES DE BRAGG

Quanto aos componentes necessários à implementação de um sistema deste tipo, já largamente debatidos no Capítulo 2, referem-se as unidades de emissão de luz e de leitura do sinal e obviamente cabos de fibra ótica. Relativamente às primeiras duas pôde-se usufruir de um interrogador ótico (FS 5600 BraggSCOPE) que por sinal cumpre as duas funções, de emissor e recetor do sinal, estabelecendo assim a premissa de um sistema reflexivo. Este foi cedido, temporariamente, ao LabGeo por parte do Laboratório de Estruturas da FEUP a fim de desenvolver o presente trabalho. As fibras óticas, assim como a gravação das redes de Bragg nas mesmas, surgiram da colaboração cordial e profissional entre a FEUP e a UA, especificamente com o IT (Instituto de Telecomunicações). Outras componentes tais como *pigtails*, mangas térmico-retrácteis, etc. foram igualmente oriundas do IT.

3.2.1.1. Interrogador ótico

A unidade de interrogação, FS5600 BraggSCOPE (Figura 3.13), foi produzida e comercializada, entre os anos 2008 e 2010, pela antiga FiberSensing, atual multinacional HBM, especialmente concebida para sensores de Bragg. Correntemente produzem-se unidades mais versáteis quanto às suas capacidades de aquisição e de leitura. Todavia este aparelho é perfeitamente capaz de competir com os mais recentes, pois apresenta um *design* robusto e apesar dos seus 12 kg pode ser facilmente transportada para locais remotos desde que haja uma fonte de alimentação. Permite uma aquisição rápida com uma leitura em

termos de variação de comprimento de onda em tempo real podendo operar 24/7 registrando as medições no seu disco rígido interno para posterior análise.

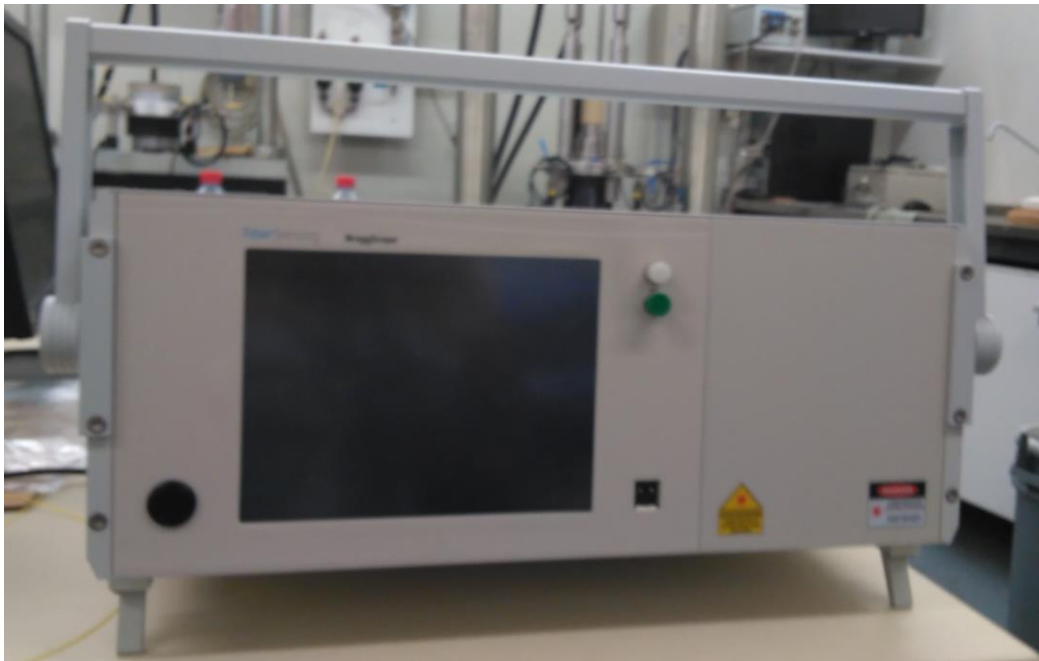


Figura 3.13 – Unidade de interrogação, FS 5600 BraggSCOPE da FiberSensing (actual HBM)

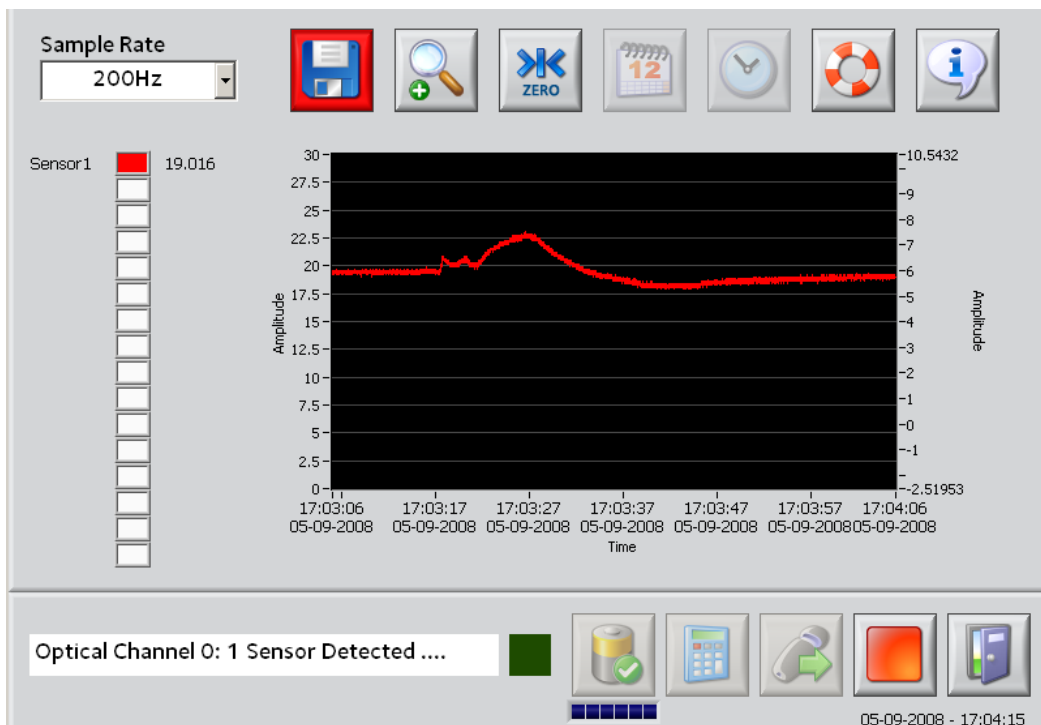


Figura 3.14 – Interface gráfico com *software* iLog da FiberSensing (actual HBM)

Usufri de um interface gráfico táctil bastante intuitivo portador do *software* iLog (Figura 3.14), desenvolvido pela FiberSensing, a fim de poder testar sensores, estipular níveis de alarme e monitorizar e/ ou controlar as leituras registadas no momento, entre outras funções. O método de interrogação assenta no WDM (multiplexagem por divisão do comprimento de onda) através de dois canais podendo suportar até 4 sensores por canal, desde que estes apresentem comprimentos de onda distinto e trabalhem dentro da sua gama espectral, nomeadamente 1530 nm até 1570 nm. Na Figura 3.15 apresentam-se as especificações gerais do aparelho fornecidas ao autor por cortesia da HBM.

Wavelength Measurement	
operating range	C band (1530 to 1570 nm)
resolution	0.1 pm (static) 25x10 ⁻³ pm (dynamic) ¹ 2.5x10 ⁻³ pm (dynamic) ²
absolute accuracy	±50 pm
repeatability	±10 pm
sensors per fiber	4 (maximum) at FiberSensing Bands: C - 1541.5 nm D - 1547.9 nm E - 1554.3 nm F - 1560.8 nm
optical channels	FS5500: 1 or 4 (with 1s switching) FS5600: 2 or 4 (in parallel)
measurement range	3.2 nm per sensor
sample rate	10 kS/s ³
Inputs / Outputs	
optical connectors	FC/APC
Datalogger	
functions	sampling; archiving; transmission
interface	touchscreen GUI ethernet, USB
data format	mySQL database Excel™ compatible files
Environmental	
operation temperature	0 to 50 ^o C
relative humidity	< 90% at 40 ^o C
Mechanical	
dimensions	450 x 180 x 370 (mm)
weight	12 kg

Figura 3.15 – Especificações gerais do interrogador FS 5600 BraggSCOPE da FiberSensing (actual HBM)

3.2.1.2. Cabo de fibra ótica e gravação de redes de Bragg

A fibra ótica utilizada (FiberCore PS1250/1500) constitui numa fibra especialmente concebida a ser usada como meio ideal de gravação de redes de Bragg, dada a sua elevada fotossensibilidade. Esta característica é conseguida co-dopando o núcleo com iões de boro, assim possibilita a fabricação de redes de Bragg com alta refletividade (Antunes, 2011).

O método de gravação das redes de Bragg recorre a um sistema que o IT da UA possui à sua disposição que se baseia na técnica de gravação por máscaras de fase. A radiação UV é emitida por um laser de excímeros limitada a um comprimento de onda equivalente a 248 nm, esta é de seguida refletida por um conjunto de espelhos até alcançar a máscara de fase. Mas antes da radiação a atingir ainda se dispõe de uma pequena abertura, *slit*, e uma lente cilíndrica de focagem, LC, que possibilita a focagem da mesma na máscara de fase, (Antunes, 2011), conforme se indica na Figura 3.16.

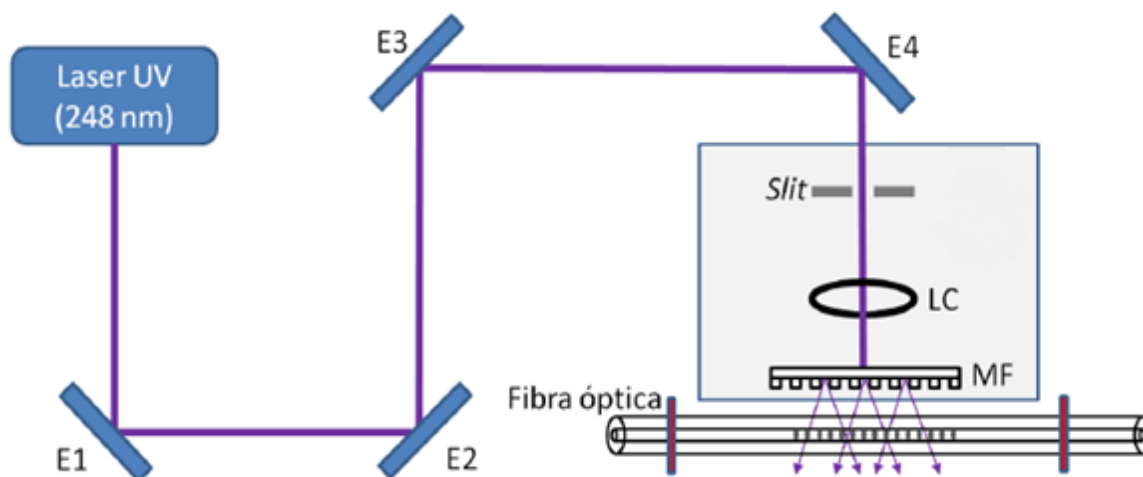


Figura 3.16 – Representação esquemática do sistema de gravação de FBG's utilizado (adaptado de Antunes, 2011)

Todo o sistema encontra-se sobre uma mesa ótica de ar comprimido com o fim de mitigar possíveis vibrações evitando assim desalinhamentos entre as diversas componentes do sistema (Figura 3.17).

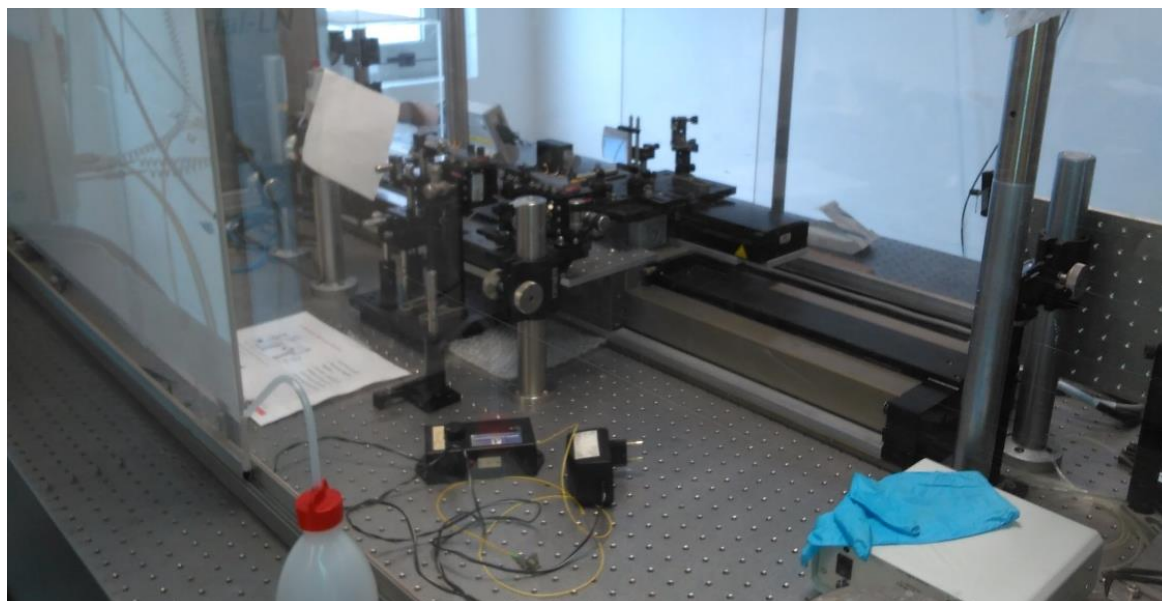


Figura 3.17 – Mesa ótica do sistema de gravação do IT (UA)

3.2.2. METODOLOGIA DE INCORPORAÇÃO DO SISTEMA ÓTICO IDEALIZADO NO TTA

Como o TTA da FEUP foi concebido inteiramente para outro fim, a implementação de um sistema ótico, ou seja, a incorporação de cabos de fibra ótica no mesmo, urgiu uma espécie de intervenção improvisada para levar a cabo o conceito idealizado.

A câmara cúbica uma vez montada fica completamente selada. A fim de fazer passar as fibras óticas, surgiu a necessidade de criar diminutos furos situados na proximidade do centro de cada face, já que no centro propriamente dito encontram-se os BE. A via que se assumiu consiste na furação das pedras porosas, existentes em cada face do Cubo, que primordialmente desempenhavam a função de drenagem. Esta tarefa só por si compromete a integridade física do cubo e dado o carácter experimental do sistema idealizado e o grau de incerteza associado à sua exequibilidade, optou-se por condensar o conceito original e aplicar a fibra somente numa direção, nomeadamente na direção Y do Cubo. Mesmo assim a criação de pequenos furos neste par de faces gera a impossibilidade de estancar o cubo, uma vez que este processo implicaria a fixação da fibra nos mesmos e por consequência disto o movimento da fibra tornar-se-ia solidário com estas e as medições seriam então o reflexo do movimento das placas. Assim sendo o ensaio fica limitado a amostras secas ou no máximo com 10 % de teor em água.

Para garantir o correto funcionamento de um sensor de Bragg a fibra tem que ser previamente tracionada e é imperativo assegurar a fixação de dois pontos, de um lado e de outro da rede de Bragg, na amostra de solo a ensaiar. As medições assim traduzem a deformação que o solo sofre entre esses pontos. A técnica de fixação direta de uma fibra ótica no solo através de micro-âncoras (Figura 2.39) demonstrada pela Marmota Engineering AG serviu de inspiração à criação de pequenas peças com função similar.

Antes de partir da teoria à prática concebeu-se um esquema simples que dá resposta a estas exigências visando proporcionar ao sensor todas as condições de que necessita para operar devidamente. No esquema, Figura 3.18, encontram-se elementos chave a serem incorporados no sistema e na Tabela 3.1 o propósito destes.

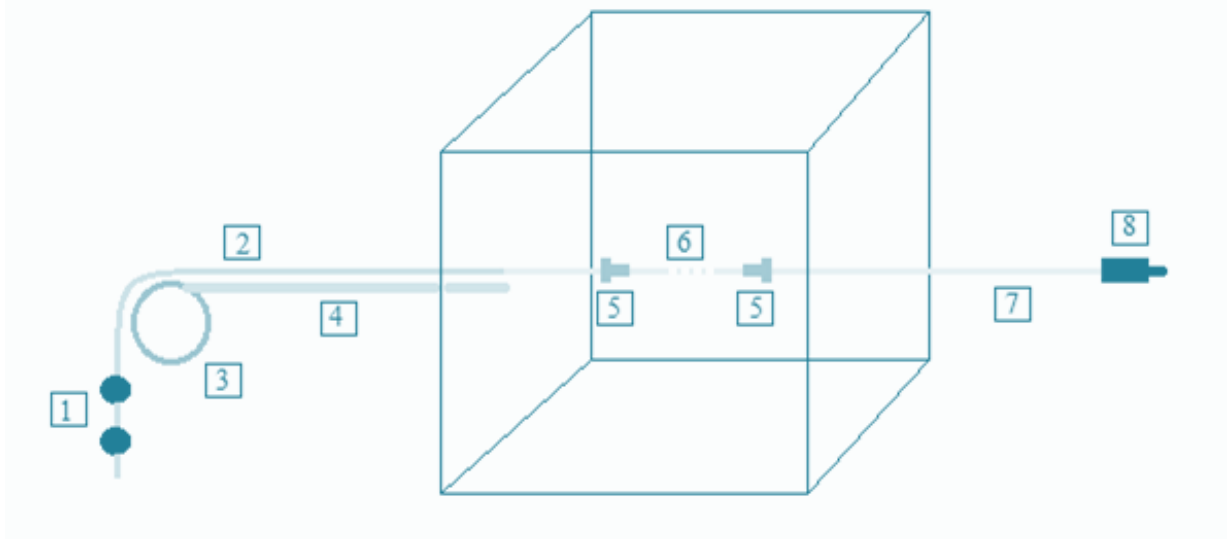


Figura 3.18 – Esquema de implementação de um sensor de Bragg no Cubo triaxial

Tabela 3.1 – Elementos chave do sistema sensorial e respetivas funções

	Elementos Chave	Função
1	Pequenos chumbos esféricos	Incutir pré-tensão na FO
2	Fio de sediela	Resistir ao esticamento a jusante do sensor FBG
3	Roldana	Suavizar o ponto de inflexão
4	Peça metálica de suporte	Proporcionar uma distância adequada da face do cubo até à roldana
5	Micro-âncoras	Fixação de dois pontos da FO na amostra isolando o sensor FBG entre eles
6	Sensor de Bragg	Medição de deformações
7	Fibra Ótica	Transmissão do sinal luminoso
8	Conector FC/ APC	Ligação ao FS 5600 BraggSCOPE

3.2.2.1. Execução do sistema sensorial simplificado

Pelos motivos atrás expostos o sistema corrente assenta na instalação de um sensor de Bragg apenas na direção Y do Cubo triaxial verdadeiro. Como primeiro passo procede-se à criação dos pequenos furos, de diâmetro ligeiramente superior ao da FO, na região das pedras porosas no respetivo par de facetas, conforme a Figura 3.19 ilustra.



Figura 3.19 – Pormenor do furo realizado na pedra porosa

É de grave importância detalhar alguns inconvenientes associados à etapa que se segue, esta só por si é bastante simples e consiste em fazer passar a fibra ótica pelos furos já existentes. Todavia as redes de

Bragg são gravadas diretamente na fibra ótica, ou seja, sem qualquer tipo de revestimento de proteção pelo que só depois é que se pode embutir a fibra de novo neste, a Figura 3.20 exemplifica este cenário.

