



M 2016

U. PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

MONITORIZAÇÃO DA DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE BETÃO POR MEIO DE SENSO-RES DE EMBEBER

JOSÉ HUMBERTO ABRUNHOSA CORREIA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA CIVIL – ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

MONITORIZAÇÃO DA DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE BETÃO POR MEIO DE SENSORES DE EMBEBER

JOSÉ HUMBERTO ABRUNHOSA CORREIA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientadora: Professora Doutora Sandra da Conceição Barbosa Nunes

Coorientadora: Doutora Engenheira Helena Isabel Maia Figueiras

JUNHO DE 2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-5081446

✉ 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 +351-22-5081440

✉ 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 respectivo 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 electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À memória da minha Querida Mãe

"What you do in life, echoes in eternity"

Gladiator

AGRADECIMENTOS

Este espaço torna-se pequeno na altura de agradecer às pessoas que mais contribuíram, não só para a realização desta dissertação, mas também que me acompanharam durante todo o percurso académico. Deste modo, apenas escrevo umas palavras de agradecimento às pessoas que tiveram uma contribuição directa na elaboração desta dissertação. O meu sincero agradecimento:

- À Professora Sandra Nunes, minha orientadora, que conseguiu sempre encaminhar-me no sentido certo, com os seus comentários e observações oportunas. Esteve sempre disponível para me ajudar durante todo o trabalho. Guardo, francamente, boas recordações e grandes ensinamentos que de alguma forma vão condicionar positivamente a minha vida futura;
- À Eng. Helena Figueiras, minha co-orientadora e representante da empresa NewMENSUS, que esteve incansavelmente disponível para responder às minhas questões e dúvidas que iam naturalmente surgindo no decorrer do trabalho. Pela sua experiência e conhecimento prático, permitiu ter um documento mais rico, mais sábio e mais próximo da realidade;
- À Professora Joana Coutinho, pela disponibilidade, pelo tempo e pelo fornecimento de documentos relacionados com a corrosão, de forma a poder perceber melhor o conceito e enquadrá-lo de uma forma sábia no tema da minha dissertação;
- Ao LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela possibilidade de usar todo o equipamento necessário e pela ajuda da equipa de técnicos do laboratório. Destaco a Paula Silva e o Cláudio Ferraz, por todo o apoio, logística e conselhos dados. São pessoas com grandes qualidades humanas e sempre disponíveis para ajudar. Penso que ganhei dois amigos, com os quais terei imenso gosto em continuar a partilhar situações e momentos;
- Ao Instituto de Telecomunicações de Aveiro (IT- Aveiro) agradeço todo o apoio prestado e a cedência do sistema de aquisição de dados, tornando possível a realização da campanha experimental com o sensor POF, na FEUP. Uma palavra de agradecimento especial ao Eng. Paulo Antunes pela ajuda, disponibilidade, conselhos e pela revisão dos Capítulos 3, 4 e 5. Dirijo também um agradecimento ao Prof. Humberto Varum por ter promovido esta colaboração com o IT-Aveiro;
- Por fim, aos meus familiares e amigos. Em especial ao meu irmão, Daniel, pela ajuda prestada e pela companhia ao longo da minha vida académica. À minha namorada, Francisca, pelo apoio e pela estabilidade emocional. Pela palavra amiga na altura certa, nos momentos de maior stress. Sem dúvida uma ajuda muito preciosa. E ao meu amigo João Pinto, pela companhia durante esta batalha, pelos ensinamentos no AutoCad e principalmente pela amizade.

RESUMO

O desenvolvimento de um país pode avaliar-se, em certa medida, pela qualidade das suas infraestruturas. Ao longo dos anos, as sociedades têm vindo a assumir uma atitude mais exigente relativamente aos níveis de desempenho e de durabilidade das estruturas. É necessário pensar e projectar com a finalidade de satisfazer os índices funcionais, evitando custos inesperados de manutenção e reparação. Neste sentido, pretende-se que, a longo prazo, seja possível apresentar respostas mais eficientes e competentes em relação ao parque construído. Assim, a presente dissertação apresenta um estudo dos vários sistemas de sensores, actualmente existentes, para a monitorização da durabilidade de estruturas de betão armado ou pré-esforçado.

Na parte inicial do trabalho é apresentado o conceito de durabilidade e a importância das infraestruturas no desenvolvimento económico de um país. Apresentam-se casos reais de fraco desempenho em termos de durabilidade, invocando os custos excessivos de manutenção e de reparação. Apresenta-se de igual modo a evolução diacrónica da regulamentação do betão armado no que diz respeito aos requisitos de durabilidade. De seguida, apresenta-se uma revisão bibliográfica dos princípios de funcionamento dos sensores utilizados para medição dos parâmetros de durabilidade das estruturas de betão, bem como os sensores comercializados para esse efeito. Posteriormente, é apresentada uma campanha experimental realizada no âmbito da monitorização da durabilidade das estruturas, usando sensores electroquímicos e ópticos. Num primeiro trabalho, recorre-se a sensores electroquímicos embebidos (kit-sensor de corrosão) num provete de betão, avaliando a influência das condições ambientais (temperatura e humidade) nos resultados dos sensores em questão. Para analisar os mesmos parâmetros, procedeu-se a uma interpretação e análise de dados recolhidos de sensores de durabilidade instalados numa estrutura de apoio aos barcos de recreio no Porto de Leixões. Na fase final é ainda avaliado o comportamento de um sensor em fibra óptica plástica, POF, em relação à sensibilidade a várias condições de exposição, como temperatura, humidade e água, bem como a sua introdução numa pasta de cimento porosa.

PALAVRAS-CHAVE: Durabilidade; Monitorização; Kit-sensor de corrosão; Sensor POF.

ABSTRACT

The development of a country can be assessed, to some extent, through the quality of its infrastructures. Over the years, societies have become more demanding towards the levels of performance and durability of structures. It is necessary to think and design in order to meet the functional indices, avoiding unexpected costs of maintenance and repair. In this sense, it is intended that at long term it will be possible to provide more efficient and appropriate responses to the problems of built environment. Thus, this work presents a study of the various sensor systems for monitoring the durability of reinforced or prestressed concrete structures.

The first part of this work presents the concept of durability and the importance of infrastructures for the economic development of a country. Real cases of poor performance in terms of durability are presented, involving excessive costs of maintenance and repair. The evolution in the rules of reinforced concrete design with regard to durability requirements is also presented. Then, a literature review of existing sensors and respective operating principles used to measure the durability of concrete structures are discussed and the available commercial sensors for that purpose are indicated. Subsequently, an experimental campaign is presented under the context of durability monitoring of concrete structures, using both electrochemical and optical sensors. The first part of the study relates to the electrochemical sensors embedded in a concrete sample (corrosion-kit sensor), assessing the influence of environmental conditions (temperature and humidity) on the results obtained. To influence of this parameters was also assessed with the interpretation and analysis of data collected by durability sensors installed in a yachting harbour structure in Leixões. In the final phase of this work, the behaviour of a sensor in plastic optical fiber, POF, was further evaluated analysing its sensitivity to various exposure conditions such as: temperature, humidity, water and a porous cement paste.

KEYWORDS: Durability; monitoring; corrosion kit-sensor; POF sensor.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. ENQUADRAMENTO	5
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	10
2 SENSORES DE BASE ELETROQUÍMICA	13
2.1. INTRODUÇÃO	13
2.2. SENSORES DE RESISTIVIDADE ELÉCTRICA	13
2.3. ELÉCTRODO DE REFERÊNCIA	19
2.4. SENSOR DE CORRENTE GALVÂNICA	22
2.5. SENSORES DE VELOCIDADE DE CORROSÃO	25
3 SENSORES DE BASE ÓPTICA	29
3.1. INTRODUÇÃO	29
3.2. FIBRA ÓPTICA	29
3.2.1. TERMINAÇÕES ÓPTICAS	35
3.2.2. EMENDAS	36
3.3. TECNOLOGIA DOS SENSORES DE BASE ÓPTICA	38
3.3.1. SENSORES INTENSIMÉTRICOS	41
3.3.2. SENSORES DE BRAGG	42
3.3.3. SENSORES INTERFEROMÉTRICOS	44
3.3.4. SENSORES DISTRIBUÍDOS	46
3.3.5. SENSORES QUÍMICOS	48
3.3.6. SENSORES REFLECTIVOS	52
3.4. MONITORIZAÇÃO DA FENDILHAÇÃO	54
3.5. MONITORIZAÇÃO DA CORROSÃO	55

3.5.1. MONITORIZAÇÃO DA CORROSÃO USANDO FBG.....	56
3.5.2. MONITORIZAÇÃO DA CORROSÃO USANDO INTERFERÓMETRO DE FABRY-PEROT	57
3.5.3. MONITORIZAÇÃO DA CORROSÃO USANDO SENSORES DISTRIBUÍDOS.....	59
3.5.4. MONITORIZAÇÃO DA CORROSÃO USANDO SENSORES REFLECTIVOS	61
3.6. SENSOR DE CLORETOS	63
3.7. SENSOR DE PH.....	65
3.8. SENSOR DE HUMIDADE.....	67
4. CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	69
4.1. INTRODUÇÃO.....	69
4.2. SENSOR ELECTROQUÍMICO: KIT-SENSOR DE CORROSÃO.....	69
4.2.1. DESCRIÇÃO DO KIT-SENSOR DE CORROSÃO.....	69
4.2.2. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL.....	72
4.2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.2.4. APLICAÇÃO EM OBRA DO KIT-SENSOR DE CORROSÃO- PAREDE CURVA DO PORTO DE RECREIO.....	81
4.2.4.1. Caracterização da estrutura a analisar	81
4.2.4.2. Sistema de monitorização de durabilidade.....	81
4.2.4.3. Resultados da monitorização	83
4.3 SENSOR ÓPTICO: SENSOR POF	89
4.3.1. DESCRIÇÃO DO SENSOR POF.....	89
4.3.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DO SENSOR POF.....	90
4.3.3. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL.....	93
4.3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
5. CONCLUSÕES.....	119
5.1. ENQUADRAMENTO FINAL.....	119
5.2. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS	119
5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
S/ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Deterioração muito precoce de estruturas: a) Docas de Lisboa; b) Interior de uma ponte do cais (LISNAVE) [2]; Colapso de estruturas: c) Colapso da ponte Daman, Índia (2003); d) Colapso de um viaduto (5 mortes), Canada (2006) [3].	2
Figura 1.2: Natureza da manutenção estrutural e reposição dos níveis de segurança (Adaptado de [4]).	2
Figura 1.3: Níveis de deterioração das estruturas.	6
Figura 1.4: Sistemas de monitorização LNEC para a durabilidade (1989 a 2014) [9].	8
Figura 1.5: Estrutura da dissertação.	11
Figura 2.1: Sonda de resistividade RESIPOD [50]: a) Representação esquemática do funcionamento da sonda; b) sonda Wenner de 4 pontos comercializada pela empresa Proceq.	15
Figura 2.2: Sensor com dois eléctrodos de resistividade: a) esquema de funcionamento [49]; b) sensor Ohmcorr comercializado pela empresa James Instruments [51].	16
Figura 2.3: Sensor com um eléctrodo de resistividade: a) esquema de funcionamento [49]; b) sensor comercializado pela empresa James Instruments [53].	17
Figura 2.4: Sensor de resistividade eléctrica [47].	18
Figura 2.5: Resposta típica da resistividade medida: a) diferentes níveis de profundidade da água; b) valores de resistividade medida ao longo do tempo [47].	18
Figura 2.6: Sensor de humidade: a) Sensor de humidade comercializado pela empresa Sensortec [54]; b) Representação esquemática da medição efectuada.	19
Figura 2.7: Esquema tipo de um eléctrodo de referência [57].	20
Figura 2.8: Esquema de medição do potencial de corrosão [40].	21
Figura 2.9: Exemplos de sensores comercializados: a) Eléctrodo de referencia MMO comercializado pela empresa Castle Electrodes; b) Eléctrodo de grafite comercializado pela empresa Castle Electrodes; c) Eléctrodo de prata/cloreto de prata comercializado pela empresa Castle Electrodes; d) Eléctrodo de zinco comercializado pela empresa Castle Electrodes; e) Eléctrodo de referencia LD15/MMO que combina a medição de potencial com corrente (Castle Electrodes); e) Eléctrodo dióxido de manganês (ERE 20) comercializado pela empresa Force Technology.	21
Figura 2.10: Modelo do circuito eléctrico formado durante a corrosão de uma macrocélula [61].	22

Figura 2.11: Esquema de um sensor de corrente galvânica.....	23
Figura 2.12: Sensores de corrente galvânica: a) Sensor de múltiplos elétrodos (CorroWatch Multisensor), comercialmente desenvolvido pela empresa Force Technology; b) Sensor 900 (Concrete Multi-Depth Sensor, Model 900), comercialmente desenvolvido pela empresa Rohrback Cosasco Systems; c) Sensor escada (Anode Ladder) sensor comercializado pela empresa Sortec; d) sensor de anéis expansivos (Expansion Ring Anode), comercializados pela empresa Sortec.	24
Figura 2.13: Aplicação dos sensores em obra: a) Sensor CorroWatch; b) Sensor Escada.	25
Figura 2.14: Esquema de medição da velocidade de corrosão [40].....	26
Figura 2.15: Kit sensor 800: a) Sensor em obra; b) Aquisição de dados (Corrater Model AquaMate); c) Transmissão de dados (Corrdata); d) Exemplo de um resultado de medição.....	27
Figura 2.16 Sensor ECI-1 [67]: a) Instalação do sensor em obra; b) Esquema do sensor.....	28
Figura 3.1: Constituição das fibras ópticas: a) Fibra óptica de sílica; b) Fibra óptica plástica.	29
Figura 3.2: Constituição de uma fibra óptica de sílica [17].....	30
Figura 3.3: Fenómenos de reflexão e refração da luz numa interface [17].....	31
Figura 3.4: Síntese do fenómeno de reflexão interna total [17].....	32
Figura 3.5: Teoria do cone de aceitação. Reflexão interna total da luz dentro da fibra óptica [10].....	33
Figura 3.6: Fibras ópticas [10]: a) Fibra monomodo; b) Fibra multimodo (step-index); c) Fibra multimodo (graded index).	34
Figura 3.7: Conexão em fibras ópticas [10]: a) Conectores e respectivo ferrule; b) Adaptador para alinhamento de ferrules.	35
Figura 3.8: Conectores para fibras ópticas comercializados pela empresa Libócabos [71]: a) Conector ST; b) Conector SC; c) Conector SC Duplex; d) Conector FC/APC.	35
Figura 3.9: Clivador para fibras ópticas comercializado pela empresa Furukawa Electric Co [72]: a) Clivador S326 High precision Optical Fiber Cleaver; b) Pormenor do equipamento na mão do utilizador.....	36
Figura 3.10: Equipamento utilizado nas emendas das fibras ópticas: a) Máquina de fusão JILONG KL-280G [73]; b) Alinhador de fibras V-GROOVE KL-510 [74]; c) Protector de emendas termo-retráctil [75].	37

Figura 3.11: Emenda provisória [10]: a) Emenda provisória com recurso a conectores FC/APC; b) Outra perspectiva da emenda;	37
Figura 3.12: Princípio de funcionamento dos sensores ópticos [10].....	38
Figura 3.13: Natureza do elemento sensor [17]: a) Sensor intrínseco; b) Sensor extrínseco; c) Sensor extrínseco-reflectivo.....	39
Figura 3.14: Base de medida: a) Sensor pontual; b) Sensor de base longa;	40
Figura 3.15: Base de medida: a) Sensor distribuído; b) Sensor quási-distribuído [10].....	41
Figura 3.16: Sistemas de medição: a) Medição da grandeza externa através de um transdutor [17]; b) Princípio de medição dos sensores intensiométricos [10].....	42
Figura 3.17: Representação esquemática do princípio de funcionamento de uma rede de Bragg [87].	43
Figura 3.18: Ilustração da técnica de gravação das redes de Bragg utilizando máscara de fase [88]. ..	44
Figura 3.19: Gravação das redes de Bragg [68]: a) Equipamento para fabrico das redes de Bragg; b) Gravação de uma rede de Bragg.	44
Figura 3.20: Esquema de medição dos sensores interferométricos[10]: a) Interferómetro de Michelson; b) Interferómetro de Mach-Zehnder.....	45
Figura 3.21: Esquema de medição do sensor interferométrico de Fabry-Perot [10]: a) Sensor intrínseco; b) Sensor extrínseco.	46
Figura 3.22:Princípio de funcionamento do sensor distribuído de Raman.	47
Figura 3.23: Princípio de funcionamento do sensor distribuído de Brillouin.	48
Figura 3.24: Esquema de um sensor químico: Sensor de extremidade revestida (Adaptado de [96]). .	49
Figura 3.25: Esquema de um sensor químico: Sensor de onda evanescente (Adaptado de [96]).	49
Figura 3.26: Esquema de um sensor químico: Sensor Revestido [96].	50
Figura 3.27: Esquema de funcionamento de um “optode”.....	51
Figura 3.28: Perda de intensidade de fluorescência função da concentração da substância supressora.	52
Figura 3.29: Esquema de um sensor reflectivo: a) Sensor com película de aço não corroída; b) Sensor com película corroída (Adaptado de [101]).	52

Figura 3.30: Construção de um sensor reflectivo: Processo de introdução de uma argamassa no tubo plástico [101].....	53
Figura 3.31: Construção de um sensor reflectivo: Esquema geral do sensor [101].....	54
Figura 3.32: Princípio de funcionamento de um sensor intensiométrico para a monitorização da fendilhação (Adaptado de [12]).....	55
Figura 3.33: Sensor de corrosão FBG (Adaptado de [85]).....	56
Figura 3.34: Princípio de funcionamento do sensor e os respectivos espectros de emissão e transmissão (Adaptado de [85]).	57
Figura 3.35: Introdução do sensor dentro de um invólucro para protecção mecânica (Adaptado de [85]).	57
Figura 3.36: Sensor interferómetro de Fabry-Perot: a) Colocação do sensor perpendicularmente a dois varões de aço; b) Aspecto físico do sensor [90].	58
Figura 3.37: Posicionamento correcto do sensor para reagir às fendas provenientes da delaminação do betão por corrosão.	58
Figura 3.38: Aspecto físico do sensor de Brillouin para monitorizar a corrosão [103].....	59
Figura 3.39: Configurações dos sensores de Brillouin [103]: a) sensor BCES-I; b) BCES-II; c) BCES-III.	60
Figura 3.40: Resultado típico do sensor de Brillouin associado à técnica BOTDR [103].....	61
Figura 3.41: Exemplo de um sistema de medição de vários sensores reflectivos [98].....	61
Figura 3.42: Duas forma de instalação do sensor: a) Instalação a partir do interior de um caixão de uma ponte; b) Instalação num pilar, perpendicularmente à frente de ataque (Adaptado de [101]).	62
Figura 3.43: Instalação dos sensores numa pilar de uma ponte em frente ao mar na parte sul da ilha de Hong Kong: Resposta de duas medições efectuadas após a instalação [98].	63
Figura 3.44: Instalação dos sensores num pilar de uma ponte em frente ao mar na parte sul da ilha de Hong Kong: a) Disposição dos sensores instalados [98].....	63
Figura 3.45: Esquema de constituição do sensor de cloretos [31].....	64
Figura 3.46: Fotografia do sensor de cloretos [31].....	65

Figura 3.47: Sensor de pH colorimétrico [102]: a) Aspecto físico; b) pequena camada estanque c) Instalação em ancoragens pré-fabricadas.....	66
Figura 3.48: Constituição do sensor de pH à base de fluorescência (Adaptado de [105]).	66
Figura 3.49: Sensor para medição da humidade relativa: a) Esquema detalhado do transdutor constituído por um material híbrido orgânico-inorgânico, denominado por di-eruasil; b) Aspecto físico do sensor [36].	67
Figura 3.50: Aplicação prática do sensor de humidade relativa: a) Cubos onde foram instalados os sensores; b) Resultado medido pelos sensores durante o período de um ano [36].	68
Figura 4.1: Sensor de corrente galvânica: a) esquema do sensor; b) fotografia do sensor.	70
Figura 4.2: Esquema de medição da corrente galvânica com o sensor CorroWatch.	70
Figura 4.3: Eléctrodo de referência dióxido de manganês, ERE 20.	71
Figura 4.4: Processo esquemático de medição de potencial de corrosão do sensor ER 20.	71
Figura 4.5: Provelte usado na campanha experimental [108]: a) Provelte antes da betonagem onde é visível os sensores usados; b) Provelte após a betonagem, já com as guardas laterais que permitiram a colocação da lâmina de água.	72
Figura 4.6: Esquema representativo das medições: a) Medição de potencial de corrosão; b) Medição de corrente galvânica.	73
Figura 4.7: Resultado tipo da medição de potencial de corrosão com o equipamento ACM realçando o valor médio utilizado.	73
Figura 4.8: Resultado tipo da medição de corrente galvânica com o equipamento ACM realçando o valor medido aos 5s após estabelecido o contacto entre o ânodo e o cátodo.	74
Figura 4.9: Resultados do impacto da temperatura nas medições de potencial de corrosão e corrente galvânica [108].	75
Figura 4.10: Resultado ao longo do tempo das variações de potencial de corrosão do provete 1.	76
Figura 4.11: Resultado ao longo do tempo das variações de corrente galvânica do provete 1.	77
Figura 4.12: Resultado ao longo do tempo das variações de potencial de corrosão do provete 2.	79
Figura 4.13: Resultado ao longo do tempo das variações de corrente galvânica do provete 2.	79

Figura 4.14: Visão geral da estrutura da Parede Curva do Porto de Recreio [108].	81
Figura 4.15: Instalação do kit-sensor de corrosão na Parede Curva [108].	82
Figura 4.16: Alçado lateral da estrutura monitorizada com indicação da localização do painel instrumentado [109].	82
Figura 4.17: Dados registados de potencial de corrosão durante os primeiros 2,5 anos de serviço (CKS-A).	83
Figura 4.18: Dados registados de corrente galvânica durante os primeiros 2,5 anos de serviço (CKS-A).	83
Figura 4.19: Dados registados de potencial de corrosão durante os primeiros 2,5 anos de serviço (CKS-B).	84
Figura 4.20: Dados registados de corrente galvânica durante os primeiros 2,5 anos de serviço (CKS-B).	84
Figura 4.21: Dados registados de potencial de corrosão e corrente galvânica do CKS-A.	85
Figura 4.22: Dados registados de potencial de corrosão do sensor CKS-B.	86
Figura 4.23: Dados registados de corrente galvânica do CKS-B.	87
Figura 4.24: Dados registados de corrente galvânica do CKS-C.	88
Figura 4.25: Sensor POF: a) Esquema do sensor; b) Visualização dos sulcos na fibra.	89
Figura 4.26: Funcionamento teórico do sensor: Maior confinamento do sinal óptico quando os sulcos estão totalmente preenchidos com água.	89
Figura 4.27: Funcionamento teórico do sensor: Menor confinamento do sinal óptico quando os sulcos estão parcialmente preenchidos com água.	90
Figura 4.28: Sistema de medição: a) Interior do equipamento; b) Vista exterior do equipamento;	91
Figura 4.29: Acompanhamento dos ensaios em tempo real através de um sistema Bluetooth incorporado (visualização de um dos canais).	91
Figura 4.30: Escala ilustrativa para o tratamento de dados de aquisição.	92
Figura 4.31: Construção dos sensores do grupo 1: a) Corte da fibra recorrendo a um x-acto; b) Efectuando um corte (sulco).	93

Figura 4.32: Peça de corte: a) Preparação da peça no torno com a broca de 2,2 mm; b) peça de corte final.	94
Figura 4.33: Projecto da peça para o corte da fibra.....	95
Figura 4.34: Resultado do teste de corte.	96
Figura 4.35: Corte dos sulcos: a) Dois cortes com 1/2 do diâmetro do núcleo; b) Vinte e um cortes efectuados a 1/4 do diâmetro do núcleo.	97
Figura 4.36: Resultado de cortes mal efectuados nas extremidades das fibras: a) Corte ondulado; b) Corte com saliência no fundo; c) Corte não perpendicular à horizontal; d) Corte com saída de parte do núcleo.	98
Figura 4.37: Acoplamento do sensor ao varão de aço.....	98
Figura 4.38: Colocação dos sensores para análise do repouso.	100
Figura 4.39: Resultados do ensaio de repouso: a) Sensores do grupo 1; b) sensores do grupo 2.	100
Figura 4.40: Resultado do teste da troca de canais: com grupo 1 de sensores.	102
Figura 4.41: Resultado do teste da troca de canais: com grupo 2 de sensores.	102
Figura 4.42: Tensão eléctrica máxima registada em cada um dos testes: Sensores grupo 1.....	103
Figura 4.43: Tensão eléctrica máxima registada em cada um dos testes: Sensores grupo 2.....	103
Figura 4.44: Teste da coluna de água: a) Os sensores foram dispostos verticalmente fixados na parede lateral; b) os sulcos foram submersos um a um, posicionando o nível da água no meio de sulcos consecutivos.	104
Figura 4.45: Teste da coluna de água: a) Resultados do grupo 1 de sensores; b) Resultado do grupo 2 de sensores.	104
Figura 4.46: Teste da câmara de nevoeiro: a) Colocação dos sensores nas barras; b) Sensores dentro da câmara de nevoeiro.	106
Figura 4.47: Resultado do teste da câmara de nevoeiro do grupo de sensores 1.....	106
Figura 4.48: Resultado do teste da câmara de nevoeiro do grupo de sensores 2: sensor S _{1/4_1} ; b) Resultado dos sensores S _{1/2_1} , S _{1/2_2} e R _{1/2_1}	107
Figura 4.49: Resultado do teste da câmara de nevoeiro do grupo de sensores 2: sensores S _{1/2_1} , S _{1/2_2} e R _{1/2_1}	108

Figura 4.50: Colocação dos sensores dentro da câmara climática.....	108
Figura 4.51: Resultados do ensaio da temperatura.	109
Figura 4.52: Resultados do ensaio da humidade.	110
Figura 4.53: Preparação do teste da areia e fíler: a) Colocação dos sensores no provete das argamassas; b) Iniciar o sistema de leitura; c) Preparação de uma das mistura da areia com água; d) Preparação de uma das misturas com a areia+água+fíler; e) Colocação da areia+água; f) Colocação da areia+água+fíler; g) Lavagem dos sensores; h) Secagem dos sensores.	111
Figura 4.54: Resultados obtidos: a) Ensaio da areia + água; b) Ensaio da areia + água + fíler.....	112
Figura 4.55: Cofragem: a) b) c) Preparação da cofragem; d) colocação dos sensores dentro da cofragem; e) perspectiva dos sensores dentro da cofragem; f) plano do sistema de ensaio.	113
Figura 4.56: Preparação da pasta: a) Fíler com cimento; b) Mistura antes de entrar na varinha; c) Aspecto da pasta final.....	114
Figura 4.57: Introdução da pasta na cofragem: a) Primeiro contacto entre a pasta e os sensores; b) Arame fino para retirar o ar interior, funcionado como um vibrador; c) Aspecto da pasta final dentro da cofragem.	115
Figura 4.58: Diminuição da potência óptica devido ao consumo de água durante as primeiras horas de hidratação do cimento.....	115
Figura 4.59: Processo de preparação do teste da molhagem: a) Colocação da cola quente numa das placas de esferovite; b) Colocação da cola quente na parte inferior das placas; Colocação da cola quente no bordo interior de forma a tornar estanque o sistema.	116
Figura 4.60: Teste da molhagem: a) Perspectiva do provete sem água; b) Colocação de água em cima do provete; c) Provete com água na superfície superior.	116
Figura 4.61: Resultado do teste da pasta de cimento porosa.	117

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Dados globais sobre a gestão de pontes em alguns Países Europeus que mostram a relação entre o custo de manutenção anual e o valor de substituição [5].	3
Tabela 1.2: Evolução da regulamentação do betão armado no que diz respeito aos requisitos de durabilidade.....	4
Tabela 2.1: Valores de resistividade eléctrica do betão para diferentes probabilidades de corrosão com a utilização do sensor Ohmcorr [50].	16
Tabela 2.2: Valores de resistividade eléctrica do betão para diferentes probabilidades de corrosão [43].	17
Tabela 2.3: Potenciais dos eléctrodos de referência [57].	20
Tabela 3.1: Características físicas e mecânicas de uma fibra óptica de sílica (Adaptado de [8]).	31
Tabela 3.2: Técnicas de modulação da luz e mecanismos físicos [16].	41
Tabela 3.3: Indicadores fluorescentes [103].	64
Tabela 4.1: Probabilidade da actividade de corrosão de estruturas expostas à atmosfera.....	71
Tabela 4.2: Programa experimental	74
Tabela 4.3: Potencial de corrosão e corrente galvânica registado no provetes secos a 20°C.....	75
Tabela 4.4: Variação dos potenciais de corrosão e correntes galvânicas por °C.	77
Tabela 4.5: Variação relativa entre as duas ultimas medições e a primeira medição, todas realizadas a 20°C.	78
Tabela 4.6: Comparação do provete 1 seco e molhado.....	78
Tabela 4.7: Variação de correntes galvânicas por °C.....	80
Tabela 4.8: Fibra óptica plástica (HFBR-RUS100Z).....	90
Tabela 4.9: Características do grupo 1 de sensores.....	93
Tabela 4.10: Características do grupo 2 de sensores.....	97

Tabela 4.11: Síntese da campanha experimental com o sensor POF.....	99
Tabela 4.12: Tabela síntese da troca de canais realizada durante o ensaio.	101
Tabela 4.13: Síntese dos ciclos efectuados em cada grupo de sensores.	106
Tabela 4.14: Composição da pasta.	114
Tabela 4.15: Procedimento de amassadura da pasta.....	114

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

R	Ω	Resistência eléctrica
ΔV	V	Diferença de potencial
a	cm	Espaçamento entre eléctrodos
A	cm ²	Área de exposição da armadura
A _a	cm ²	Área do ânodo
A _c	cm ²	Área do cátodo
B	mV	Constante empírica
D	cm	Diâmetro do eléctrodo
d	μm	diâmetro do núcleo
E	GPa	Módulo de Young
I	A	Corrente eléctrica
I _{corr}	mA/cm ²	Velocidade de corrosão
I _{me}	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Corrente galvânica
k	m	Constante de célula
P _{ot}	W	Potência óptica
R _a	Ω	Resistência de polarização anódica
R _c	Ω	Resistência de polarização catódica
R _{el}	Ω	Resistência do electrólito
R _p	Ω	Resistência de polarização
σ	MPa	Tensão
ρ	$\Omega\cdot\text{m}$	Resistividade
α	$\mu\text{e}/\text{C}$	Coefficiente de expansão térmica
λ_b	nm	Comprimento de onda de Bragg
Λ	nm	Período espacial de modulação
I _f	dB	Intensidade de fluorescência com substâncias supressoras
I _{of}	dB	Intensidade de fluorescência sem substâncias supressoras
K _{sv}	-	Sensibilidade do fluoróforo (molécula fluorescente) ao supressor
n _{eff}	-	Índice efectivo de refração da fibra
R _{es}	-	Responsividade
ν	-	Coefficiente de Poison
V	-	Frequência normalizada
[Q]	-	Concentração da substância supressora
n _{nu}	-	Índice de refração do núcleo
n _{ba}	-	Índice de refração da bainha

LABEST	Laboratório de Tecnologia de Betão e Comportamento Estrutural
LNEC	Laboratório Nacional Engenharia Civil
RBLH	Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos
REBA	Regulamento de estruturas de betão armado
REBAP	Regulamento de estruturas de betão armado pré-esforçado
NA	Abertura numérica
NP	Norma Portuguesa
NHE	Eléctrodo de hidrogénio
SCE	Eléctrodo de calomelano
SC	Square conector ou Standard Connector
SC Duplex	Square conector Duplex
ST	Straight Tip
POF	Fibra óptica plástica

1 INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde sempre os engenheiros civis tiveram a preocupação de compreender e acompanhar o comportamento e a durabilidade das estruturas durante o seu tempo de serviço. Todavia, as suas avaliações eram efectuadas a partir de inspecções visuais, devido à grande limitação das primeiras técnicas de monitorização. Assim, as conclusões retiradas eram em grande medida grosseiras e dependiam muito da sensibilidade do observador. Por outro lado, os danos estruturais só eram muitas vezes detectados quando a degradação se encontrava num estado muito avançado e de difícil recuperação.

Nos dias de hoje, as infra-estruturas desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de um país e das suas actividades. Nesta óptica, as sociedades, por diversos motivos, como aumento populacional, o avanço tecnológico, têm tido uma atitude mais exigente sobre os níveis de desempenho e de resposta das suas infra-estruturas. Torna-se por isso, imperativo ter uma visão futurista, cautelosa e criar soluções eficientes, duradouras e seguras para as nossas estruturas.

Ao longo deste documento, será dado mais ênfase à componente de durabilidade das estruturas. Esta componente é fundamental para qualquer edifício, ponte, barragem ou túnel. Na actualidade, a segurança das estruturas é um tema de elevada importância em que os prejuízos da sua falha são muito elevados. Assim sendo, as estruturas devem ser pensadas, projectadas e construídas com o intuito de satisfazer os requisitos e finalidades funcionais para um dado período de tempo, sem causar custos inesperados de manutenção e reparação. Segundo o EC2 [1], no capítulo 4 - Durabilidade e recobrimento das armaduras - vem referida a seguinte definição para a durabilidade de uma estrutura:

“(1)P Uma estrutura duradoura deve satisfazer, durante o seu tempo de vida, os requisitos de utilização, resistência e estabilidade, sem perda significativa de utilidade nem excesso de manutenção não prevista”.

No entanto a realidade é bem diferente. Há inúmeros casos em que as estruturas projectadas e construídas não correspondem aos seus índices estruturais e de durabilidade e necessitam de manutenção e reparação muito precocemente. A título de exemplo, é ilustrado na Figura 1.1 a) e b), exemplos de estruturas que tiveram uma forte deterioração com poucos anos de serviço. A situação extrema é o seu colapso. A Figura 1.1 c) e d) mostra dois casos de colapsos de estruturas por falta de manutenção adequada, a ponte Daman na Índia (2003) e um viaduto no Canadá (2006).

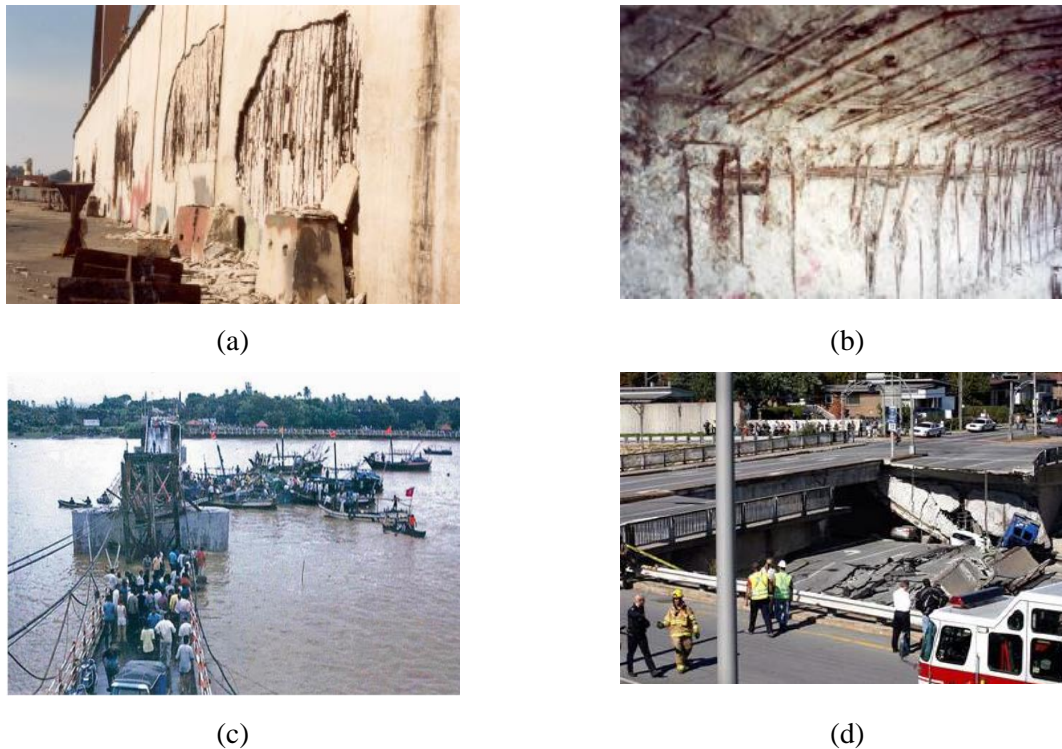


Figura 1.1: Deterioração muito precoce de estruturas: a) Docas de Lisboa; b) Interior de uma ponte do cais (LISNAVE) [2]; Colapso de estruturas: c) Colapso da ponte Daman, Índia (2003); d) Colapso de um viaduto (5 mortes), Canada (2006) [3].

Contudo, as infra-estruturas não são eternas e tendem a envelhecer. Esse envelhecimento é causado, naturalmente pelo próprio uso, mas também pelo ataque de acções agressivas físicas, químicas e biológicas. O seu envelhecimento reduz progressivamente o desempenho estrutural conforme é ilustrado na Figura 1.2 [4]. O desempenho estrutural diminui progressivamente ao longo do tempo e, ao longo da vida útil da obra, é necessária uma manutenção regular e, em casos especiais, recorrer a um reforço estrutural para manter os níveis de funcionalidade, segurança e conforto das infra-estruturas. As manutenções e reparações, assumem em alguns casos um carácter preventivo (conservação preventiva) e em outros tem um carácter essencial (conservação essencial) para o contínuo normal funcionamento das estruturas.

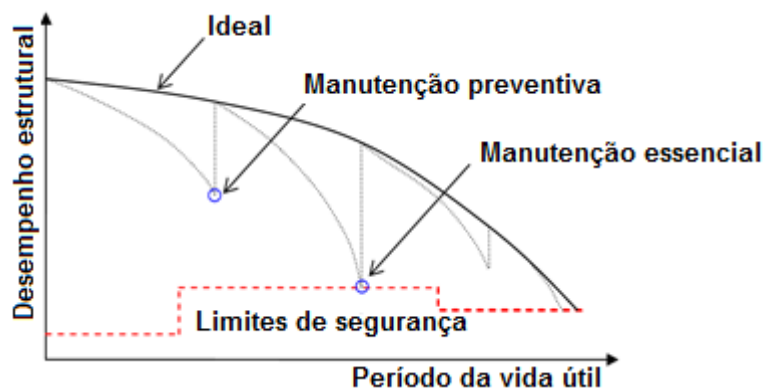


Figura 1.2: Natureza da manutenção estrutural e reposição dos níveis de segurança (Adaptado de [4]).

As manutenções e reparações têm sempre um custo significativo. De acordo com VISION 2020 (ACI/ICRI) [5] estima-se que o custo total para reparação, reabilitação, reforço e protecção (incluindo impermeabilizações) das estruturas de betão armado nos EUA é entre 18-21 biliões de dólares por ano (16-19 mil milhões de euros por ano). Nos Estados unidos, aproximadamente 40% das pontes, necessitam de intervenção e reparação. A maior parte dessas pontes foram construídas na década de 30 [6]. Na Europa, a realidade não é muito diferente, sendo que a maior parte da construção foi feita depois da II Guerra Mundial. Por esse motivo, a maioria das pontes têm mais de 40 anos e precisam de manutenção [7]. A título de exemplo, em França, os montantes envolvidos com a inspecção e conservação de pontes são superiores a cem milhões de euros anuais. Na Alemanha, são também desembolsados cerca de quinhentos milhões de euros para controlo e manutenção. Na Suécia, o orçamento anual para a conservação e manutenção é da mesma ordem de grandeza do orçamento para a construção de novas pontes, cerca de noventa milhões de euros [7]. Alguns dados globais, relativamente à gestão de pontes na Europa, estão apresentados na Tabela 1.1.

Entrando na realidade portuguesa, o cenário não é muito optimista. Segundo o ultimo relatório de contas das Infraestruturas de Portugal, é apurado um gasto anual de 53 milhões de euros para manter a qualidade das estruturas em conformidade com o índice de qualidade médio da rede das vias e obras de arte nos níveis em que as mesmas foram concluídas [8]. Em 2015, as acções de conservação periódica perfazem cerca de 20 milhões de euros [8]. Nesta óptica, ao longo dos tempos, têm sido desenvolvidos esforços para tornar as estruturas mais eficientes e duradouras, inclusivamente podemos encontrar uma clara evolução da regulamentação do betão armado, incluindo sucessivamente requisitos mais exigentes no que diz respeito à durabilidade das estruturas (Tabela 1.2).

Tabela 1.1: Dados globais sobre a gestão de pontes em alguns Países Europeus que mostram a relação entre o custo de manutenção anual e o valor de substituição [6].

País	Número de pontes	Manutenção:	Substituição:	Rácio (%)
		Custo anual (M.€)	Custo anual (M.€)	
Bélgica	5000	10	3800	0,3
Finlândia	15000	30	2900	1
França	28000	73	14900	0,5
Alemanha	34600	318	30000	1
Inglaterra	9500	225	22500	1
Irlanda	18000	25	450	0,6
Noruega	17000	37	6000	0,6
Espanha	13600	13	4100	0,3
Suécia	15000	92	5300	1,7

Tabela 1.2: Evolução da regulamentação do betão armado no que diz respeito aos requisitos de durabilidade (Adaptado de [9]).

Ano	Referência	Descrição
		Os recobrimentos mínimos especificados eram os seguintes:
1918	RCfrench-dec 4034/18:	<ul style="list-style-type: none"> - $C_{min} > 1,5\phi$ - $C_{min} > 1$ cm (lajes) - $C_{min} > 2$ cm (vigas e pilares) <p>Nota: É recomendado que estes valores sejam duplicados em construções junto ao mar.</p>
1967	REBA(1967)+(RBLH)-dec 404/71:	Não há grande evolução, com efeito especificam-se os valores indicados no regulamento anterior, com a recomendação de que tais valores sejam aumentados para melhor protecção contra o fogo ou a corrosão.
1983	REBAP (Artigo 78.º)	São diferenciadas 3 classes de exposição (ambientes pouco agressivos; moderadamente agressivos e muito agressivos) e com os recobrimentos mínimos de 2, 3, 4 cm, respectivamente.
2004	(EN 1992-1-1)	O EC2 faz referência à EN 206, norma portuguesa NP EN 206-1 de 2007.
2010	(NP EN 1992-1-1)	Com a EN 206 as classes de exposição são mais diferenciadas e os correspondentes requisitos de durabilidade mais coerentes e apropriados. Há a introdução do conceito de vida útil.
2004	(EN 1992-1-1)	As principais especificações do LNEC relacionadas com a durabilidade citadas na NP EN 206-1 são:
2010	(NP EN 1992-1-1)	<ul style="list-style-type: none"> - LNEC E 464- Especifica as medidas prescritivas da vida útil de projecto das estruturas de 50 ou de 100 anos nas diferentes classes de exposição; - LNEC E 465- Especifica metodologias para estimar as propriedades de desempenho do betão armado ou pré-esforçado sob a acção do dióxido de carbono e dos cloretos para satisfazer a vida útil pretendida;
2010	Model Code	O Model Code prevê 3 categorias de controlo e conservação de estruturas (categoria A, B e C), tendo em conta o seu grau de deterioração e importância. Para cada categoria está ainda associado um regime de inspecção e monitorização.

Com base nos pontos referidos anteriormente, torna-se evidente a necessidade de haver uma gestão mais eficiente das infra-estruturas efectuando uma recolha permanente e criteriosa de informação sobre o seu estado efectivo. Só desse modo se torna mais eficiente a avaliação da estrutura e a realização do respectivo diagnóstico para planear as intervenções necessárias, comportando menores custos [10].

1.2. ENQUADRAMENTO

O betão é um excelente material que para além da sua componente estrutural tem um papel determinante na durabilidade das estruturas de betão armado. Funciona como uma barreira física para protecção e passivação das armaduras. Contudo, segundo Costa (1999) [2], nenhum material é por si próprio durável, é a interacção entre o material e o ambiente a que está exposto que determina a sua durabilidade.

A garantia de durabilidade das estruturas é dependente dos seus diversos intervenientes. A durabilidade da estrutura depende desde logo do dono de obra, passando pelo projectista e pelo empreiteiro até ao utilizador. O dono de obra deve fazer um controlo de qualidade e realizar sistematicamente e periodicamente inspecções e ensaios durante e após a construção. O projectista a par com o empreiteiro são os grandes responsáveis pela definição e cumprimentos dos requisitos de durabilidade. O primeiro, entre outras medidas, deve ter especial atenção e cuidado em identificar as condições de exposição da estrutura. Deve também especificar todos os materiais e os recobrimentos a usar. Outro aspecto importante prende-se com o estabelecimento de medidas de protecção futuras aliadas a um manual de manutenção. O empreiteiro por seu turno deve ter como principais preocupações o respeito pelo projecto e todas as suas especificidades, deve controlar a composição do betão e os recobrimentos. Por fim temos o utilizador que deve ter o cuidado de realizar inspecções, avaliar o desempenho e não alterar a utilização para a qual foi definida a estrutura, por forma a não aumentar o risco de agressividade ambiental [2, 9].

As principais causas de deterioração do betão são de várias índoles. Grande parte delas resulta de erros e deficiências de projecto, execução, exploração e manutenção. As deficiências de projecto são erros graves e ocorrem sistematicamente. São erros que colocam as nossas estruturas numa situação muito mais frágil e débil do ponto de vista de durabilidade. No entanto, são erros que podem ser completamente evitados se os projectistas estiverem alertados para as questões de durabilidade. Outra causa de deterioração do betão são as deformações impostas devido à retracção e ao efeito da temperatura. As deformações impostas devidas à retracção (plástica ou de secagem) ou à temperatura são inevitáveis, e não temos meios mecânicos para o anular, mas sabendo da sua existência, temos condições para conseguir atenuar os efeitos nefastos que estas deformações induzem nas nossas estruturas. Por fim, temos o efeito do meio ambiente em que se insere a estrutura com as suas acções físicas, químicas e biológicas. As acções agressivas físicas são naturalmente o próprio uso da estrutura mas também acções como o gelo/degelo ou o fogo. As acções biológicas aparecem em casos muito especiais, mas há situações em que a sua consideração é fundamental, como por exemplo em estruturas de saneamento. Por fim temos a acção agressiva química. A acção do dióxido de carbono e dos cloretos que leva à corrosão das armaduras [9].

Segundo Tuutti (1982) [11], a vida das estruturas de betão armado pode ser dividida em duas fases distintas (Figura 1.3):

A **primeira fase** corresponde ao início da corrosão (iniciação). Esta fase corresponde ao tempo necessário para que se criem as condições de destruição da camada protectora da armadura. A duração desta fase depende da espessura do betão de recobrimento, da permeabilidade do betão, da concentração

necessária dos agentes agressivos que provocam despassivação e da agressividade do meio em que se insere a estrutura.

As duas principais acções agressivas responsáveis pela destruição da película passivadora e, consequentemente, pela iniciação do processo de corrosão, é a carbonatação e a acção dos cloretos. Durante a fase de iniciação, a carbonatação (reacção do dióxido de carbono com os hidróxidos do betão) faz com que a alcalinidade do meio seja neutralizada, diminuindo o valor do pH para valores próximos de 9, destabilizando a camada protectora. Os iões de cloretos que se encontram na atmosfera ou na água conseguem penetrar no betão, devido à sua porosidade, e se a sua concentração for superior à crítica, a película protectora é destruída e a armadura deixa de estar protegida.

A **segunda fase** do modelo de Tuutti denomina-se por propagação da corrosão. Esta fase corresponde ao tempo desde o início da despassivação da armadura até ao momento em que a estrutura alcança a rotura. Com a destruição da película protectora, a armadura deixa de estar protegida e dá-se início aos mecanismos de corrosão [11].

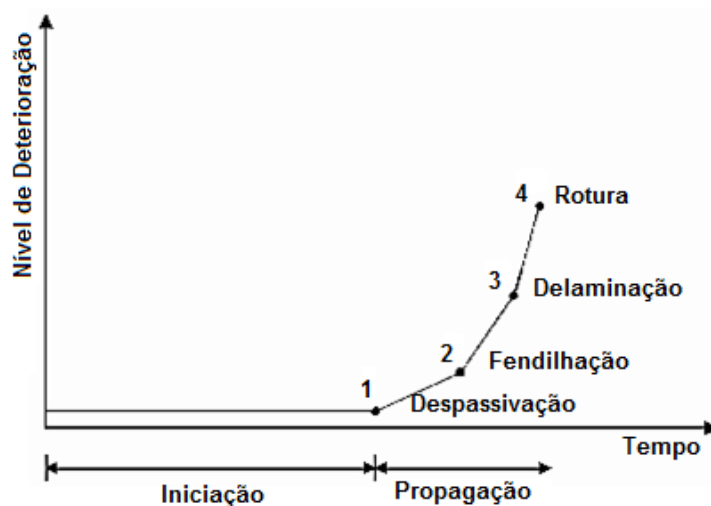


Figura 1.3: Níveis de deterioração das estruturas.

Ao longo do tempo de vida útil da estrutura, devem ser tomadas medidas e estratégias preventivas nas diferentes fases de construção e uso das estruturas. As medidas preventivas incluem os requisitos para a durabilidade desde a concepção estrutural, pormenorização, selecção de materiais, execução, controlo de qualidade e inspecção. Existem duas estratégias distintas que podem ser tomadas na prevenção da iniciação da corrosão [9]. A primeira é intitulada como estratégia base que corresponde à espessura do betão de recobrimento. Regra geral, os projectos de durabilidade de estruturas de betão armado utilizam a estratégia base como estratégia preventiva. Neste caso, o único meio é o efeito barreira do recobrimento às acções de degradação, especificando-se para o caso a composição de betão adequada ao meio de exposição e ao tempo de vida útil pretendido [9]. A segunda é designada como estratégia multibarreira, sendo caracterizada pela utilização de métodos adicionais de prevenção da iniciação da corrosão, especialmente em condições de elevada agressividade como são os casos das estruturas marítimas e para tempos de vida de projecto superior a 100 anos. Nesta estratégia podem ser tomadas várias medidas desde o reforço do efeito barreira com a colocação de revestimentos por pinturas ou membranas na superfície de betão, inibir as reacções de corrosão com a introdução de inibidores durante o processo da amassadura, utilização de armaduras com materiais especiais como aço inox ou aço revestido e, por fim, temos a introdução de sistemas de monitorização da durabilidade. A incorpo-

ração de sistemas de sensores no betão armado permite o acompanhamento continuado e possibilitam o alerta sobre a iniciação dos processos de degradação e a sua progressão [9].

A monitorização das estruturas através de sensores tem como principal objectivo avaliar a integridade estrutural e de durabilidade ao longo da vida útil da obra. Todo o processo abrange um acompanhamento contínuo ao longo dos anos, através de sistemas de monitorização integrados e permanentes, que possibilitam a avaliação da integridade da obra. Os resultados obtidos apoiam a tomada de decisão sobre as respectivas operações de manutenção ou reabilitação [12]. Regra geral, as estruturas alvo dos sistemas de monitorização são as obras de arte, tais como pontes, viadutos, barragens e túneis. Este tipo de estruturas pela sua dimensão, volume e importância no desenvolvimento económico da sociedade, exigem um acompanhamento contínuo ao longo do tempo. No entanto, os donos de obra, oferecem alguma inércia à instalação deste tipo de sistemas nas suas obras, por questões económicas, porém, cabe ao Engenheiro convencê-los que a monitorização tem muitas vantagens a longo prazo na identificação das intervenções na altura certa e a mais baixo custo.

Desde os acontecimentos trágicos dos sismos de Northridge em 1994, nos Estados Unidos da América, e do sismo de Kobe, no Japão em 1995, têm sido reunidos esforços para a instrumentação das estruturas civis com o intuito de as monitorizar [13]. Para além disso, a instrumentação também é justificada pela existência de pontes com vários anos em que a sua capacidade de carga relativamente ao tráfego actual é questionável [14]. Na Coreia do Sul, com o colapso de pontes como a New Haengju Bridge em 1995, como consequência da construção desenfreada em paralelo com um repentino desenvolvimento económico, impeliu o governo do país a ordenar a instalação de sistemas de monitorização, particularmente em pontes suspensas [15]. No nosso País, a queda da ponte Hintze Ribeiro de Entre-os-Rios em 4 de Março de 2001, consciencializou para a necessidade da monitorização contínua das pontes, bem como mostrou a exigência de uma sociedade cada vez mais atenta à política deste sector [12]. Os aspectos mencionados são mais que suficientes para justificar a necessidade da instalação de sistemas de monitorização não só para auxiliar no processo de manutenção mas também para controlo da segurança da estrutura e dos utilizadores.

Em Portugal, a observação e monitorização do comportamento de estruturas de obras de arte tem sido levado a cabo por várias instituições, de entre as quais se destacam o Núcleo de Observação de Estruturas, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), e mais recentemente o Laboratório de Tecnologia de Betão e Comportamento Estrutural (LABEST) em parceria com a empresa NewMensus.

O LNEC é uma instituição de relevância, não só a nível nacional mas também a nível mundial, com intervenções em vários países. A primeira estrutura de relevo a ser observada foi a Ponte sobre o rio Sousa (1948) e desde então o LNEC tem adquirido e partilhado um conjunto ímpar de conhecimentos e experiências [16]. Outro trabalho de relevo, digno de ser mencionado, é a observação da ponte suspensa sobre o rio Tejo. Na altura, era a primeira ponte suspensa do mundo na qual se procedia à observação do comportamento estrutural durante o processo construtivo. O estudo efectuado aprofundou o conhecimento deste tipo de estruturas e permitiu estabelecer correlações entre a acção do vento e a resposta dinâmica da estrutura [17]. A nível da durabilidade, o LNEC também tem reunido esforços para a instrumentação de obras de arte. Desde 1989 até 2014 o LNEC tem instalado diversos sistemas de monitorização não só em Portugal mas também na Europa e África (Figura 1.4) [9]. Destaca-se a Ponte do Infante, no Porto, a Ponte da Barra, em Aveiro e também a Ponte Edgar Cardoso na Figueira da Foz. Na Europa, mais propriamente em França, o LNEC teve intervenções a nível de sistemas de monitorização para a durabilidade na Ponte Volesvres.

O LABEST é um grupo de investigação em Portugal vocacionado para o ensino e investigação com contributos para o desenvolvimento e aplicação de sistemas de monitorização. As intervenções a esse nível começaram com ensaios de carga e monitorização de estruturas por períodos curtos com uso de sensores eléctricos e sistemas de aquisição automáticos. Ao longo dos últimos anos, foram desenvolvidos projectos de investigação, suportados por fundos públicos e privados, para a promoção da aplicação de novos conceitos de monitorização. Um dos projectos de destaque foi realizado com donos das infra-estruturas de transportes para o desenvolvimento de trabalhos de monitorização para as operações de reabilitação e reforço da Ponte Luiz I com o intuito de a integrar na rede do Metro do Porto [17].

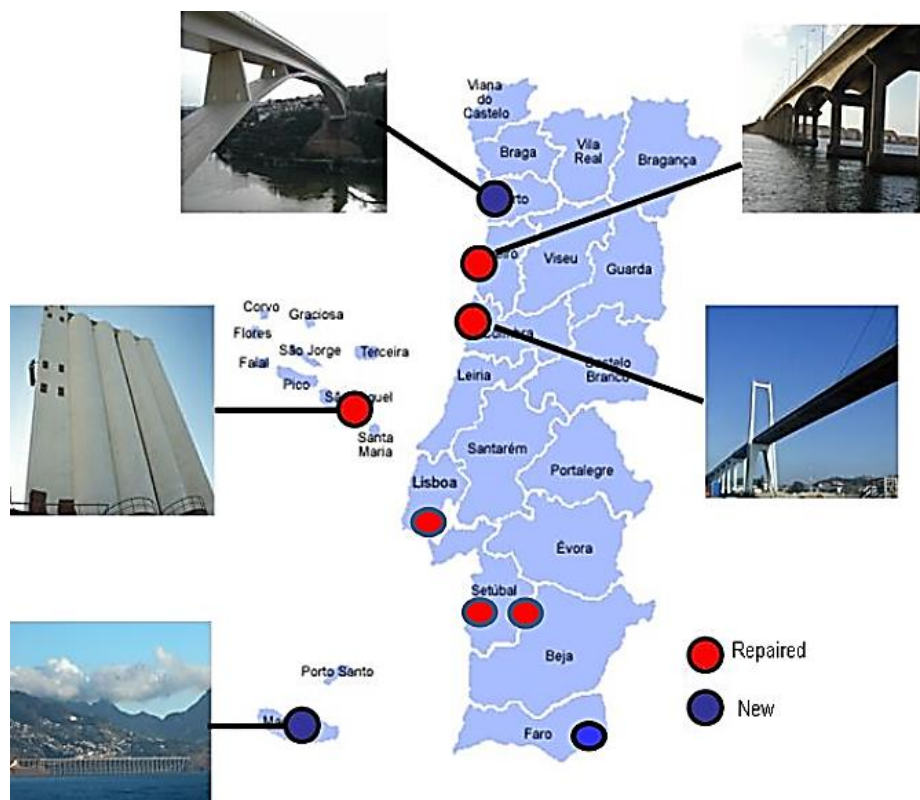


Figura 1.4: Sistemas de monitorização LNEC para a durabilidade (1989 a 2014) [9].

