



**Licínio Duarte Ferreira Monitorização do processo de cura do betão através
de sensores óticos**



Licínio Duarte Ferreira Monitorização do processo de cura do betão através de sensores óticos

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Sérgio de Brito André, Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações e Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e do Doutor Humberto Salazar Amorim Varum, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à memória de minha avó piccola,

Maria Mendes Figueiredo.

o júri

presidente

Prof. Doutor João Filipe Calapez de Albuquerque Veloso
Professor auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Doutor Orlando José dos Reis Frazão
Investigador Auxiliar do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto

Prof. Doutor Paulo Sérgio de Brito André
Professor auxiliar convidado do Departamento de Física da Universidade de Aveiro
Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações

Prof. Doutor Humberto Salazar Amorim Varum
Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Este trabalho desenvolvido foi possível graças a diversas pessoas que me apoiaram ao longo deste ano académico. Por isto, quero exteriorizar toda a minha gratidão para com elas.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Paulo Sérgio de Brito André e Professor Doutor Humberto Salazar Amorim Varum, pela oportunidade, pela sabedoria científica transmitida, pela orientação e acima de tudo, pela paciência face às dificuldades intrínsecas de um mero aprendiz, como eu.

Ao Doutor Paulo Antunes pelo apoio prestado e pela discussão dos resultados experimentais.

À Engenheira Maria Carlos pela orientação no laboratório e de algumas dicas experimentais.

Ao Engenheiro João, colaborador do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, pela enorme ajuda durante o procedimento experimental.

Como não podia deixar de ser, aos meus pais, pelo amor e pelo arcaboço de educação transmitido!

Aos primos, Erbi Silva e Carla Silva, pelos momentos em família!

Aos amigos e colegas de universidade, pela amizade e apoio: Diogo Pires, David Monteiro, Abel Fenta, Rafael Pinho, Pedro Pinto, Vanessa Lopes, Pedro Simões, Sónia Linhares, Hélio Cheong, Sónia Tavares, Vânia Freitas, Tiago Rodrigues, Tim Koch-Grünberg, Marco Granada, Bruno Faria, Gil Fernandes e João Dinis.

A todos, muito obrigado,
Licínio

palavras-chave

Betão, Monitorização da cura, Fibras óticas de plástico

resumo

O objetivo principal deste trabalho foi propor e validar um novo método de monitorização do processo de cura do betão através de fibras óticas de plástico (*POFs*). Com este propósito desenvolveu-se um protótipo para aquisição da informação referente à monitorização em ambiente de campo. O princípio de funcionamento destes sensores óticos é baseado espalhamento de *Rayleigh* do sinal ótico enaltecido por entalhes aplicados ao longo do núcleo da fibra. Os resultados obtidos comprovam a validade deste novo método de monitorização, principalmente no ensaio onde se monitorizou betão corrente e betão leve em simultâneo.

keywords

Concrete, curing monitoring, plastic optical fiber

abstract

The main objective of this work is to propose and validate a new method for monitoring the curing process of concrete using plastic optical fibers (POFs). For this purpose a prototype has been developed for acquisition in a field environment. The principle of operation of sensor is based the Rayleigh scattering of the optical signal, enhanced by grooves applied along the fiber core. The results confirm the validity of this new method of monitoring, especially in the monitoring current concrete and lightweight concrete.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação e enquadramento	1
1.2	Estado de arte	1
1.3	Estrutura da dissertação	2
2	Fundamentos relacionados com a cura do betão	3
2.1	Introdução	3
2.2	Reações de hidratação	3
2.3	Calor de hidratação	4
2.4	Mecanismos de hidratação	6
2.5	Desenvolvimento microestrutural na periferia da partícula de cimento	8
2.6	Água na pasta de cimento hidratado	10
2.7	Resistência do betão	10
3	Fibras óticas de plástico	13
3.1	Introdução	13
3.2	Fundamentos sobre a propagação da luz em fibras óticas	13
3.3	Modos de propagação	15
3.4	Atenuação	16
4	Desenvolvimento do sensor ótico em <i>POF</i>	21
4.1	Introdução	21
4.2	Princípio de funcionamento do sensor	22
4.3	Protótipo: <i>Conbox</i>	24
5	Resultados experimentais	27
5.1	Introdução	27
5.2	Apresentação e interpretação dos resultados experimentais	28
5.3	Influência das condições exteriores nos sinais óticos no interior do betão	37
6	Conclusão e trabalho futuro	43

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e enquadramento

Esta tese de mestrado tem como objetivo principal o desenvolvimento e aplicação de sensores em fibras óticas de plástico para monitorização do processo de cura do betão. Pretende-se com isto, utilizar a tecnologia ótica para avaliar este processo de extrema complexidade, visto que a cura das argamassas e dos betões depende de vários fatores, tais como: tipo de cimento, relação água/cimento, calor libertado durante a hidratação do cimento, entre outros. Muitas estruturas de betão, como edifícios, barragens, pontes, etc. podem ser fortemente afetados também pela pluviosidade, ataques químicos (ambientes salinos) ou por grandes variações temperatura e de humidade relativa do ar.

O processo de cura do betão requer especial atenção, particularmente quando se trata de construções de grande porte, podendo, nestas situações, a monitorização da cura ser um passo imprescindível para o controlo da segurança e qualidade da construção.

A avaliação da cura em estruturas de betão pode ser feita através da medição do calor libertado proveniente das reações de hidratação do cimento. Sabe-se, que esta significativa libertação de calor está correlacionada com o aumento da resistência mecânica do betão ao longo do tempo. Existem, assim, no mercado produtos como o referenciado em [1] para a avaliação do estado de maturação do betão.

Porém, como referido anteriormente, o fenómeno em causa é complexo e de difícil monitorização em obras de grande envergadura. Um bom exemplo deste facto é o famoso caso da barragem de *Hoover* (Estados Unidos da América, 1936), que se estimou um tempo de cura de 200 anos [2].

Assim, nesta dissertação sugere-se o desenvolvimento e a aplicação de um sensor de fibra ótica de plástico (*POF*, do acrónimo em inglês *Plastic Optical Fiber*) como transdutor para a monitorização do processo de cura do betão.

1.2 Estado de arte

Na bibliografia litográfica encontram-se diversos trabalhos direcionados para a monitorização do processo de cura de argamassas com fibras óticas, particularmente, com sensores baseados em redes de *Bragg* gravadas em fibras óticas [3]. Essa aplicação visa a obtenção do tempo de presa e da curva de deformação durante o endurecimento, através da introdução de sensores *FBGs* (do acrónimo em inglês *Fiber Bragg Grating*) num provete de argamassa.

O trabalho desta dissertação é semelhante a trabalhos já então desenvolvidos por outro grupo de investigadores, sendo descritos nas referências [4, 5]. Nesses trabalhos foram embutidas fibras óticas de plástico num elemento de argamassa. Durante o endurecimento da argamassa ocorrem pequenos encurvamentos da fibra, que se traduz na atenuação da intensidade do sinal ótico transmitido ao longo do tempo, possibilitando a avaliação do processo de cura dos materiais. Em outras aplicações reportadas, são utilizadas fibras óticas de plástico encurvadas revestidas com material transparente e sensível

à humidade relativa do ar. Este revestimento permite a obtenção de um filme fino sobre o núcleo da fibra de plástico, cujo índice de refração varia com o teor de humidade [6, 7].

Nos últimos anos, a aplicação de sensores óticos em engenharia civil tem ocorrido particularmente na monitorização de estruturas. Isto deve-se ao desenvolvimento de sensores em fibra ótica de sílica e de plástico, apresentando excelentes características, tais como: dimensões reduzidas, elevada resolução e precisão, elevada capacidade de transmissão dos sinais a longas distâncias e imunes a interferências eletromagnéticas [8, 9].

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos e um apêndice. No primeiro capítulo realiza-se o enquadramento do trabalho, o estado de arte da tecnologia, os objetivos principais do trabalho e, por fim, a estrutura e organização do documento.

O segundo capítulo aborda os fenómenos físico-químicos associado à cura do betão, a explicação do desenvolvimento da microestrutura da partícula de cimento hidratada, as reações de hidratação, entre outros aspetos. No terceiro capítulo apresentam-se os conceitos associados à propagação de sinais óticos nas fibras e os mecanismos responsáveis pela atenuação do sinal ótico.

O sensor ótico desenvolvido nesta dissertação, antes de ser aplicado na monitorização do processo de cura do betão, foi avaliado quanto à sua resposta e à sua sensibilidade ao meio envolvente. Para tal, usou-se uma pasta constituída por areia e água. Estes resultados são expostos no quarto capítulo, onde também é relatado todo o equipamento eletrónico construído para o suporte de aquisição nas operações de monitorização.

Após a realização dos testes referentes à monitorização da cura, os resultados experimentais são apresentados e interpretados no quinto capítulo.

Finalmente, no sexto capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido e as propostas de eventuais trabalhos futuros no seguimento deste novo método de monitorização do processo de cura do betão. Por fim, no apêndice enumeram-se as publicações e comunicações resultantes do trabalho efetuado e apresentam-se as curvas de calibração para os sensores comerciais de temperatura e de humidade.

O trabalho experimental desta dissertação foi desenvolvido numa fase inicial no Instituto de Telecomunicações (Pólo de Aveiro) e no Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Posteriormente, realizou-se no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da mesma instituição.

Capítulo 2

Fundamentos relacionados com a cura do betão

2.1 Introdução

O processo de cura do betão divide-se em duas fases, a fase presa e a fase de endurecimento. Em termos gerais, a presa é conhecida pela perda da consistência da pasta de betão após amassadura. Quando esta pasta deixa de ser trabalhável, apresentando já alguma rigidez, dá-se o fim da fase de presa e o início da fase de endurecimento. Nestas duas etapas, desenvolve-se toda uma complexidade de fenómenos fazendo com que o betão apresente as suas excelentes características e propriedades para aplicações no ramo da engenharia civil, particularmente, na sua associação com o aço designado por betão armado [10].

Neste capítulo são reportados sucintamente alguns aspetos importantes relacionados com a cura do betão, nomeadamente: as reações de hidratação, o calor de hidratação, os mecanismos de hidratação, o desenvolvimento microestrutural na periferia da partícula ou grão de cimento, a água na pasta de cimento hidratada e, para finalizar, as propriedades mecânicas do betão, em particular, a evolução da tensão de rotura do betão em compressão ao longo do período de cura.

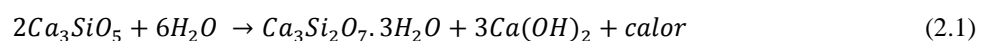
2.2 Reações de hidratação

O cimento é um ligante hidráulico, comercializado sob a forma de partículas com dimensões entre 1 a 90 μm e composto por vários constituintes, sendo os principais: os silicatos tricálcio, os silicatos dicálcio, os aluminatos tricálcio e os ferroaluminatos tetracálcio. Na Tabela 1 são apresentados os principais constituintes do cimento e algumas das abreviaturas convencionais usadas na química do cimento, bem como as concentrações típicas e as suas dimensões [10-13].

Tabela 1 Abreviaturas convencionais usadas na química do cimento para os constituintes do cimento *Portland* comum [11, 13].

Constituintes	Fórmula química	Abreviatura	Concentrações típicas (%)	Dimensões (μm)
Silicato tricálcio	$(\text{CaO})_3\text{SiO}_5$	C_3S	60-70	25-65
Silicato dicálcio	$(\text{CaO})_2\text{SiO}_5$	C_2S	10-20	20-40
Aluminato tricálcio	$(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	5-10	1-60
Ferroaluminato tetracálcio	$(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	3-8	-

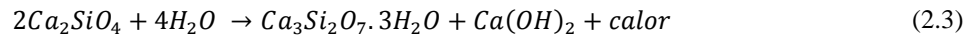
O C_3S é o principal constituinte do cimento, por vezes também designado por alita. No entanto, autores como Coutinho *et al.* (1997) afirmam que a alita é constituída essencialmente por C_3S e por átomos estranhos [10, 14]. A alita ao entrar em contacto com a água produz dois produtos de reação, silicato de cálcio e hidróxido de cálcio também denominado por cal, e em simultâneo, ocorre uma forte libertação de calor segundo a seguinte reação [15, 16]:



Para simplificar a apresentação da reação química anterior são usadas abreviaturas convencionais, reescrevendo-se esta do seguinte modo:



Outro constituinte fortemente ativo é o silicato dicálcio, que em contato com água, resulta também numa reação exotérmica, mas libertando menos quantidade de calor do que a reação anterior:



Usando a nomenclatura convencional, esta reação química reescreve-se da seguinte maneira, tendo também como produtos resultantes o *C-S-H* e o *C-H*:



Refira-se que o *C-S-H* formado não é do mesmo tipo que o que resulta da hidratação do C_3S e a quantidade de *C-H* formado é menor. Apesar das semelhanças entre os constituintes, as atividades químicas são diferentes [17].

A reação do aluminato tricálcio com água origina dois produtos de reação: aluminatos tricálcio hidratados e calor:



Os restantes constituintes apresentados na Tabela 1 também reagem com a água e com o gesso existente no cimento (em quantidades inferiores a 3%) [18]. O gesso tem uma função extremamente importante visto que retarda o processo de presa. Sem o gesso ou sulfato de cálcio (CSO_3H_2), a presa apenas duraria alguns minutos, o que afetaria o manuseamento das argamassas e dos betões [10].

Estas reações de hidratação são bastante duradouras e não se pode identificar o seu fim, apenas identificar quando é atingido um determinado grau de hidratação.

2.3 Calor de hidratação

Em geral, o calor de hidratação surge devido à rotura e formação das ligações químicas, que habitualmente são monitorizadas através de métodos calorimétricos [19].

A geração de calor na massa do betão requer especial atenção quando se trata da betonagem numa única vez e com dimensões das peças superiores a 1 metro, como no caso das construções de barragens [10]. Nos primeiros dias de cura há uma grande libertação de calor, mas com o decorrer do tempo esta libertação atenua-se. Com o arrefecimento da massa de betão surgem gradientes de temperatura no seu interior, afetando a resistência do betão, e eventualmente proporcionando até o aparecimento de fissuras.

Através de ensaios calorimétricos, a cura da pasta de cimento caracteriza-se tipicamente em 5 fases [17-19]:

- Reação inicial – fase I;
- Período de indução – fase II;
- Período de aceleração – fase III;
- Período de desaceleração – fase IV;

- Reação final – fase V.

A reação inicial ocorre logo que o cimento é misturado com a água, surgindo assim uma pronunciada libertação de calor, num período de tempo muito reduzido, sensivelmente 15 minutos devido ao C_3S e ao humedecimento das partículas finas (fase I).

No período de indução ou período dormente assiste-se a uma diminuição acentuada da taxa de libertação de calor, durante algumas horas, devido à desaceleração das reações químicas. A amassadura apresenta-se bastante fluída e a microestrutura da pasta continua em desenvolvimento, porém de uma forma mais lenta (fase II).

A fase III corresponde ao período de aceleração, no qual ocorre a retomada das reações, principalmente devido à precipitação do silicato de cálcio ($C-S-H$) e hidróxido de cálcio ($C-H$), registando-se, assim, um novo pico exotérmico e o início do endurecimento da pasta. Com o decorrer do tempo a taxa de libertação de calor diminui gradualmente (fase IV).

Finalmente, o processo de hidratação da pasta de cimento estabiliza (fase V), passando a libertação de calor a ser mais lenta. Esta fase é conhecida também por fase de controlo de difusão e continua enquanto existir água e partículas anidras.

A Figura 1 ilustra a evolução temporal da taxa de geração de calor da pasta de cimento e as diferentes fases que tipicamente descrevem o processo de cura da pasta de cimento.

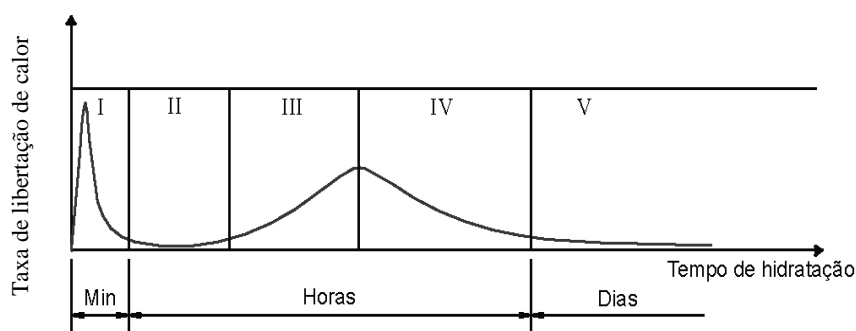


Figura 1 Taxa de libertação de calor durante a cura da pasta de cimento com o decorrer do tempo, adaptado de [12].