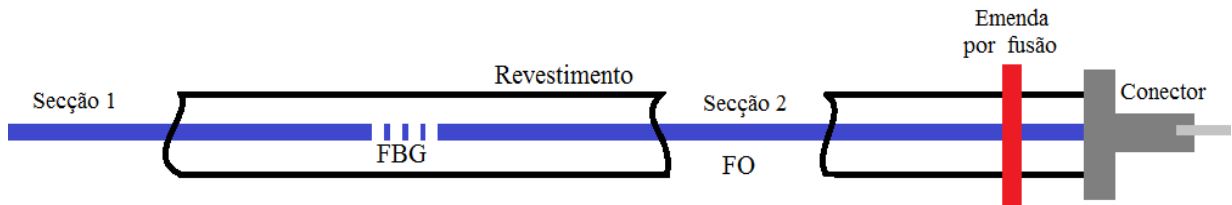


Figura 3.20 – Representação da fibra ótica a ser inserida numa das faces do Cubo

Tendo em conta que, pelo esquema representado na Figura 3.20, nas secções 1 e 2 a fibra ótica encontra-se totalmente desprotegida, o risco de a quebrar nestas zonas ao passar a mesma pelo furo existente na pedra porosa é elevado e a máxima cautela é requerida. Estas duas secções são alvo da aplicação das micro-âncoras por colagem, já que o ideal é fixar as mesmas na fibra ótica “despida” a fim de impedir o escorregamento desta face ao revestimento de proteção aquando a imposição de deformações longitudinais (Figura 3.21). É de notar que a solução ideal seria realizar este passo em primeiro lugar e só depois fazer passar a fibra pelo furo à direita da secção 2, realizando uma emenda, por fim, através da técnica de fusão. Hipótese esta inviável neste caso dada a carência deste tipo de equipamento na premissa. Posto isto, foi inserida a fibra ótica, conforme se representa na Figura 3.20, por uma das faces do Cubo, nomeadamente a face Y2 (Figura 3.23a), e de seguida procedeu-se à colagem das micro-âncoras (Figura 3.24), salientando que a jusante do sensor de Bragg a extremidade da fibra é substituída por um fio de sediela pelas razões já discutidas, Figuras 3.21 e Figura 3.23b).

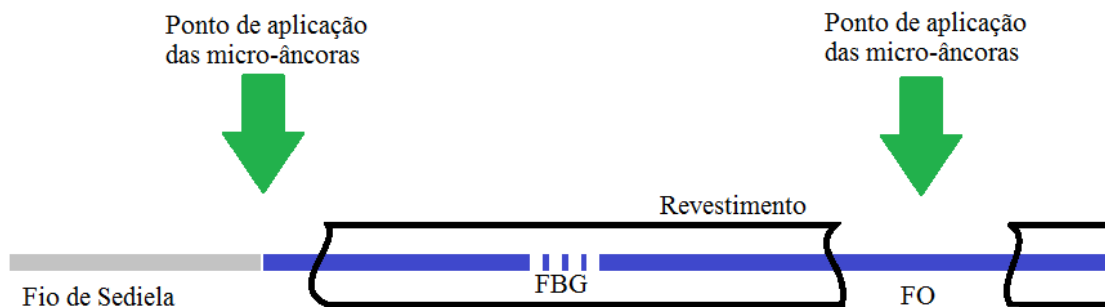
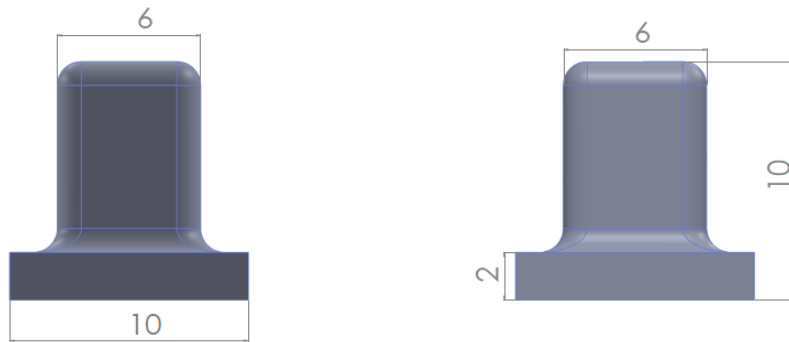


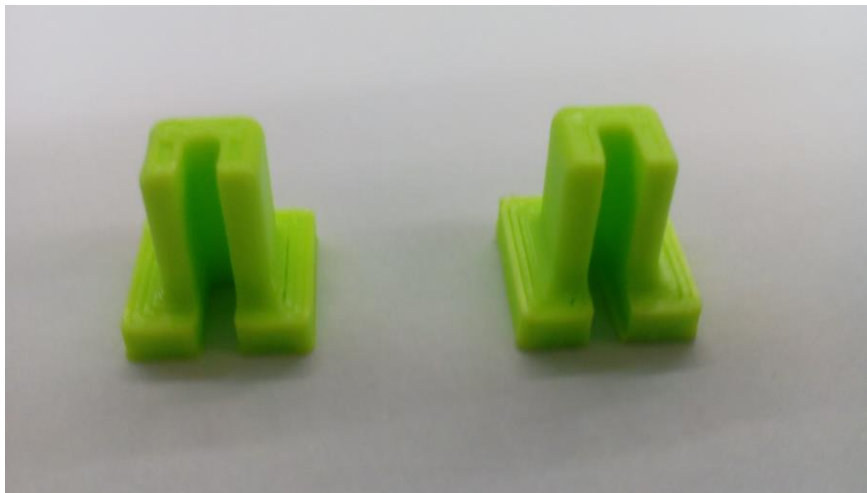
Figura 3.21 – Cenário após a introdução da fibra pelo furo da face Y2

As micro-âncoras a serem aplicadas a cerca de 100 mm de distância entre elas, isolando o sensor de Bragg entre as mesmas, foram desenhadas pelo Professor Doutor Paulo Antunes da UA com dimensões

adequadas para o propósito (Figura 3.22a) e fabricadas com recurso a uma impressora 3D (Figura 3.22b) propriedade do departamento de física da UA.



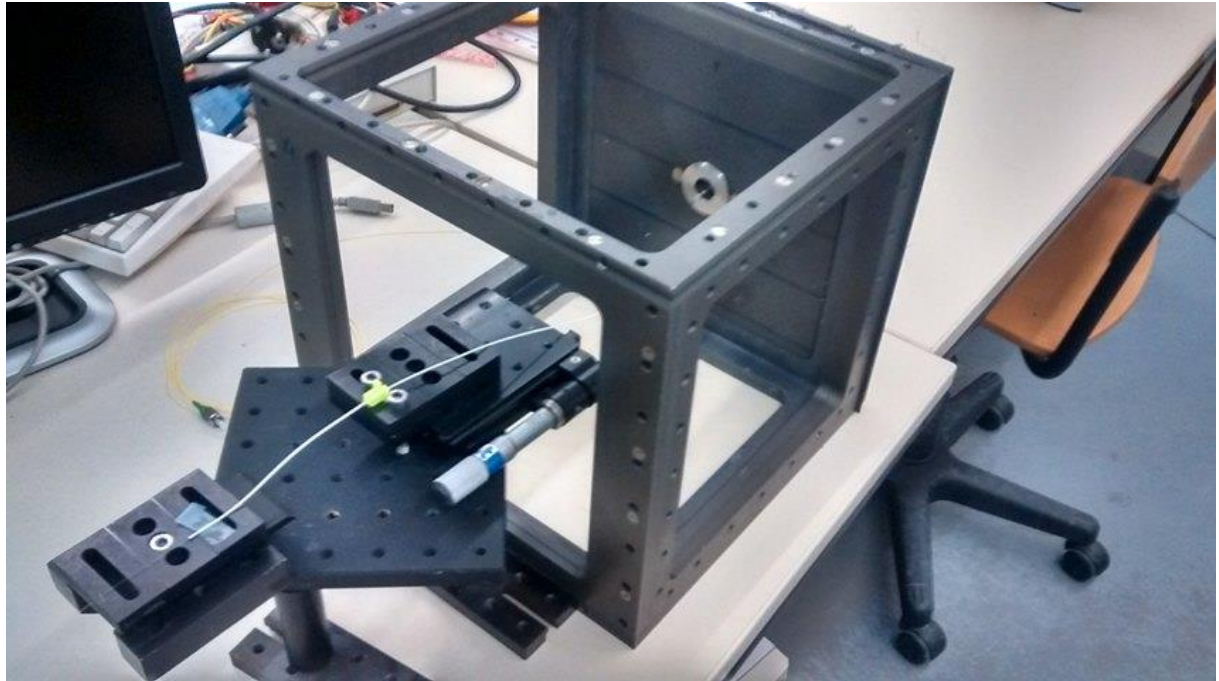
a)



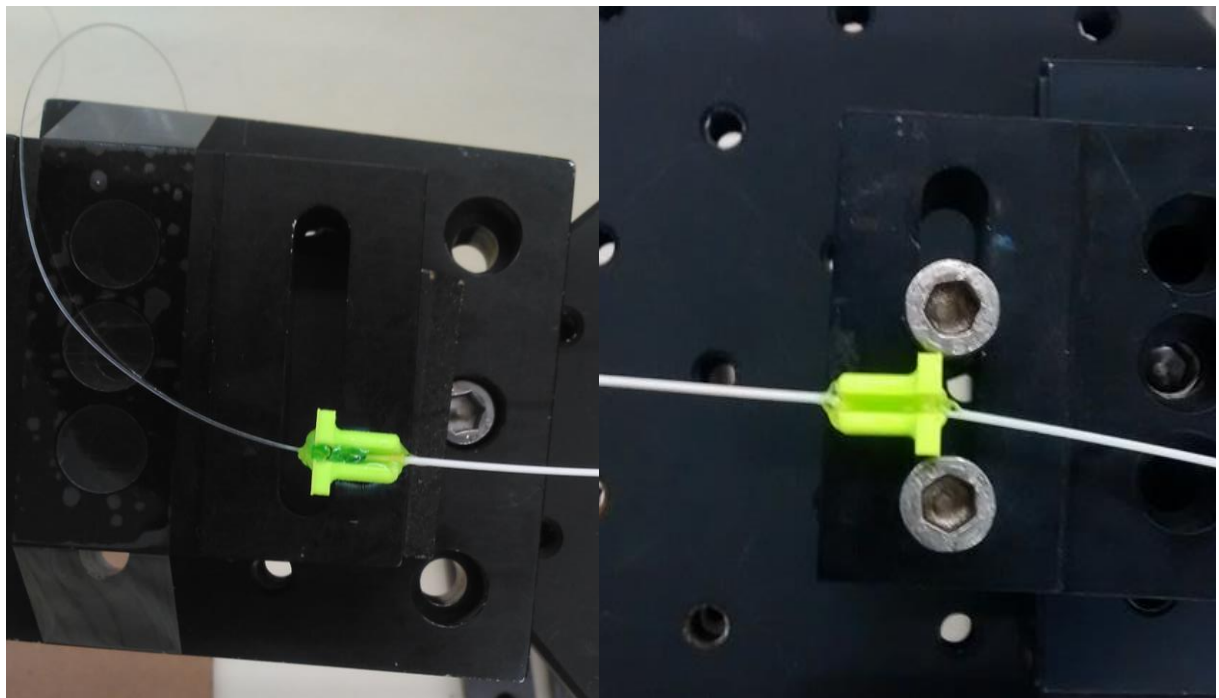
b)

Figura 3.22 – Micro-âncoras: a) Dimensões das peças em mm; b) pormenor das peças

Estas micro-âncoras cumprem então uma dupla funcionalidade, a ranhura presente nestas são alvo de receção das secções 1 e 2, é nestas que se procede à colagem da fibra ótica “despida”, de modo a impedir o escorregamento desta face ao revestimento primário (Figura 3.23b e c); a base alargada que as peças assumem constituem um reforço por forma a garantir um movimento solidário da extensão de fibra que isolam, e na qual se encontra o sensor de Bragg, com as deformações que a amostra de solo experimenta.



a)



b) Secção 1

c) Secção 2

Figura 3.23 – Instalação das micro-âncoras: a) Recurso à plataforma de translação linear de forma a facilitar o processo de colagem; b) colagem do fio de sedilha e a extremidade de jusante final da fibra ótica; c) colagem de um curto segmento de fibra ótica “despida”.

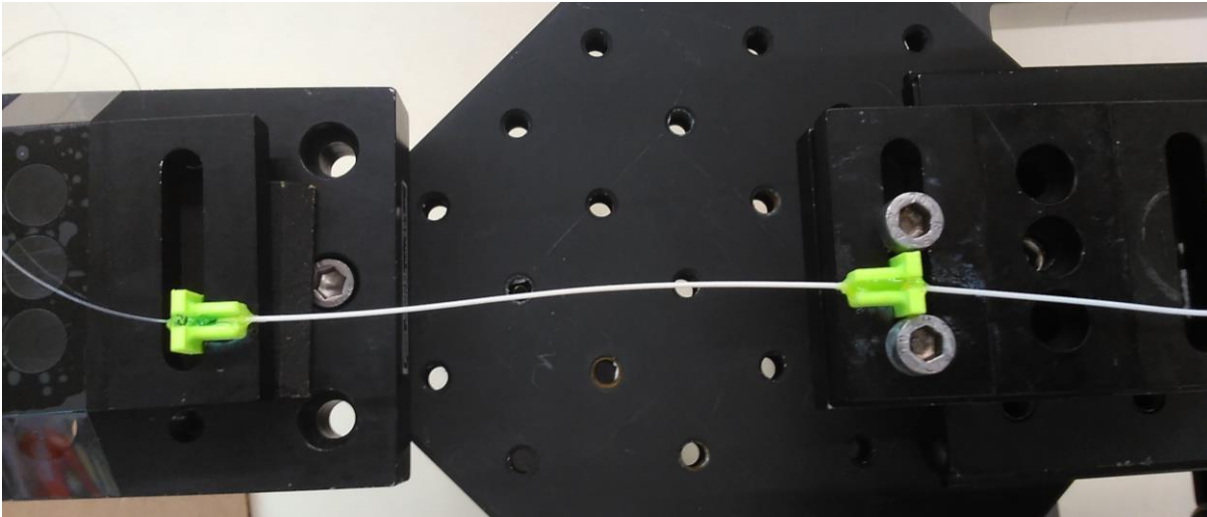


Figura 3.24 – Visão geral do processo de colagem de ambas as micro-âncoras isolando um segmento de aproximadamente de 100 mm, no qual se encontra a rede de Bragg

Antes de proceder à montagem das restantes faces do cubo tem que se realizar as devidas calibrações do sensor usufruindo da plataforma micrométrica de translação linear presente na Figura 3.24. Já que para a realização destas são necessários os pontos de fixação gerados por parte das micro-âncoras. A caracterização do sensor é detalhada no Capítulo 4.

Uma vez concluídas as calibrações do sensor de Bragg pode-se então partir para a fase seguinte de montagem das restantes faces do Cubo e fazer passar a outra extremidade do sistema ótico, que consiste no fio de sediela, pela face Y1 (Figura 3.25).

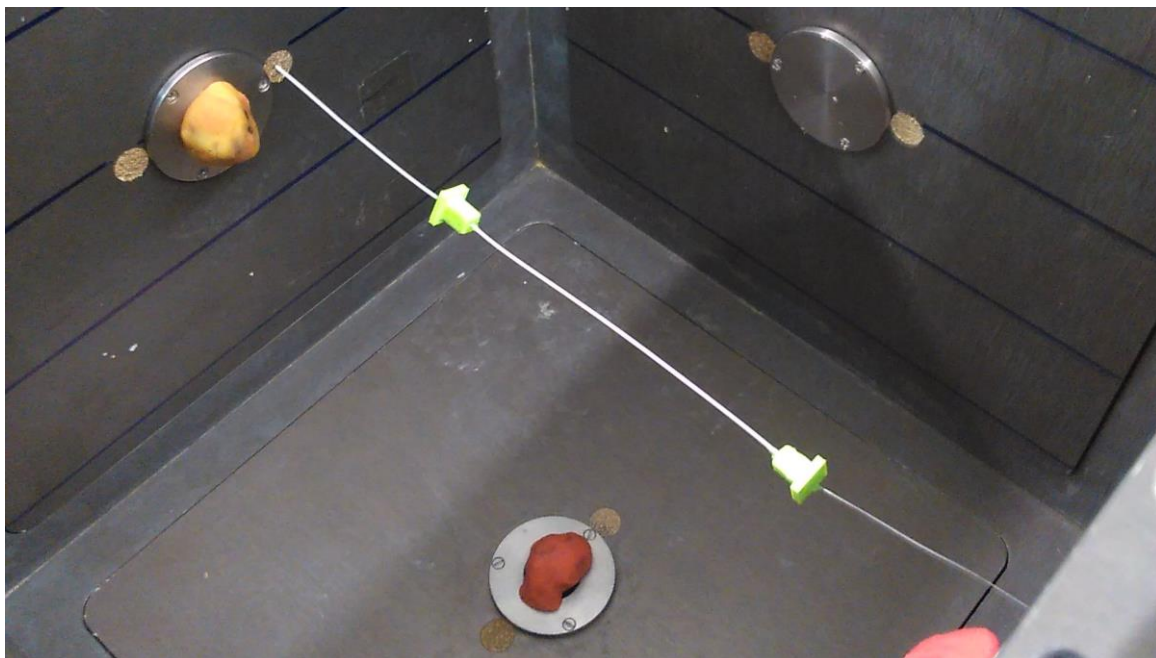


Figura 3.25 – Sensor instalado na direção Y do Cubo

Para finalizar a implementação do sistema idealizado importa instalar os elementos de esticamento da fibra ótica, para tal é necessário fixar um ponto da fibra externo à face Y2, a montante do sensor de Bragg. E a jusante deste, esticar o fio de sediela que sai a partir da face Y1 usufruindo dos elementos chave, números 1, 3 e 4, esboçados na Figura 3.18 e detalhados na Tabela 3.1, que são respetivamente chumbos esféricos, roldana e peça metálica. Todos eles são de fácil aquisição, apenas o último elemento é que forçou um pouco de improviso e engenho. Na Figura 3.26 revela-se uma peça metálica, de 150 mm de comprimento, já acoplada de uma roldana, de dimensões adequadas, na sua extremidade.



Figura 3.26 – Peça de suporte com roldana acoplada na sua extremidade

A fim de ligar a peça de suporte à face Y1 do Cubo procedeu-se à dobragem e à furação de um orifício naquela extremidade de modo a prender a mesma com uma rosca já existente na face que por ventura constitui na saída do fio de sediela, Figura 3.27.

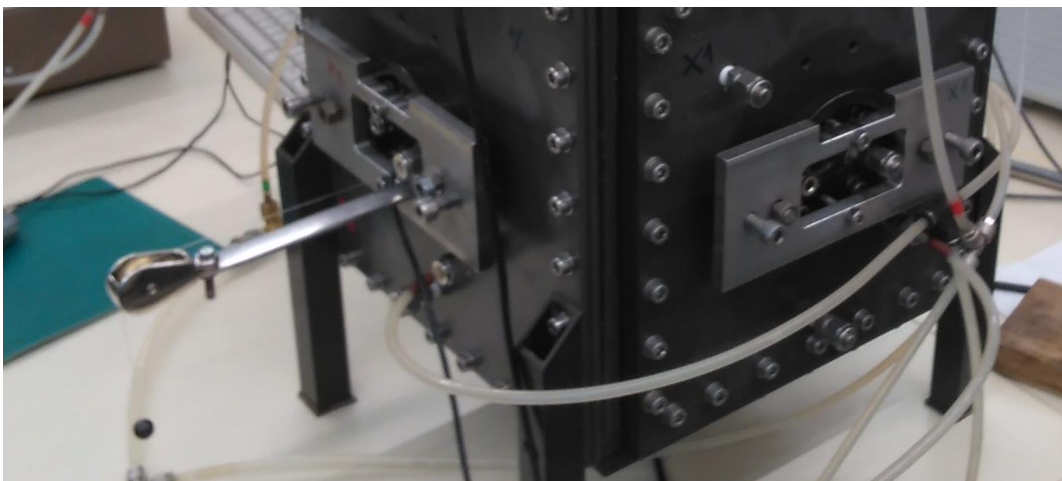


Figura 3.27 – Acessório de esticamento instalado na face Y1 do Cubo

De modo a fixar um ponto qualquer da fibra externo à face Y2 usufruiu-se de uma peça metálica com as mesmas características e procedeu-se a colagem desse ponto na extremidade da peça, conforme a Figura 3.28 ilustra.