Outras obras a cargo de responsabilidades do LABEST são o viaduto atirantado sobre a VCI, Ponte pedonal de Coimbra, sobre o rio Mondego, Ponte metálica do Pinhão, sobre o rio Douro, entre outras. Outro exemplo de relevo, elaborado pelo LABEST, são os sistemas de monitorização estrutural e de durabilidade instalados na nova Ponte da Lezíria, sobre o rio Tejo. O sistema de monitorização instalado na ponte apresentou aspectos inovadores na monitorização de estruturas em Portugal. Fez parte integrante do projecto da ponte, ocupando mesmo um lugar no caderno de encargos intitulado “Plano de monitorização estrutural e de durabilidade”. A versão final do projecto, pela organização, conteúdos e objectivos, constituiu um documento de referência no campo da monitorização [18].

A NewMENSUS, desde a sua fundação, tem desenvolvido diversos projectos na área da inspecção de estruturas, da monitorização da durabilidade e da segurança estrutural. Destacam-se projectos de grande envergadura como a Ponte da Lezíria, sobre o rio Tejo, e a Ponte Armando Emílio Guebuza, sobre o Rio Zambeze, em Moçambique, com o fornecimento e instalação de sistemas de monitorização.

A nível internacional é merecedor de destaque a Universidade da Califórnia, especialmente o Departamento de Estruturas de Engenharia Civil de San Diego, nas demais fases de monitorização e na elaboração de algoritmos que ajudam na tomada de decisão. A instituição canadiana ISIS Canada – Intelligent Sensing for Innovative Structures, merece também destaque pelas várias publicações sobre esta especialidade [12]. Segundo Sumitro e Hodge (2006), a implementação de sistemas de monitorização a longo prazo têm demonstrado serem uma fiável e económica aproximação para avaliação da integridade estrutural [19].

A abordagem convencional para o diagnóstico do processo de deterioração é realizada através de métodos destrutivos. Os métodos destrutivos têm sempre implícito a retirada de amostras da estrutura e que só por si não fornece informação sobre o conjunto. Esta abordagem não é adequada para obras com grande heterogeneidade de materiais e diferentes exposições ambientais. Outro aspecto negativo prende-se com o facto de com este procedimento não se consegue uma avaliação ao longo do tempo. Para uma melhor compreensão sobre os processos de deterioração e, portanto, das condições da estrutura, é necessária uma análise contínua ao longo do tempo [20]. Nesta óptica, a evolução da monitorização tende a usar técnicas não destrutivas que permitem ter informações rápidas sobre toda a estrutura de forma continuada [21]. Para a aplicação destes métodos não destrutivos podemos recorrer a sondas externas colocadas sobre a superfície de betão ou através de sensores embebidos. As sondas permitem efectuar a análise em toda a estrutura, no entanto, necessita de um operador e em alguns casos é necessário a montagem de equipamentos de acesso a zonas inacessíveis da estrutura. Os sensores embebidos podem ser ligados a um sistema de aquisição automática de dados, efectuando uma monitorização contínua sem necessidade de deslocação ao local da obra. Apresentam como desvantagem o facto de constituírem uma monitorização pontual da estrutura [21].

Para um controlo eficaz das estruturas de betão, os sensores devem possuir flexibilidade na sua incorporação, robustez para resistir a ambientes agressivos, tamanho pequeno para serem instalados no betão de recobrimento, uma boa sensibilidade, reprodutibilidade e baixo custo [20].

Segundo Goltermann, Jensen e Andersen (2002) [22], os sensores para monitorização da corrosão são uma ferramenta valiosa, pois permitem um melhor conhecimento sobre os mecanismos de deterioração das estruturas de betão. Outras vantagens do uso de sensores são as seguintes [22]:

- Maior conhecimento do comportamento da estrutura ao longo dos anos, podendo os dados obtidos ser usados em modelos matemáticos de previsão de vida útil da estrutura;
- Optimização e melhoramento no planeamento das intervenções de inspecção e de reparação da estrutura, incluindo interrupções de tráfego e instalações de infra-estruturas de apoio;
- Avaliação dos diferentes cenários como, por exemplo, mudança do sistema de tratamento superficial ou troca de materiais.

Devido ao facto de haverem muitos factores que contribuem para a durabilidade das estruturas de betão, para aumentar a eficácia da monitorização é necessária uma combinação de diferentes sensores, o que proporciona um maior conhecimento da resposta da estrutura a variações ao longo do tempo e sobre a qualidade do betão de recobrimento [20].

O primeiro sensor de corrosão comercial foi desenvolvido por Peter Schiessl e Michael Raupach, em 1992. Neste sensor, é controlada a profundidade de penetração da frente dos agentes agressivos através das correntes galvânicas de cada ânodo e a comparação do seu potencial com um eléctrodo de referência [23]. Posteriormente, foram desenvolvidos diferentes sensores com base nas propriedades eléctricas do aço e do betão [24-26] e outros sensores baseados nas propriedades electroquímicas, como é o

caso dos eléctrodos de referência [27, 28], que demonstraram a capacidade de monitorizar a frente de corrosão no betão de recobrimento.

Os sensores de base electroquímica são amplamente usados nas aplicações de engenharia civil. Possuem como principais vantagens a vasta experiência na sua utilização, a existência de várias soluções de encapsulamento que cobrem a maioria das grandezas a monitorizar e a possibilidade de utilização de vários equipamentos de aquisição de dados. No entanto, apresentam certas limitações, essencialmente ligadas às interferências electromagnéticas, dimensão do sensor e perda de sinal se a distância entre o sensor e o sistema de aquisição for elevada [29]. Para fazer face a estas limitações, ultimamente têm sido reunidos esforços para o desenvolvimento de sensores em fibra óptica.

Têm vindo a ser desenvolvidos sensores em fibra óptica para monitorizar os diferentes factores que contribuem para a durabilidade do betão, tais como, a presença de iões de cloretos dentro do betão. Estes sensores baseiam-se em diferentes técnicas, tais como, na fluorescência de um indicador [30, 31]. Várias técnicas para monitorização da humidade, através do uso de fibra óptica, também foram desenvolvidas nos últimos anos. Alguns dos sensores são baseados em Redes de Bragg [32-36] e em interferometria através de sensores Fabry-Perot [37]. Por fim, também foram desenvolvidos sensores de fibra óptica, com a técnica sol-gel, para monitorização das alterações de pH devido à carbonatação do betão [38].

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é composta por cinco capítulos, denominados por: 1) Introdução, 2) Sensores de base electroquímica, 3) Sensores de base óptica, 4) Campanha Experimental e, por fim, 5) Conclusão. Na Figura 1.5 é apresentada, de forma esquemática, a estrutura da dissertação e a forma como os diferentes capítulos se interligam. Os capítulos 2 e 3 expõem os princípios de funcionamento dos sensores, para medições de parâmetros de durabilidade, com base electroquímica e base óptica, respectivamente. São também apresentados os principais desenvolvimentos na área e os sensores que actualmente já se encontram no mercado. O capítulo 4 apresenta a campanha experimental realizada ao longo do trabalho. A primeira parte da campanha experimental, desenvolvida ao nível laboratorial e em obra, foi realizada usando um conjunto de sensores electroquímicos, designados por kit-sensor de corrosão que permitem monitorizar a profundidade de penetração da frente dos agentes agressivos. A segunda parte da campanha experimental, elaborada a nível laboratorial, pretendeu estudar o desenvolvimento de um sensor em fibra óptica de plástico para monitorizar o teor em água no interior do betão. Por fim, o capítulo 5 congrega as principais conclusões retiradas do trabalho e expõem-se os desenvolvimentos futuros.

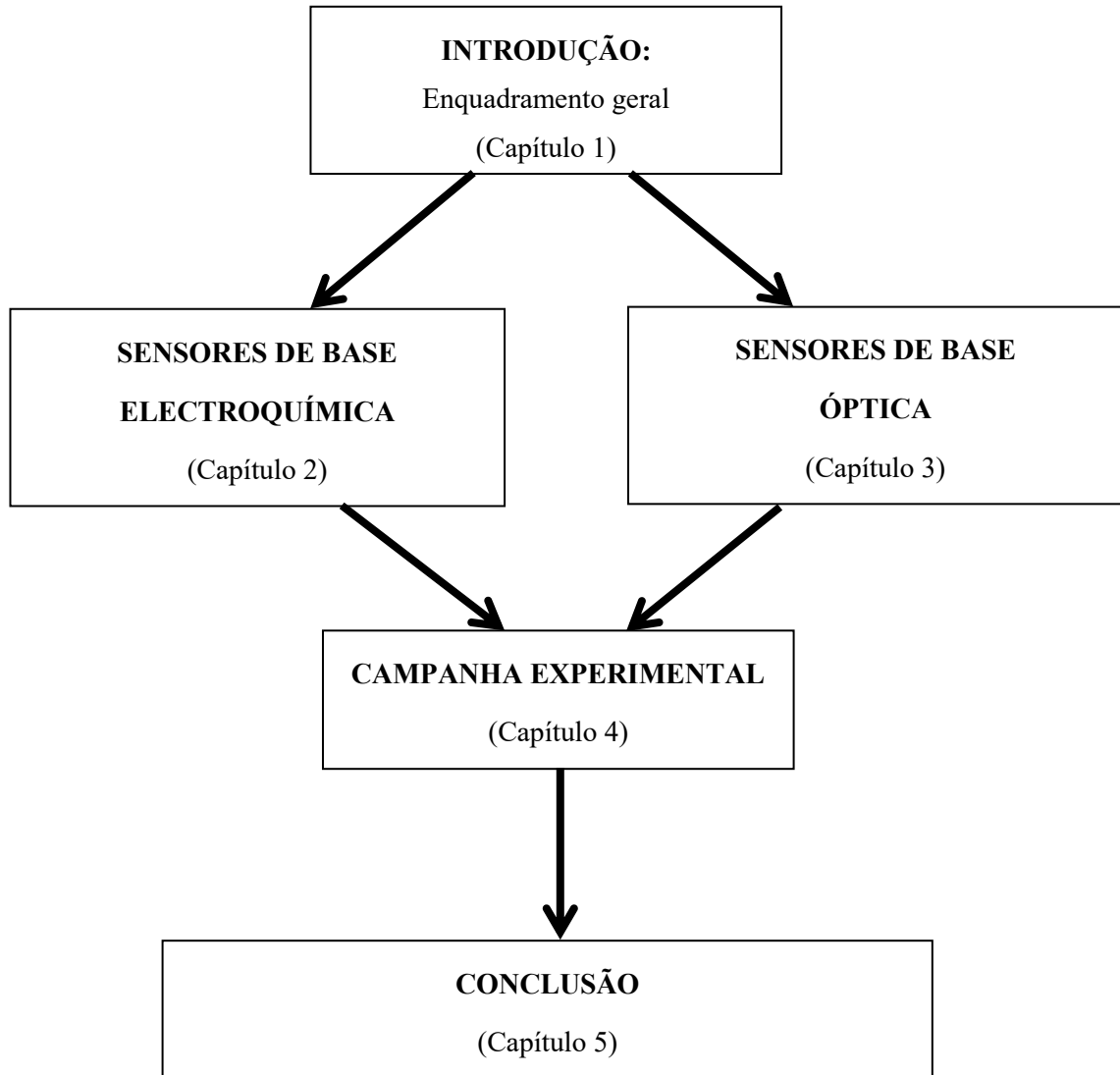


Figura 1.5: Estrutura da dissertação.

2

SENSORES DE BASE ELETROQUÍMICA

2.1. INTRODUÇÃO

Ao longo deste capítulo, destacam-se os principais sensores de base electroquímica na monitorização de parâmetros aliados à durabilidade. Numa primeira parte, aborda-se o princípio de funcionamento de cada sensor em relação ao parâmetro medido e de seguida é ilustrado uma panóplia de opções comercialmente disponíveis. Destaca-se também um conjunto de recomendações de aplicabilidade de alguns sensores. Os sensores electroquímicos mais amplamente usados na monitorização da durabilidade são sensores de resistividade eléctrica, potencial de corrosão, corrente galvânica e velocidade de corrosão. Existem outro tipos de sensores, embora menos divulgados, como é o caso dos sensores para medição da corrente limite de redução de oxigénio e teor em cloretos. No entanto, os sensores de base electroquímica são aqueles mais aplicados na monitorização da durabilidade das estruturas porque são mais amplamente divulgados e com experiência na sua utilização.

2.2. SENSORES DE RESISTIVIDADE ELÉCTRICA

A resistividade eléctrica é uma propriedade física do betão que pode ser definida como o inverso da condutividade eléctrica, tendo significativa importância na durabilidade das estruturas de betão armado. A sua importância reflecte-se no facto de que controla o processo electroquímico que gera o fenómeno de corrosão das armadura dentro do betão [39].

A resistividade eléctrica indica a resistência ao fluxo da corrente eléctrica, de natureza iónica, na solução aquosa presente na rede porosa do betão (vazios e canais capilares). A condição ideal para o fluxo de corrente é quando o betão se encontra totalmente saturado. Há vários factores que influenciam o cálculo da resistividade eléctrica do betão, tais como, configuração geométrica dos eléctrodos, conexão entre os poros capilares e o nível de saturação, concentração e mobilidade de iões na água e a temperatura e humidade [40].

A relação água/cimento é um factor preponderante para o desempenho do betão. Influencia consideravelmente a rede porosa afectando o volume total de poros. Quanto maior for a relação água/cimento, maior será a rede porosa e, conseqüentemente, mais permeável. Deste modo, a resistividade eléctrica irá diminuir [41]. Os agregados também são elementos que influenciam a resistividade do betão. Segundo Monfore [42] os agregados são partículas praticamente não condutoras, entre a matriz de betão, o que dificulta a passagem de corrente eléctrica. O fluxo desta corrente é intensificado pelo aumento da humidade e pelo aumento da temperatura [43, 44]. A humidade é um factor importante para o grau de saturação dos poros, por isso quanto maior for a saturação dos poros, menor será a resistividade eléctrica [41]. A temperatura provoca uma diminuição da resistividade eléctrica devido a mudanças na mobilidade dos iões na solução dos poros [45].

A resistividade eléctrica do betão controla a corrente eléctrica que se estabelece entre a zona anódica (oxidação do metal) e a zona catódica (redução do metal) no processo de corrosão das armaduras. Desse modo, a resistividade eléctrica está intimamente relacionada com a probabilidade e intensidade de corrosão [46]. No entanto, como foi exposto anteriormente, são muitos os factores que interagem na durabilidade das estruturas, por isso não devemos correlacionar directamente a corrosão com um valor isolado de resistividade. A resistividade do betão, deve ser avaliada conjuntamente com outras medidas de durabilidade como o potencial de corrosão. Por exemplo, geralmente admite-se que ocorre corrosão das armaduras quando a resistividade eléctrica do betão é baixa e a medida do potencial indica a despassivação da armadura. A condutividade eléctrica do betão pode, assim, ser encarada como um parâmetro chave na avaliação da durabilidade do betão armado [47].

A resistência eléctrica do betão depende do tipo e número de eléctrodos e pode ser medido quer em corrente contínua (c.c.) ou em corrente alternada (c.a.). No entanto, as medições de resistividade, devem ser realizadas em corrente alternada pois as medições em corrente contínua não são recomendáveis devido ao efeito de polarização dos eléctrodos, podendo induzir erros [44]. Há várias técnicas de medição da resistividade. Nesta análise vão ser abordados três técnicas: técnica dos 4 eléctrodos, técnicas dos 2 eléctrodos e, por último, a técnica de 1 eléctrodo.

A técnica dos 4 eléctrodos, também conhecida pelo método de Wenner, consiste no posicionamento de 4 eléctrodos alinhados e equidistantes na superfície de betão. O espaçamento entre eléctrodos é ajustável, utilizando-se normalmente 5 cm por se ter chegado à conclusão que na maioria dos casos já permite evitar que os agregados de maiores dimensões influenciem as leituras [48]. O processo consiste na introdução de uma corrente eléctrica aplicada nos dois eléctrodos extremos e mede-se a diferença de potencial entre os dois eléctrodos internos (Figura 2.1 a)). Com este parâmetro é determinada a resistência eléctrica na região de betão delimitada por uma semicircunferência, centrada no ponto médio dos eléctrodos interior, de raio igual ao espaçamento entre eléctrodos [49]. Através do valor obtido de resistência, com recurso à equação 2.1, calcula-se a resistividade eléctrica do betão através da equação 2.2 [49].

Resistência eléctrica:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.1)$$

Resistividade eléctrica:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot a \quad (2.2)$$

Onde:

R	Resistência eléctrica
ΔV	Diferença de potencial
I	Corrente eléctrica
ρ	Resistividade
a	Espaçamento entre eléctrodos

Esta técnica, quando aplicada com eléctrodos posicionados na superfície de betão, pode introduzir erros até 25% que é resultado de problemas de contacto entre o betão e os eléctrodos devido à heterogeneidade do meio [44]. No entanto, já existem no mercado equipamentos que identificam automaticamente problemas de contacto entre o betão e os eléctrodos de forma a minimizar os erros de leitura. Este tipo de sondas com quatro eléctrodos é comercializado, por exemplo, pela empresa Proceq [50] (Figura 2.1).

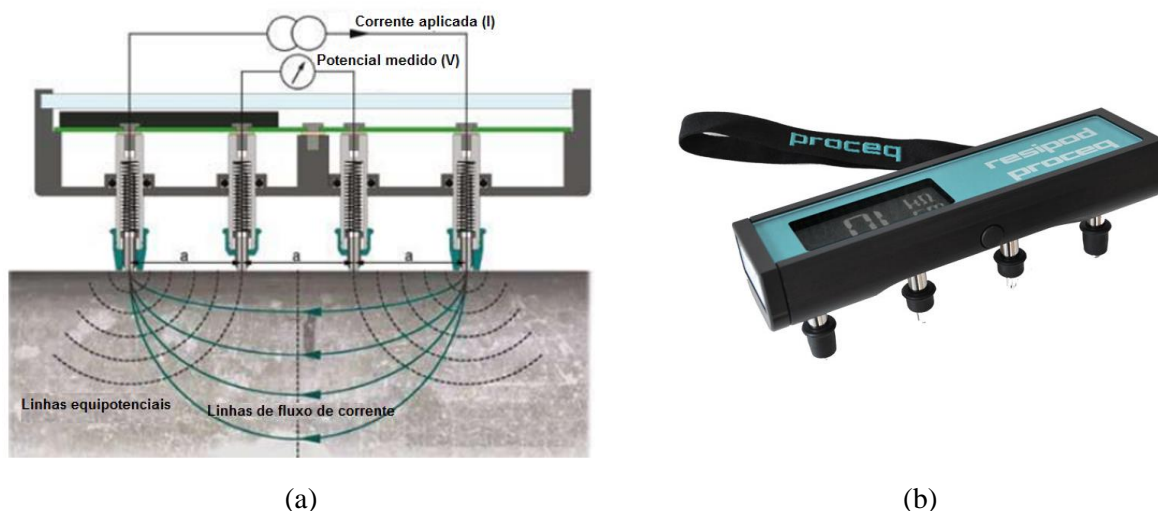


Figura 2.1: Sonda de resistividade RESIPOD [50]: a) Representação esquemática do funcionamento da sonda; b) sonda Wenner de 4 pontos comercializada pela empresa Proceq.

Outra técnica para medição da resistividade do betão é a utilização da técnica de 2 eléctrodos. Esta técnica consiste na utilização de 2 eléctrodos posicionados na superfície de betão ou introduzidos em furos previamente executados no betão. O processo consiste na aplicação de uma corrente eléctrica entre os 2 eléctrodos e é medida a diferença de potencial entre os eléctrodos (Figura 2.2) [49]. Conhecida a diferença de potencial é determinada a resistência eléctrica, com a aplicação da equação 2.1, utilizada na técnica anterior. Por fim calcula-se a resistividade com a aplicação da equação 2.3 para o caso dos eléctrodos estarem introduzidos em furos executados no betão [49].

Resistividade eléctrica [49]:

$$\rho = 0,1 \cdot \pi \cdot R \cdot a \quad (2.3)$$

Na prática corrente, também se usam equipamentos automatizados com espaçamento entre eléctrodos de 5 cm. No entanto esta técnica introduz mais erros comparativamente com a técnica dos 4 eléctrodos. Outro aspecto negativo é a necessidade de introduzir no furo um gel condutivo antes da introdução dos eléctrodos. Não obstante, a introdução dos eléctrodos no interior do betão diminui a interferência das heterogeneidades da superfície [48]. Na tabela 2.1 está representado valores de resistividade do betão para diferentes probabilidades de corrosão.

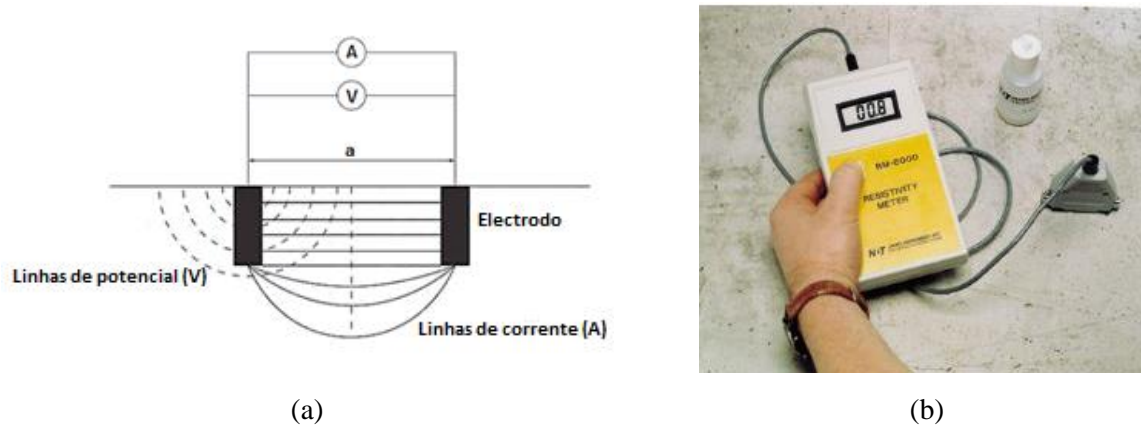


Figura 2.2: Sensor com dois eléctrodos de resistividade: a) esquema de funcionamento [49]; b) sensor Ohmcorr comercializado pela empresa James Instruments [51].

Tabela 2.1: Valores de resistividade eléctrica do betão para diferentes probabilidades de corrosão com a utilização do sensor Ohmcorr [51].

Resistividade do betão (k Ω.cm)	Probabilidade de corrosão
<5	Muito alto
5 a 10	Alto
10 a 20	Moderado
>20	Baixo

Por fim, temos a técnica de 1 eléctrodo. Esta técnica é semelhante à anterior, utilizando 2 eléctrodos, só que um dos eléctrodos é a própria armadura (Figura 2.3). O processo também consiste na medição de corrente só que em vez de ser entre 2 eléctrodos interiores é entre um eléctrodo exterior, caracterizado, por exemplo por um disco de 2 cm de diâmetro e a própria armadura (Proceq). Nesta técnica, a determinação da resistividade do betão é limitada à camada de recobrimento da armadura. A estimativa de erros neste processo é semelhante à técnica dos 4 eléctrodos [52]. A resistividade é calculada recorrendo à equação 2.4 [49]:

Resistividade eléctrica:

$$\rho = 2 \cdot R \cdot D \quad (2.4)$$

Onde:

ρ	Resistividade
R	Resistência eléctrica
D	Diâmetro do eléctrodo

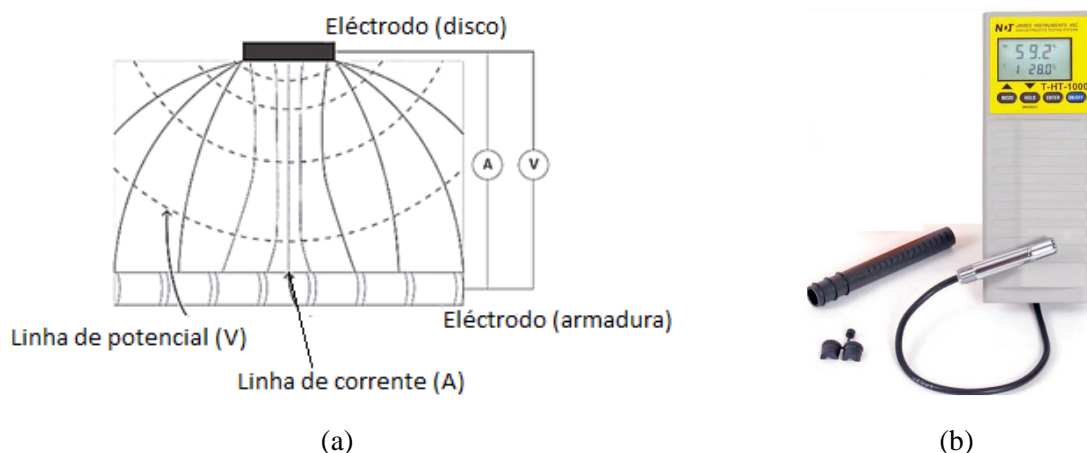


Figura 2.3: Sensor com um eléctrodo de resistividade: a) esquema de funcionamento [49]; b) sensor comercializado pela empresa James Instruments [53].

Na aplicação destas técnicas é necessário ter vários aspectos em conta. As condições superficiais do betão é um importante factor na realização das medidas. Para evitar que a sua influência interfira significativamente nas leituras deve-se evitar a realização dos ensaios em períodos de intenso calor ou frio ou quando a superfície de betão estiver muito molhada [45, 48]. No entanto, a humedificação da superfície do betão, antes da realização da medição poderá ser necessária, particularmente quando há dificuldade em alcançar resultados, mas devendo só humedecer a zona que os eléctrodos irão estar em contacto. Este processo de humedecimento pode ser feito recorrendo a um gel condutivo ou até mesmo a uma esponja húmida [44].

Na Tabela 2.2 ilustra-se valores típicos de resistividade eléctrica do betão para diferentes probabilidades de corrosão.

Tabela 2.2: Valores de resistividade eléctrica do betão para diferentes probabilidades de corrosão [44].

Resistividade do betão ($\Omega.m$)	Probabilidade de corrosão
100	Alto
100-500	Moderado
500-1000	Baixo
>1000	Muito baixo

McCarter et al [47], na Universidade Heriot-Watt em Edimburgo, desenvolveram um sensor de resistividade eléctrica que permite fornecer dados em tempo real sobre o estado e a distribuição espacial das propriedades do betão de recobrimento, permitindo medições de resistência eléctrica discretizadas em profundidade (Figura 2.4).

O sensor contém 10 pares de eléctrodos de aço inoxidável, montados numa pequena caixa de acrílico, com 1,6 mm de diâmetro (Figura 2.4). Os pares de eléctrodos estão dispostos verticalmente, espaçados de 5 mm, permitindo assim medições eléctricas em pontos discretos sobre uma profundidade de 50 mm. Além disso, o sensor possui quatro termistores, posicionados a diferentes profundidades, para se traçar os perfis de temperatura. A resposta típica da resistividade medida pelo sensor, numa frente de água está ilustrada na Figura 2.5.

A Figura 2.5 representa a penetração da água, a vários níveis, relacionada com a resistividade medida pelo par de eléctrodos apresentado. Quando a água se encontra no nível I, a resistividade medida apresenta o seu valor máximo. Quando a água se encontrar no nível III, consequentemente os eléctrodos estarão em contacto íntimo com a água, a resistividade medida apresenta valores mais baixos.

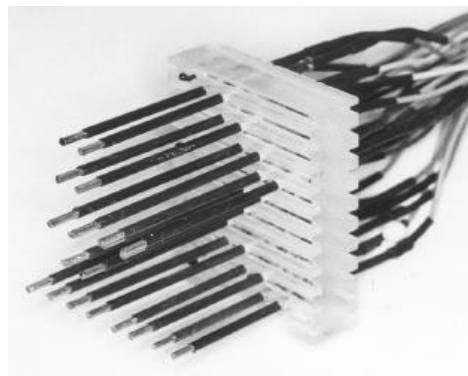


Figura 2.4: Sensor de resistividade eléctrica [47].

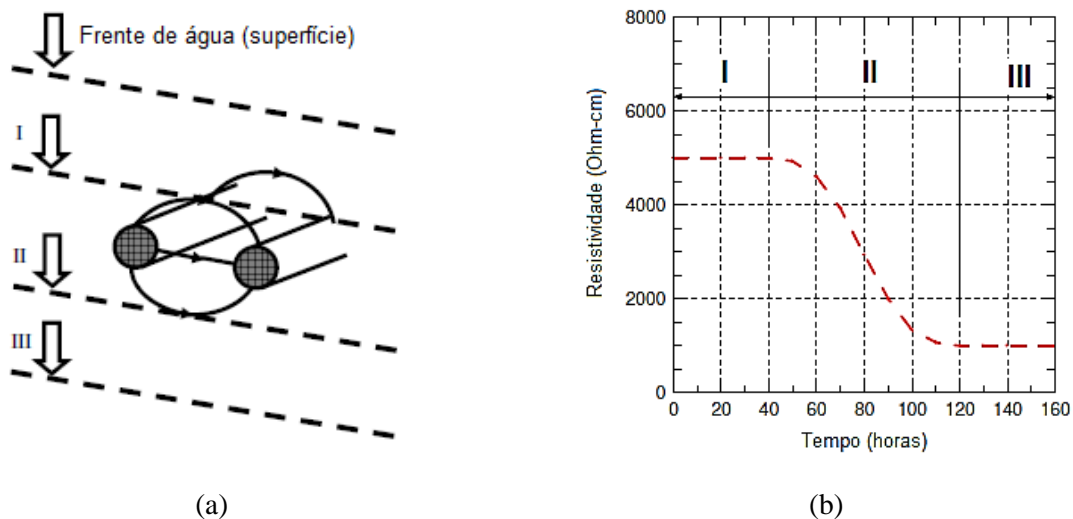


Figura 2.5: Resposta típica da resistividade medida: a) diferentes níveis de profundidade da água; b) valores de resistividade medida ao longo do tempo [47].

Outro tipo de sensor desenvolvido, com base na medição de resistividade, é o sensor de múltiplos anéis (multiring electrode) para a monitorização da humidade (Figura 2.6) [54]. Este sensor é constituído por anéis sobrepostos de aço inoxidável e no intervalo destes é constituído por outros anéis de material isolante eléctrico e de vedação. Este sensor permite monitorizar as variações de humidade do betão, possibilitando a obtenção de um perfil de humidade ao longo do tempo e ao longo de uma profundidade que poderá ir até aos 45mm da superfície de betão [54]. Com o resultado do perfil de humidade é possível avaliar a eficiência de sistemas de protecção superficial do betão contra a entrada de água e também o risco de corrosão. Assim, o sensor pode ser usado tanto em estruturas novas como em estruturas já existentes [55].

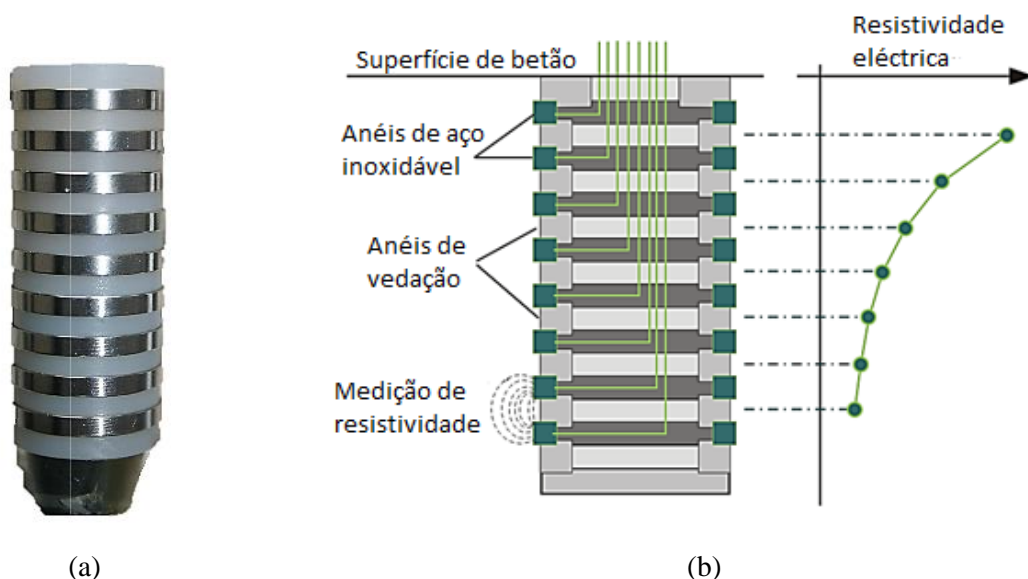


Figura 2.6: Sensor de humidade: a) Sensor de humidade comercializado pela empresa Sensortec [54]; b) Representação esquemática da medição efectuada.

O perfil de humidade é obtido a partir da determinação da resistência ohmica (Ω) entre os pares de anéis metálicos. Para isso é necessário converter os valores da resistência de cada par em resistividade eléctrica ($\Omega.m$) usando uma constante de célula ($k=0,10m$). Com recurso a curvas de calibração, convertem-se os valores de resistividade eléctrica em humidade. Sabendo previamente a profundidade dos anéis é possível obter um perfil de humidade. Uma nota muito importante é que a temperatura influencia a resistência medida no betão e, por isso, o sensor tem incorporado um também um sensor de temperatura (PT1000). Outro aspecto importante é que os cálculos descritos não são precisos, por isso os valores obtidos de humidade só devem ser analisados em função das suas variações ao longo do tempo [55].

2.3. ELÉCTRODO DE REFERÊNCIA

O primeiro desenvolvimento dos métodos não destrutivos para avaliação da corrosão das armaduras no betão armado teve início na década de setenta com a medição do potencial de corrosão. O processo requeria a introdução de eléctrodos de referência para controlo do potencial de corrosão em protecção catódica. O potencial de corrosão constitui uma medida indicativa da probabilidade de corrosão e permite concluir se a armadura se encontra no estado activo ou passivo. O processo baseia-se na medição da diferença de potencial electroquímico de um metal, neste caso a armadura, numa solução, em

relação a um potencial de um eléctrodo previamente conhecido, designado como eléctrodo de referência [56]. O esquema deste tipo de sensor esta esquematizado na Figura 2.7.

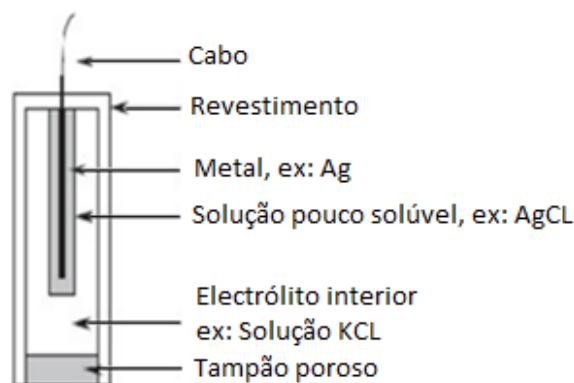


Figura 2.7: Esquema tipo de um eléctrodo de referência [57].

Alguns eléctrodos de referência são designados como eléctrodos de referência “não polarizáveis”, na medida em que satisfazem as necessidades de transferência de cargas impostas pelo instrumento de medida sem alterar o seu valor de potencial. Outros eléctrodos de referência são designados por eléctrodos de referência “polarizáveis” e, portanto, o seu valor de potencial pode variar. Os requisitos técnicos para instalação dos eléctrodos são diversos, tais como, reprodutibilidade, reversibilidade e estabilidade. A exigência depende muito do objectivo da instalação do eléctrodo de referência. Um eléctrodo destinado a medir variações de potencial ao longo de vários anos terá exigências muito rigorosas a todos os requisitos referidos, enquanto que para um eléctrodo, destinado a medir mudanças de potenciais para um período curto, os requisitos são reduzidos, não sendo necessária uma muito boa estabilidade a longo prazo [58].

Os eléctrodos de referência mais comumente usados no betão são prata/cloreto de prata, dióxido de manganês, grafite, aço inoxidável e chumbo. O potencial de cada eléctrodo de referência não pode ser medido directamente em termos absolutos, é necessário medir uma diferença de potencial entre dois eléctrodos. Geralmente, costuma-se medir a diferença de potencial do eléctrodo de referência a usar, em relação ao eléctrodo de hidrogénio ou então ao eléctrodo de calomelano saturado. A Tabela 2.3 apresenta os potenciais de eléctrodo de referência em relação ao eléctrodo de hidrogénio (NHE).

Tabela 2.3: Potenciais dos eléctrodos de referência [58].

Eléctrodo	Potencial (mV vs NHE)
Calomelano	+244
Prata/Cloreto de prata	+199
Cobre/Sulfato de cobre	+316
Dióxido de manganês	+365
Grafite	+150 +/- 20
Aço inoxidável	+150 +/- 20
Chumbo	- 450

A monitorização da durabilidade, mais propriamente da probabilidade de corrosão, pode ser feita recorrendo à medição das variações de potencial ao longo do tempo. Com a transformação do estado passivo para o estado activo do aço, o potencial do aço medido em relação ao eléctrodo de referência irá alterar-se. O valor de potencial depende de muitos factores, como a humidade do betão, temperatura, pH do betão, portanto, o valor de potencial deve ser interpretado cuidadosamente e conjuntamente com outras medidas. A avaliação deve ser baseada em mudanças no potencial ao longo do tempo entre o aço e um eléctrodo de referência (Figura 2.8) [40]. Na figura 2.9 estão ilustrados exemplos de eléctrodos de referência comercializados [59, 60].

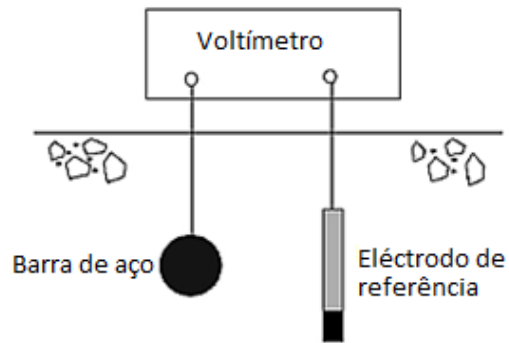


Figura 2.8: Esquema de medição do potencial de corrosão [40].

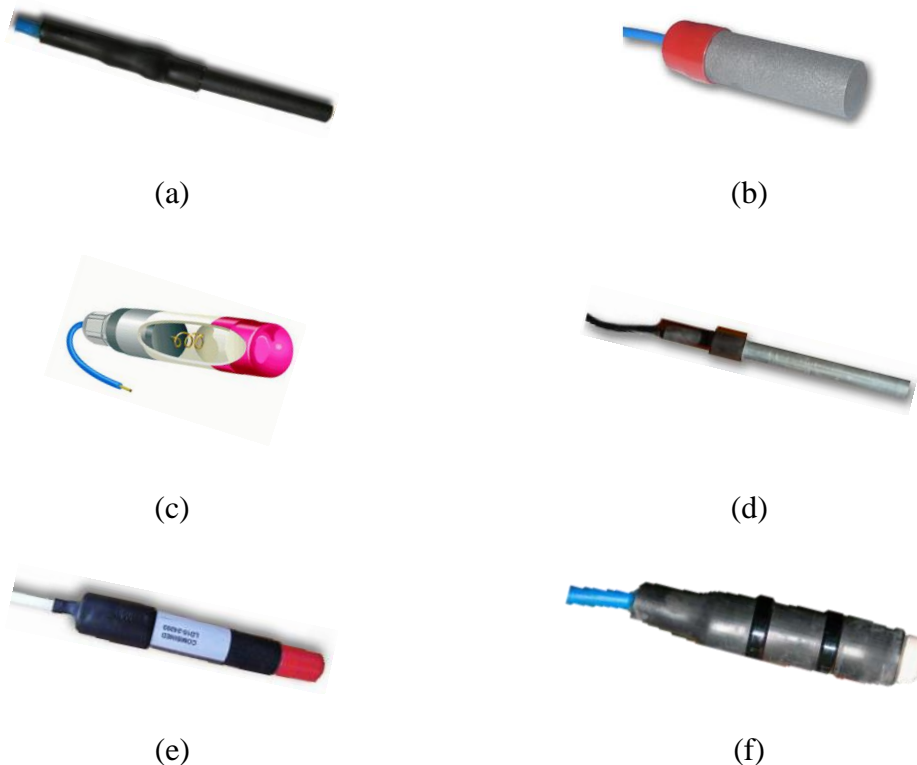


Figura 2.9: Exemplos de sensores comercializados: a) Eléctrodo de referência MMO comercializado pela empresa Castle Electrodes; b) Eléctrodo de grafite comercializado pela empresa Castle Electrodes; c) Eléctrodo de prata/cloreto de prata comercializado pela empresa Castle Electrodes; d) Eléctrodo de zinco comercializado pela empresa Castle Electrodes; e) Eléctrodo de referência LD15/MMO que combina a medição de potencial com corrente (Castle Electrodes); e) Eléctrodo dióxido de manganês (ERE 20) comercializado pela empresa Force Technology.

2.4. SENSORES DE CORRENTE GALVÂNICA

A maioria dos sensores disponíveis no mercado, para avaliação do risco da corrosão em estruturas de betão armado, fundamenta-se na monitorização da variação da corrente galvânica. A corrente galvânica desenvolve-se quando, num mesmo meio electrólito, se faz o contacto eléctrico entre dois metais em estados distintos (estado activo ou passivo) decorrentes de alterações do meio envolvente. Este tipo de sensor foi largamente desenvolvido e iniciada a comercialização na década de noventa.

O sensor de corrente galvânica tem como base a medição da intensidade de corrente de uma macrocélula formada por 2 metais com potenciais eléctricos diferentes, ligados pelo betão que funciona como um electrólito. Simplificadamente, a corrente flui entre o metal menos nobre, designado ânodo, para o metal mais nobre, designado cátodo (Figura 2.10) [23].

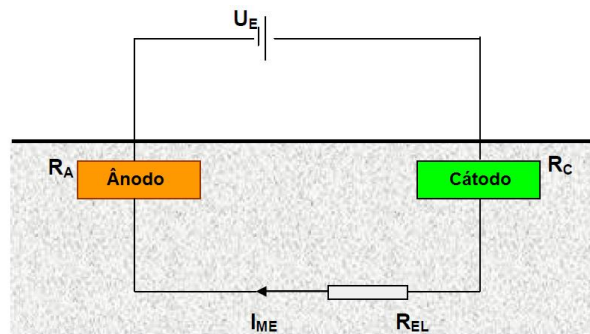


Figura 2.10: Modelo do circuito eléctrico formado durante a corrosão de uma macrocélula [61].

A corrente eléctrica (corrente galvânica) é calculada pelo quociente entre o diferencial de potencial dos dois metais ($U_C - U_A$) e o somatório das resistências (R_{EL} , R_A e R_C) [61] (equação 2.5).

Corrente galvânica:

$$I_{ME} = \frac{U_C - U_A}{R_{EL} + R_A + R_C} = \frac{U_C - U_A}{k\rho + R_A + R_C} \quad (2.5)$$

Onde:

I_{ME}	Corrente galvânica
$U_C - U_A$	Diferença de potencial dos dois metais
R_{EL}	Resistência do electrólito
R_A	Resistência de polarização anódica
R_C	Resistência de polarização catódica

O sensor de corrente galvânica mais popular foi impulsionado por Peter Schiessl e Michael Raupach, em 1992 [23], tendo sido amplamente utilizada para monitorizar o risco de corrosão em estruturas novas. Este sensor consiste no posicionamento de uma série de ânodos de aço-carbono a diferentes profundidades da superfície do betão como ilustra a Figura 2.11.

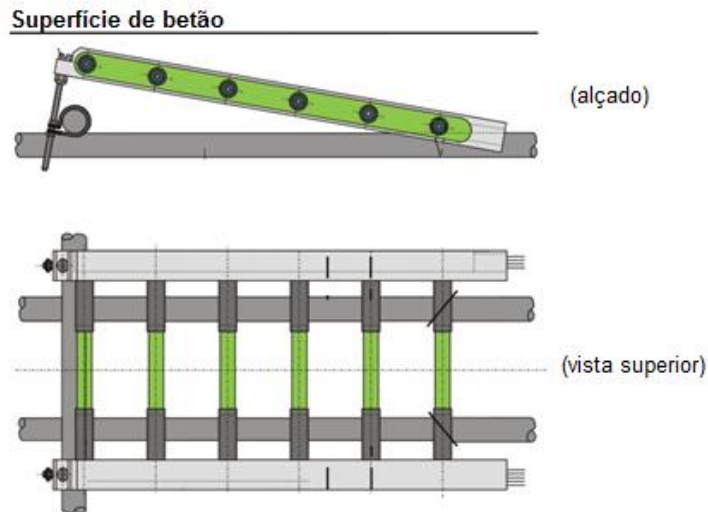


Figura 2.11: Esquema de um sensor de corrente galvânica.

Na prática, os sensores galvânicos possuem um conjunto de barras posicionadas a diferentes profundidades, embebidas no betão de recobrimento. Este conjunto de barras do sensor são os ânodos e nas suas proximidades é então embebida a barra de metal mais nobre, designado cátodo. O material constituinte dos ânodos deve ser o mesmo que as armaduras da estrutura. Os materiais que normalmente se usam como cátodo são aços inoxidáveis, altamente resistentes à corrosão, ou também titânio revestido com platina [58]. A corrente galvânica é então medida entre cada barra do ânodo e o cátodo.

No caso do betão ainda não contaminado com agentes agressivos, a corrente medida é desprezável, uma vez que as barras que compõem os ânodos se encontram no estado passivo, logo apresentam uma diferença de potencial muito baixa em relação ao cátodo, também este passivo. No caso do sensor CorroWatch, comercializado pela empresa Force Technology [60] as correntes típicas nestes casos rodam ($<2\mu\text{A}/\text{cm}^2$) [61].

Quando a corrosão se processa nas barras dos ânodos, a corrente galvânica assume valores mais significativos, e o potencial dos ânodos assumem valores mais negativos em relação ao seu estado inicial. No caso do sensor CorroWatch, comercializado pela empresa Force Technology [60] as correntes típicas nestes casos rondam ($>10\mu\text{A}/\text{cm}^2$) [61]. Um aspecto importante de referir é que como as barras dos ânodos estão colocadas a diferentes profundidades, o processo corrosivo nos diferentes ânodos ocorre de forma sequencial. Deste modo, a corrente galvânica aumenta no sentido do ânodo embebido mais próximo da superfície para o ânodo mais profundo. Este aspecto traz imensas vantagens na monitorização das estruturas, pois permite conhecer a profundidade de penetração dos agentes agressivos, e recorrendo a modelos de previsão da vida útil, conseguimos estimar o início da corrosão das armaduras das estruturas [58].

Com uma revisão bibliográfica verificou-se que há um grande desenvolvimento de novos sensores de corrente galvânica. Os principais sensores disponíveis no mercado são os seguintes (Figura 2.12):

- Sensor de múltiplos eléctrodos (CorroWatch Multisensor), comercializado pela empresa Force Technology [60];
- Sensor 900 (Concrete Multi-Depth Sensor, Model 900), comercializado pela empresa Rohrback Cosasco Systems [62];

- Sensor escada (Anode Ladder) e sensor de anéis expansivos (Expansion Ring Anode), ambos comercializado pela empresa Sortec [63];

O sensor de múltiplos eléctrodos é constituído por barras (ânodos) rectas, ortogonais duas a duas e colocadas a diferentes alturas (Figura 2.12 a)). As barras estão apoiadas sobre uma base circular sobre o qual foi colocada uma tela de titânio activado que corresponde ao cátodo. Ao sensor é também geralmente acoplado um eléctrodo de referência, ERE20 (Mn/MnO_2), que é colocado nas proximidades. Desta forma, o sensor, para além de permitir determinar a corrente galvânica, determina o potencial de corrosão das barras correspondentes aos ânodos. Na base do sensor ainda existe um sensor específico para a temperatura [60].

O sensor 900 e o sensor escada (Figura 2.12 b) e c)), os ânodos são constituídos por barras de aço-carbono e são paralelas entre elas, no entanto, no sensor 900 os cátodos são barras de aço inoxidável e estão em paralelo com os ânodos enquanto que no sensor escada, o cátodo é posicionado nas proximidades do sensor e corresponde a uma barra de titânio revestido com MMO.

O sensor de anéis expansivos (Figura 2.12 d)), em vez de barras são utilizados anéis de aço-carbono colocados uns sobre os outros, intercalados com anéis de isolamento eléctrico e de vedação. Neste tipo de sensor, o cátodo é idêntico ao sensor escada, na medida em que o cátodo é uma barra de titânio revestido com MMO, instalado próximo do sensor.

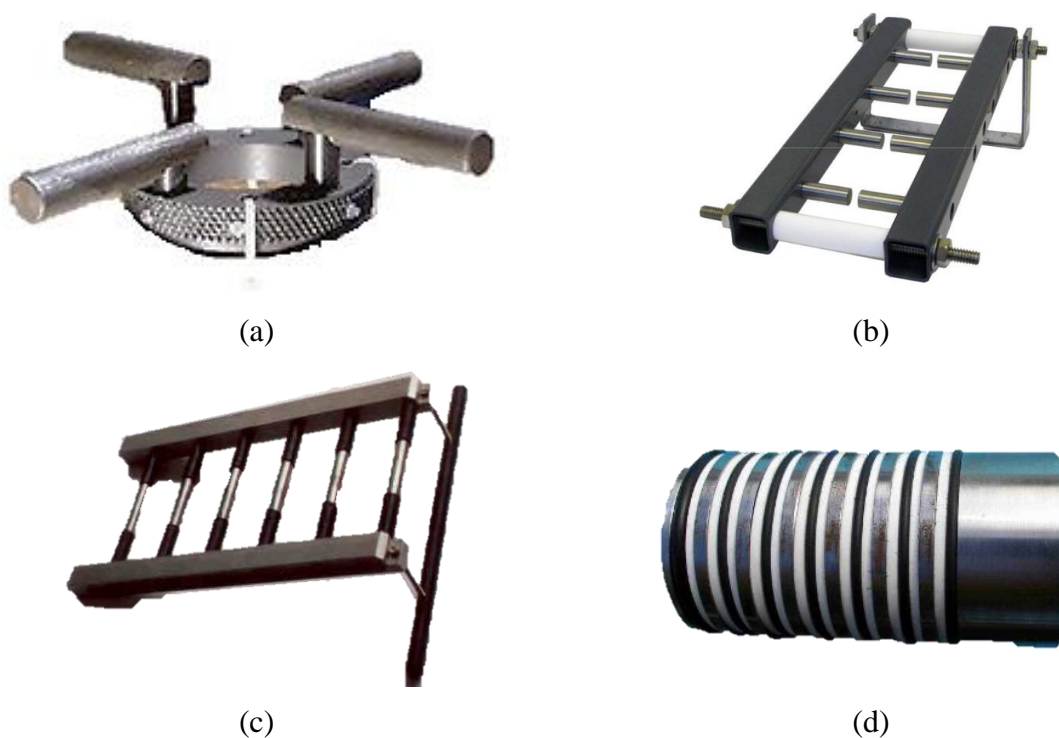


Figura 2.12: Sensores de corrente galvânica: a) Sensor de múltiplos eléctrodos (CorroWatch Multisensor), comercialmente desenvolvido pela empresa Force Technology; b) Sensor 900 (Concrete Multi-Depth Sensor, Model 900), comercialmente desenvolvido pela empresa Rohrback Cosasco Systems; c) Sensor escada (Anode Ladder) sensor comercializado pela empresa Sortec; d) sensor de anéis expansivos (Expansion Ring Anode), comercializados pela empresa Sortec.

Tanto o sensor CorroWatch, o sensor 900 e o sensor escada foram desenvolvidos para a monitorização do risco de corrosão para estruturas novas, como pontes, túneis ou barragens. O sensor de anéis expansivos é mais indicado para o uso em construções existentes [64]. O sensor CorroWatch é instalado entre as armaduras mais superficiais e a superfície de betão. Fica colocado no betão de recobrimento, (Figura 2.13 a)). Em relação ao sensor escada e ao sensor 900, também são colocados no betão de recobrimento, mas em posição inclinada sobre a armadura. Essa inclinação é variável e é função da espessura do betão de recobrimento (Figura 2.13 b)). Em relação à instalação do sensor de anéis expansivos, este é colocado no betão de recobrimento por meio de um furo prévio. Para uma aderência perfeita entre a superfície exterior do sensor e a parede do furo, os anéis são expandidos através de um equipamento manual de torção. A expansão juntamente com os anéis de vedação evita a entrada de água pela parede do furo, no entanto existe sempre alguma possibilidade de entrada, por isso é de evitar o uso deste tipo de sensor em situações de imersão.



Figura 2.13: Aplicação dos sensores em obra: a) Sensor CorroWatch; b) Sensor Escada.

2.5. SENSORES DE VELOCIDADE DE CORROSÃO

A velocidade de corrosão da armadura é um parâmetro importante a monitorizar nas estruturas de betão armado, principalmente em estruturas expostas a ambientes agressivos como é o caso das obras marítimas. Quanto maior for a agressividade do meio maior é a intensidade da corrosão da armadura e, conseqüentemente, a deterioração do betão envolvente.

Na prática, a velocidade de corrosão é estimada com a aplicação de técnicas de polarização linear que, têm como base a equação de Stern e Geary (1957). O método baseia-se na observação de linearidade da curva de polarização junto ao potencial de corrosão. Ultrapassando as deduções iniciais presentes na bibliografia, a velocidade de corrosão (i_{CORR}) pode ser obtido através da equação 2.6 [65]:

$$i_{CORR} = \frac{B}{R_p A} \quad (2.6)$$

Onde:

B	Constante
R_p	Resistência de polarização
A	Área de exposição da armadura

O valor B é uma constante empírica e pode variar entre 13 e 52 mV, mas para o caso particular do aço embebido no betão o valor usual de B é 26 mV. A resistência de polarização linear (R_p) representa a resistência que um material, inserido num electrólito, oferece à oxidação aquando da aplicação de um potencial externo. Para valores de R_p altos é indicativo de que o material não é susceptível à corrosão. Para o valor da área de exposição a estratégia passa por introduzir um pedaço de aço com área conhecida [40, 65].

A técnica da polarização linear, para o cálculo da R_p , pode ser realizada por 2 ou 3 eléctrodos. Na primeira situação usa-se, particularmente, um eléctrodo de trabalho e outro eléctrodo que faz simultaneamente de eléctrodo de referência e contraeléctrodo. Na segunda situação, usam-se 3 eléctrodos bem discriminados, como eléctrodo de trabalho, que consiste na armadura no qual queremos determinar a velocidade de corrosão, um contraeléctrodo com uma dimensão igual ou superior à do eléctrodo de trabalho e de um material que disperse bem a corrente de polarização e um eléctrodo de referência que servirá para avaliar o sinal eléctrico (Figura 2.14) [40, 65].

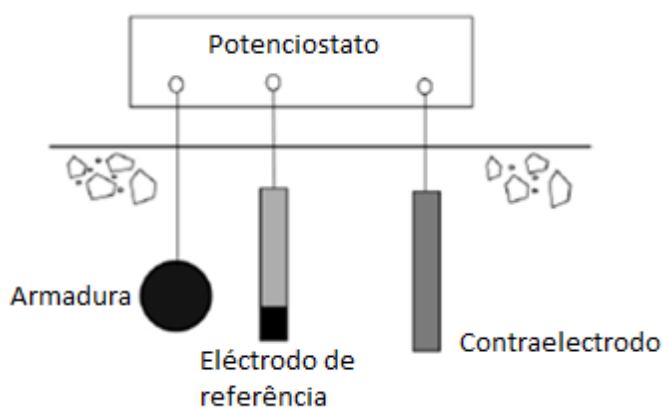


Figura 2.14: Esquema de medição da velocidade de corrosão [40].

Há no mercado, sensores galvânicos com capacidade de monitorizar a velocidade de corrosão como é o caso do sensor galvânico escada, da empresa Sensortec, e o sensor galvânico 900 da empresa Rohrbach Cosasco Systems [62] (Figura 2.12 b) e c)). Tanto no primeiro como no segundo sensor podemos usar 2 ou 3 eléctrodos. No caso de usarmos 3 eléctrodos, utiliza-se uma barra de ânodo como eléctrodo de trabalho, uma barra adjacente a essa como contra eléctrodo e o cátodo como um pseudoeléctrodo de referência. No caso de 2 eléctrodos, usa-se um par de barras adjacente do ânodo, ficando um a funcionar como eléctrodo de trabalho e o outro a funcionar simultaneamente como contra eléctrodo e pseudoeléctrodo de referência.

No entanto, também há no mercado, sensores específicos para monitorizar a velocidade de corrosão das armaduras. Para o efeito, especifica-se o sensor 800 (Corrater Probe, Model 800), da empresa Rohrbach Cosasco Systems [66] (Figura 2.15) e o sensor ECI-1 (Embebed Corrosion Instrument, Model ECI-1) da empresa EléctraWatch [67] (Figura 2.16). No sensor 800, a determinação do R_p é feita com recurso a 2 eléctrodos (duas barras de aço-carbono) que são fixos junto à armadura com 32 milímetros de comprimento. A monitorização pode ser feita com equipamento de medição manual (Corrater Model AquaMate) ou com um sistema de transmissão de dados remota (Corrdata).



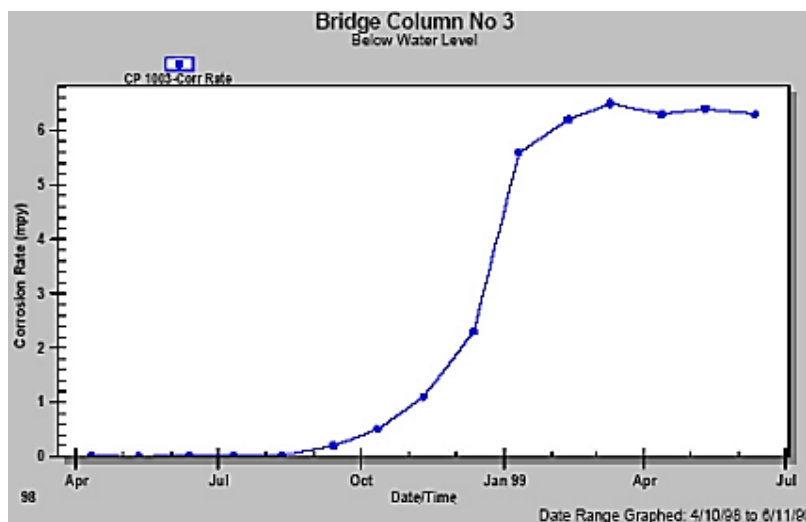
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.15: Kit sensor 800 [66]: a) Sensor em obra; b) Aquisição de dados (Corrater Model AquaMate); c) Transmissão de dados (Corrdata); d) Exemplo de um resultado de medição.