No âmbito da investigação do processo de hidratação dos cimentos, os métodos calorimétricos são bastante utilizados, nomeadamente: a calorimetria diferencial de varrimento (*DSC*, do acrónimo inglês *Differential Scanning Calorimetry*) e a calorimetria de condução isotérmica (*ICC*, do acrónimo inglês *Isothermal Conduction Calorimetry*). Os resultados experimentais obtidos com estes métodos corroboram os resultados obtidos a partir de modelos teóricos, nomeadamente, aqueles que assentam nos mecanismos de hidratação, como o *BNGM* (do acrónimo inglês *Boundary Nucleation and Growth Model*) [19].

Existem outras formas de avaliar experimentalmente o processo de hidratação da pasta de cimento, tais como a mediação da quantidade de hidróxidos de cálcio, da variação do peso específico, da variação da quantidade de água quimicamente combinada, e da quantidade de cimento anidro presente, através da análise quantitativa da técnica de difração raios-X (DRX). No entanto, o processo mais utilizado ocorre através da obtenção da evolução da tensão de rotura ao longo do período de cura [10].

2.4 Mecanismos de hidratação

A hidratação da pasta de cimento é alvo de um intenso estudo tanto a nível académico como a nível científico. Os primeiros estudos de índole científico sobre os fenómenos químicos que acompanham os processos de presa, de endurecimento e do desenvolvimento da microestrutura da pasta de cimento, foram desenvolvidos por *W. Michealis* (1867) e *H. Le Chatelier* (1887) [11]. Desde então têm surgido inúmeros trabalhos nesta área, desde modelos teóricos a trabalhos experimentais, existindo atualmente um vasto conhecimento neste campo. Apesar de todo este trabalho desenvolvido ao longo dos anos, os processos de cura das pastas de cimento, das argamassas e dos betões não estão totalmente esclarecidas. Daí o interesse da continuação de muitos trabalhos de investigação direcionados neste campo.

Os mecanismos de hidratação do cimento estão na base do processo de cura de argamassas e betões. Para compreensão destes, é necessário conhecer a estrutura da superfície das partículas de cimento [16, 20].

Após a amassadura, a pasta de cimento formada tende a passar lentamente ao estado sólido. Nesta passagem ocorrem vários fenómenos físico-químicos, tais como: a nucleação, o crescimento, a dissolução, a difusão e a adsorção, entre outros. Todos estes fenómenos poderão ocorrer, de forma paralela, em série, ou mesmo de forma aleatória [21].

A nucleação é uma das etapas fundamentais para a precipitação de cristais e é conhecida por depender das condições de operação, por exemplo, da temperatura. De acordo com a bibliografia, a nucleação pode ser classificada em dois tipos, nucleação homogénea e nucleação heterogénea [22].

Na Natureza, a nucleação heterogénea ocorre com mais frequência, em certos sítios mais favoráveis como a superfície de um sólido e em contornos de grão, quando há contato com uma fase líquida. Quanto à nucleação homogénea é mais simples que a heterogénea e, de acordo com a bibliografia, pode ser envolvida na hidratação da pasta de cimento, visto que a taxa de nucleação homogénea depende fortemente da sobressaturação [21].

No caso do cimento hidratado, ocorre a solidificação ou cristalização de pequenos cristais, com dimensão da ordem de nanómetros. Para definir a sobressaturação ou força motriz (*driving force*) para este tipo de sistemas, com muitos constituintes, é necessário recorrer à definição da variação de potencial químico, [22, 23], para cada constituinte da partícula de cimento entre as fases antigas e recentes num soluto homogéneo, tendo assim [24]:

$$\Delta\mu = \mu_{antiga} - \mu_{recente} = kT \ln(S) \quad (2.6)$$

onde k representa a constante de *Boltzmann*, T a temperatura absoluta e S a taxa de sobressaturação, sendo definida como o quociente entre concentração atual e a concentração em equilíbrio.

A nucleação homogénea ocorre especialmente quando as partículas estão no seio de uma matriz líquida já existente. Estas partículas associam-se formando aglomerados (*clusters*), que por sua vez tendem a tornar-se estáveis quando atingem uma quantidade crítica, que em termos energéticos corresponde a superar a barreira termodinâmica para tal acontecimento. Esta barreira termodinâmica (ΔG^*_{hom}) é definida pela energia livre de *Gibbs* do sistema, $\Delta G(r)$, e considera duas contribuições: a energia livre volumétrica e a energia livre de superfície da interface entre as diferentes fases (sólido-líquido). Para facilitar o cálculo, admite-se ainda que

o *cluster* tem forma esférica e a energia livre de superfície é isotrópica. Desta forma obtêm-se assim o raio crítico do *cluster*, r^* , em vez da quantidade crítica, a partir da seguinte expressão [25]:

$$\Delta G(r) = (4/3)\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma_{SL} \quad (2.7)$$

onde γ_{SL} é a energia da superfície da interface sólido-líquido e ΔG_V corresponde à energia livre de *Gibbs*, dado por:

$$\Delta G_V = \frac{\Delta\mu}{V_M} = \frac{kT \ln(S)}{V_M} \quad (2.8)$$

onde V_M é o volume molar do sólido. Derivando a expressão (2.7) em ordem a r , e igualando esta derivada a zero ($d\Delta G(r)/dr = 0$), obtêm-se o valor r^* do *cluster*:

$$r^* = - \frac{2\gamma_{SL}}{\Delta G_V} \quad (2.9)$$

A barreira energética a alcançar para que haja nucleação homogénea é dada por:

$$\Delta G_{hom}^* = \Delta G(r^*) = \frac{16\pi\gamma_{SL}^3}{3\Delta G_V^2} \quad (2.10)$$

Atingida a energia para ultrapassar a barreira energética, a variação de energia livre (ΔG_{hom}) do sistema tende a diminuir, tanto por dissolução ($r < r^*$) como por crescimento ($r > r^*$), como é possível visualizar na Figura 2. Na situação de $r > r^*$, o *cluster* é designado por núcleo e é energeticamente favorável ao crescimento.

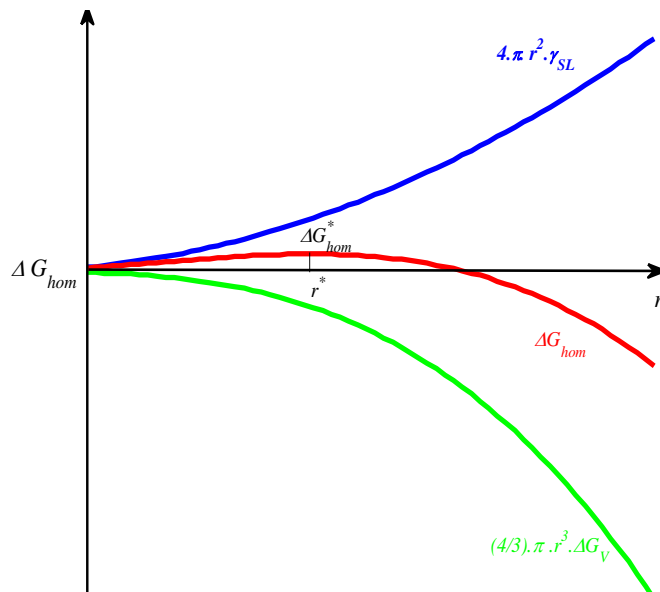


Figura 2 A variação de energia livre (ΔG_{hom}) provocado pelo surgimento do cristal na nova fase, juntamente com as contribuições das energias de superfície e volume.

Posto isto, é possível definir a taxa de nucleação homogénea (J) que corresponde à densidade de núcleos formados por cm^3 e por segundo, sendo dada pela distribuição de *Boltzmann*:

$$J = A \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{kT}\right) \quad (2.11)$$

onde A é o fator pré-exponencial associado à cinética da nucleação. Combinando as equações (2.8), (2.10) e (2.11) é possível escrever a taxa de nucleação homogénea [21, 26]:

$$\ln(J) = \ln(A) - \frac{16\pi\gamma_{SL}^3 V_M^2}{3k^3 T^3 \ln(S)^2} \quad (2.12)$$

Esta equação serve para mostrar a sensibilidade que a taxa de nucleação homogénea tem relativamente à temperatura, à taxa de sobressaturação e à energia de superfície livre da interface sólido-líquido.

Quando a alita entra em contacto com a água, os inúmeros átomos que estão à superfície deste constituinte entram em rotura devido à fraca ligação. Deste modo, originam pontos ativos de nucleação, ocorrendo também deposições dos primeiros silicatos de cálcio hidratados e de iões de Ca^{2+} e OH^- na fase líquida por dissolução ou dissociação. Este processo constitui o ponto de partida para desencadear os mecanismos de hidratação, ou seja, é o inverso do processo de crescimento dos cristais [21].

Como o sistema em causa apresenta várias fases: sólida (constituintes do grão de cimento), coloidal ($C-S-H$) e líquida (água), a difusão dos reagentes tem diferentes fluxos até chegar aos pontos de interesses, mais concretamente aos sítios onde ocorrem as reações químicas. Os produtos resultantes da hidratação ocupam os espaços disponíveis. Espaços estes preenchidos por água rica em iões, fazendo com que haja uma diminuição da porosidade e reduzindo gradualmente o transporte destes na interface sólido-líquido, o que provoca também a diminuição da velocidade das reações.

Nos casos das argamassas e dos betões, a presença de inertes influenciam os fenómenos químicos associados à hidratação. Após a amassadura e a moldação do elemento em betão, os inertes ficam envolvidos por um película constituída por água e por partículas de cimento. Próximo dos inertes, a concentração de água é elevada, mas com o decorrer do tempo tende a diminuir devido às referidas reações químicas. Esta película é rica em iões resultantes da dissolução. Nestas condições ocorre a formação dos primeiros núcleos dos constituintes hidratados do cimento, como por exemplo, o hidróxido de cálcio que após a cristalização designa-se por portlandite. Nesta situação, o crescimento de cristais ocorre num meio pouco sobressaturado quando comparado com o caso da pasta de cimento, em que a sobressaturação é muito mais elevada.

2.5 Desenvolvimento microestrutural na periferia da partícula de cimento

A análise do desenvolvimento microestrutural da partícula de cimento hidratada durante a cura é feita por meios bem conhecidas como, o *SEM* (do acrónimo inglês de *Scanning Eletron Microscope*) e o *AFM* (do acrónimo de inglês *Atomic Force Microscope*) [21]. Na descrição deste tópico, é apenas considerada uma partícula típica ou grão de cimento envolvida em água, como é possível visualizar na Figura 3.

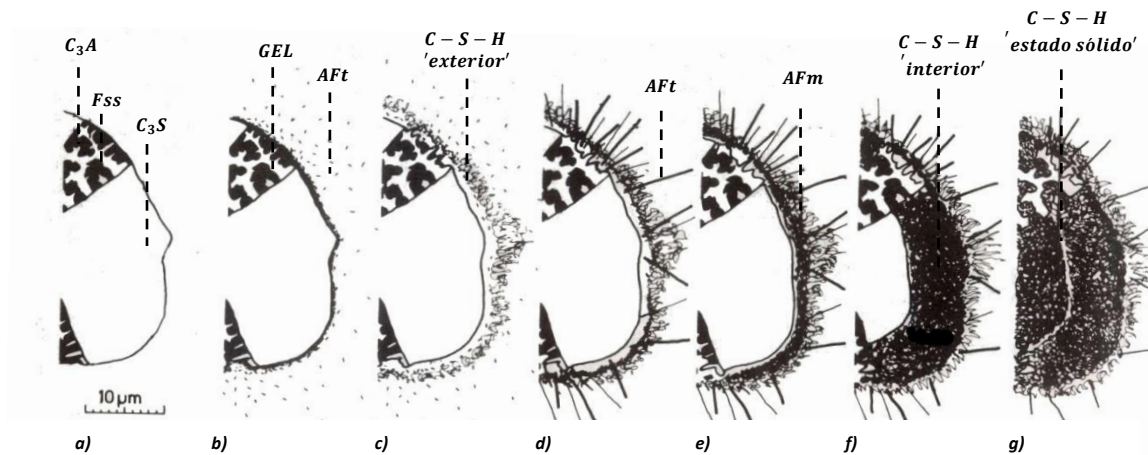


Figura 3 Ilustração do desenvolvimento microestrutural a partir de um grão de cimento durante a sua hidratação adaptado de [21].

Nesta mesma figura são mostrados os vários momentos da hidratação do grão de cimento *Portland*, desde o início, ainda seco *a)*, até ao produto final, que em termos temporais corresponde ao decorrer de alguns anos, *g)*.

No início tem-se apenas o grão de cimento seco com os respetivos constituintes à escala intersticial, *a)*. Após a mistura com a água, o grão fica embebido na mesma, ficando em excelentes condições para desencadear as reações químicas. Deste modo, surge uma membrana sobre a superfície do grão, rica em óxido de alumínio (alumina) e óxido de silício. Nesta situação, o espaçamento entre partículas depende da relação água/cimento. Posteriormente, parte do C_3A reage com o gesso em solução, o que origina cristais curtos na forma de agulha ou barras curtas de etringite ou trissulfato (*AFt*), e o C_3S com a água origina um gel amorfo de *C-S-H* que se deposita na superfície do grão de cimento. Em paralelo, o hidróxido de cálcio (*C-H*) precipita entre os espaços de grão de cimento apresentando no final uma microestrutura com aspeto hexagonal, *b)*.

As reações dos silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) com a água prosseguem, o que origina uma quantidade adicional de gel de *C-S-H* ao então já existente. Esta adição permite aumentar a camada de gel na superfície do grão de cimento e é habitual designa-la por '*C-S-H exterior*', *c)*. Nesta fase já decorreram algumas horas desde o início da hidratação.

Na fase seguinte ocorre uma segunda hidratação dos aluminatos de cálcio (C_3A e C_4AF) produzindo assim agulhas longas de *AFt*, como é visível na Figura 3, *d)*. Neste momento também se inicia a formação de *C-S-H* no interior do grão de cimento, provocando uma redução gradual da mobilidade dos produtos de reação que estão depositados na camada de hidratação originada anteriormente.

Passados alguns dias, assiste-se a uma desaceleração das reações porque ocorrem agora em estado sólido. Desta maneira, há a continuação da formação de '*C-S-H interior*' e a diminuição de espaço livre entre a parte hidratada e anidra. Há também o aparecimento de uma nova fase de aluminato (mono-sulfoaluminato de cálcio hidratado, *AFm*), *f)*. Por último, ao longo dos anos, decorre a formação, essencialmente, de '*C-S-H interior*' até ao '*estado sólido de C-S-H*', *g)*. Estas reações de constituintes não hidratados ocorrem mas de forma mais lenta.

Em suma, a microestrutura do cimento hidratado é constituído por duas fases: sólida e ligante. A fase sólida é composta por *C-S-H*, *C-H*, *AFt*, *AFm*, por grãos de cimento ainda anidros e, provavelmente, por partículas inertes. A fase ligante é essencialmente composta por *C-S-H* sendo este o principal responsável pela coesão entre as diferentes fases sólidas. As forças responsáveis por esta coesão entre fases/cristais são chamadas forças de *van der Waals* [13].

2.6 Água na pasta de cimento hidratado

A água é um elemento importante para a coesão da pasta de cimento assim como para a sua fluidez. Convém esclarecer e sistematizar as formas de como a molécula de água está combinada no interior da pasta de cimento hidratado. Por vezes, esta tarefa torna-se difícil devido à envolvimento de muitos constituintes existentes no pó de cimento.

Quando a água entra em contato com o cimento seco, parte é consumida nas reações químicas, mas nem toda a água tem esse destino. A água que reage com o C_3S origina a formação de *C-S-H*, ficando assim a água ligada a esta microestrutura, sendo designada por *água de hidratação ou de cristalização*. A água que se encontra nas argamassas e nos betões livres de qualquer força, tende a evaporar-se durante o endurecimento e é chamada *água livre*.

A *água capilar* é aquela que ocupa os capilares no interior da pasta, resultado da condensação do vapor de água. A quantidade desta água vai depender da humidade relativa do ar e da dimensão do capilar. O fluxo de entrada e saída nos capilares é constante e está associado à tensão de vapor e à temperatura.

A água designada por *água de constituição*, deve-se à perda da identidade da molécula de água, surgindo grupos hidróxidos, OH^- , como o caso do hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$, produto resultante da hidratação de C_3S .

A *água adsorvida* corresponde a água encontrada na superfície dos constituintes hidratados do cimento, que é atraída pelos inúmeros de átomos que estão também à superfície de tais cristais. A força atrativa entre os átomos e as moléculas de água é conhecida pelas forças de adsorção ou de *van der Waals* [10, 18].

2.7 Resistência do betão

Uma das propriedades importantes na caracterização do betão para aplicação no domínio da engenharia é a sua resistência mecânica, especialmente para a escolha da classe de betão, de modo a permitir o dimensionamento dos elementos estruturais com associação das respetivas armaduras. Por exemplo, a classe B35, indica que a tensão de rotura à compressão deve ser 35 MPa para uma idade do betão de 28 dias.

A avaliação da resistência do betão pode ser feita através da obtenção da tensão de rotura à compressão de provetes cúbicos, normalizados, com arestas de 15 cm. A resistência do betão é conhecida por variar com o aumento do traço.