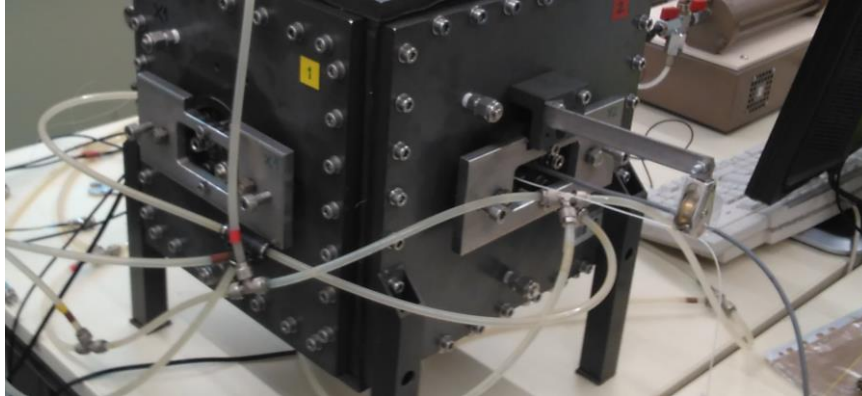


Figura 3.28 – Fixação de um ponto qualquer da fibra a montante do sensor de Bragg

A pré-tensão da fibra, em particular da rede de Bragg, é imperativa pois tem que se incutir uma tração tal de modo a assegurar a permanência da rede de Bragg no reino da linearidade estipulada aquando a sua caracterização à deformação.

Na Figura 3.29 encontra-se o sistema ótico implementado consoante o idealizado.

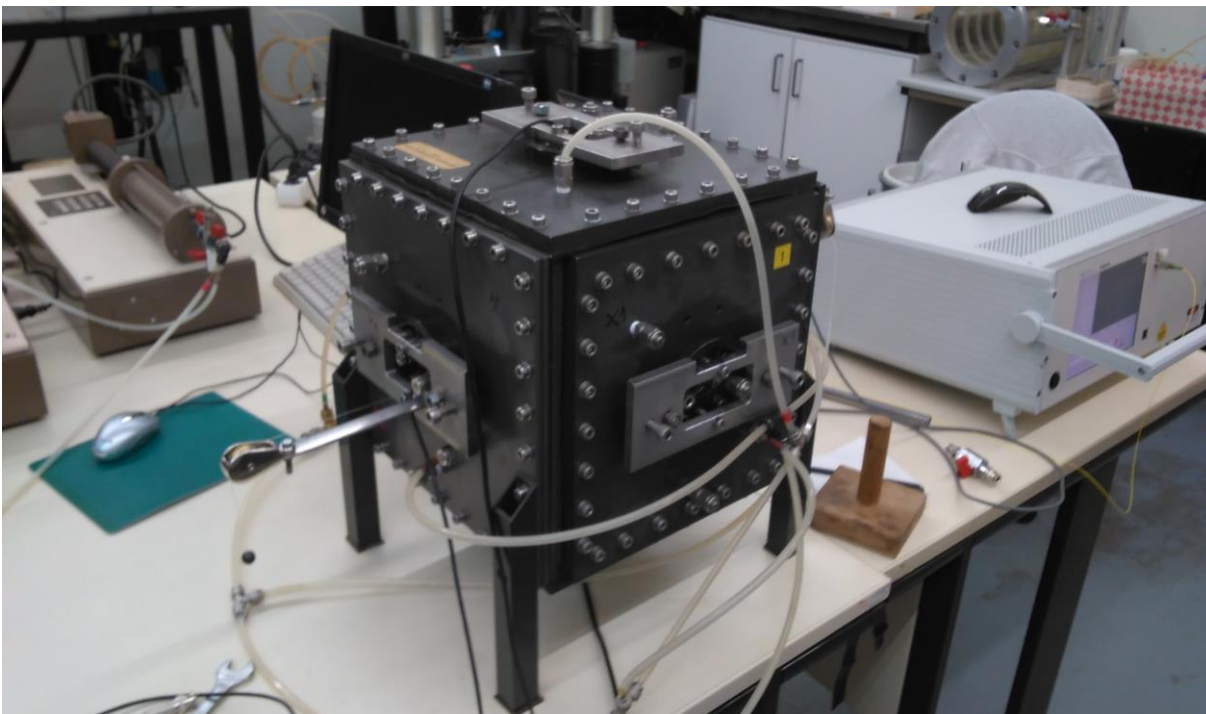


Figura 3.29 – Sistema ótico implementado no Cubo e conectado à unidade de interrogação do sinal

É de notar que como o sensor de Bragg se encontra disposto segundo a direção Y do Cubo, o *setup* dos controladores GDS assenta apenas na utilização de dois dispositivos do género, um a controlar a direção Y e outro a controlar o estado de tensão nas restantes direções, X e Z (Figura 3.30). De forma a averiguar o desempenho do sensor ótico face a extensões segundo o eixo da fibra e determinar a influência das pressões envolventes oriundas das tensões impostas nas faces X e Z do Cubo.



Figura 3.30 – Controladores GDS utilizados para estabelecimento de tensões no Cubo

E como tal a instalação do sistema completo de medições de ondas com base nos BE foi simplificada consoante se ilustra na Figura 3.31. Sendo as medições do par de transdutores piezoelétricos na direção Y os de maior relevância.

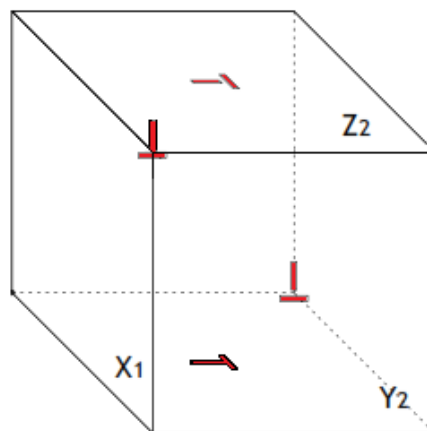


Figura 3.31 – Localização dos pares dos elementos *bender/ extender* nas respectivas faces do Cubo

3.3. MATERIAL: AREIA HOSTUN

A amostra de solo reconstituído utilizado neste trabalho incide numa areia em particular, nomeadamente areia de Hostun (HS – Hostun *sand*). As propriedades que a caracterizam assim como a facilidade de interpretação de resultados que fornece torna-a alvo de inúmeras investigações pelo que já foi estudada num vasto leque de cenários distintos a nível mundial. Como tal justifica-se plenamente o seu uso no presente estudo.

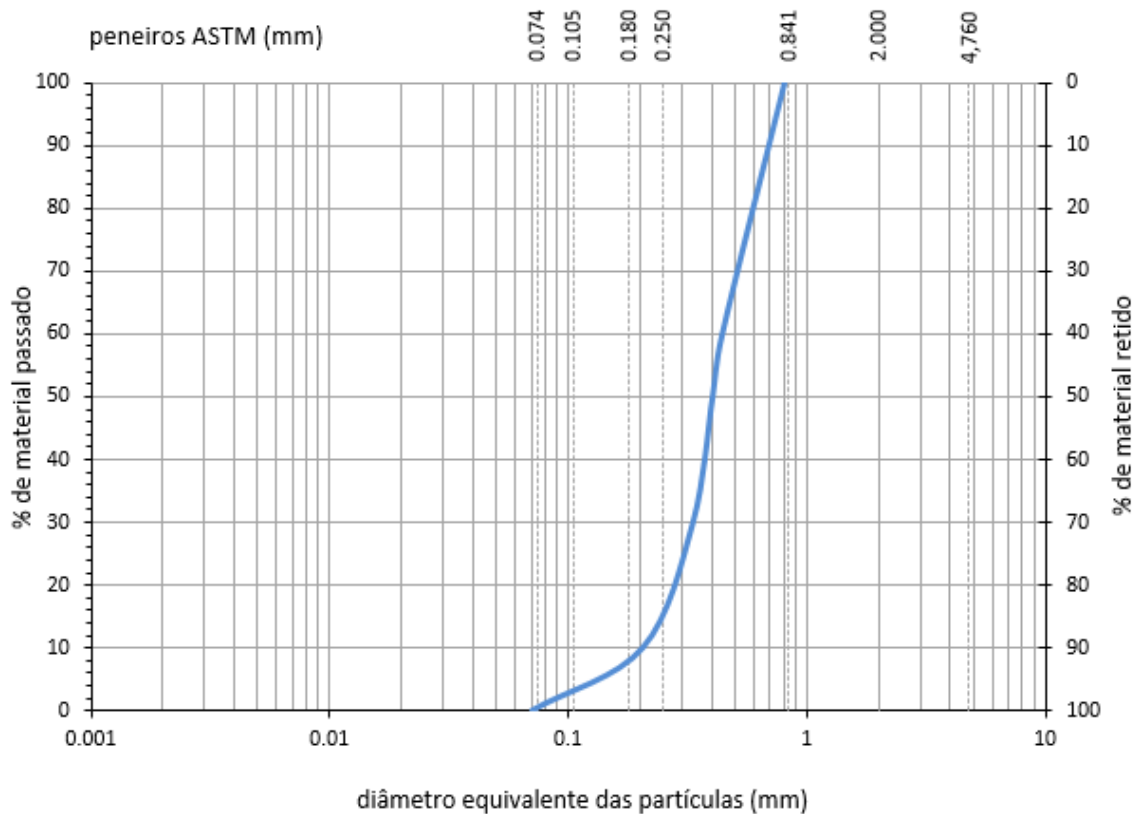
3.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A areia Hostun provém, tal como o seu nome indica, da região de Hostun situada no sudoeste de França. É formada por grãos esbranquiçados angulares de diminuta dimensão, sendo composta maioritariamente por sílica ($\text{SiO}_2 > 98\%$). Quanto às suas propriedades físicas refere-se o trabalho desenvolvido por outros autores, presente na Tabela 3.2, pelo que se averigua a constância das mesmas.

Tabela 3.2 - Propriedades físicas da areia "Hostun"

Autores	D ₅₀	U	e min	e max	G _s	ρ _{dmin} (g/ cm ³)	ρ _{dmax} (g/ cm ³)
Colliat (1986)	-----	-----	0.624	0.961	2.65	1.351	1.632
Fargeix (1986)	-----	-----	0.648	1.041	2.65	1.298	1.608
Alvarado (2000)	0.35	1.57	0.656	1.000	2.65	1.325	1.600
Amat (2007)	0.34	1.50	-----	-----	-----	-----	-----

O peso específico da amostra de solo desta areia, determinado no LabGeo, mostra-se coincidente com os valores obtidos pelos autores mencionados na Tabela 3.2, nomeadamente $\rho_s=2.669 \text{ g/ cm}^3$. Ainda se realizou uma análise granulométrica da amostra, orientada pela norma europeia ISO/TS 17892-4, visível na Figura 3.32 e como se pode confirmar pela sua análise a amostra compreende um intervalo bastante restrito, portante pode-se considerar que a mesma é mal graduada constituindo uma areia média. Este último aspeto indica que a gama de índice de vazios ($e_{\text{max}} - e_{\text{min}}$) é diminuta. Já que cerca de 67% da massa ficou retida no peneiro N° 60 correspondente a 0.250 mm, ou seja, grande parte dos grãos apresentam a mesma dimensão (entre 0.250 mm e 0.425 mm).



ARGILA	SILTE			AREIA			CASCALHO
	FINO	MÉDIO	GROSSO	FINA	MÉDIA	GROSSA	

Figura 3.32 - Análise granulométrica da amostra de areia "Hostun"

3.3.2. PREPARAÇÃO E COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA NO CUBO

Geralmente o solo tem um teor de água inicial diferente de zero que deve ser contabilizado, todavia após a determinação do valor médio deste teor na amostra estabeleceu-se que o mesmo podia ser desprezado, $w_0=0.04\%$. Recordar-se que a implementação do sistema ótico inviabilizou a estanqueidade da câmara cúbica do TTA, na sequência disto incutiu-se um teor de água na amostra equivalente a 5 % apenas a fim de conferir uma certa coesão à areia.

O interior de Cubo apresenta um volume de 15625 cm^3 e procurando incutir um índice de vazios próximo dos 0.8, após os devidos cálculos, chegou-se a um peso de solo seco (W_s) a adicionar igual a 22753.75 gf e 1137.69 gf de água (W_w) totalizando um peso de 23891.4 gf. De seguida, preparou-se uma mistura (W_w+W_s) de 25 kgf contabilizando o rácio determinado anteriormente e procedeu-se à colocação e devida compactação da mesma no Cubo. Por fim sobrou uma porção de solo de 641 gf permanecendo 24359.0 gf no interior do Cubo.

Quanto à compactação do solo, cada placa interior do cubo foi delimitada com linhas de orientação, a azul na Figura 3.33, por forma a perfazer 5 camadas, tendo a primeira camada 3.0 cm de altura, a última 2.0 cm e as restantes intermédias 5.0 cm.

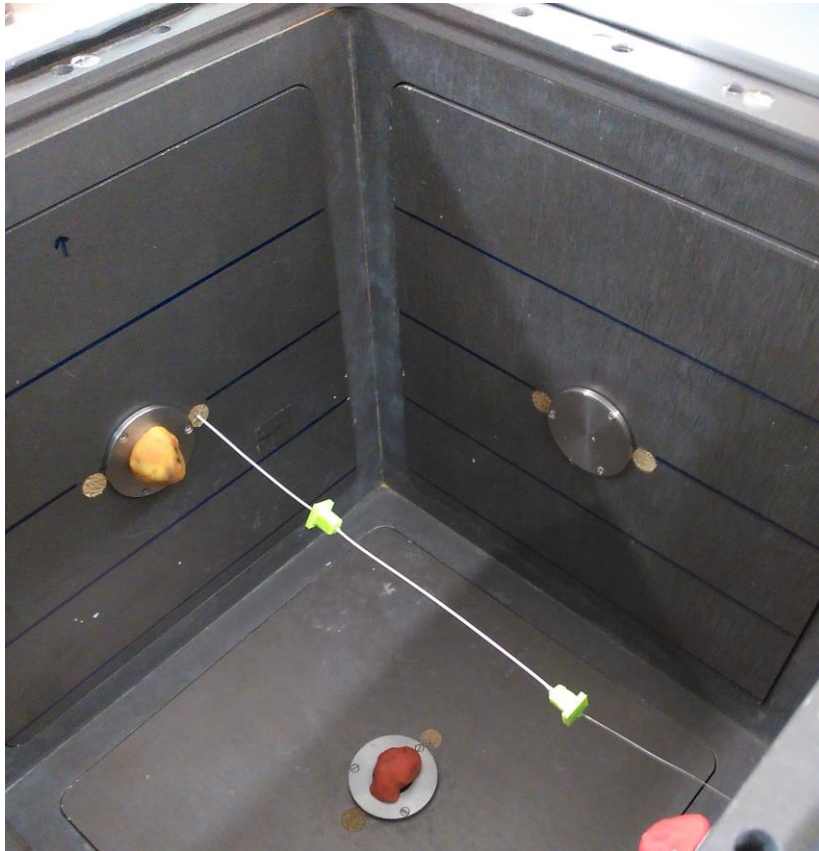


Figura 3.33 – Guias de orientação ao processo de compactação no interior do Cubo

Durante a compactação tem de se garantir uma transmissão de energia uniforme e bem distribuída camada a camada, ainda se acresce a agravante da presença do sensor ótico no interior da câmara. As primeiras três camadas a extremidade a jusante da secção 1 foi removida da respetiva face (Figura 3.34a), de seguida voltou-se a dispor o sensor da forma desejada procurando garantir a sua correta posição incutindo um certo grau de tração na fibra (Figura 3.35a).

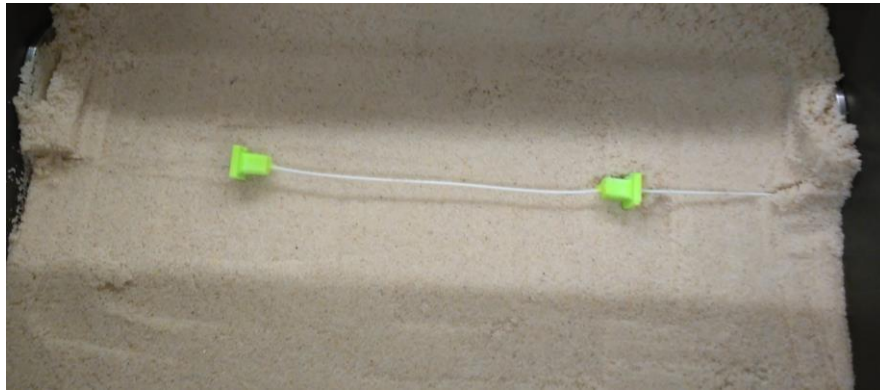


a)

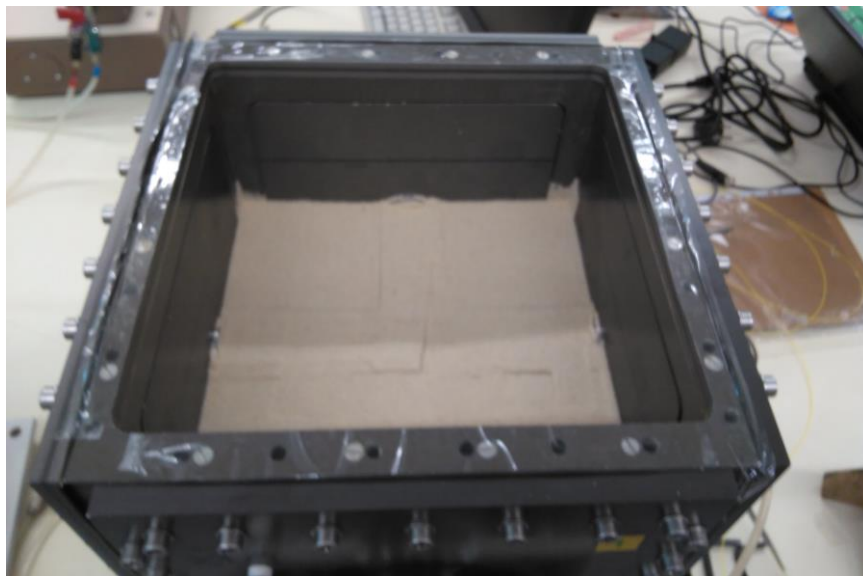


b)

Figura 3.34 – Pormenores do processo de compactação: a) remoção da extremidade a jusante da secção 1 da face Y1; b) dispositivo utilizado para compactar a amostra



a)



b)

Figura 3.35 – Compactação no local da fibra ótica: a) disposição desejada do sensor; b) camada compactada sobrejacente à fibra

O plano de ensaios foi ditado pelas circunstâncias criadas e impostas pela implementação do sistema sensorial ótico. Como o sensor de Bragg se dispõe segundo a direção Y do Cubo, tal como já fora mencionado, só se aplicaram dois controladores de pressão GDS, um deles controla duas direções, X e Z, enquanto o segundo controla exclusivamente a direção Y, conforme a Figura 3.36 ilustra. Desta forma pode-se avaliar a influência da compressão e descompressão longitudinal ao longo do eixo do sensor e apreciar a influência das pressões envolventes inculcidas à mesma pelas faces X e Z, mantendo as pressões constantes nestas, e comprimindo ou descomprimindo na direção Y e experimentar o cenário inverso.

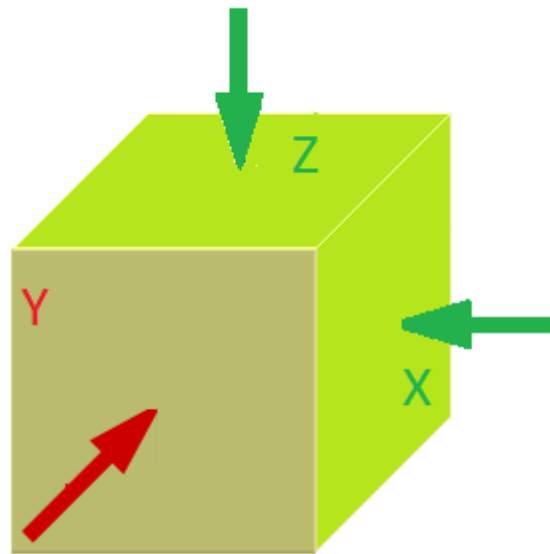


Figura 3.36 – Desenho ilustrativo do controlo de tensões por parte dos controladores GDS

4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES ÓTICOS DE BRAGG

A caracterização dos sensores óticos quanto à sua sensibilidade térmica (sT) e quanto à sua sensibilidade à deformação longitudinal (sI) é imperativa já que se pretende converter o registo de variação de comprimento de onda para valores do parâmetro que se pretende controlar que, neste caso, consiste na deformação longitudinal. Considera-se que as variações térmicas no interior da câmara cúbica são reduzidas ou mesmo nulas e portanto desprezáveis, de qualquer das formas procedeu-se à caracterização completa do sensor.