No sensor ECI-1 [67], a determinação de R_p é realizada com o auxílio de 3 eléctrodos (Figura 2.16). Há um eléctrodo de trabalho, uma barra de aço inoxidável é usada como contraelectrodo e um eléctrodo de manganês/óxido de manganês (Mn/MnO_2) é utilizado como eléctrodo de referência. Este sensor também possui um eléctrodo selectivo de $Ag/AgCl$, utilizado para a determinação da concentração de iões de cloreto no betão e sensores de temperatura. Contém ainda quatro barras de aço inoxidável para a determinação da resistividade eléctrica do betão. A determinação da concentração de iões de cloreto é realizada com a monitorização da temperatura e da variação de potencial do eléctrodo $Ag/AgCl$ que é dependente do teor de iões de cloreto na solução aquosa dos poros do betão em relação ao eléctrodo de referência (Mn/MnO_2). Em relação à resistividade eléctrica, esta é determinada pela técnica de quatro pinos. Tipicamente, o sensor ECI-1, é usado para monitorizar a corrosão do aço de um tabuleiro de uma ponte. Para o efeito, os eléctrodos deverão estar colocados de frente para a superfície de betão de forma a que o sensor fique exposto às mesmas condições ambientais que a armadura da estrutura.

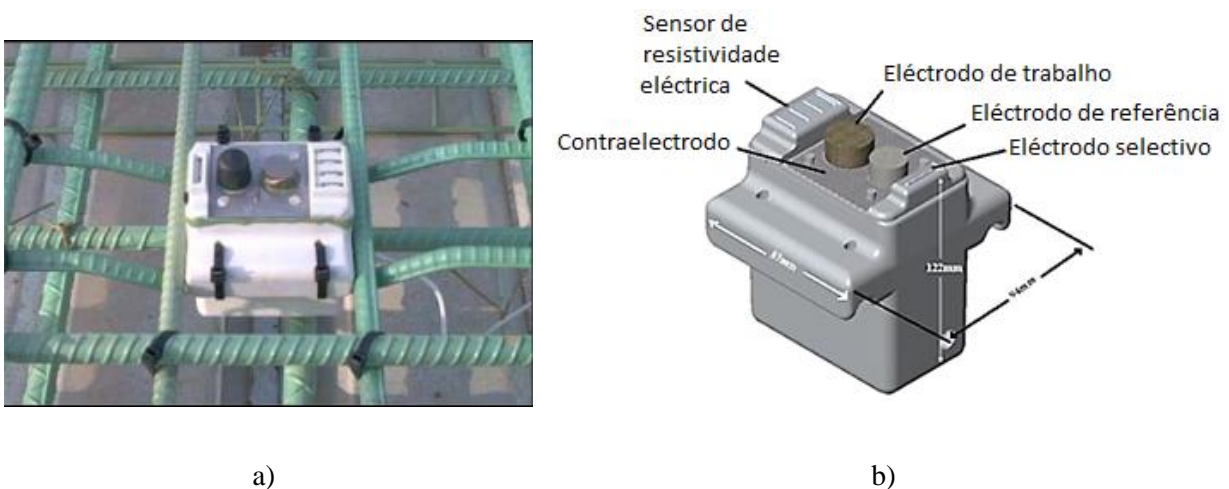


Figura 2.16: Sensor ECI-1 [67]: a) Instalação do sensor em obra; b) Esquema do sensor.

3

SENSORES DE BASE ÓPTICA

3.1. INTRODUÇÃO

Ao longo deste capítulo, são apresentadas as principais tecnologias de base óptica orientadas para a monitorização da durabilidade. Abordam-se, de forma breve, os princípios de funcionamento da fibra óptica e os modos de propagação da luz. Faz-se um resenha de alguns dos desenvolvimentos mais recentes da integração das fibras ópticas em elementos sensores com vista a integra-los na monitorização da durabilidade das estruturas.

3.2. FIBRA ÓPTICA

A fibra óptica é um filamento, de vidro ou de materiais poliméricos, com capacidade de transmissão de luz a longas distâncias com um nível de atenuação muito baixo. Os filamentos responsáveis pela propagação da luz podem ser de vários diâmetros, indo em média dos 125 μm até a 1 mm [68]. Dentro da fibra, a transmissão da luz segue sempre o mesmo princípio: *“a luz entra numa extremidade da fibra e sai pela outra devido a consecutivos fenómenos de reflexões”* [10]. No mercado, existem dois tipos de fibras ópticas. As fibras ópticas de sílica e as fibras ópticas plásticas. Em ambas, a estrutura interna é constituída por 4 camadas como se ilustra na Figura 3.1.

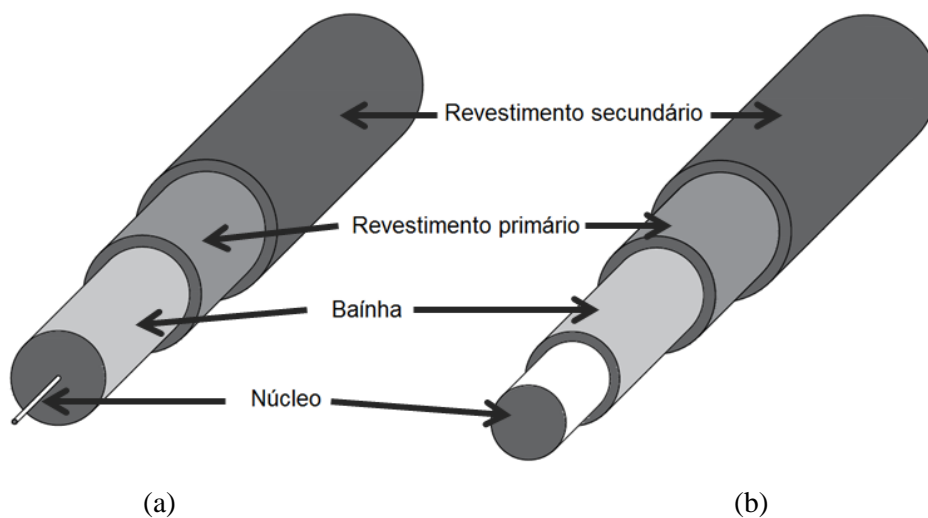


Figura 3.1: Constituição das fibras ópticas: a) Fibra óptica de sílica; b) Fibra óptica plástica.

De entre as camadas, o núcleo e a bainha são os principais meios responsáveis pelo transporte da luz. O núcleo pode ser constituído por vidro ou plástico muito fino, tratando-se de um meio bastante flexível, e é envolvido por uma bainha transparente com um menor índice de refração. As fibras de sílica possuem um núcleo de menor diâmetro comparativamente com o núcleo das fibras plásticas (Figura 3.1). Esta diferença traduz-se nos diferentes modos de propagação da luz. Nas fibras de sílica, devido ao reduzido diâmetro, só é possível a propagação da luz de um único modo (modo fundamental), enquanto que nas fibras plásticas, é possível a propagação da luz de diferentes modos [69]. No entanto, os diferentes modos de propagação não se distinguem apenas pelo diâmetro do núcleo como está referido mais à frente. Para além dessa particularidade, as fibras ópticas de sílica distanciam-se das fibras ópticas plásticas em relação ao nível de atenuação do sinal. As fibras de sílica atingem atenuações à volta de 0,2 dB/km, enquanto que as fibras ópticas plásticas, na generalidade dos casos, apresentam valores de atenuação superiores a 60 dB/km. A razão para esta diferença é devido a defeitos do material e por falta de transparência do plástico em relação ao vidro [68].

O índice de refração do núcleo é superior ao índice de refração da bainha e é esta diferença, nas propriedades ópticas dos dois meios, que potencia o transporte da luz devido à ocorrência de sucessivos fenómenos de reflexão interna [10, 17].

O revestimento primário é a primeira camada com finalidade protectora do núcleo e da bainha. Genericamente esta camada é constituída por acrilato ou poliamida. Os produtos à base de acrilato são mais económicos, mas têm fraca ligação à sílica da bainha e instabilidade térmica a temperaturas elevadas, (85°C), que podem ser facilmente atingidas, por exemplo, durante a cura do betão. Os produtos à base de poliamida são mais estáveis termicamente, (300°C), têm uma maior adesão à sílica da bainha mas são mais dispendiosos [70]. Em termos práticos, o revestimento primário, oferece maior flexibilidade no manuseamento, confere resistência mecânica ao conjunto e minimiza as perdas devido a microcurvaturas [10, 17].

A envolver estas 3 camadas temos o revestimento secundário, oferecendo uma maior robustez à fibra, que complementa a protecção mecânica juntamente com o revestimento primário. Regra geral, o revestimento secundário, é constituído por um tubo interior em PVC envolvido por fibras tipo Kevlar. Exteriormente é reforçado por outro tubo em PVC com requisitos de resistência e durabilidade dependendo da aplicação em questão (Figura 3.2) [17].

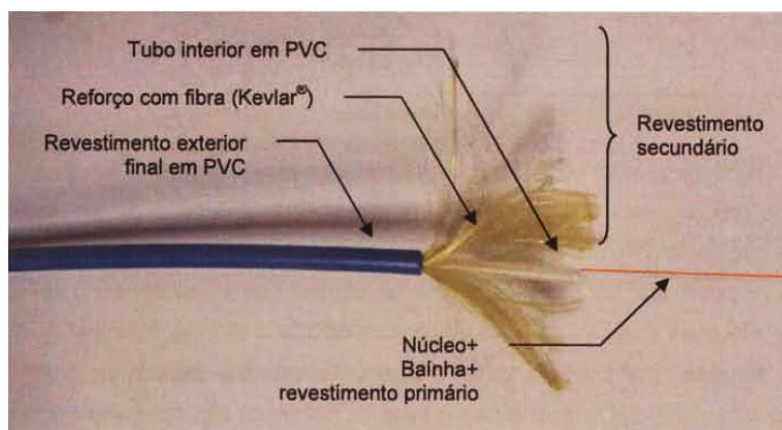


Figura 3.2: Constituição de uma fibra óptica de sílica [17].

As propriedades físicas e mecânicas características da fibra óptica de sílica podem ser resumidas na Tabela 3.1 [10]:

Tabela 3.1: Características físicas e mecânicas de uma fibra óptica de sílica (Adaptado de [10]).

Composição química	SiO_2
Tensão de rotura (MPa)	5
Módulo de Young (GPa)	72
Coefficiente de Poisson	0,17
Extensão de rotura (%)	2-8
Coefficiente de dilatação térmica ($\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$)	0,5
Temperatura de fusão ($^\circ\text{C}$)	1665
Índice de refração	1,46
Atenuação média (dB/km)	0,3

Em termos de características mecânicas destaca-se o módulo de Young com valor a rondar os 72 GPa e a extensão média de rotura que se encontra entre 2% e 8%. Em termos de propriedades ópticas, chama-se especial atenção ao índice de refração médio de 1,46 e à reduzida atenuação média de 0,3 dB/km o que permite a transmissão de sinais a longas distâncias.

Para se compreender o conceito de propagação da luz na fibra óptica é necessário esclarecer e apresentar alguns conceitos e termos técnicos. A Figura 3.3 ilustra os fenómenos de reflexão e refração de um feixe luminoso que incide na interface de 2 meios com os respectivos índices de refração (n_i e n_t).

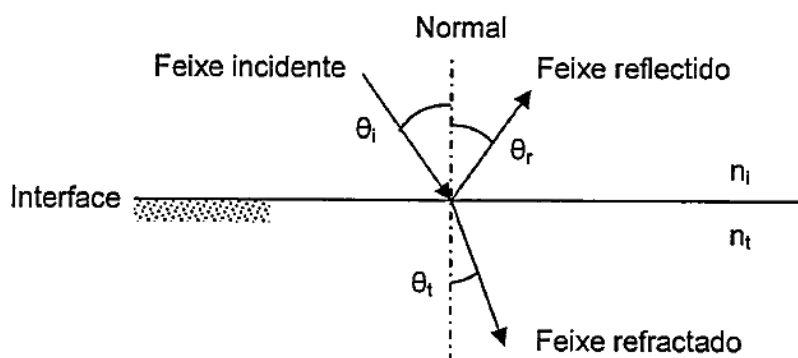


Figura 3.3: Fenómenos de reflexão e refração da luz numa interface [17].

O ângulo que o feixe incidente faz com a normal à interface é designado como ângulo de incidência e está representado por θ_i . Os ângulos θ_r e θ_t são ângulos de reflexão e refração, respectivamente.

A refração é um fenómeno que resulta da velocidade de propagação da luz ser diferente em meios distintos. Desta forma, o índice de refração (n) é dado pelo quociente entre a velocidade da luz no vácuo, c , e a velocidade num dado meio, v , (equação 3.1) [17]:

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.1)$$

Tendo como base a Figura 3.2 e a lei de Reflexão, também designada na bibliografia por lei de Snell, podemos estabelecer a seguinte equação (equação 3.2):

$$n_i \cdot \text{sen}\theta_i = n_t \cdot \text{sen}\theta_t \quad (3.2)$$

Como facilmente se compreende, para diferentes inclinações do feixe incidente também temos diferentes direcções dos feixes reflectidos e refractados. Na Figura 3.4 está ilustrada a incidência de vários feixes na interface entre 2 meios transparentes. Da incidência do feixe 2, com o respectivo ângulo θ_i , resulta um feixe reflectido com um ângulo θ_r (não representado na figura) e um ângulo refractado θ_t . Com o aumento do ângulo θ_i , naturalmente também aumenta o ângulo θ_t . Desenvolvendo esta ideia, chega-se à conclusão de que existe um valor de θ_i para o qual $\theta_t=90^\circ$ (feixe 3) (equação 3.3). Este ângulo é designado na literatura como ângulo crítico (θ_c). Novamente com o recurso à lei de Snell, é possível obter a equação do ângulo crítico (equação 3.4) [17]:

$$n_i \cdot \text{sen}\theta_i = n_t \cdot \text{sen}90^\circ \quad (3.3)$$

Resultando:

$$\text{sen}\theta_c = \frac{n_t}{n_i} \quad (3.4)$$

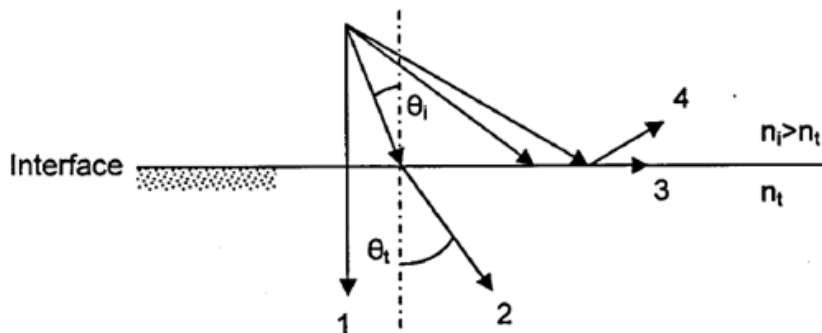


Figura 3.4: Síntese do fenómeno de reflexão interna total [17].

Para valores de incidência superior ao ângulo crítico, toda a luz é reflectida e não ocorre o fenómeno de refracção (feixe 4). Este processo designa-se como reflexão interna total e é o fenómeno que ocorre na transmissão de luz na tecnologia da fibra óptica. Este fenómeno ocorre sempre que seja respeitado o cone de aceitação da fibra. Este cone representa o espaço delimitado pelo ângulo crítico a partir do

qual deixa de haver reflexão interna total e passa a existir reflexão e refração e perde-se luz para o exterior pela bainha (Figura 3.5) [10].

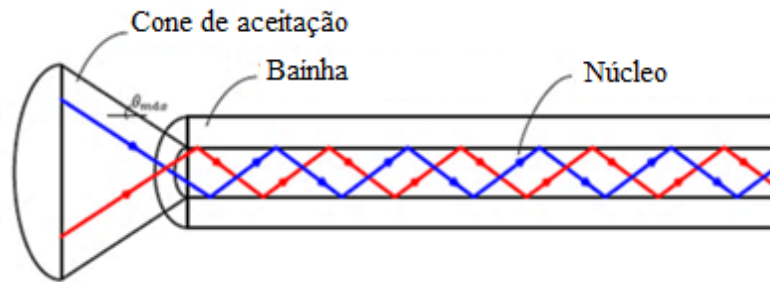


Figura 3.5: Teoria do cone de aceitação. Reflexão interna total da luz dentro da fibra óptica [10].

O ângulo crítico é característico de cada fibra e é especificado por meio de uma abertura numérica, AN, que corresponde à equação 3.5 em que o n_u e n_{ba} são os índices de refração do núcleo e da bainha, respectivamente [10]:

$$AN = \text{sen}\theta_{max} = \sqrt{n_u^2 - n_{ba}^2} \quad (3.5)$$

A título informativo, as fibras ópticas mais utilizadas em sensores ópticos apresentam valores da abertura numérica entre 0,1 e 0,2 [17].

Constata-se que para um determinado comprimento de onda, o modo de propagação da luz, depende sobretudo do diâmetro do núcleo e do quociente entre os diferentes índices de refração das camadas interiores [10]. Os modos de propagação são todas as trajetórias que os raios luminosos podem percorrer dentro da fibra óptica. O número de modos pode variar e tem uma relação com uma grandeza adimensional designada por Frequência Normalizada (V). Esta grandeza, para além de depender do diâmetro do núcleo (d), depende também do comprimento de onda do feixe luminoso (λ) e da abertura numérica (AN) (Equação 3.6) [69]:

Frequência normalizada (V):

$$V = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \cdot AN \quad (3.6)$$

O número de modos (N_m) é definido pela equação 3.7, para fibras ópticas com índice gradual, e pela equação 3.8 para fibras ópticas com índice degrau [69].

$$N_m = \frac{V^2}{4} \quad (3.7)$$

$$N_m = \frac{V^2}{2} \quad (3.8)$$

Uma fibra óptica é caracterizada como monomodo quando a Frequência Normalizada (V) for inferior a 2,405 [69]. Como a Frequência Normalizada é função do comprimento de onda da luz transmitida, é frequente caracterizar as fibras monomodo por um comprimento de onda de corte (λ_c), que é definido como o comprimento de onda a partir do qual a fibra tem um comportamento monomodo [69].

As fibras monomodo caracterizam-se por ter um diâmetro do núcleo da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz transportada (inferior a $10\mu\text{m}$). A luz é composta pela soma de ondas electromagnéticas, mas as fibras monomodo só transportam um modo de luz com um comprimento de onda específico (Figura 3.6 a)). As vantagens das fibras monomodo são a eliminação da dispersão intermodal, devido a atrasos variáveis que cada modo pode sofrer durante a propagação, atenuando a perda de sinal e, conseqüentemente, aumentando a taxa de transmissão [10, 17].

As fibras multimodo possibilitam a propagação de vários modos de luz e o núcleo pode variar entre $50\text{-}200\mu\text{m}$ para as fibras “step-index” e entre $50\text{-}100\mu\text{m}$ para as fibras “graded index”. As fibras “step-index” correspondem a fibras com índice de refração do núcleo constante ao longo do seu diâmetro (Figura 3.6 b)). As fibras “graded index” correspondem a fibras com um gradiente do índice de refração (Figura 3.6 c)). Estas fibras possuem um grande diâmetro comparativamente com o comprimento de onda da luz transmitida ($=1\mu\text{m}$) [17]. O facto do diâmetro do núcleo das multimodo ser superior ao monomodo isso traz vantagens na acoplagem da luz à fibra. Como o núcleo não tem dimensões reduzidas, comparativamente com as fibras monomodo, o seu fabrico torna-se mais fácil e conseqüentemente mais barato. No entanto, as fibras “graded index” necessitam de cuidados especiais devido à variação gradual do índice de refração do centro até à periferia do núcleo.

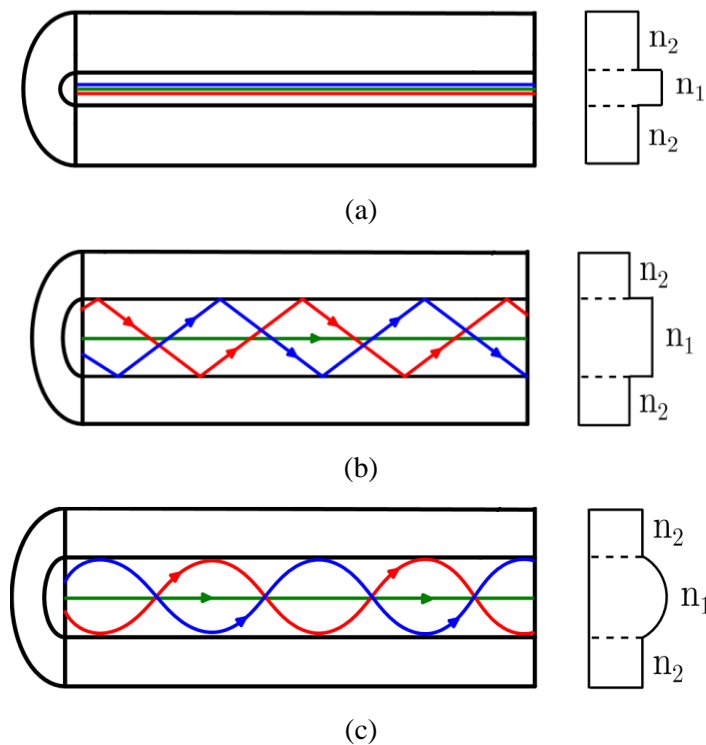


Figura 3.6: Fibras ópticas [10]: a) Fibra monomodo; b) Fibra multimodo (step-index); c) Fibra multimodo (graded index).

3.2.1. TERMINAÇÕES ÓPTICAS

As terminações ópticas são basicamente constituídas por conectores. Têm a função de conectar e/ou desconectar, de forma fácil e frequente, fibras ópticas a uma fonte luminosa ou realizar uma emenda não permanente. Um conector é basicamente um acessório aplicado à extremidade da fibra, que contém o núcleo centrado num elemento de precisão, designado ferrule (Figura 3.7 a)). A ligação entre dois conectores é realizada com o alinhamento preciso dos dois ferrules, consequentemente do núcleo das fibras, no interior de um adaptador (Figura 3.7 b)). Os conectores são responsáveis pela fixação das fibras e tendem a evitar perdas de sinal. Há cuidados a ter na realização da conexão tais como, ambiente limpo, temperatura controlada e baixo nível de humidade [17].

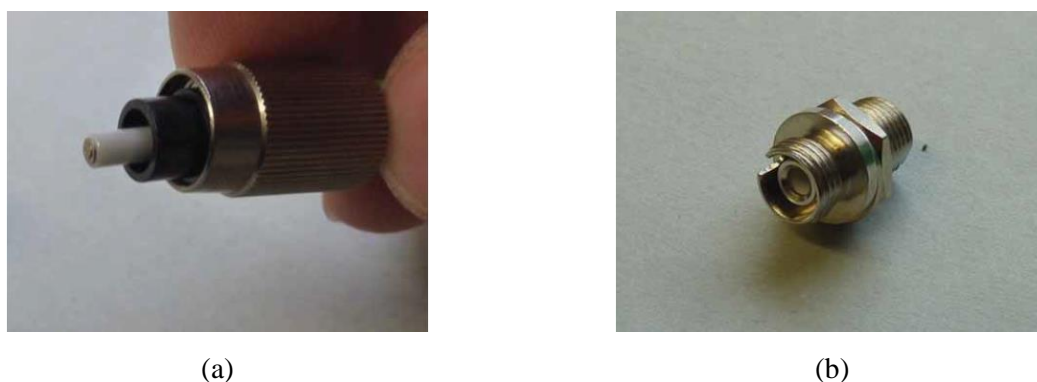


Figura 3.7: Conexão em fibras ópticas [10]: a) Conectores e respectivo ferrule; b) Adaptador para alinhamento de ferrules.

No mercado existem vários tipos de conectores, com determinados requisitos específicos, no entanto, os tipos de conectores mais usados são: ST, SC e SC Duplex (Figura 3.8). Todavia, os conectores que têm apresentado vantagens na incorporação prática na rede de sensores é o conector FC/APC. As suas características de robustez, facilidade de manuseamento e de limpeza e perdas de atenuação diminutas tornam este tipo de conector o mais usado pela maioria dos fabricantes de sensores e equipamentos de aquisição [10].

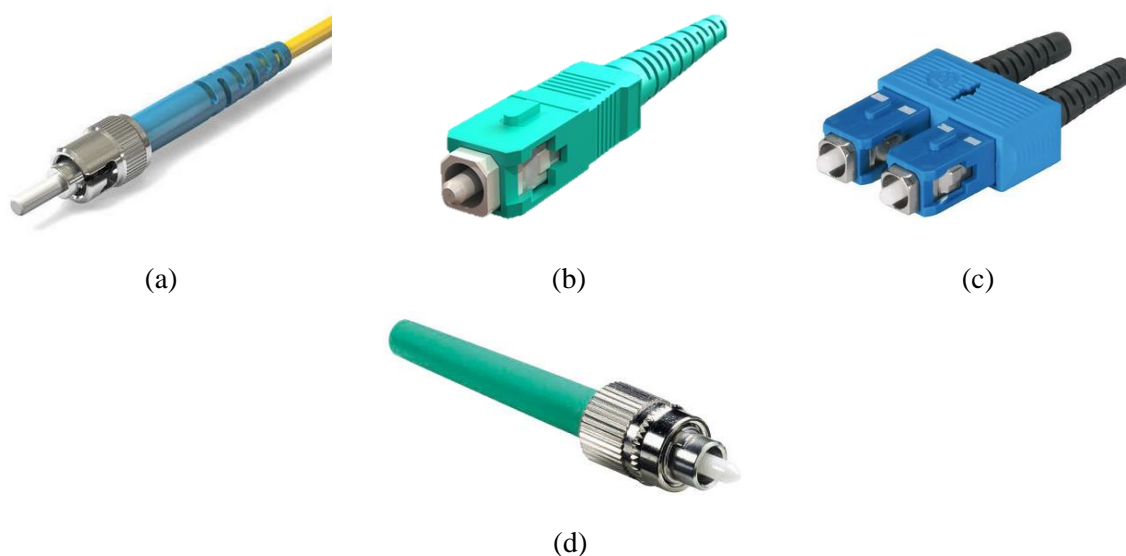


Figura 3.8: Conectores para fibras ópticas comercializados pela empresa Libócabos [71]: a) Conector ST; b) Conector SC; c) Conector SC Duplex; d) Conector FC/APC.

3.2.2 EMENDAS

A emenda de duas fibras ópticas pode ter um carácter permanente ou provisório. Se tiver um carácter permanente recorre-se à emenda por fusão (Figura 3.10). Se a emenda tiver um carácter provisório utilizam-se conectores ópticos (Figura 3.11). No entanto, antes do processo da emenda propriamente dito, há uma fase de preparação das fibras que inclui a remoção do revestimento das 2 extremidades da fibra sem danificar o núcleo. Para o efeito, utiliza-se um decapador de fibra óptica que deve ser escolhido em função do tipo de diâmetro e do tipo de revestimento. Para que a fusão das 2 fibras seja possível não pode haver imperfeições nas extremidades, por isso, e uma vez decapadas, as fibras antes de serem instaladas na máquina de fusão, elas são cortadas usando uma máquina de corte designada clivador, que evita essas imperfeições. A Figura 3.9 ilustra um modelo comercial de um clivador de precisão, da empresa Furukawa Electric Co [72]. Ao seleccionar estes acessórios de corte deve-se ter em conta o diâmetro e o tipo de revestimento. Os resíduos provenientes do corte são armazenados num colector próprio, fazendo com que a zona de corte esteja sempre limpa [17].



Figura 3.9: Clivador para fibras ópticas comercializado pela empresa Furukawa Electric Co [72]: a) Clivador S326 High precision Optical Fiber Cleaver; b) Pormenor do equipamento na mão do utilizador.

As emendas por fusão da sílica consistem em “fundir” as extremidades das fibras ópticas de forma a torna-las contínuas. No processo é utilizado um arco eléctrico num equipamento de precisão, sendo incorporado com um sistema automático de alinhamento das fibras. Os sistemas mais evoluídos incluem funções de inspecção do ângulo de clivagem, ensaio à tracção da zona da emenda e indicam uma estimativa das perdas locais resultantes, que não deverão ultrapassar os 0,2 dB [17]. As fibras são inseridas num equipamento, designado por V-Groove, e este tem o papel de as alinhar de forma a ficarem a 1mm de distância, evitando que estas se encostem (Figura 3.19 a) e b)). Após este processo, as fibras são fundidas com auxílio de arcos voltaicos gerados por 2 eléctrodos, tornando as fibras contínuas [17]. No fim, a emenda é envolvida por um acessório designado como protector de emendas, para protecção mecânica (Figura 3.10 c)). Para o efeito, usa-se um tubo em aço inox envolvido por uma manga termo-retráctil. Outra opção é utilizar bandas em material acrílico com um sistema de fecho por encaixe [17].

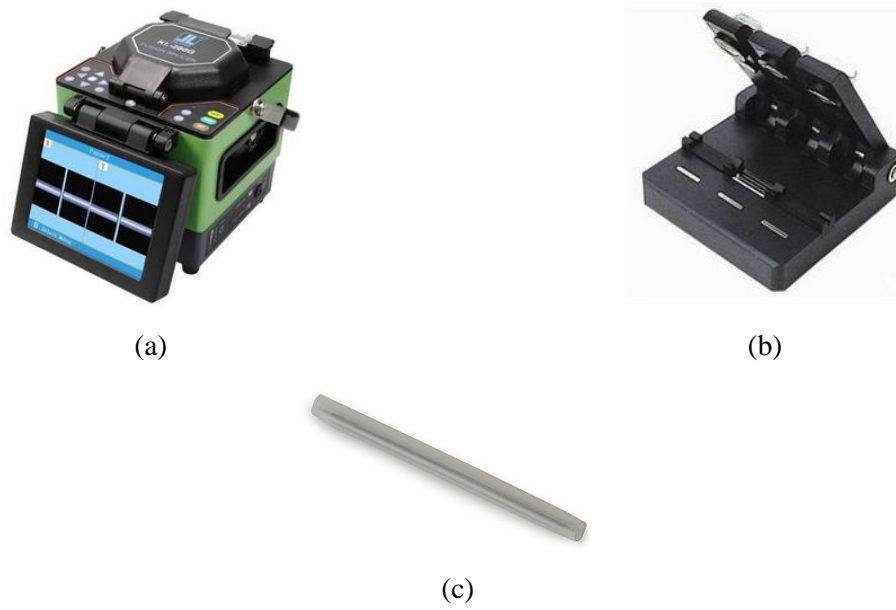


Figura 3.10: Equipamento utilizado nas emendas das fibras ópticas: a) Máquina de fusão JILONG KL-280G [73]; b) Alinhador de fibras V-GROOVE KL-510 [74]; c) Protector de emendas termo-retráctil [75].

Na Figura 3.11 a) e b) ilustra-se uma emenda com carácter provisório utilizando conectores ópticos.

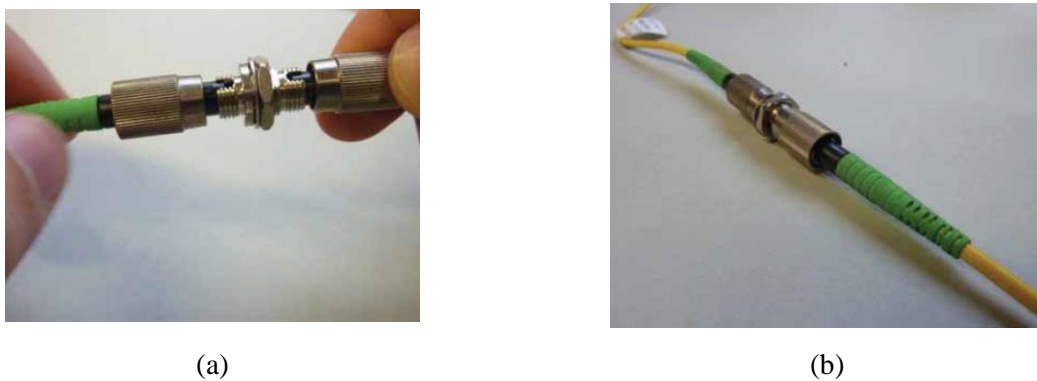


Figura 3.11: Emenda provisória [10]: a) Emenda provisória com recurso a conectores FC/APC; b) Outra perspectiva da emenda;

3.3. TECNOLOGIA DOS SENSORES DE BASE ÓPTICA

As múltiplas tecnologias relacionadas com sensores de fibra óptica têm sido investigadas e descobertas explorando as propriedades da luz e das fibras. Deste modo, propriedades ópticas, têm sido analisadas para avaliação de parâmetros físicos e químicos com recurso à medição de variações nas propriedades da luz, como a intensidade, comprimento de onda ou fase. Também existe outra propriedade da luz que entra na análise para a avaliação de parâmetros físicos e químicos como é a polarização. No entanto, no contexto deste documento não será abordada.

Todos os sensores em fibra óptica têm uma premissa em comum: *“Recorrem ao impacto que determinadas grandezas externas têm sobre as propriedades ópticas da fibra e à respectiva consequência que se traduz na alteração das características da luz”* [10] (Figura 3.12).

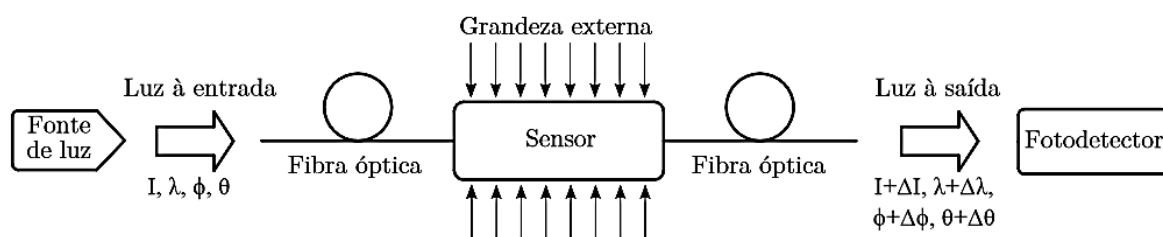


Figura 3.12: Princípio de funcionamento dos sensores ópticos [10].

Os sensores de fibra óptica podem, de um modo geral, ser classificados não só pelo aspecto físico do sensor, mas também pelo princípio de medição. A classificação dos sensores pode ser baseada nos seguintes critérios [10]: i) Natureza do elemento sensor (Figura 3.13); ii) Base de medida (Figura 3.14); iii) Princípio de medição (Tabela 3.2).

Relativamente à natureza do elemento sensor, os sensores em fibra óptica podem ser classificados em 2 domínios: intrínsecos ou extrínsecos. Esta distinção refere-se à região onde a grandeza exterior é sentida, no exterior ou no interior da fibra óptica (Figura 3.13). No caso dos sensores intrínsecos, a própria fibra óptica funciona simultaneamente como transdutor e meio de comunicação. O feixe de luz, ao percorrer a fibra, modifica-se devido à actuação do meio envolvente da fibra óptica, estando o elemento sensor integrado nela própria. A luz é conduzida desde a fonte até ao fotodetector sempre dentro da fibra óptica. Esta característica representa claramente uma vantagem deste tipo de sensores, que é ser imune a ambientes sujos. A título de exemplo, temos os sensores de Bragg e o interferómetro intrínseco de Fabry-Perot (IFPI), como sendo sensores intrínsecos.

No caso dos sensores extrínsecos, a fibra óptica actua unicamente como meio de transmissão da luz para um dispositivo sensor externo à fibra. O dispositivo sensor recebe a luz, oriunda da fibra óptica, e esta sofre variação consoante a perturbação física que esteja a ocorrer e envia novamente pela fibra óptica até atingir o fotodetector. Assim, ao contrário do caso anterior, o efeito óptico ocorre num meio exterior à fibra óptica. Exemplos destes tipos de sensores são os sensores intensiométricos, sensores químicos, sensores reflectivos, o sensor interferómetro extrínseco de Fabry-Perot (EFPI) e o sensor POF (plastic optical fibre).

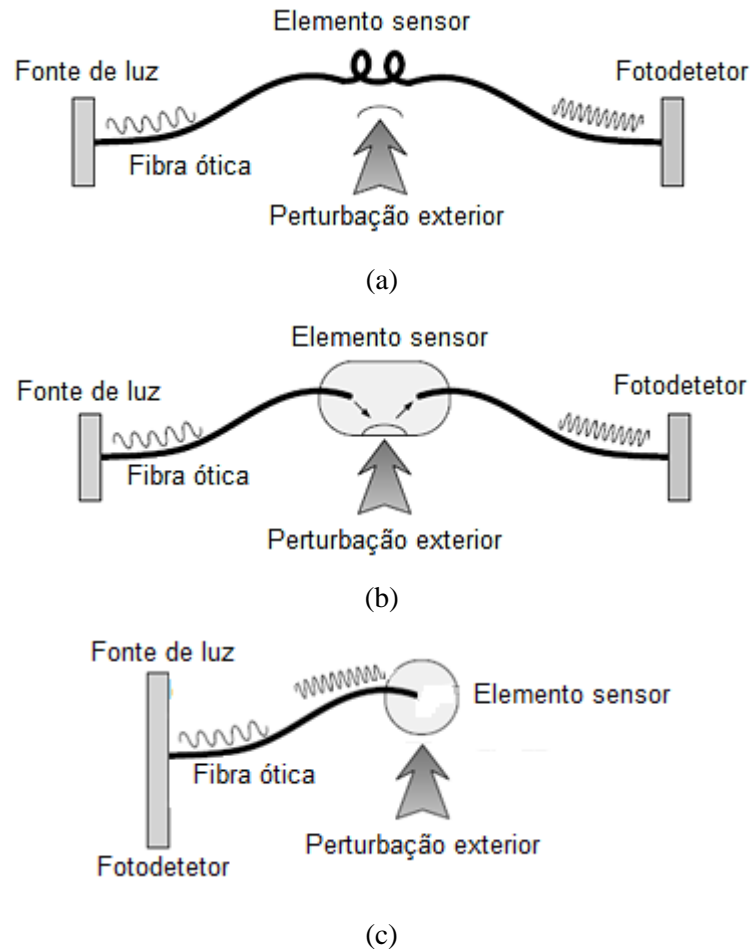


Figura 3.13: Natureza do elemento sensor: a) Sensor intrínseco [17]; b) Sensor extrínseco [17]; c) Sensor extrínseco-reflexivo (Adaptado de [17]).

Confrontando os dois tipos de sensores apresentados, destaca-se o facto de que os sensores intrínsecos apresentam algumas vantagens comparativamente com os sensores extrínsecos, tais como [76]:

- Maior sensibilidade;
- Maior facilidade de multiplexagem;
- Eliminam as dificuldades de ligação das fibras ópticas que existem nos sensores extrínsecos;
- Menor tamanho, o que implica menor intrusão e menos dificuldades para serem embebidos;

No âmbito comercial, pelas razões apresentadas, os sensores intrínsecos tendem a ser mais sólidos e mais polivalentes na sua instalação. Estas vantagens conseguem suplantar o seu maior aspecto negativo que é o de representarem um maior esforço financeiro comparativamente com os sensores extrínsecos [76].

Relativamente à base de medida, os sensores de fibra óptica, podem ser classificados como sendo, pontuais, de base longa de medida, distribuídos ou quasi-distribuídos (Figura 3.14 e Figura 3.15) [77].

Os sensores pontuais caracterizam-se pela medição de grandezas em pontos discretos em que tipicamente medem parâmetros físicos com dimensões não superiores a 20 mm (Figura 3.14 a)). Este tipo de sensores são apropriados para avaliação dos efeitos locais e refere-se a título de exemplo dois tipos de sensores, os sensores de Bragg e os interferómetros de Fabry-Perot [76].

Os sensores de base longa de medida, como o próprio nome indica, o princípio de medição leva à obtenção de valores médios de uma determinada grandeza ao longo de comprimentos de medição que podem variar desde alguns centímetros até centenas de quilómetros (Figura 3.14 b)). Este tipo de base de medida é o ideal para aferir variações globais, integrando os efeitos locais [17].

Os sensores distribuídos são uma tecnologia ímpar dos sensores em fibra óptica [10]. Este tipo de morfologia permite a avaliação de uma determinada grandeza física ao longo do comprimento total do sensor fazendo tudo isto de forma contínua no espaço (Figura 3.15 a)). O comprimento deste tipo de sensores pode atingir vários quilómetros o que os torna potencialmente adequados para estruturas de grande desenvolvimento como barragens, obras geotécnicas e oleodutos. Este tipo de sensores são potenciados pela tecnologia dos sensores de Raman e Brillouin [10, 17].

Ao conjunto de vários sensores pontuais colocados, atribui-se a classificação de **sensores quasi-distribuídos**, que também podem ser denominados por sistema multiplexado ou multiponto. Apesar de não serem um sensor verdadeiramente distribuído, eles permitem obter perfis espaciais de determinadas grandezas físicas através das medições realizadas pelo conjunto de pontos discretos (Figura 3.15 b)). A forma mais comum de conceber este tipo de sensores é através da multiplexagem em série de sensores de Bragg [10].

O princípio de medição também é um critério de classificação dos sensores ópticos. É através do elemento transdutor que as propriedades da luz são modeladas conforme a perturbação física exterior envolvente ao sensor. Regra geral, são quatro as propriedades da luz utilizadas na medição das perturbações exteriores, nomeadamente a intensidade, o comprimento de onda ou a fase. A Tabela 3.2 reúne as respectivas técnicas de modelação da luz anteriormente apresentadas bem como os mecanismos físicos. Nos próximos pontos são apresentadas várias tecnologias de sensores em fibra óptica, explicando o seu funcionamento, para monitorizar parâmetros da durabilidade das estruturas de betão.

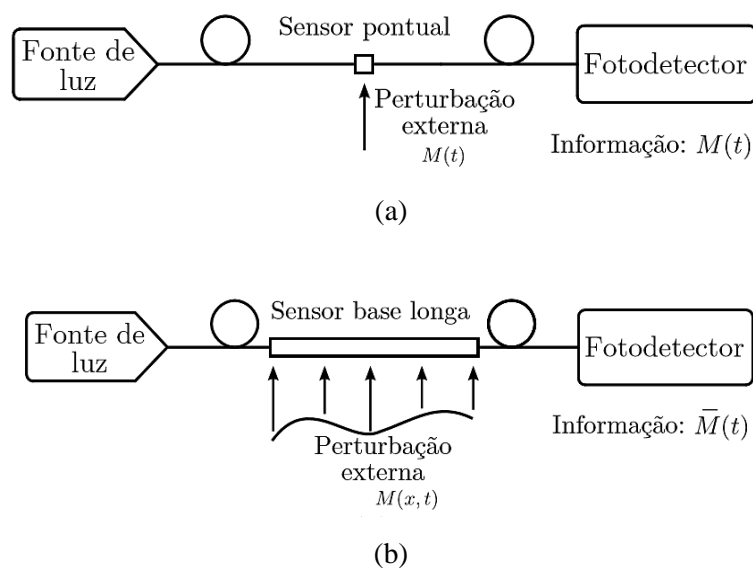


Figura 3.14: Base de medida: a) Sensor pontual; b) Sensor de base longa;

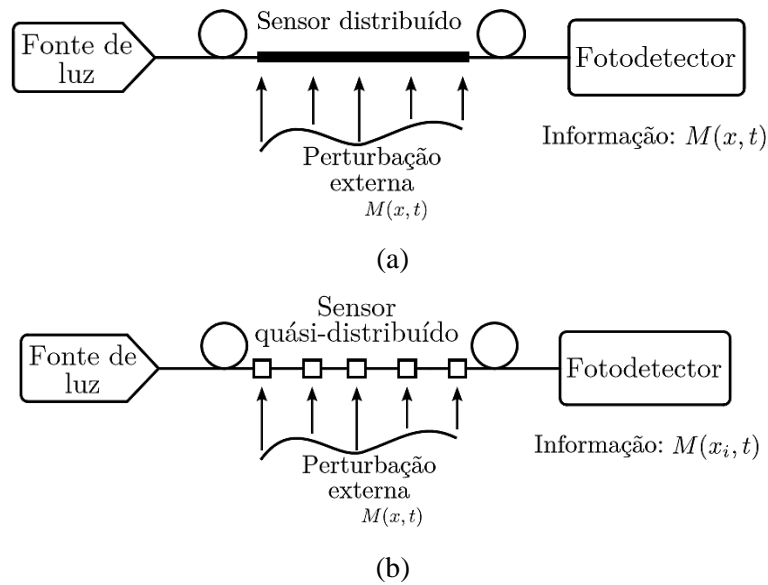


Figura 3.15: Base de medida [10]: a) Sensor distribuído; b) Sensor quási-distribuído.

Tabela 3.2: Técnicas de modulação da luz e mecanismos físicos [17].

Modulação	Mecanismo físico
Intensidade	Mudança na luz transmitida devido à alteração da absorção, emissão ou dispersão
Fase	Interferência entre o sinal sentido e um sinal de referência
Comprimento de onda	Dependência do comprimento de onda face à reflexão, absorção, emissão e índice de refração

3.3.1. SENSORES INTENSIMÉTRICOS

Os sensores intensiométricos tem como princípio de funcionamento a modulação da intensidade da luz transmitida pelo núcleo da fibra óptica. São sensores com um funcionamento muito simples, económico e de pequena dimensão [17]. Desse modo, foram os primeiros sensores em fibra óptica a ser desenvolvidos e ainda continuam a ser utilizados como sensores de detecção de danos [12] e na monitorização da cura do betão [78, 79].

Existem diferentes sistemas para aplicabilidade deste tipo de sensores. Nos sistemas mais simples apenas é necessário uma fonte de luz estável, uma fibra multimodo de forma a transmitir uma maior potência óptica e um fotodetector. Neste tipo de sensores a grandeza externa a medir pode interagir directamente com a fibra ou então é usado um transdutor de forma a aplicar uma pressão, fazendo variar a intensidade da luz transmitidas (Figura 3.16 a)) [10, 17].

Apesar deste tipo de sensores basearem-se na perda da intensidade transmitida é necessário ter em conta as perdas da instalação, flutuações da intensidade da fonte óptica e dos conectores. Torna-se por

isso, necessário compensar as perdas usando um canal de referência [17]. Na Figura 3.16 b) está esquematizado o princípio geral de medição usado em sensores intensiométricos.

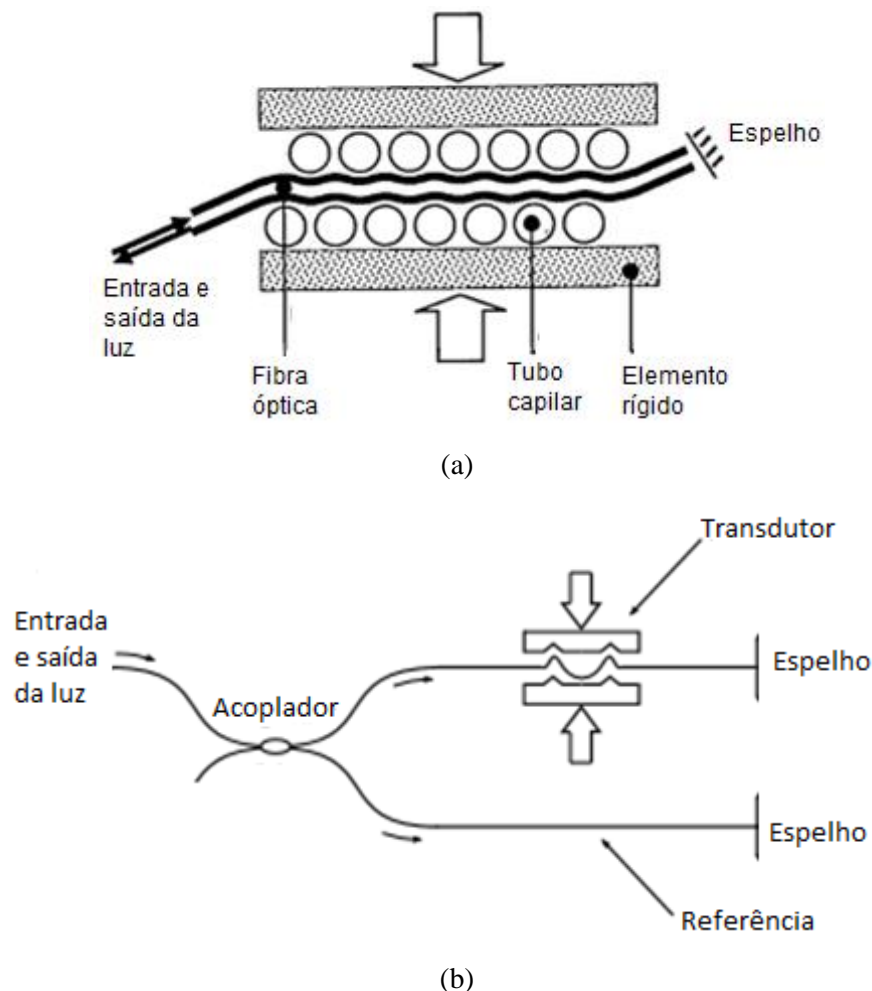


Figura 3.16: Sistemas de medição: a) Medição da grandeza externa através de um transdutor [17]; b) Princípio de medição dos sensores intensiométricos [10].

3.3.2. SENSORES DE BRAGG

As redes de Bragg são denominadas na literatura internacional como (FBG- *Fiber Bragg Gratings*). Podem ser classificadas como “*enabling technologies*”, pois proporcionam o desenvolvimento célere e eficaz de novos sensores cujas vantagens superam as limitações dos sensores electroquímicos tradicionais na medição de parâmetros de durabilidade [80]. Com o auxílio de sensores ópticos, baseados em redes de Bragg, é possível desenvolver sistemas inteligentes, funcionando de forma dinâmica, tomando decisões baseadas nos parâmetros monitorizados. Exemplos de sistemas inteligentes são as “*smart structures*”, que reduzem vibrações indesejadas, garantindo assim a estabilidade e segurança estrutural [81]. As suas aplicações são amplas e diversas em vários campos. Actualmente têm sido amplamente usadas na monitorização estrutural, no cálculo de extensões, mas também, há grandes desenvolvimentos deste tipo de sensores na monitorização da durabilidade das estruturas [82-86].

O princípio de funcionamento das redes de Bragg, assenta na possibilidade de fotoinduzir numa pequena extensão no núcleo da fibra uma modulação periódica permanentemente do índice de refração do núcleo. Desta forma, uma rede de Bragg actua como elemento filtro, ou seja, através de um fenómeno de difracção reflecte uma gama de comprimentos de onda e ao mesmo tempo permite que as outras gamas de comprimentos de onda continuem a transmissão sem qualquer perturbação [17]. O comprimento de onda reflectido, designado também por comprimento de onda de Bragg, é dado pela equação 3.9:

$$\lambda_b = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda \quad (3.9)$$

Onde:

λ_b	Comprimento de onda de Bragg reflectido
n_{eff}	Índice efectivo de refração da fibra
Λ	Período espacial de modulação da rede de Bragg

As variações do comprimento de onda de Bragg são dependentes de alterações, por um lado no período espacial de modulação da rede e por outro no índice efectivo de refração. Todas estas alterações são decorrentes de variações de grandezas externas como a temperatura e a deformação que o sensor está sujeito [17]. Na Figura 3.17 está ilustrado o princípio de funcionamento de uma rede de Bragg.

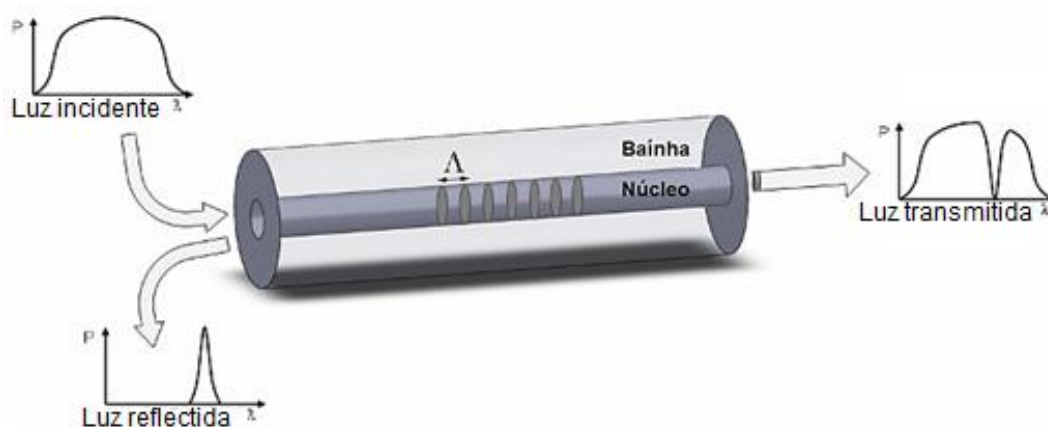


Figura 3.17: Representação esquemática do princípio de funcionamento de uma rede de Bragg [87].

A gravação das redes de Bragg em fibras ópticas só foi exequível com a descoberta do efeito fotorefrativo, que consiste na mudança do índice de refração do núcleo através de um feixe de luz incidente. A partir daqui novos métodos foram desenvolvidos e o mais importante foi a escrita holográfica (método holográfico) das redes de Bragg, também conhecido como método interferómetro [88]. Mais tarde um novo avanço foi apresentado, com a introdução da máscara de fase, Figura 3.17. Com esta técnica, a gravação das redes de Bragg, tornou-se mais expedita e controlada e permitiu a aplicação sensorial com comprimentos de alguns milímetros de desenvolvimento [10].

Na figura 3.18 está ilustrado o processo de gravação das fibras ópticas utilizando o método da máscara de fase. Uma máscara de fase é um elemento difractivo fabricado à base de sílica e transparente à luz

ultravioleta. A máscara ao ser perpendicularmente iluminada por radiação ultravioleta surgem duas franjas de interferência de elevada sensibilidade que ao interferir com a fibra óptica irá alterar o índice de refração do núcleo nos locais onde a interferência for máxima. Estas modificações no núcleo da fibra formam uma estrutura periódica que constitui a rede de Bragg [88]. Na Figura 3.19 a) está ilustrado o equipamento para o fabrico das redes de Bragg e na Figura 3.19 b) é representado um pormenor da gravação de uma rede de Bragg numa fibra óptica de sílica [68].

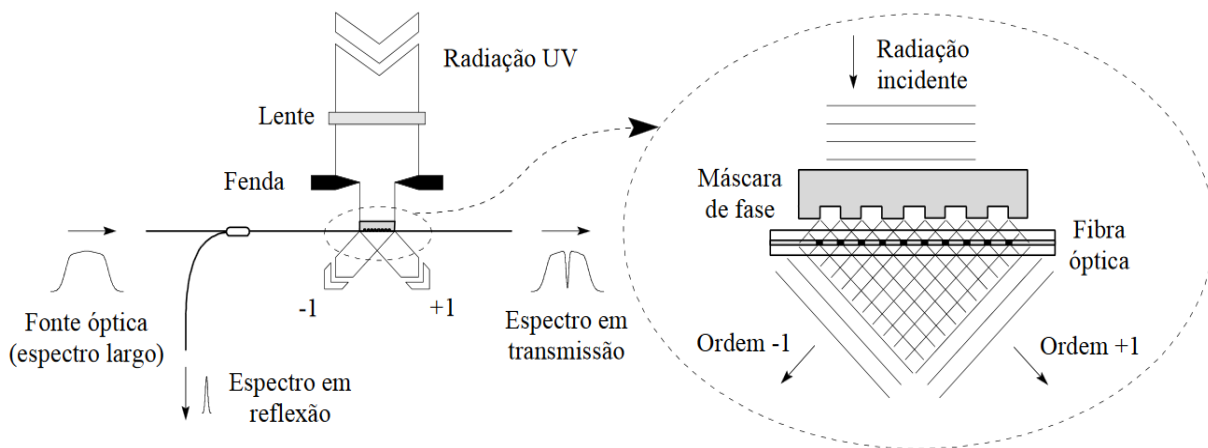
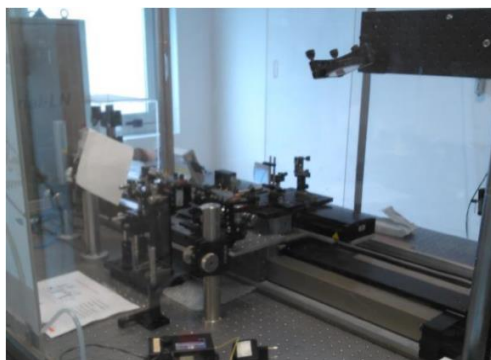
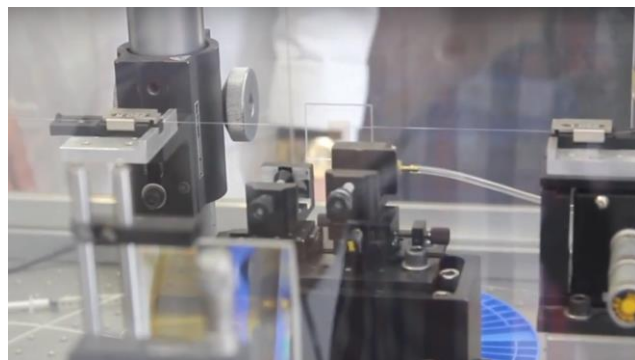


Figura 3.18: Ilustração da técnica de gravação das redes de Bragg utilizando máscara de fase [88].