Nos betões, também os agregados utilizados têm influência na sua resistência. Normalmente, o betão corrente é constituído por cimento *Portland* comum (CEM 32,5 N), areia, água, brita grossa e brita miúda. Contudo, existem outros tipos de betões como o betão leve, onde em vez da brita são usados agregados leves

(como a *LECA*, do acrónimo inglês *Light Expanded Clay Aggregate*, com massa volúmica aparente compreendida entre 300 e 700 kg/m³, inferior à da brita calcária, 1600 kg/m³).

Estes betões leves são usados no espaçamento de lajes de edifícios públicos, servindo também como isoladores térmicos, sonoros e apresentam uma tensão de rotura à compressão naturalmente inferior à do betão corrente.

Os agregados têm grande influência, não só na resistência do betão endurecido, como na hidratação durante o período de cura do betão, afetando os mecanismos de hidratação devido às suas propriedades, nomeadamente: forma, tamanho e rugosidade.

A estimativa da tensão de rotura é feita via experimental, tendo associado tipicamente enorme variabilidade. Estes procedimentos da obtenção da tensão de rotura e do módulo de elasticidade à compressão devem seguir a Norma Portuguesa. Na determinação da tensão de rotura devem-se ensaiar três provetes, entendendo-se como a melhor estimativa a média aritmética dos três valores de tensão de rotura obtidos.

Na ausência de informação sobre a evolução da tensão de rotura do betão com a idade, recorre-se a expressões empíricas que dão o coeficiente de endurecimento para determinar as tensões de rotura em função da idade, como indicado na Tabela 2, valores estes retirados do Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (REBAP).

Tabela 2 Valores de coeficiente de endurecimento para diferentes idades do betão (REBAP).

Idade do betão (dias)	3	7	14	28	90
Coefficiente de endurecimento	0.40	0.65	0.85	1	1.20

Estes valores referem-se ao betão com a mesma composição, mesmo fabrico e curados em condições correntes, e cujo ligante é o cimento *Portland*. Como se verifica na Tabela 2, o coeficiente de endurecimento de referência estabelece-se aos 28 dias de idade.

Capítulo 3

Fibras óticas de plástico

3.1 Introdução

A designação de fibras óticas de plástico é atribuída devido à composição do núcleo ser de polimetilmetacrilato (*PMMA*), e a bainha ser composta também por um polímero designado por metacrilato de fluoroalquilo (*PFAM*). Este tipo de fibra surgiu na década de 1960, sendo reportadas pela *Pilot Chemical of Boston*. Porém o seu grande desenvolvimento foi realizado pela *DuPont*, nos finais dos anos 60, tendo o registo da sua patente sido realizado em 1978 pela *Mitsubishi Rayon*.

Neste capítulo é apresentada, uma descrição das fibras óticas de plástico, nomeadamente a propagação do sinal ótico, as suas características e a comparação com as fibras convencionais de sílica. Serão ainda abordados os fenómenos responsáveis pela atenuação do sinal ótico propagado.

3.2 Fundamentos sobre a propagação da luz em fibras óticas

A velocidade da luz num meio transparente é definida pela razão entre a velocidade da luz no vazio, c , e o índice de refração do meio, n :

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

Nos guias de onda, como as fibras óticas, o confinamento do sinal ótico é garantido pela condição de reflexão interna total e é definido a partir da lei de *Snell*. Para tal, consideram-se dois meios com índices de refração, n_1 e n_2 , sendo que $n_2 < n_1$, como se visualiza na Figura 4.

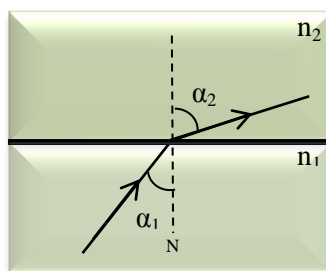


Figura 4 Refração de um feixe ótico na interface entre dois meios distintos.

A lei de *Snell*, escreve-se da seguinte forma,

$$n_1 \sin(\alpha_1) = n_2 \sin(\alpha_2) \quad (3.2)$$

onde α_1 e α_2 são, respetivamente, os ângulos dos sinais incidente e transmitido. A partir desta equação, é possível definir o ângulo crítico ou limite em relação à normal da interface. Deste modo, considera-se que $\alpha_2 = \pi/2$, tendo assim o ângulo crítico, α_c :

$$\alpha_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3.3)$$

Os feixes óticos com uma incidência superior a α_c vão-se propagar ao longo do guia de onda, sendo designados como modos guiados.

Uma das características importantes das fibras óticas é o ângulo de aceitação ou admissão, que corresponde ao ângulo mínimo de entrada do feixe para que seja guiado na fibra, tal como é visualizado na Figura 5. Este ângulo é definido recorrendo novamente à lei de *Snell* e considerando que o índice do meio exterior é n_{ext} :

$$\frac{\sin(\theta_{max})}{\sin(\theta_c)} = \frac{n_{co}}{n_{ext}} \quad (3.4)$$

Os feixes óticos com ângulos de aceitação inferiores a θ_{max} são os que se propagam ao longo da fibra.

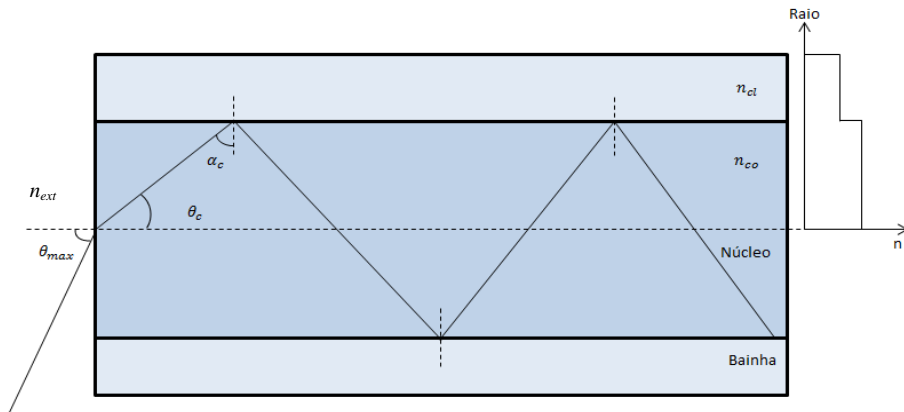


Figura 5 Ilustração da condição de aceitação e propagação de um sinal ótico ao longo de uma fibra ótica com índice em degrau.

A abertura numérica, AN, é uma grandeza física associada à quantidade de luz que pode entrar num sistema ótico, tais como fibras óticas, lentes, etc. Para definir a abertura numérica no caso de fibras óticas, convém reorganizar a equação 3.4 da seguinte forma:

$$\begin{aligned} n_{ext} \sin(\theta_{max}) &= n_{co} \sin(\theta_c) \\ &= n_{co} \cos(\alpha_c) \\ &= n_{co} \sqrt{1 - \sin^2(\alpha_c)} \\ &= n_{co} \sqrt{1 - \left(\frac{n_{cl}}{n_{co}}\right)^2} \\ &= \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \end{aligned}$$

Através da definição de AN e considerando $n_{ext} = 1$, obtém-se:

$$AN = \sin(\theta_{max}) = \frac{\sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}}{n_{ext}} = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (3.5)$$

No caso das fibras óticas de plástico, a abertura numérica varia entre 0,10 e 0,65.

3.3 Modos de propagação

Antes de apresentar os tipos de fibras óticas e as suas aplicações, é necessário descrever o conceito de modo de propagação de uma fibra ótica. Este conceito está associado à teoria eletromagnética aplicada a um guia de onda. Cada modo de propagação é caracterizado por duas componentes perpendiculares entre si: campo elétrico e magnético. Do ponto de vista da ótica geométrica cada modo corresponde a uma trajetória diferente do feixe ótico ao longo do guia de onda.

Os modos de propagação vão depender do material do guia, da geometria e do ângulo de incidência do feixe na fibra. Fisicamente, os modos de propagação são as soluções que satisfazem as equações de *Maxwell* para o caso da fibra ótica. O parâmetro que permite quantificar o número de modos propagados numa fibra, é designado por número *V* ou frequência normalizada:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda_0} a \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (3.6)$$

onde *a* representa o raio do núcleo da fibra e λ_0 é o comprimento de onda do sinal ótico propagado. Esta equação é válida apenas para as fibras com índice em degrau. Estes parâmetros em questão classificam as fibras em dois grupos: monomodo (*SM*, do acrónimo inglês *Single Mode*) ou multimodo (*MM*, do acrónimo inglês *Multi Mode*). Os valores de parâmetro *V* para os quais existe apenas um único modo na fibra ótica são:

$$0 < V < 2,405 \quad (3.7)$$

Nesta situação a fibra é do tipo monomodo. Para valores superiores a 2,405, a fibra designa-se por multimodo. Quando o número *V* é muito elevado, o número de modos propagados (*N*) numa fibra, pode ser aproximado por:

$$N \approx \frac{V^2}{2} \quad (3.8)$$

As fibras utilizadas neste trabalho são do tipo *SI-POF* (*Step Index-POF* com um diâmetro de 1,0 mm e $AN = 0,47$), com um perfil de índice de refração em degrau, ou seja, têm uma variação abrupta de índice na interface núcleo-bainha, e o material do núcleo é *PMMA* (Polimetilmetacrilato).

Na Figura 6 são ilustrados alguns tipos de fibras óticas de plástico existentes no mercado, suas características e algumas aplicações.

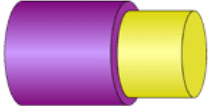
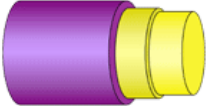
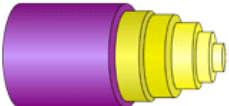



Esquema	Nomenclatura e características
	SI-POF (step index, Ø: 1,0 mm, AN = 0,50): Núcleo homogéneo com revestimento simples.
	DSI-POF (double step index, Ø: 1,0 mm, AN = 0,30): Núcleo homogéneo com dois revestimentos; largura de banda elevada.
	MSI-POF (multi step index, Ø: 0,75 mm, AN = 0,25): Núcleo composto por várias camadas com diferentes índices de refração; largura de banda muito elevada.
	GI-POF (graded index, Ø: 0,9 mm, AN = 0,40): Perfil de índice refração do tipo parabólico; Taxas de transmissão superiores a 2 Gbit/s para um comprimento de 100 metros
	MC-POF (multi core, Ø: 1,0 mm, AN = 0,50): Muitos núcleos com perfil SI, raio de curvatura pequeno (3 mm)
	DSI-MC-POF (multi core, Ø: 1,0 mm, AN = 0,20): Muitos núcleos com duas camadas; largura de banda muito elevada

Figura 6 Tipos de fibras óticas de plástico e suas aplicações, adaptado de [27].

Atualmente, estas fibras são aplicadas em diversas áreas, como sistemas de comunicações de curta distância (*Ethernet, ATM, IEEE 1394b*), na iluminação ambiente (decoração, sinais de trânsito, etc.), nos mostradores (*displays*), também como sensores, etc. A popularidade das *POFs* é devido essencialmente, ao seu fácil manuseamento, baixo custo, boa qualidade, fácil aplicação, alta resistência mecânica e química, flexibilidade e imunidade a interferências eletromagnéticas.

3.4 Atenuação

A atenuação do sinal numa fibra ótica traduz-se pela perda gradual de intensidade do sinal propagado. A variação da potência ótica do sinal é descrito, por:

$$P(z) = P(0)e^{-\alpha z} \quad (3.9)$$

onde α corresponde ao coeficiente de atenuação linear expressa em km^{-1} , $P(0)$ e $P(z)$ são, respetivamente, a potência do sinal ótico de entrada e de saída. É usual expressar a atenuação da fibra em unidades logarítmicas (dB/km), utilizando a relação:

$$\alpha_{ab} = -\frac{10}{z} \log \left(\frac{P(z)}{P(0)} \right) = 4.343 \alpha \quad (3.10)$$

O coeficiente de atenuação corresponde ao somatório de vários fatores de cariz geométricos e estruturais característicos da própria fibra ótica. Estes dividem-se em mecanismos intrínsecos e extrínsecos. Os mecanismos intrínsecos estão divididos em dois grupos: absorção pelo *PMMA* e espalhamento de *Rayleigh*.

A absorção de radiação por parte do *PMMA* está relacionada com os modos de vibração e as transições eletrónicas. O *PMMA* é constituído por cadeias moleculares com ligações simples carbono-hidrogénio, onde ocorre absorção, especialmente na região espectral do infravermelho, que corresponde a uma transição vibracional. Para minimizar esta absorção, são incorporados átomos mais pesados do que o hidrogénio, como o caso do flúor. A probabilidade de ocorrer as transições entre orbitais moleculares não ligante (n) para antiligante (π^*) e ligante (π) para antiligante (π^*) nas ligações duplas carbono-carbono ($>C=C<$) e nos grupos carboxílicos da dita cadeia (Figura 7) é elevada, quando excitado com radiação ultravioleta (UV). Daí, o coeficiente de atenuação ser elevado nesta gama do espectro eletromagnético em relação ao do visível.

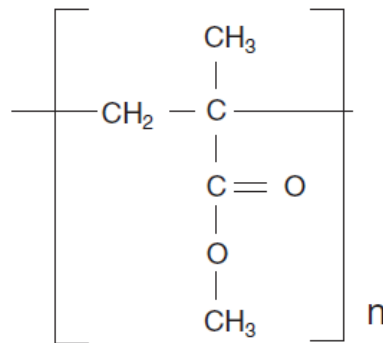


Figura 7 Estrutura química da cadeia molecular do *PMMA* (Polimetilmetacrilato).

O espalhamento de *Rayleigh* é um fenómeno associado aos defeitos do núcleo da fibra, como flutuações do índice de refração, orientação e composição do material. Estes defeitos provocam o espalhamento do sinal ótico em todas as direções. A contribuição do espalhamento de *Rayleigh*, α_s , no coeficiente de atenuação total é expressa da seguinte forma,

$$\alpha_s = 13 \left(\frac{633}{\lambda} \right)^4 \text{ (dB/km)} \quad (3.11)$$

variando inversamente proporcional com a quarta potência do comprimento de onda, λ , do sinal ótico.

Os fatores extrínsecos que provocam atenuação na fibra ótica de plástico dividem-se em três grupos: absorção por impurezas, radiação e dispersão/espalhamento.

Durante o processo de fabrico das fibras óticas de plástico, a contaminação é algo inevitável. Deste modo surgem impurezas nas mesmas, como a presença de iões metálicos de transição, mais frequentemente, cobalto, crómio e ferro. A presença deste tipo de contaminantes provoca maiores perdas por absorção nas regiões do infravermelho e do visível do espectro eletromagnético.

O uso de fibras óticas de plástico em diversas aplicações poderá causar de forma propositada ou não, deformações por encurvamento, tipicamente, designado por macro ou micro curvatura. Na literatura, encontram-se aplicações de sensores óticos em fibras de plástico para monitorização da integridade de estruturas [28, 29], que utilizam este fenómeno como princípio de funcionamento: radiação através do encurvamento da fibra. Quanto menor o raio de curvatura maior será a atenuação do sinal ótico. Quando o encurvamento é da ordem da dimensão do núcleo da fibra, designa-se por macro encurvamento.

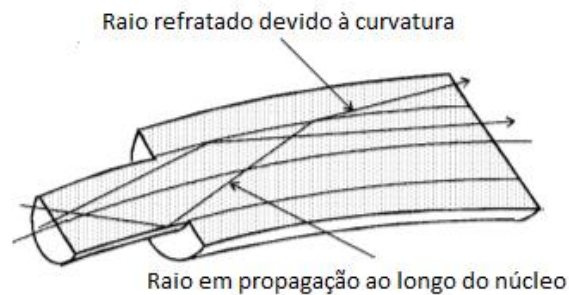


Figura 8 Ilustração das perdas por radiação, adaptado de [30].

A ilustração da perda por radiação é mostrada na Figura 8, onde se visualizam dois raios luminosos, um propagado e outro refratado para a bainha.

A atenuação por dispersão/espalhamento é provocada por micro fraturas, bolhas e outros defeitos de cariz estrutural, surgidas também durante o processo de fabrico.

A Figura 9 mostra o perfil do espectro de atenuação para dois tipos de fibras de plástico de *PMMA* e *PS* (poliestireno), assim como, a contribuição do espalhamento de *Rayleigh* para ambos os casos.

No caso da fibra de *PMMA*, as gamas espectrais de operação onde a atenuação é reduzida situam-se na região do verde, amarelo e vermelho do espectro eletromagnético, designadas por janelas de transmissão. O valor mínimo de atenuação é de 90 dB/km e ocorre para os seguintes comprimentos de onda: 520 nm e 570 nm.