As relações que se procuram são estritamente lineares e as condições com que estas se obtêm têm de ser reproduzidas, idealmente, aquando a seu funcionamento no TTA.

4.1.1. CALIBRAÇÃO À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

A caracterização relativa a variação de temperatura foi realizada numa câmara climática, FITOCLIMA (Figura 4.2), que permite não só fazer o controlo da temperatura assim como alterar a humidade relativa no seu interior. Embora esta última variável seja desprezável para a finalidade em questão, uma vez que o sensor de Bragg é insensível a este parâmetro. Na Figura 4.1 o interrogador FS 5600 BraggSCOPE em pleno funcionamento a efetuar leituras de temperatura em tempo real.

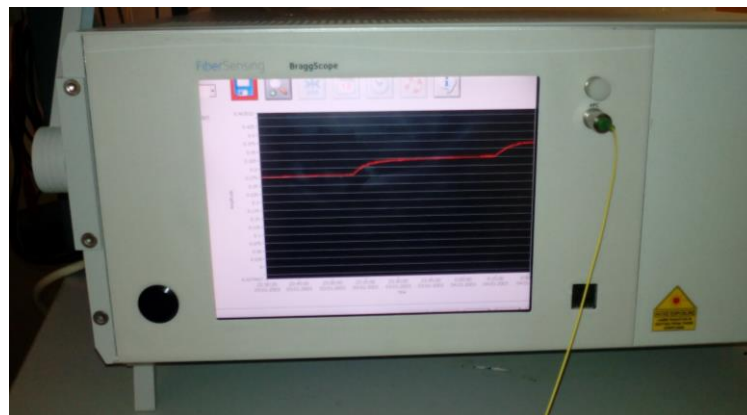


Figura 4.1 - FS 5600 BraggSCOPE a realizar leituras em tempo real do incremento de temperatura imposto na câmara climática



Figura 4.2 – Câmara climática - FITOCLIMA, Laboratório de Estruturas

Partindo de uma temperatura fixa inicial de 20 °C procedeu-se ao incremento desta feita por escalões de 5 °C até atingir os 70 °C perfazendo 10 patamares de referência. O primeiro acréscimo de temperatura serviu apenas para averiguar o intervalo de tempo de estabilização da temperatura no interior na câmara e deste modo registar a variação de comprimento de onda central correspondente àquele incremento, neste caso de 25 °C. Após cumprir o estipulado concluiu-se que esta câmara climática estabiliza após sensivelmente uma hora a partir do momento de *input* da temperatura desejada. Na Tabela 4.1 encontram-se as variações de comprimento de onda central e as respetivas temperaturas.

Tabela 4.1 – Variações do comprimento de onda central face a oscilações térmicas

T (°C)	$\Delta\lambda_B$ (nm)	λ_B (nm)
20.0	0.090	1554.090
25.0	0.115	1554.115
30.0	0.162	1554.162
35.0	0.212	1554.212
40.0	0.279	1554.279
45.0	0.326	1554.326
50.0	0.360	1554.360
55.0	0.402	1554.402
60.0	0.453	1554.453
65.0	0.511	1554.511
70.0	0.564	1554.564

A fim de tratar os dados graficamente tem que se adotar uma relação da temperatura com o comprimento de onda correspondente. Daí a necessidade de somar a variação do comprimento de onda (parâmetro que o interrogador regista) com o comprimento de onda central de Bragg, neste sensor este é equivalente a 1554.00 nm. Pois só desta forma é que se consegue adquirir a sensibilidade térmica do sensor através da análise da inclinação da linha de tendência que melhor se adapta à relação temperatura versus comprimento de onda (Figura 4.3).

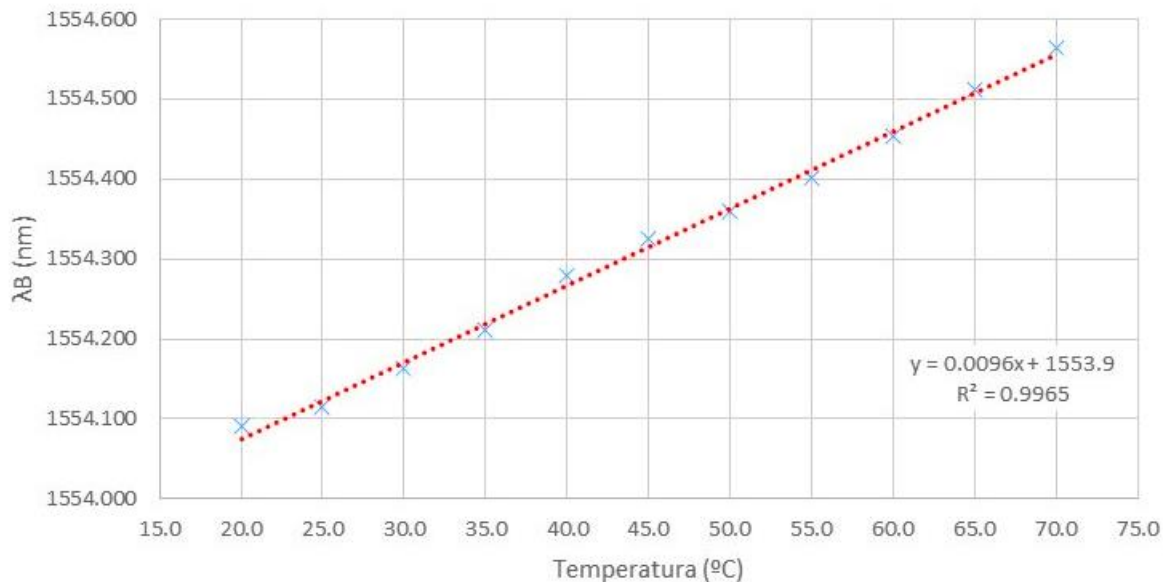


Figura 4.3 – Variação do comprimento de onda de Bragg com o incremento da temperatura

Conclui-se que este sensor apresenta uma sensibilidade térmica (sT) que se aproxima dos 9.6 pm/ °C. Este valor é inferior ao valor típico das fibras dopadas com germânio, no entanto trata-se de uma rede gravada em fibra fotossensível dotada de iões de boro, como tal os valores dos parâmetros termo-óticos e de expansão térmica são diferentes dos anteriormente apresentados.

4.1.2. CALIBRAÇÃO À DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL

Para realizar esta calibração usufruiu-se da plataforma de translação linear, acoplada de um parafuso micrométrico, presente na Figura 4.4. Tirou-se proveito da sua morfologia para fixar as micro-âncoras de forma conveniente e de modo a esticar a fibra ótica tanto quanto o necessário.

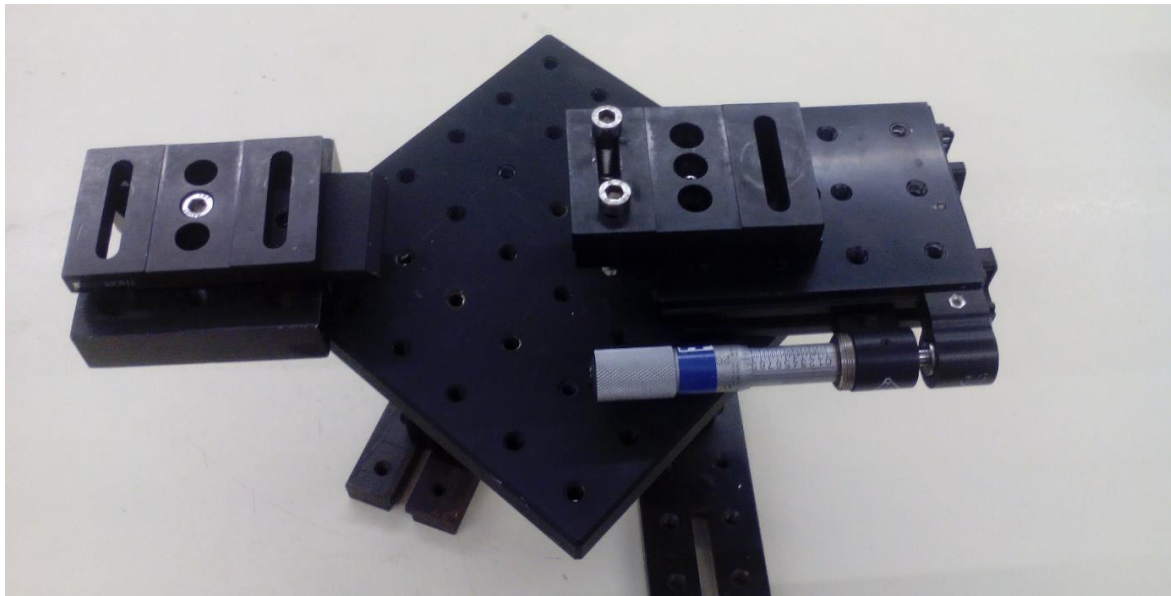


Figura 4.4 - Plataforma de translação linear controlada por um parafuso micrométrico

O comprimento de onda central refletido pela rede de Bragg foi monitorizado em função da tensão aplicada na fibra ótica. Nas Figuras 4.5 e 4.6 mostra-se o comprimento de onda de Bragg em função da elongação relativa induzida, onde cada incremento consiste em 20 μm .

Tabela 4.2 – Variação do comprimento de onda em função da deformação longitudinal incutida na fibra

μe (μm)	$\Delta\lambda\text{B}(\text{nm})$	$\lambda\text{B}(\text{nm})$
20	0.091	1554.091
40	0.211	1554.211
60	0.378	1554.378
80	0.550	1554.550
100	0.755	1554.755
120	0.860	1554.860
140	1.010	1555.010

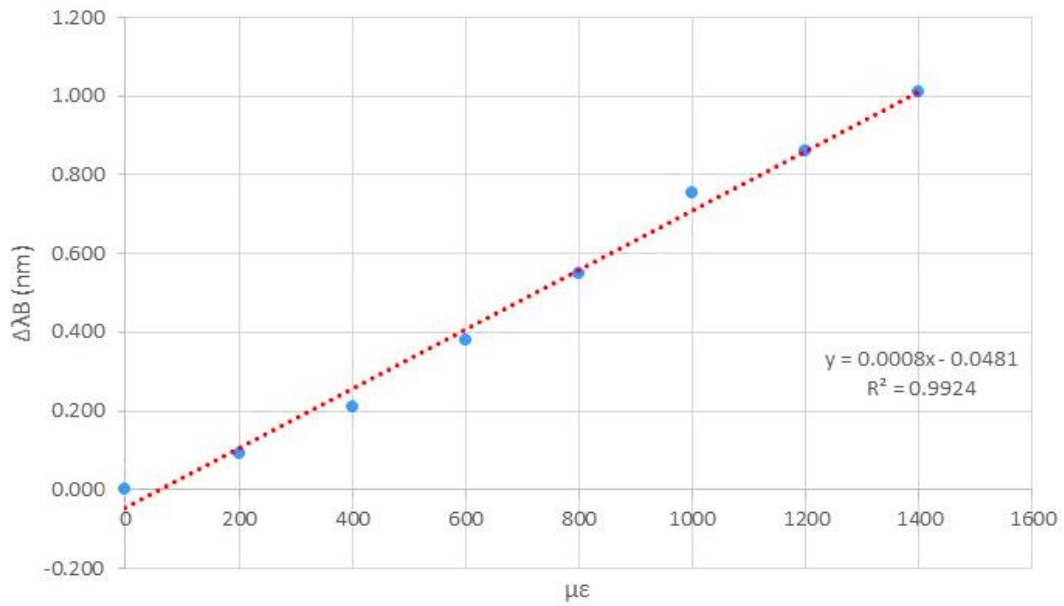


Figura 4.5 – Variação do comprimento de onda por *microstrain* ($\mu\epsilon$)

A análise das Figuras 4.5 e 4.6 permite determinar a sensibilidade da rede de Bragg à deformação. O ajuste linear dos dados da Figura 4.5, comprimento de onda de Bragg em função da elongação relativa, fornece um valor de 0.8 ± 0.01 pm/ $\mu\epsilon$ para a sensibilidade à deformação. Este valor é ligeiramente inferior a um resultado típico de sensibilidade à deformação para uma rede de Bragg que ronda os 1.2 pm/ $\mu\epsilon$. Isto deve-se ao facto de o sensor calibrado ter sido previamente encapsulado por um revestimento polimérico e o valor típico corresponde ao de uma fibra “despida”. Na Figura 4.6 o ajuste linear oferece um *sl* ditada em micrómetros, valor a ser contabilizado em cálculos futuros, *sl* = 7.6 pm/ μm .

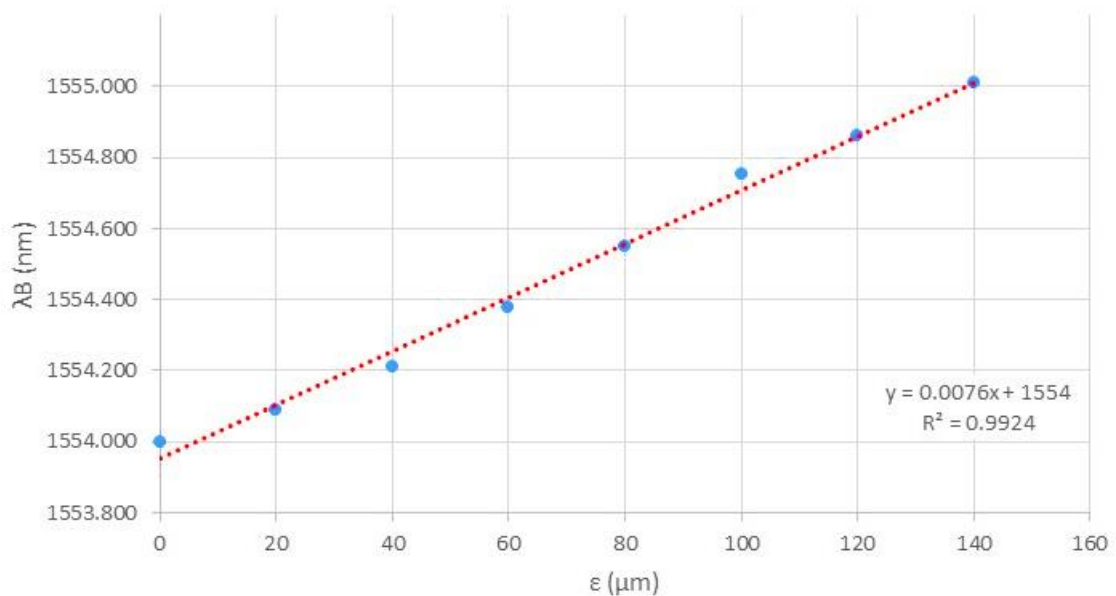


Figura 4.6 – Variação do comprimento de onda de Bragg com a elongação longitudinal

4.2. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Uma vez concluída a etapa de compactação atrás exposta, procedeu-se de imediato à avaliação do comportamento da fibra. O idealizado teoricamente consistia em averiguar o posicionamento do sensor de Bragg em termos da variação do seu comprimento de onda; o esperado seria que a fibra ótica estivesse suficientemente relaxada a fim de pôr em prática o sistema de esticamento da fibra concebido para o propósito. Este permitiria manipular a variação do comprimento de onda, com o objetivo de enquadrá-la na gama de deformações para a qual o sensor fora previamente calibrado. No entanto, este cenário não se verificou, uma vez que o sensor se manteve fixo num dado valor, até ser alvo de pressões inculidas pelas faces do Cubo, tornando o sistema referido anteriormente totalmente obsoleto neste cenário em particular. Este último serviu apenas como sistema de fixação da fibra e de auxílio ao processo de instalação da mesma.

Posteriormente, aliviou-se o grau de compactação da amostra de solo inicial (Amostra 1) ao retirar uma porção de solo desta, dando assim origem a uma nova amostra (Amostra 2), com o intuito de avaliar o comportamento atípico que a fibra demonstrou inicialmente. Assim dispõe-se de um conjunto de resultados pertencentes a duas amostras de solo, a amostra inicial (Amostra 1) com um peso total de 24359.0 gf e um peso volúmico de 15.293 kN/m³ e uma segunda (Amostra 2) com um peso equivalente a 23986 gf e o respetivo peso volúmico igual a 15.059 kN/m³.

É de notar que a todos os cálculos inerentes à conversão das variações do comprimento de onda registados para deformação, em mm, é imperativo o conhecimento da sensibilidade do sensor à deformação determinado quando a sua devida calibração, Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Características intrínsecas do sensor de Bragg utilizado

λ_B (nm)	sI (pm/ μ m)	sT (pm/ °C)
1554	7.6	9.6

Acrescenta-se que as medições dos BE focam-se exclusivamente nos registos provenientes das ondas de corte (S), que se processa a baixa frequências, impondo para cada escalão de carga/ descarga 4 frequências distintas, nomeadamente 1, 2, 6 e 8 kHz. A fim de obter valores dos módulos de distorção inicial, de cada escalão, e comparar os mesmos com os aqueles oriundos da deformação do sensor de Bragg.

Note-se ainda a impossibilidade de aplicar os potenciômetros no referido ensaio, cuja função assenta na medição do deslocamento de cada pistão incorporado em todas as faces do Cubo, pelo que não se pôde realizar a comparação entre estes e os movimentos registados pelo sensor ótico. Trata-se de um condicionalismo bastante nefasto ao cumprimento do objetivo de avaliar e validar o desempenho da fibra ótica como elemento sensorial neste cenário.

4.2.1. AMOSTRA 1

De seguida apresentam-se os resultados obtidos de três ensaios realizados sobre a Amostra 1, observando um comportamento da fibra contrário ao idealizado. Em cada ensaio considerou-se, no primeiro estado de tensão imposto, a variação do comprimento de onda de Bragg como sendo o "zero",

subtraindo este valor aos consequentes correspondentes a diferentes tensões a fim de estipular a extensão relativa àquele incremento. Dado o comportamento atípico do sensor não foram consideradas as medições dos BE nesta amostra.

4.2.1.1. Ensaio 1.1

Nesta primeira abordagem incutiu-se uma pressão de 50 kPa nas direções X e Z, e em Y uma tensão inicial de igual valor, linha sombreada (Tabela 4.4), o valor do comprimento de onda associado a este estado constitui o ponto de referência para as medições subsequentes.

O esperado ao manter as tensões envolventes à fibra constantes, direções X e Z, e ao comprimir na direção Y seria um decréscimo na variação do comprimento de onda e ao descomprimir um acréscimo desta mesma variação. Contudo, tal não se verificou sob estas condições mas sim o oposto, conforme se pode observar na Tabela 4.4. Verificou-se todavia a permanência da linearidade associada à deformação da fibra (Figura 4.7).

Tabela 4.4 – E1.1: Medições

σ (kPa)		$\Delta\lambda_B$ (nm)	$\Delta\lambda_B$ (nm) corrigido	Δl (mm)	$\Delta\epsilon$	E_{sec} (MPa)
X e Z	Y					
	50	1.415	0.0000	0.0000	0.00E+00	----
	100	1.800	0.3850	0.0507	4.92E-04	101.662
	120	1.928	0.5130	0.0675	6.55E-04	106.815
50	150	2.170	0.7550	0.0993	9.64E-04	103.682
	100	2.025	0.6100	0.0803	7.79E-04	64.164
	40	1.592	0.1770	0.0233	2.26E-04	44.226
	30	1.480	0.0650	0.0086	8.30E-05	240.862

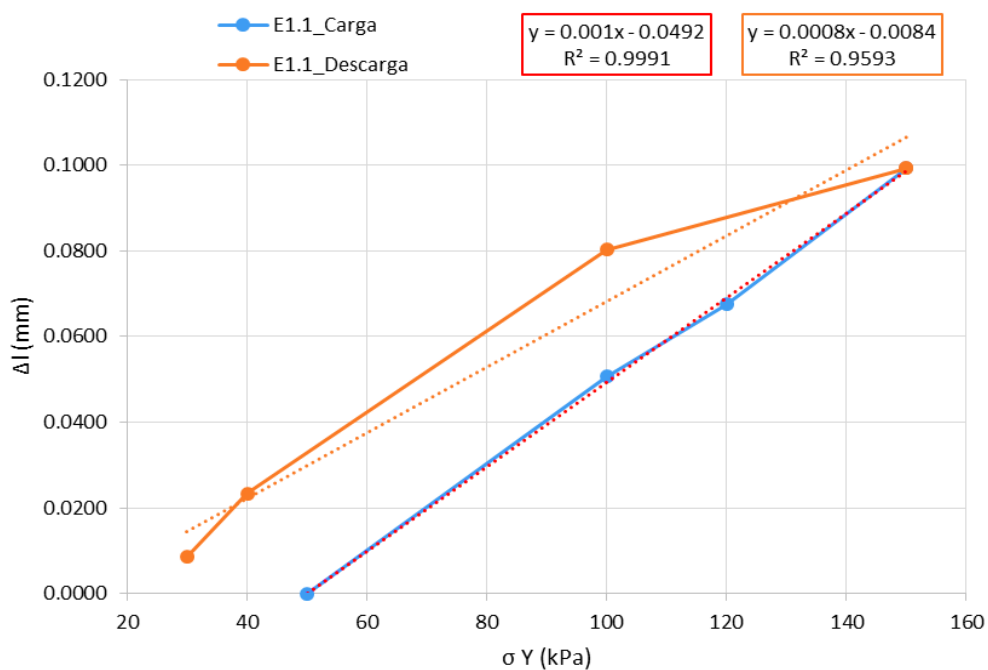


Figura 4.7 – E1.1: Deformação do sensor FBG, carga e descarga

4.2.1.2. Ensaio 1.2

Este segundo ensaio processou-se de forma similar ao anterior, pelo que se incutiu maior tensão na direção Y diminuindo as envolventes à fibra e mantendo-as constantes. Desta vez tirou-se proveito das medições dos BE instalados na direção Y.