(a)



(b)

Figura 3.19: Gravação das redes de Bragg [68]: a) Equipamento para fabrico das redes de Bragg; b) Gravação de uma rede de Bragg.

3.3.3. SENSORES INTERFEROMÉTRICOS

Os sensores interferométricos baseiam-se na modulação da fase da luz recorrendo à interferometria óptica. O princípio de funcionamento dos sensores interferométricos tem como base a divisão dos feixes de luz emitidos por uma determinada fonte, enviando-os por caminhos diferentes de forma a que sejam afectados de forma distinta pela grandeza externa a medir. Consequentemente, quando os dois feixes de luz são combinados apresentam uma potencial diferença de fase dependente das variações das características de propagação da luz nos dois diferentes percursos [10]. Há várias configura-

ções de interferómetros que podem ser usadas na medição da diferença de fase da luz sendo as mais comuns os interferómetros de Michelson, Mach-Zehnder e Fabry-Perot [10, 17].

O **interferómetro de Michelson** acomoda uma configuração bastante comum e de fácil compressão. O seu funcionamento passa por enviar um feixe de luz em que esta é dividida por um acoplador entre duas fibras ópticas. Uma parte da luz percorre uma fibra óptica designada activa, em que estará exposta às perturbações induzidas exteriormente, e outra, designada como referência, que se encontra imune às interferências e perturbações do meio. Nas extremidades das duas fibras ópticas encontram-se espelhos para reflectirem a luz, que percorre agora o percurso inverso em direcção ao fotodetector. O fotodetector irá receber a combinação dos dois feixes com diferenças de fase, uma vez que percorreram caminhos diferentes. Esta técnica permite a medição rigorosa de alterações de fase da luz e, consequentemente, permite avaliar as alterações que o meio induziu à fibra activa quando equiparada com a fibra de referência. Este tipo de interferómetro é utilizado em sensores de deformação [10, 17]. O esquema de medição está representado na Figura 3.20 a).

Outro tipo de configuração dos interferómetros existentes é designado como o **interferómetro de Mach-Zehnder**. A sua configuração é mais complexa que a anterior, utiliza de forma análoga duas fibras ópticas, uma de referência e outra activa, mas agora são introduzidos dois acopladores direccionais para criar dois feixes de luz em oposição de fase. Neste tipo de interferómetros a fonte de luz e o fotodetector estão em extremidades opostas. Este, enquanto elemento sensor, tem tido aplicação muito reduzida [10, 17]. O esquema de medição está representado na Figura 3.20 b).

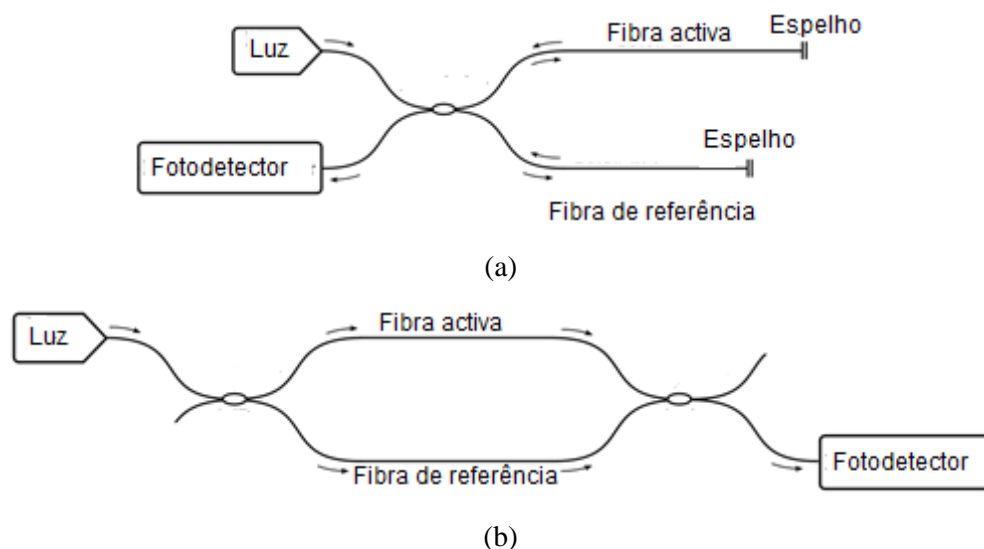


Figura 3.20: Esquema de medição dos sensores interferométricos[10]: a) Interferómetro de Michelson; b) Interferómetro de Mach-Zehnder.

Por fim, temos o **interferómetro Fabry-Perot**, que é o único que permite a medição recorrendo apenas a uma fibra óptica, o que facilita a sua instalação e torna imune aos efeitos devidos à variação da temperatura [17]. Este sensor utiliza uma cavidade óptica definida por dois planos paralelos entre si e perpendiculares ao eixo longitudinal da fibra a uma distância L . Esta cavidade pode ser intrínseca e a fibra funciona como elemento sensor ou extrínseca em que o elemento sensor é externo à fibra [10]. A

respectiva diferença de fase varia com a diferença da distância entre os planos paralelos, ou seja, pela alteração do comprimento da cavidade óptica. O esquema de medição está representado na Figura 3.21.

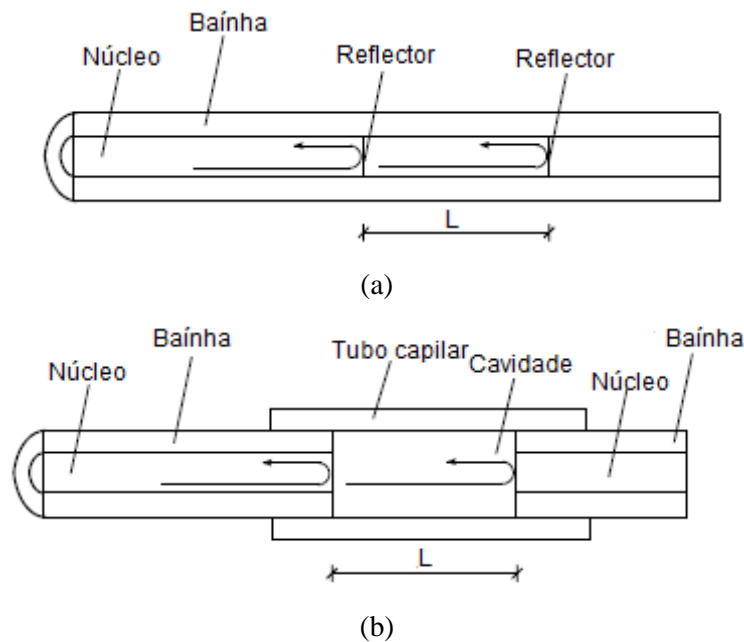


Figura 3.21: Esquema de medição do sensor interferométrico de Fabry-Perot [10]: a) Sensor intrínseco; b) Sensor extrínseco.

Em relação aos três tipos de interferómetros apresentados, o interferómetro de Fabry-Perot, é aquele que apresenta uma maior aplicação em termos práticos. Apresenta claramente vantagens em relação aos demais, principalmente pelo facto da grandeza medida, L , ser um parâmetro absoluto. O sinal de saída dos feixes luminosos nada depende da intensidade da luz, das perdas nas emendas ou nos acopladores. Na prática corrente, os sensores Fabry-Perot, têm sido bastante utilizados na monitorização estrutural, para fabrico de extensómetros, mas também têm uso como sensores de temperatura [17]. De entre todas as potenciais aplicações relacionadas com este tipo de sensores de fibra óptica, estudos desenvolvidos têm apontado para a sua integração na monitorização de parâmetros químicos ou biológicos devido ao pequeno tamanho, flexibilidade e capacidade de leituras in-situ. Nesta óptica foi elaborado um sensor interferómetro de Fabry-Perot para a monitorização directa da corrosão [89, 90]. A vantagem deste tipo de sensor ser usado na medição da corrosão prende-se com o facto de que é muito sensível a variações de extensões provocadas pela corrosão, durante longos períodos, mas também, por ser insensível a cargas transversais [91].

3.3.4. SENSORES DISTRIBUÍDOS

Os sensores distribuídos fundamentam-se num fenómeno natural intrínseco à transmissão de luz nas fibras ópticas. O fenómeno verifica que uma porção de luz é continuamente espalhada ao longo da fibra devido a perturbações locais [10]. As perturbações locais são sensíveis a variações de temperatura e de deformação. Apesar da maioria do espalhamento se perder para o meio exterior, o espalhamento na direcção longitudinal propaga-se e pode ser detectado nas duas extremidades usando técnicas de

desmodulação adequadas. As causas inerentes ao respectivo espalhamento têm o nome dos respectivos investigadores que as descobriram, nomeadamente Rayleigh, Raman e Brillouin.

O espalhamento de Rayleigh acontece devido à existência de heterogeneidades microscópicas no núcleo da fibra, provocando uma reflexão simples com o mesmo comprimento de onda da luz incidente. Deste modo, a componente Rayleigh não apresenta qualquer vantagem como elemento sensor [10, 17].

Neste sentido, os sensores distribuídos recorrem somente ao espalhamento de Raman e Brillouin. Os dois efeitos estão relacionados com a interacção da luz com as vibrações moleculares e ondas acústicas termicamente geradas. Com efeito, associa-se a sensibilidade da componente Raman a variações de temperatura e a sensibilidade simultânea da temperatura e deformação da componente Brillouin. Associado a estes fenómenos, se forem utilizadas técnicas de desmodulação por meio de impulsos de luz, consegue-se monitorizar grandezas distribuídas de diferentes pontos ao longo da fibra [10, 17].

De uma forma geral, o espalhamento de Raman, é um efeito não linear, determinado pela interacção da luz com a própria matéria da fibra (moléculas). O resultado desta interacção é o aparecimento espontâneo de novas componentes espectrais com frequências diferentes da luz de excitação (componente Stokes e Anti-Stokes) (Figura 3.22). Os campos de Stokes e Anti-Stokes propagam-se nos dois sentidos, mas são aqueles que vão em direcção ao espectómetro, na qual se processa a informação ao longo do tempo. Este processo também pode ser realizado recorrendo à utilização de uma técnica avançada designada OTDR (reflectómetro óptico no domínio do tempo). Esta técnica permite a avaliação das intensidades do campo Stokes e Anti-Stokes associado ao tempo de chegada do sinal. Conhecendo a velocidade de propagação da luz e o tempo de chegada do sinal, conseguimos traçar a posição da origem desse mesmo sinal [10].

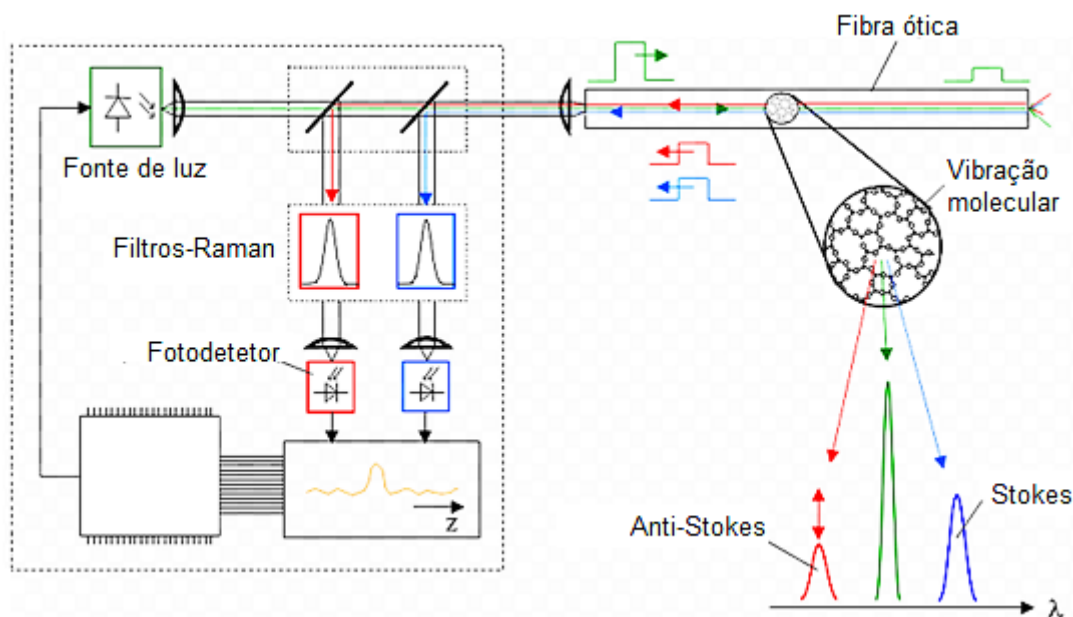


Figura 3.22:Princípio de funcionamento do sensor distribuído de Raman.

Relativamente ao espalhamento de Brillouin, também corresponde a um modo de espalhamento não linear, derivado à interacção da luz com as ondas acústicas termicamente geradas (fónons), contidas na fibra óptica. Com a existência das ondas acústicas, na fibra óptica, o índice de refração do núcleo vai ser ligeiramente alterado. Esta modificação opera como uma rede dinâmica, levando a um espalhamento da luz com um pequeno desvio da frequência que lhe deu origem (Figura 3.23) [70]. A sensibi-

lidade dos sensores de Brillouin a variações de temperatura e deformação resulta do facto da velocidade das ondas acústicas estar directamente relacionada com a densidade do meio de propagação [10].

O espalhamento de Brillouin tem origem de forma espontânea no interior da fibra óptica, no entanto, o respectivo sinal possui baixa magnitude e, por isso, torna-se inapropriado. Deste modo, é necessário, estimular o espalhamento de Brillouin, utilizando técnicas de desmodulação, designadas por BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) [92].

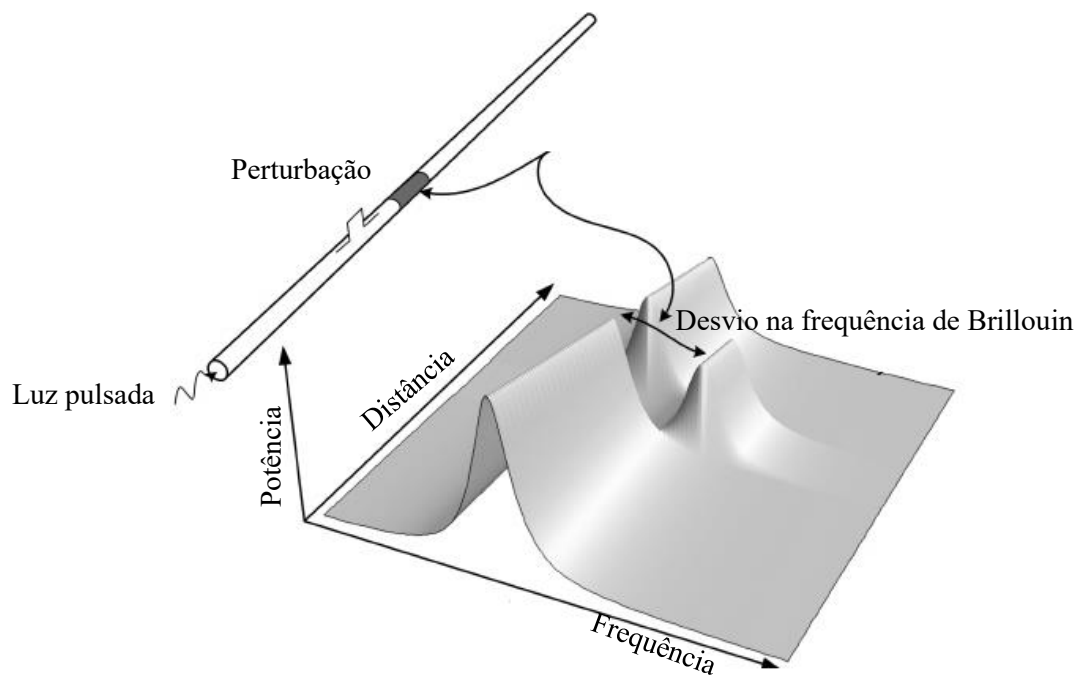


Figura 3.23: Princípio de funcionamento do sensor distribuído de Brillouin.

3.3.5. SENSORES QUÍMICOS

Os sensores químicos de fibra óptica são constituídos por uma camada de produto químico reactivo, em que as suas propriedades ópticas mudam consoante as características do meio envolvente. É no interior do “optode” que é colocado o reagente químico. O termo “optode” aparece da aglutinação a partir da contracção de OPTical + electrODE [93]. Os “optodes” são transdutores enquanto que a fibra óptica actua só como elemento de transmissão [94]. Há uma variedade grande de formas de incorporar o produto químico reactivo na região sensorial, dando origem a vários sensores químicos. Os três tipos mais comuns de sensores químicos são: i) sensor de extremidade coberta; ii) sensor de onda evanescente; iii) sensor revestido.

-Sensor de extremidade coberta: Este é o método construtivo mais comunmente usado na construção de sensores químicos de fibra [95]. A ideia é colocar o produto químico reagente na ponta da fibra e este ao interagir com o meio envolvente vai fazer variar as suas propriedades ópticas, que depois são transmitidas através do cabo de fibra óptica. As duas formas para concretizar este tipo de sensor é por um lado colocar o reagente químico na ponta da fibra óptica, deixando solidificar formando uma espécie de lâmpada ou então envolver a extremidade da fibra com um disco poroso saturado com o reagen-

te ligado mecanicamente com cola na ponta da fibra (Figura 3.24). Estes métodos descritos têm a desvantagem de possuírem uma quantidade muito pequena de reactivo químico e, portanto, pode sofrer desgaste (“fading”) mais rapidamente, o que irá interferir com as propriedades ópticas e assim induzir erro nas nossas leituras [96].

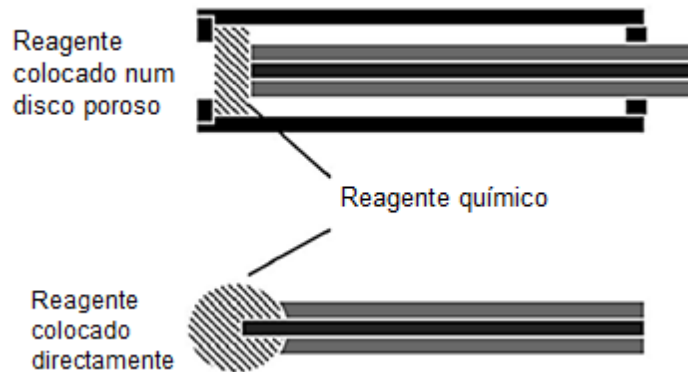


Figura 3.24: Esquema de um sensor químico: Sensor de extremidade revestida (Adaptado de [96]).

- **Sensor de onda evanescente:** Este tipo de sensor caracteriza-se pela remoção de parte do revestimento em torno do núcleo e substituí-lo com o reagente químico [95]. A zona do reagente químico está intimamente em contacto com o núcleo da fibra e com o meio envolvente através de uma membrana porosa de protecção. O funcionamento deste tipo de sensor é sensivelmente igual ao anterior na medida em que as alterações do meio vão fazer reagir o produto químico. O produto químico ao reagir não irá provocar na totalidade a reflexão interna da luz e então irá haver perda de potência transmitida. Esta atenuação de potência é provocada pelo efeito de onda evanescente em que parte da luz penetra o interior do produto químico, e só depois de uma certa profundidade é então reflectido (Figura 3.25). Refira-se que quanto maior for esta penetração maior será a atenuação de potência [96]. A vantagem deste tipo de sensor reside no facto de poderem ser criados vários sensores ao longo da mesma fibra óptica levando para uma monitorização mais abrangente e deixa de ser pontual ou local. O grande inconveniente consiste em assegurar a estabilidade do reagente com o núcleo da fibra, por ser uma zona muito sensível, de forma a manter a reflexão interna total de luz no interior do cabo [96].



Figura 3.25: Esquema de um sensor químico: Sensor de onda evanescente (Adaptado de [96]).

- **Sensor revestido:** Os sensores de fibra ópticos revestidos caracterizam-se, como o próprio nome indica, por terem um revestimento de um produto químico. A colocação do produto químico pode ser

efectuado entre o núcleo e a bainha (Figura 3.26) ou colocado em cima da bainha, como é o caso do sensor mencionado por Correia et al [36]. Assim, deve-se ter especial atenção para que o revestimento seja suficientemente poroso para permitir a interacção com o meio envolvente e reagir com o produto químico [96]. Outro aspecto que merece importância prende-se com índice de refração do reagente. O índice de refração do reagente deve ser maior tanto em relação ao núcleo como o revestimento. O resultado disto é que a luz passa do núcleo para o reagente, e em seguida, bate na fronteira com o revestimento, de menor índice de refração, e assim é reflectida. Quando a luz reflecte, bate na fronteira com o núcleo e como tem um índice de refração também maior este feixe de luz é novamente reflectido e volta para o reagente (Figura 3.26). Deste modo, o feixe de luz é confinado à envolvente da camada do reagente químico [96].

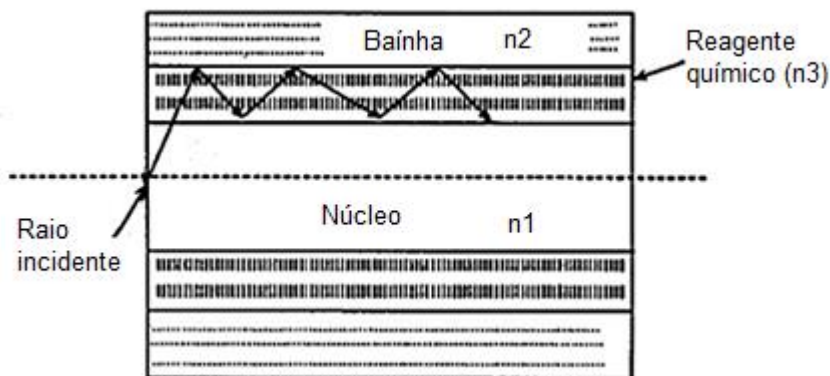


Figura 3.26: Esquema de um sensor químico: Sensor Revestido [96].

Chama-se especial atenção para o cuidado necessário no fabrico destes tipos de sensores químicos porque por um lado o “optode” tem que ser capaz de interagir com o ambiente, mas também ter a capacidade de transmitir a informação ao longo do cabo de fibra óptica. Estes sensores químicos de fibra ópticas dão a possibilidade da monitorização da componente mais química inerente à corrosão como o controlo dos níveis de pH do meio e a concentração de iões de cloretos [31, 97].

Basicamente, é possível diferenciar duas abordagens principais sobre os fenómenos ópticos em relação à transdução óptico-química: sensores baseados em fluorescência e sensores colorimétricos. O indicador fluorescente ou colorimétrico é imobilizado numa matriz, em forma de disco, em que as propriedades ópticas são alteradas por mudanças no meio externo. Alguns autores relatam diferentes meios de imobilização para a criação de áreas sensíveis, tais como poliuretanos, hidrogéis e celuloses, mas o meio de imobilização mais utilizado são as matrizes sol-gel porque são totalmente inorgânicas, mecanicamente robusta, transparentes e permeáveis [31, 36].

A abordagem óptica mais robusta para aplicações de engenharia civil é uma configuração de reflexão usando uma fibra óptica múltipla. Como é mostrado na Figura 3.27, são usadas fibras ópticas periféricas, levando a luz desde a fonte até ao indicador, para maximizar a quantidade de luz de excitação e uma fibra óptica central para recolher o espectro óptico reflectido. Quando são utilizados indicadores fluorescentes as fibras ópticas periféricas excitam o indicador, presente no disco sensível, e apenas uma pequena porção de fluorescência é recolhida pela fibra central. Quando são utilizados indicadores colorimétricos, o “optode” termina com um espelho, mantendo a informação da absorção óptica do disco sensível.

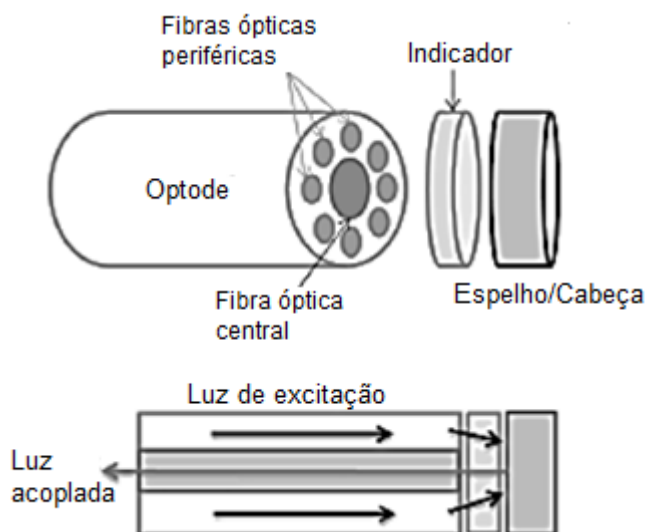


Figura 3.27: Esquema de funcionamento de um “optode”.

A fluorescência é a capacidade de uma substância emitir luz quando esta é excitada por radiação, normalmente radiação de baixo comprimento de onda. O fenómeno de fluorescência consiste assim na absorção de energia por um electrão, passando do estado fundamental (S0) para o estado excitado (S1), este electrão ao retomar o estado fundamental liberta energia através da emissão de radiação com comprimento de onda maior comparativamente com a radiação incidente [31].

Na prática, os sensores ópticos químicos usados para a determinação da concentração de iões de cloreto e para as variações de pH, baseiam-se na capacidade dos iões de cloretos e o pH modificarem a fluorescência emitida por um determinado reagente químico (fluoróforo). A perda de intensidade de fluorescência devido à presença de agentes oxidantes ou sais, como por exemplo os iões livres de cloretos, é designado na literatura por “Quenching” (Figura 3.28). A queda de intensidade de fluorescência é descrita pela equação de Stern-Volmer (Equação 3.10) [31] [97]:

$$\frac{I_{0f}}{I_f} = 1 + K_{sv} \cdot [Q] \quad (3.10)$$

Onde:

- I_{0f} Intensidade de fluorescência sem substâncias supressoras;
- I_f Intensidade de fluorescência com substâncias supressoras;
- $[Q]$ Concentração da substância supressora;
- K_{sv} Sensibilidade do fluoróforo (molécula fluorescente) ao supressor.

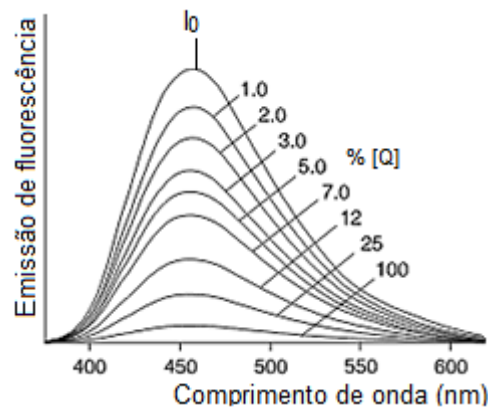


Figura 3.28: Perda de intensidade de fluorescência função da concentração da substância supressora.

3.3.6. SENSORES REFLECTIVOS

Um sensor reflectivo em fibra óptica, como o próprio nome indica, é baseado no fenómeno de reflexão. O dispositivo de detecção consiste na introdução de uma película fina de material a ser monitorizado na ponta de fibra óptica (Figura 3.29). Este tipo de sensor caracteriza-se por possuir na superfície da sua extremidade uma película fina de aço e se a reflectividade deste material for suficientemente elevada, a maior parte da luz enviada através da fibra será reflectida. No caso da película se degradar por corrosão, a sua espessura e o valor da potência óptica reflectida irá diminuir. Desta forma, quando o revestimento for completamente removido, da ponta da fibra óptica, a potência óptica reflectida irá atingir o seu valor mínimo [98-101].

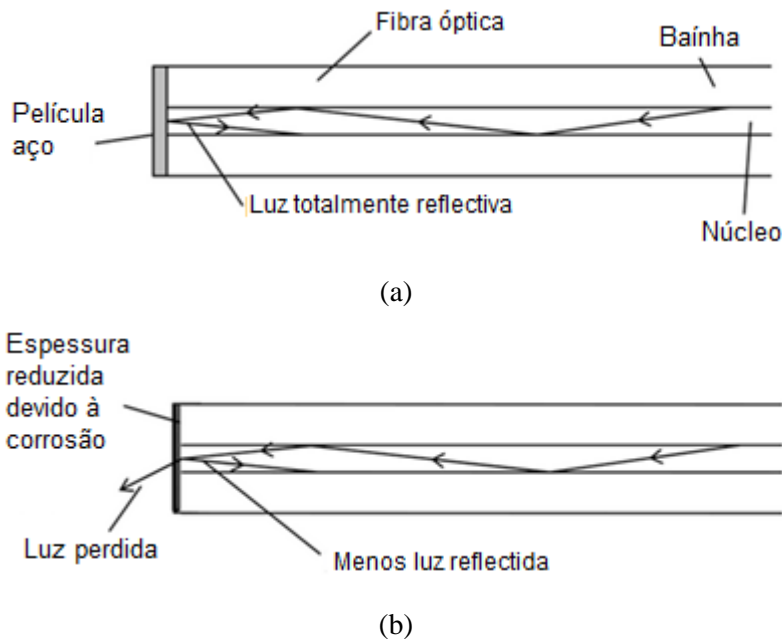


Figura 3.29: Esquema de um sensor reflectivo: a) Sensor com película de aço não corroída; b) Sensor com película corroída (Adaptado de [101]).

O processo de construção do sensor passa por uma fibra monomodo onde a extremidade é removida e cortada por um clivador, produzindo uma superfície plana, para introduzir uma fina película de aço. Para a formação da película fina de aço, com espessura controlada sobre a extremidade clivada da fibra óptica, é utilizada a técnica de pulverização catódica. O processo de pulverização catódica consiste na deposição de material, numa determinada superfície, num ambiente rarefeito. Para isso, as pontas das fibras são colocadas numa câmara, em vácuo, onde irá ocorrer o processo de deposição da película de aço. De salientar que a espessura da película depende do tempo de exposição/deposição. Os sensores com películas mais espessas são pouco sensíveis à corrosão a curto espaço de tempo. Em contrapartida, sensores com películas de aço mais finas, são mais sensíveis para a corrosão pouco tempo depois da sua instalação em obra [98, 101].

A instalação do sensor nas estruturas de betão tem que ser realizada com grande cuidado para evitar a quebra da fibra. Para a aplicação em campo, o sensor requer uma protecção adequada para torná-lo mais robusto. Um dos procedimentos adoptados para realizar a protecção do sensor está ilustrado nas Figuras 3.30 e 3.31. A fibra revestida é incorporada num tubo oco de plástico flexível, com 1 mm de diâmetro e fixo no interior através de uma cola. Assim, a extremidade revestida da fibra, é então bem protegida contra acções mecânicas. No entanto é necessário ter um cuidado adicional. Este revestimento tem que ser robusto o suficiente, mas também tem que ter uma permeabilidade adequada aos agentes agressivos. Para permitir a transferência adequada dos agentes corrosivos do betão, uma argamassa é adicionada no interior do tubo de plástico, na zona da ponta da fibra (Figura 3.30) [101].

O comprimento da fibra revestida é de apenas 20 mm, pelo que para aplicações práticas é necessário ligar a um cabo de extensão. Esta ligação poderá ser feita através de uma emenda de fusão e o conjunto será protegido com um protector de emenda termo-retractil. O processo de finalização do sensor passa por envolver toda a fibra com um tubo de plástico flexível (Figura 3.31). Num ambiente hostil, o cabo da fibra pode ainda ter que ser protegido por um tubo solto blindado (“armored loose tube optical fiber cable”) [101].

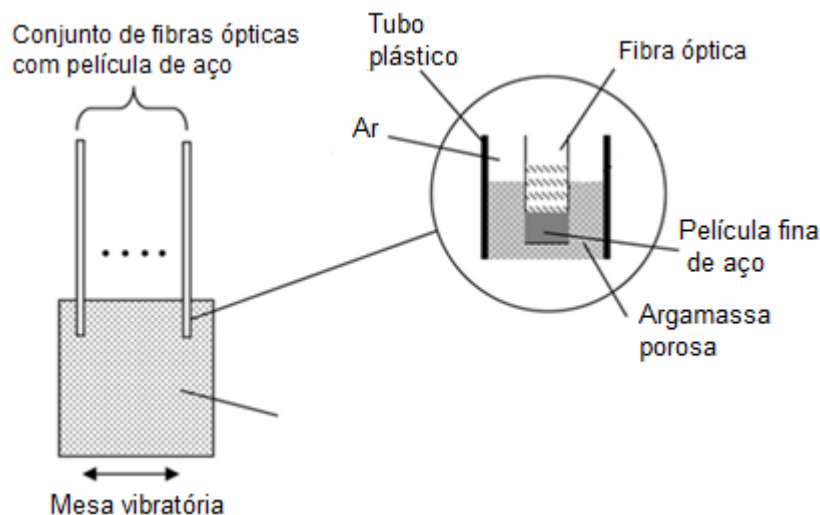


Figura 3.30: Construção de um sensor reflectivo: Processo de introdução de uma argamassa no tubo plástico [101]

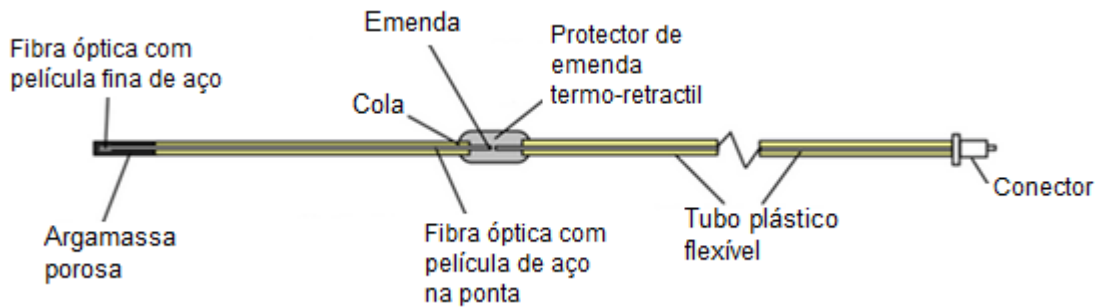


Figura 3.31: Construção de um sensor reflectivo: Esquema geral do sensor [101].

Em comparação com outros sensores de corrosão, o sensor de “reflexão” possui uma série de vantagens. O princípio de medição é muito simples, a interpretação do resultado é fácil e directa. Aplica-se à corrosão induzida quer por penetração de cloretos, quer por carbonatação. A técnica não requer a utilização de fibras ópticas especiais, as fibras monomodo de telecomunicações podem ser empregues neste tipo de sensores. Além do que, as fibras óptica monomodo são superiores às fibras ópticas multimodo em termos de estabilidade de medição, uma vez que, a intensidade da luz reflectida na película, depende do ângulo de incidência do raio, que varia de acordo com diferentes modos. Para uma fibra multimodo, qualquer pequena deformação ao longo da fibra, pode conduzir a uma redistribuição de modos, resultando em flutuações na resposta do sensor [101]. Outra vantagem, é a questão da reprodutibilidade, uma vez que, a produção em massa do sensor deve, portanto, ser possível. Além disso, devido ao pequeno tamanho, ele pode ser introduzido posteriormente nas estruturas existentes [101].

3.4. MONITORIZAÇÃO DA FENDILHAÇÃO

O estado da durabilidade das estruturas de betão armado pode ser avaliado através da detecção e monitorização da fendilhação. Em geral, nas estruturas, as fendas são as primeiras “portas abertas” para a penetração de agentes nocivos como cloretos, dióxido de carbono e até mesmo a água que irão incitar o processo de corrosão das armaduras. As estruturas que contêm fendas com vários milímetros de abertura são consideradas estruturas com graves anomalias estruturais, podendo pôr a segurança em risco [12]. Deste modo, a monitorização da fendilhação é importante também para o controlo das questões de durabilidade. Regra geral, a detecção e a avaliação das fendas é realizada através de inspeções visuais periódicas. Apesar de nos dias de hoje existir pessoal qualificado para interpretar os resultados das inspeções, têm sido mencionadas algumas limitações na sua capacidade de detectar precocemente problemas graves [10].

Neste contexto, têm sido reunidos esforços para a aplicação de sensores para a monitorização da fendilhação, sensores de base eléctrica e óptica (principalmente os sensores intensiométricos). Conforme referido anteriormente, um sensor intensiométrico baseia-se na intensidade da luz que chega ao fotodetector, quando esta passa pela região sensorial. Uma aplicação deste tipo de sensor, na monitorização da fendilhação, passa por introduzir a fibra óptica, em forma de “zig-zag”, num elemento de betão, por exemplo, o betão de recobrimento. Quando, naquela porção de betão, não existir fissuras, não existirá microcurvaturas na fibra. Assim, os troços continuarão rectilíneos e as perdas ópticas são diminutas. Quando ocorre fissuração, as fissuras irão provocar distorções à fibra e macro-flexões, originando pontos de inflexão e, provocando um perda nítida de sinal (Figura 3.32). Utilizando sistemas de inter-

rogação apropriados como a Reflectometria Óptica no Domínio do Tempo (OTDR) pode-se detectar variações na intensidade da luz ao longo de todo o comprimento da fibra, através da medição temporal dos impulsos recebidos [12]. Assim, é possível detectar as perdas e a sua localização.

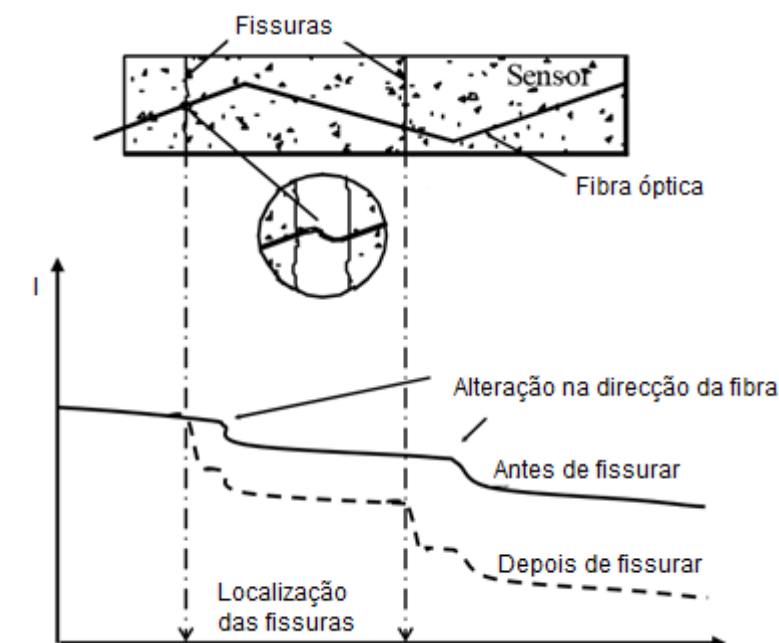


Figura 3.32: Princípio de funcionamento de um sensor intensiométrico para a monitorização da fenição (Adaptado de [12]).

3.5. MONITORIZAÇÃO DA CORROSÃO

As deformações e as extensões de uma estrutura, numa fase precoce, podem dar informações valiosas sobre as suas propriedades mecânicas e também sobre a corrosão. As fibras ópticas, totalmente integradas nas estruturas, são capazes de monitorizar directamente o início e o progresso da degradação mecânica induzida por corrosão. Os sensores são geralmente encapsulados para formar um transdutor que devido ao seu tamanho extremamente pequeno, podem fornecer informações de elevada precisão e resolução sem influenciar as propriedades mecânicas da estrutura (pouco intrusivo). O processo de corrosão das estruturas é um fenómeno dependente do tempo, assim sendo, é necessária uma monitorização a longo prazo com técnicas de aquisição de dados multiponto e redes de longa distância instaladas em áreas, muitas vezes de difícil acesso. O uso da fibra óptica deve ser fortemente preferida na monitorização da corrosão devido à sua resistência à corrosão e grande capacidade de multiplexagem. Numa visão mais objectiva, para a detecção da corrosão, três abordagens básicas podem ser distinguidas [102]:

- medição directa dos efeitos de degradação da corrosão;
- medição dos precursores de corrosão;
- medição dos parâmetros ambientais a fim de prever os efeitos corrosivos.

A corrosão pode ser monitorizada directamente através da fibra óptica quando esta é colocada de forma a que os processos consequentes da corrosão interferem directamente com a fibra óptica, por exemplo, através de extensões ou deformações. A detecção de extensões e deformações, numa fase

precoce, pode conceder informações valiosas sobre o comportamento estrutural e, nomeadamente, no controlo da fendilhação. Um conjunto de sensores baseados na tecnologia da fibra óptica, totalmente integradas nas estruturas, são capazes de controlar o processo da degradação mecânica incitada pela corrosão. Deste modo, há múltiplos sensores em fibra óptica capazes de responder a essa questão como são os casos dos sensores de Bragg, sensores interferométricos e os sensores distribuídos de Brillouin. Para além destes, existem ainda outros tipos de sensores capazes de monitorizar directamente o processo corrosivo quando um revestimento adequado é depositado na extremidade da fibra. Este tipo de sensores têm como base fenómenos de reflexão, em que o parâmetro monitorizado é a degradação de uma película fina de metal mecanicamente depositada na extremidade da fibra óptica. Como a película fina de aço está perante as mesmas condições de exposição que as armaduras da própria estrutura, conseqüentemente, há uma analogia directa entra a degradação da película com os varões de aço da própria estrutura.

3.5.1. MONITORIZAÇÃO DA CORROSÃO USANDO FBG

Ao longo dos últimos tempos, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos com intuito de desenvolver sensores FBG para monitorizar a corrosão das armaduras das estruturas de betão armado. Um dos sensores desenvolvidos para a monitorização directa da corrosão, que merece destaque, foi desenvolvido por Jung-Ryul Lee, Chang-Yong Yun e Dong-Jin Yoon em 2010 [85]. A técnica de monitorização utiliza sensores de Bragg como meio de medição.

Na prática, o sensor é constituído não só pelo sensor de corrosão, mas também por um sensor de referência (Figura 3.33). Tanto o sensor de corrosão como o sensor de referência possuem uma placa de metal (18Cr-8Ni, coeficiente de expansão térmica, $\alpha = 17.3\mu\epsilon/^\circ\text{C}$) com dimensões de 34mmx2mmx0,5mm. A placa de metal do sensor de referência, é totalmente revestido com uma camada de acrílico imune à corrosão, com cerca de 50 μm de espessura, ao contrário do sensor de corrosão, em que só 10mm das duas extremidades é revestido com o mesmo material acrílico. Deste modo, só uma extensão central de 14 mm é que é susceptível de corroer. O sensor de referência serve, como o próprio nome indica, para uma base de referência para a compensação do efeito da temperatura. A fibra óptica é sujeita inicialmente a uma pré-tensão e posteriormente as suas pontas são coladas à placa de metal com resina epóxi. A cola epóxi serve para garantir a pré-tensão e para dar consistência à própria fibra óptica (Figura 3.33). O princípio de medição baseia-se no facto de que quando a estrutura começar a corroer, o metal também iniciará a corrosão e irá perder massa (redução da secção transversal). Conseqüentemente, a fibra sofrerá um encurtamento e o comprimento de onda de Bragg vai alterar (Figura 3.34) [85].

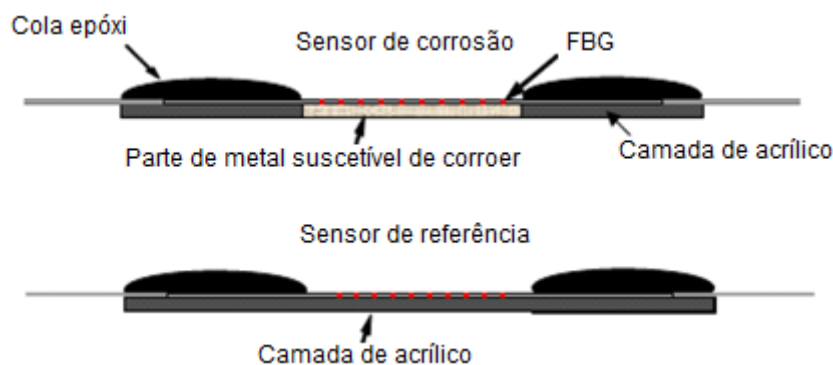


Figura 3.33: Sensor de corrosão FBG (Adaptado de [85]).

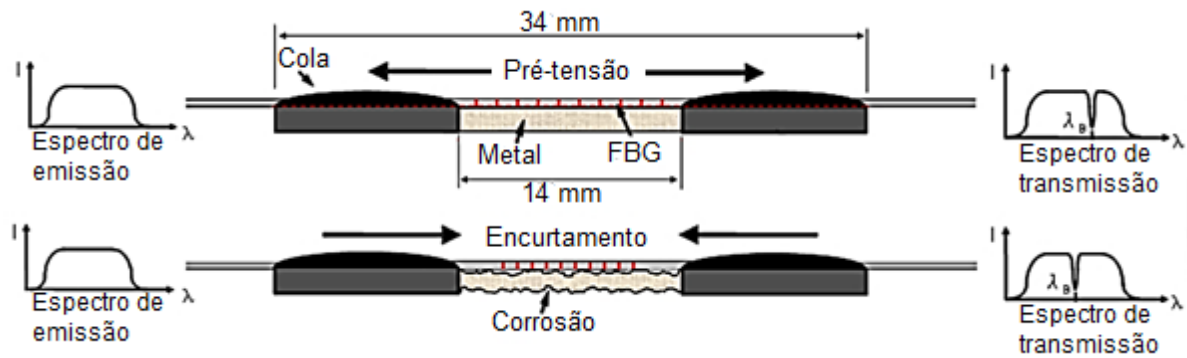


Figura 3.34: Princípio de funcionamento do sensor e os respectivos espectros de emissão e transmissão (Adaptado de [85]).

Este sensor é implementado nas estruturas usando um invólucro apropriado. O objetivo da introdução do sensor dentro de um invólucro é por um lado, proteger o sensor das pressões resultantes da estrutura devido aos produtos resultantes da oxidação da própria armadura, e por outro, tornar o sensor independente da deformação da estrutura. O sensor de referência pode ser colocado de duas formas distintas, em série ou em paralelo, dependendo portanto das circunstâncias e da geometria da aplicação (Figura 3.35) [85].

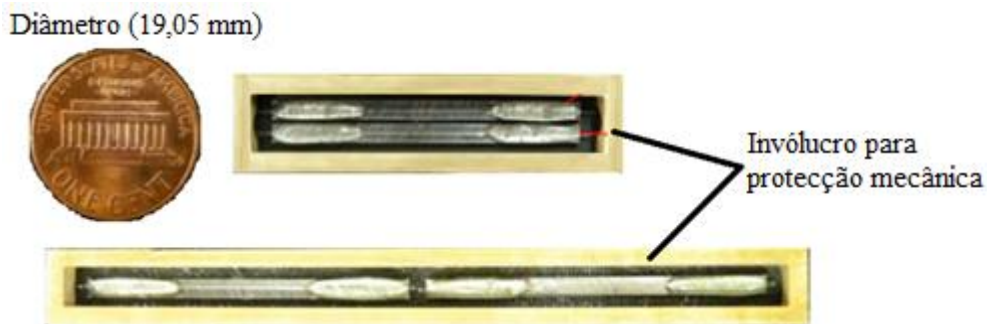


Figura 3.35: Introdução do sensor dentro de um invólucro para protecção mecânica (Adaptado de [85]).

3.5.2. MONITORIZAÇÃO DA CORROSÃO USANDO INTERFERÓMETRO DE FABRY-PEROT

O sensor baseia-se no princípio de interferometria de luz extrínseca e consiste na aplicação de duas fibras ópticas multimodo semi-reflectoras, separadas por um intervalo, que varia com a tensão longitudinal aplicada. Um feixe de luz é lançado numa das extremidades da fibra óptica e atinge a outra fibra, fixa na outra extremidade. O sinal de luz de saída é função do comprimento de onda de luz e do comprimento de cavidade, L . Como o comprimento de onda da luz é fixo, apenas a variação do comprimento da cavidade, L , vai contribuir para modificar o sinal de saída. Uma variação de tensão irá produzir uma variação de comprimento do tubo micro-capilar e, conseqüentemente, uma mudança no comprimento da cavidade, L . Esta alteração no comprimento da cavidade irá produzir uma mudança no sinal de luz reflectida [90]. Para a integração do sensor nas estruturas de betão, este é acoplado na parte interior de um tubo de aço inoxidável (Figura 3.36 a)). O tubo de aço possui dois “discos” nas duas extremidades para assegurar uma aderência perfeita do sensor com o betão (Figura 3.36 b)).

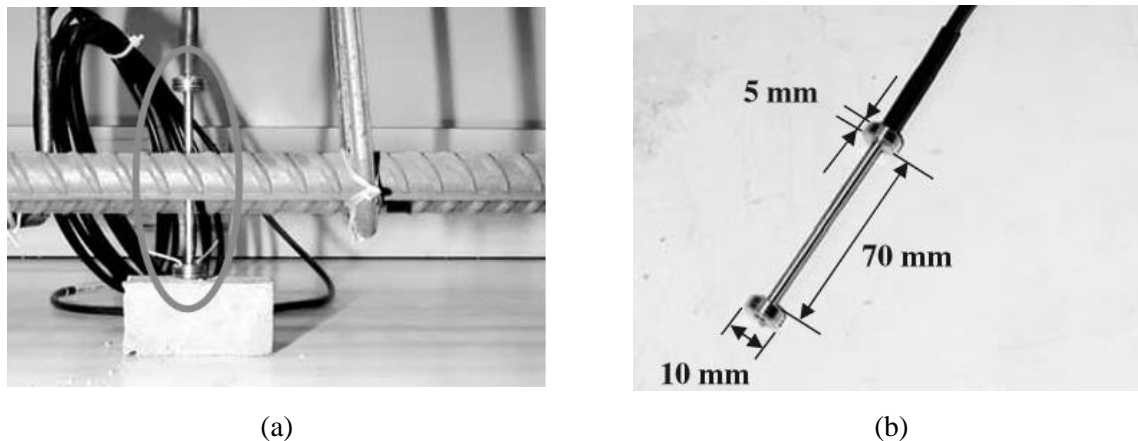


Figura 3.36: Sensor interferómetro de Fabry-Perot: a) Colocação do sensor perpendicularmente a dois varões de aço; b) Aspecto físico do sensor [90].

O sinal reflectido é dirigido para um agrupamento de foto-díodos para determinar com precisão a distância entre as duas faces dos discos da extremidade da fibra óptica, permitindo assim o cálculo da extensão absoluta do sensor. Com a finalidade de monitorizar a fendilhação provocada pela corrosão das armaduras, o sensor de fibra óptica é posicionado perpendicularmente ao plano das armaduras. As fendas dentro do betão, provenientes da corrosão do aço, são paralelas às armaduras e perpendiculares ao sensor, tornando o sistema eficaz. A configuração deste sensor permite monitorização da delaminação associada às fissuras longitudinais ao longo dos varões do betão armado, resultantes da expansão radial dos aços corrosivos (Figura 3.37). Deste modo, este sensor, torna-se especialmente adequado para a instalação em locais onde a inspecção visual é difícil.

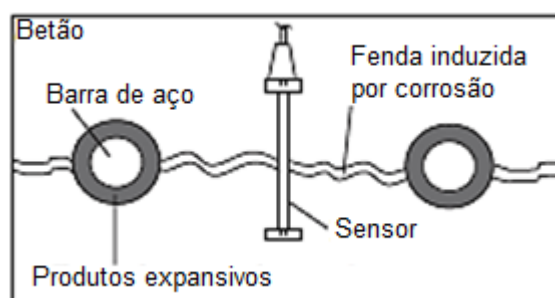


Figura 3.37: Posicionamento correcto do sensor para reagir às fendas provenientes da delaminação do betão por corrosão.

3.5.3. MONITORIZAÇÃO DA CORROSÃO USANDO SENSORES DISTRIBUÍDOS

A técnica de detecção de Brillouin baseia-se no fenómeno de espalhamento de Brillouin em que as fibras ópticas são utilizadas tanto como elemento sensor como elemento de transmissão de sinal. Quando uma luz pulsada é lançada e transmitida ao longo da fibra, a frequência Brillouin da luz espalhada pode ser medida. O intervalo de tempo entre o envio do pulso e a chegada da luz retro-espalhada fornece a informação espacial, enquanto que a frequência de Brillouin da luz fornece informações sobre a temperatura ou a extensão distribuídas ao longo da fibra óptica [103]. Quando se inicia o processo de corrosão, o volume dos varões de aço vai aumentar, devido ao acumular de produtos resultantes do processo electroquímico. A chave dos sensores de Brillouin, para a monitorização da corrosão, é utilizar a sensibilidade à extensão que estes sensores possuem, já que este processo electroquímico é expansivo e por essa mesma razão pode ser monitorizado [103].

O presente sensor caracteriza-se pelo enrolamento de uma fibra óptica monomodo à volta de um varão de aço polido (Figura 3.38). No decorrer da corrosão, a fibra óptica será esticada devido ao acumular de produtos expansivos e a extensão pode ser analisada por um sistema BOTDR, assim o processo de corrosão no aço das estruturas de betão pode ser monitorizado [103].

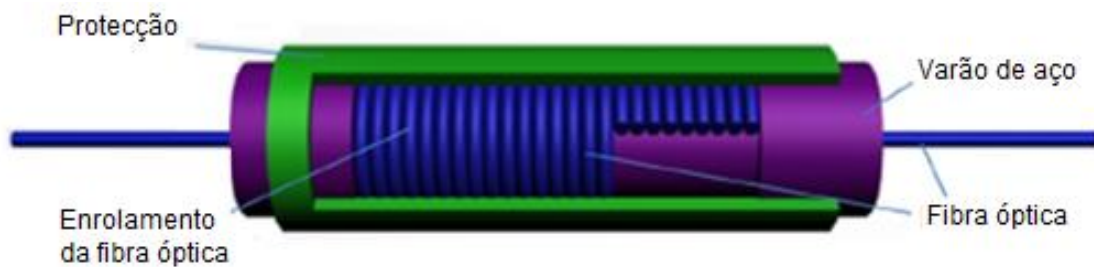


Figura 3.38: Aspecto físico do sensor de Brillouin para monitorizar a corrosão [103].

Os autores Xuefeng Zhao et al [103] propuseram três tipos de sensores de Brillouin: BCES-I, BCES-II, BCES-III (Figura 3.39). Diferentes configurações foram propostas para testar a sensibilidade na monitorização da expansão decorrente da corrosão. A fibra óptica monomodo, utilizada no processo, é a fibra Corning G.657 A / B, com um raio de curvatura mínimo de 7,5 mm, traduzindo um nível muito baixo de perdas ópticas devido ao enrolamento da fibra no varão de aço. Na Figura 3.39 são apresentados as três configurações dos sensores distribuídos de Brillouin.

O sistema de interrogação BOTDR permite detectar corrosão através da extensão da fibra ao longo do tempo e a que distancia se encontra essa perturbação do sistema de leitura (Figura 3.40). Desta forma, e aliados a técnicas de multiplexagem é possível através de uma única fibra óptica monitorizar uma área considerável.

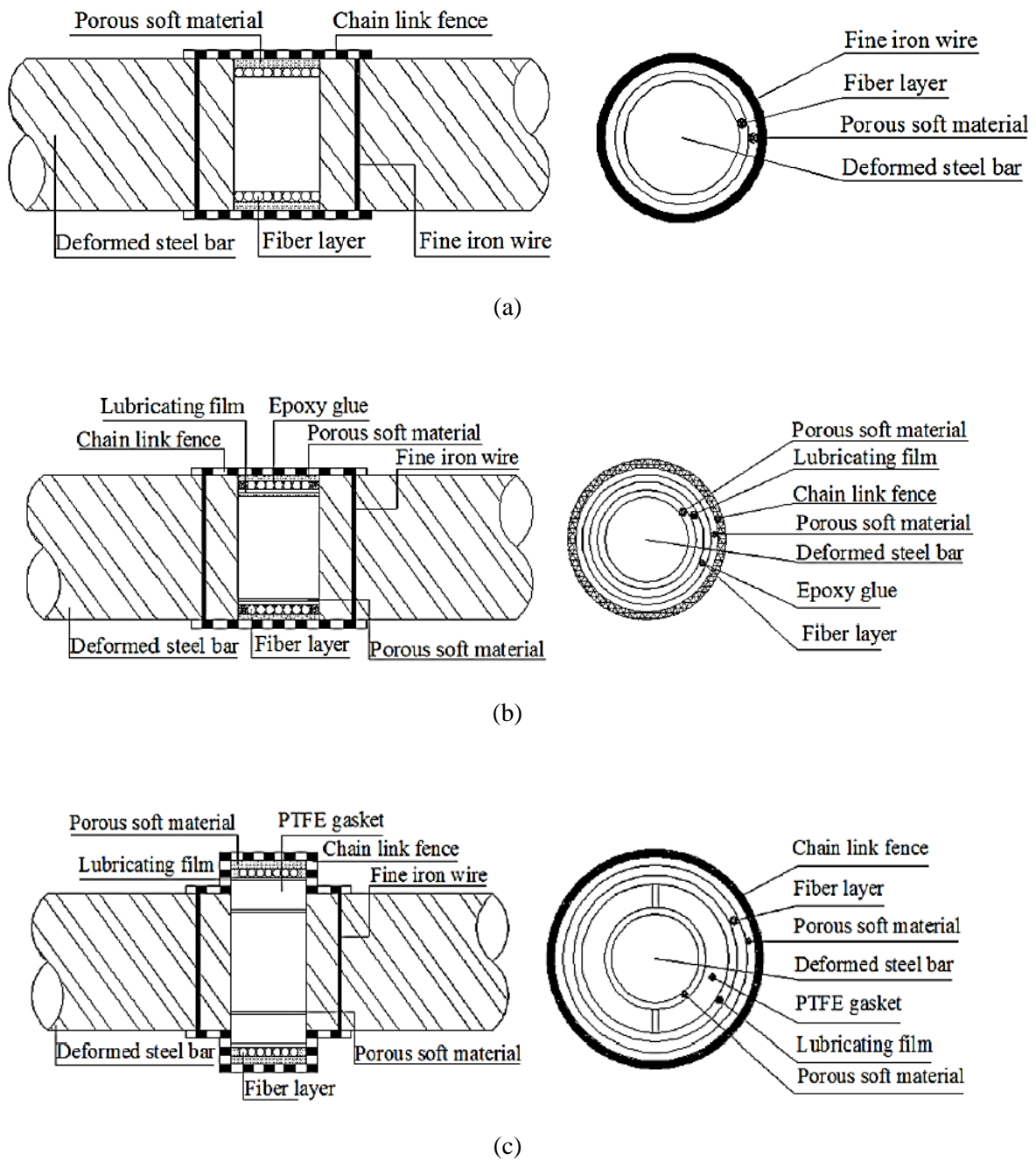


Figura 3.39: Configurações dos sensores de Brillouin [103]: a) sensor BCES-I; b) BCES-II; c) BCES-III.