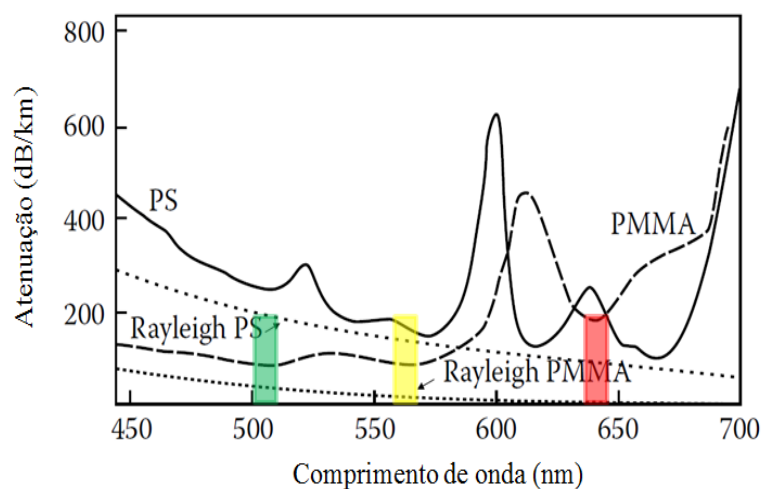


Figura 9 Perfil de atenuação em função do comprimento de onda para fibras de *PMMA* (tracejado) e *PS* (contínuo), com a contribuição de espalhamento de *Rayleigh*, adaptado de [31].

Como referido anteriormente, os vários máximos de atenuação ao longo do espectro eletromagnético estão relacionados com o oscilador harmónico do átomo de hidrogénio, particularmente, com o estiramento da ligação carbono-hidrogénio que é evidenciado na região do infravermelho. Enquanto, na região do visível ocorre os sobretons (*overtons*) dos modos da ligação referida [31].

Apesar das excelentes características das fibras de plástico, o efeito da atenuação é muito superior quando comparado com as fibras convencionais, nomeadamente entre fibras de *PMMA* e de sílica. Daí o desenvolvimento de novas fibras de plástico, através do processo de substituição dos átomos de hidrogénio específicos por deutério (*D-PMMA*) ou por fluor (*PF-POF*), resultando, assim, numa redução considerável do coeficiente de atenuação, como é ilustrado na Figura 10. Com o desenvolvimento, o número de aplicações em fibras óticas de plástico tenderá a aumentar no futuro.

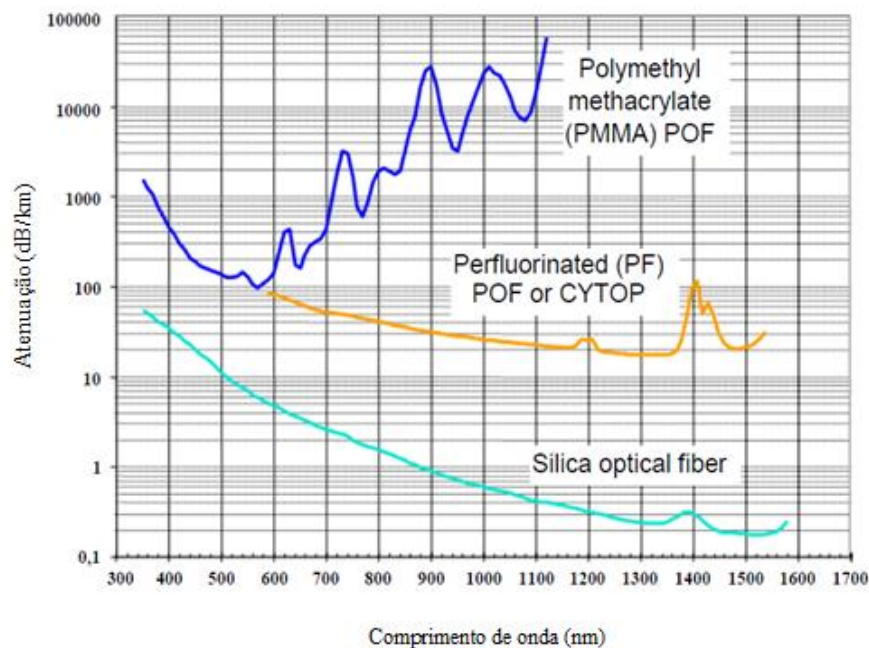


Figura 10 Comparação das perdas entre as fibras de plástico e de sílica, adaptado de [32].

Por fim, são apresentados alguns parâmetros na Tabela 3 referentes a propriedades térmicas do *PMMA* e da sílica. A necessidade de apresentar esta tabela deve-se, principalmente, à natureza exotérmica do processo do betão e das condições exteriores porque, de algum modo, irão afetar as propriedades intrínsecas da fibra.

Uma vez que o coeficiente de expansão térmico linear do *PMMA* é aproximadamente dez vezes superior ao da sílica, a condutividade térmica do material é considerada baixa quando comparada com metais e vidros.

Tabela 3 Propriedades térmicas do *PMMA* [33].

Material	Varição de índice de refração por grau (dn/dT) $10^{-6}/K$	Coefficiente de expansão térmico linear $10^{-6}/K$	Condutividade térmica $W/(m K)$	Difusidade térmica $10^{-6}m^2/s$
PMMA	- 8,50	72,0	0,21	0,13

Capítulo 4

Desenvolvimento do sensor ótico em POF

4.1 Introdução

O capítulo 4 apresentará o princípio de funcionamento do sensor ótico proposto para monitorizar o processo de cura do betão, sendo demonstrado o seu funcionamento através de testes de validade e otimização da resposta. Por último, é feita uma breve descrição sobre o protótipo elaborado para a aquisição dos dados da monitorização, designado por *Conbox*.

A janela de transmissão do espectro eletromagnético escolhida para a monitorização do processo de cura do betão corresponde à gama do verde, tendo sido utilizado um díodo emissor de luz (IF-E93 da *Industrial Fiber Optics*), cujo espectro de emissão do *LED* é apresentado na Figura 11.

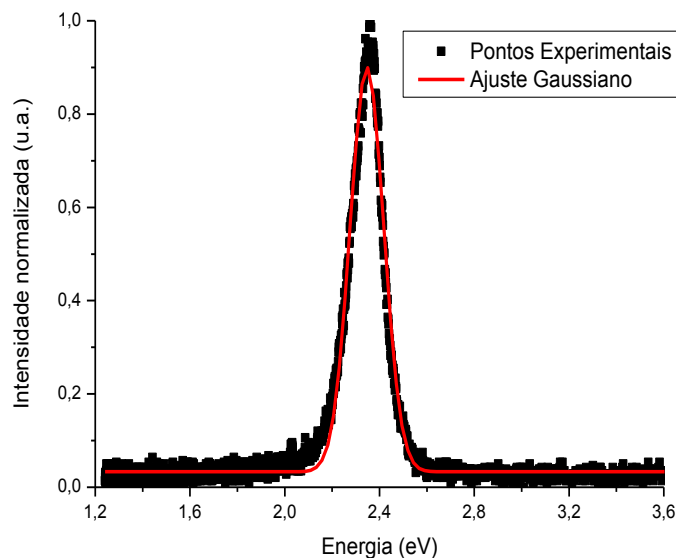


Figura 11 Espectro ótico de emissão do *LED* verde e o ajuste gaussiano efetuado (com média e variância, respetivamente de 2,347 eV e 0,167 eV).

Através do ajuste gaussiano realizado ao espectro de emissão do *LED*, estimou-se um comprimento de onda central de 529,2 nm. Recorrendo à equação 3.11, é possível obter a contribuição do espalhamento de *Rayleigh* no coeficiente de atenuação das fibras com núcleo de *PMMA* para esse comprimento de onda. Obtendo-se, um valor de 27,3 dB/km, que corresponde a aproximadamente 30 % do valor da atenuação total esperada para este comprimento de onda. Este cálculo serve para realçar a contribuição que o espalhamento de *Rayleigh* detém no coeficiente de atenuação para a janela de transmissão em questão.

4.2 Princípio de funcionamento do sensor

A preparação da fibra ótica de plástico consiste em remover a bainha e, posteriormente, introduzir entalhes no núcleo da fibra ao longo da direção de propagação. Os entalhes incrementam o espalhamento de *Rayleigh* do sinal ótico, aumentando a contribuição do sinal ótico desviado para modos não guiados.

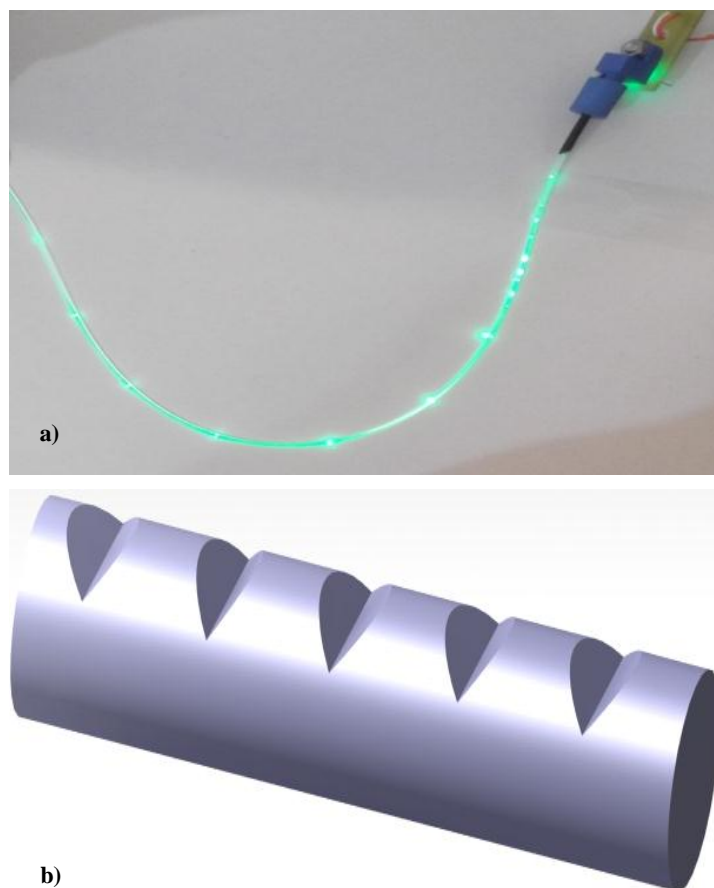


Figura 12 a) Fotografia da fibra com entalhes e b) o detalhe dos entalhes.

Através da Figura 12 a) é possível visualizar o sinal ótico desviado para os modos não guiados pelos entalhes, implicando, assim, a perda adicional da intensidade do sinal ótico.

De forma a avaliar o sensor ótico baseado neste princípio de funcionamento, procedeu-se a vários testes que consistiram em efetuar entalhes na fibra (do núcleo despido da bainha) e medir a intensidade ótica do sinal transmitido ao longo desse processo.

A Figura 13 mostra a intensidade ótica obtida à saída de uma fibra com 1,0 metro de comprimento em função do número de entalhes com um espaçamento de 5,0 cm. Estimou-se um valor para atenuação média, por entalhe, de 0,23 dB.

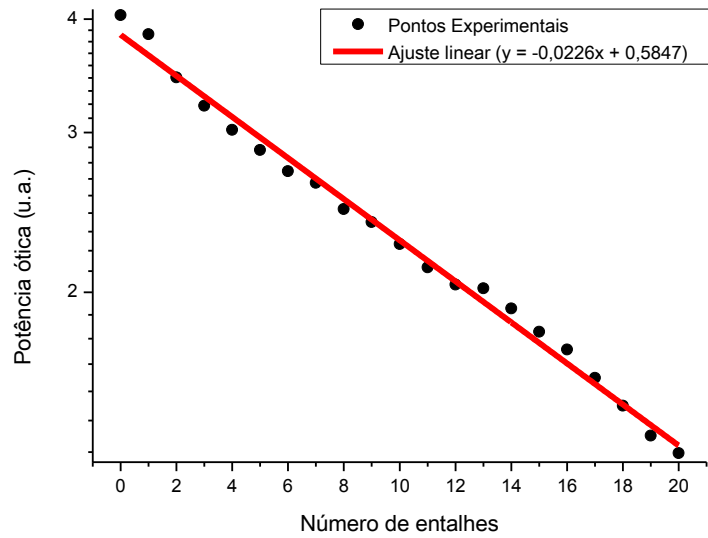


Figura 13 Potência ótica à saída de uma fibra com 1,0 metro de comprimento em função do número de entalhes. Os pontos são dos dados experimentais e a reta é o ajuste linear ($r^2 = 0,9919$).

Noutra situação, considerou-se um elevado número de entalhes para um comprimento de 1,0 metro, com um espaçamento entre eles de 2,7 cm, sendo notória, uma resposta não-linear da potência à saída em função do número de entalhes, como mostra a Figura 14.

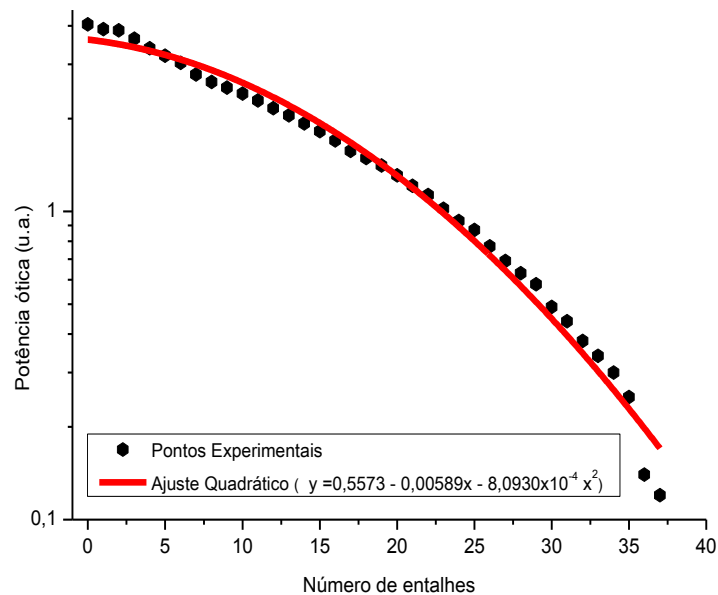


Figura 14 Potência ótica à saída de uma fibra com 1,0 metro de comprimento em função do número de entalhes. Os pontos são dos dados experimentais e a curva é o ajuste quadrático ($r^2 = 0,98543$).

Este comportamento não linear foi descrito através de uma função polinomial de segundo grau (também mostrado na Figura 14).

Como tal, verificou-se que o número de entalhes é um parâmetro fundamental na resposta deste tipo de sensores. Para determinar a resposta do sensor na presença de água, a fibra foi colocada aleatoriamente dentro de um recipiente com areia seca, observando-se a evolução da intensidade ótica em função da adição de pequenas quantidades de água. Neste teste utilizou-se 2,22 kg de areia seca e um sensor com 20 entalhes igualmente espaçados ao longo de uma fibra com um comprimento de 1,0 metro.

Como o sensor foi embutido na areia seca, registou-se assim uma intensidade ótica de 1,37 u.a. Posteriormente, foi adicionada água em patamares de 50,0 ml até se obter uma situação de saturação, com intensidade ótica de 2,02 u.a. Na presença de areia seca, o sinal ótico espalhado perde-se por reflexão difusa. Por outro lado, na presença de água, parte do sinal ótico é reencaminhado para o interior da fibra, resultando assim num aumento da intensidade como se visualiza na Figura 15.

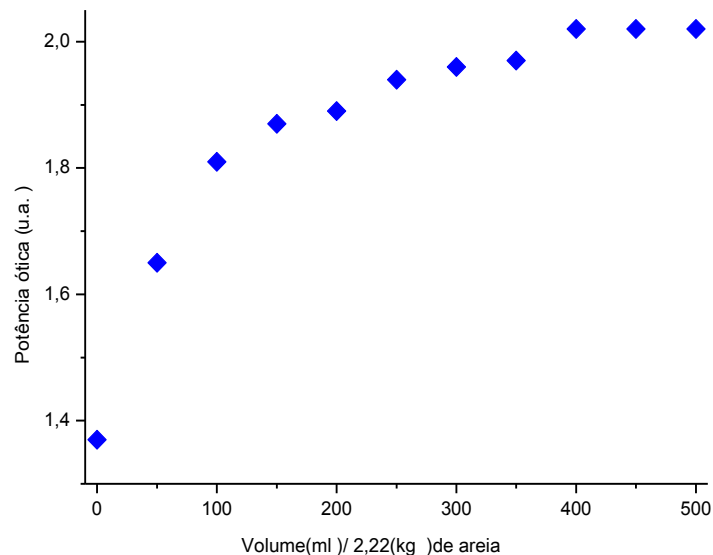


Figura 15 Evolução da potência ótica em função do rácio água-areia.

Este teste da areia realçou a sensibilidade do sensor ao meio exterior, perspetivando a sua aplicabilidade na monitorização da presença de água.

4.3 Protótipo: *Conbox*

Uma das etapas desta dissertação foi construir um protótipo do tipo funcional, com capacidade para ler e gravar a informação proveniente da monitorização da cura do betão, sendo designado por *Conbox*.