Tabela 4.5 – E1.2: Medições

σ (kPa)		$\Delta\lambda_B$ (nm)	$\Delta\lambda_B$ (nm) corrigido	Δl (mm)	$\Delta\epsilon$	E_{sec} (MPa)	Y - BE
X e Z	Y						E_0 (MPa)
	30	1.441	0.0000	0.0000	0.00E+00	----	173.130
	50	1.524	0.0830	0.0109	1.06E-04	188.627	174.680
	75	1.662	0.2210	0.0291	2.82E-04	159.394	182.084
	100	1.825	0.3840	0.0505	4.91E-04	142.698	188.911
	125	2.052	0.6110	0.0804	7.81E-04	121.712	192.470
30	150	2.246	0.8050	0.1059	1.03E-03	116.691	194.2869
	175	2.415	0.9740	0.1282	1.24E-03	116.536	203.7707
	200	2.523	1.0820	0.1424	1.38E-03	122.991	203.7707
	150	2.508	1.0670	0.1404	1.36E-03	36.682	207.7595
	100	2.399	0.9580	0.1261	1.22E-03	40.856	199.8956
	50	2.04	0.5990	0.0788	7.65E-04	65.342	199.142

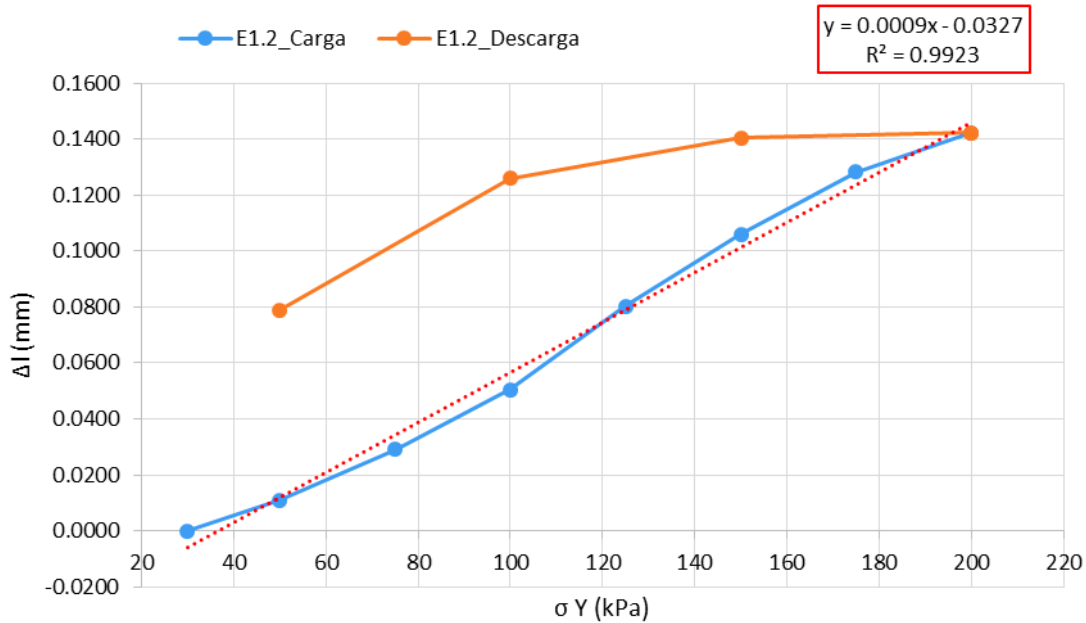


Figura 4.8 - E1.2: Deformação do sensor FBG, carga e descarga

O comportamento inverso do sensor ótico manteve-se e os próprios módulos de deformabilidade estipuladas pelas deformações experimentas pela fibra não se revelaram representativos da amostra.

4.2.1.3. Ensaio 1.3

Neste ensaio assumiu-se uma metodologia inversa à assumida nos dois anteriores, aumentar a pressão nas direções X e Z, mantendo a tensão constante em Y. O aumento da pressão envolvente à fibra induziu uma diminuição do comprimento de onda, como se pode verificar na Tabela 4.6 e demonstrou um comportamento fora da linearidade (Figura 4.9) para tensões superiores a 200 kPa.

Tabela 4.6 - E1.3: Medições

σ (kPa)		$\Delta\lambda_B$ (nm)	$\Delta\lambda_B$ (nm) corrigido	Δl (mm)	$\Delta\epsilon$	E_{sec} (MPa)	Z - BE
Y	X e Z						E_0 (MPa)
50	50	1.979	0.0000	0.0000	0.00E+00	-----	236.794
	100	1.929	0.0500	0.0066	6.39E-05	782.800	238.776
	150	1.897	0.0820	0.0108	1.05E-04	954.634	242.816
	200	1.851	0.1280	0.0168	1.64E-04	917.344	244.874
	250	1.754	0.2250	0.0296	2.87E-04	695.822	246.959
	300	1.607	0.3720	0.0489	4.75E-04	526.075	249.6028
	350	1.422	0.5570	0.0733	7.12E-04	421.616	263.4798
	400	1.162	0.8170	0.1075	1.04E-03	335.349	268.1656

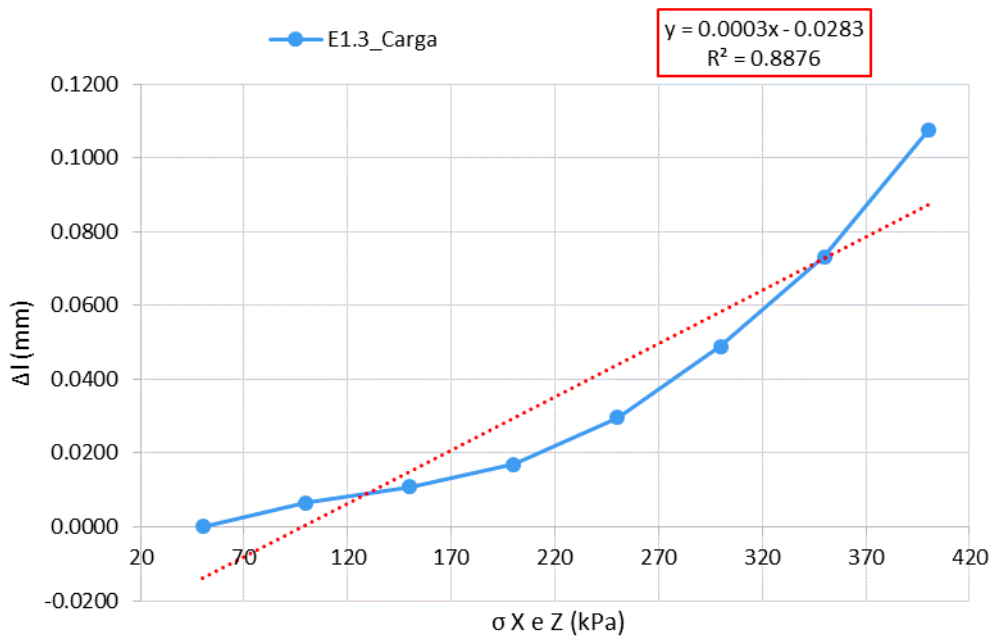


Figura 4.9 - E1.3: Deformação do sensor FBG, carga

Uma das explicações possíveis associada à resposta anormal do sensor de Bragg encontra-se relacionada com o elevado grau de compactação conferida à amostra, com a atenuante do sensor se localizar no cerne da amostra, ao incrementar as tensões em Y parte destas são distribuídas por toda amostra podendo

incrementar pressões na região envolvente ao sensor de Bragg, Figura 4.10, e deste modo obrigar a que o mesmo seja tracionada (efeito ilustrado com setas a vermelho na Figura 4.10) e como consequência disto aumentar a variação do seu comprimento de onda.

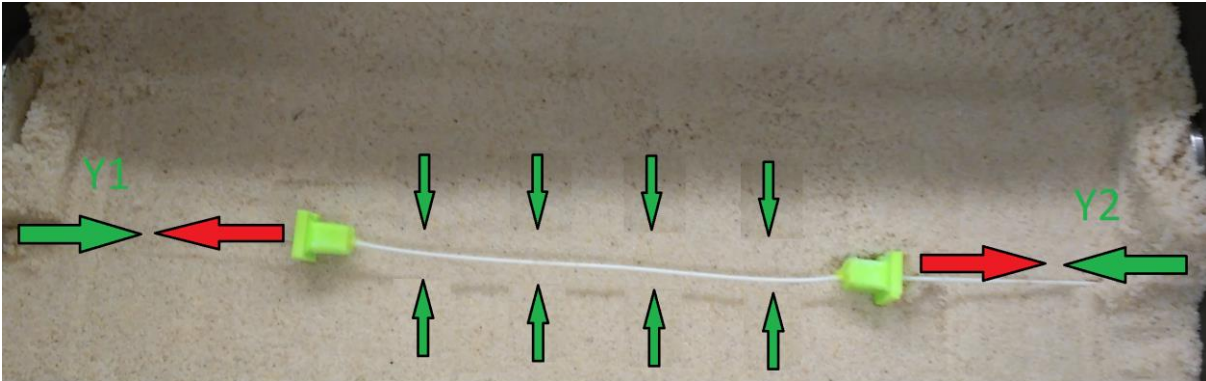


Figura 4.10 – Cenário hipotético justificativo do comportamento atípico do sensor FBG

Como forma de validar esta hipótese, decidiu-se abrir o cubo pela placa de topo (Z2), de modo a retirar algum material e reduzir o efeito de compressão excessiva. Para tal, foram removidos 373 g de solo, correspondendo a cerca de 1 cm de altura da amostra inicial.

4.2.2. AMOSTRA 2

Como já foi referido, a Amostra 2 resultou da remoção de uma porção de solo através da desmontagem do conjunto de placas Z2, visando assegurar um comportamento adequado e expectável do sensor de Bragg. O que felizmente se verificou após a realização de um pequeno teste, efetivamente, sobre as novas condições criadas, a variação de comprimento de onda de Bragg diminuía aquando a imposição de compressões em Y.

Com a exceção do primeiro ensaio (2.1), todos os outros foram realizados com uma pressão constante nas direções (X e Z) perpendiculares ao eixo da fibra, variando-se apenas a tensão na direção Y, em carga ou em descarga.

4.2.2.1. Ensaio 2.1

Como se procedeu a um alívio de carga com a desmontagem da face do topo do Cubo, o sensor de Bragg relaxou pelo que a variação do respetivo comprimento de onda reduziu significativamente. Como já foi referido o sistema de esticamento revelou-se infrutífero face ao cumprimento da sua função, desta forma teve que se depender do controlo das pressões impostas nas direções X e Z a fim de situar a variação do comprimento de onda na gama estipulada durante a caracterização do sensor FBG à deformação. A Tabela 4.7 é um reflexo desse procedimento, conseguindo-se aumentar esta variação perto de 1 nm. A título de curiosidade realizaram-se os cálculos convencionais de deformação experimentada pela fibra. Nas Figuras 4.11 e 4.12 revela-se a deformação em função da tensão aplicada.

Tabela 4.7 - E2.1: Medições

Y	σ (kPa)	$\Delta\lambda_B$ (nm)	$\Delta\lambda_B$ (nm) corrigido	Δl (mm)	$\Delta\varepsilon$	E_{sec} (MPa)	Z - BE
	X e Z						E_0 (MPa)
20	10	0.243	0.0000	0.0000	0.00E+00	----	83.733
	20	0.344	0.1010	0.0133	1.29E-04	77.505	98.318
	30	0.471	0.2280	0.0300	2.91E-04	68.667	110.018
	40	0.737	0.4940	0.0650	6.31E-04	47.538	146.676
	50	0.993	0.7500	0.0987	9.58E-04	41.749	155.084

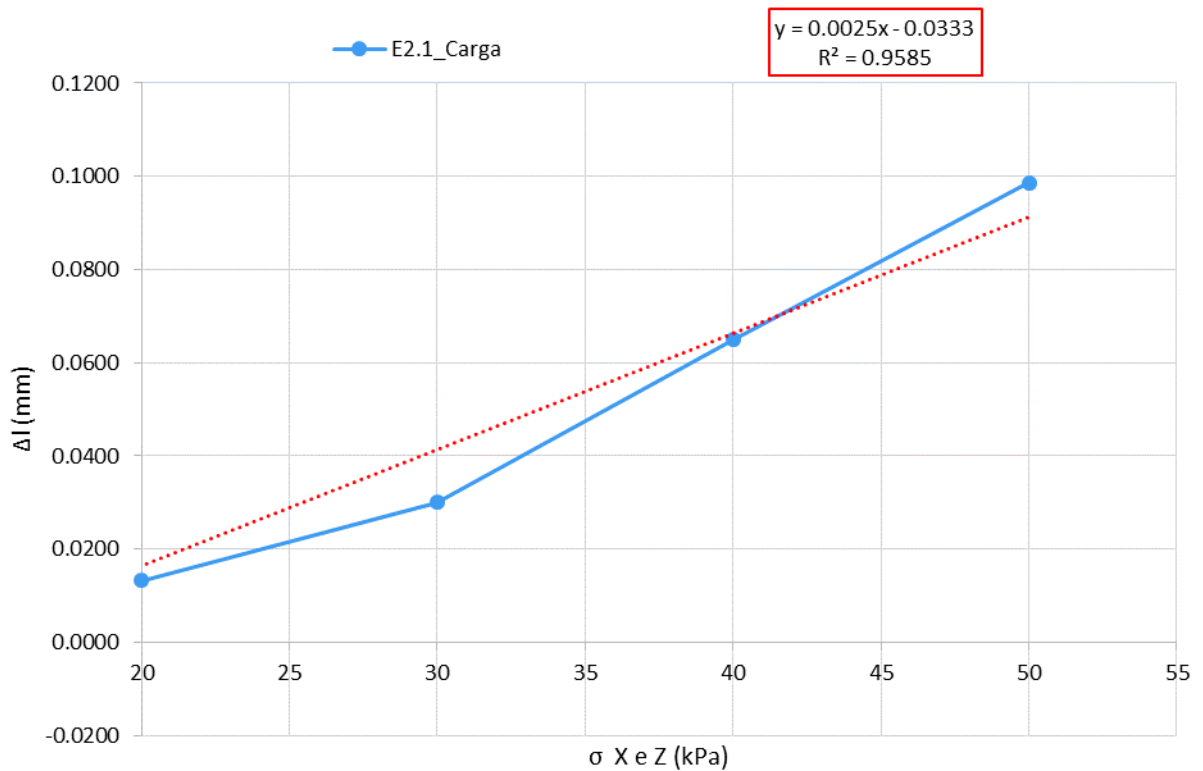


Figura 4.11 – E2.1: Deformação do sensor FBG

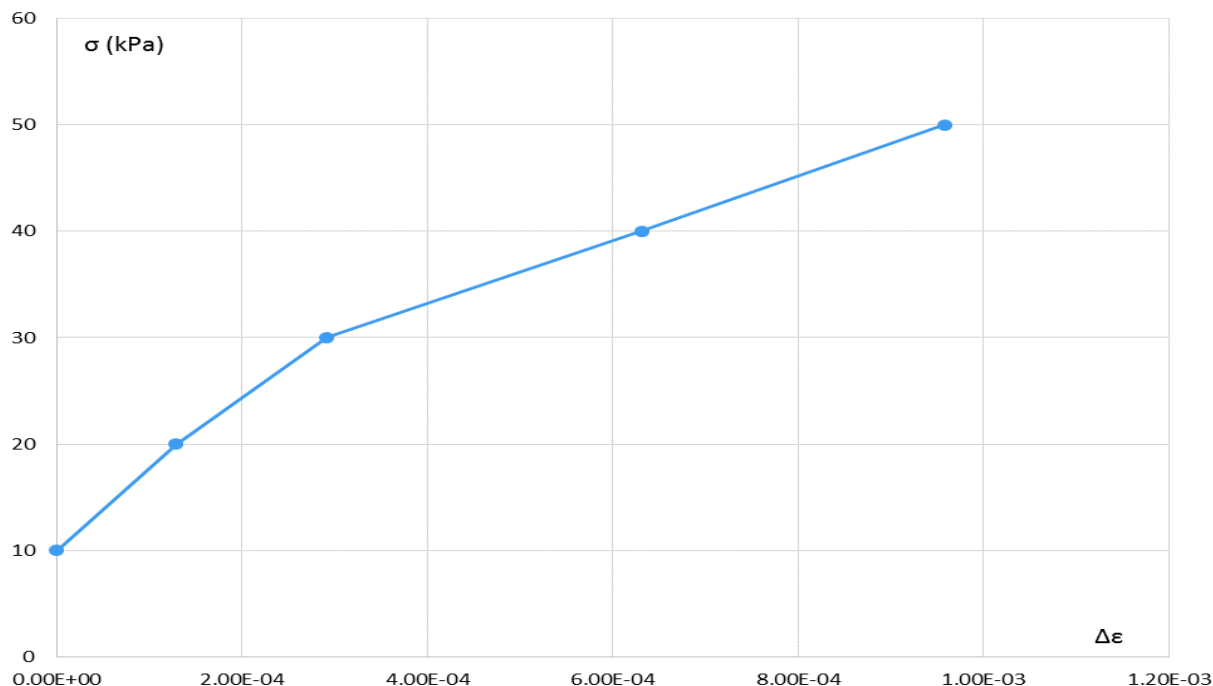


Figura 4.12 – E2.1: Curva de deformação em função da tensão aplicada

4.2.2.2. Ensaio 2.2

Nesta experiência procedeu-se à compressão e descompressão na direção Y com incrementos ligeiros de 5 kPa. Apresentam-se inicialmente os percursos de deformação, de carga (ensaio 2.2.1 – Tabela 4.8) e descarga (ensaio 2.2.2 – Tabela 4.9), individualmente para melhor aferir o desempenho do sensor.

Tabela 4.8 - E2.2.1: Medições

E2.2.1							
σ (kPa)		$\Delta\lambda B$ (nm)	$\Delta\lambda B$ (nm) corrigido	Δl (mm)	$\Delta\epsilon$	E_{sec} (MPa)	Y - BE
X e Z	Y						E_0 (MPa)
	25	0.976	0.000	0.00000	0.00E+00	----	92.317
	30	0.931	0.045	0.00592	5.75E-05	86.978	95.413
	35	0.879	0.097	0.01276	1.24E-04	80.701	97.155
	40	0.825	0.151	0.01987	1.93E-04	77.762	100.930
	45	0.752	0.224	0.02947	2.86E-04	69.893	104.474
	50	0.673	0.303	0.03987	3.87E-04	64.587	110.808
50	55	0.612	0.364	0.04789	4.65E-04	64.516	112.991
	60	0.547	0.429	0.05645	5.48E-04	63.865	117.348
	65	0.470	0.506	0.06658	6.46E-04	61.881	119.358
	70	0.402	0.574	0.07553	7.33E-04	61.369	124.402
	75	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04	61.930	127.640
	80	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04	68.123	130.042
	85	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04	74.316	----

Através do incremento de carga constatou-se que a partir de certa tensão as medições do sensor de Bragg permaneciam fixas num dado valor, o que significa que a fibra, nestas condições, se encontra completamente imóvel. Como esta se localiza no cerne da amostra, uma explicação que fundamenta este acontecimento assenta no facto do núcleo da amostra se revelar incompressível, neste tipo de cenário, sem quaisquer movimentos das partículas constituintes do mesmo. Na Tabela 4.8, nas linhas assinaladas a laranja, e na Figura 4.13, pontos a vermelho, evidencia-se este acontecimento. Posto isto, descarta-se estes pontos a fim de traçar a linha de tendência presente na Figura 4.14.