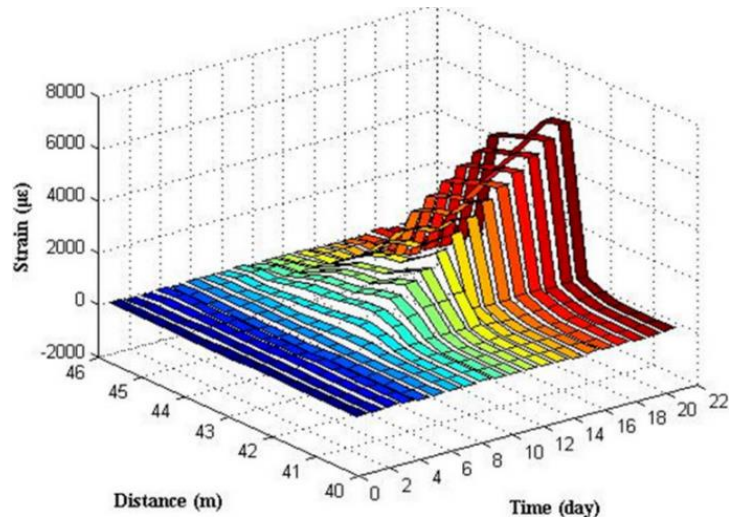


Figura 3.40: Resultado típico do sensor de Brillouin associado à técnica BOTDR [103].

3.5.4. MONITORIZAÇÃO DA CORROSÃO USANDO SENSORES REFLECTIVOS

O sensor proposto não detecta directamente a corrosão do aço da estrutura. Em vez disso, monitoriza a “corrosividade” do ambiente circundante. Uma película fina de aço é depositada sobre a superfície da extremidade da fibra, sendo o princípio de medida do sensor a reflectividade da própria película. Aquando da corrosão da película, a reflectividade irá diminuir devido à diminuição da espessura [101]. O esquema de funcionamento do sensor foi ilustrado no ponto 3.3.5.

Na monitorização das estruturas, vários sensores reflectivos podem ser multiplexados com o uso de um divisor óptico (acoplador) e a reflectividade final de cada sensor pode ser medida com o recurso ao sistema OTDR. O princípio do OTDR consiste no envio de um pulso de laser para a fibra óptica medindo a intensidade da luz reflectida e o tempo de chegada correspondente. Quando o impulso atinge a extremidade da fibra esta é reflectida e volta no sentido inverso. Com a utilização do divisor óptico, o impulso de laser do OTDR propaga-se para os diferentes sensores (Figura 3.41). Note-se que cada sensor tem obrigatoriamente que estar a diferentes distâncias do OTDR. No caso de serem usados sensores reflectivos para a monitorização da corrosão, é boa prática utilizar mais um sensor como referência. Desta forma, as variações da fonte de luz, as perdas de inserção no OTDR e no divisor óptico podem ser eliminadas [98].

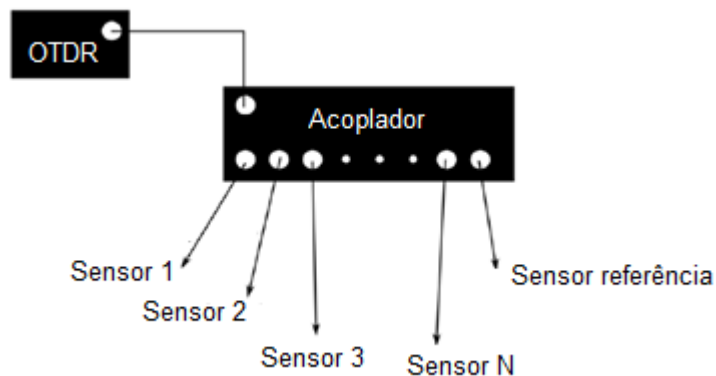


Figura 3.41: Exemplo de um sistema de medição de vários sensores reflectivos [98].

Para a instalação do sensor em obra, é necessário em primeiro lugar, perfurar a superfície de betão onde se quer instalar o sensor. Após a perfuração, o buraco é limpo com ar comprimido e a superfície interna é humedecida com uma película de água. Logo de seguida é incorporado o sensor e é aplicada uma argamassa com uma seringa. A argamassa deve ser muito fluída ($w/c=0,7$) e deve ser adicionado um aditivo modificador de viscosidade para evitar a saída da mesma. Após a secagem da argamassa, é colocado sobre a superfície uma cola epóxi de endurecimento rápido. Assim que ocorra o endurecimento da epóxi, a superfície do furo ainda deve ser protegido por uma camada de pintura de revestimento à prova de água [98].

Existem duas maneiras possíveis para instalar o sensor (Figura 3.42 a) e b)) [101]. No caso de se tratar de uma ponte em caixão, pode ser realizado um buraco a partir do interior do mesmo para a colocação do sensor (Figura 3.42 a)). Para a monitorização da penetração dos iões de cloretos ou do dióxido de carbono, por exemplo de um pilar, o orifício deverá ser efectuado numa superfície perpendicular à frente de ataque (Figura 3.42 b)). Com este tipo de instalação, o furo não vai agir como um caminho de difusão fácil que irá afectar os resultados da monitorização.

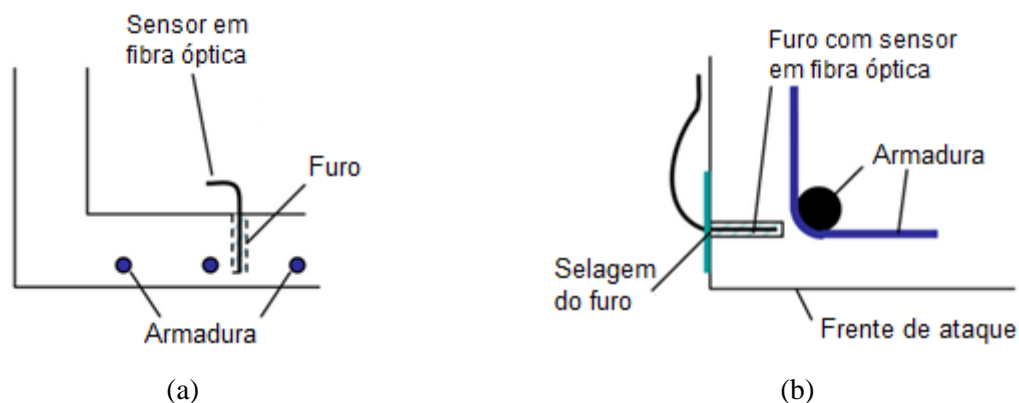


Figura 3.42: Duas forma de instalação do sensor: a) Instalação a partir do interior de um caixão de uma ponte; b) Instalação num pilar, perpendicularmente à frente de ataque (Adaptado de [101]).

A título de exemplo, a Figura 3.43 mostra a resposta típica deste tipo de monitorização usando sensores de corrosão reflectivos. Os sensores foram incorporados em dois pilares de uma ponte pedonal localizada em frente ao mar, na parte sul da ilha de Hong Kong. O esquema da instalação e localização dos sensores está representado na Figura 3.44. As condições de exposição dos pilares são adversas. A Figura 3.43 ilustra duas leituras efectuadas pelo OTDR usado na monitorização. Os sensores foram instalados no dia 13 de Agosto de 2008 e em 29 de Outubro de 2008, 77 dias após a instalação, a leitura OTDR mostrou uma queda significativa do sinal reflectido a partir de sensores 1, 2 e 3 [98].

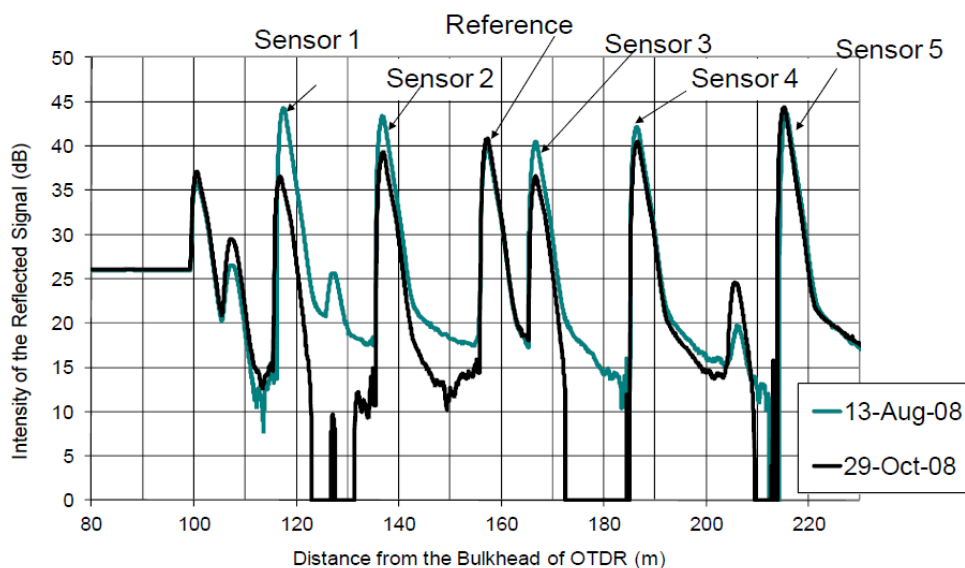


Figura 3.43: Instalação dos sensores numa pilar de uma ponte em frente ao mar na parte sul da ilha de Hong Kong: Resposta de duas medições efectuadas após a instalação [98].

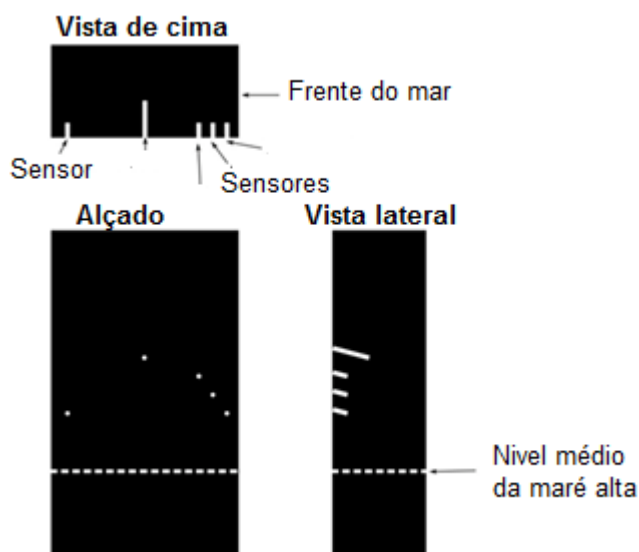


Figura 3.44: Instalação dos sensores num pilar de uma ponte em frente ao mar na parte sul da ilha de Hong Kong: a) Disposição dos sensores instalados [98].

3.6. SENSOR DE CLORETOS

Os sensores para detectar a presença de iões de cloreto enquadram-se dentro dos sensores químicos em que a base principal de medida é a extinção de fluorescência, através do qual o reagente químico é excitado por radiação [31]. Existe um grande número de moléculas fluorescentes que são capazes de detectar a presença de iões de cloreto. Regra geral, estas moléculas, são também designadas na literatura como corantes indicadores com comprimentos de onda muito diferentes de excitação e de emissão (Tabela 3.3) [104].

Tabela 3.3: Indicadores fluorescentes [104].

Referência	Nome	Excitação (nm)	Emissão (nm)	K_{sv}
E-3101	MQAE	350	460	200
L-6868	Lucigenin	455	505	390
M-440	SPQ	344	443	118
M-6886	MEQ	344	442	145

As moléculas descritas na Tabela 3.3 existem sobre a forma de pó, por isso é imperativo um encapsulamento adequado para a sua integração no final do “optode”. Deste modo, a técnica sol-gel é geralmente seleccionada para o efeito já que apresenta vantagens, tais como, transparência, estabilidade mecânica, inércia química e flexibilidade em termos de configuração. O esquema de medição do sensor é ilustrado na Figura 3.45 e apresenta 4 elementos essenciais [31]:

- uma fonte de excitação - um diodo eletroluminescente com comprimento de onda de excitação do indicador;
- um indicador para a detecção de iões de cloretos (Tabela 3.3);
- filtros de comprimento de onda para isolarem fotões da emissão de excitação;
- espectrómetro que regista a intensidade de fluorescência.

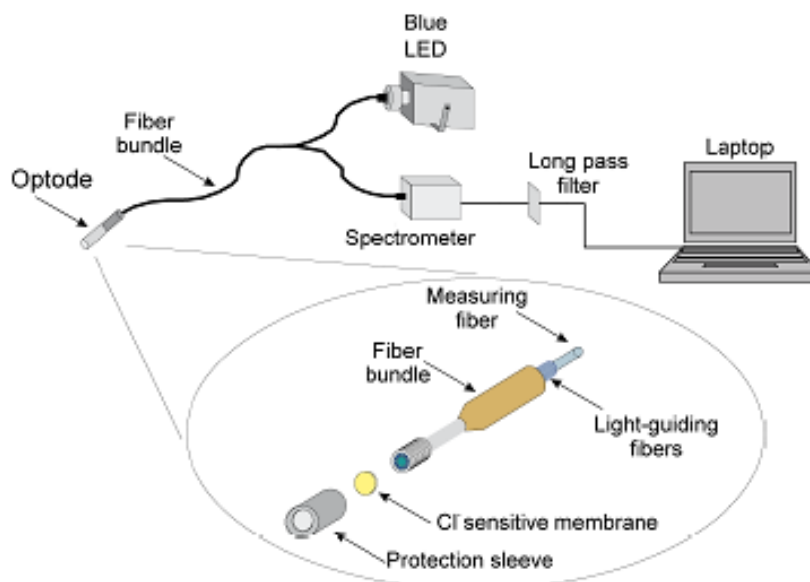
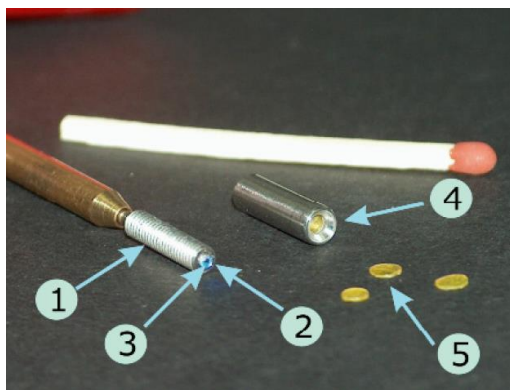


Figura 3.45: Esquema de constituição do sensor de cloretos [31].

A fonte de excitação e a sonda óptica “optode” é ligada através de doze fibras ópticas multimodo (Figura 3.46). Com a excitação do sinal de luz, emitida pela fonte de excitação, o “optode” emite um sinal de fluorescência no qual é transportado até ao espectrómetro por uma fibra óptica (Figura 3.46).

Neste ponto, o sinal de luz é convertido num sinal eléctrico para depois ser analisado. Neste sensor, as fibras ópticas são utilizadas apenas como elementos de transmissão e não como um elemento transdutor. Esta configuração é facilmente aplicável em ambientes difíceis, como é o caso das estruturas de betão [31].



1. Cabeça do sensor;
2. Fibras ópticas de emissão;
3. Fibra óptica de recepção;
4. Protector do "optode";
5. Membrana com indicador;

Figura 3.46: Fotografia do sensor de cloretos [31].

3.7. SENSOR DE PH

A vida útil das estruturas de betão armado depende fortemente do seu nível de pH, uma vez que a armadura só se encontra num estado passivo para valores de pH superior a 9. Por esta razão, o controlo a longo prazo dos valores de pH, num intervalo entre 9 a 13, com uma resolução de cerca de 0,5 unidades de pH, é relevante para a detecção precoce da potencial condição de corrosão [102]. Nesta óptica, foram desenvolvidos sensores químicos (indicador colorimétrico e fluorescente) para a monitorização do pH [102, 105].

Um dos sensores químicos desenvolvidos é constituído por uma camada sensível ao pH, constituída por um indicador, imobilizado num substrato sólido, que muda de cor de acordo com os respectivos valores de pH do meio em que está envolvido. A Figura 3.47 a) mostra o aspecto da cabeça do sensor, sendo esta encaixável e substituível. Como é visível pela figura, a cor da membrana sensível varia de acordo com valores de pH. A resolução da medição do sensor, para valores de pH entre 9 e 12, está na gama de 0,1 a 0,6 unidades de pH. A resolução mais elevada pode ser conseguida no meio do intervalo de medição entre 9,7 e 11. Uma condição particular da membrana é que esta não deve secar. Este requisito é maioritariamente cumprido em obras hidráulicas e geotécnicas. A fim de evitar a secagem, antes da integração do sensor no betão, a membrana sensível é protegida por uma pequena camada estanque, cheia de água, para evitar a desidratação da membrana (Figura 3.47 b). A instalação deste sensor foi testada em ancoragens pré-fabricadas, instaladas no porto de Rostock no norte da Alemanha, pela empresa STUMP GmbH. A Figura 3.47 c) mostra dois dos dez sensores de pH que foram instalados em ancoragens pré-fabricadas, antes da introdução no furo [102].

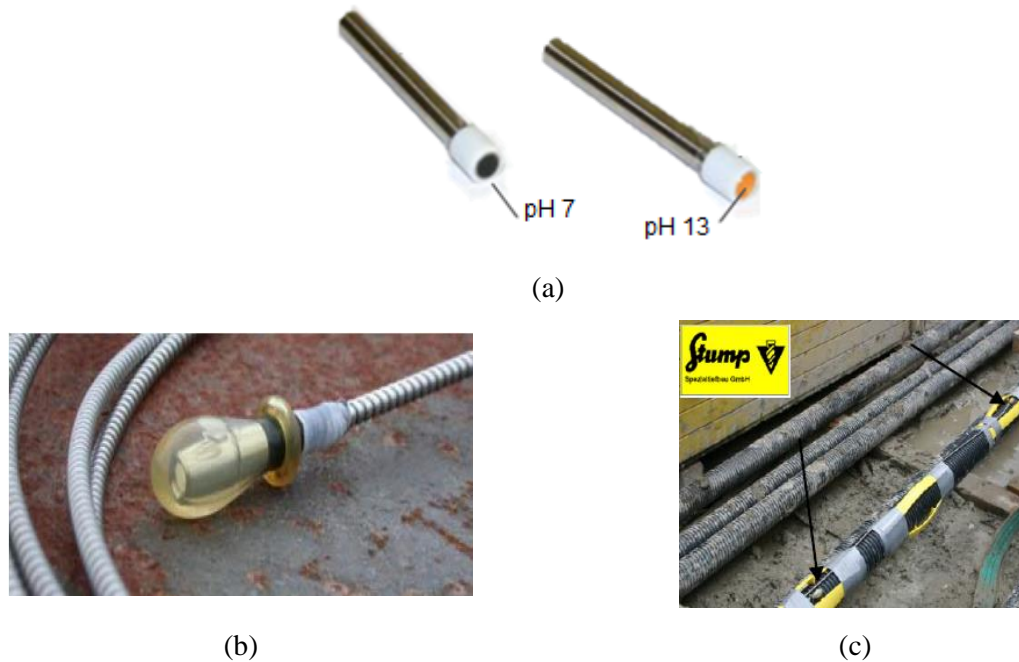


Figura 3.47: Sensor de pH colorimétrico [102]: a) Aspecto físico; b) pequena camada estanque c) Instalação em ancoragens pré-fabricadas.

Outro sensor de pH desenvolvido numa tentativa de ultrapassar as limitações do sensor anterior, criando, assim, um tipo de sensor mais estável, robusto e durável e, portanto, um dispositivo mais útil [105]. Este sensor funciona à base da fluorescência de um indicador imobilizado, sensível às variações de pH (Figura 3.48). O método de detecção à base de fluorescência foi empregue em vez do método com base em medições colorimétricas, uma vez que os sensores fluorescentes são geralmente mais precisos, tendo menos interferência a partir da fonte de luz e oferecem uma sensibilidade mais elevada [105]. O desenvolvimento deste foi também dada especial atenção à concepção mecânica do sensor para garantir estabilidade em ambientes agressivos e corrosivos.

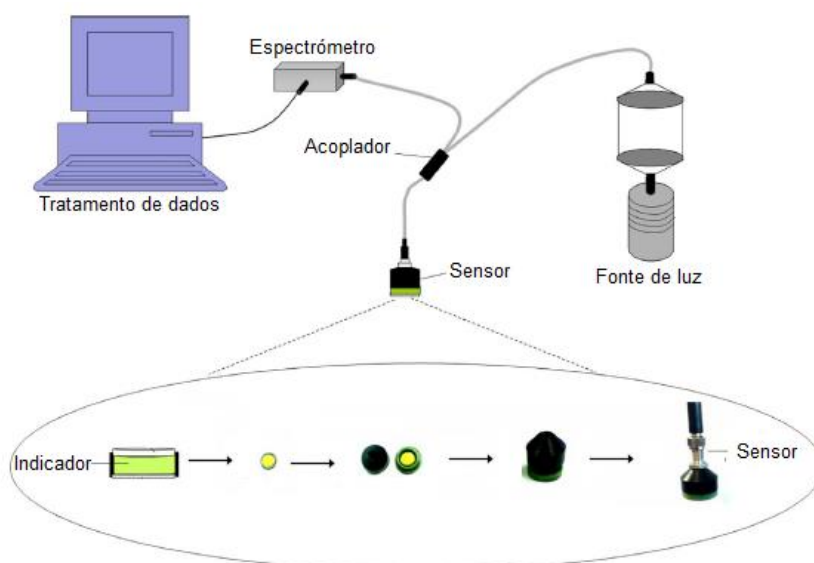


Figura 3.48: Constituição do sensor de pH à base de fluorescência (Adaptado de [105]).

3.8. SENSOR DE HUMIDADE

Nos últimos anos têm sido desenvolvidos vários tipos de sensores de humidade baseados em diferentes tecnologias de fibra óptica [106]. Neste ponto apresenta-se um sensor de humidade relativa com base numa rede de Bragg escrita numa fibra óptica. O sensor está associada a um revestimento constituído por um material híbrido orgânico-inorgânico, denominado por di-eruasil, preparado pelo método sol-gel (Figura 3.49). A utilização de sensores com base em redes de Bragg para monitorizar a humidade relativa (RH) requer a presença de uma camada transdutora que induz uma acção térmica ou mecânica para a qual a fibra é directamente sensível. [36].

No presente sensor, a camada transdutora é um material híbrido orgânico-inorgânico com forte adesão à fibra óptica, que muda de volume consoante níveis distintos de humidade relativa. A expansão da camada sensível será reflectida na rede de Bragg, resultando numa variação do seu comprimento de onda de Bragg. O revestimento transdutor tem uma forte adesão à fibra óptica e a sua expansão é reversivelmente afectada pela variação dos valores de humidade relativa, balizando-se entre (15,0%-95,0%). Porém, visto que as redes de Bragg são sensíveis às variações térmicas, é necessário incluir um sistema de compensação da temperatura. Regra geral, utiliza-se outra fibra com uma rede de Bragg não revestida, logo insensível às variações de humidade. A fibra óptica utilizada para o efeito foi uma fibra monomodo (Fibercore PS 1250/1500) [36].

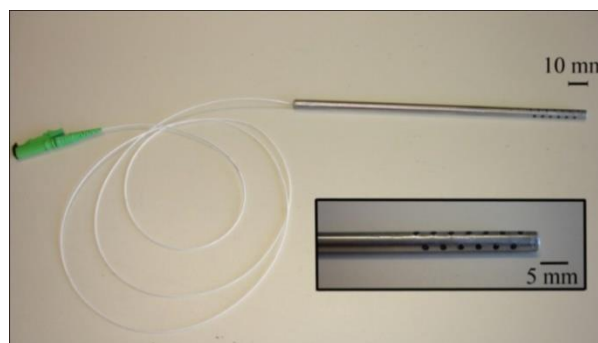
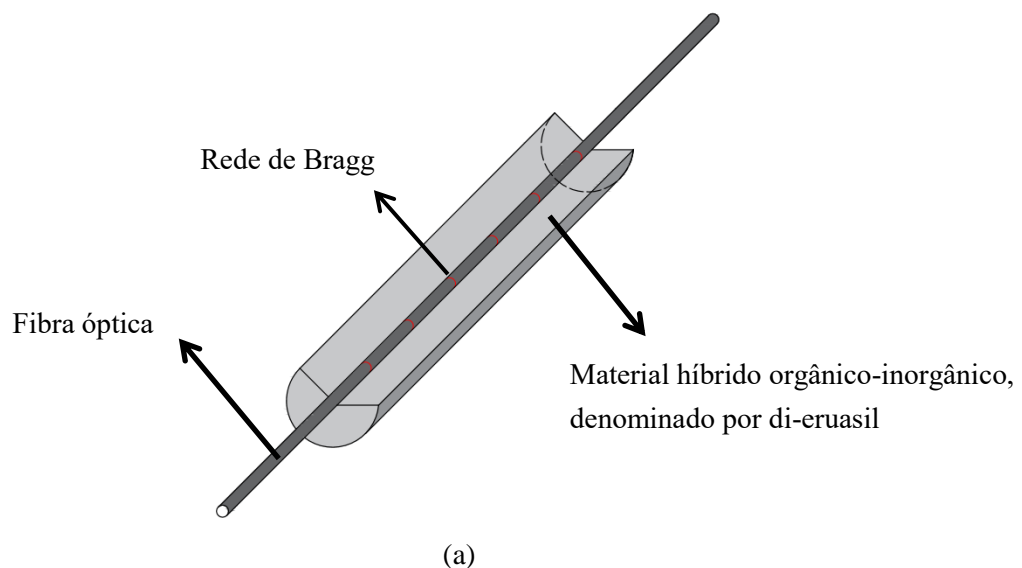
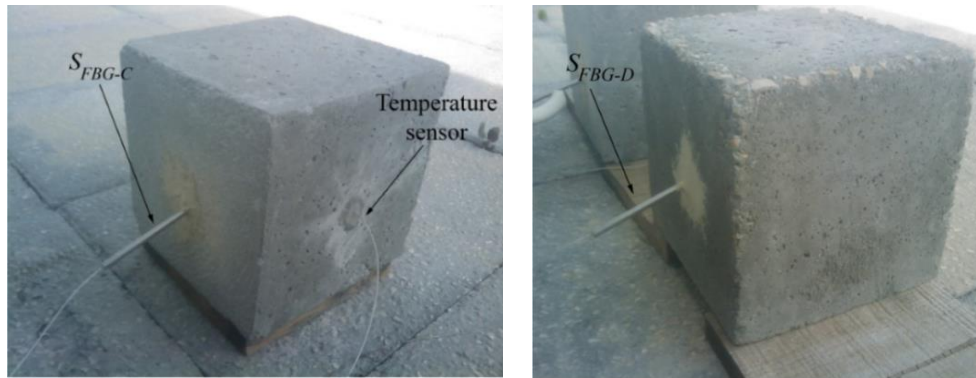
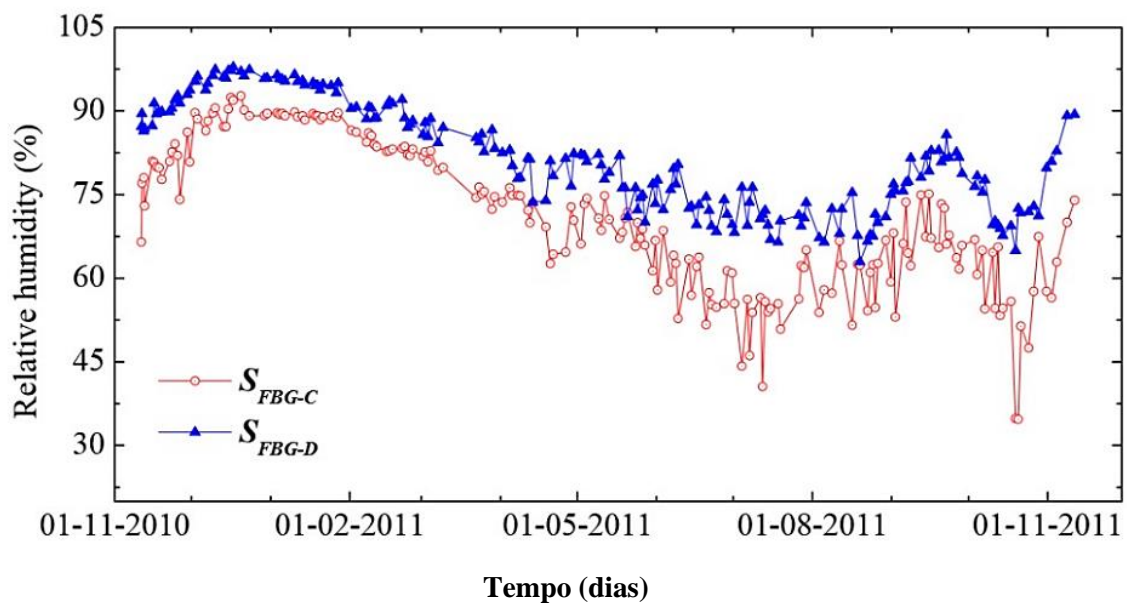


Figura 3.49: Sensor para medição da humidade relativa: a) Esquema detalhado do transdutor constituído por um material híbrido orgânico-inorgânico, denominado por di-eruasil; b) Aspecto físico do sensor [36].

A aplicabilidade do sensor desenvolvido foi testada num ensaio. Para o efeito, os sensores foram introduzidos em dois cubos de betão ($25 \times 25 \times 25 \text{ cm}^3$) que foram expostos às condições climáticas ambientais durante um ano (Figura 3.50 a)) [36]. A Figura 3.50 b) ilustra os resultados medidos pelos sensores durante um ano. Os sensores estão em fase mas apresentam uma pequena diferença em termos de humidade relativa medida devido ao facto de porosidade dos cubos de betão ser diferente [36].



(a)



(b)

Figura 3.50: Aplicação prática do sensor de humidade relativa: a) Cubos onde foram instalados os sensores; b) Resultado medido pelos sensores durante o período de um ano [36].

4. CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

No âmbito da monitorização da durabilidade das estruturas e com o objectivo de associar estes parâmetros a casos reais, procedeu-se à realização de uma campanha experimental. Numa primeira fase procedeu-se à utilização de um sensor electroquímico, designado como kit-sensor de corrosão, embebido em dois provetes de betão. O estudo sobre sensores electroquímicos conta já com uma vasta investigação e de trabalhos realizados. Contudo, a interpretação dos seus resultados e a avaliação da influência das acções ambientais sobre as medidas electroquímicas, continua a ser um assunto que carece de investigação. O trabalho experimental desenvolvido apresenta como novidade relativamente a trabalhos anteriores a avaliação das medidas electroquímicas em provetes húmidos sob a variação da temperatura, simulando o efeito da temperatura em períodos de chuva.

Na segunda fase da campanha experimental e, no seguimento do trabalho desenvolvido na primeira fase, procedeu-se à avaliação das potencialidades de um sensor em fibra óptica plástica, POF (Plastic Fibre optic), para monitorização do teor em água das estruturas. Um dos primeiros trabalhos desenvolvidos com fibra óptica de plástico para embeber no betão foi realizado por Clive et al [79]. O trabalho consistia no uso de fibra óptica de plástico para monitorizar o processo de cura do betão. Baseava-se na perda de potência óptica transmitida devido a micro flexões da fibra, induzidas pela retracção do betão durante todo o processo de cura. A principal desvantagem deste método prende-se com a fraca sensibilidade do processo. Durante esta campanha experimental foi aplicado um método, igualmente baseado em fibras ópticas de plástico, em que a determinação do teor em água é feita através do espalhamento do sinal óptico nos sulcos impostos às fibras. A campanha realizada teve como ponto de partida o trabalho efectuado por P.S. André et al [78], da Universidade de Aveiro, para monitorizar também a cura do betão.

4.2. SENSOR ELECTROQUÍMICO: KIT-SENSOR DE CORROSÃO

4.2.1. DESCRIÇÃO DO KIT-SENSOR DE CORROSÃO

O trabalho experimental teve como objectivo avaliar a influência da humidade e temperatura em parâmetros de durabilidade como o potencial de corrosão e a corrente galvânica, através de um kit-sensor de corrosão embebido num provete de betão com as dimensões de 30x50x10 cm³. O kit-sensor de corrosão é composto por um sensor de temperatura, um sensor de múltiplos eléctrodos (CorroWatch Multisensor) e por um eléctrodo de referência de dióxido de manganês (ERE 20) ambos da empresa Force Technology.

O sensor de corrente galvânica utilizado possui quatro ânodos de aço carbono, posicionados a diferentes alturas, numa base circular e um cátodo de titânio activado, colocado ao longo do perímetro da

base circular (Figura 4.1). O princípio geral de funcionamento de um sensor de corrente galvânica foi descrito no ponto 2.4 deste documento. Recordando brevemente, o funcionamento deste sensor assenta na medição da intensidade de corrente entre os ânodos, metal menos nobre, e o cátodo, metal mais nobre, em contacto através de um electrólito (betão) (Figura 4.2). A corrente eléctrica registada constitui uma medida indicativa da velocidade do processo de corrosão. Porém, a determinação da velocidade de corrosão das armaduras, a partir da medição de corrente galvânica, ainda não é consensual no meio científico. Uma vez que o sensor de corrente galvânica possuiu uma razão A_c/A_a (área do cátodo/área do ânodo) relativamente pequena, não permite validar a proporcionalidade entre a intensidade de corrente medida na macrocélula formada pelo sensor e a velocidade de corrosão. Na verdade, a corrente galvânica medida pelo sensor é representativa de uma parte da corrente de corrosão [61].

A medição de corrente galvânica entre os ânodos e o cátodo permite identificar o instante em que ocorre a despassivação do metal que constitui os ânodos por contaminação do betão pelos agentes agressivos. Como o sensor de corrente galvânica possui ânodos a diferentes profundidades, é possível determinar a qualquer instante a profundidade dos agentes agressivos.

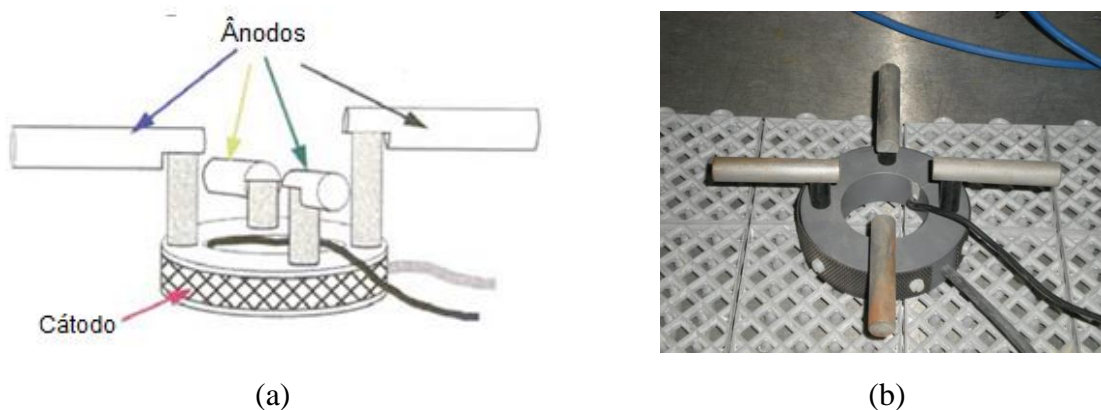


Figura 4.1: Sensor de corrente galvânica: a) esquema do sensor; b) fotografia do sensor.

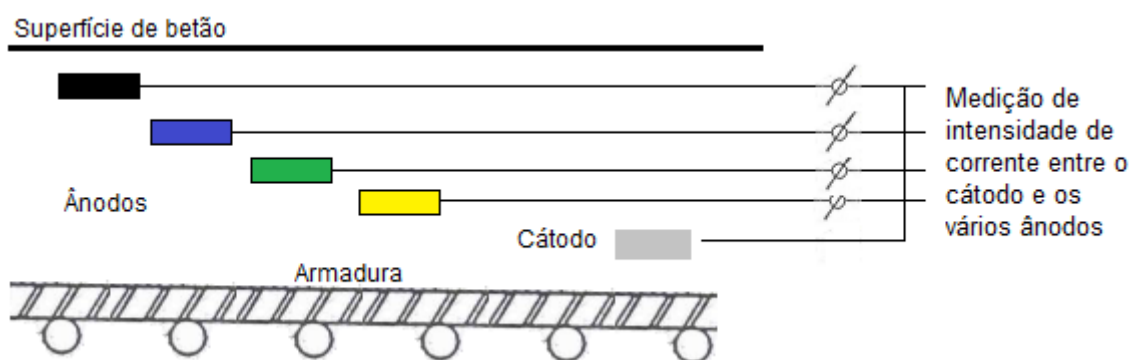


Figura 4.2: Esquema de medição da corrente galvânica com o sensor CorroWatch.

O eléctrodo de referência de dióxido de manganês (MnO_2) foi especialmente concebido para ser embebido no betão. Este eléctrodo é constituído por um eléctrodo de dupla junção contendo MnO_2 , numa caixa de aço inoxidável, com um gel NaOH de pH 13,5. O contacto do eléctrodo de referência com o betão é realizado através de uma camada de cimento poroso (Figura 4.3). Esta camada, para além de

uma boa ligação ao betão, permite o contacto da solução do eléctrodo com a solução dos poros intersticiais do betão. No entanto, o valor de pH no interior do eléctrodo é semelhante à solução nos poros de betão, minimizando o potencial de junção. Porém, a existência deste potencial de junção torna o eléctrodo sensível a alterações de pH da solução, variando cerca de 30 mV por uma unidade de pH [107]. O valor típico do potencial do eléctrodo de MnO_2 medido numa solução de $Ca(OH)_2$ saturada a 23°C em comparação com o eléctrodo de calomelanos saturado é de 160 mV (+160Mv vs SCE) e igual a 405mV (+405Mv vs NHE) na escala de hidrogénio [61].

A incorporação deste eléctrodo no kit-sensor de corrosão possibilita a medição do potencial dos ânodos e da armadura, tendo por base o potencial do eléctrodo de referência MnO_2 .



Figura 4.3: Eléctrodo de referência dióxido de manganês, ERE 20.

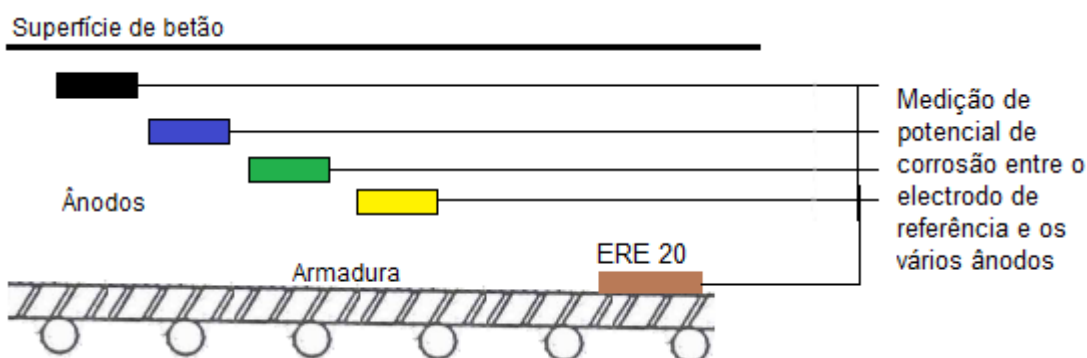


Figura 4.4: Processo esquemático de medição de potencial de corrosão do sensor ERE 20.

Na tabela 4.1 indica-se a probabilidade da actividade de corrosão para estruturas expostas à atmosfera em função dos valores medidos do potencial e da intensidade de corrente.

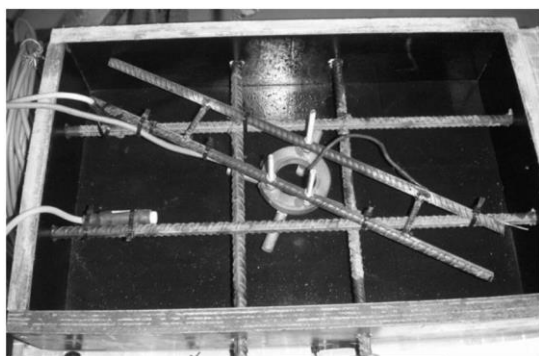
Tabela 4.1: Probabilidade da actividade de corrosão de estruturas expostas à atmosfera.

Probabilidade de actividade de corrosão	Potencial (mV vs MnO_2)	Corrente ($\mu A/cm^2$)
>90% de probabilidade de não ocorrer	>-305	> -2
Probabilidade de corrosão	-305 a -455	-2 a -10
>90% de probabilidade de ocorrer	<-455	< -10

4.2.2. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

O kit-sensor de corrosão, como foi referido anteriormente, foi embebido em provetes de betão, construídos durante o desenvolvimento da tese de doutoramento da Doutora Engenheira Helena Isabel Maia Figueiras, intitulada como “Performance-based design of SCC to ensure durability of concrete structures”, em Novembro de 2013 (Figura 4.5) [108].

A campanha experimental levada a cabo teve como objectivo colocar dois provetes dentro de uma câmara com temperatura e humidades controladas (FITOCLIMA 3600 EDTu) expondo-os ao longo do tempo a diferentes temperaturas. Esta campanha dividiu-se em duas fases distintas. A primeira fase correspondeu à medição de potencial de corrosão e corrente galvânica dos provetes secos a 20°C. Na segunda fase foram realizados ciclos de temperatura e humidade. Antes de iniciar a segunda fase da campanha foi colocada em cima dos provetes uma lâmina de água. A introdução da lâmina de água tinha o objectivo de provocar humidade no interior dos provetes, recreando uma situação de intensa precipitação. O objectivo deste ensaio consistiu em avaliar o efeito da temperatura nas evoluções das reacções electroquímicas, em provetes húmidos, ao longo do tempo, para uma variação de temperatura entre 10°C e 40° C, concretizando um ciclo de subida e um ciclo de descida, em passos de 10° C, e com isso avaliar a evolução do potencial de corrosão e da corrente galvânica.



(a)



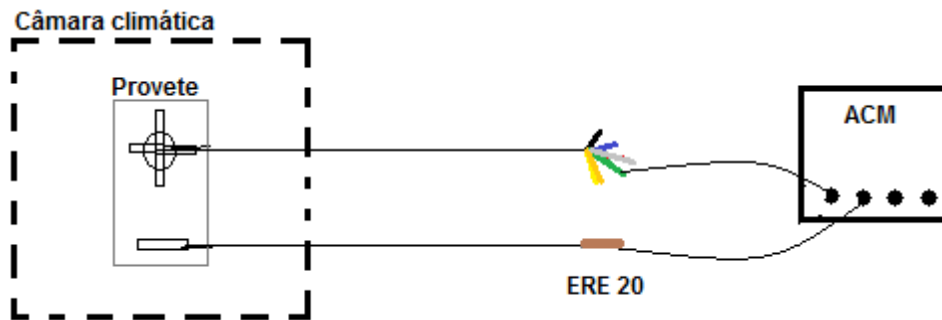
(b)

Figura 4.5: Proвете usado na campanha experimental [108]: a) Proвете antes da betonagem onde é visível os sensores usados; b) Proвете após a betonagem, já com as guardas laterais que permitiram a colocação da lâmina de água.

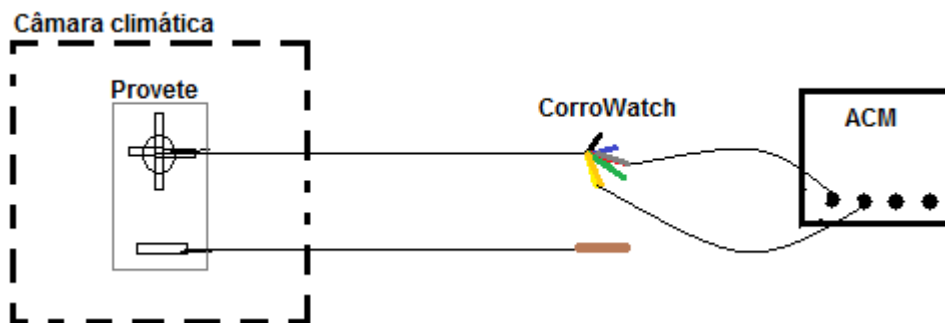
O equipamento utilizado para a obtenção dos resultados foi o ACM Instruments-GiLL AC e respectivo software no computador. As medições foram realizadas de forma manual, primeiro efectuando medições de potencial, estabelecendo um circuito entre o ACM o fio condutor do eléctrodo de referência e os vários ânodos (Figura 4.5 a)). Após a medição do potencial de corrosão procedia-se à medição de corrente galvânica. Para a medição de corrente galvânica, foi estabelecido um circuito entre o cátodo e os vários ânodos (Figura 4.6 b)). Desta forma, para cada provete, foram lidos quatro potenciais de corrosão e quatro correntes galvânicas. O resultado da medição, utilizando o software no computador, era apresentado sob a forma de um gráfico em que nas abcissas é registado o tempo, num intervalo de 27 segundos, e nas ordenadas é representado o potencial de corrosão ou a corrente galvânica.

Depois de obtido este gráfico, no caso do potencial de corrosão, os resultados foram tratados, obtendo um valor final igual à média dos valores registados ao longo do tempo (Figura 4.7). No caso da corrente galvânica, o tratamento de resultados foi feito de forma diferente. O valor final assumido corres-

pondeu ao valor registado após 5s ter sido estabelecido o circuito entre o ânodo e o cátodo (Figura 4.8).



(a)



(b)

Figura 4.6: Esquema representativo das medições: a) Medição de potencial de corrosão; b) Medição de corrente galvânica.

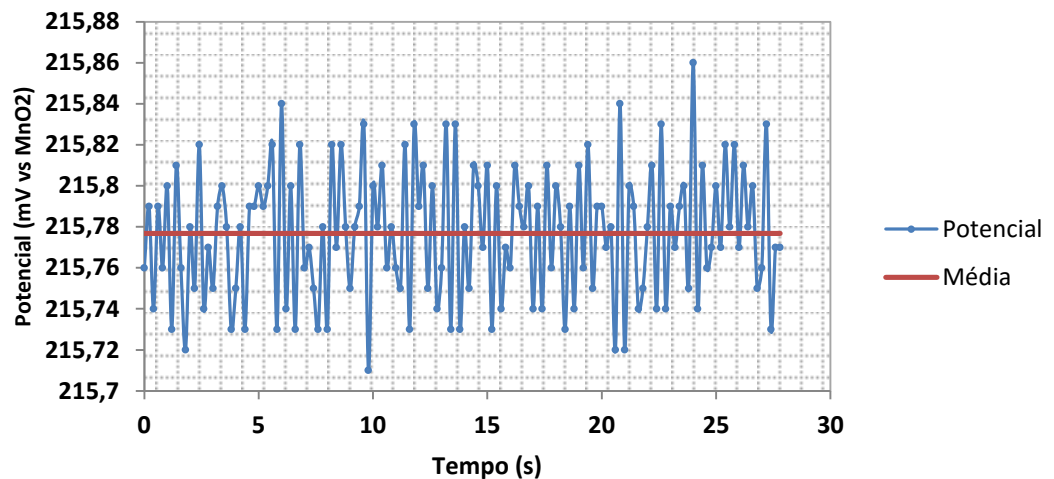


Figura 4.7: Resultado tipo da medição de potencial de corrosão com o equipamento ACM realçando o valor médio utilizado.

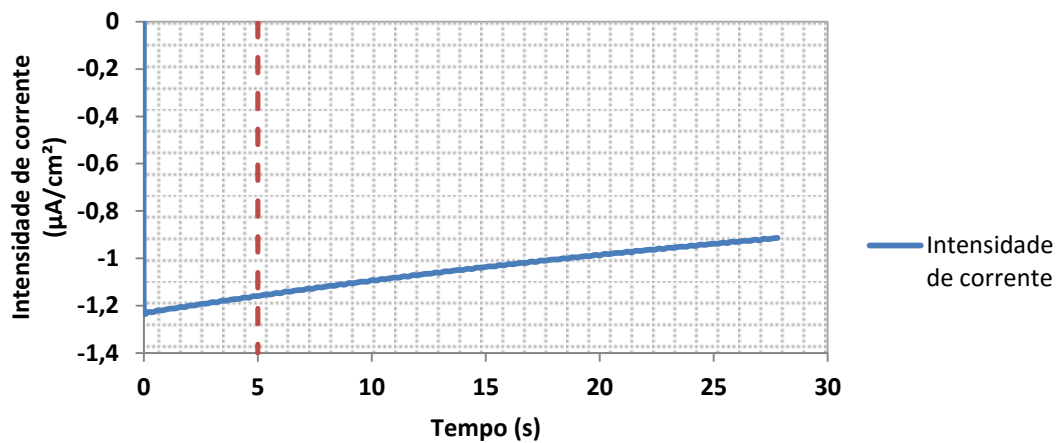


Figura 4.8: Resultado tipo da medição de corrente galvânica com o equipamento ACM realçando o valor medido aos 5s após estabelecido o contacto entre o ânodo e o cátodo.

Na Tabela 4.2 está sintetizado o programa experimental realizado usando os provetes onde foi instalado o kit-sensor de corrosão.

Tabela 4.2: Programa experimental

Mapa de trabalhos				
	Dia	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Tarefa
Fase 1	-	-	20	- Medição de corrente galvânica e potencial de corrosão com os provetes secos;
	0	0	10	- Colocação da lâmina de água (ficou até ao quinto dia);
Fase 2	5	120	10	
	7	168	20	
	10	240	30	
	12	288	40	
	14	336	30	
	17	408	20	
	19	456	10	
	21	528	10	- Medição da corrente galvânica e do potencial de corrosão;

4.2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes de apresentar os resultados da campanha experimental, considera-se oportuno apresentar os resultados obtidos para um dos provetes previamente ensaiados por Figueiras [108], de forma a permitir retirar mais conclusões (Figura 4.9). Durante os ensaios realizados por Figueiras [108], o provete esteve num ambiente de humidade controlada (50% HR) e a temperatura variou entre 10°C e 40°C, em intervalos de 5°C. Os resultados medidos durante o ensaio estão ilustrados na Figura 4.9. Analisando os resultados, é possível observar que com o aumento da temperatura, o potencial de corrosão e a corrente galvânica assumem valores mais negativos, com uma variação de 1,5 mV/°C e 0,0159 $\mu\text{A}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$, respectivamente.

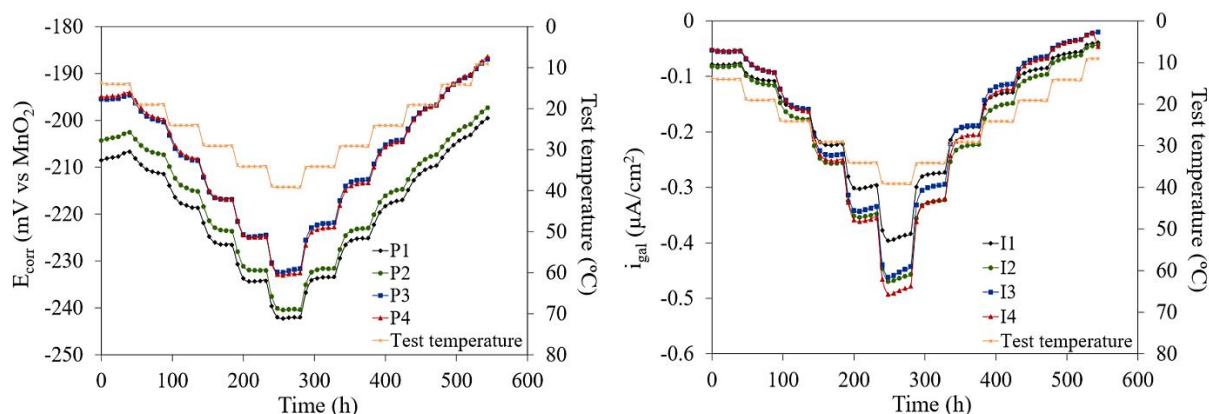


Figura 4.9: Resultados do impacto da temperatura nas medições de potencial de corrosão e corrente galvânica [108].

Os resultados das medições efectuadas na Fase 1, com os provetes secos (20°C), estão apresentados na Tabela 4.3. Importa referir que os ânodos do provete 1 mantiveram-se sempre em estado passivo e que o provete 2, aquando do trabalho de doutoramento de Figueiras [108], foi submetido a um processo acelerado de corrosão, induzida por ciclos de molhagem e secagem e exposição aos cloretos, provocando a corrosão dos ânodos do sensor.

Tabela 4.3: Potencial de corrosão e corrente galvânica registado no provetes secos a 20°C.

	Ânodos	Potencial (mV)	Corrente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Provete 1	Preto	-220	-0,53
	Azul	-187	-0,35
	Verde	-184	-0,29
	Amarelo	-176	-0,10
Provete 2	Preto	-237	-1,05
	Azul	-278	-0,79
	Verde	-246	0,53
	Amarelo	-222	-0,2

Através da análise da Tabela 4.3 é plausível afirmar que os provetes possuem medidas de potencial de corrosão e de correntes galvânicas muito baixas. Os valores registados correspondem a baixa probabilidade de corrosão de acordo com a Tabela 4.1. Os ânodos do sensor estavam ainda no estado passivo e o betão do provete estava com humidade bastante baixa. Por outro lado, verificou-se que os valores agora obtidos são da mesma ordem de grandeza dos dados obtidos por Figueiras [108] relativamente ao potencial de corrosão do provete 1 (Figura 4.9). No provete 2, os dados registados são superiores aos obtidos por Figueiras [108]. Em relação às medições registadas de corrente galvânica, elas são ligeiramente superiores às representadas na Figura 4.9, no entanto, ainda dentro dos limites apresentados para a baixa probabilidade à actividade de corrosão.

Passando agora à análise da Fase 2, fase na qual os provetes foram previamente humedecidos. Relativamente ao provete 1, os valores registados pelo kit-sensor de corrosão encontram-se na Figura 4.10 e Figura 4.11. Os gráficos apresentados são referentes aos valores registados pelos ânodos do kit-sensor de corrosão. Na interpretação dos gráficos deve-se ter em conta as cores dos ânodos que estão de acordo com a Figura 4.2 e 4.4. A evolução da temperatura está marcada pela cor vermelha a traço interrompido e corresponde à temperatura registada no amostrador da câmara climática.

A introdução da lâmina de água, a simular um período de precipitação intensa, não alterou o comportamento típico de ânodos no estado passivo. O comportamento de ânodos no estado passivo é idêntico aos valores ilustrados na Figura 4.9. De um modo geral, os sensores registaram valores de correntes galvânicas e potenciais de corrosão baixos. Observando a evolução das medições efectuadas, conclui-se que tanto os registos de potencial de corrosão como os de corrente galvânica apresentam uma evolução como a variação de temperatura. Este comportamento foi idêntico ao obtido pelos dados do provete ilustrado na Figura 4.9.

Analisando os resultados pode-se observar que, com o aumento da temperatura o potencial de corrosão e a corrente galvânica tornam-se mais negativos, diminuindo, em média, $1,283 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$ e $0,042 \text{ } \mu\text{A} / \text{cm}^2 / ^\circ\text{C}$, respectivamente. Na descida da temperatura o potencial de corrosão e a corrente galvânica aumentam em média, $1,025 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$ e $0,041 \text{ mA} / \text{cm}^2 / ^\circ\text{C}$, respectivamente (Tabela 4.4). Este fenómeno está de acordo com as investigações realizadas até então e exibem uma tendência semelhante à ilustrada na Figura 4.9.

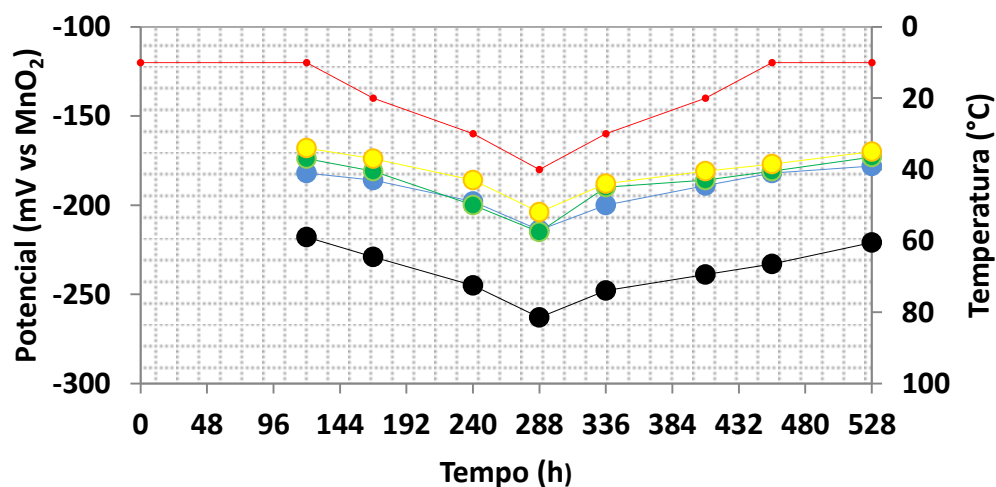


Figura 4.10: Resultado ao longo do tempo das variações de potencial de corrosão do provete 1.