O protótipo recebe informação de dois sensores óticos, dois sensores de temperatura e um sensor de humidade. Sendo que os dois sensores óticos e um sensor de temperatura estão embutidos no betão, os restantes estão no exterior, permitindo obter a temperatura ambiente e a humidade relativa do ar.

A *Conbox* está dividida em dois blocos, um bloco é responsável pela gravação da informação, sendo este um dispositivo designado por *Logomatic V1.0* (da *Spark Fun ELECTRONICS*), usando 5 entradas das 10 disponíveis.

O *Logomatic V1.0* é um *ADC (Analog-to-Digital Converter)*, com uma gama de leitura de [0,0-3,3] V, com 10 *bits*, resultando numa resolução de 3,2 mV. A alimentação elétrica é de 5,0 V e permite a gravação dos dados num cartão de memória *SD (ScanDisk)*.

Como o sensor de humidade utilizado (*HH-4000 Series, Honeywell*) tem uma gama de sinal de saída referenciada de [0,0-4,0] V, existe então a necessidade de recorrer a um divisor de tensão para permitir a sua ligação ao *ADC*. O mesmo acontece para os sensores de temperatura, que são termístores de 10 k Ω (da *Keystone* e da *RS Components*) do tipo *NTC (Negative Temperature Coefficient)*.

Para os sensores óticos foram utilizados *LEDs verde (IF-E93, Industrial Fiber Optics)* e como recetores são utilizados fotodíodos (*IF-D91, Industrial Fiber Optics*) tendo uma responsividade aproximadamente 0,25 A/W para o comprimento de onda de 529,2 nm. Como a amplitude do sinal elétrico proveniente dos fotodíodos é reduzida, foi necessário recorrer a um amplificador operacional (*MCP6566 da Microchip Technology*) em que a amplitude do sinal de saída é controlada por um ganho variável.

Outra restrição existente é a taxa de aquisição, visto que o *Logomatic V1.0* tem taxas de aquisição pré-definidas e na melhor das situações, optou-se por uma taxa de 10 Hz, o que no final de 28 dias de teste resulta numa grande quantidade de dados. Por forma a contornar esta situação, fez-se uma rotina em C para amostrar os dados, efetuando o cálculo da média móvel e converte-los para as respetivas grandezas físicas. A interface desta rotina está apresentada em apêndice (Figura 39).

O passo final foi a calibração da *Conbox*, nomeadamente dos sensores de temperatura e de humidade. Os detalhes do processo de calibração estão descritos em apêndice.

Na *Conbox* também foi incorporada uma bateria recarregável de 9,0 V, precavendo-se eventuais cortes de corrente elétrica. Na Figura 16 mostra-se uma fotografia da *Conbox* em funcionamento, com as fibras óticas de plástico incorporadas no provete de betão. Todo este sistema é alimentado com 12,0 V através de um transformador ligado à rede elétrica.



Figura 16 Protótipo de aquisição em funcionamento, *Conbox*.

Capítulo 5

Resultados experimentais

5.1 Introdução

Neste capítulo será realizado a apresentação e interpretação dos resultados experimentais e o estudo da influência das condições exteriores nos sinais óticos no interior do betão.

Os resultados experimentais foram conseguidos através de diversos ensaios, nos quais são utilizados sensores óticos embutidos em provetes de betão. Os sensores têm o mesmo comprimento de fibra (1,0 metro) com diferentes números de entalhes (6, 11, 15 e 20) igualmente espaçados. Para complementar o estudo, estes ensaios foram executados em diferentes condições ambientais. Para finalizar, avaliou-se a maturação de outro tipo de betão, nomeadamente betão com agregado leve. A descrição do procedimento experimental está sistematizada na Tabela 4.

Tabela 4 Descrição do procedimento experimental realizado na dissertação.

Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Amostra teste: betão corrente.	Amostra teste: betão corrente.	Amostras testes: -betão leve; -betão corrente.
Sensores óticos: -6 (entalhe/m) (sensor A); -11 (entalhe/m) (sensor B).	Sensores óticos: -15 (entalhe/m) (sensor C); -20 (entalhe/m) (sensor D).	Sensor ótico: -15 (entalhe/m) sensor C.
Condições de cura: Pouco hostil.	Condições de cura: Pouco hostil.	Condições de cura: Muito hostil.

Durante os ensaios, mediu-se a temperatura ambiente e a temperatura no interior do betão, a humidade relativa do ar e a tensão de rotura à compressão ao longo do período de cura. Esta última grandeza foi obtida de acordo com as normas vigentes, ou seja, a tensão de rotura à compressão é estimada como a média de três testes consecutivos realizados no terceiro, sétimo, décimo-quarto e vigésimo-oitavo dia após a produção de betão, utilizando uma máquina de teste de compressão (*FORM+TEST*, tipo *BETA 2-3000 D*) com velocidades de carregamento entre 0,40 e 0,80 MPa/s.

Dada a resistência mecânica do betão endurecido, o sensor de temperatura embutido no provete, foi previamente protegido por uma cauda de argamassa curada (para o ensaio 1 e 3) e por uma envoltória metálica no ensaio 2 (Figura 17) evitando desta forma a deformação/destruição deste sensor.

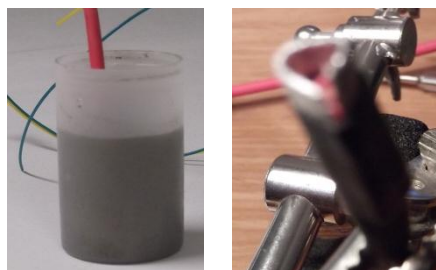


Figura 17 Fotografias das proteções utilizadas com o sensor de temperatura no seu interior.

5.2 Apresentação e interpretação dos resultados experimentais

No ensaio 1 foi usado betão corrente com a seguinte composição: 42,25 kg de areia, 29,90 kg de brita calcária grossa (do tipo 12/25) e 16,90 kg de brita calcária miúda (do tipo 8/12), 16,90 kg de cimento *Portland II* 32,5 e 8190 ml de água, perfazendo assim um rácio de água-cimento de aproximadamente 0,48. Após amassadura, esta massa de betão é vazada para treze moldes metálicos normalizados do tipo cúbico, com dimensões 150 x 150 x 150 mm³. Posteriormente foram vibrados, com o objetivo de reduzir os espaços vazios no interior do provete de betão.

Num destes provetes foram incorporados os respetivos sensores, enquanto os restantes provetes são expostos nas mesmas condições de cura que o provete monitorizado, servindo para a obtenção da tensão de rotura à compressão.

Os sensores óticos utilizados no ensaio 1 têm 6 e 11 entalhes distribuídos ao longo de uma fibra com comprimento de 1,0 metro. O outro sensor incorporado no provete é o sensor eletrónico de temperatura.

A Figura 18 apresenta os resultados experimentais deste primeiro ensaio que durou 30 dias. Nesta é possível visualizar as evoluções temporais da potência dos sinais óticos, das temperaturas no interior e no exterior do provete de betão, da humidade relativa do ar e das tensões de rotura por compressão.

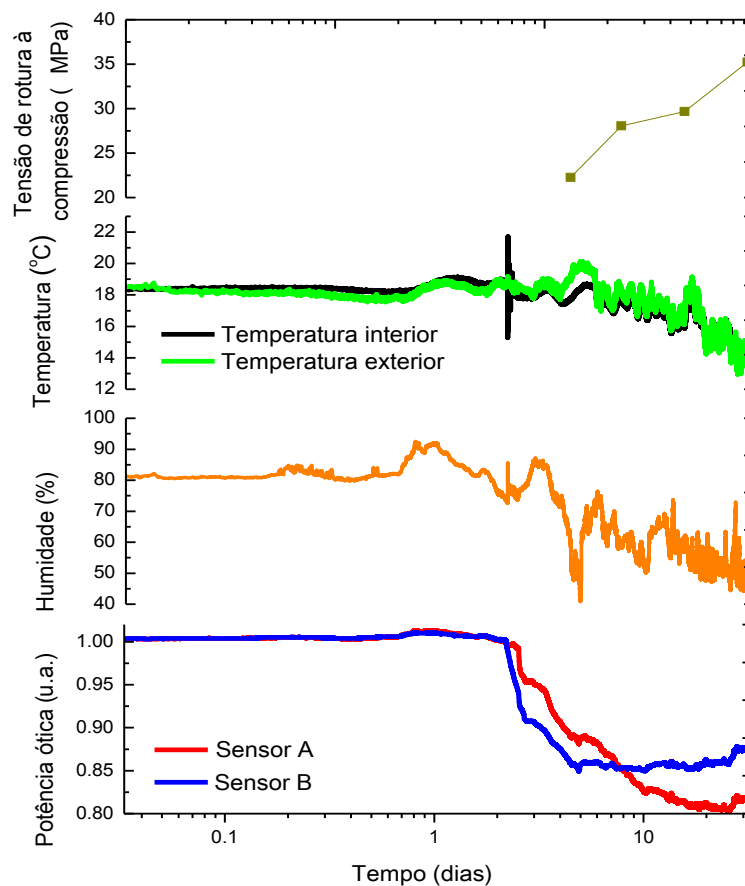


Figura 18 Representação das evoluções temporais das potências óticas (caso A e B), da humidade relativa do ar, da temperatura e da tensão de rotura à compressão.

Através dos resultados experimentais deste primeiro ensaio, é possível relacionar o estado de maturação do betão durante o período de cura, com a informação obtida deste novo método de monitorização. Desde já, salienta-se o perfil das potências óticas com o decorrer do tempo, ou seja, a diminuição da potência ótica imposta pelo endurecimento do betão.

A Figura 19 mostra um provável cenário de interação do núcleo da fibra com entalhes e a pasta de betão, em particular a reação da alita com a água, onde se assiste ao crescimento e à nucleação de *C-S-H*, ocorrendo assim a densificação de espaços preenchidos inicialmente por água. O mesmo acontece nos entalhes do núcleo da fibra de plástico.

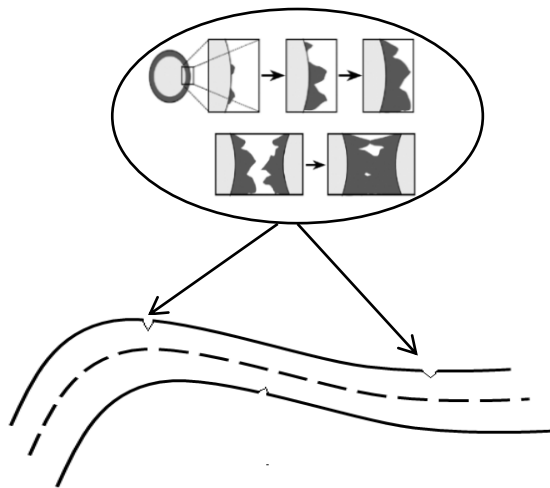


Figura 19 Interação do núcleo da fibra de plástico com a pasta de betão à microescala [14].

Tal como citado anteriormente, a fase inicial é conhecida pelo estado semilíquido ou fluido da pasta de betão. Neste curto período de tempo, desencadeiam-se as reações de hidratação e ao mesmo tempo a libertação de calor proveniente destas. Estes fatores fazem com que a potência ótica transmitida seja constante com o decorrer do tempo, sensivelmente, até ao segundo dia de idade do betão. De seguida, a intensidade do sinal ótico diminui de forma acentuada, principalmente no sensor A e, tendo o provete uma tensão de rotura à compressão de 22,26 MPa para o terceiro dia de idade do betão.

Em particular, a partir do quinto dia de idade do betão, o sensor A deixa de avaliar o estado de maturação do betão, apresentando uma resposta constante ao longo do tempo e com uma intensidade ótica transmitida, aproximadamente, de 15 % do valor inicial.

Quanto ao sensor B, a potência ótica tende a diminuir devido ao espalhamento do sinal ótico nos entalhes da fibra. Neste momento, o teor de água no interior do provete de betão é baixo quando comparado à quantidade de água inicial. Tal facto deve-se, essencialmente, ao consumo de água nas reações químicas, da emigração para a superfície e pela evaporação, fazendo assim com que o espalhamento do sinal ótico seja ainda mais acentuado. Este consumo de água traduz-se num aumento considerável da resistência do provete. Para os últimos 20 dias de cura, o provete encontra-se num estado sólido ou rígido avançado, pressupondo-se que a pouca água ainda então existente no interior do provete, dependa das condições exteriores, nomeadamente, da temperatura ambiente e da humidade relativa do ar.

Neste ensaio, a potência ótica do sensor B tende a estabilizar, acabando por atingir um valor de 20 % em relação à potência ótica correspondente ao início da cura.

As semelhanças evidentes nos sinais dos 2 sensores são as perturbações sofridas pelas condições exteriores. Estas perturbações são conhecidas por influenciar significativamente o processo de cura, aspeto este que será abordado com mais detalhe no tópico 5.3.

Com este primeiro ensaio fica claro a importância do número de entalhes na resposta e na sensibilidade do sensor face ao processo de cura do betão. Devido a isto, o segundo ensaio continuará na mesma linha, com a mesma composição de betão utilizado no ensaio 1 mas utilizaram diferentes sensores óticos: sensor C e D.

O aumento do número de entalhes impõe um maior contacto com o meio envolvente, o que por sua vez, poderá reverter numa maior perda da potência do sinal ótico.

A descrição feita para o segundo ensaio é muito similar ao primeiro ensaio, tendo algumas diferenças particularmente no perfil da potência ótica do sinal.

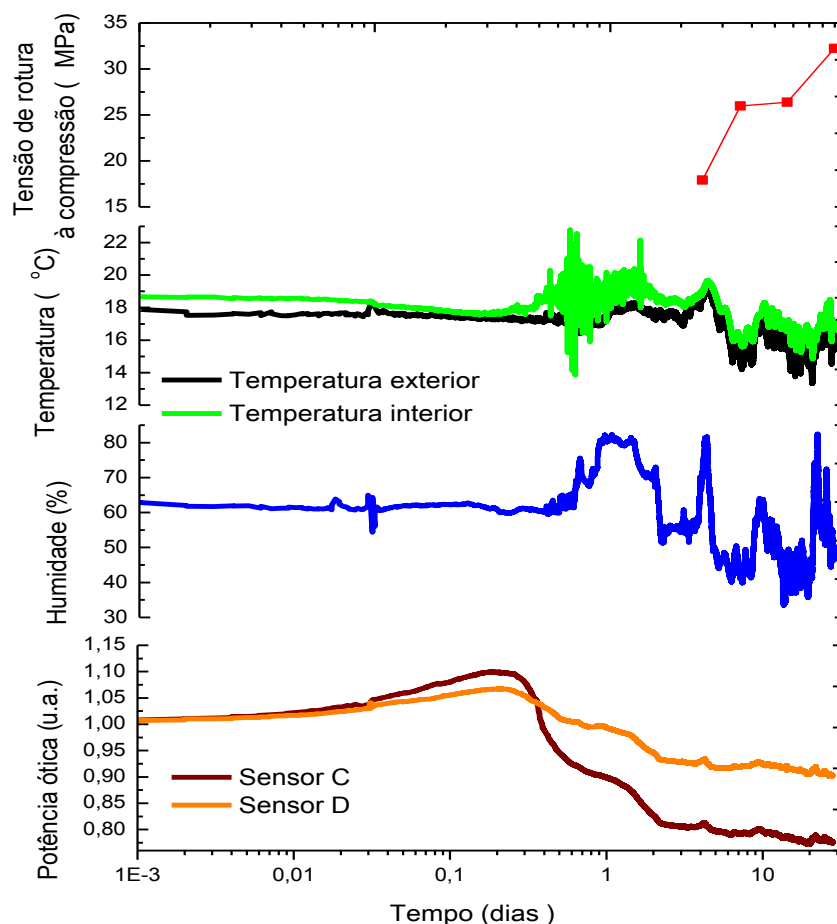


Figura 20 Representação da evolução temporal da potência ótica (sensor C e D), da humidade relativa do ar, da temperatura e da tensão de rotura à compressão com o decorrer do tempo.

Nas primeiras horas, a potência do sinal ótico tende a aumentar, sensivelmente, até à quinta hora, induzido pelo preenchimento dos entalhes com água e, de seguida, pela geração de calor libertada proveniente das reações de hidratação, fazendo com que as fibras dilatem e os entalhes tendam a fechar

parcialmente. Após estas ocorrências, o calor é responsável pela deformação mecânica da fibra, o que provoca uma diminuição da intensidade do sinal ótico transmitido em ambos os sensores.

Com o decorrer do tempo, os sinais continuam a diminuir provocado pelo desaparecimento da água no interior do provete, fazendo aumentar o espalhamento do sinal ótico nos entalhes. Em simultâneo, a resistência do provete aumenta, registando 17,9 MPa de tensão de rotura por compressão para o terceiro dia de idade do betão.