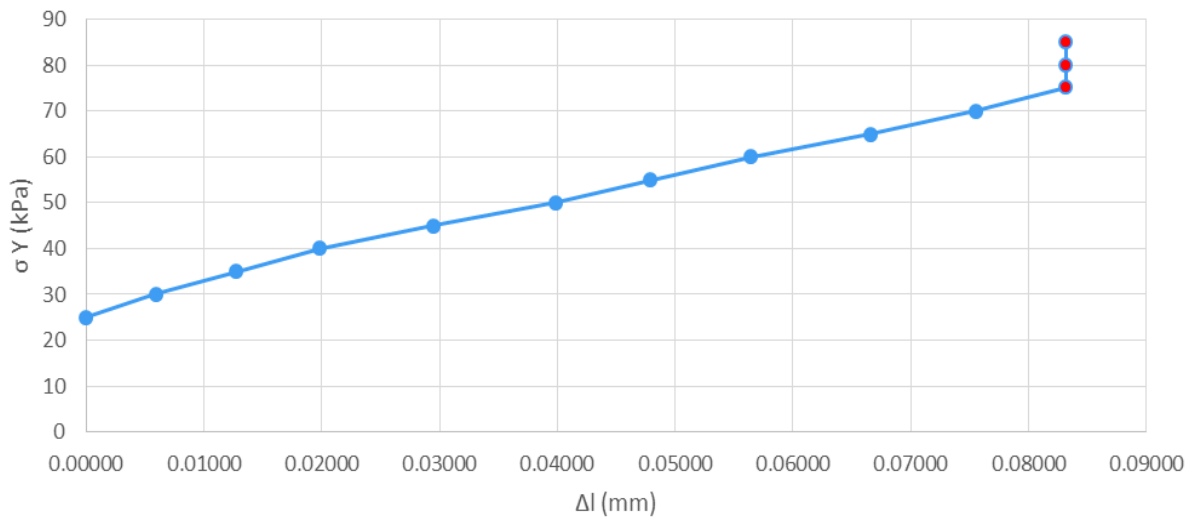


Figura 4.13 - E2.2.1: Deformação do sensor FBG, carga

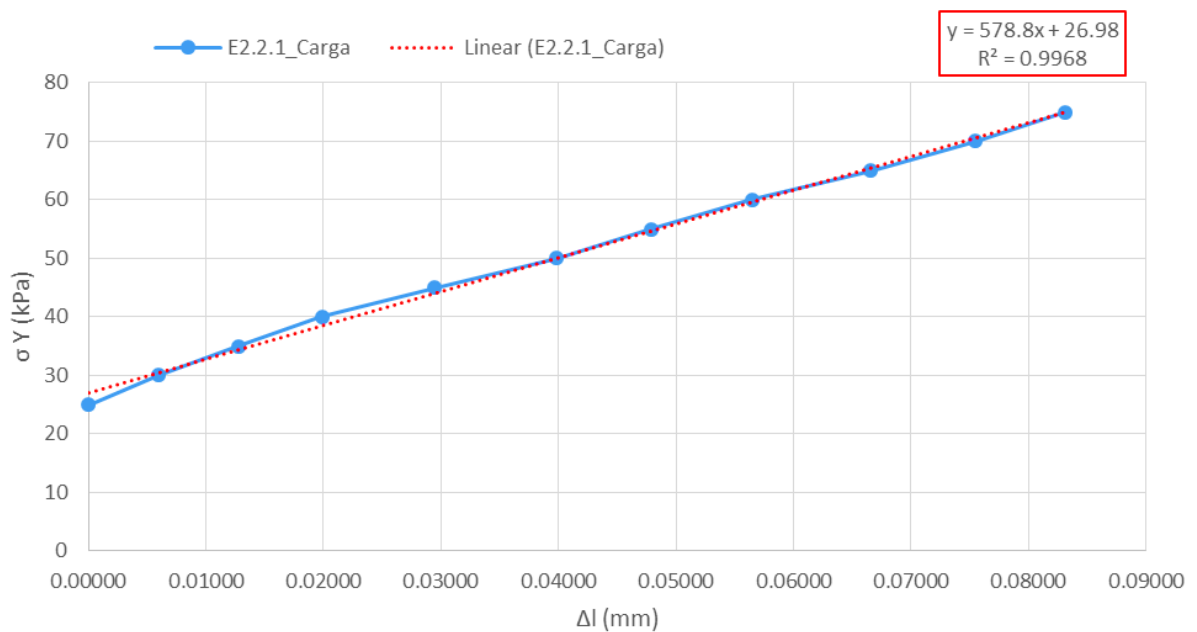


Figura 4.14 - E2.2.1: Deformação do sensor FBG com exclusão de pontos, carga

Pela análise da Figura 4.14 nota-se que a regressão linear se aproxima da unidade o que demonstra um comportamento linear quase perfeito por parte do sensor de Bragg e valida o seu correto funcionamento.

No caso da descompressão em Y, constata-se que o sensor continua bloqueado dado o registo de valores inalterado nos escalões de carga 80, 70, 60 50 kPa, linhas assinaladas a laranja na Tabela 4.9. Este comportamento pode ser justificado tendo em conta a história de tensões de compressão a que a amostra foi alvo.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 é evidente a imobilidade do sensor face as tensões já referidas, pelo que o módulo de deformabilidade tangente só é calculado abaixo destas. Este módulo foi considerado, nas trajetórias de descarga, com o intuito de obter valores comparáveis com aqueles medidos pelos BE. Como se pode constatar, pela leitura das duas colunas à direita da Tabela 4.9, ambos decrescem à medida que se processa a descompressão e aproximam-se uns dos outros de forma satisfatória, principalmente nos primeiros patamares da trajetória de descarga, revelando nestes um comportamento elástico do solo.

Tabela 4.9 - E2.2.2: Medições

E2.2.2								
σ (kPa)		$\Delta\lambda B$ (nm)	$\Delta\lambda B$ (nm) corrigido	Δl (mm)	$\Delta\epsilon$	E_{sec} (MPa)	Y - BE	E_{tan} (MPa)
Xe Z	Y						E_0 (MPa)	
	80	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04	----	----	----
	70	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04	12.386	----	----
	60	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04	24.772	----	----
	50	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04	37.158	----	----
	40	0.384	0.592	0.07789	7.56E-04	52.892	115.414	195.700
	35	0.419	0.557	0.07329	7.12E-04	63.242	113.675	111.829
	30	0.474	0.502	0.06605	6.41E-04	77.968	108.390	71.164
	25	0.544	0.432	0.05684	5.52E-04	99.662	106.271	55.914
	20	0.652	0.324	0.04263	4.14E-04	144.963	99.226	36.241
	15	0.823	0.153	0.02013	1.95E-04	332.562	93.461	22.889
	10	1.116	-0.140	-0.0184	-1.79E-04	-391.400	86.447	13.358
	5	1.523	-0.547	-0.0719	-6.99E-04	-107.331	78.786	9.617

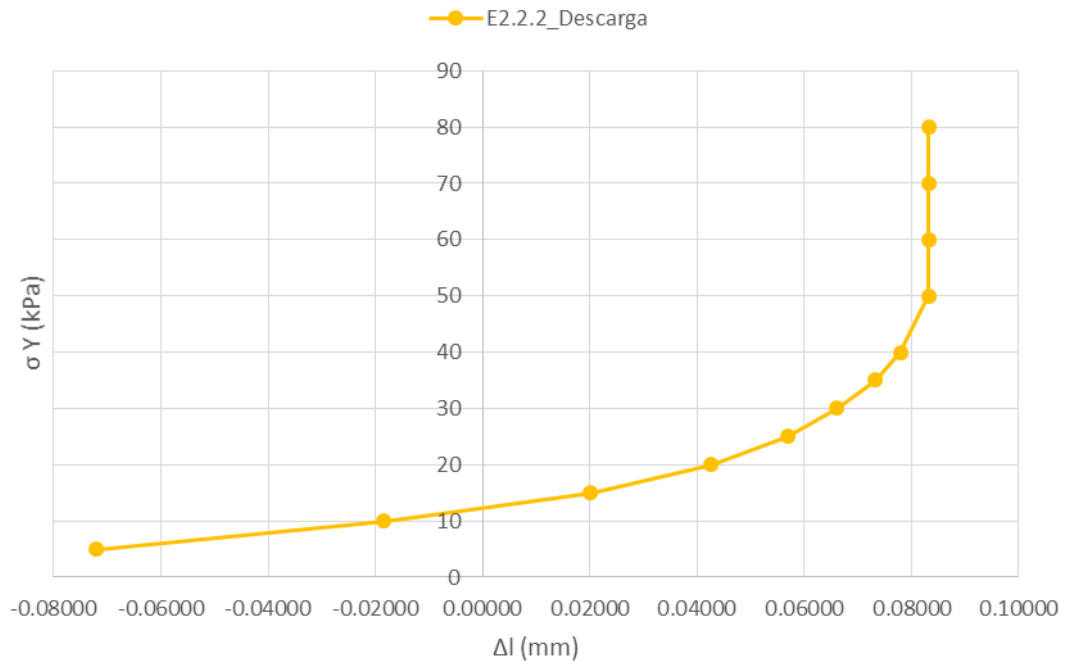


Figura 4.15 - E2.2.2: Deformação do sensor FBG, descarga

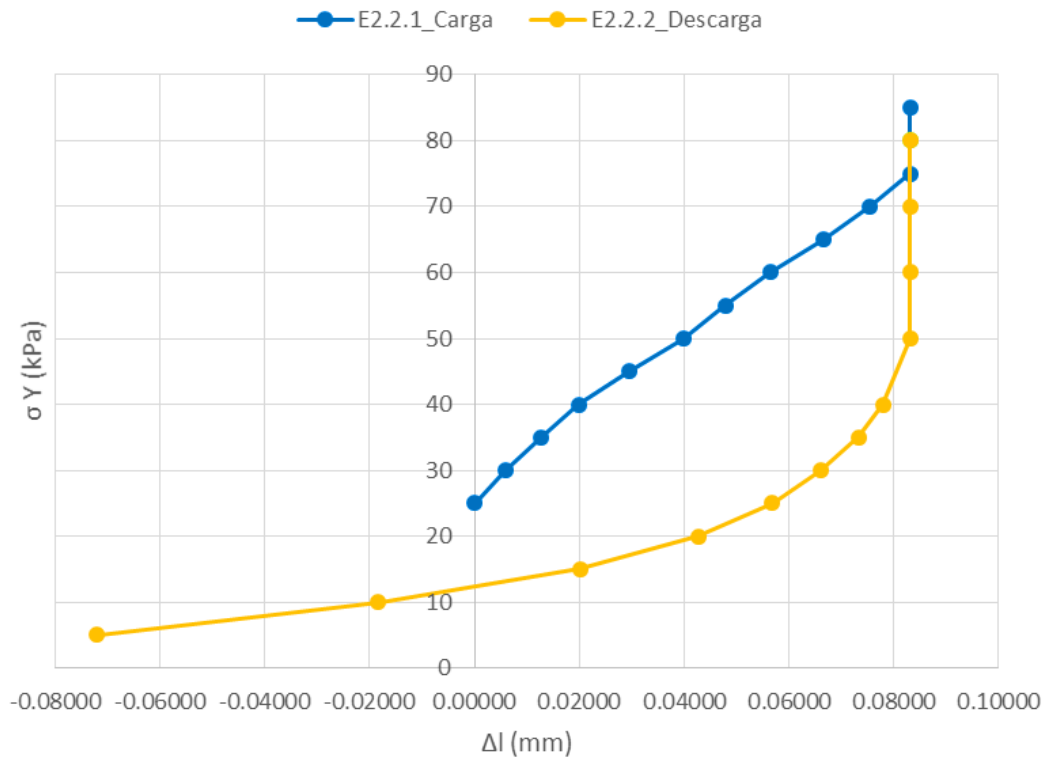


Figura 4.16 - E2.2.1: Deformação do sensor FBG, carga e descarga

Na Figura 4.17 é evidente o comportamento elástico do solo aquando o carregamento e a aquisição de alguma plasticidade por parte do mesmo no percurso de descarga.

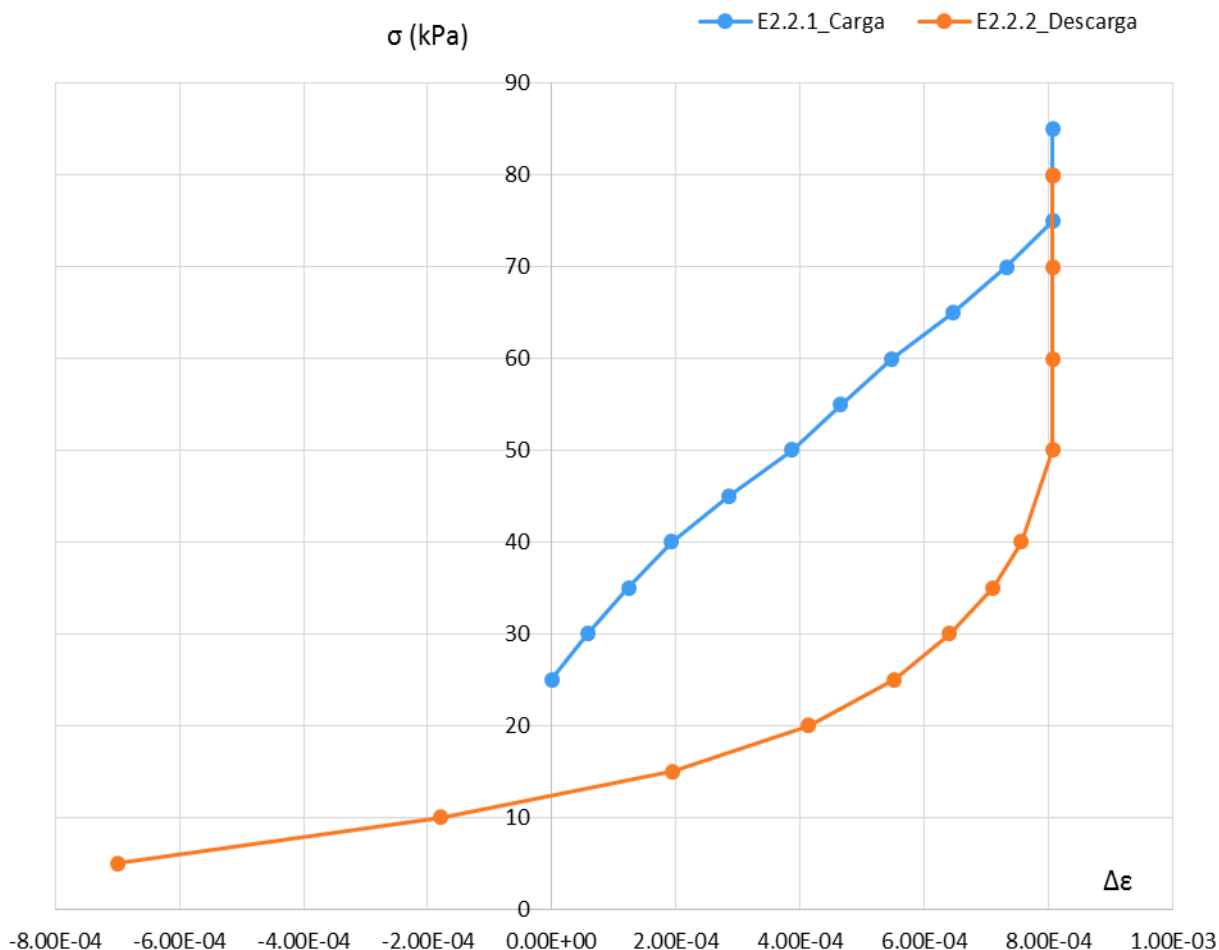


Figura 4.17 - E2.2: Curva de deformação em função da tensão aplicada

Nos ensaios seguintes seguem-se procedimentos idênticos ao deste, consistindo em ciclos de carga e descarga. O comportamento do solo medido pelo sensor de Bragg manteve-se similar ao observado neste exemplo, podendo-se aplicar os mesmos comentários tecidos sobre o ensaio 2.2.

Por fim, aglutina-se na secção 4.3 toda a informação adquirida incidentes na Amostra 2 de modo a revelar o histórico de tensões que esta sofreu ao longo de todos os ensaios (Figura 4.22).

4.2.2.3. Ensaio 2.3

No ensaio 2.3 procedeu-se de modo idêntico ao ensaio 2.2.1, com a diferença de o incremento de carga ter sido realizado por escalões de 10 kPa, conforme se mostra na Tabela 4.10. Neste caso verificou-se de novo a estagnação do sensor para tensões superiores a 80 kPa. Os resultados de deformação do sensor presente na Figura 4.18 são equiparáveis aos registados no ensaio 2.2.1 e exclui o último registo, linha assinalada a laranja na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - E2.3: Medições

E2.3							
σ (kPa)		$\Delta\lambda_B$ (nm)	$\Delta\lambda_B$ (nm) corrigido	Δl (mm)	$\Delta\epsilon$	E_{sec} (MPa)	Y - BE
Xe Z	Y						E_0 (MPa)
	10	1.477	0.000	0.00000	0.00E+00	----	82.060
	20	1.330	0.147	0.01934	1.88E-04	53.252	89.730
	30	1.181	0.296	0.03895	3.78E-04	52.892	95.944
	40	1.005	0.472	0.06211	6.03E-04	49.754	102.091
50	50	0.821	0.656	0.08632	8.38E-04	47.732	108.048
	60	0.638	0.839	0.11039	1.07E-03	46.651	114.540
	70	0.452	1.025	0.13487	1.31E-03	45.822	122.594
	80	0.344	1.133	0.14908	1.45E-03	48.364	127.963
	85	0.344	1.133	0.14908	1.45E-03	51.818	----

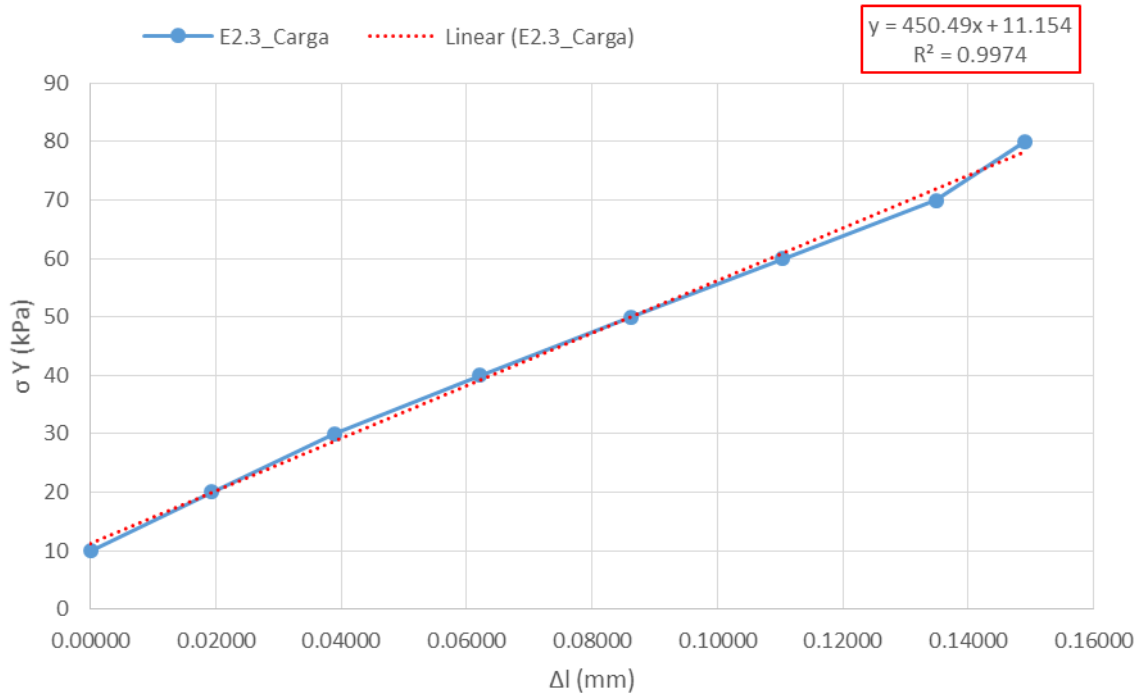


Figura 4.18 - E2.3: Deformação do sensor FBG, carga

4.2.2.4. Ensaio 2.4

Este ensaio consiste em duas etapas, numa descompressão (E2.4.1) e numa consequente compressão (2.4.2). Na Tabela 4.11 encontram-se os resultados do percurso de descarga, note-se que se descartou os registos das tensões superiores a 50 kPa dada a estagnação do sensor no registo $\Delta\lambda_B = 0.344$ nm, linha assinalada a laranja na Tabela 4.10. Assim a curva da Figura 4.19 reflete exclusivamente o comportamento do solo aquando a descarga (em Y) incorporando somente os valores considerados válidos, presentes na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - E2.4.1: Medições