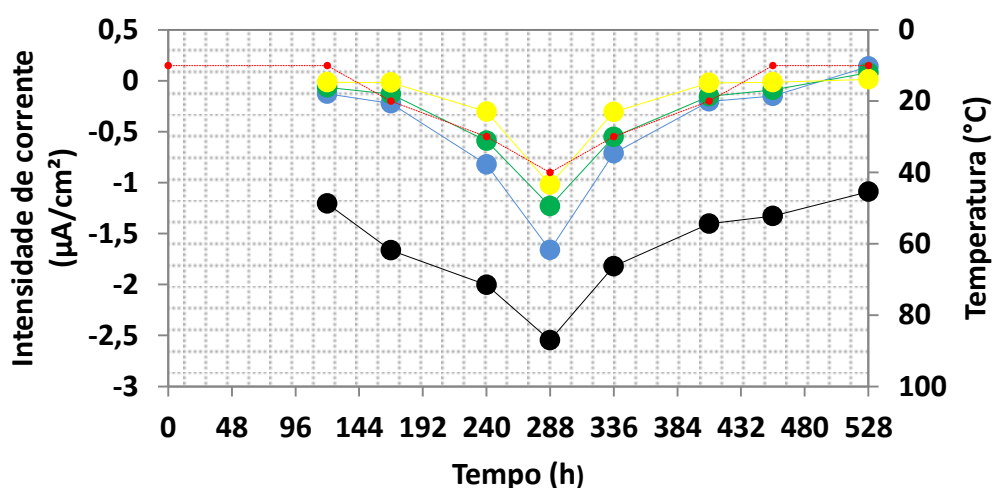


Figura 4.11: Resultado ao longo do tempo das variações de corrente galvânica do provete 1.

As variações observadas no potencial de corrosão dependem principalmente da forma como a temperatura afecta a natureza, a composição e a distribuição da camada de óxido do ânodo. Para além disso, o potencial do eléctrodo de referência também pode sofrer variações sob o efeito da temperatura. O aumento da temperatura aumenta também a corrente galvânica (em valores absolutos), uma vez que melhora a mobilidade de iões através do electrólito e aumenta a cinética das reacções anódicas e catódicas [57].

Porém, o ganho/perda de potencial de corrosão e de corrente galvânica apresentam uma ligeira diferença consoante o ciclo é de subida ou descida. Segundo os resultados apresentados na Tabela 4.4, o provete 1 reage mais rapidamente à subida da temperatura do que à descida, resultando num maior aumento de potencial e de corrente por grau de temperatura. Um factor que contribui para esta diferença é a própria câmara climática, na medida em que esta apresenta uma grande inércia à diminuição de temperatura devido às suas proporções físicas (grandes dimensões). Por outro lado, como os ciclos de temperatura são curtos, o provete, aquando das medições, não tinha uma temperatura uniforme ao longo do seu interior.

Tabela 4.4: Variação dos potenciais de corrosão e correntes galvânicas por °C.

Ciclo de subida (+10 a +40 °C)					
	Preto	Azul	Verde	Amarelo	Média
mV/°C	1,5	1,06	1,36	1,2	1,283
µA /cm ² /°C	0,0446	0,0511	0,0389	0,03355	0,042
Ciclo de descida (+40 a +10 °C)					
mV/°C	1,0	1,066	1,13	0,9	1,025
µA/cm ² /°C	0,0405	0,0503	0,0381	0,0335	0,041

Deste modo, no ciclo de descida, aquando das medições efectuadas, provavelmente a temperatura do provete estava ligeiramente diferente da indicada no amostrador da câmara. Na tentativa de comprovar o facto referido anteriormente, foram efectuadas duas medições à mesma temperatura (10 °C), garantindo desta forma que o provete atingiria uma temperatura constante. A Tabela 4.5 mostra a variação relativa entre as últimas duas medições efectuadas (dia 19 e 21) com a primeira (dia 0), também a 10°C. Pela análise da Tabela 4.5, as medições de potencial de corrosão e de corrente galvânica diminuem (em valores absolutos) na segunda medição efectuada a 10 °C (dia 21) comparativamente com a primeira medição (dia 19), fortalecendo a ideia de que o intervalo de tempo, entre cada medição, foi insuficiente para se estabelecer uma temperatura constante e uniforme em profundidade no provete.

Tabela 4.5: Variação relativa entre as duas últimas medições e a primeira medição, todas realizadas a 20°C.

Variação relativa (%)					
Dia da medição	Parâmetro	Preto	Azul	Verde	Amarelo
Dia 19 (456h)	Potencial (mV/°C)	6,881	0	4,023	5,357
	Corrente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$)	10,051	17,762	41,668	19,623
Dia 21 (528h)	Potencial (mV/°C)	1,376	2,198	0,575	1,190
	Corrente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$)	9,860	9,116	26,034	5,811

Na tabela 4.6 está apresentada a comparação dos valores de potenciais de corrosão e de correntes galvânicas, a 20°C, entre os provetes secos (Tabela 4.3) e os provetes húmidos (Figura 4.10 e Figura 4.11). Pela análise verificou-se que a humidade não alterou os potenciais de corrosão, apresentando variações insignificantes, no entanto, houve algumas variações nas correntes galvânicas registadas, uma vez que, com a humidade as correntes galvânicas aumentaram, mas sempre dentro da mesma gama de valores.

Tabela 4.6: Comparação do provete 1 seco e molhado.

	Âodos	Seco	Molhado	Rácio (%)
Potencial (mV/°C)	Preto	-220	-229	0,96
	Azul	-187	-186	1,01
	Verde	-184	-181	1,01
	Amarelo	-176	-174	1,01
Corrente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$)	Preto	-0,53	-1,66	0,31
	Azul	-0,35	-0,22	1,59
	Verde	-0,29	-0,12	2,416
	Amarelo	-0,10	0,013	7,69

Relativamente ao provete 2, as medições efectuadas pelo kit-sensor de corrosão mostram um comportamento diferente em relação ao provete 1, analisado anteriormente. Caracteriza-se por possuir potenciais de corrosão e correntes galvânicas muito elevadas em valor absoluto (Figura 4.12 e Figura 4.13).

Com a introdução da lâmina de água, simulando período de intensa precipitação, os valores de potencial de corrosão diminuíram comparativamente com os valores medidos aquando do provete seco. Assim, a introdução da lâmina de água, fez variar os parâmetros medidos, colocando-os em valores de grande probabilidade de corrosão (Tabela 4.1). Com a análise e interpretação dos dados, registados pelo kit-sensor de corrosão, nota-se claramente que à medida que a temperatura aumenta, o potencial de corrosão medido diminui em valores absolutos (Figura 4.12). Este comportamento é contrário ao que aconteceu com as medições efectuadas no provete 1. Estes resultados poderiam ser justificados pelo facto de durante o ensaio, onde se fez variar a temperatura até aos 40°C, ter ocorrido secagem do provete. No caso dos ânodos já terem iniciado o processo de corrosão, como é este o caso, o processo de secagem poderia estar a ter um efeito muito mais preponderante sobre as medidas electroquímicas do que a variação de temperatura provoca na cinética das reacções. Contudo, observando os resultados da corrente galvânica, estas suposições parecem não ser coerentes. Assim, neste momento não se consegue explicar o comportamento observado no provete 2 para o potencial de corrosão.

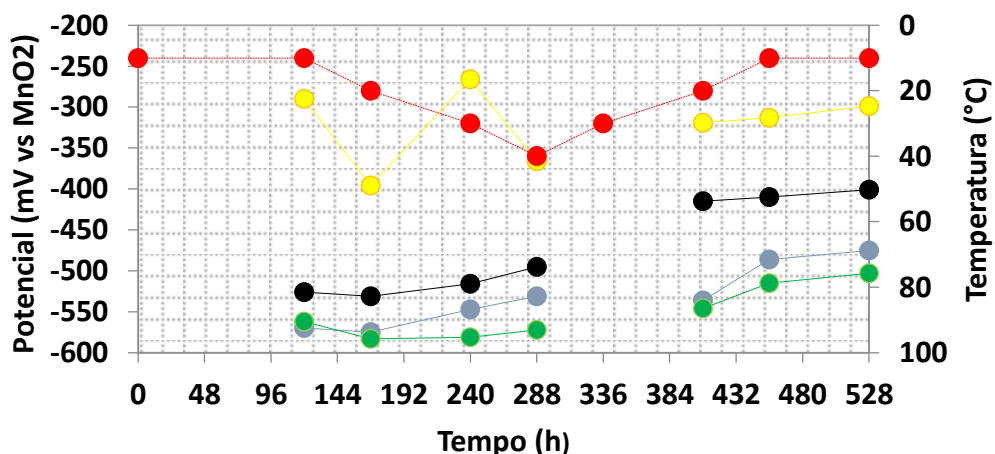


Figura 4.12: Resultado ao longo do tempo das variações de potencial de corrosão do provete 2.

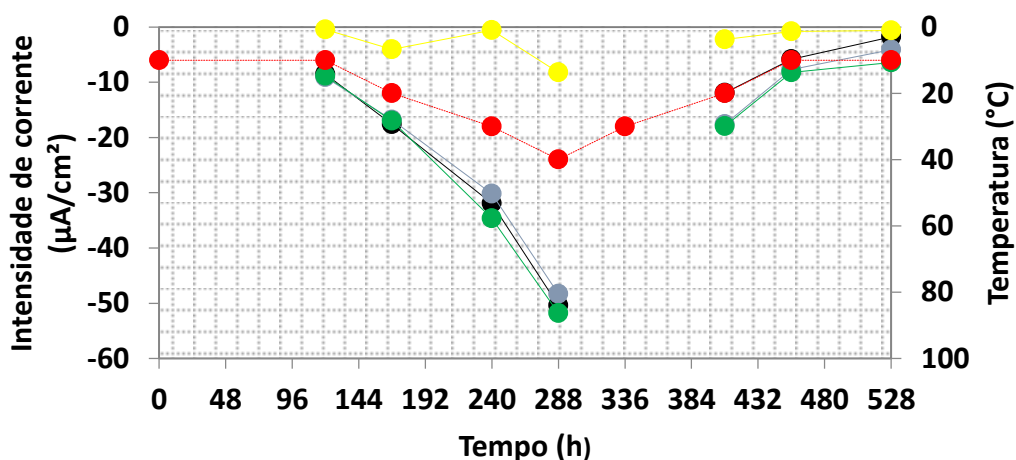


Figura 4.13: Resultado ao longo do tempo das variações de corrente galvânica do provete 2.

Relativamente às medidas registadas de correntes galvânicas elas apresentam claramente valores muito elevados, em valor absoluto, (Figura 4.13), característicos de ânodos já corroídos (Tabela 4.1). Na tabela 4.7 apresenta-se a variação de corrente galvânica por °C no ciclo de subida e descida. A variação de corrente galvânica tanto no ciclo de subida como no ciclo de descida apresentam valores muito elevados como 1,37 $\mu\text{A}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$ e 1,43 $\mu\text{A}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$, respectivamente. Neste provete, a variação de corrente galvânica é muito maior em relação à corrente galvânica do provete 1 mas com igual sentido. Também é importante referir a diferença dos valores de corrente galvânica, a 20 °C, para o provete seco e molhado. Recorde-se, que o maior potencial de corrosão e a maior corrente galvânica registada para o provete 2 seco, foi de 278 mV e 1,05 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectivamente. Assim, com esses resultados, e de acordo com a Tabela 4.1, o provete indicaria um estado passivo. No entanto, com a introdução da humidade esses valores variaram muito, registando valores muito superiores, indicando estado de corrosão activa.

Na Tabela 4.7 não se faz referência ao ânodo amarelo uma vez que não se consegue explicar o seu comportamento, embora esteja concordante com as variações de potencial de corrosão.

Tabela 4.7: Variação da corrente galvânica por °C.

Ciclo de subida (+10 a +40 °C)				
	Preto	Azul	Verde	Média
$\mu\text{A}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$	1,30	1,43	1,43	1,37
Ciclo de descida (+40 a +10 °C)				
$\mu\text{A}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$	1,48	1,35	1,45	1,43

4.2.4. APLICAÇÃO EM OBRA DO KIT-SENSOR DE CORROSÃO- PAREDE CURVA DO PORTO DE RECREIO

4.2.4.1 Caracterização da estrutura a analisar

A estrutura principal do porto de iates, implantado no Porto de Leixões, tem a configuração de uma parede curva, com 22 m de comprimento e 30 cm de espessura. A parede é armada em cada face com uma armadura horizontal ($\text{Ø}10 // 0,15$) e por uma armadura vertical ($\text{Ø}12 // 0,15$), formando uma malha. Tendo em consideração a exposição marítima, a parte inferior da estrutura é uma zona submersa, a parte média da curva corresponde uma zona molhagem e secagem, enquanto que a parte superior corresponde a uma zona de alguns salpicos e zona seca. A Figura 4.14 mostra uma visão geral da estrutura da Parede Curva do Porto de Recreio, no Porto de Leixões [108].

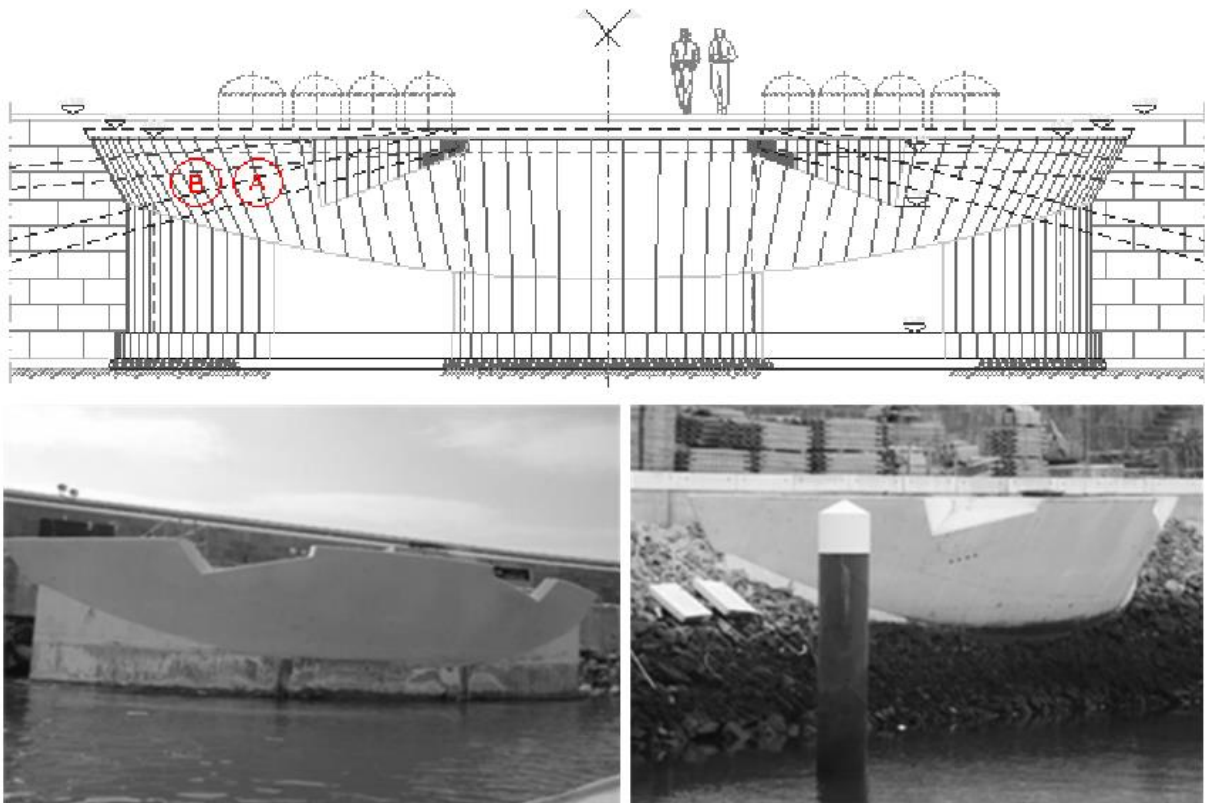


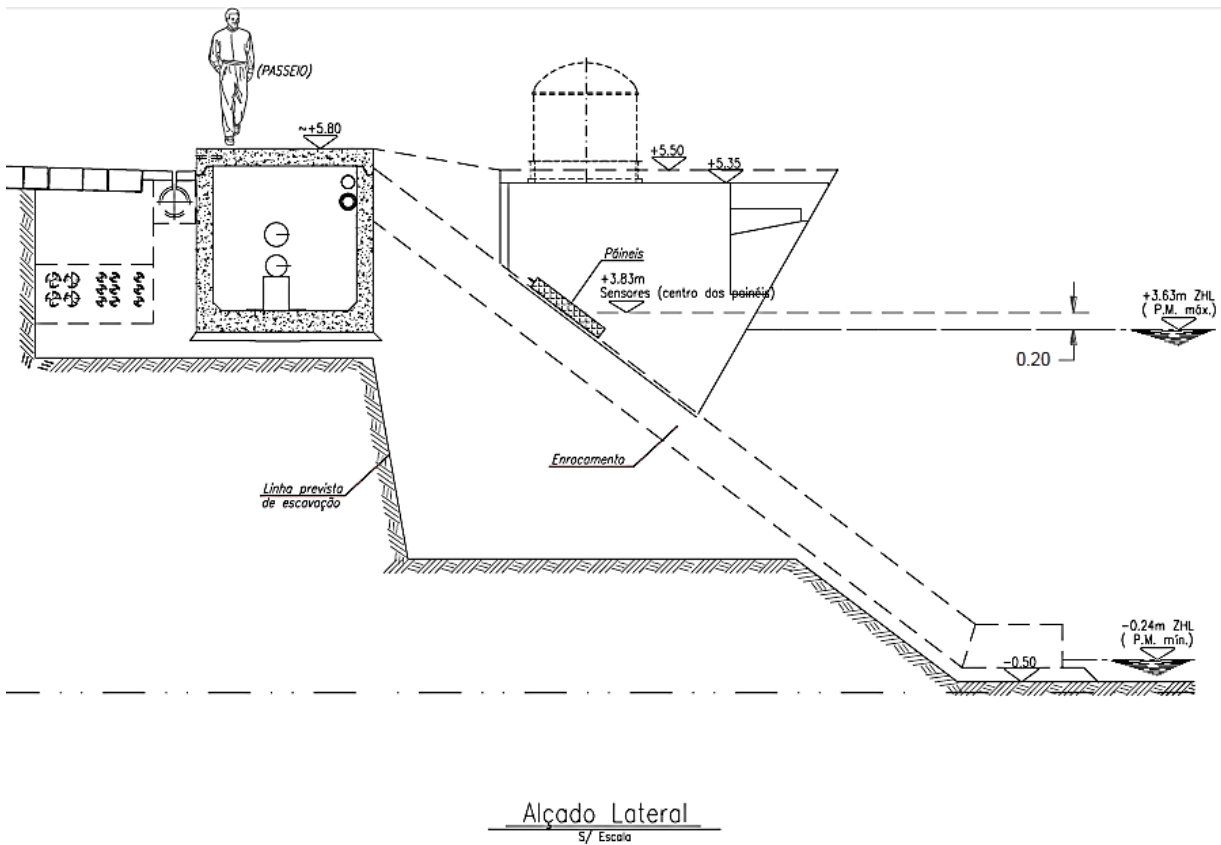
Figura 4.14: Visão geral da estrutura da Parede Curva do Porto de Recreio [108].

4.2.4.2 Sistema de monitorização de durabilidade

O sistema de monitorização de durabilidade instalado nesta estrutura é constituído pelo Kit-sensor de corrosão instalado em duas zonas. Na Figura 4.15 estão assinaladas as zonas A e B onde foram instalados os sensores de durabilidade, CKS-A e CKS-B, respectivamente. Na Figura 4.15 ilustra-se a instalação dos kits antes da betonagem. Houve também a instalação de um outro kit-sensor de corrosão (zona C), introduzido num painel, colocado ao lado da estrutura, sobre o enrocamento, sensivelmente à mesma cota que os sensores da zona A e B (Figura 4.16). Este painel possui o mesmo betão utilizado na parede curva, surgindo assim como um modelo reduzido. A instrumentação deste painel teve como principal objectivo retirar mais conclusões sobre o comportamento do betão à penetração dos agentes agressivos e, também, a possibilidade de se retirarem carotes para comparar a resposta do sensor com o valor real da penetração dos agentes agressivos [109].



Figura 4.15: Instalação do kit-sensor de corrosão na Parede Curva [108].



Alçado Lateral
S/ Escala

Figura 4.16: Alçado lateral da estrutura monitorizada com indicação da localização do painel instrumentado [109].

4.2.4.3 Resultados da monitorização

Antes de passar propriamente para os dados recolhidos actualmente, considera-se oportuno apresentar os dados recolhidos por este sistema de monitorização aquando da sua instalação de modo permitir retirar mais conclusões.

Da Figura 4.17 à Figura 4.20 estão ilustrados os valores do potencial de corrosão, correntes galvânicas e temperaturas, registados durante os primeiros 2,5 anos de serviço da estrutura. Note-se que durante esse período houve falhas de sinal, decorrentes de problemas no fornecimento de energia eléctrica.

Durante os primeiros meses houve uma variação relativamente significativa do potencial de corrosão e da corrente galvânica, para valores menos negativos. Este aumento é consequência de variações das condições ambientais, mas também poderá estar relacionado com o desenvolvimento do filme passivo sobre os ânodos e das variações das condições de humidade do betão (variações que são mais pronunciadas nos primeiros meses).

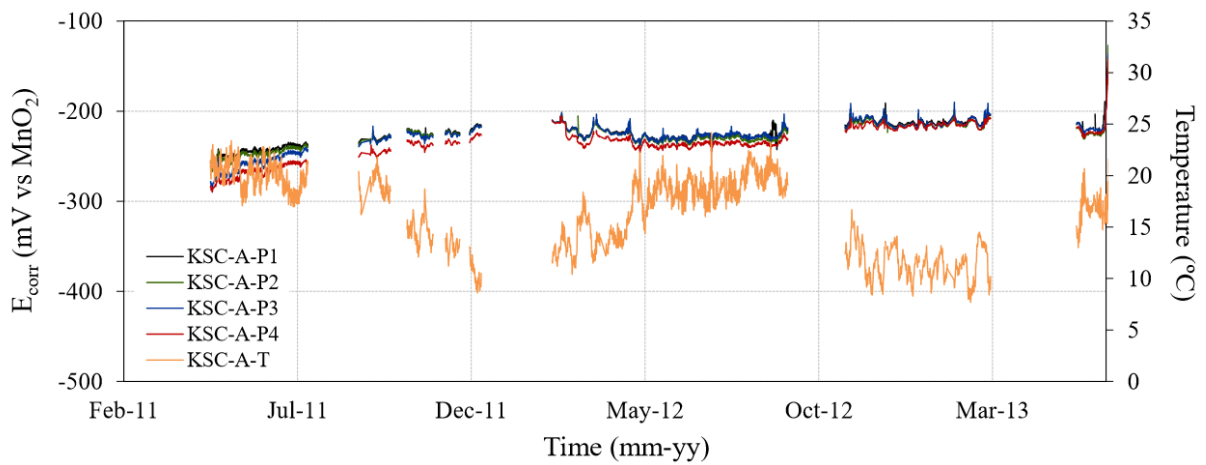


Figura 4.17: Dados registados de potencial de corrosão durante os primeiros 2,5 anos de serviço (CKS-A).

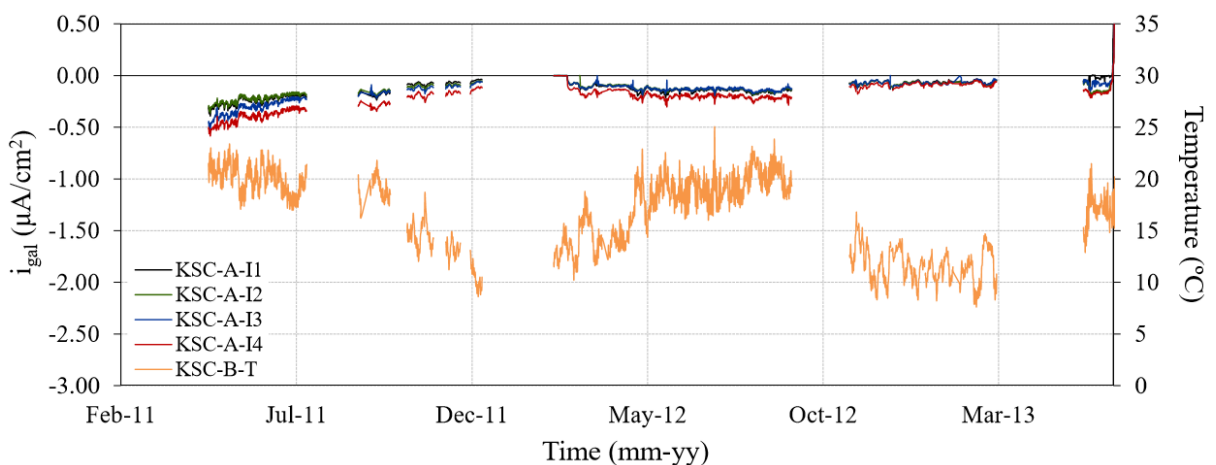


Figura 4.18: Dados registados de corrente galvânica durante os primeiros 2,5 anos de serviço (CKS-A).

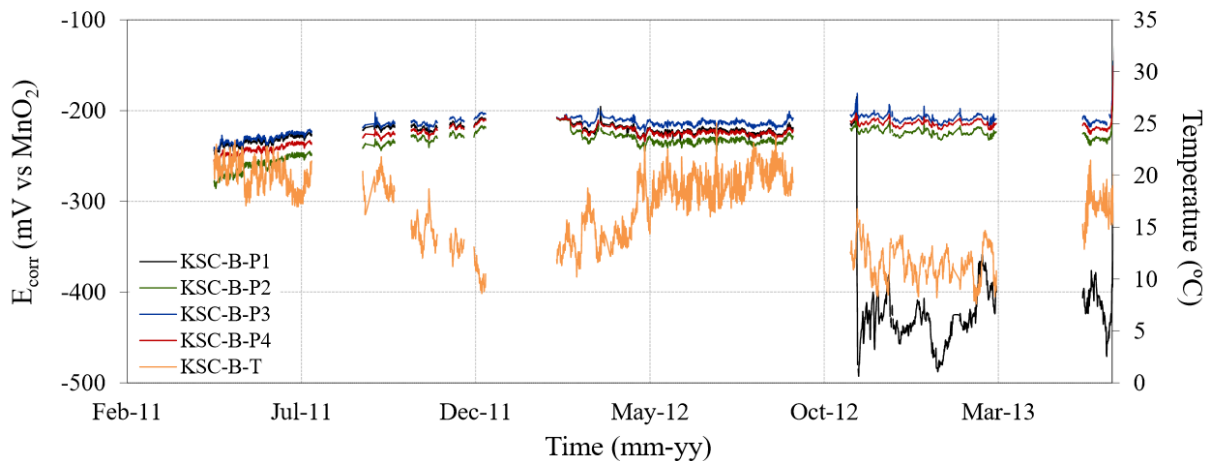


Figura 4.19: Dados registados de potencial de corrosão durante os primeiros 2,5 anos de serviço (CKS-B).

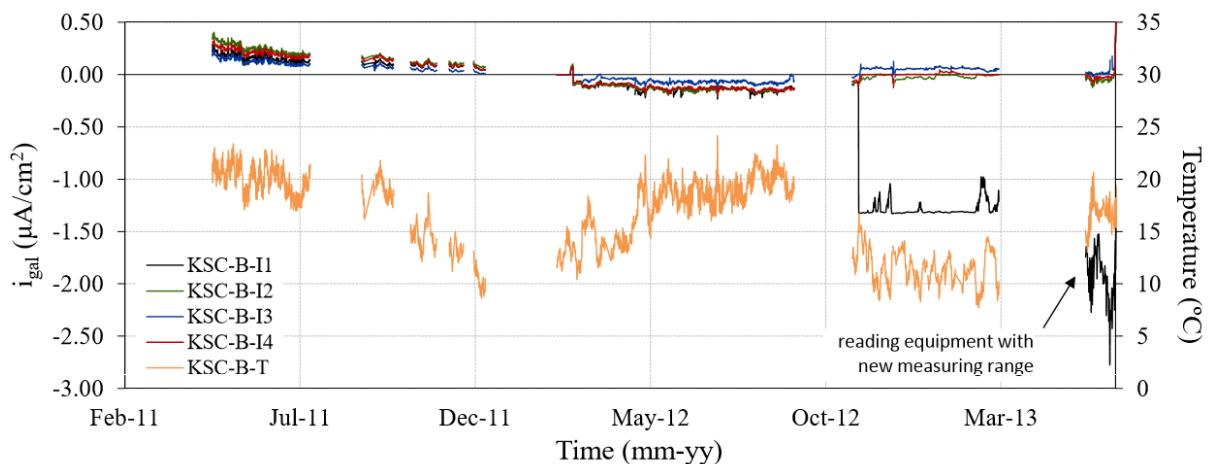


Figura 4.20: Dados registados de corrente galvânica durante os primeiros 2,5 anos de serviço (CKS-B).

Após o período inicial, o potencial de corrosão e corrente galvânica mostraram uma boa concordância com os ciclos diários e sazonais de temperatura. De acordo com os dados recolhidos com o kit sensor da zona A (CKS-A), parece que todos os ânodos ainda estão num estado passivo (baixa probabilidade de corrosão). No entanto, no kit-sensor da zona B (CKS-B), observou-se uma mudança súbita do potencial de corrosão e os valores de corrente galvânica no primeiro ânodo (CKS-B-P1 e CKS-B-I1, respectivamente), indicando alguma actividade de corrosão deste ânodo (provavelmente a ocorrência da despassivação do ânodo).

Passando agora para a análise da monitorização que teve início no dia 16 de Junho até 29 de Junho de 2016, ilustra-se na Figura 4.21 os dados registados de potencial de corrosão e de corrente galvânica do sensor instalado na zona A. Note-se que o primeiro nível do sensor se encontra avariado desde Agosto de 2013 e, por isso, não aparecem os respectivos registos.

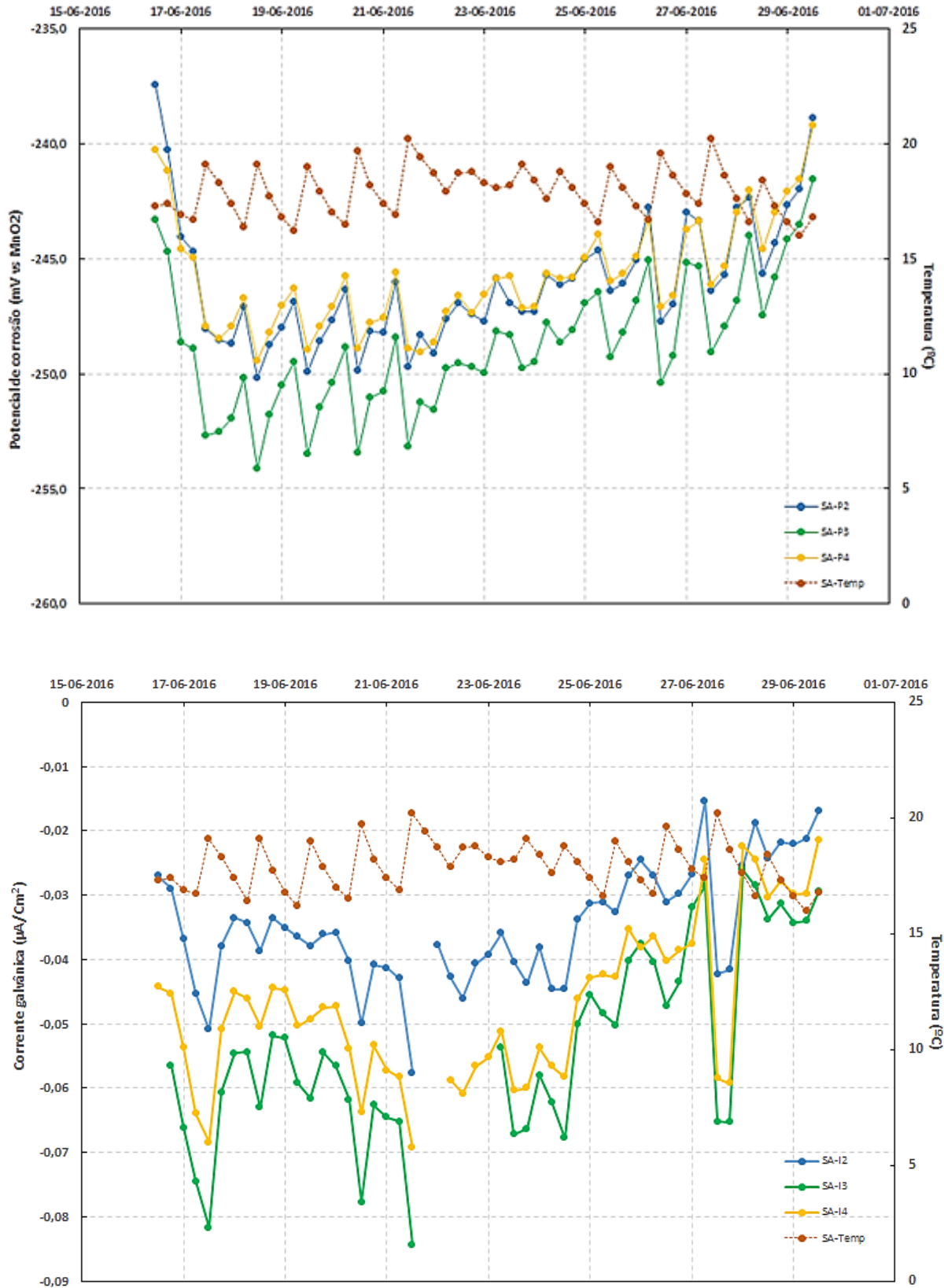


Figura 4.21: Dados registados de potencial de corrosão e corrente galvânica do CKS-A.

De um modo geral, os valores registados de potencial de corrosão e corrente galvânica são baixos, não indicando actividade de corrosão (Tabela 4.1). Em relação aos últimos dados recolhidos em 2013, o potencial de corrosão aumentou ligeiramente mas a corrente galvânica encontra-se mais baixa (em valores absolutos) mas dentro de parâmetros de não actividade de corrosão. No fundo, os resultados apresentados são um zoom do gráfico apresentado anteriormente, evidenciando-se as flutuações diárias da temperatura e dos respectivos parâmetros de durabilidade medidos. Segundo a Figura 4.21, torna-se evidente a dependência dos valores registados pelos ânodos com a temperatura. Essa correspondência é muito evidente entre os dias 16 e 20 de Junho. No período de 16 a 20 de Junho a variação de potencial de corrosão e de corrente galvânica é $1,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ e $5,068 \times 10^{-3} \mu\text{A}/^\circ\text{C}$. Nos ensaios laboratoriais foram encontrados valores próximos em relação ao potencial de corrosão ($1,283$ e $1,025 \text{ mV}/^\circ\text{C}$). No entanto, em relação à corrente galvânica, os valores obtidos em laboratório são dez vezes superiores ($0,042$ e $0,041 \mu\text{A}/^\circ\text{C}$) comparativamente com os registados em obra.

Relativamente ao sensor instalado na zona B, os valores registados não são muito diferentes dos encontrados no sensor instalados na zona A. Observam-se as flutuações diárias dos parâmetros de durabilidade. Nota-se também a dependência das medidas de potencial de corrosão com a temperatura, e neste caso essa dependência é bastante concordante ao longo de todo o período de análise (Figura 4.22). Verifica-se também uma dependência da corrente galvânica com a temperatura (Figura 4.23). A dependência do potencial de corrosão corresponde em média a $1,45 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ enquanto que a corrente galvânica $6,99 \times 10^{-3} \mu\text{A}/^\circ\text{C}$. Um pormenor importante a referir é que comparativamente com os resultados anteriores (2013), o ânodo 1 do CKS-B parece ter retomado a valores indicativos de um estado passivo.

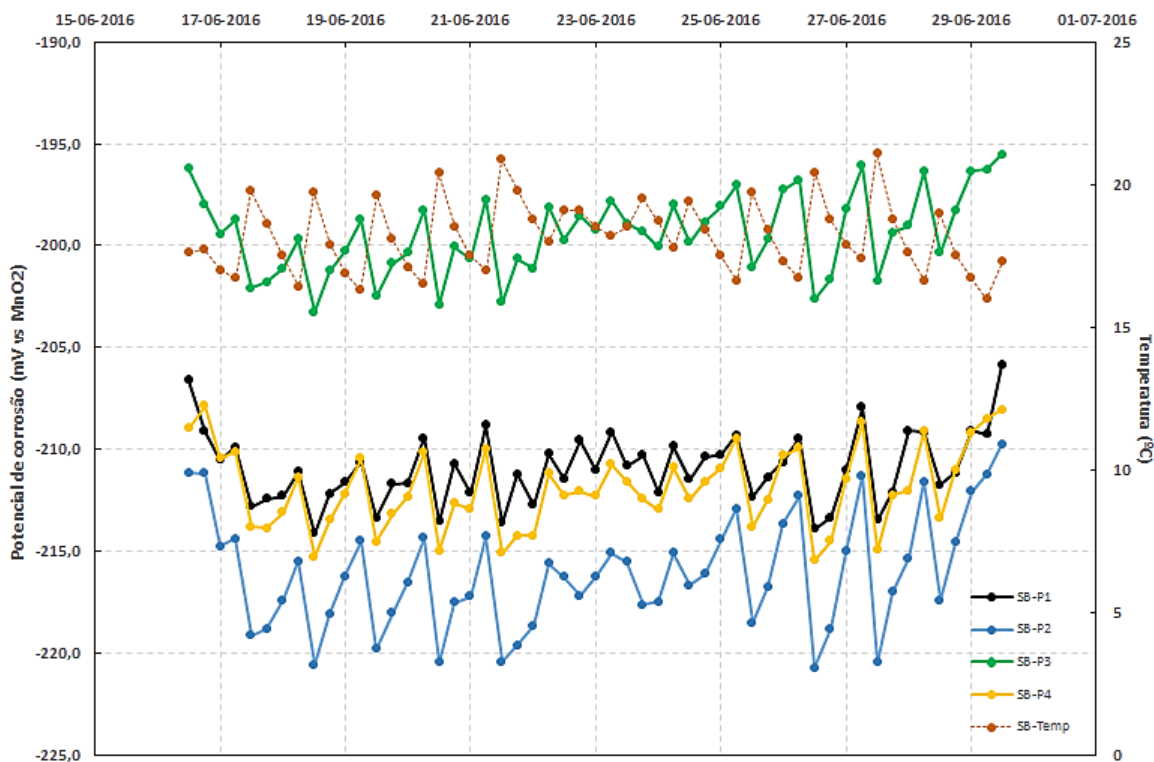


Figura 4.22: Dados registados de potencial de corrosão do sensor CKS-B.

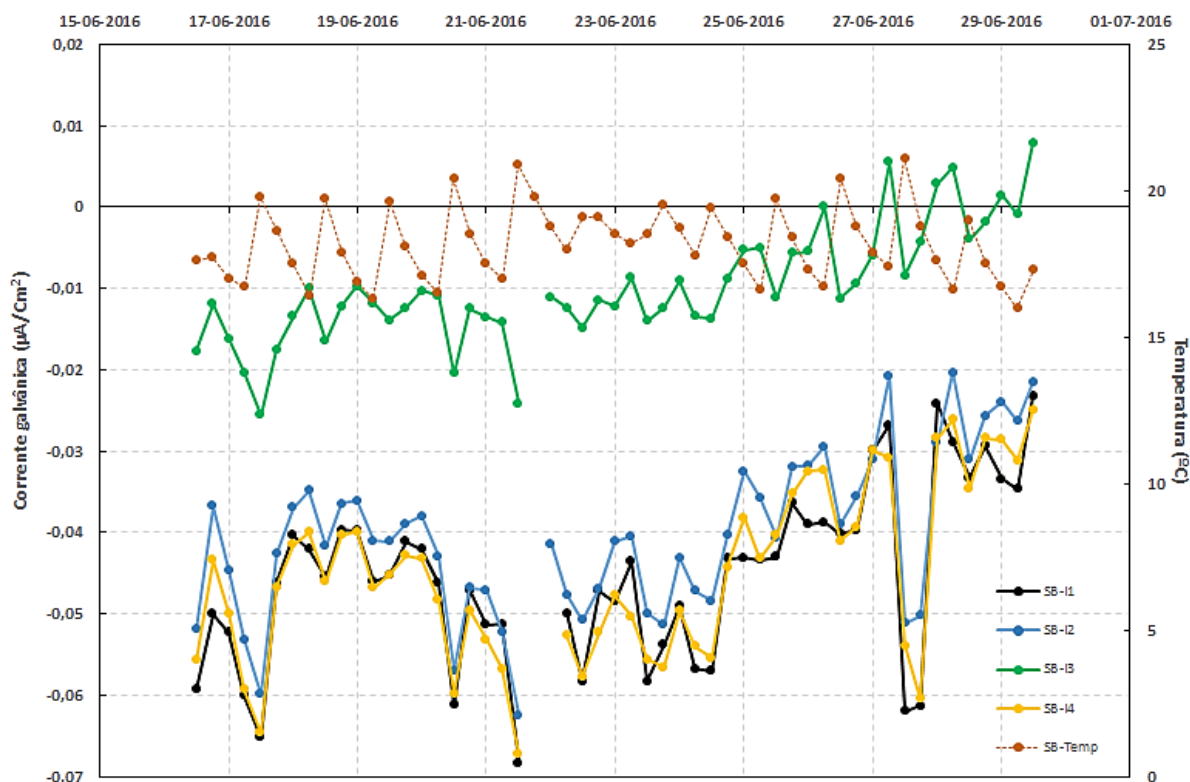


Figura 4.23: Dados registados de corrente galvânica do CKS-B.

Relativamente ao sensor instalado na zona C, este é o que apresenta as maiores amplitudes térmicas. Verifica-se também uma forte dependência do potencial de corrosão e da corrente galvânica com a temperatura (Figura 4.24). Em relação aos parâmetros medidos, essa relação é mais satisfatória no ânodo preto e no azul (ânodos mais superficiais). A dependência para o potencial de corrosão e de corrente galvânica é $1,33 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ e $3 \times 10^{-3} \mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Novamente estamos perante uma boa correspondência em relação ao potencial de corrosão relativamente aos resultados de laboratório. No entanto, os resultados em relação à corrente galvânica continuam a ser bastante baixos. Nestes casos, como os valores de corrente galvânica são tão baixos, o erro associado ao equipamento de leitura pode influenciar os resultados medidos.

Em conclusão, os valores registados pelos sensores das zonas A, B e C, não diferem muito dos valores registados entre o período de 2011 a 2013 à exceção do ânodo 1 do CKS-B. Não foi registado nenhuma actividade de corrosão no período em análise e os valores medidos estão dentro dos valores indicativos de baixa probabilidade de corrosão. Os resultados obtidos podem ser vistos como um zoom dos gráficos anteriores, uma vez que com estes é possível perceber as dinâmicas dos parâmetros medidos e a sua dependência com a temperatura ao longo do dia. Estes resultados estão em conformidade com os resultados obtidos em laboratório, em que a dependência com a temperatura do potencial de corrosão deram valores muito próximos, enquanto que em relação à corrente galvânica os valores registados foram menores. Assim, os parâmetros ambientais alteram os valores medidos pelo kit-sensor de corrosão.

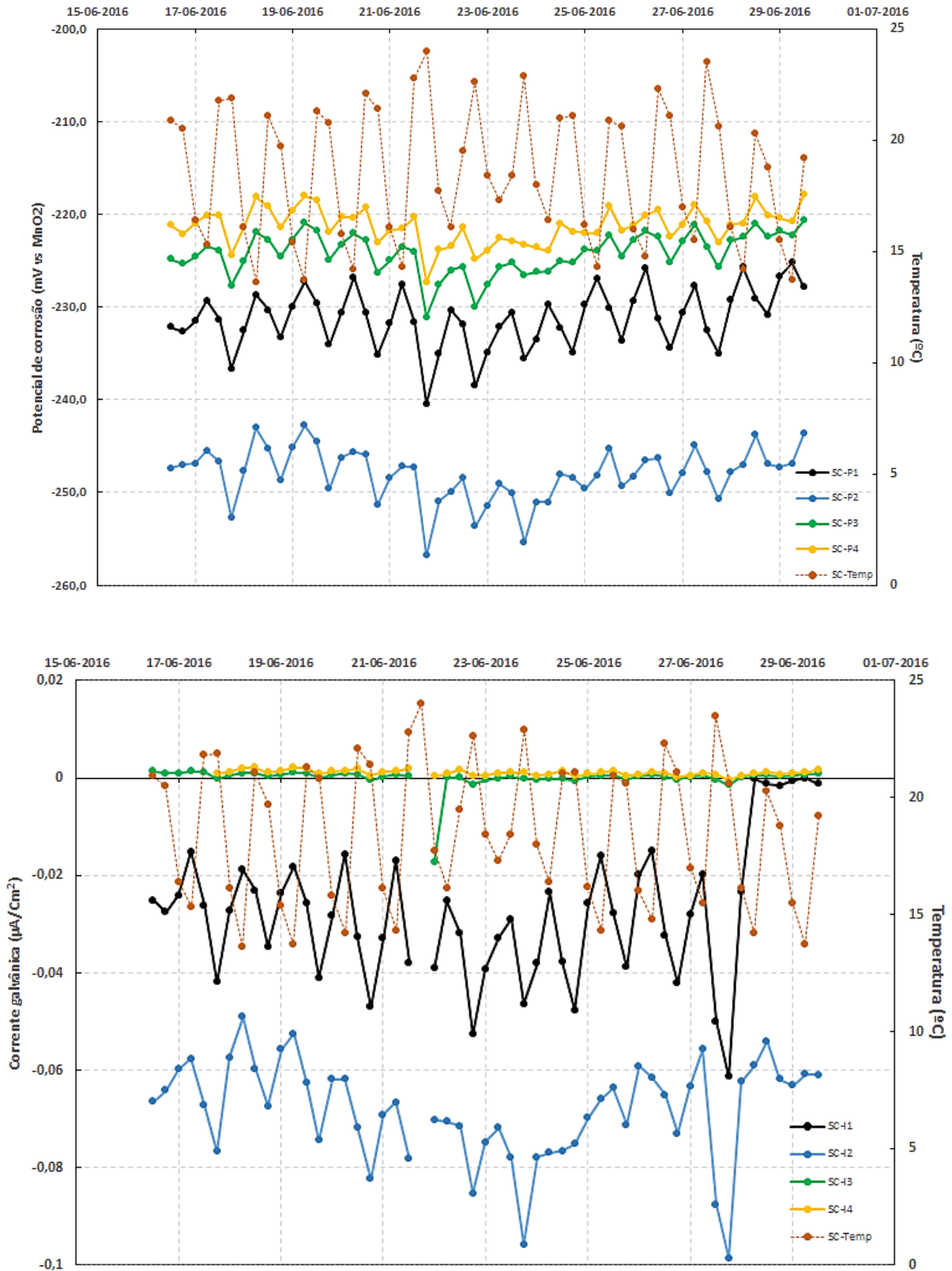


Figura 4.24: Dados registados de corrente galvânica do CKS-C.

4.3 SENSOR ÓPTICO: SENSOR POF

4.3.1 DESCRIÇÃO DO SENSOR POF

O sensor POF integra a categoria dos sensores intensiométricos (ver 3.3.1), isto é, que medem a modulação da intensidade da luz transmitida pelo núcleo da fibra óptica (Figura 4.25). Este sensor, produzido em fibra óptica de plástico, caracteriza-se por possuir sulcos/rasgos, ao longo de um determinado comprimento, que funcionam como elementos sensores.

O princípio de funcionamento do sensor baseia-se na perda de potência óptica transmitida até ao fotodetector, devido ao espalhamento do sinal óptico. Para permitir a alteração do espalhamento do sinal óptico em função da presença de água foram efectuados sulcos na estrutura da fibra com uma geometria bem definida. Quando há presença de água nos sulcos há um maior confinamento do sinal óptico dentro da fibra do que quando os sulcos estão preenchidos por ar, aumentando a potência óptica transmitida. A origem deste confinamento deve-se ao facto do índice de refração da água (1,332 para água pura a 20°C) ser mais próximo do índice de refração do núcleo da fibra (1,492), comparativamente com o ar (1,00), atenuando as perdas (Figura 4.26) [78]. Com a diminuição da presença de água o espalhamento do sinal para fora da fibra aumenta, logo a potência óptica transmitida para o fotodetector é menor (Figura 4.27). A sensibilidade da zona de leitura depende tanto do número como da profundidade dos sulcos, bem como do modo de espalhamento do sinal óptico dentro da fibra, uma vez que a perda de potência é proporcional a $1/\lambda^4$, em que λ representa o comprimento de onda do sinal óptico. Deste modo, a sensibilidade aumenta com a utilização de sinais ópticos com menores comprimentos de onda [78].



Figura 4.25: Sensor POF: a) Esquema do sensor; b) Visualização dos sulcos na fibra.

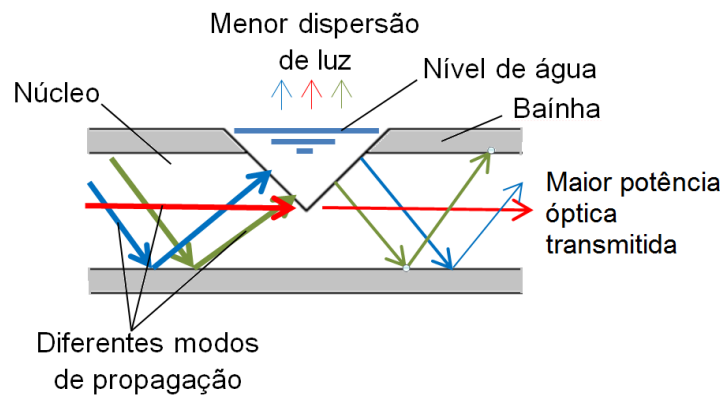


Figura 4.26: Funcionamento teórico do sensor: Maior confinamento do sinal óptico quando os sulcos estão totalmente preenchidos com água.

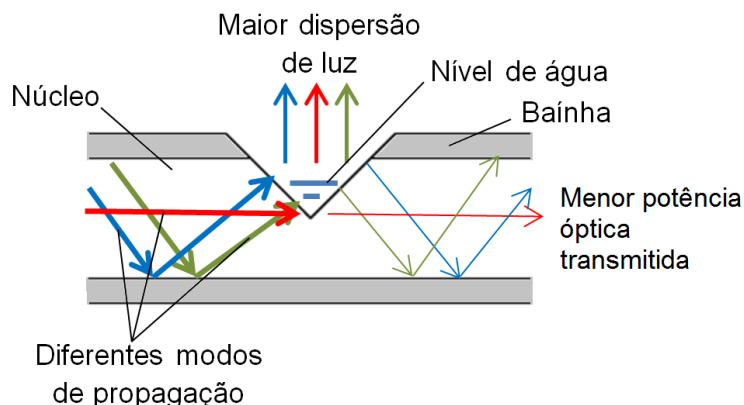


Figura 4.27: Funcionamento teórico do sensor: Menor confinamento do sinal óptico quando os sulcos estão parcialmente preenchidos com água.

Para a realização desta campanha experimental, os sensores POF foram produzidos a partir de uma fibra óptica plástica (HFBR-RUS100Z) comercializada pela empresa Farnel. O material constituinte da fibra é polimetilmetacrilato (PMMA) com 2,2 mm de diâmetro. As principais características da fibra encontram-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Fibra óptica plástica (HFBR-RUS100Z).

Fibra óptica plástica	HFBR-RUS100Z
Composição química	Polimetilmetacrilato (PMMA)
Temperatura recomendada de aplicação (°C)	-40 a +85
Atenuação média [dB/m]	0,19
Abertura numérica	0,47
Diâmetro: núcleo + bainha (mm)	1
Diâmetro: núcleo + bainha + revestimento (mm)	2,2
Índice de refração do núcleo: $n_{\text{núcleo}}$	1,492
Índice de refração da bainha: n_{bainha}	1,417

4.3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DO SENSOR POF

O equipamento de medição utilizado para o sensor POF consiste num emissor óptico (díodo emissor de luz) e um receptor óptico (fotodíodo), conectados por uma fibra óptica de plástico na qual foram introduzidos defeitos (sulcos ou rasgos). O sinal óptico é emitido por um díodo (modelo IF E93 da Industrial Fiber Optics), com um comprimento de onda de 522 nm, espectro de luz visível de cor vermelha. O receptor de sinal óptico é baseado num fotodíodo (modelo IF D91 da Industrial Fiber Optics), associado a um amplificador de transimpedância eléctrica, proporcionando um sinal eléctrico de saída balizado entre 0 e 2,5 V. O sistema de aquisição de dados é feito com uma ADC (Analog to Digital Converter), de 16 bits, e está incluída num microcontrolador PIC24FJ256DA206 (Figura 4.28 a)).

Todo o equipamento de medição e aquisição de dados foi desenvolvido pelo Instituto de Telecomunicações, Campus Universitário de Santiago, Aveiro, Portugal.

O aparelho utilizado na campanha experimental é composto por quatro canais, com quatro LEDs emissores e quatro receptores (Figura 4.28 b)). O equipamento permite por isso fazer medições em 4 sensores POF, simultaneamente. A utilização de emissores ópticos baseados em díodos emissores de luz (LED), em alternativa aos emissores baseados em lasers, permite soluções de implementação de menor custo e contribui para uma simplificação do sistema [78]. Para além da medição da potência óptica, o aparelho permite também a monitorização da temperatura, recorrendo a um sensor eléctrico. Outra potencialidade do aparelho utilizado na campanha experimental prende-se com a possibilidade de acompanhamento dos ensaios em tempo real através de um sistema Bluetooth incorporado. A Figura 4.29 ilustra o acompanhamento dos ensaios em tempo real no computador. O acesso aos dados é feito através de um cabo USB que se liga directamente ao computador.



(a)



(b)

Figura 4.28: Sistema de medição: a) Interior do equipamento; b) Vista exterior do equipamento;



Figura 4.29: Acompanhamento dos ensaios em tempo real através de um sistema Bluetooth incorporado (visualização de um dos canais).

O equipamento proporciona um sinal eléctrico de saída está entre [0; 2,5] V. Associado a cada fotodetector, existe um parâmetro, designado por responsividade. A responsividade estabelece a relação entre a corrente eléctrica, instalada em cada fotodetector, e a potência de luz incidente (Equação 4.1):

$$P_{OT} = \frac{V}{R_{es}} \quad (4.1)$$

Onde:

P_{ot}	Potência óptica
V	Tensão eléctrica
R_{es}	Responsividade

No entanto, o sistema de aquisição, regista um sinal entre [0; 65535], ou seja, divide o intervalo de 2,5 em 65535 espaços correspondentes aos 16 bits de resolução da DAC (Figura 4.30). O valor de cada espaço é determinado através da aplicação da equação 4.2:

$$b = \frac{\Delta V}{2^n - 1} \quad (4.2)$$

Onde:

b	Valor de cada espaço
ΔV	Varição da tensão eléctrica ($\Delta V=2,5$ V)
n	Resolução da DAC ($n=16$)

Assim, para a determinação da tensão eléctrica, proporcional à potência óptica, recebida pelo fotodetector, basta multiplicar o valor de “b” pelo arranjo de valores compreendidos entre 0 a 65535.

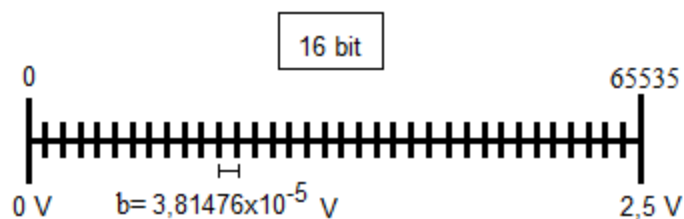


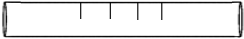



Figura 4.30: Escala ilustrativa para o tratamento de dados de aquisição.

Todos os gráficos apresentados a partir deste ponto, o eixo das ordenadas, encontra-se em unidades normalizadas, uma vez que só será contabilizado as variações ao longo do decorrer dos ensaios. A obtenção das unidades normalizadas ocorre com a divisão de todos os dados registados pelo seu valor inicial, após a estabilização do sinal. Ao dividir tensão/responsividade (valor n) a dividir por tensão/responsividade (valor $n+1$), o valor da potência óptica vem em unidades adimensionais.

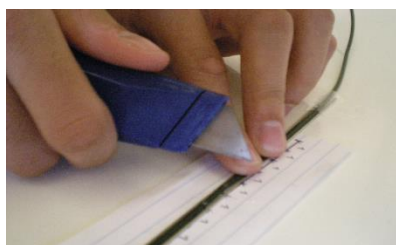
4.3.3 DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

A campanha experimental foi composta por várias actividades. Inicialmente, procedeu-se à construção dos sensores. A construção dos sensores passou pela realização de sulcos/rasgos ao longo da fibra óptica plástica com um espaçamento e profundidade bem definido. Para o efeito foram efectuados 2 grupos de sensores (grupo 1 e 2). O primeiro grupo (grupo 1) corresponde ao grupo de sensores onde existe pouca precisão na realização dos sulcos. Neste grupo, os sulcos foram efectuados à mão livre, controlando só a sua profundidade. Foram então definidos 4 sensores, um sensor de referência (sem sulcos), um sensor com quatro rasgos e os restantes dois com seis e oito sulcos, respectivamente. Na Tabela 4.9 está a síntese das geometrias dos sensores do grupo 1.