Para os últimos 26 dias a intensidade do sinal ótico diminui lentamente em ambos casos. No global, ao fim de 28 dias, os sensores C e D tiveram uma intensidade transmitida de respetivamente 9,5 % e 22,0% em relação à intensidade inicial, enquanto o provete atinge o máximo de tensão de rotura à compressão de 32,0 MPa.

Apresentados e conhecidos os sensores óticos propostos para avaliar este complexo fenómeno, convém seleccionar o melhor candidato para dar continuação ao trabalho desta dissertação. Com este objetivo comparou-se a resposta dos sensores (Figura 21). Esta comparação é válida porque as condições de cura e as amostras são consideradas similares.

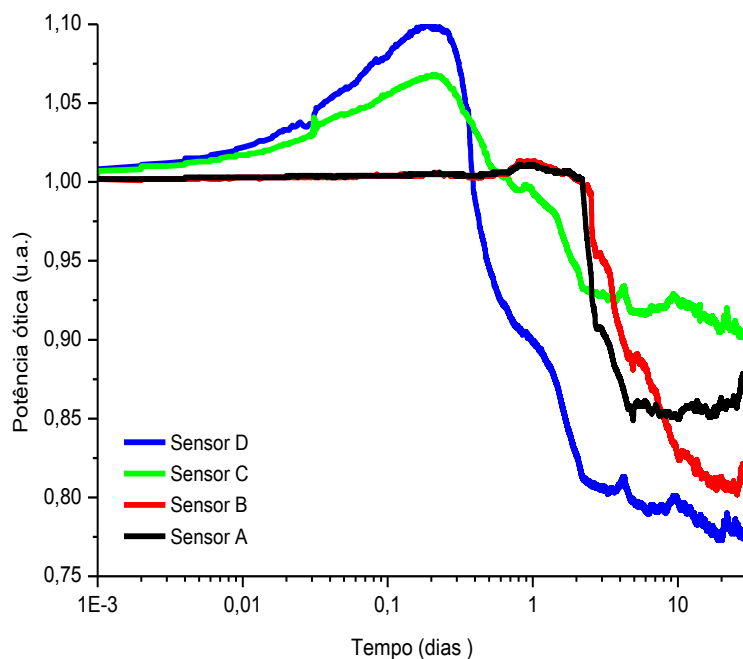


Figura 21 Representação evolução temporal da potência ótica proveniente de vários sensores.

Os sensores do ensaio 2 são mais sensíveis à quantidade de água inicial existente no provete de betão e ao calor gerado, registando assim um máximo de intensidade. Enquanto os outros dois sensores apresentam-se constantes para o mesmo período de tempo (as primeiras 5 horas após amassadura). Outra disparidade salientada é entre a potência ótica após o segundo dia de idade do betão entre o ensaio 1 e 2. Nos sensores do primeiro ensaio, a potência é ainda máxima, o mesmo não sucede para os sensores do segundo ensaio. O

sensor que melhor avalia a maturação do betão é o sensor D. No entanto, foi utilizado o sensor C para prosseguir com as atividades experimentais.

Para modelar os gráficos dos sinais óticos provenientes da maturação do betão, é sugerido então o uso da função logística:

$$P(t) = \frac{A}{1 + \left(\frac{t}{t_0}\right)^p} \quad (5.1)$$

onde $P(t)$ é a potência medida no instante t , A é a variação da potência transmitida, p é o parâmetro de ajuste responsável pelo evolução da grandeza em causa com o decorrer do tempo e t_0 é o tempo que corresponde ao decaimento da potência inicial.

A aplicação deste modelo matemático é possível porque numa fase inicial a intensidade ótica apresenta um comportamento bastante semelhante ao decréscimo na forma exponencial, posteriormente, as perdas por maturação tendem a estabilizar. Na Figura 22 e 23 são representados os ajustes logísticos aos dados experimentais para todos os sensores óticos.

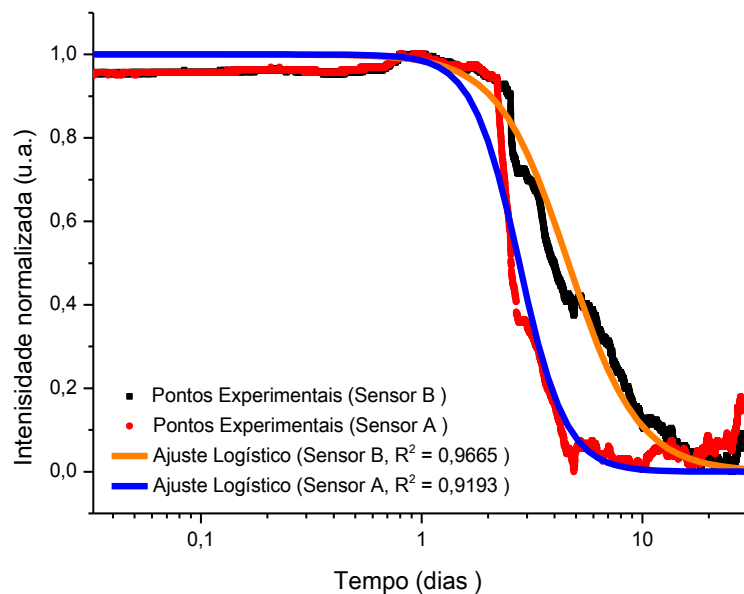


Figura 22 Representação da evolução temporal da potência ótica do sensor A ($p=2,709$, $t_0=4,623$ e $A=1,000$) e do sensor B ($p=4,114$, $t_0=2,769$ e $A=1,000$) e os respetivos ajustes logísticos.

Este tipo de ajuste permite obter a evolução do sinal ótico espectável para o período de cura baseado nos resultados experimentais.

Para os outros dois sensores (B e D) os sinais óticos apresentam diferenças, principalmente nas primeiras horas, onde se verifica um máximo da intensidade ótica não reprodutível pela função logística. Por este facto, desprezam-se as primeiras horas após amassadura para modelar os dados referentes a estes sensores.

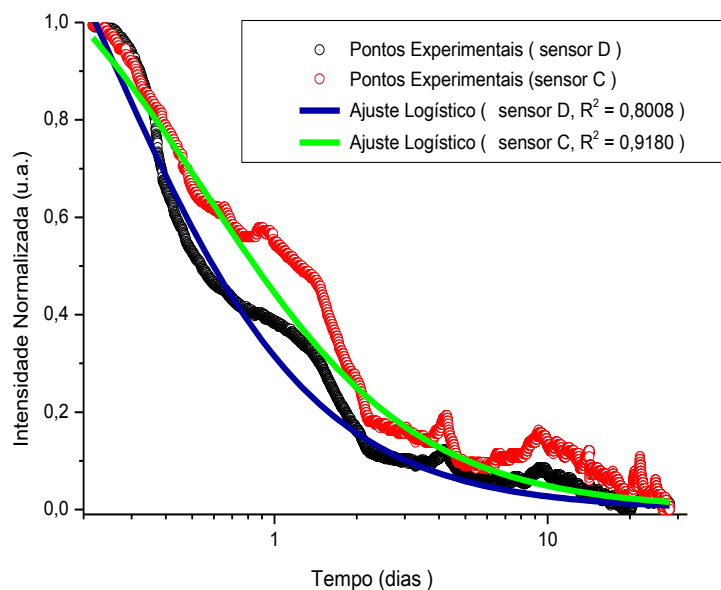


Figura 23 Representação da evolução temporal da potência ótica do sensor C ($p=1,209$, $t_0=0,734$ e $A=1,209$) e do sensor D ($p=1,125$, $t_0=0,560$ e $A=1,301$) e os respetivos ajustes logísticos.

A partir do segundo dia de cura a intensidade do sinal ótico transmitido dos sensores C e D tende a diminuir lentamente, tal como prevê a função logística.

De acordo com a bibliografia, as propriedades dos inertes/agregados influenciam a resistência, o calor específico e a condutividade térmica do betão endurecido. No entanto, no âmbito desta dissertação, a questão central foi avaliar o processo de hidratação. Sabendo as diferenças entre agregado comum (brita) e leve procedeu-se então ao terceiro ensaio, onde foram monitorizados, em paralelo, dois tipos diferentes de betão: betão corrente e betão leve. O betão corrente produzido tem a mesma composição que nos ensaios anteriores, enquanto o betão leve, em vez da brita calcária, é utilizado LECA do tipo M (granulometria entre 4,0 e 12,5 mm), com uma massa de 13,19 kg e a mesma relação água/cimento que a amostra do betão corrente. Aproveitou-se também este ensaio para expor estas amostras em condições ambientais mais adversas. Os sensores óticos utilizados foram semelhantes ao do sensor C (15 entalhes aplicados numa fibra com 1,0 metro de comprimento).

Durante e após a amassadura do betão leve, o agregado fica embebido em água e partículas de cimento. Devido à porosidade do agregado, a água tende a deslocar-se para o seu interior por efeito de capilaridade, onde a relação água/cimento é superior relativamente ao exterior do agregado. Desta forma, o agregado em questão influencia de algum modo o processo de hidratação. Os poros do agregado leve retêm a água fazendo com que a hidratação seja duradoura ao longo do período de cura, como esquematizado na Figura 24. Enquanto o agregado comum, durante a presa, fica envolvido numa película de água que está em contacto com as partículas de cimento.

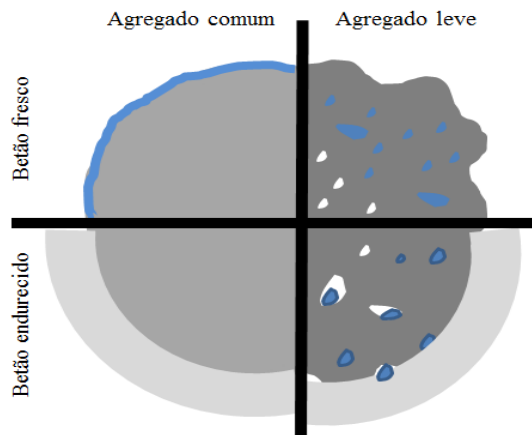


Figura 24 Ilustração do processo de hidratação do agregado leve e comum em betão, adaptado de [34].

Os resultados experimentais do ensaio 3 estão representados na Figura 25.

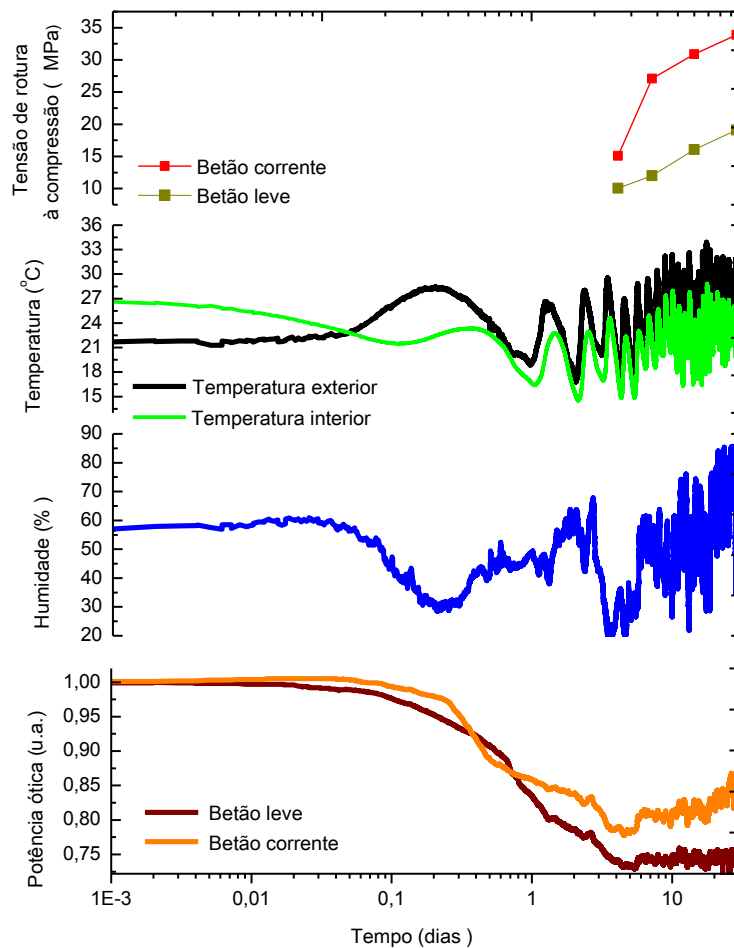


Figura 25 Representação da evolução temporal da potência ótica, da humidade relativa do ar, da temperatura e da tensão de rotura à compressão.

Nesta figura, é possível visualizar as diferenças na evolução dos sinais óticos, nas tensões de rotura à compressão e a influência das condições ambientais nos sinais óticos no interior do betão, principalmente a partir do terceiro dia de idade do betão. Tal como se esperaria, as tensões de rotura do betão corrente são superiores à do betão leve.

No caso do betão corrente, o resultado obtido é o esperado, tendo em conta os ensaios anteriores. Para o betão leve, o sinal ótico é similar ao sinal proveniente do betão corrente, apresentando algumas diferenças notórias até ao segundo dia de idade do betão, como ilustrado na Figura 26.

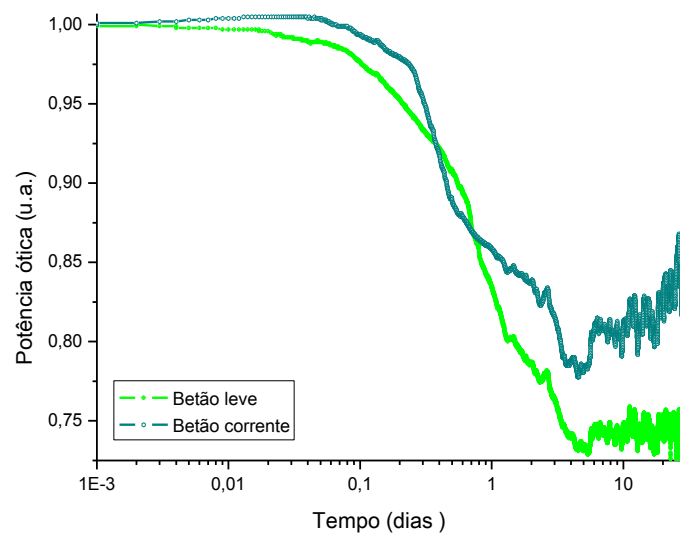


Figura 26 Representação da evolução temporal da potência ótica do betão corrente e do betão leve.

Sabendo que o processo de hidratação é diferente em ambos os casos, no betão leve é mais demorado em relação à do betão corrente, daí as evoluções das duas intensidades óticas transmitidas apresentarem diferentes declives com o decorrer do tempo.

A Figura 27 mostra uma fotografia de provetes cúbicos de betão leve e betão corrente ensaiados ao terceiro dia de idade sendo notória a diferença de cor entre o betão leve e o betão corrente. O betão leve apresenta-se mais escuro (mais húmido) do que o betão corrente. Para melhor realçar este facto, é também comparado com um provete de betão leve já curado, posicionado na fotografia em baixo no lado direito.



Figura 27 Fotografia de provetes de betão corrente (em cima) e de betão leve (em baixo) ensaiados à compressão para o terceiro dia de idade. O provete do lado direito em baixo é um provete de betão leve já curado.

De acordo com a bibliografia [35, 36], no caso do betão leve estamos perante o fenómeno designado por cura interna do betão.

A cura interna permite reduzir a permeabilidade, aumentar a durabilidade, uma retração controlada o que minimiza o aparecimento de fissuras por secagem e, especialmente o prolongamento da hidratação, tal como reportado anteriormente.

Com este ensaio experimental ficou patente a capacidade destes sensores óticos na avaliação contínua do estado de maturação do betão. Durante a cura do betão leve, o agregado em causa tende a reter/absorver água, ficando parcialmente inacessível ao processo de hidratação e ao contato físico com o sensor ótico, por isso, a intensidade do sinal ótico no final da cura do betão leve é inferior ao do betão corrente.

Quanto à água proveniente da humidade relativa do ar, esta penetra na superfície do betão leve e é também aprisionada pelo agregado. O mesmo não acontece no caso do betão corrente, em que a água fica disponível para hidratar os poucos constituintes ainda anidros e em particular interagir com a fibra ótica.

Após este trabalho experimental, verificou-se que a amplitude da variação da intensidade do sinal ótico ao longo do tempo aumenta com o número de entalhes. Esta variação corresponde à diferença entre o máximo e o mínimo desta grandeza que está exposta na Figura 28.