E2.4.1		$\Delta\lambda_B$ (nm)	$\Delta\lambda_B$ (nm) corrigido	Δl (mm)	$\Delta\epsilon$	E_{sec} (MPa)	Y - BE E_0 (MPa)	E_{tan} (MPa)
σ (kPa)	X e Z Y							
	50	0.393	1.084	0.14263	1.38E-03	----	116.339	----
	45	0.425	1.052	0.13842	1.34E-03	3.721	114.929	122.313
	40	0.458	1.019	0.13408	1.30E-03	7.682	112.182	118.606
	35	0.500	0.977	0.12855	1.25E-03	12.018	108.244	93.190
50	30	0.556	0.921	0.12118	1.18E-03	16.999	104.509	69.893
	25	0.625	0.852	0.11211	1.09E-03	22.969	99.260	56.725
	20	0.712	0.765	0.10066	9.77E-04	30.698	97.053	44.989
	15	0.835	0.642	0.08447	8.20E-04	42.676	89.882	31.821
	10	1.013	0.464	0.06105	5.93E-04	67.483	82.618	21.989
	0	1.594	-0.117	-0.0153	-1.49E-04	-334.530	66.026	13.473

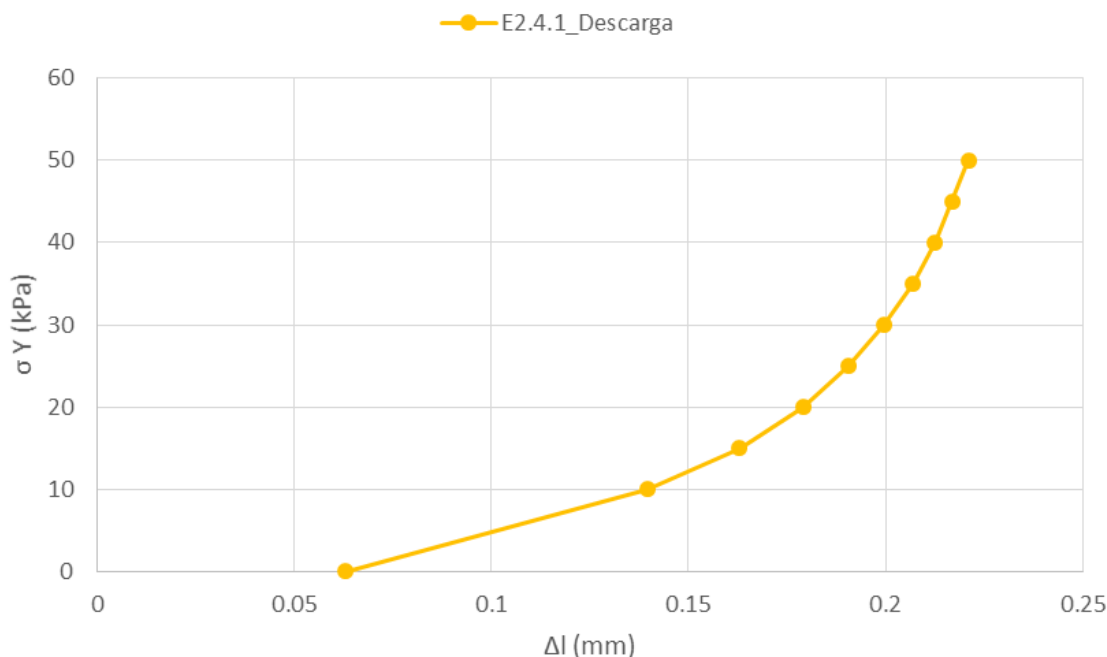


Figura 4.19 - E2.1: Deformação do sensor FBG, descarga

Neste caso de descarga confirma-se, mais uma vez, a utilidade do módulo de deformabilidade tangente para efeitos comparativos. Na Tabela 4.11 é notório este facto nos escalões de carga 45, 40 e 30 kPa.

O ensaio 2.4.2, apresentado nas Tabela 4.12 e Figura 4.20, é em tudo similar ao ensaio 2.3, com compressão em Y em incrementos equivalentes a 10 kPa. Mais uma vez, o sensor ótico foi capaz de traduzir o comportamento elástico do solo aquando da carga.

Tabela 4.12 - E2.4.2: Medições

E2.4.2							
σ (kPa)		$\Delta\lambda B$ (nm)	$\Delta\lambda B$ (nm) corrigido	Δl (mm)	$\Delta\varepsilon$	E_{sec} (MPa)	Y - BE
Xe Z	Y						E_0 (MPa)
	0	2.073	0.000	0.00000	0.00E+00		59.284
	10	1.800	0.273	0.03592	3.49E-04	28.674	67.891
	20	1.488	0.585	0.07697	7.47E-04	26.762	76.961
50	30	1.092	0.981	0.12908	1.25E-03	23.939	86.135
	40	0.811	1.262	0.16605	1.61E-03	24.811	92.348
	50	0.560	1.513	0.19908	1.93E-03	25.869	98.701
	60	0.367	1.706	0.22447	2.18E-03	27.531	105.732

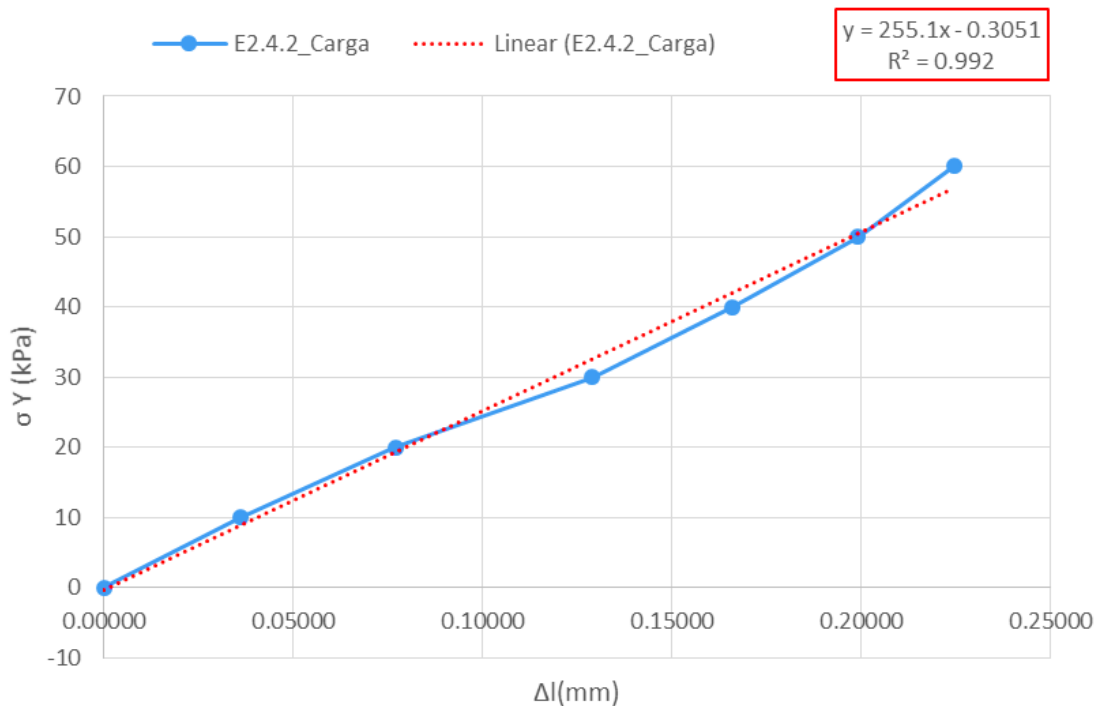


Figura 4.20 - E2.4.2: Deformação do sensor FBG, carga

A Figura 4.21 engloba as curvas tensão-deformação relativas aos ensaios 2.4.1 e 2.4.2 e caracteriza o comportamento do solo que vai de encontro ao teoricamente expectável.

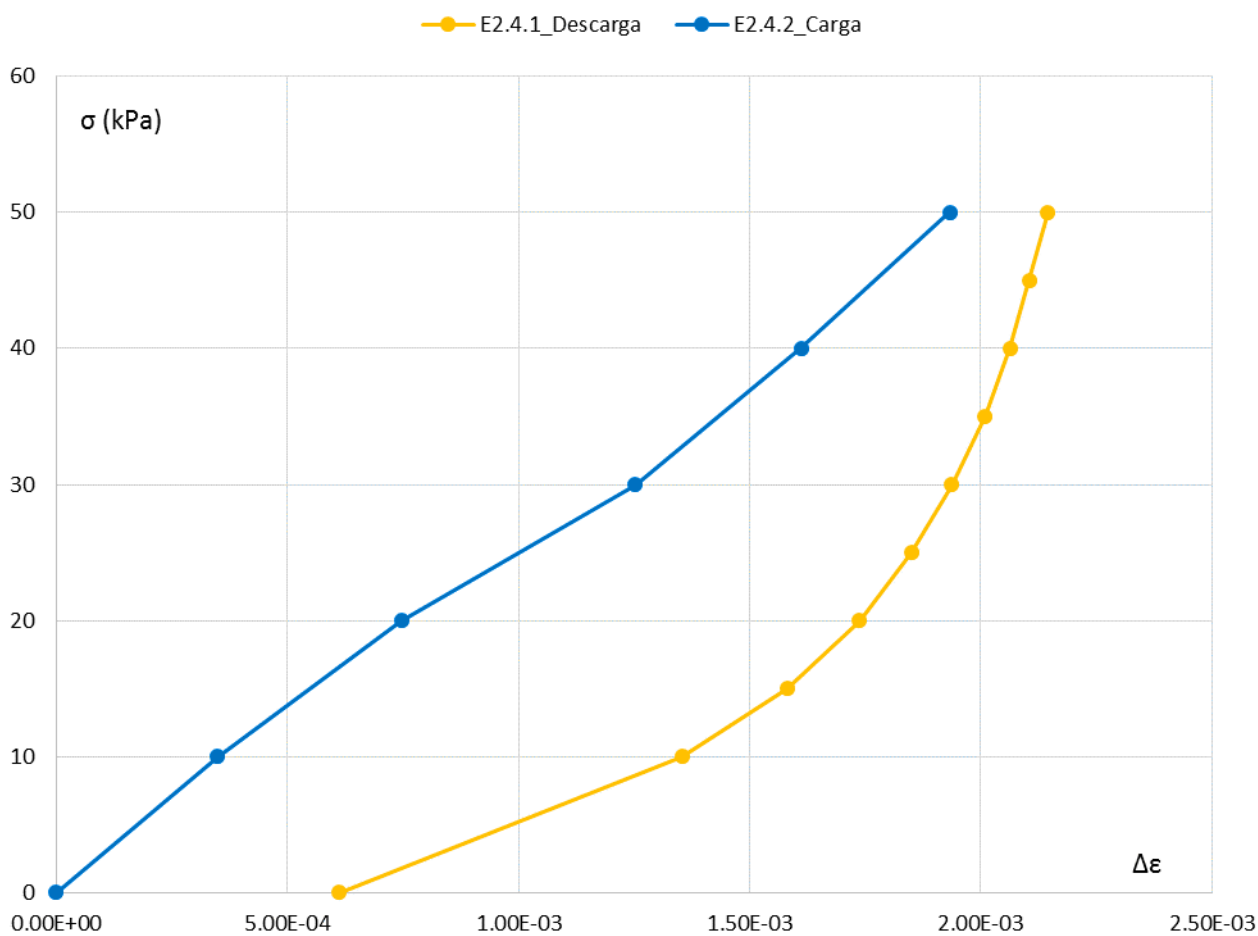


Figura 4.21 - E2.4: Curva de deformação em função da tensão aplicada

4.3. ANÁLISE GLOBAL DE RESULTADOS

4.3.1. COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO

Resumem-se nas tabelas seguintes (4.14 e 4.15) os resultados obtidos nos diversos ensaios sobre a Amostra 2, analisados globalmente, isto é, considerando as deformações cumulativas desde o ensaio E2.2.1. Na Tabela 4.13 indica-se o estado de tensão inicial (E2.2.1) assim como o “zero” de referência que consiste na variação do comprimento de onda associado a este estado.

Tabela 4.13 – Ponto de referência estipulado para a análise global

Direção	Tensão (kPa)	$\Delta\lambda B$ (nm)	
X e Z	50	Zero	0.976
Y	25		

Tabela 4.14 – Compilação de medições (parte 1)

	σ (kPa)		$\Delta\lambda B$ (nm)	$\Delta\lambda B$ (nm) corrigido	Δl (mm)	$\Delta\epsilon$
	X e Z	Y				
E2.2.1	50	25	0.976	0.000	0.00000	0.00E+00
		30	0.931	0.045	0.00592	5.75E-05
		35	0.879	0.097	0.01276	1.24E-04
		40	0.825	0.151	0.01987	1.93E-04
		45	0.752	0.224	0.02947	2.86E-04
		50	0.673	0.303	0.03987	3.87E-04
		55	0.612	0.364	0.04789	4.65E-04
		60	0.547	0.429	0.05645	5.48E-04
		65	0.470	0.506	0.06658	6.46E-04
		70	0.402	0.574	0.07553	7.33E-04
		75	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04
		80	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04
85	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04		
E2.2.2	50	80	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04
		70	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04
		60	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04
		50	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04
		40	0.384	0.592	0.07789	7.56E-04
		35	0.419	0.557	0.07329	7.12E-04
		30	0.474	0.502	0.06605	6.41E-04
		25	0.544	0.432	0.05684	5.52E-04
		20	0.652	0.324	0.04263	4.14E-04
		15	0.823	0.153	0.02013	1.95E-04
		10	1.116	-0.140	-0.01842	-1.79E-04
		5	1.523	-0.547	-0.07197	-6.99E-04

Tabela 4.15 – Compilação de medições (parte 2)

	σ (kPa)		$\Delta\lambda_B$ (nm)	$\Delta\lambda_B$ (nm) corrigido	Δl (mm)	$\Delta\epsilon$
	X e Z	Y				
E2.3	50	10	1.477	-0.501	-0.06592	-6.40E-04
		20	1.330	-0.354	-0.04658	-4.52E-04
		30	1.181	-0.205	-0.02697	-2.62E-04
		40	1.005	-0.029	-0.00382	-3.70E-05
		50	0.821	0.155	0.02039	1.98E-04
		60	0.638	0.338	0.04447	4.32E-04
		70	0.452	0.524	0.06895	6.69E-04
		80	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04
		85	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04
E2.4.1	50	80	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04
		70	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04
		60	0.344	0.632	0.08316	8.07E-04
		50	0.393	0.583	0.07671	7.45E-04
		45	0.425	0.551	0.07250	7.04E-04
		40	0.458	0.518	0.06816	6.62E-04
		35	0.500	0.476	0.06263	6.08E-04
		30	0.556	0.420	0.05526	5.37E-04
		25	0.625	0.351	0.04618	4.48E-04
		20	0.712	0.264	0.03474	3.37E-04
		15	0.835	0.141	0.01855	1.80E-04
		10	1.013	-0.037	-0.00487	-4.73E-05
		0	1.594	-0.618	-0.08132	-7.89E-04
		E2.4.2	50	10	1.800	-0.824
20	1.488			-0.512	-0.06737	-6.54E-04
30	1.092			-0.116	-0.01526	-1.48E-04
40	0.811			0.165	0.02171	2.11E-04
50	0.560			0.416	0.05474	5.31E-04
60	0.367			0.609	0.08013	7.78E-04

A Figura 4.22 representa o culminar dos ensaios realizados sobre a Amostra 2, pois traduz um comportamento típico de um solo arenoso para as trajetórias de tensões aplicadas. Pode observar-se alguma elasticidade aquando da compressão e um certo grau de plasticidade, traduzido pela abertura do ciclo histerético, uma vez exposto à tração.

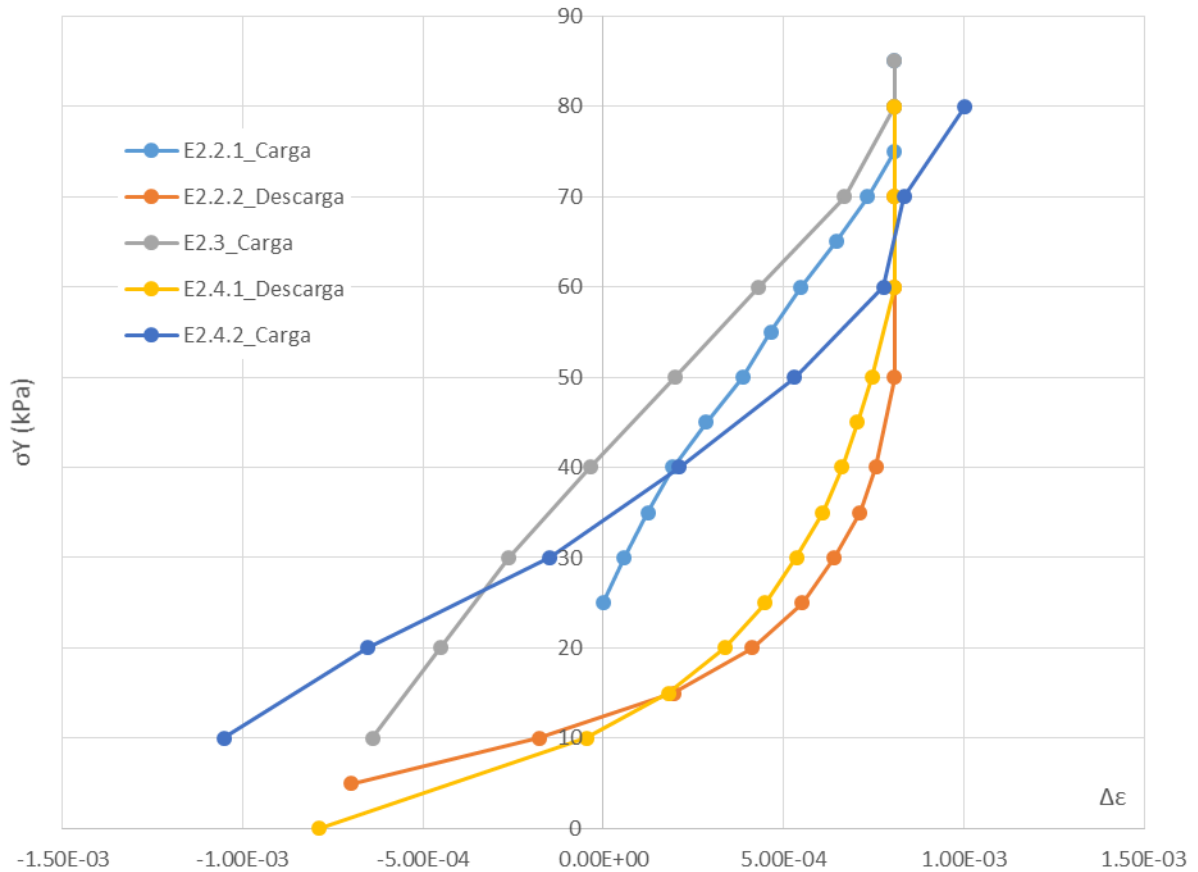


Figura 4.22 – Curva de deformação em função da tensão aplicada

4.3.2. RIGIDEZ ELÁSTICA E SECANTE

É relevante a comparação entre a rigidez elástica determinada pelos BE a partir das velocidades das ondas sísmicas e a rigidez secante, traduzida pelo respetivo módulo de deformabilidade E_{sec} , medido pelo sensor de fibra ótica. Para tal, a análise pode ser feita em termos do nível de deformação axial ou do estado de tensão, como ilustra a Figura 4.23.