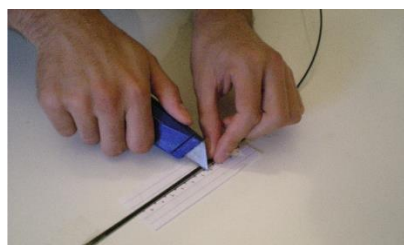
Tabela 4.9: Características do grupo 1 de sensores.

Grupo 1		
Sensor	Geometria	Espaçamento (entre sulcos)
4 rasgos		1 cm
6 sulcos		
8 sulcos		
Referência		

Para a realização dos respectivos sulcos foram colocados, paralelamente à fibra, dois varões de aço com diâmetro igual a 1 mm, de forma a funcionar como um batente, para controlar a profundidade do rasgo/sulco. A realização dos rasgos/sulcos foi feita de forma manual e através de um x-acto (Figura 4.31). É de salientar que é difícil garantir igual geometria dos sulcos e, portanto, é difícil a sua reprodutibilidade. Assim, este grupo de sensores tinha o objectivo de averiguar qual a influência das diferentes geometrias dos rasgos/sulcos na resposta do sensor, comparando-o com o grupo 2 de sensores.



(a)



(b)

Figura 4.31: Construção dos sensores do grupo 1: a) Corte da fibra recorrendo a um x-acto; b) Efectuando um corte (sulco).

O segundo grupo (grupo 2) corresponde ao grupo de sensores em que os sulcos apresentam um geometria bem definida. Para tornar os sensores mais precisos e reprodutíveis, em termos de geometria, foi concebida uma peça metálica para a realização dos sulcos com espaçamento e profundidades bem definidas (Figura 4.32 e Figura 4.33). A peça de corte foi feita com material de alumínio duro com 12 cm de comprimento contendo dois orifícios de entrada para as fibras ópticas, a 2,75 e 2,50 mm de profundidade da face superior. Esta diferença de alturas permite realizar sulcos com profundidades bem conhecidas como 1/2 e 1/4 do diâmetro do núcleo da fibra, respectivamente. Para além disso, ao longo dos seus 12 cm de comprimento a peça possui 21 moldes de cortes com uma abertura de 90° e espaçados de 5 mm.



(a)



(b)

Figura 4.32: Peça de corte: a) Preparação da peça no torno com a broca de 2,2 mm; b) peça de corte final.

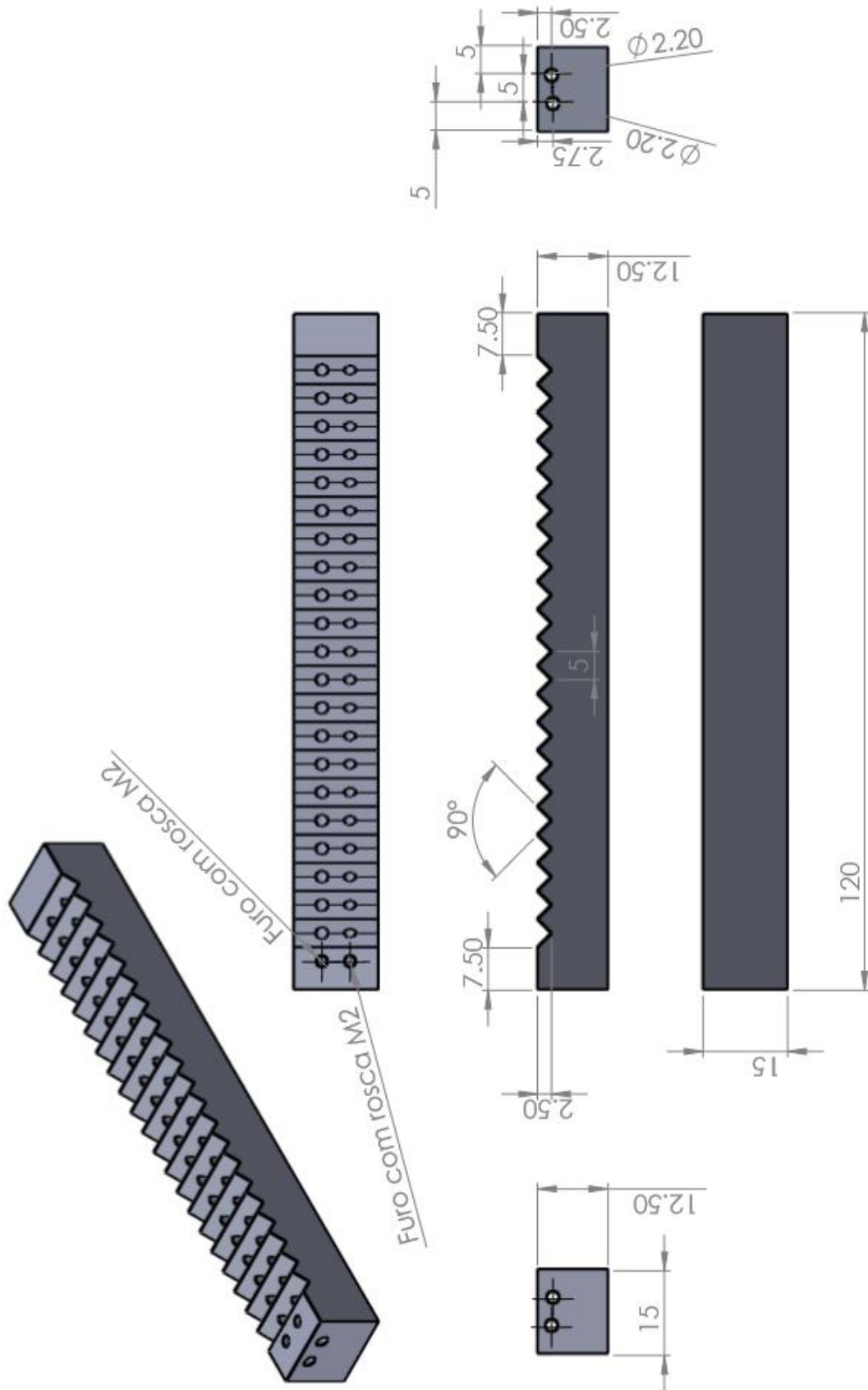


Figura 4.33: Projecto da peça para o corte da fibra.

Para a definição dos sulcos a efectuar no grupo 2, realizou-se um ensaio prévio de forma a encontrar o número máximo de sulcos, para as profundidades de 1/2 e 1/4 do diâmetro do núcleo, em que a perda de potência óptica fosse linear. Este ensaio prévio teve como principal objectivo avaliar a perda de potência óptica à medida da realização dos sulcos. O objectivo concreto é encontrar uma constante de perda óptica por sulco para um melhor controlo da resposta dos sensores desenvolvidos. Ilustra-se na Figura 4.34 o resultado do ensaio. Os resultados demonstram que até um determinado número de sulcos a perda de potência óptica é linear (Figura 4.34). Através da análise dos resultados, nos sensores com cortes até 1/4 do diâmetro do núcleo, é possível realizar dez sulcos sem sair do regime de perda linear. Através de uma regressão linear chegou-se a uma perda de potência por sulco de 0,185 V/sulco. Contrapondo isto, os sensores com cortes até 1/2 do diâmetro do núcleo, o regime linear só é mantido até ao quarto sulco, com uma perda de potência óptica de 0,54 V/sulco. Com a realização dos sulcos seguintes, a potência óptica tende assintoticamente para zero, deixando-se de verificar o regime linear. Com isto, podemos afirmar que a forma do sulco é preponderante nos resultados obtidos e, consequentemente, na perda óptica.

Assim, concluiu-se que a profundidade dos sulcos é um parâmetro importante de diferenciação dos resultados obtidos. Quanto menor for a profundidade do corte, maior é o número de cortes possíveis em regime de perda linear. Este facto prende-se com a forma de afetação do núcleo da fibra. No primeiro caso, como a perturbação do núcleo só atinge 1/4 do diâmetro, o nível de atenuação é menor e a perda de potência óptica por sulco também é menor. Por outro lado, nos sensores com sulcos até 1/2 do diâmetro do núcleo, a afetação do núcleo é maior, resultando numa maior perda de potência óptica por sulco.

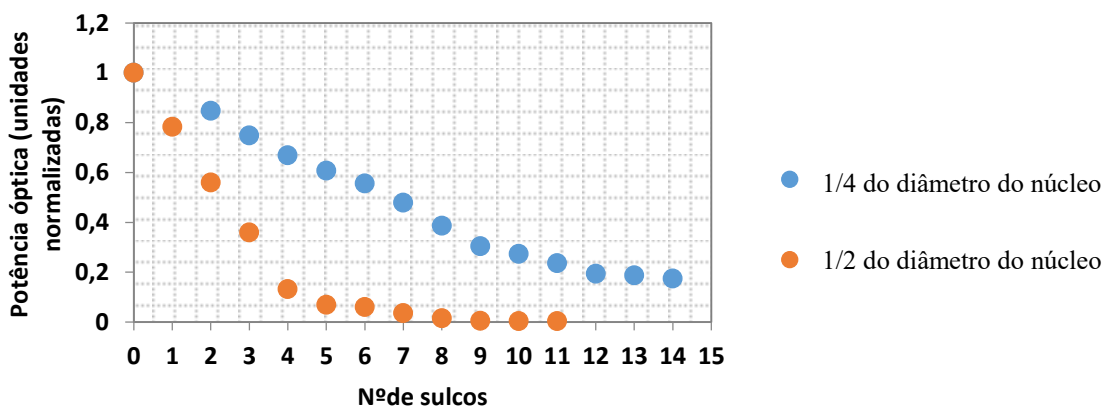

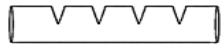
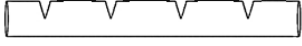
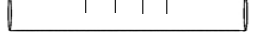
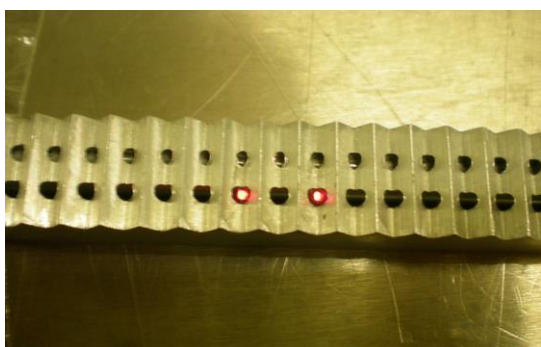


Figura 4.34: Resultado do teste de corte.

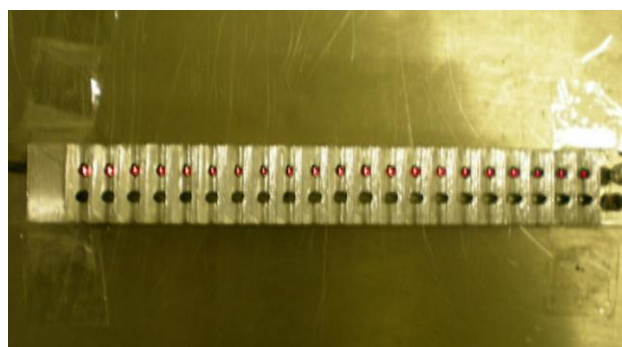
Com base nos resultados obtidos foram concebidas 4 geometrias diferentes de sensores. Procurou-se que a geometria seleccionada estivesse dentro do regime linear de perda de potência óptica, baseado nos resultados do teste de corte. Assim, para sensores com sulcos até 1/2 do diâmetro do núcleo não foram realizados mais do que 4 sulcos, enquanto que, no sensor com sulcos até 1/4 do diâmetro do núcleo foram realizados 8 sulcos. O objectivo deste processo era obter sensores com regimes lineares, de forma a simplificar o processo de obtenção de resultados. As características de cada sensor estão identificadas na Tabela 4.10, bem como a referência adoptada para cada sensor, usada a partir deste ponto (Sulco/Rasgo_profundidade_espaçamento). A Figura 4.35 mostra a fase de realização dos sulcos efectuados na peça de corte, onde é visível a luz vermelha nas zonas onde já foram realizados os sulcos.

Tabela 4.10: Características do grupo 2 de sensores.

Grupo 2			
Sensor	Geometria	Profundidade	Espaçamento
S_1/4_1		1/4	1cm
S_1/2_1		1/2	1cm
S_1/2_2		1/2	2cm
R_1/2_1		1/2	1cm



(a)



(b)

Figura 4.35: Corte dos sulcos: a) Dois cortes com 1/2 do diâmetro do núcleo; b) Vinte e um cortes efectuados a 1/4 do diâmetro do núcleo.

No entanto, para além dos cortes dos sulcos, é importante salientar alguns aspectos sobre o corte da fibra na sua extremidade. Este cortes foram efectuados de forma manual com recurso a um x-acto. Como se compreende, esta não será a melhor forma para cortar a fibra óptica plástica, na medida em que a secção transversal de corte não fica toda ela perpendicular ao eixo da fibra e isso tem algumas implicações nos resultados obtidos. A Figura 4.36 ilustra algumas secções indesejadas no corte da fibra que deverão ser evitadas.

Numa última fase, os sensores foram acoplados a um varão de aço ($\phi 8$), com 13 mm de comprimento, com recurso a braçadeiras de plástico nas extremidades (Figura 4.37). Esta montagem serve para conferir rigidez ao sensor garantindo que a fibra se mantenha sempre esticada e, portanto, não altere a forma do sulco. Por outro lado, o acoplamento ao varão de aço, facilita o transporte, manuseamento e colocação do sensor para efectuar os ensaios.

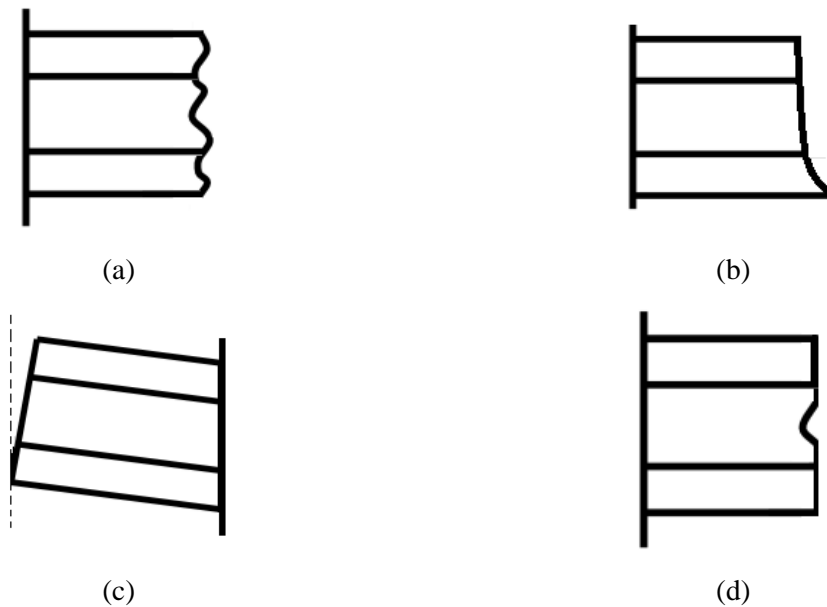


Figura 4.36: Resultado de cortes mal efectuados nas extremidades das fibras: a) Corte ondulado; b) Corte com saliência no fundo; c) Corte não perpendicular à horizontal; d) Corte com saída de parte do núcleo.



Figura 4.37: Acoplamento do sensor ao varão de aço.

Com a etapa da construção dos sensores concluída, deu-se continuidade ao plano de actividades experimental, passando à execução das fases 2 e 3, ou seja, ao estudo de parâmetros de referência e à análise da resposta dos sensores quando expostos a diferentes ambientes.

Na fase 2, procedeu-se ao estudo de sensibilidade do equipamento de medição, do nível de ruído e a influência da recolocação da fibra no sistema de leitura, incluindo a troca de canal. Para o efeito, o primeiro teste de sensibilidade realizado foi o de repouso. Este teve como principal objectivo compreender a evolução da potência óptica ao longo do tempo sem nenhuma perturbação exterior. Com base neste ensaio foi definido o “tempo de arranque” do sistema que posteriormente foi aplicado a todos os testes. O tempo de arranque refere-se ao tempo que o sistema demora a estabilizar, nomeadamente, a estabilização da potência óptica emitida pelos LEDs. O ensaio seguinte, ensaio da troca de canais, teve como objectivo averiguar se a troca de canal influencia os resultados medidos.

Na fase 3, procedeu-se à avaliação da resposta dos sensores quando expostos em diferentes ambientes. O primeiro teste foi designado de teste da coluna de água. O objectivo do ensaio foi avaliar o efeito da presença de água na variação de potência óptica. No segundo teste, os sensores foram colocados dentro de uma câmara de nevoeiro salino, expondo-os a vários ciclos. O objectivo do ensaio era verificar se a resposta dos sensores se altera na presença de vapor de água e analisar a evolução da potência óptica ao longo de um período de tempo considerável. De seguida, foram realizados os testes de humidade e temperatura. Os sensores foram colocados dentro de uma câmara climática, fazendo variar a humidade e a temperatura, para averiguar a influência destes dois factores. O quarto teste foi o teste da areia e do filer. O objectivo foi avaliar a resposta dos sensores à presença de água com diferentes partículas de diferentes granulometrias. No quinto e último teste pretendeu-se avaliar a sensibilidade do sensor a ciclos de molhagem e secagem, quando embebidos numa pasta de cimento porosa.

Na Tabela 4.11 encontra-se a síntese da campanha experimental realizada com o sensor POF e os objectivos correspondentes.

Tabela 4.11: Síntese da campanha experimental com o sensor POF.

	Actividade	Objectivo
Fase 1	Construção dos sensores	Determinar o número máximo de sulcos/rasgos que garantem uma perda de potência óptica linear
Fase 2	Análise do repouso do sistema	Definir tempo de arranque
	Influência da troca de canal	Influência da troca de canal e recolocação da fibra
Fase 3	Teste da coluna de água	Avaliar a resposta do sensor à presença de água
	Teste da câmara de nevoeiro	Avaliar a resposta do sensor à presença de vapor de água
	Teste da temperatura e humidade	Analisar o comportamento do sensor a variáveis ambientais
	Teste da areia e do filer	Avaliar a influencia da presença dos grão nos sulcos
	Teste numa pasta de cimento porosa	Avaliar a influência de ciclos de molhagem e secagem no sensor embebido numa pasta de cimento porosa

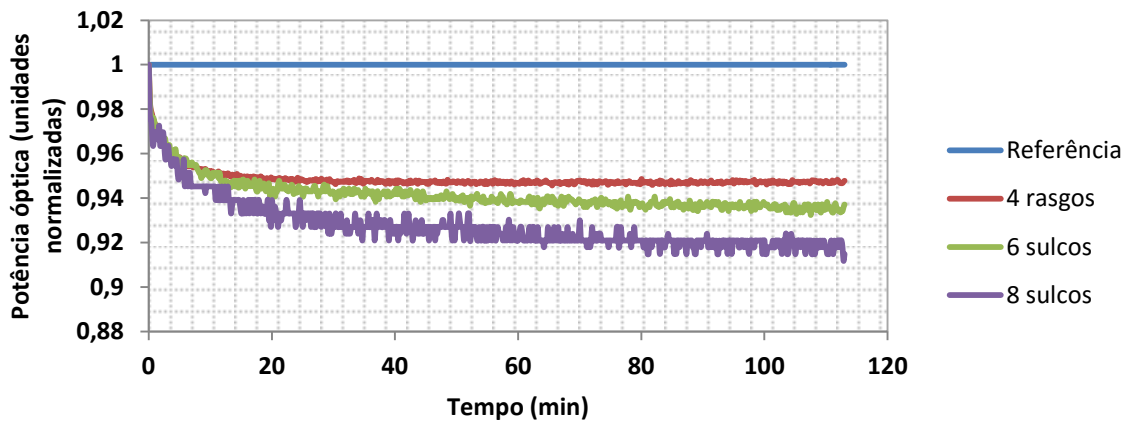
4.3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise do repouso do sistema:

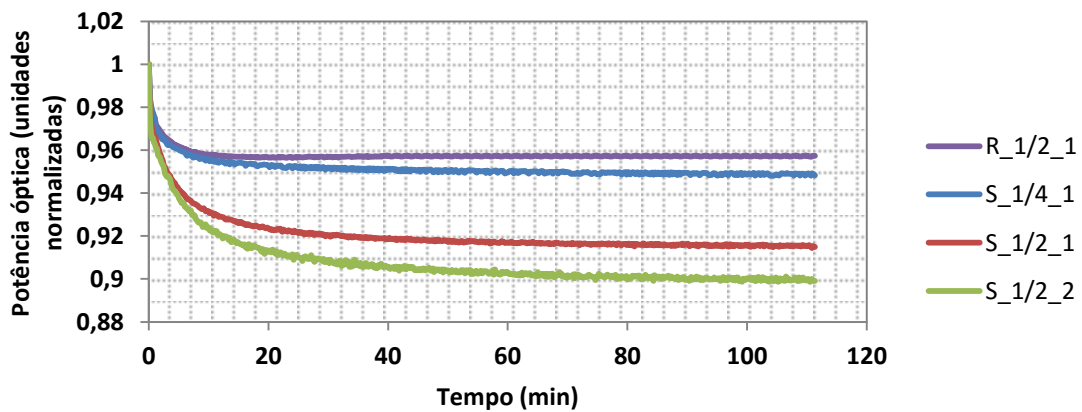
O teste do repouso teve como objectivo aferir a potência óptica ao longo de um determinado tempo sem qualquer intervenção exterior. Pretende-se assim, observar o “grau” de ruído do próprio sistema. Para o efeito, ambos os grupos de sensores foram colocados em cima de uma mesa, devidamente fixados a varões de aço, numa sala com ambiente controlado (temperatura a 20° e 50% de humidade) (Figura 4.38). Os resultados obtidos apresentam-se nas Figura 4.39 a) e b).



Figura 4.38: Colocação dos sensores para análise do repouso.



(a)



(b)

Figura 4.39: Resultados do ensaio de repouso: a) Sensores do grupo 1; b) sensores do grupo 2.

Pela análise dos gráficos, podemos observar que ambos os grupos de sensores necessitam de um tempo para a estabilização do sinal, variando assintoticamente, para um valor fixo. Este tempo mínimo é designado como “tempo de arranque” do sistema. O tempo de arranque é indicativo do período que é necessário esperar antes do registo da medida de potência óptica, de forma a esta variação não perturbar a análise dos resultados. Tanto para o grupo 1 como para o grupo 2 o tempo de arranque não é muito variável, encontrando-se entre 35 a 40 minutos.

A grande diferença entre os resultados dos grupos 1 e 2 está no nível de ruído. Os sensores do grupo 1 têm um ruído muito mais significativo, comparativamente com os sensores do grupo 2. Este facto remete para uma ideia já referida anteriormente, em que se colocou a hipótese de que a geometria dos sulcos poderiam influenciar os resultados obtidos. Deste modo, a geometria dos sulcos é preponderante para a estabilização do sinal recebido. No grupo 1, o nível de ruído aumenta à medida que o número de sulcos aumenta, uma vez que, há uma maior variabilidade nas formas dos cortes. Por outro lado, como os sulcos foram efectuados manualmente, pode ter levado à formação de microfissuras, uma vez que se pressionou a fibra, com os dedos para a imobilizar, facilitando a realização dos respectivos sulcos. No grupo 2, o nível de ruído, visualmente, é semelhante entre todos, fortalecendo a ideia de que a geometria dos sulcos é importante e possivelmente existirá menos microfissuras. No entanto, mesmo após o tempo de arranque, os sensores continuam a ter uma ligeira inclinação decrescente. Em termos práticos, esta variação é negligenciável, uma vez que, a perda é diminuta.

Influência da troca de canal:

A análise da influência da troca de canal consiste , basicamente, num novo ensaio de repouso, só que com alternância dos canais de leitura. O objectivo deste ensaio foi aferir qual a influência desta troca nos resultados obtidos, avaliar o nível de ruído, a potência máxima registada e comparar o tempo necessário para a estabilização com o teste anterior. Na tabela 4.12 está ilustrada a troca de canais efectuada. Na Figura 4.40 e na Figura 4.41 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 4.12: Tabela síntese da troca de canais realizada durante o ensaio.

Teste de repouso				Teste de repouso após troca de canais			
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4
S_1/4_1	S_1/2_1	S_1/2_2	R_1/2_1	S_1/2_1	S_1/4_1	R_1/2_1	S_1/2_2

Através da análise dos dados concluiu-se que a troca de canais tem extrema influência nos resultados obtidos. A troca de canais influenciou o valor absoluto da potência óptica máxima registada (tensão máxima registada), o tempo necessário para a estabilização, o nível de ruído e a ordem de estabilização. Assim, este facto é um ponto a ter em conta na realização dos ensaios posteriores, na medida em que os dados não devem ser interpretados em termos de valores absolutos mas sim pela sua variação ao longo do tempo, ou seja, em termos de valores relativos.

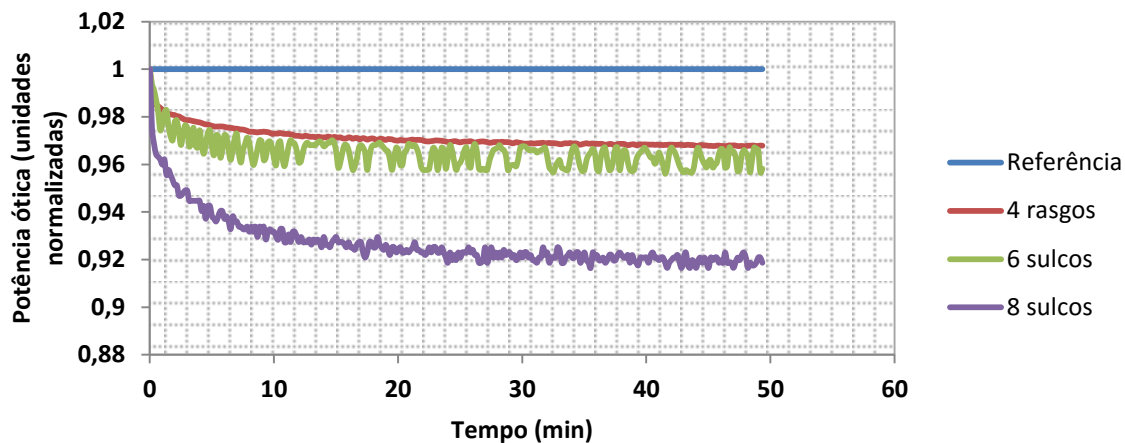


Figura 4.40: Resultado do teste da troca de canais: com grupo 1 de sensores.

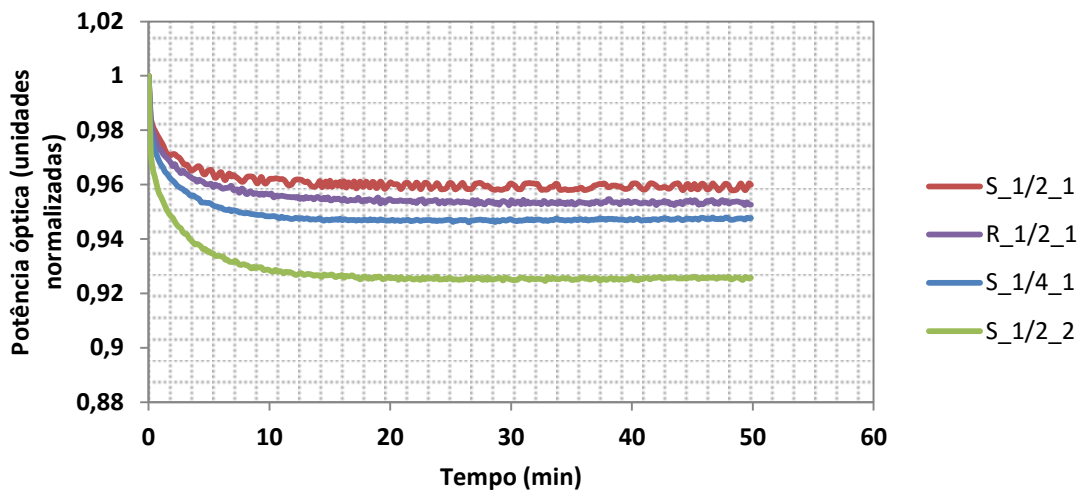


Figura 4.41: Resultado do teste da troca de canais: com grupo 2 de sensores.

A troca de canais influenciou o valor absoluto da tensão máxima registada. Para o mesmo sensor, a tensão máxima registada é diferente da tensão máxima registada no primeiro teste de análise ao repouso (Figura 4.42 e Figura 4.43). Na Figura 4.41 não se apresenta o resultado registado pelo sensor de “referência” uma vez que neste sensor não se observou qualquer alteração.

Por outro lado, é também visível que o tempo necessário para a estabilização mudou em relação ao teste anterior. Esta diferença de valores pode justificar-se atendendo à forma como é executada a troca, ou seja, manualmente, fazendo com que a posição de encaixe da extremidade da fibra no sistema de emissão e aquisição seja sempre diferente e muito variável. Além disso, também pode haver o acumular de poeiras nos canais ou até mesmo na fibra, provocando esta variação de valores.

A forma do corte da fibra, na sua extremidade, também poderá contribuir para estas variações do tempo de estabilização. Como referido anteriormente, no ponto 4.3.3, a secção da fibra que liga ao conector do equipamento pode ter várias configurações nas suas extremidades, e a luz oriunda dos LED’s, ao incidir numa superfície irregular, pode dar origem a esta variação do tempo de estabilização. Deste

modo, devemos interpretar os resultados não de forma absoluta mais sim tendo em conta a sua variação ao longo do tempo.

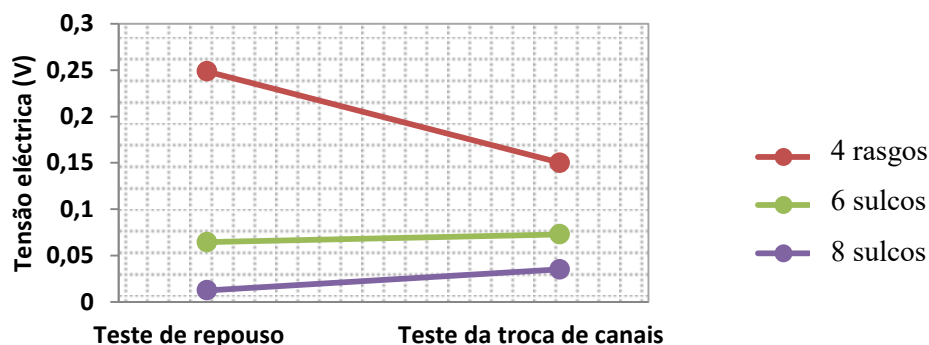


Figura 4.42: Tensão eléctrica máxima registada em cada um dos testes: Sensores grupo 1.

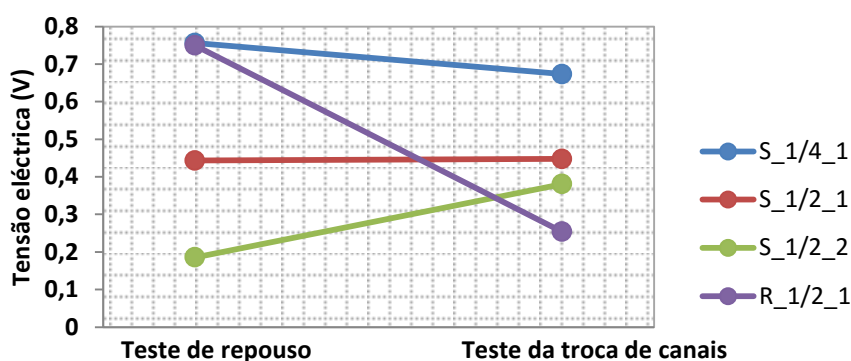


Figura 4.43: Tensão eléctrica máxima registada em cada um dos testes: Sensores grupo 2.

Teste da coluna de água:

O teste da coluna de água é o primeiro ensaio em que se coloca o sensor em contacto com um ambiente diferente do ar. Teve como principal objectivo observar a variação da potência óptica ao longo do tempo, com a sucessiva submersão dos sulcos em água. Para a realização do ensaio, as fibras ópticas foram dispostas verticalmente dentro de goblés fixadas na parede lateral (Figura 4.44 a). No interior do goblé é colocado um funil com o objectivo de introduzir a água no fundo e evitar respingar. Aquando do teste, os sulcos foram totalmente submersos um a um, posicionando o nível da água no meio de sulcos consecutivos (Figura 4.44 b)). A submersão de cada sulco ocorreu aquando da estabilização do sinal, de forma a encontrar um ganho de potência óptica por sulco. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 4.45.

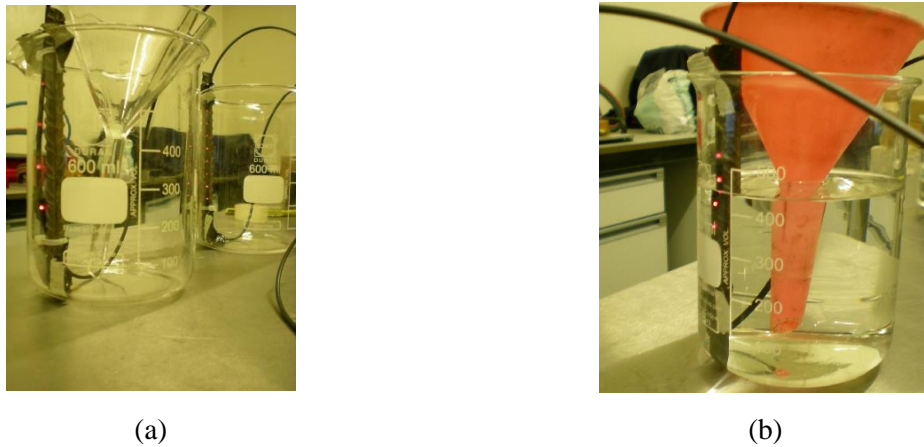
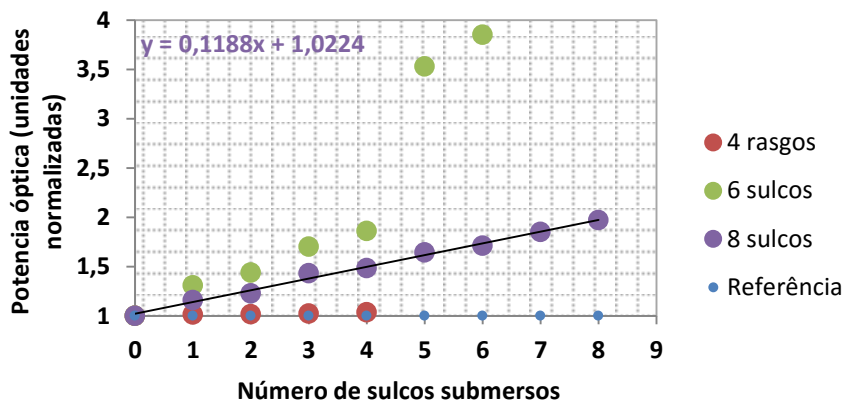
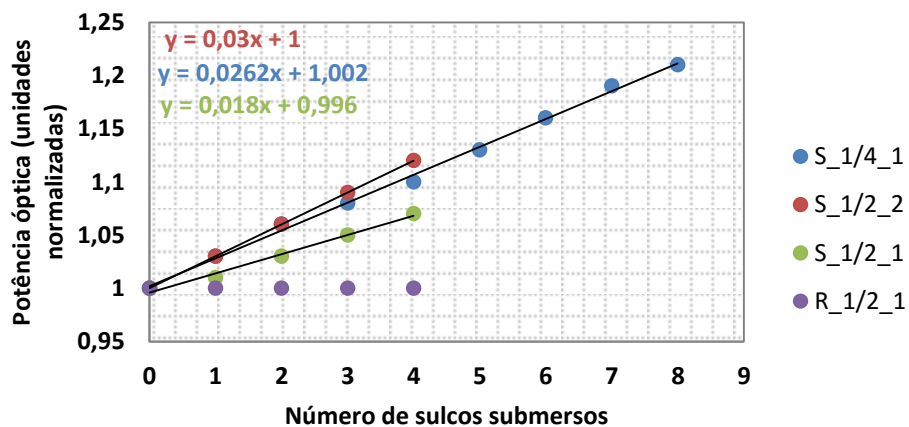


Figura 4.44: Teste da coluna de água: a) Os sensores foram dispostos verticalmente fixados na parede lateral; b) os sulcos foram submersos um a um, posicionando o nível da água no meio de sulcos consecutivos.



(a)



(b)

Figura 4.45: Teste da coluna de água: a) Resultados do grupo 1 de sensores; b) Resultado do grupo 2 de sensores.

Através da análise da Figura 4.45 é perceptível que os sensores são sensíveis à presença de água. Em todos os sensores, salvo a excepção dos sensores “4 sulcos”, “R_1/2_1” e “referência”, a potência óptica aumentou. Como foi referido no 4.3.1, este aumento de potência ocorre devido ao maior confinamento de luz que a presença de água oferece. Deste modo, a dispersão da luz é menor e, consequentemente, as perdas também.

Os sensores do grupo 1 correspondem ao grupo de sensores em que o aumento de potência óptica foi mais expressivo. O sensor “8 sulcos” apresentou, durante todo o teste, um regime linear, possuindo um ganho de 0,119 V/sulco. Até ao quarto sulco submerso, o sensor “6 sulcos”, o ganho de potência óptica assumiu um comportamento linear, com ganhos de 0,211 V/sulco. Relativamente ao sensor “4 sulcos”, este não apresentou sensibilidade à presença de água. Apesar de ser um resultado estranho, aparentemente parece indicar que a água não conseguiu alcançar o núcleo da fibra. Este facto pode ser explicado devido não só à sua geometria mas também à forma como se processou o teste. Devido à sua geometria, é fisicamente perceptível, a dificuldade de entrada de água líquida nos rasgos e por outro lado, o facto do sensor se encontrar na posição vertical pode levar a um maior fecho dos próprios rasgos. Por fim, o sensor “referência”, por não possuir cortes, demonstrou insensibilidade à água, mostrando que a camada primária é impermeável.

Os sensores do grupo 2 tiveram um comportamento linear no decorrer do teste, à excepção do sensor “R_1/2_1”. Através do auxílio de regressões lineares é possível determinar o ganho de potência óptica por sulco. Os ganhos de potência óptica nos sensores “S_1/2_1”, S_1/2_2” e S_1/4_1 foram 0,018 V/sulco, 0,03 V/sulco e 0,026 V/sulco, respectivamente. O sensor que apresentou um ganho maior de potência óptica corresponde ao sensor “S_1/2_2”.

No entanto, os sensores não têm que ter uma resposta linear. Um “bom” sensor tem que ter uma resposta conhecida, reproduzível e reversível.

Teste da câmara de nevoeiro:

O teste anterior permitiu concluir que alguns dos sensores são particularmente sensíveis à água na sua fase líquida. O teste da câmara de nevoeiro tem como principal objectivo aferir a sensibilidade dos sensores ao vapor de água e avaliar a estabilidade do sistema por um tempo considerável. Antes da colocação dos sensores na câmara, houve todo um processo de preparação. Os sensores foram devidamente fixos a duas barras (dois sensores em cada uma) com braçadeiras plásticas, posicionando os sulcos virados para baixo, de forma a que eventuais gotas que pudessem “cair” do tecto da câmara, durante os ciclos, não conseguissem atingir os sulcos directamente (Figura 4.46).

O grupo 1 de sensores experimentou dois ciclos, cada um com oito horas. O primeiro ciclo correspondeu ao tempo de exposição ao nevoeiro, enquanto que as oito horas seguintes serviram para testar a sensibilidade da secagem dos sensores. A abordagem ao grupo 2, pelo facto de ter dado respostas positivas nos testes anteriores, foi um pouco diferente. Foram então realizados ciclos de quatro horas, intercalando com nevoeiro e sem nevoeiro, de forma a aferir a sensibilidade dos sensores ao longo do tempo (Tabela 4.13). Na Figura 4.47 e na Figura 4.48 são apresentadas as respostas dos sensores.

Através da análise do gráfico dos sensores do grupo 1, é possível afirmar que todos os sensores foram sensíveis ao nevoeiro gerado. Nota-se claramente um aumento de potência óptica ao longo do tempo. Ao analisar com mais detalhe, os sensores “6 sulcos” e “8 sulcos” atingiram uma espécie de “saturação do sulco”, em que a potência óptica estabilizou. Em relação ao sensor “4 rasgos”, aparenta ter um comportamento linear no aumento de potência óptica. Este comportamento poderá ser devido às ra-

zões mencionadas anteriormente, na medida em que a geometria do sulco oferece alguma inércia à entrada de água.

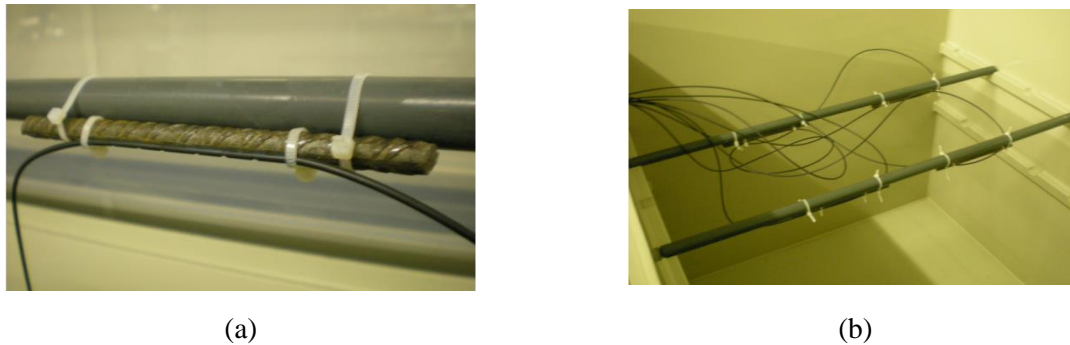


Figura 4.46: Teste da câmara de nevoeiro: a) Colocação dos sensores nas barras; b) Sensores dentro da câmara de nevoeiro.

Tabela 4.13: Síntese dos ciclos efectuados em cada grupo de sensores.

Tempo (h)	Temperatura (°C)	Grupo 1	Grupo 2
0-4	20	Nevoeiro	Nevoeiro
4-8		Nevoeiro	-
8-12		-	Nevoeiro
12-16		-	-
16-20		-	Nevoeiro
20-24		-	-
24-26		-	Nevoeiro

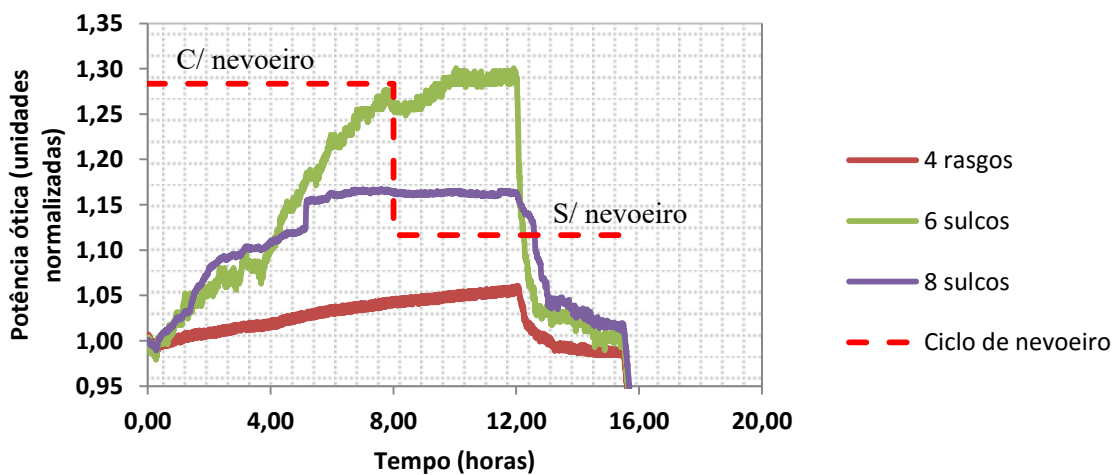


Figura 4.47: Resultado do teste da câmara de nevoeiro do grupo de sensores 1.

Relativamente ao grupo 2, quase todos os sensores tiveram um comportamento espectável (Figura 4.48 e Figura 4.49). Visualmente é perceptível que os sensores estão em fase com os ciclos gerados, registando o pico de potência óptica no decorrer dos respectivos ciclos de nevoeiro. Neste grupo, tal como no primeiro grupo, os sensores atingem também uma espécie de saturação do sulco, mas mais rapidamente que no caso anterior. É de alguma relevância referir a grande estabilidade de leituras efectuadas ao longo de um intervalo de tempo considerável. Todos os sensores responderam da mesma forma ao ciclo do nevoeiro, com excepção do sensor “R_1/2_1”. O sensor “R_1/2_1” demonstrou ter um comportamento sem significado e sem padrão. Este sensor mostrou ser imune ao nevoeiro, tendo, porém, atingido alguns aumentos de potência mas incompatíveis com o decorrer dos ciclos. Este sensor teve um comportamento diferente do sensor homólogo do grupo 1. Não se compreende bem este comportamento, no entanto poderá ter havido um problema na forma como o sensor foi colocado no varão, provocando um maior fecho dos rasgos. Também é oportuno referir que os rasgos efectuados no sensor “R_1/2_1” foram realizados com recurso a um bisturi, enquanto que, no sensor “4 rasgos”, os rasgos foram efectuados com um x-acto. Desta forma, a espessura do rasgo é maior no sensor do grupo 1, o que poderá ter tido influência nos resultados obtidos. Assim, devia ser repetido o ensaio com os sensores com rasgos para validar o comportamento.

Analisando mais em pormenor, o primeiro ciclo, corresponde ao ciclo em que os resultados medidos não encaixam bem no padrão posteriormente desenhado pelos ciclos seguintes, ciclo 2, 3 e 4. Num caso real, este ciclo não seria contabilizado, afirmando tratar-se de um “ciclo de arranque do sistema”. É ainda de salientar que, apesar dos sensores darem a mesma resposta aos ciclos, à medida que os ciclos avançam, a potência óptica atingiu sempre um novo máximo. Quer isto dizer que o tempo de exposição do ciclo anterior afecta de alguma forma o ciclo seguinte. Note-se também que nos sensores “S_1/2_1” e “S_1/2_2” a potência óptica registada aumentava mesmo antes de começar o ciclo de nevoeiro. Este comportamento não se percebe muito bem e eram necessários mais testes para se retirar conclusões mais objectivas sobre este comportamento.

Com base nos resultados alcançados pelos dois grupos de sensores neste e nos testes anteriores, ficou provado que os sensores do grupo 2 apresentam melhores resultados, padrões e estabilidade ao longo do tempo. Por esses motivos, para a realização dos testes seguintes, só foram considerados os sensores do grupo 2. Assim, a grande conclusão a retirar dos testes até então é que a geometria e a forma do sulco é preponderante na sensibilidade e estabilidade da resposta do sensor. Por outro lado, apesar de se pretender testar o comportamento dos sensores ao nevoeiro, na câmara onde foi realizado o ensaio, ocorrem condensações que de alguma forma podem afectar a resposta do sensor.

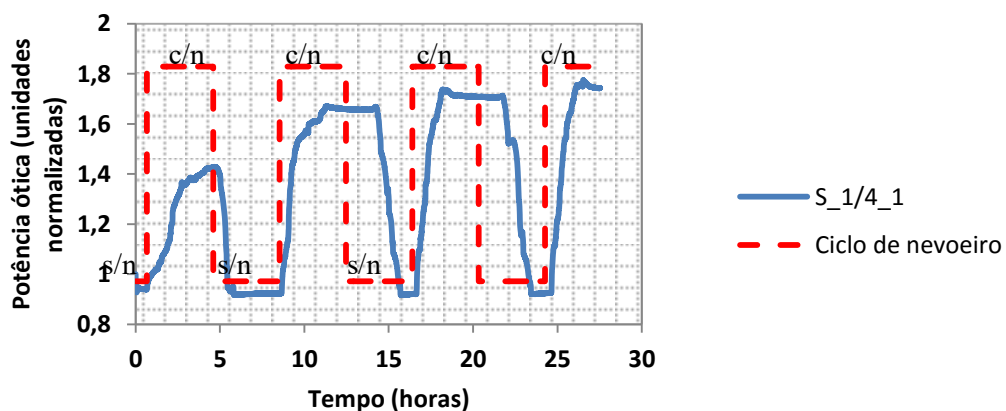


Figura 4.48: Resultado do teste da câmara de nevoeiro do grupo de sensores 2: sensor S_1/4_1; b) Resultado dos sensores S_1/2_1, S_1/2_2 e R_1/2_1.

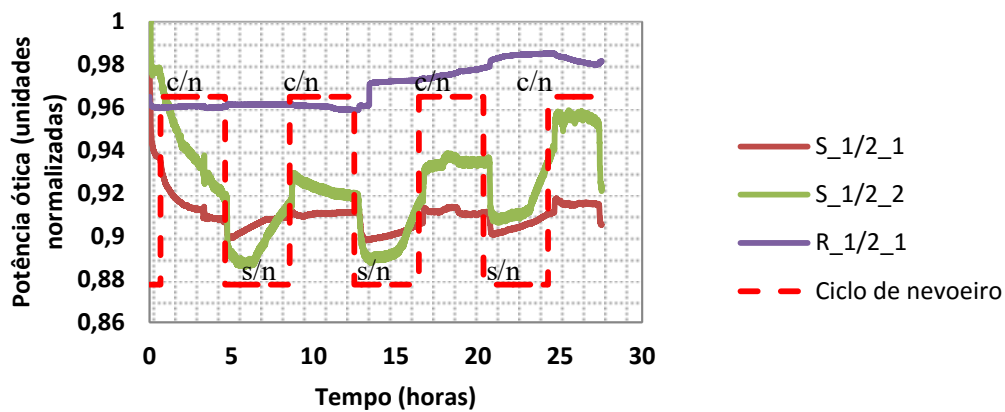


Figura 4.49: Resultado do teste da câmara de nevoeiro do grupo de sensores 2: sensores S_1/2_1, S_1/2_2 e R_1/2_1.

Teste da temperatura e humidade:

O teste da temperatura e da humidade teve como principal objectivo avaliar a influência destas duas variáveis nos resultados medidos. Para o efeito, os sensores foram colocados numa câmara com humidade e temperatura controlada (FITOCLIMA 3600 EDTu), devidamente fixados, de forma a tentar reduzir ao máximo o efeito sobre os sensores das vibrações da própria câmara aquando da realização dos ciclos, uma vez que os sensores são sensíveis a vibrações externas (Figura 4.50). Os registos da temperatura foram obtidos pelo sensor de temperatura do próprio sistema de aquisição. Os resultados são apresentados na Figura 4.51.



Figura 4.50: Colocação dos sensores dentro da câmara climática.

De um modo geral, todos os sensores reagiram à variação de temperatura imposta. Verificou-se que há uma tendência para o aumento de potência óptica com o aumento da temperatura, tendo-se verificado essa tendência na generalidade dos sensores. Este aumento de potência óptica poderá estar relacionado com a expansão térmica da fibra, provocada pelo aumento de temperatura, que induz um pequeno fecho dos sulcos, diminuindo a dispersão da luz. De entre todos os sensores testados, os sensores “S_1/4_1” e o “S_1/2_2” foram aqueles que acompanharam as variações de temperatura de forma consideravelmente mais rigorosa. Nestes sensores, o aumento de potência óptica devido à temperatura

ronda os 2% e 15%, respectivamente. Recorde-se, que o aumento de potência, aquando da realização do teste da coluna de água, foi de 21% e 12%, respectivamente. Assim, o efeito da temperatura foi mais significativo no sensor “S_1/2_2”, produzindo 80% do efeito da água. Salienta-se ainda o facto de que com a temperatura nota-se mais a influência das microfissuras, provocadas aquando da realização dos sulcos e rasgos.

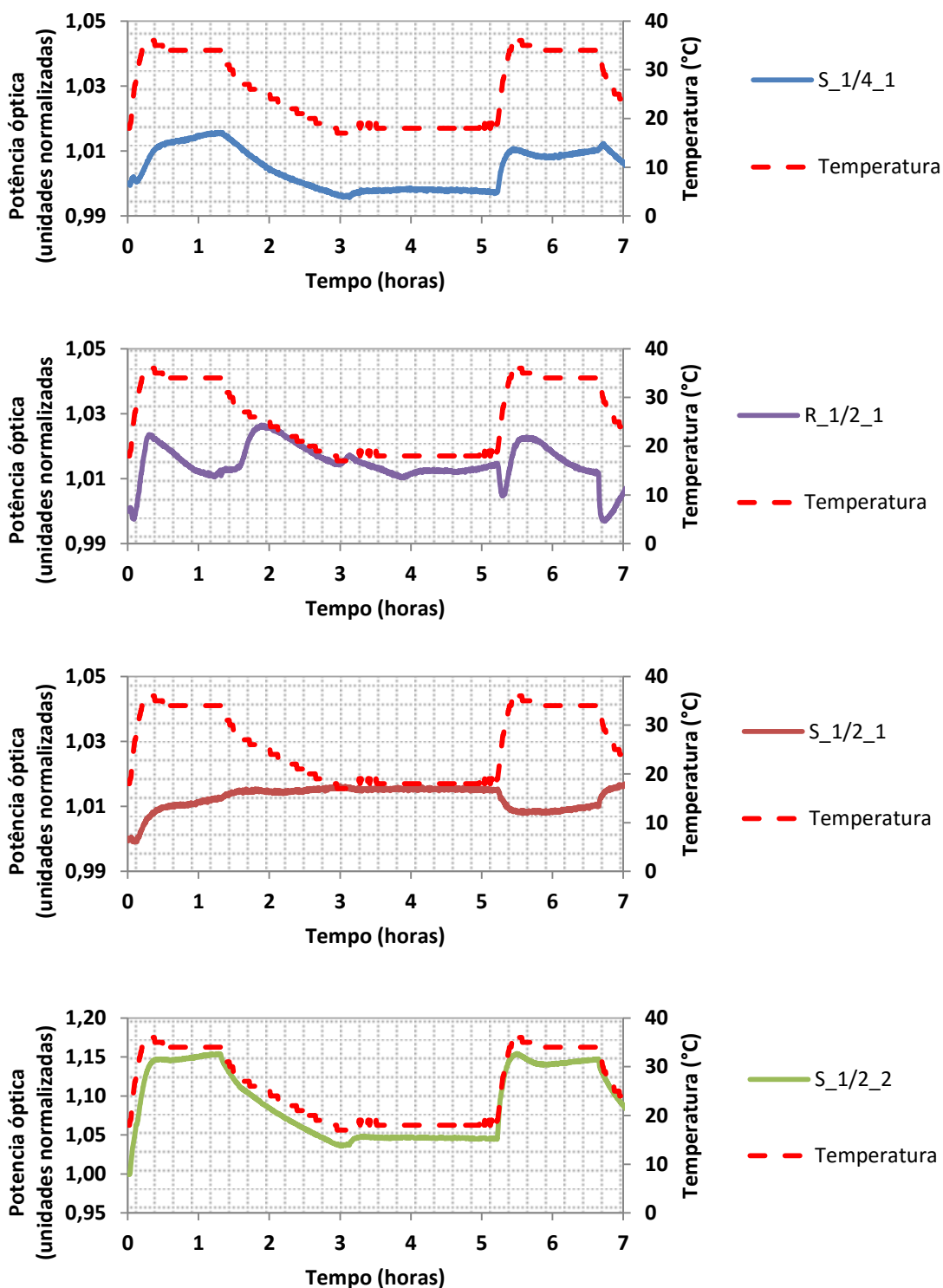


Figura 4.51: Resultados do ensaio da temperatura.

Nos sensores “S_1/2_1” e “R_1/2_1” o aumento de potência foi ligeiro, rondando os 2% a 3%. No teste da coluna de água, o aumento de potência óptica para o sensor “S_1/2_1” foi 7% e 0% para o sensor “R_1/2_1”, uma vez que este não reagiu ao teste da coluna de água. Deste modo, o efeito da temperatura tem muita influência nas medições efectuadas, excepto no sensor “S_1/4_1”. No entanto, esta influência, muito provavelmente, só se manifesta devido à abertura/fecho dos sulcos/rasgos. Na introdução do sensor em argamassas ou no betão, a abertura dos sulcos, depois da cura, em princípio não se alterará. Assim, a componente da temperatura, em princípio, poderá ser desprezada.

Em relação ao teste da humidade, este foi realizado na mesma câmara utilizada no teste da temperatura. Na figura 4.52 está ilustrado a resposta do sensor “R_1/2_1”. Não se apresentam os resultados dos outros sensores uma vez que foram insensíveis às variações de humidade. Foi realizado um ciclo de subida de humidade com três patamares. A humidade inicial foi estabelecida nos 50%, passando para o 75% e acabando nos 90%. Como é visível, o sensor respondeu de forma clara às mudanças de humidade, com ganhos de 3% na passagem do 50-75% e ganhos de 5% na passagem dos 75-90%.