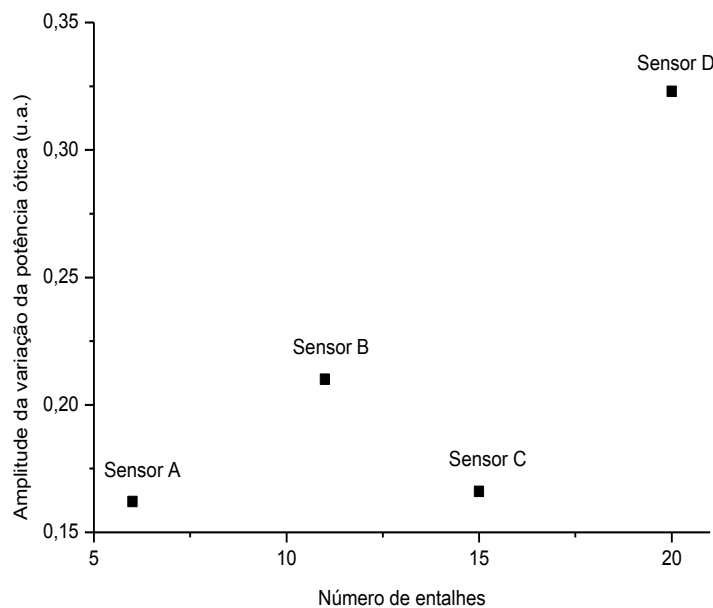


Figura 28 Amplitude da variação da potência ótica ao longo da cura em função do número de entalhes.

Estes sensores desenvolvidos na dissertação mostram-se habilitados para a monitorização do processo de cura do betão até aos 28 dias mostrando maior sensibilidade do que o método referido em [5], que só tem sensibilidade para avaliar o estado de maturação do betão nas 10 primeiras horas após a amassadura.

5.3 Influência das condições exteriores nos sinais óticos no interior do betão

Na parte final da cura, os sinais óticos são fortemente afetados pelas condições exteriores. No caso do betão corrente, existem capilares que permitem a ocorrência de fluxo de humidade relativa do ar para o interior do betão, chegando aos sensores óticos e ao mesmo tempo interferir no processo de cura. Enquanto o grau de hidratação for elevado (início da cura), este acréscimo de água é irrelevante, mas num estado de maturação avançado afeta o processo de hidratação.

Para retirar as contribuições da humidade relativa do ar e da temperatura ambiente nos sinais óticos do interior do betão, é escolhida a janela (intervalo) mais pertinente. A janela pretendida é aquela em que a contribuição da maturação do betão no sinal ótico é muito inferior quando comparado com a contribuição da humidade e da temperatura.

Com estas janelas bem definidas, calculou-se a variação das respetivas grandezas em relação ao ponto inicial da janela (servindo de referência). Tendo a variação da intensidade do sinal ótico e das outras variáveis, obteve-se uma correlação (linear) entre elas. Com as correlações então determinadas, extrapolou-se para todo o período de cura, obtendo-se assim a desconvolução da intensidade do sinal ótico transmitido pela humidade relativa do ar e pela temperatura ambiente. Para este exercício foram escolhidas as intensidades óticas dos sensores B e D.

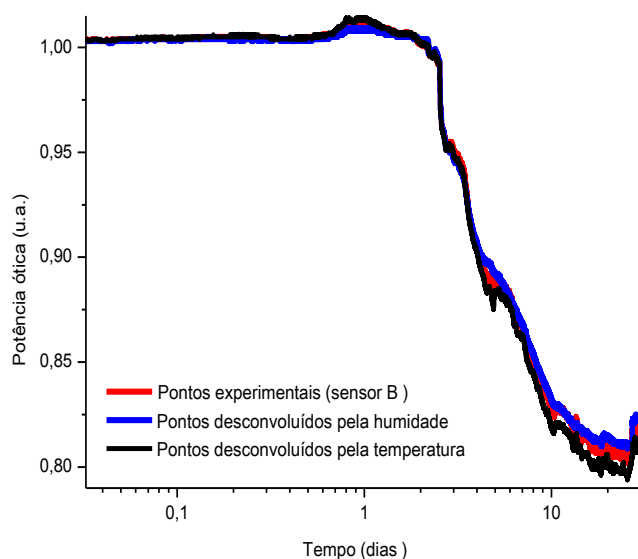


Figura 29 Representação da evolução temporal da potência ótica do sensor B e a desconvolução pela humidade e pela temperatura.

A Figura 29 mostra o sinal original e os sinais desconvoluídos. Nos primeiros dois dias de cura, os sinais estão praticamente coincidentes, a partir daí, assiste-se à suavização dos valores de humidade relativa do ar. Enquanto a desconvolução pela temperatura ambiente, o sinal ótico resultante é similar ao sinal ótico original.

É de relembrar, que este provete de betão sofreu grandes variações de humidade (Figura 17). O mesmo não aconteceu com a temperatura, tendo sofrido pequenas variações (6 °C) ao longo do período de cura, ou seja, a influência da humidade relativa do ar foi superior à influência da temperatura ambiente nos sinais óticos, principalmente num estado de maturação avançado do betão. Após isto, desconvoluiu-se o sinal ótico em simultâneo com a informação da temperatura e da humidade, obtendo-se assim o resultado apresentado na Figura 30.

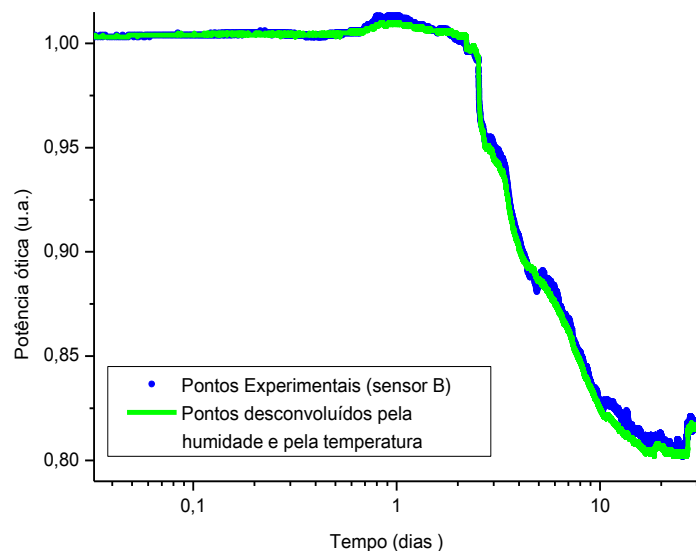


Figura 30 Representação da evolução temporal da potência ótica do sensor B e a desconvolução pela humidade e pela temperatura em simultâneo.

Desta forma verifica-se que o gráfico (a verde) apresenta menos interferência em relação ao gráfico original. Os mesmos cálculos foram feitos para a intensidade ótica do sensor D, mas apenas a desconvolução pela humidade relativa do ar, porque pela temperatura ambiente não se conseguiu obter uma correlação.

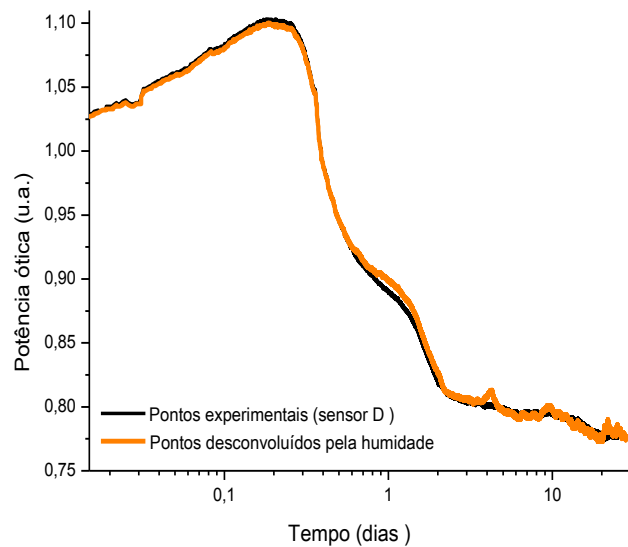


Figura 31 Representação da evolução temporal da potência ótica do sensor D e a desconvolução pela humidade relativa do ar.

Para resolver esta questão, recorreu-se à utilização de uma câmara climática (*Fitoclima 300*) e procedeu-se a duas etapas com um provete de betão já curado e com o sensor C. Numa etapa, colocou-se a humidade constante e a temperatura a variar, seguidamente, mantêm-se a temperatura constante e variou-se a humidade, por patamares ao longo do tempo, com intervalos de 10 horas, garantindo assim tempo suficiente de estabilização. Tempo necessário para o provete de betão atingir a temperatura exterior e a humidade relativa do ar.

Os resultados experimentais alcançados permitiram obter uma correlação entre o sinal ótico e a temperatura ou a humidade, descortinando, assim, a resposta dos sensores face às condições ambientais.

Para averiguar a influência da humidade, realizou-se um ciclo de subida de 20% a 60% com um incremento de 10% de humidade a uma temperatura constante de 25°C. Para avaliar a influência da variação de temperatura no sinal ótico, efetuou-se um ciclo decrescente de 50 °C a 10°C com um passo de 10 °C a uma humidade constante de 70%.

Após o tratamento dos dados experimentais, obteve-se uma relação para a influência da humidade relativa do ar e para a influência da temperatura ambiente. Essas relações estão representadas nas Figura 32 e 33.

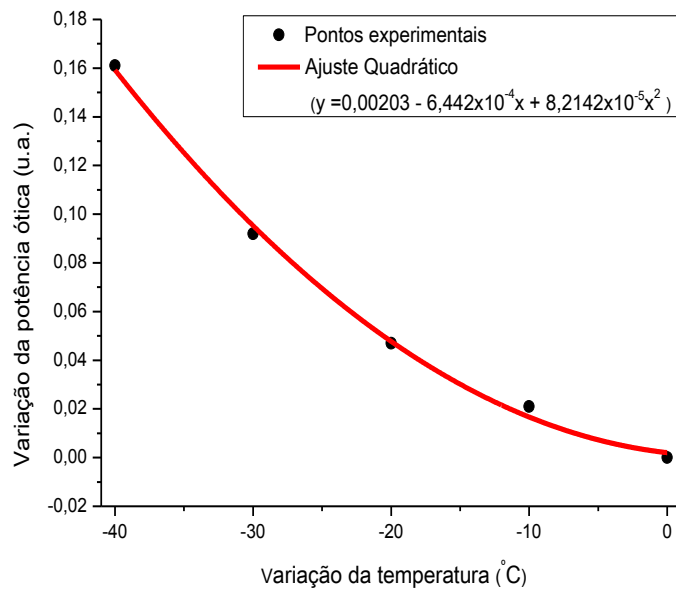


Figura 32 Variação da potência ótica no sensor C embutido no betão curado em função da variação da temperatura e o respetivo ajuste ($r^2 = 0,995$).

Através da Figura 32, verifica-se que a correlação entre a variação da intensidade do sinal ótico do sensor C e a variação da temperatura é descrita por um polinómio de segundo grau. O mesmo acontece para a correlação entre a variação da intensidade do sinal ótico e a variação da humidade (Figura 33).

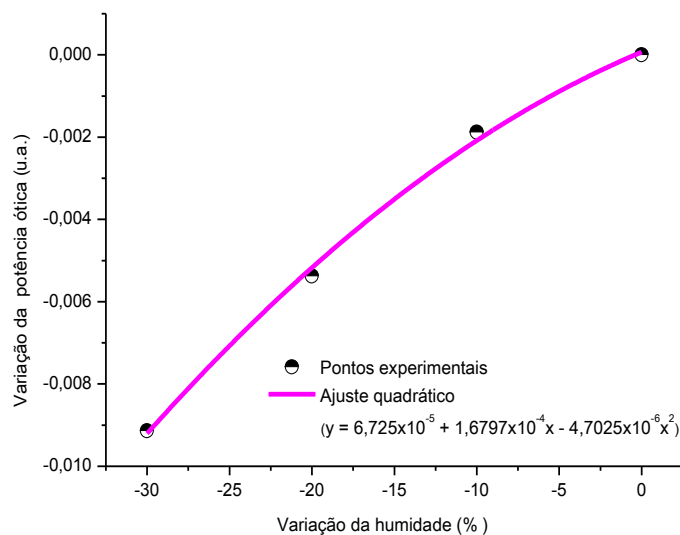


Figura 33 Variação da potência ótica no sensor C embutido no betão curado em função da variação da humidade e o respetivo ajuste ($r^2 = 0,994$).

Com estes ajustes, é possível realizar a desconvolução do sinal ótico pela humidade relativa do ar e pela temperatura ambiente. A Figura 34 mostra a evolução temporal da potência ótica transmitida do sensor B e a desconvolução segundo a humidade relativa do ar e segundo a temperatura ambiente, onde é notável a contribuição das condições exteriores no sinal ótico no interior do betão.

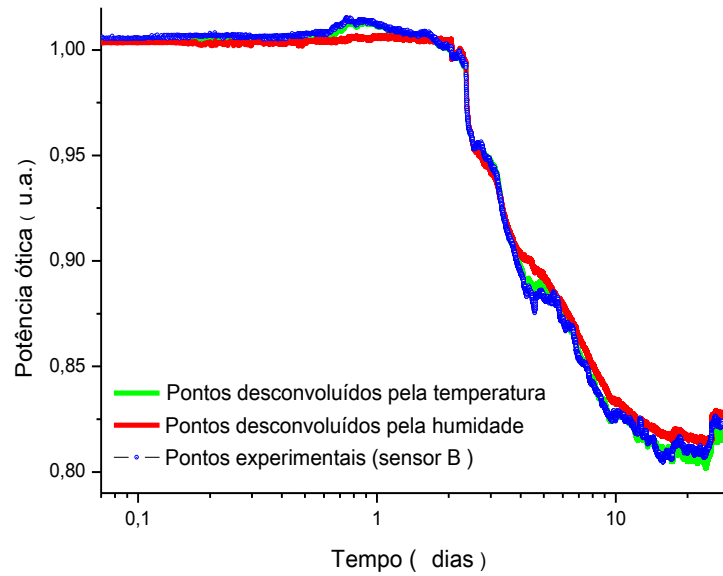


Figura 34 Representação da evolução temporal da potência do sensor B e a desconvolução pela humidade relativa do ar (a vermelho) e pela temperatura ambiente (a verde).

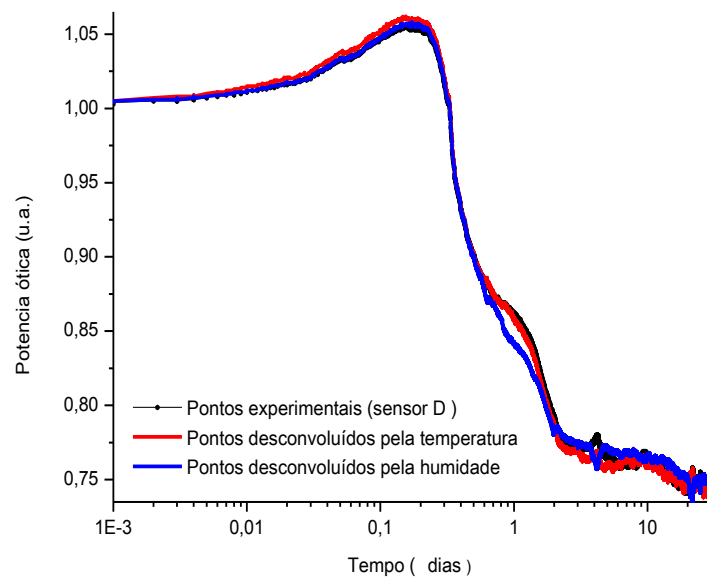


Figura 35 Representação da evolução temporal da potência do sensor B e a desconvolução pela humidade relativa do ar (a vermelho) e pela temperatura ambiente (a azul).

Tal como no caso anterior (sensor C), o mesmo ocorre para o sensor D.

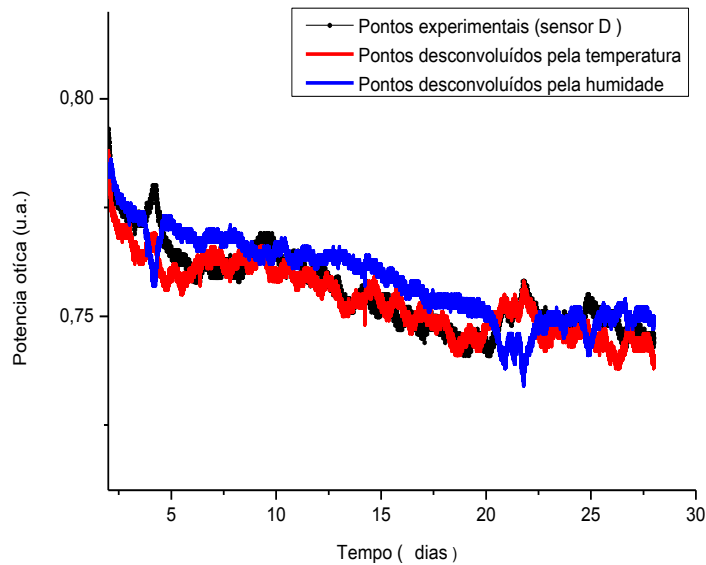


Figura 36 Representação da evolução temporal da potência do sensor B e a desconvolução pela humidade relativa do ar (a vermelho) e pela temperatura ambiente (a azul), a partir do segundo dia de idade do betão.