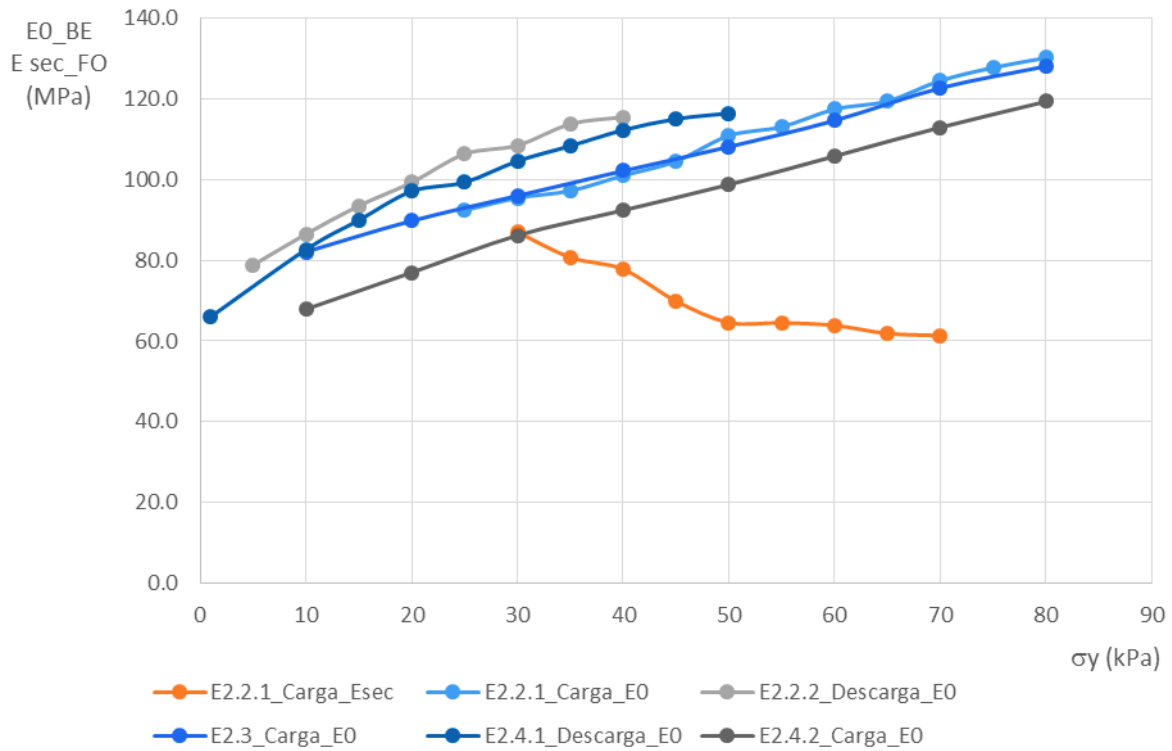


Figura 4.23 – Rigidez elástica e secante

De forma a comparar estes dois módulos de deformabilidade de natureza distinta, é habitual normalizar a rigidez secante da rigidez elástica, obtendo-se a curva de degradação da rigidez normalizada, como se mostra na Figura 4.24.

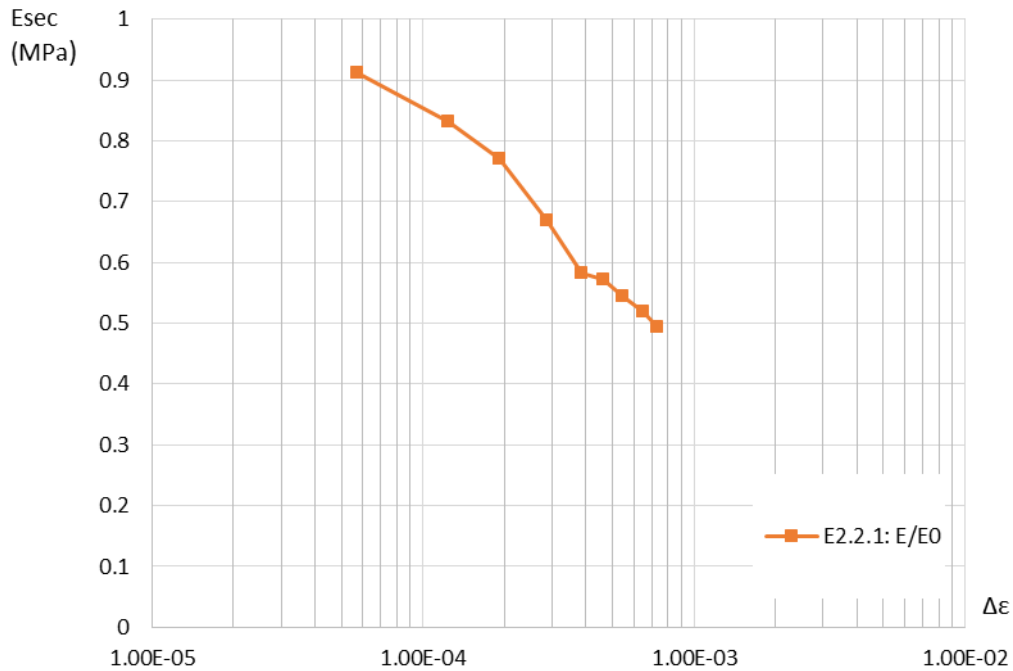


Figura 4.24 – Curva normalizada da rigidez do solo, medida no ensaio E2.2.1

Para efeitos desta abordagem, optou-se por representar apenas o primeiro ensaio da Amostra 2, correspondente à primeira carga do provete, para o qual o solo ainda não experimentou quaisquer deformações permanentes. É de notar na figura a forma em S invertido, típica do comportamento tensão-deformação dos solos, abordada na secção 2.8.

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

Os ensaios incidentes sobre a Amostra 1 foram úteis na medida em que permitiram comprovar a existência da influência de pressões envolventes à fibra. É de notar que esta se implementou diretamente no solo no seu estado mais simples sem qualquer tipo de encapsulamento. Sempre que for este o caso o estado de tensão inicial da amostra é determinante. Embora se tenha exposto uma hipótese que justifica aquele comportamento, oposto ao que se esperava, a carência de pelo menos outro sensor em qualquer das outras direções, X ou Z, ressentiu-se fortemente. A informação acrescida deste segundo sensor permitiria uma melhor compreensão da situação e a tecer conclusões mais sólidas relativas a esta ocorrência.

Ficou comprovado que a primeira amostra estava de facto demasiado comprimida, já que se conseguiu impor um correto funcionamento do sensor de Bragg descomprimindo a mesma através da remoção de uma porção de solo. Todavia o autor aconselha a incorporar um elemento de proteção, por exemplo através de uma peça metálica, na zona do sensor, onde se situa a rede Bragg, à semelhança de muitos comercializados atualmente, como no caso dos sensores embebidos (Figura 2.24 e)), de modo a mitigar o impacto de pressões envolventes à mesma e garantindo uma deformação exclusivamente longitudinal, quando for este o caso pretendido.

O sistema de esticamento da fibra desenvolvido para este equipamento revelou-se obsoleto na primeira tentativa de o pôr em prática, devido ao sistema de ancoragens acoplado à fibra. Este, uma vez embutido no solo, que por sua vez fora previamente compactado, fixou aquele segmento de fibra melhor do que o previsto. Como o acréscimo de chumbos à extremidade composta pelo fio de sedilha não induziram qualquer variação na leitura do FBG, tentou-se tracionar a mesma manualmente obtendo o mesmo resultado, ou seja, as micro-âncoras concebidas desempenharam o seu papel com máxima eficiência. Portanto retém-se a ideia de que o sistema de esticamento cumpre o propósito único de auxílio de instalação e de fixação da fibra ótica na câmara cúbica. Para além disso, pode dizer-se que o deslocamento do sensor foi completamente solidário com o do solo, funcionando efetivamente como medidor local de deformações.

A gama de deformações medidas através do sensor de Bragg constituiu um aspeto de interesse e inesperado, uma vez que foram para além do intervalo correspondente às muito pequenas deformações abrangendo a janela que enquadra pequenas deformações (Figura 2.50) onde se verifica uma degradação severa da rigidez. Atendendo a que os módulos de deformabilidade foram calculados a partir de extensões relativas, dependentes de um dado ponto de referência arbitrado e tendo em conta o atrás exposto, os parâmetros de rigidez obtidos pelo sensor ótico revelaram-se díspares daqueles medidos

pelos BE. Adianta-se que estes últimos operam apenas na gama de muito pequenas deformações, sendo que para além destas os valores deixam de ser sequer próximos.

Há que mencionar que a impossibilidade de beneficiar da medição dos potenciômetros, transdutores de deslocamento aplicados em cada face do Cubo, revelou-se uma lacuna importante relativamente à validação do desempenho da fibra ótica implementada no TTA. Tendo estes registos e podendo compará-los com os movimentos medidos pelo sensor ótico acrescentaria, no caso provável de serem equiparáveis, confiança à continuação deste projeto. Todavia, não se pode descartar o conceito apresentado de forma alguma, já que todos os registos válidos fornecidos pelo sensor ótico se encontram numa relação perfeitamente linear, o que só por si demonstra a sua eficiência quanto às medições efetuadas. Acresce ainda o facto de a enorme sensibilidade que este tipo de tecnologia oferece, já que o sensor utilizado, atendendo à sua sensibilidade à deformação ($7.6 \text{ pm}/\mu\text{m}$) e considerando a resolução do interrogador (0.1 pm) permite obter uma resolução do sensor equivalente a $0.0132 \mu\text{m}$. Pelo que se sublinha o enorme potencial de aplicação desta tecnologia no âmbito laboratorial.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

As vantagens inerentes à utilização da fibra ótica como elemento sensor são demasiado vastas para as ignorar e a urgência de inovação que esta ciência demanda tem que ser preenchida. A continuação deste projeto deve-se focar no encapsulamento do sensor ótico a fim de evitar influências de pressões envolventes que induzem erro nas medições, mas até antes deste passo, a instalação de pelo menos um segundo sensor na direção vertical seria vital. O estudo de medições provenientes de dois sensores, dispostos perpendicularmente entre si, submetidos ao mesmo estado de tensão contribuiria para uma melhor compreensão do seu comportamento e desempenho. E por fim levar a cabo o conceito teórico inicialmente idealizado que consiste na cobertura dos três eixos ortogonais do Cubo por sensores óticos de Bragg. A utilização de outros tipos de solos arenosos com diferentes curvas granulométricas e, portanto, aplicando gamas de índices de vazios diversas constituiria um bom teste, face ao sistema de ancoragem desenvolvido no presente trabalho.

Futuramente o autor crê veementemente na substituição dos meios de medição tradicionais por meios sensoriais óticos e mesmo na construção de ensaios especialmente concebidos para o uso de sensores óticos no contexto de avaliação de parâmetros de rigidez, pois estes assumem enorme relevância quanto à caracterização de maciços. Pode-se ter como inspiração a noção teórica do aparelho triaxial verdadeiro que de facto é um ensaio muito completo e competente em diversos aspetos. Pelo estudo do autor, os sensores de Bragg são os mais competentes a serem implementados num projeto do género, pois são bastante acessíveis, os parâmetros aos quais são sensíveis são de grande importância no panorama em questão, permitem alguma facilidade de interpretação e podem ser adquiridos comercialmente previamente calibrados dispostos a serem aplicados diretamente em cenários distintos. As próprias unidades de interrogação estão a tornar-se cada vez menos onerosas, dada a grande adesão destas por parte de inúmeras comunidades científicas que potenciam a sua massificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, M., Finn, E. (1981). ondas eletromagnéticas. In *Física, um curso universitário - Campos e Ondas. Vol. II*, pp. 286 – 351, Editora Edgar Blucher, Brasil.
- Amat, A. (2007). *Elastic Stiffness Moduli of Hostun Sand*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Bristol.
- António, P., Paulino, S., Araújo, L., Taborda, D. (2016). *Potenciais fontes de erro na realização e interpretação de ensaios de bender elements em amostras reconstituídas de areia*. In Atas do 15º Congresso Nacional de Geotecnia/ 8º Congresso Luso-brasileiro de Geotecnia, Junho 2016, Porto.
- Antunes, P. (2007). *Análise dinâmica de estruturas com sensores de Bragg*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- Antunes, P., Lima, H., Alberto, N., Rodrigues, H., Pinto P., Pinto, J., Nogueira R., Varum, H., Costa A., André, P. (2009) *Optical fiber accelerometer system for structural dynamic monitoring*. IEEE Sensors Journal, vol. 9, pp. 1347 – 1354.
- Antunes, P. (2011) *Sensores ópticos para monitorização dinâmica de estruturas*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.
- Bortolotti, F., Sousa, Kleiton M., Silva, J. (2012). *Packaging, characterization and calibration of fiber Bragg grating temperature sensors*. In Atas do 15º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 10º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Agosto 2012, Paraíba.
- Briançon, L., Nancey, A., Caquel, F., Villard, P. (2004). *New technology for strain measurements in soil and the survey of reinforced earth constructions*. Proceedings of EUROGEO, vol. 3, pp. 1-3.
- Chung, H., Tam, H., Wai, P., Khandelwal, A. (2005). *Time and wavelength-division multiplexing of FBG sensors using a semiconductor optical amplifier in ring cavity configuration*. In IEEE Photonics Technology Letters, vol. 17, pp. 2709-2711.
- Costa, C., Ferreira, C., Viana da Fonseca, A., Mendes, J. (2008). *Ensaio Triaxiais Verdadeiros em Provetes de Solo Residual de Granito do Porto: Concepção e Implementação do Sistema de Aquisição e Controlo Automático*, In Atas do 11º Congresso Nacional de Geotecnia, Abril 2008, Coimbra.
- Ferreira, C. (2003). *Implementação e Aplicação de Transdutores Piezoelétricos na Determinação de Velocidades de Ondas Sísmicas em Provetes. Avaliação da Qualidade de Amostragem em Solos Residuais*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ferreira, C. (2009). *The Use of Seismic Wave Velocities in the Measurement of Stiffness of a Residual Soil*. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto.
- Ferreira, C., Viana da Fonseca, A. (2010). *Caracterização do comportamento de um solo residual de granito através de ensaios triaxiais verdadeiros*. In Atas do 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Abril 2010, Guimarães.

- Fibracem (2016). Arquivos Fusão em Fibra Óptica – Fibracem, <http://www.fibracem.com/categoria-produto/equipamentos-e-ferramentas/fusao-em-fibra-optica/>, acessado em Julho 2016.
- Gwandu, L.; Zhang, L.; Chisholm, K.; Liu, Y.; Shu, X.; Bennion, I. (2001). *Compact FBG array structure for high resolution distributed strain sensing*. Measurement Science and Technology, vol. 7, pp.918 - 927.
- HBM (2016). Optical Strain Sensors FS62 | HBM, <https://www.hbm.com/en/4600/fs62-optical-strain-sensor-fibersensing/>, acessado em Julho 2016.
- HBM (2016). Products HBM FiberSensing, http://www.fibersensing.com/products#measurement-units_braggmeter-family, acessado em Julho 2016.
- Ho, Y., Huang, A., Lee, J. (2006). *Development of a fibre Bragg grating sensed ground movement monitoring system*. Measurement Science and Technology, vol. 17, pp. 1733 - 1740.
- Inaudi, D. (1997). *Fiber Optic Sensor Network for the Monitoring of Civil Engineering Structures*. Tese de Doutorado, École Polytechnique.
- Innoinstrument (2016). Catalogs innoinstrument, http://www.innoinstrument.com/eng/board_skin/board_list.asp?page=1&bbs_code=4&etc=FUSION%20SPLICER, acessado em Julho 2016.
- Innoinstrument (2016). Catalogs innoinstrument, http://www.innoinstrument.com/eng/board_skin/board_list.asp?page=1&bbs_code=4&etc=FUSION%20SPLICER, acessado em Julho 2016.
- Iten, M. (2011). *Novel applications of distributed fiber optic sensing in geotechnical engineering*. Tese de Doutorado, ETH Zürich.
- Johnson, E., Donlon, P., Braun, D., Van Hoang, L. (2005). *Athermal package for fibre Bragg gratings with two or more bonding regions*. U.S. Patent Patent 6.856.730.
- Lee, J., Chen, L., Ho, Y., Huang, A. (2011). *A Fiber Optic Sensed Triaxial Testing Device*. In Geotechnical Testing Journal, vol.34, pp. 103 -111.
- Leng, B., Hameed, A., Winter, D., Tetlow, J., Mays, G., Fernando, G. (2006). *Structural NDE of concrete structures using protected EFPI and FBG sensors*. In Sensors and Actuators a-Physical, vol. 126, pp. 340-347.
- Lo, Y., Kuo, C. (2003). *Packaging a fiber Bragg grating with metal coating for a thermal design*. In Journal of Lightwave Technology, vol. 21, pp. 1377-1383.
- Lobo, A. (1996). *Esquemas de Multiplexagem de Sensores de Fibra Ótica*. Tese de Doutorado, Universidade do Porto.
- Loke, H., Kongkitkul, W., Tatsuoka, F. (2006). *Fiber Optic Technology in Geosynthetic Instrumentation for Monitoring of Soil Structures*. In Atas do 6th Southeast Asian Geotechnical Conference, Maio 2007, Kuala Lumpur.
- Majumder, M., Gangopadhyay, K., Chakraborty, K., Dasgupta K., Bhattacharya, K. (2008). *Fiber Bragg gratings in structural health monitoring--Present status and applications*. In Sensors and Actuators a-Physical, vol. 147, pp. 150 - 164.
- Marques, C. (2008). *Gravação de redes de Bragg avançadas em fibra ótica*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.

- Marques, L. (2008). *Optimização de processos de produção de sensores de Bragg em fibra ótica*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Marmota Engineering AG (2012). Marmota Engineering AG :: Technology, http://www.marmota.com/docs/products/Marmota_GeoScan_Documentation_EN.pdf, acessido em Julho 2016.
- Meltz, G., Hill, O. (1997). *Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview*. In Journal of lightwave technology, vol. 15, pp. 1263 - 1276.
- Meltz, G., Morey W., Glenn, W. (1989). *Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method*. In Optics Letters, vol. 14, pp. 823-825.
- NI (2011). Fundamentos de detecção Óptica (FBG) - National Instruments, <http://www.ni.com/white-paper/11821/pt/>, acessido em Julho 2016.
- Oliveira, L. (2011). *Análise Metrológica de Redes de Bragg de Alta Temperatura Voltadas para Aplicações em Sensoriamento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará.
- Othonos, A., Kalli, K. (1999). *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. In Physics Today, vol. 53, pp. 61.
- Ouyang, Y., Bell, A., Elshafie, M., Kechavarzi, C., Soga, K., Fernie, R., Mair, R. (2015). *The history of UK experience in the use of fibre optic monitoring of geotechnically associated installations*. In Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development-Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, vol.2, pp. 637 – 642.
- Puzrin, A., Iten, M., Hauswirth, D. (2010). *Advanced Geotechnical Applications of Distributed Fiber-Optic Sensing*. In Geotechnical News, vol.28, pp.29.
- Ribeiro, A. (2009). *Aplicação de sensores de fibras óticas à observação do comportamento de obras geotécnicas*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Rodrigues, C. (2011). *Monitorização de estruturas de engenharia civil apoiada em soluções de fibra ótica*. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto.
- Santos, P., António, P., Paulo, C., Araújo, L., Taborda, D. (2016). *Caracterização da rigidez inicial da areia de Coimbra*. In Atas do 15º Congresso Nacional de Geotecnia/ 8º Congresso Luso-brasileiro de Geotecnia, Junho 2016, Porto.
- Soga, K., Kwan, V., Pelecanos, L., Rui, Y., Schwamb, T., Seo, H., Wilcock, M. (2015). *The Role of Distributed Sensing in Understanding the Engineering Performance of Geotechnical Structures*. In XVI ECSMGE Geotechnical engineering for infrastructure and development, vol. 1, pp. 13 - 48.
- Werneck, M., Allil, R., Ribeiro, B., Nazaré, F. (2013). *a guide to fiber bragg grating sensors*. In *Current Trends in Short and Long-period Fiber Gratings*, pp. 1 - 23, Cuadrado-Laborde, Brasil.
- Zhou, Z., Graver, T., Hsu, L., Ou, J. (2003). *Techniques of Advanced FBG sensors: fabrication, demodulation, encapsulation and their application in the structural health monitoring of bridges*. In Pacific Science Review, vol. 5, pp. 116 - 121.