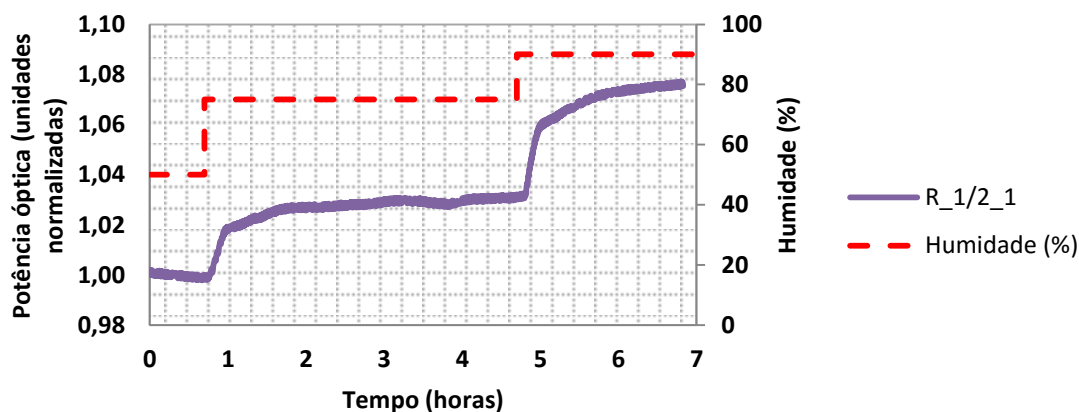


Figura 4.52: Resultados do ensaio da humidade.

Teste em areia e fíler:

O teste em areia e fíler aparece no sentido de perceber o comportamento dos sensores embebidos na pasta de cimento porosa. Sabendo previamente que os sensores respondem bem à presença de água, o objectivo destes testes é avaliar a sensibilidade dos sulcos à água juntamente com partículas sólidas como a areia e partículas finas como o fíler. Os resultados encontram-se na Figura 4.54. Para ambos os testes, o procedimento utilizado consistiu nas seguintes fases:

1. Colocar os sensores (“S_1/4_1”, “S_1/2_1” e “S_1/2_2”) dentro de um molde de argamassas com os sulcos virados para cima (Figura 4.53 a));
2. Ligar os três sensores ao equipamento de leitura e iniciar a leitura (Figura 4.53 b));
3. Preparação das misturas. Este tempo serve para a estabilização dos sensores, rentabilizando o tempo de ensaio (Figura 4.53 c) e d));
4. Colocar as respectivas misturas, nos moldes, ocupando todo o volume (Figura 4.53 e) e f));
5. Deixar os sensores em contacto com a mistura durante 10 min;

6. Retirar a mistura dos moldes e o respectivo sensor. Lavar os sensores com água a correr, de forma a retirar todos os restos de partículas (Figura 4.53 g);
7. Secar todos os sensores com um secador e preparar o próximo teste (Figura 4.53 h)).



(a)



(b)



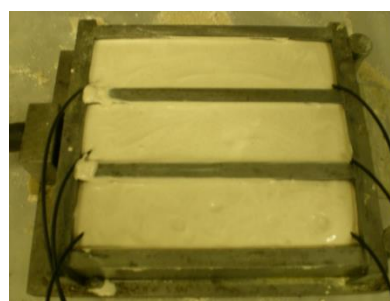
(c)



(d)



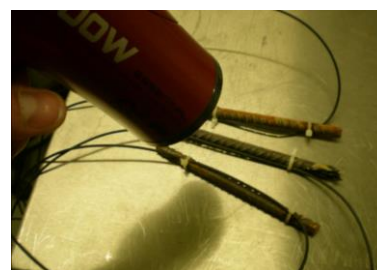
(e)



(f)

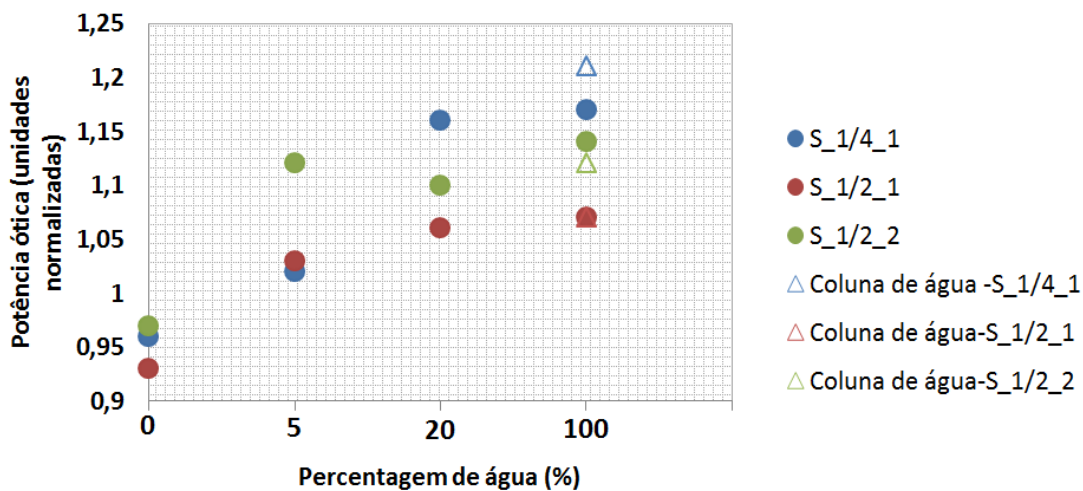


(g)

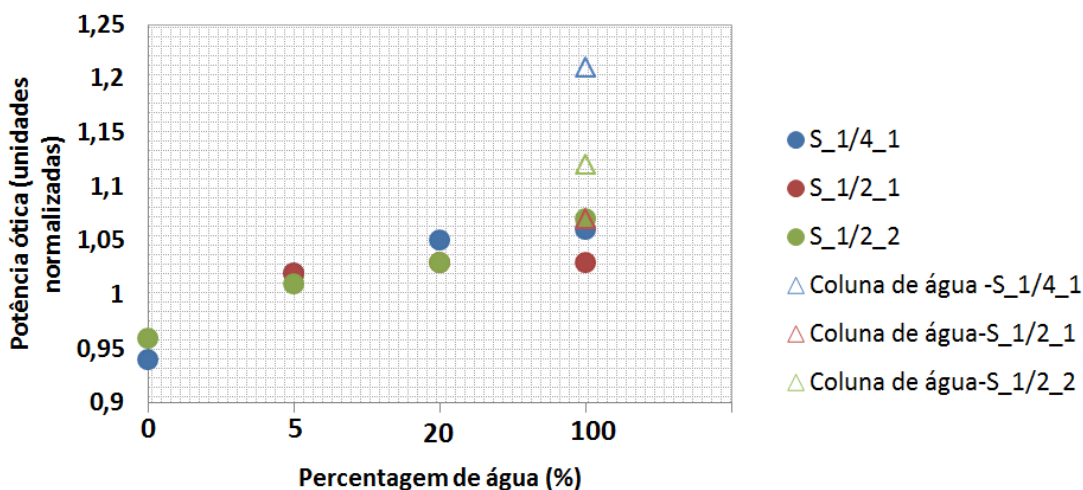


(h)

Figura 4.53: Preparação do teste da areia e fíler: a) Colocação dos sensores no provete das argamassas; b) Iniciar o sistema de leitura; c) Preparação de uma das misturas da areia com água; d) Preparação de uma das misturas com a areia + água + fíler; e) Colocação da areia + água; f) Colocação da areia + água + fíler; g) Lavagem dos sensores; h) Secagem dos sensores.



(a)



(b)

Figura 4.54: Resultados obtidos: a) Ensaio da areia + água; b) Ensaio da areia + água + fíler.

Pela análise dos gráficos, e como era espectável, à medida que aumenta a percentagem de água, a potência óptica registada também aumenta. Facto explicado devido a uma menor dispersão do sinal óptico nos sulcos devido à presença de água. No entanto, com a introdução só da areia (0% de água), registou-se uma diminuição da potência óptica. Pode haver três motivos que explicam o sucedido. Uma explicação assenta na ideia do impacto causado na fibra, aquando da introdução da areia, obrigando-a a deslocar-se. Uma outra explicação é que a pressão exercida pela areia pode alterar a geometria dos sulcos. Por último, como os grãos de areia são um material opaco, a pouca luz que era refractada para o interior do núcleo com o ar como meio, deixa de existir, aumentando as perdas ópticas.

Comparativamente com as percentagens de 5% e 20% de água, os resultados foram o esperado, com potências ópticas maiores para a maior percentagem de água, à excepção do sensor “S_1/2_2”. Este facto não se percebe muito bem, no entanto, não é regra geral do teste efectuado. Desta forma, não se

consegue encontrar uma explicação credível e lógica para tal facto, e para isso eram necessários mais ensaios para aferir algo mais.

De acordo com os resultados registados, a mistura com 100% de água foi a situação em que se encontrou a maior potência óptica. A par dos resultados apresentados, foi introduzido nos gráficos, pontos em forma de triângulo que simbolizam a potência óptica máxima registada no teste da coluna de água dos respectivos sensores. Deste modo, e analisando os dados, a potência óptica registada neste ensaio é, em regra geral, menor que a potência óptica do ensaio da coluna de água. Assim, concluiu-se que, a presença de partículas sólidas e opacas no interior dos sulcos altera o sinal óptico, reduzindo-o. Outra conclusão importante a salientar é que o ganho de potência óptica nas misturas “areia + água + fíler” é muito menor que o ganho na mistura “areia + água”. Este facto vem ao encontro da ideia descrita anteriormente, de que os partículas têm uma clara influência no sinal recebido.

Teste na pasta porosa:

O teste numa pasta porosa teve como objectivo avaliar a resposta do sensor POF quando integrado num material cimentício, para averiguar a possibilidade da sua utilização na monitorização da durabilidade das estruturas de betão armado, medindo teores em água.

Neste pressuposto, foi necessário preparar uma cofragem, em madeira, colocando no seu interior os sensores (Figura 4.55). A cofragem assumiu a forma quadrada, com 10 cm de lado e com uma altura de 2 cm. Em duas faces opostas foram efectuados, 4 furos, para permitir a passagem da fibra óptica, evitar grandes flexões nas fibras para não introduzir perdas e também facilitar a introdução da pasta. Terminado este processo, o sistema foi colocado a registar, enquanto se preparava a pasta de cimento porosa.

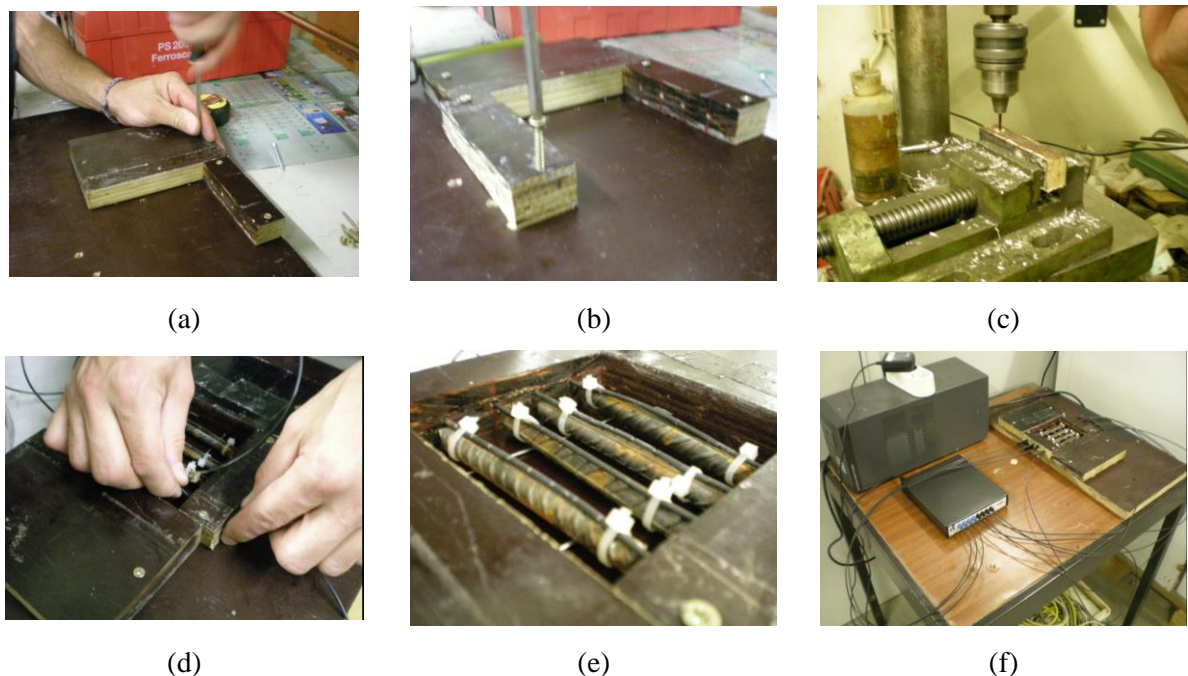


Figura 4.55: Cofragem: a) b) c) Preparação da cofragem; d) colocação dos sensores dentro da cofragem; e) perspectiva dos sensores dentro da cofragem; f) plano do sistema de ensaio.

A composição utilizada para a pasta de cimento porosa está sintetizada na Tabela 4.14. É de salientar o elevado rácio de água/cimento igual a 0,6. O procedimento para a preparação da pasta de cimento porosa encontra-se sintetizado na Tabela 4.15. A Figura 4.56 apresenta a sequência da preparação da pasta.

Tabela 4.14: Composição da pasta.

Composição da pasta de cimento porosa	
Cimento- CEM I 42.5 R	622 kg/m ³
Fíler calcário	511 kg/m ³
Água	373 kg/m ³
Superplastificante (V3006)	3 L/m ³
a/c	0,6

Tabela 4.15: Procedimento de amassadura da pasta

Procedimento de amassadura	
(1/2) Água + Fíler + Cimento	(2 minutos) V. Lenta
(1/2) Água+ SP (V3006)	(2 minutos) V. Lenta + (1 minuto) V. Rápida



(a)

(b)

(c)

Figura 4.56: Preparação da pasta: a) Fíler com cimento; b) Mistura antes de entrar na varinha; c) Aspecto da pasta final.

Após esta fase, procedeu-se então à colocação da pasta na cofragem, anteriormente preparada (Figura 4.57)

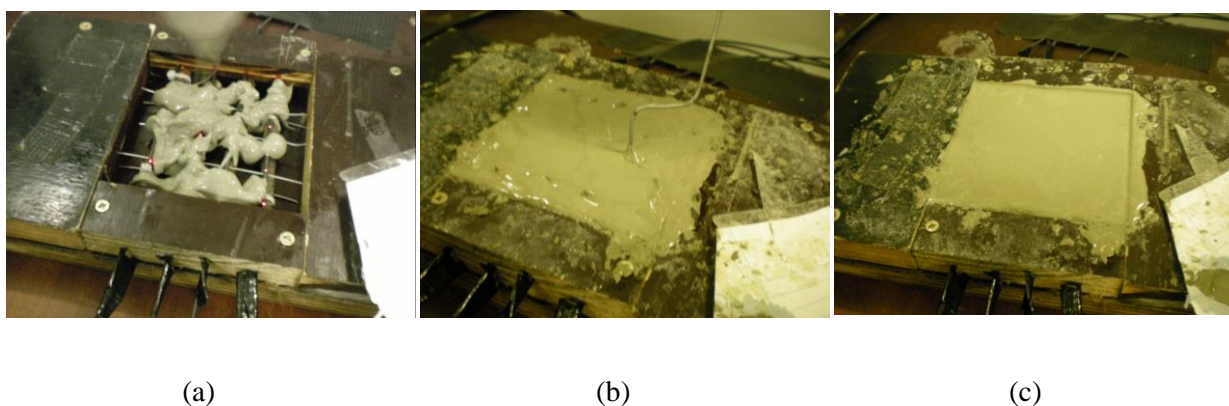


Figura 4.57: Introdução da pasta na cofragem: a) Primeiro contacto entre a pasta e os sensores; b) Arame fino para retirar o ar interior, funcionado como um vibrador; c) Aspecto da pasta final dentro da cofragem.

A Figura 4.58 apresenta o consumo de água devido à hidratação da pasta. Ao longo das primeiras horas a potência óptica diminui devido ao processo de cura do provete, uma vez que a quantidade de água vai diminuindo, originando a uma maior dispersão do sinal óptico.

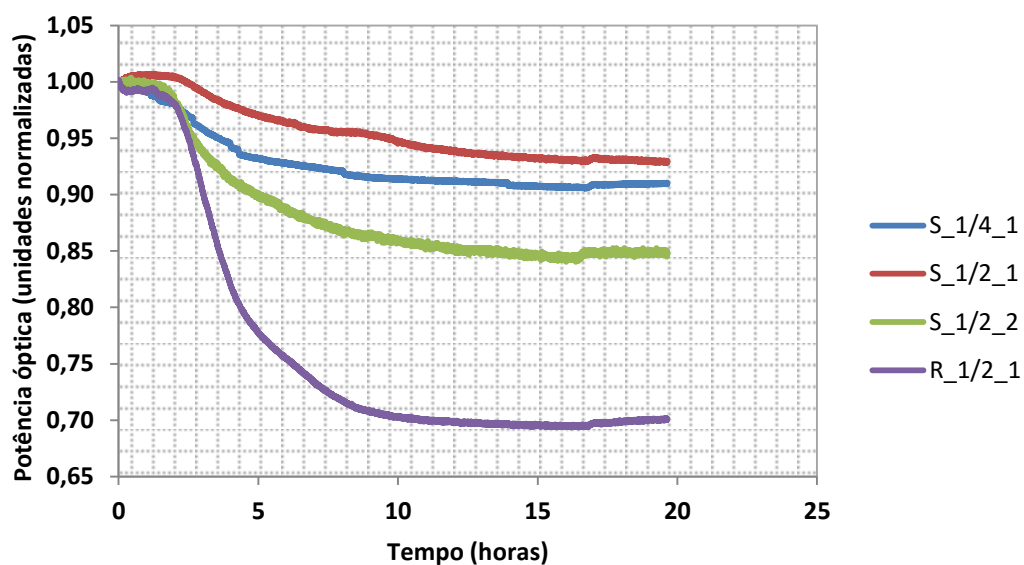


Figura 4.58: Diminuição da potência óptica devido ao consumo de água durante as primeiras horas de hidratação do cimento.

Com a certeza que o processo de cura tenha terminado, como é visível pela estabilização da resposta dos sensores, foi colocado no provete umas placas de esferovite, cortadas de forma rectangular, e coladas com cola quente. Estas placas, depois de coladas, foram devidamente posicionadas na face superior do provete, ao longo do seu perímetro, também com cola quente no bordo interior, de forma a tornar uma superfície estanque. A Figura 4.59 ilustra o processo de preparação para se iniciar o teste da molhagem.

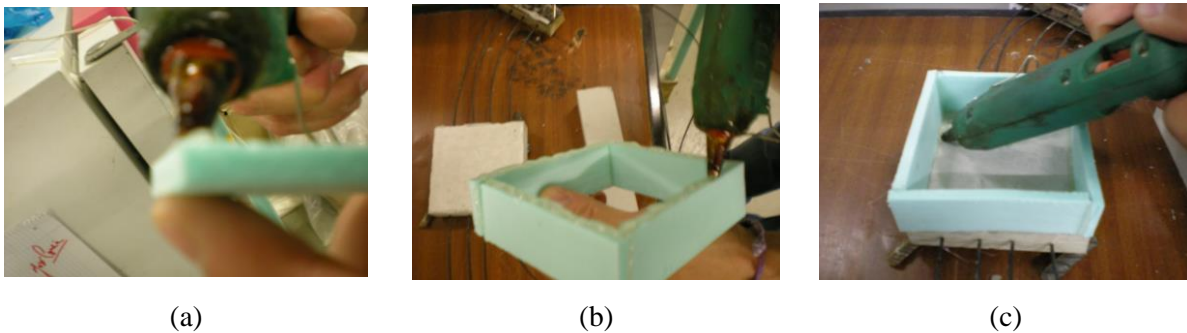


Figura 4.59: Processo de preparação do teste da molhagem: a) Colocação da cola quente numa das placas de esferovite; b) Colocação da cola quente na parte inferior das placas; Colocação da cola quente no bordo interior de forma a tornar estanque o sistema.

Com este processo concluído, e com a cola já seca, passou-se à introdução de água por cima do provete. A altura de água deixada em cima do provete foi cerca de 2 cm. A Figura 4.60 ilustra o processo de introdução da água.

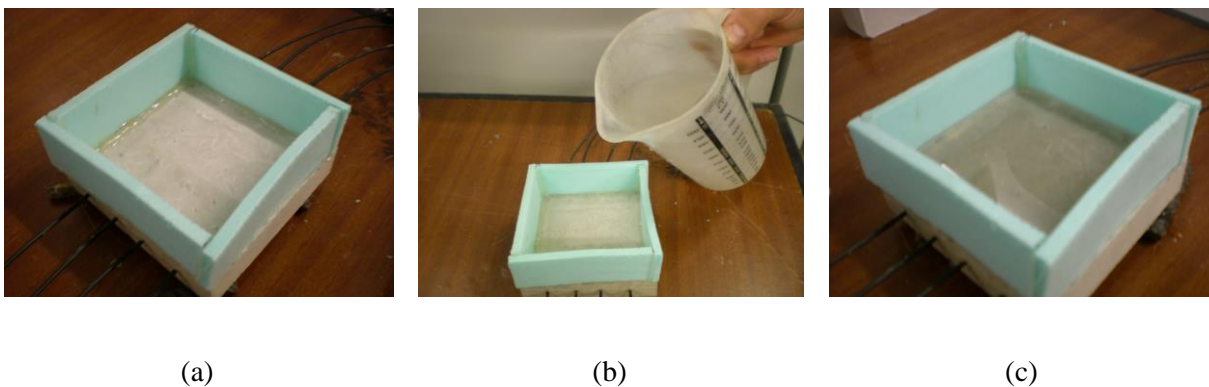


Figura 4.60: Teste da molhagem: a) Perspectiva do provete sem água; b) Colocação de água em cima do provete; c) Provete com água na superfície superior.

Após este processo foram analisados os resultados do ensaio do teste da molhagem e do teste da secagem. A Figura 4.61 ilustra os resultados obtidos durante a cura, o teste de molhagem e secagem. As áreas delimitadas a traço interrompido de cor vermelha identificam as três fases de estudo.

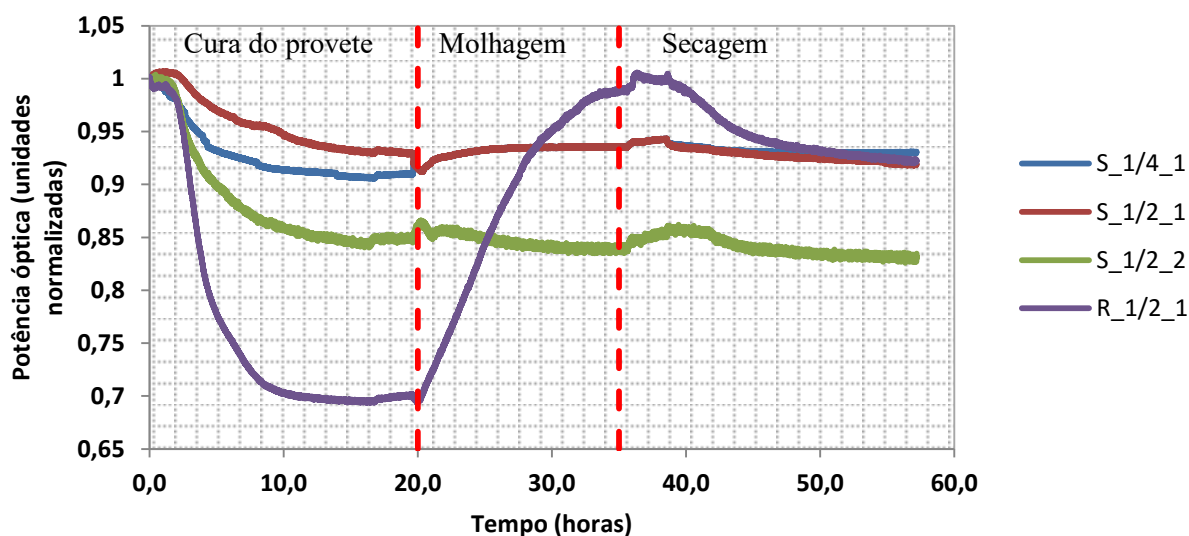


Figura 4.61: Resultado do teste da pasta de cimento porosa.

Com a análise dos resultados é visível que todos os sensores reagiram ao teste da molhagem e secagem. O mais expressivo foi o sensor “R_1/2_1” que obteve ganhos de 30% da sua potência óptica, recuperando a perda que teve durante o processo de cura..

Relativamente aos restantes sensores, apresentaram uma menor variação de potência óptica no ciclo da molhagem e secagem. Este comportamento pode estar relacionado com uma espécie de preenchimento do próprio sulco, devido ao desenvolvimento da microestrutura da pasta de cimento. Comparativamente com o sensor “R_1/2_1”, este apresentou um comportamento sólido e respondeu de forma coerente aos ciclos expostos. Este sensor, ao contrário dos anteriores, pelo facto de ter rasgos ao invés de sulcos poderá explicar este comportamento. A própria geometria do rasgo pode impedir a entrada de material sólido, permitindo no entanto a entrada de água, respondendo assim aos ciclos criados.

Salienta-se para o facto de serem necessários mais testes e em maior número, de forma a tentar padronizar as conclusões obtidas. Com o desenvolvimento deste trabalho experimental, conseguiu-se perceber que poderá haver potencial para a integração deste sensor na monitorização da humidade das estruturas. Apesar de ainda ser um trabalho preliminar foi suficiente para retirar algumas conclusões interessantes.

5. CONCLUSÕES

5.1. ENQUADRAMENTO FINAL

Na nossa sociedade as infraestruturas tornaram-se, ao longo dos anos, num elemento chave de desenvolvimento económico, cultural e social, na medida em que facilitaram o crescimento e melhoria da qualidade de vida da população. Porém, as estruturas de betão armado degradam-se ao longo do tempo se não forem tomadas medidas preventivas ou realizadas inspeções periódicas, acabando mesmo por ter o seu funcionamento comprometido.

Actualmente, todos os trabalhos relacionados com a prevenção/reparação de problemas estruturais têm acontecido já numa fase muito tardia, levando muitas vezes a custos demasiado elevados face ao problema estrutural inicial. Deste modo, a procura de uma solução para este paradigma tem sido o objetivo fundamental dos Engenheiros Civis actuais.

Esta nova era de tecnologia permite o desenvolvimento de novos meios de obtenção e registo de informações que, em tempo real, se relevam extremamente importantes para o diagnóstico preliminar das anomalias das estruturas.

A presente dissertação estabeleceu, assim, uma ponte de ligação entre a utilização de sensores electroquímicos e de fibra óptica, na monitorização da durabilidade das estruturas de betão armado. A aplicabilidade destas tecnologias no estudo do comportamento das estruturas só é possível estabelecendo parâmetros específicos para cada ensaio, fixando diversas variáveis, tais como a temperatura, humidade, teor em água e tempo de estabilização.

Fazendo um enquadramento geral, a abordagem aos sensores electroquímicos desenrolou-se no âmbito da investigação sobre a monitorização de durabilidade. Assim, permitiu criar mais uma base de estudo e de interpretação de resultados, aliados a certos indicadores como o potencial de corrosão e corrente galvânica.

Por outro lado, a tecnologia utilizada nos sensores em fibra óptica aparece como uma ferramenta promissora. Todos os sensores referidos neste trabalho têm ainda um carácter experimental. Apesar de se apresentar como uma tecnologia bastante versátil e com um grande leque de sensores para a medição de parâmetros de durabilidade, estas soluções ainda não se encontram em comercialização.

5.2. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS

No capítulo 1, introduziu-se parte teórica sobre a contextualização do tema. Foi apresentado o conceito de durabilidade, dando ênfase à sua importância no que toca à segurança das estruturas e, consequentemente, à segurança dos seus utilizadores. Foram identificados os diversos custos associados às reparações de estruturas que apresentam um baixo desempenho com poucos anos em serviço. É ainda de referir que, ao longo dos anos, se tem vindo a notar um aumento significativo da procura de novos

sensores e novas formas de responder às crescentes exigências em termos de desempenho das estruturas ao longo da sua vida útil.

Concluiu-se ainda que houve uma evolução da regulamentação do betão armado no que diz respeito aos requisitos de durabilidade das estruturas, passando por novas medidas prescritivas da vida útil de projecto das estruturas de 50 ou 100 anos nas diferentes classes de exposição (LNEC E 464), bem como novas metodologias para estimar as propriedades de desempenho do betão armado (LNEC E 465).

Ao longo dos capítulos 2 e 3, procurou-se apresentar os princípios fundamentais dos sensores de base electroquímica e dos sensores de base óptica. Neste âmbito, relativamente aos sensores electroquímicos, elaborou-se uma lista pormenorizada dos vários sensores actualmente disponíveis no mercado, bem como algumas considerações sobre a sua utilização e aplicabilidade “in-situ”. Concluiu-se que, apesar de serem sensores com um preço bastante elevado e ainda com alguma dificuldade de interpretação dos seus resultados, são os únicos existentes no mercado e os mais utilizados em obra em questões de monitorização de durabilidade das estruturas de betão armado. Concluiu-se também que, como são os sensores mais difundidos na monitorização da durabilidade, há uma maior experiência na sua utilização, uma grande robustez nas soluções de encapsulamento e uma grande oferta de transdutores que permitem medir a maior parte dos parâmetros importantes para a durabilidade, possuindo ainda uma grande compatibilidade com diversos sistemas de aquisição de dados.

O estudo relativamente aos sensores ópticos baseou-se numa pesquisa e recolha de informação sobre os últimos desenvolvimentos na sua concepção e aplicação. Obteve-se uma lista de tecnologias em fibra óptica que permitem medir os parâmetros mais relevantes para avaliar questões da durabilidade, tais como a corrosão, os percursos de corrosão e os parâmetros ambientais. Concluiu-se que, na monitorização da durabilidade, ao longo das últimas décadas, houve esforços para a introdução de sensores de base óptica. Para o aumento deste investimento, muito tem contribuído o aumento do conjunto de vantagens que agora se sobrepõem às desvantagens dos sensores electroquímicos tradicionais. Destaca-se a imunidade às interferências electromagnéticas, a imunidade à corrosão e a possibilidade da transmissão do sinal a longas distâncias. Por outro lado, comparados com os sensores electroquímicos, são sensores que, associados à técnica de multiplexagem, conseguem monitorizar uma maior área, usando uma única fibra. Porém, devido ao facto de serem constituídos por um material frágil, são sensores que ainda não existem no mercado e que ainda são raramente aplicados em obra.

Concluiu-se também que há uma grande preocupação na produção de novas formas e tecnologias para a monitorização da durabilidade das estruturas. Os sensores embebidos, aliados a sistemas de aquisição automática, constituem uma ferramenta promissora na definição de estratégias de manutenção e de reparação, em especial as que envolvem a aplicação de medidas com carácter preventivo. A introdução de sensores nas estruturas de betão armado permite ainda uma avaliação em tempo real da degradação do betão e das armaduras, constituindo uma base de apoio para a aplicação de metodologias de previsão de vida útil.

No capítulo 4 desenvolveram-se duas campanhas experimentais, uma com recurso ao kit-sensor de corrosão (electroquímico) e outra com recurso a um sensor de fibra óptica plástica, POF. Na primeira parte, analisaram-se as variações de potencial de corrosão e corrente galvânica face a ciclos de temperatura e humidade. As principais conclusões retiradas da primeira campanha experimental prendem-se com o facto das medidas de potencial de corrosão e corrente galvânica, quando os ânodos do kit-sensor de corrosão se encontram no estado passivo, serem sensíveis às variações de temperatura, independentemente das suas variações do teor de humidade. Por outro lado, num provete seco e onde os ânodos do kit-sensor de corrosão se encontram corroídos, quando a temperatura aumenta, a corrente galvânica, acompanha a evolução da temperatura, mas sempre na gama de valores característicos de

um provete passivo. No entanto, para o mesmo provete, com a introdução de uma lâmina de água para promover a humidade do provete, a resposta da corrente galvânica ao aumento de temperatura apresentou uma configuração semelhante mas com variações por °C muito superiores. Salienta-se que a molhagem do provete activou o processo de corrosão, pelo que os valores recolhidos durante este ensaio são já valores característicos de um provete corroído. Deste modo, concluiu-se que parâmetros, como a temperatura e humidade, influenciam os resultados do kit-sensor de corrosão e, por isso, não podemos analisar os resultados fornecidos pelos sensores de forma simplista e determinística, sendo necessário avaliar a sua variação ao longo do tempo e atender aos parâmetros ambientais. Importa ainda salientar que houve alguma dificuldade na aquisição de dados do sistema de monitorização instalado no Porto de Leixões. Entre outras, as maiores dificuldades foram devidas a deficiências na alimentação eléctrica do sistema de monitorização. Contudo, apesar das várias dificuldades, verificou-se que os resultados recolhidos nos sensores instalados apresentaram, face às variações de temperatura, um comportamento semelhante ao observado em laboratório.

Tendo em conta tudo o que foi mencionado anteriormente, conclui-se que, para além da importância da instalação de sistemas de monitorização da durabilidade nas estruturas é, de igual modo, importante a vigilância e manutenção dos próprios sistemas de monitorização.

A segunda campanha experimental permitiu concluir que o sensor POF é sensível à presença de água. Com a realização dos dois grupos de sensores, concluiu-se que a forma geométrica do sulco é preponderante nos resultados medidos. Esta diferença é evidente ao nível do ruído e do tempo de estabilização do sinal. No grupo de sensores em que a geometria dos sulcos seguiu um critério bem definido, fazendo com que sejam todos iguais, o ganho de potência óptica foi linear, ou seja, traduziu-se num ganho constante por sulco. No entanto, um bom sensor, não necessita de ter uma resposta linear, basta ter uma resposta conhecida, reproduzível e reversível. Porém, em termos de análise e de interpretação, os sensores com comportamento linear facilitam o processo. Concluiu-se também que, aparentemente, os sensores com rasgos são sensíveis à humidade e os sensores com sulcos são sensíveis à presença de água em fase líquida. No entanto, é necessário realizar mais ensaios com outras geometrias de sensores para se retirarem conclusões mais concretas e objectivas.

Na realização dos ensaios era necessário considerar um tempo de estabilização do sinal. Este acontecimento devia-se sobretudo à necessidade de um tempo de aquecimento do próprio sistema de emissão e de recepção dos dados, nomeadamente, no aquecimento dos LEDs. É ainda importante referir que a troca de canal alterava o valor máximo da potência óptica. Assim, foi necessário interpretar os valores e os resultados dos ensaios tendo em conta a sua variação relativa.

Por último, na fase de introdução dos sensores numa pasta de cimento porosa, os sensores com sulcos responderam essencialmente durante a fase de cura, devido à presença de água. Após esta fase, estes sensores demonstraram fraca sensibilidade às variações de humidade do provete, provavelmente devido a um preenchimento do sulco com pasta. Em contrapartida, os sensores com rasgos foram sensíveis durante todo o processo. Deste modo, concluiu-se que a forma geométrica do sulco influenciou os resultados medidos. Aparentemente, o sensor com os rasgos, de alguma forma impediu a entrada de pasta, permitindo somente a entrada de água.

Em termos de conclusão, o trabalho desenvolvido com o sensor POF dá indicações de que estes sensores poderão ser utilizados para monitorizar teores em água do betão, constituindo uma solução simples, de relativa sensibilidade e de baixo custo.

5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O estudo sobre sensores electroquímicos conta já com um vasto campo de investigação e de trabalhos realizados. Contudo, as maiores dificuldades mantêm-se em torno da interpretação dos resultados obtidos. Deste modo, dever-se-iam criar novas geometrias de sensores que permitissem novas avaliações e novas interpretações. Em termos do trabalho experimental, era necessário realizar novamente o ciclo de temperatura mas agora com os provetes secos. Assim ir-se-iam retirar melhores conclusões sobre a influência que as variáveis ambientais (temperatura e humidade) em provetes corroídos e não corroídos.

Relativamente ao sensor POF, era necessário aprofundar mais os conhecimentos adquiridos. No que diz respeito aos sensores que possuem rasgos, o facto de terem sido os únicos a terem sensibilidade à humidade, remete para uma necessidade de realização de mais ensaios para obtenção de mais resultados para compreender melhor este comportamento e obter, deste modo, melhores conclusões.

Por outro lado, era interessante a construção de novos acessórios que permitissem a eliminação de erros associados ao sistema de medição. Numa primeira análise, seria importante introduzir conectores à extremidade da fibra para melhorar a ligação da própria fibra ao sistema de leitura e aquisição, uma vez que, a falta deste elemento tornou-se numa variável que influenciava os resultados. A forma como se cortava as extremidades da fibra também se revelou ser imprópria para obter os melhores resultados durante os ensaios. Como os cortes eram feitos de forma manual, nem sempre a secção transversal da extremidade da fibra era perpendicular ao eixo longitudinal, levando a alguma incorreção dos resultados. Assim, era extremamente importante a introdução de um equipamento próprio para o corte das extremidades da fibra.

Por último, no ensaio embebido na pasta, sentiu-se a necessidade de prevenir a ocorrência do preenchimento do sulco. Desta forma, a solução passaria pela introdução de um encapsulamento do sensor que fosse permeável apenas à água, funcionando como um filtro.

Com o desenvolvimento desta dissertação, com especial atenção à realização da campanha experimental, concluiu-se que não restam dúvidas de que a monitorização da durabilidade das estruturas através de sensores de embeber tem hoje um enorme potencial. Deste modo, este documento surge como um novo ponto de partida para a realização de novos trabalhos e para o desenvolvimento de novos sensores, com o intuito de obter uma durabilidade controlada e um desempenho de longa duração das estruturas de betão armado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Eurocódigo 2 [2010], "EN 1992-1-1: Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão-Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios," CEN, p. 55, 2010.
- [2] Costa, A., "Reabilitação e reforço de estruturas-Durabilidade de Estruturas de Betão," Instituto Superior Técnico - Reabilitação e Reforço de Estruturas Mestrado em Engenharia Civil 1999.
- [3] Basheer, P., "Use of Fibre Optic Technology to Monitor In Situ Concrete Performance," presented at the UK-China Science Bridge Workshop, 2010.
- [4] Santa, U., "Techniques for the acquisition, modeling and interpretation of knowledge in monitoring applications," presented at the In: Proceedings of the 6th International Workshop on Material Properties and Design., Bauhaus University Weimar, 2000.
- [5] Adams N., "Vision 2020: A Vision for the Concrete Repair Protection and Strengthening Industry " Octobre 2004.
- [6] OCDE, "Bridge Management," Road Transportation Research, 1992.
- [7] Cruz, P., "Inspeção, diagnóstico, conservação e monitorização de pontes" Universidade do Minho, 2006.
- [8] S. A. INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL, "Relatório e contas consolidado," 2015.
- [9] Salta, M., "Prevenção da corrosão nas estruturas marítimas em betão armado," presented at the II ENCONTRO: Dia Mundial sensibilização para a Corrosão- "Os Materiais e o Mar", Lisboa, 2014.
- [10] Rodrigues, C., "Monitorização de estruturas de engenharia civil apoiada em soluções de fibra óptica," Doutor em Engenharia Civil, Engenharia Civil Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [11] Bertolini, L., Pedferri, P., Redaelli, E., Polder, Rob B., *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, 2nd Edition*. John Wiley and Sons, 2013.
- [12] Figueiredo, E., "Monitorização e Avaliação do Comportamento de Obras de Arte," Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, DEC, Universidade do Porto, FEUP, 2006.
- [13] Fraser, M., "Development and Implementation of an Integrated Framework for Structural Health Monitoring," University of California, San Diego, 2006, 2006.
- [14] ISIS, *Guidelines for Structural Health Monitoring*. Canada, Setembro, 2001.
- [15] Chang, S., *Application of the Structural Health Monitoring System to the Long Span Cable-Supported Bridges* vol. Vol.1. Porto, 2006.
- [16] Rocha, M., Ferry, J., Marécos, José, "Observation of Some Reinforcer Concrete Structures," presented at the Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais sur les Matériaux et les Constructions, Symposium sur l'Observation des Ouvrages, Outubro, 1955.

- [17] Félix, C., *"Monitorização e Análise do Comportamento de Obras de Arte,"* Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2004.
- [18] Figueiras, J., *"Monitorização da integridade estrutural de obras de arte,"* presented at the BE2008 - Encontro Nacional Betão Estrutural 2008, Guimarães, 2008.
- [19] Sumitro, S., *Global Smart Bridge Monitoring System* Vol. 1. Porto, 2006.
- [20] Basheer, M., Nanukuttan, S., Cleland, D., *"Technical Report 6.4 - Smart structural materials with permanent monitoring system for concrete: Novel sensors for monitoring the durability of concrete structures"* smart & green • structural and repair materials, 2008.
- [21] LNEC, *"PROJECTO SCORBA - Desenvolvimento de um sensor de resistividade para monitorização da corrosão no betão armado,"* DEPARTAMENTO DE MATERIAIS - Núcleo de Materiais Metálicos, Lisboa, Dezembro 2007.
- [22] Goltermann, P., Andersen, M., *"Smart Structures: Possibilities, Experiences and Benefits from Permanent Monitoring"* presented at the International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Barcelona: Iabmas, 2002.
- [23] Schiessl, P., Raupach, M., *"Monitoring system for the corrosion risk of steel in concrete structures,"* Concrete International, pp. 52-55, 1992.
- [24] Bäßler, R., Mietz, J., Raupach, M., Klinghoffer, O., *"Corrosion risk and humidity sensors for durability assessment of reinforced concrete structures"* presented at the Proc. EUROCORR 2000, London, 2000.
- [25] Montemor, M., Alves, J., Simões, A., Fernandes, J., Lourenço, Z., Costa A., Appleton, A., Ferreira, *"Multiprobe chloride sensor for in-situ monitoring of reinforced concrete structures"* Cement and Concrete Composites vol. 28, pp. 233-236, 2006.
- [26] Legat, A., *"Monitoring of steel corrosion in concrete by electrode arrays and electrical resistance probes"* Electrochemical Acta, vol. 52, pp. 7590–7598, 2007.
- [27] Atkins, C., Scantlebury, J., Nedwell, P., Blatch, S., *"Monitoring chloride concentrations in hardened cement pastes using ion selective electrodes,"* Cement and Concrete Research, vol. Vol-26, pp. 319-324, February 1996.
- [28] Muralidharan, S., Ha, T., Bae, J., Ha, Y., Lee, H., Kim, D., *"A promising potential embeddable sensor for corrosion monitoring application in concrete structures,"* Measurement, vol. Vol: 40, pp. 600–606, 2007.
- [29] Figueiras, J., *"Monitorização na construção e na conservação de obras de arte"* presented at the Congresso Brasileiro do Concreto, Maceló-Alagoas, 2002.
- [30] Fuhr P., Huston, D., McPadden, A., Couley, R., *"Embedded chloride detectors for roadways and bridges,"* SPIE, vol. 2719, pp. 229-237, 1996.
- [31] Laferrière, F., Inaudi, D., Kronenberg, P., Smith, I., *"A new system for early chloride detection in concrete"* Smart Materials and Structures, vol. 17, p. 045017, 2008.
- [32] Healy, W., *"Moisture sensor technology-A summary of techniques for measuring moisture levels in building envelopes,"* ASHRAE transactions, vol. Vol. 109, 2003.

- [33] Yeo, T., Sun, T., Grattan K., Parry, D., Lade, R. Powell, B., " *Polymer-coated fiber Bragg grating for relative humidity sensing*" IEEE Sensors Journal, vol. 5, pp. 1082-1089, 2005.
- [34] Pascal, K., " *Construction material monitoring with optical hair hygrometers*" École Polytechnique Fédérale De Lausanne, Switzerland, 2002.
- [35] Srinivasan, S., Taylor, S., Basheer, P., Smith, B., Sun, T., Grattan, K., " *Fibre optic relative humidity probe for monitoring of concrete structures*" presented at the 4th international conference on structural health monitoring of intelligent infrastructure (SHMII-4), Zurich, 2009.
- [36] Correia, S., Antunes, P., Pecoraro, E., Lima, P., Varum, H., Carlos, L., " *Optical fiber relative humidity sensor based on a FBG with a di-ureasil coating*" Sensors (Basel), vol. 12, pp. 8847-60, 2012.
- [37] Arregui, F., Yanjing, L., Matias, I., Claus, R., " *Optical fiber humidity sensor using a nano Fabry-Perot cavity formed by the ionic self-assembly method*" Sensors and Actuators A: Physical, vol. 59, pp. 54-59, 1999.
- [38] Dong, S., Luo, M., Peng, G., Cheng, W., " *Broad range pH sensor based on sol-gel entrapped indicators on fibre optic*" Sensors and Actuators B: Chemical, vol. Vol: 129, pp. 94-98, 2007.
- [39] Lencioni, M., " *Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto – Estado-da-Arte*" presented at the VI Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, Córdoba, Argentina, 2010.
- [40] McCarter, W., Vennesland, Ø., " *Sensor systems for use in reinforced concrete structures*" Construction and Building Materials, vol. 18, pp. 351–358, 11 March 2004 2004.
- [41] Abreu, A., " *Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais*" Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- [42] Monfore, G., " *The electrical resistivity of concrete*" Journal of the PCA Research and Development Laboratories, vol. Vol. 10, n. 2, pp. 35-48, 1968.
- [43] Larsen, E., Østvik, J., Vennesland, Ø., " *Electrical resistivity of concrete - Part II: Influence of moisture content and temperature*", 2006.
- [44] Polder, R., " *Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation*" Construction and Building Materials, 2001.
- [45] Polder, R., " *Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation*" Construction and Building Materials, vol. 15, pp. 125-131, 2001.
- [46] Cox, R., Vennesland, Ø., Valente, T., " *Corrosion and protection of metals in contact with concrete: Final Report (COST 509)*" 1997.
- [47] Chrisp, G., McCarter, W., Owens E., Nanukuttan, S., Basheer, P., " *Developments in Intelligent Monitoring of Concrete Structures*" presented at the Structural Faults & Repairs Conference, Edinburgh, Scotland, June, 2010.
- [48] Gowers, K., S. G., " *Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique*" ACI Materials Journal, n. 96, 1999.

- [49] Filho, A., "Técnicas de medida da resistividade elétrica em estruturas atmosféricas de concreto convencional" *Téchne*, vol. 210, pp. 44-48, 2014.
- [50] Proceq. (2016, 15/03/16). *Resipod (Sonda de wenner)*. Available: <http://www.proceq.com/po/produtos/teste-de-concreto/resistividade-da-superficie/resipod.html?pqr=17>
- [51] Equipment. (2016, 15/05/16). *Ohmcorr Test System™ Resistivity Meter for Concrete* Available: <http://www.ndtjames.com/Ohmcorr-Test-System-Resistivity-Meter-p/c-rm-8000.htm>
- [52] Feliu, C., Gonzdlez, J., Alonso, C., "A new method for in-situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete" Vol. 29, 1996.
- [53] J. Instruments. (2016, 15/03/16). *Humiditest™* Available: http://www.directindustry.com/prod/james-instruments/product-58286-872003.html#product-item_397624
- [54] S. GmbH. (2016, 15/03/16). Available: <http://www.sensortec.de/sensoren-sensors/multiring-elektrode-multiring-electrode.html>
- [55] Vennesland, Ø., Raupach, M., Andrade, C., "Recommendation of Rilem TC 154-EMC: "Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete"—measurements with embedded probes" *Materials and Structures*, vol. 40, pp. 745-758, 2007.
- [56] Basheer, M., Nanukuttan, S., Cleland, D., "Technical Report 6.4 - Smart structural materials with permanent monitoring system for concrete: Novel sensors for monitoring the durability of concrete structures" *smart & green • structural and repair materials*, 2008.
- [57] Myrdal, R., "The electrochemistry and characteristics of embeddable reference electrodes for concrete (EFC 43)" Woodhead Publishing, 2007.
- [58] Cigna, R., Nurnberg, U.; Polder, R.; Weydert, R., "COST 521 - Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Structures, Final Report," 2002.
- [59] C. Electrodes. (2016, 15/03/16). *Reference Electrodes*. Available: <http://www.castle-electrodes.com/reference-electrodes/>
- [60] F. Technology. (2016, 15/03/16). *CorroWatch Multisensor*. Available: <http://www.pcte.com.au/corrowthatch-embeddable-corrosion-front-probes>
- [61] Figueiras, H., Coutinho, J., Andrade, C., Félix, C., "Desempenho do kit-sensor de corrosão na monitorização da durabilidade de estruturas de betão" Encontro Nacional Betão Estrutural 2008 - Guimarães, 5, 6, 7 de Novembro de 2008 2008.
- [62] R. C. Systems. (2016). *Sensor 900 (Concrete Multi-Depth Sensor, Model 900)*. Available: [http://www.cosasco.com/documents/900_Concrete_Chloride_Contamination_LPR_Probe\(2\).pdf](http://www.cosasco.com/documents/900_Concrete_Chloride_Contamination_LPR_Probe(2).pdf)
- [63] Sensortec. (2016, 15/03/16). *Corrosion Sensor* Available: <http://www.sensortec.de/>
- [64] Raupach, M., Schiessl, P., "Macrocell Sensor Systems for Monitoring of the Corrosion Risk of the Reinforcement in Concrete Structures" *NDT& International*, vol. 34, pp. 435-442, 2001.

- [65] Andrade, C., "Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method," *Materials and Structures*, vol. 37, pp. 623-643, November 2004.
- [66] I. Rohrback Cosasco Systems. (2016, 15/03/16). *Model 800: LPR Corrosion Rate Monitoring in Concrete* Available: http://www.cosasco.com/pdfs/800_LPR_Corrosion_Rate_Monitoring%20Concrete.pdf
- [67] EléctraWatch. (2016). *ECI-1-Embedded Corrosion Instrument*. Available: http://www.electrawatch.com/ECI_Brochure.pdf
- [68] Antunes, P., Varum, H., André, P., "Sensores de fibra ótica: Desenvolvimentos em Aveiro" FEUP, 2016.
- [69] O.-MIB, "Fibras Ópticas: Estruturas e Teoria de Propagação," 2007.
- [70] Measures, R., "Structural Monitoring with Fiber Optic Technology" San Diego, Academic Press., 2001.
- [71] Libocábos. (2016). *Conectores*. Available: <http://www.libocabos.com/site/produtos/conectores-de-fibra-optica/>
- [72] Furukawa.co. (2016, 15/03/15). *S326 Hand-Held High Precision Cleaver*. Available: <https://www.furukawa.co.jp/fitel/english/fusion/fct.htm>
- [73] JILONG. (2016, 15/03/15). *JILONG KL-280G*. Available: <http://www.jilongfiber.com/product/fusion-splicer-48.html>
- [74] FS, "Precision V-Groove Fiber Aligner KL-510," 15/03/16 2016. <http://www.fs.com/products/14345.html>
- [75] Fibracem. (2016, 15/03/15). *Protector de emendas termo-retráctil*. Available: <http://www.fibracem.com/produtos/equipamentos-e-ferramentas/protector-de-emenda-optica/>
- [76] Mrad, N., "Optical fiber sensor technology: introduction and evaluation and application," in *Encyclopedia of smart materials*, J. Wiley, Ed., ed. New York, 2002.
- [77] Grattan, K., "Fiber optic sensor technology: an overview" *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. A: Physical. 82:1 pp. 40–61, 2000.
- [78] André, P., Antunes, P., Ferreira, L., Sousa, M., Varum, H., "Monitoring of the concrete curing process using plastic optical fibers" *Measurement*, vol. 45, pp. 556-560, 2012.
- [79] Rajesh, M., Nampoori, V., "POF based smart sensor for studying the setting dynamics of cement paste" presented at the Third International Conference on Optical and Laser Diagnostics, 2007.
- [80] Barbero, A., Carneiro, A., "Princípio de funcionamento dos sensores ópticos baseados em grades em fibras ópticas e a sua importância nas diferentes áreas tecnológicas" *ENGEVISTA*, vol. 14, pp. 389-403, Dezembro 2014.

- [81] Braghin, G., Cinquemani, S., Resta, F., "Potential of FBG Sensors for Vibration Control in Smart Structures" presented at the IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), Politecnico di Milano, Via La Masa 1, 20156 Milano, Italy, 2013.
- [82] Lima, H., Nogueira, R., Abe, I., André, P., Fernandes, H., Varum, H., Kalinowski, H., Costa, J., "Structural Health Monitoring of the Church of Santa Casa da Misericórdia of Aveiro Using FBG Sensors" IEEE Sensors Journal, vol. 8, pp. 1236-1242, JULY 2008.
- [83] Antunes, P., Lima, H., Varum, H., André, P., "Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures_Abode wall case study" Measurement, vol. 45, pp. 1695–1705, 2012.
- [84] Li, H., Ou, J., Zhou, Z., "Applications of optical fibre Bragg gratings sensing technology based smart stay cables" Optics and Lasers in Engineering, vol. 47, pp. 1077–1084, 2009.
- [85] Lee, J., Yun, C., Yoon, D., "A structural corrosion-monitoring sensor based on a pair of prestrained fiber Bragg gratings" MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, vol. 21, p. 7, 2010 2010.
- [86] Majumder, M., Gangopadhyay, T., Chakraborty, A., Dasgupta, K., Bhattacharya, D., "Fibre Bragg gratings in structural health monitoring" Sensors and Actuators A: Physical, vol. 147, pp. 50–164, 2008.
- [87] Varum, H., Antunes, P., Alberto, N., Bilro, L., Pinto, P., Costa, A., Rodrigues, H., Pinto, J., Nogueira, R., André, P., "Optical Sensors Based on Fiber Bragg Gratings for Structural Health Monitoring" New Developments in Sensing Technology for SHM, LNEE 96, pp. 253–295, 2011.
- [88] Ferreira, F., Maia, A., Alves, P., Santos, J., "Redes de Bragg em fibra óptica - Contribuições para o desenvolvimento de uma tecnologia revolucionária em monitorização estrutural" presented at the Encontro Nacional Betão Estrutural, 2004.
- [89] Goicoechea, J., Zamarreño, C., Matias, I., Arregui F., "Utilization of white light interferometry in pH sensing applications by mean of the fabrication of nanostructured cavities" Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 138, pp. 613-618, 2009.
- [90] Maalej, S., Kuang, K., Paramasivam, P., "Fiber Optic Sensing for Monitoring Corrosion-Induced Damage" Structural Health Monitoring vol. 3(2), pp. 165–176, 2004.
- [91] Quirion, B., Ballivy, G., "Concrete strain monitoring with Fabry-Perot fiber-optic sensor" Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 12, pp. 254-261, August, 2000.
- [92] Bao, X., Heron, N., Webb, D., Jackson, D., "Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering," Journal of Lightwave Technology, vol. 13:7, pp. 1340–1348, 1995.
- [93] Sachs, C., "Une nouvelle génération de détecteurs: les optodes," Ann. de biologie clinique vol. 57, p. 107, 1999.
- [94] Barker, S., Thorsrud, B., Kopelman, R. "Nitrite and chloride-selective fluorescent nano-optodes and in vitro application to rat conceptuses," Anal. Chem., vol. 70, 1998.

- [95] Cosentino, P., Grossman, B. , Shieh, C. , Doi, S. , Xi, H. , Erbland, P. , "Fibre optic chloride sensor development" J. Geotech. Eng., vol. 121(8), pp. 610-617, 1995.
- [96] McPolin, D., Basheer, P., Grattan, K., Long, A., Sun, T., Xie, W., "Preliminary Development and Evaluation of Fiber-Optic Chemical Sensors," Journal of Materials in Civil Engineering Vol. 23(8), pp. 1200-1210, AUGUST 2011.
- [97] Habel, W., "Assessment of Structures using Fibre-optic Sensors - pH sensor for early detection of potential danger of corrosion in concrete structures" Fachtagung Bauwerksdiagnose - Vortrag 06, 2008.
- [98] Wan, K., Leung, C., "Durability Tests of a Fiber Optic Corrosion Sensor," Sensors vol. 12, pp. 3656-3668, 16 March 2012 2012.
- [99] Wang, Y., Huang, H., "Optical fiber corrosion sensor based on laser light reflection," Smart Materials and Structures, vol. 20, p. 085003, 2011.
- [100] Nascimento, J., Carlos, E., Maciel, D., Fontana, E., Martins-Filho, J., Coêlho, I., "Influencia da Rugosidade na Resposta de Sensores de Corrosao a Base de Fibra Optica" presented at the 14° SBMO – Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 9° CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo.
- [101] Leung, K., "A Novel Optical Fiber Sensor for Steel Corrosion in Concrete Structures " Sensors, vol. 8, pp. 1960-1976 2008.
- [102] Habel, W., Krebber, K., "Fiber-optic sensor applications in civil and geotechnical engineering" Photonic Sensors, vol. 1, pp. 268-280, 2011.
- [103] Zhao, X., Gong, P., Qiao, G., Lu, J., Lv, X., Ou, J., "Brillouin corrosion expansion sensors for steel reinforced concrete structures using a fiber optic coil winding method" Sensors (Basel), vol. 11, pp. 10798-819, 2011.
- [104] Molecular Probes, "Fluorescent Indicators for Chloride," *Molecular Probes*, February 2001.
- [105] Nguyen, T., Venugopala, T., Chen, S., Sun, T., Grattan, K., Taylor, S., "Fluorescence based fibre optic pH sensor for the pH 10–13 range suitable for corrosion monitoring in concrete structures," Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 191, pp. 498-507, 2014.
- [106] Alwis, T., Grattan, K., "Optical fibre-based sensor technology for humidity and moisture measurement: Review of recent progress" Measurement, vol. 46, pp. 4052–4074, 2013.
- [107] Arup, H., Mletz, J., "Long term performance of MnO₂ – Reference electrodes in concrete" presented at the Corrosion 97, Houston, USA, 1997. , 1997.
- [108] Figueiras, H., "Performance-based design of SCC to ensure durability of concrete structures" Departamento de Engenharia Civil, University of Porto, 2013.
- [109] NewMENSUS, "Instalação experimental de sistemas de medição da corrosão-Relatório Técnico-Científico elaborado no âmbito do Projecto N° 013 675- Parte 2" Setembro 2012.