Na Figura 36 está representada a evolução temporal da potência ótica do sensor D e a desconvolução segundo a humidade relativa do ar e segundo a temperatura ambiente, a partir do segundo dia de idade do betão. Período no qual o grau de hidratação do betão é superior quando comparado com o grau de hidratação nas primeiras horas após amassadura.

Em suma, os resultados obtidos mostram que é possível utilizar os sensores óticos para monitorizar o processo de cura do betão. Através da otimização do sensor foi possível monitorizar a presença de água no betão durante o período de cura.

Capítulo 6

Conclusão e trabalho futuro

No âmbito deste trabalho foram desenvolvidos vários sensores óticos para a avaliação do estado de maturação do betão. Os resultados experimentais alcançados são promissores e perspetivam que este método de monitorização ótica do processo de cura do betão venha a ter especial importância em obras de grande porte.

O método proposto pode ser utilizado como uma ferramenta de baixo custo, como, por exemplo, na aplicação para testes de qualidade na indústria de produção de cimentos comerciais, ou seja, permitir uma monitorização *in situ* e em tempo real.

O protótipo construído permitiu adquirir os dados referentes à monitorização, sendo um dos objetivos fulcrais deste trabalho. Os sensores eletrónicos comerciais utilizados durante este trabalho mostraram que as perturbações sofridas pelos sinais óticos são provocadas pelas condições exteriores. Este aspeto ficou explícito através da desconvolução do sinal ótico segundo a humidade relativa do ar e segundo a temperatura ambiente.

Quanto à caracterização do sensor ótico verifica-se que para um número elevado de entalhes (superior a 25) a resposta é não linear, portanto, considerou-se este o limite superior. No teste da areia (seca), o sensor ótico mostra-se sensível à adição da água, corroborando o facto de o sensor ser capaz de monitorizar a presença de água no processo de cura do betão.

Como sugestões para trabalhos futuros salientam-se: monitorizar betão corrente com diferentes relações água/cimento ([0,30-0,60]), principalmente nos limites do intervalo indicado; repetir o ensaio 3 num ambiente controlado, de forma a obter a intensidade ótica transmitida sem interferência das condições exteriores (visto que o processo de hidratação em ambos os casos é diferente devido às propriedades do agregado); otimizar o protótipo construído, de forma a dividir a potência ótica emitida pelo *LED* com recurso a um acoplador 1x2 e utilizar dois fotodíodos. Parte do sinal ótico será injetado na fibra que contém os entalhes e a outra parte será injetada diretamente num dos fotodíodos. Deste modo, será possível obter um sinal de referência, dividindo o sinal ótico do sensor pelo sinal de referência. Com isto será possível eliminar possíveis flutuações da intensidade ótica emitida pelo *LED*, permitindo assim obter um sinal com menos ruído. Por último, propõe-se a utilização deste sensor em ambiente de obra.

Referências

-
- [1] Available: <http://www.eclo.pt/eclo2/Products/ConcreteMaturity/CTS100/tabid/1089/Default.aspx>
- [2] L. D. Suit. and M. M. Sprinkel, "Control of Cracking in Concrete," *Transportation Research Board*, p. 29, 2006.
- [3] P. Hugo F. T. Lima, L. Silva, R. N. Nogueira e J. L. Pinto, "Determinação dos tempos de presa de argamassa em diferentes condições de cura usando sensores de fibra óptica," in *5º Congresso Luso-Moçambique de Engenharia*, Maputo, Moçambique 2008.
- [4] K.. Rajesha, M. Sheeba, P. Radhakrishnan, C. Vallabhan e V. Nampoore, "A fiber optic smart sensor for studying the setting characteristics of various grades of cement," *Optics and Lasers in Engineering - Elsevier*, vol. 44, pp. 486–493, 2006.
- [5] M. Sheeda. e. V. Rajesh, "POF based smart sensor for studying the setting dynamics of cement paste," presented at the Third International Conference on Optical and Laser Diagnostics, 2007.
- [6] K. Tay, S. C. Tjin, C. C. Chan, and H. Rahardjo, "Humidity sensing using plastic optical fibers" *Microwave and Optical Technology Letters* vol. 43, 2004.
- [7] C. Lee, W. Liao, J. Chen and J.Yu Chen, "Monitoring the Curing Process of Concrete Composites Using Plastic Optic Fiber Sensors," presented at the 16th International Conference on composite materials.
- [8] L. Dangan and C. S. Cai, "Applications of fiber optic sensors in civil engineering," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 25, pp. 577-596, 2007.
- [9] C. K. Y. Leung, "Fiber optic sensors in concrete: the future?," vol. 34, pp. 85-94, 2001.
- [10] A. d. S. Coutinho, *Fabrico e propriedades do betão* vol. I. Lisboa, 1997.
- [11] M. Reis, "Materiais Dois Mil," I. S. Técnico, Ed., ed Lisboa: IST Press, 2005.
- [12] V. de Castro, "Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil," *Cerâmica* vol. 55, 2009.
- [13] P. Carvalho C. Costa , J.C. Bordado, A. Nunes, "Estudo de Argamassas de base cimentícia por Microscopia Electrónica de Varrimento," *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 21, 2009.
- [14] S. Bishnoi and K. L. Scrivener, "Studying nucleation and growth kinetics of alite hydration using mu ic," *Cement and Concrete Research*, vol. 39, pp. 849-860, Oct 2009.
- [15] J. J. Thomas, H. M. Jennings, and J. J. Chen, "Influence of Nucleation Seeding on the Hydration Mechanisms of Tricalcium Silicate and Cement," *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 113, pp. 4327-4334, Mar 19 2009.
- [16] J. W. Bullard, H. M. Jennings, R. A. Livingston, A. Nonat, G. W. Scherer, J. S. Schweitzer, K. L. Scrivener, and J. J. Thomas, "Mechanisms of cement hydration," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, pp. 1208-1223, Dec 2011.
- [17] P. Hewlett, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, VI ed.: Elsevier Science & Technology Books, 2004.
- [18] M. Reis, "Estudo da presa do cimento por medidas eléctricas," MSc, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2007.
- [19] F. Ridi, E. Fratini, P. Luciani, F. Winnefeld and P. Baglioni, "Hydration kinetics of tricalcium silicate by calorimetric methods," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 364, pp. 118-124, Dec 1 2011.
- [20] J. J. Thomas, J. J. Biernacki, J. W. Bullard, S. Bishnoi, J. S. Dolado, G. W. Scherer, and A. Luttge, "Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, pp. 1257-1278, Dec 2011.
- [21] J. M. Gaidis, K. L. Scrivener, E. M. Gartner, *Materials Science of Concrete I*, vol. I. United States of America: The American Ceramic Society, 1989.
- [22] J. W. P. Schmelezer, *Nucleation Theory and Applications*, Weinheim, 2005.
- [23] E. Lage, *Física Estatística*. Lisboa, 1995.
- [24] P. G. V. James J. De Yoreo, *Principles of Crystal Nucleation and Growth*, vol. 54, 2003.
- [25] W. Kurz and D. J. Fisher, *Fundamentals of Solidification*, Lausanne, Switzerland, 1986.
- [26] S. Garrault-Gauffnet, A. Nonat, "Experimental investigation of calcium silicate hydrate (C-S-H) nucleation," *Journal of Crystal Growth*, 1999.
- [27] Available: http://www.pofac.de/pofac/en/what_are_pof/index_profiles.php

- [28] K. S. C. K. Akmaluddin, W. J. Cantwell C. Thomas, "Crack detection and vertical deflection monitoring in concrete beams using plastic optical fibre sensors," *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, pp. 205–216, 2003.
- [29] K. S. C. Kuang, S. T. Quek, C. G. Koh, W. J. Cantwell and P. J. Scully, "Plastic Optical Fibre Sensors for Structural Health Monitoring: A Review of Recent Progress," *Journal of Sensors*, p. 13, 2009.
- [30] J. Z. e. J. Arrue, *Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications*, 2001
- [31] M. G. Kuzyk, *Polymer Fiber Optics*. Boca Raton Taylor & Francis Group, LLC 2007.
- [32] S. C. J. Lee, "Discrete Multitone Modulation for Short-Range Optical Communications," PhD, Department of Electrical Engineering, University of Eindhoven, Eindhoven, 2009.
- [33] S. Baumer, *Handbook of Plastic Optics*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.
- [34] *TheConcreteProducerOnline*. Available: <http://www.theconcreteproducer.com/industry-news.asp?sectionID=1423&articleID=466478>
- [35] D. P. Bentz, Lura, P., and Roberts, J.W, "Mixture Proportioning for Internal Curing," *Concrete International*, vol. 27, pp. 35-40, 2005.
- [36] D. P. Bentz and Snyder, K.A, "Protected Paste Volume in Concrete. Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1863-1867, 1999.

Apêndice

As contribuições científicas resultantes do trabalho descrito nesta dissertação foram dois artigos, um em conferência e o outro em revista, respetivamente:

- L. Ferreira, P. Antunes, H. Varum and P. André, “Optical monitoring of curing process of concrete with plastic optical fibers”, 22nd International Conference on Optical Fiber (OFS-22), China, 2012;
- André, S., P., Varum, H., Antunes, P., Ferreira, L., and Sousa, M.” Monitoring of the concrete curing process using plastic optical fibers”, 45 (3), Measurement, 556-560 (2012).

E também o registo de duas patentes, uma nacional e outra internacional:

- Paulo André, Humberto Varum, Paulo Antunes, Licínio Ferreira e Marta Sousa, Monitor, método e dispositivo para a determinação do processo de cura do betão em fibras óticas de plástico, 105.424, Patente Nacional, 2010 (Pendente);
- Paulo André, Humberto Varum, Paulo Antunes, Licínio Ferreira and Marta Sousa, Method and device for the monitorization of the concrete curing process based in optical fibers, PCt/IB2010/055743, Patent International, 2010 (Pendent).

Seguidamente são apresentadas as calibrações dos sensores eletrónicos e a interface da rotina em C para amostrar os dados experimentais referentes à monitorização.

Para calibrar o sensor de humidade recorreu-se a uma câmara climática (*ESQEC ARL-0680*) com um ciclo de subida de 20% a 70% com incrementos de 10%. A temperatura foi programada para os 25°C.

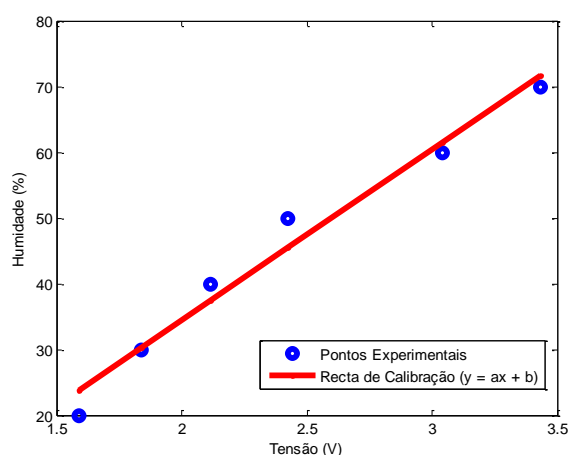


Figura 37 Humidade em função da tensão de saída e o respetivo ajuste linear.

Tabela 5 Apresentação dos coeficientes obtidos a partir do ajuste linear.

Coefficientes	Valores obtidos*	Valores previstos	R ²
a	25,93	32,57	0,9866
b	-17,45	-31,20	

*Usando resistências: R₁ = 270 kΩ e R₂ = 390 kΩ (tolerância de 10%) para a configuração de um divisor de tensão.

Através do ajuste linear estimou-se os valores de humidade no interior da câmara e comparou-se com os valores programados (Tabela 6).

Tabela 6 Valores de humidade programada e estimada.

Humidade programada (%)	Humidade estimada (%)
20,00	23,80
30,00	30,30
40,00	37,38
50,00	45,47
60,00	61,45
70,00	71,62

Para calibrar os sensores de temperatura recorreu-se a uma estufa (*FIRLABO*) e com esta realizou-se dois ciclos: um de subida e outro de descida, partindo de 20°C até 65°C com incrementos de 5°C. Esta aquisição foi feita de forma contínua, ou seja, acabando o ciclo de subida iniciou-se o ciclo de descida com intervalos de tempo de uma hora. Este procedimento permitiu estabilizar a temperatura no interior da estufa. Para obter as curvas de calibração dos sensores, recorreu-se ao modelo (*Steinhart-Hart*) que tem o seguinte perfil:

$$\frac{1}{T} = a + b \ln\left(\frac{R(t)}{R_o}\right) + c \left(\ln\left(\frac{R(t)}{R_o}\right)\right)^3$$

onde a , b e c são os coeficiente a determinar, $R(t)$ a resistência no instante t , R_o é a resistência de referência (10 k Ω) e T é a temperatura expressa em *Kelvin*.

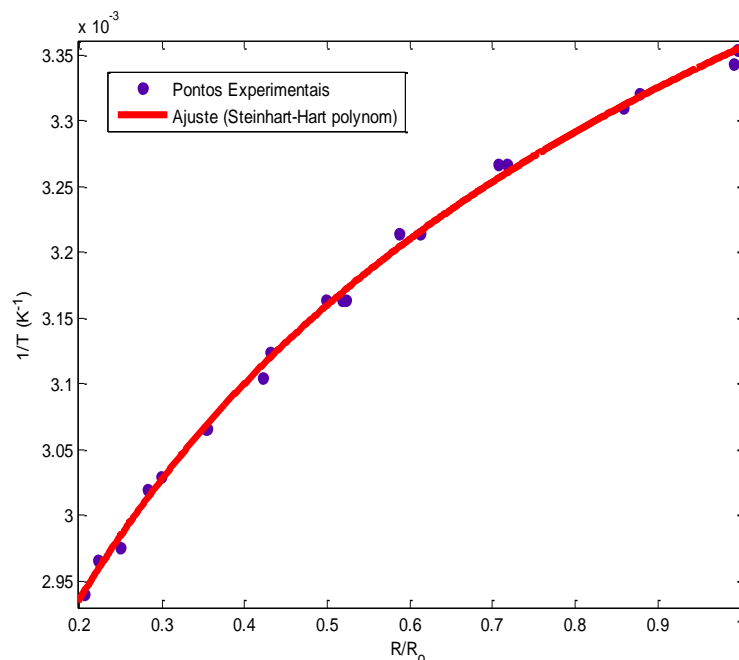


Figura 38 Gráfico do inverso da temperatura absoluta em função do valor da resistência normalizada e o respetivo ajuste (polinómio *Steinhart-Hart*).

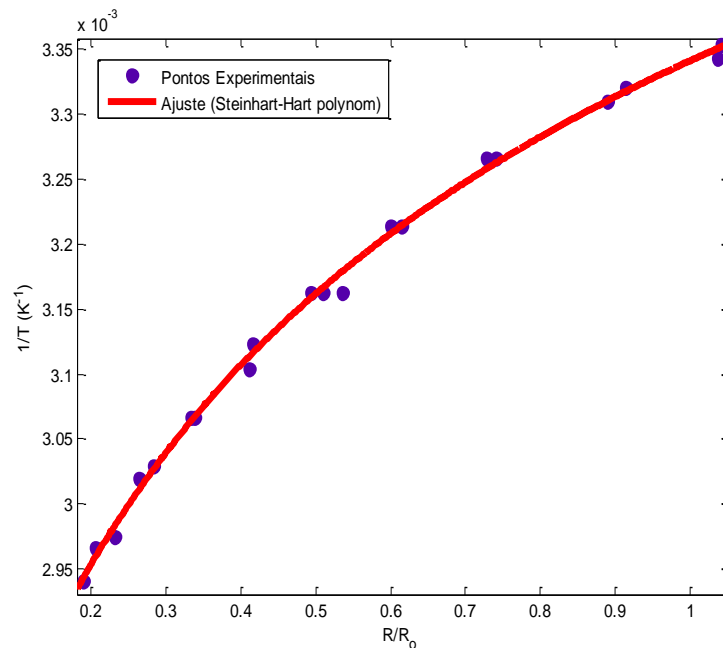


Figura 39 Gráfico do inverso da temperatura absoluta em função do valor da resistência normalizada e o respetivo ajuste (polinómio *Steinhart-Hart*).

A tabela 7 apresenta os coeficientes estimados pelo ajuste (*Steinhart-Hart*), os coeficientes previstos, os intervalos de confiança e o coeficiente de correlação para os dois sensores de temperatura.

Tabela 7 Apresentação dos coeficientes obtidos para sensores de temperatura.

Sensor da temperatura ambiente @2780.							
Valores estimados		Intervalos de confiança		R^2	Valores previstos*		
a	0,003355	[0,003334;0,003348]			0,9972	a_p	0,0000048
b	0,0002873	[0,0002717;0,000303]				b_p	0,0003630
c	$-1,046 \times 10^{-6}$	[$-1,682 \times 10^{-5}$; $-6,092 \times 10^{-6}$]		c_p		~0	
Sensor da temperatura do interior do betão @4080.							
a	0,003341	[0,003334; 0,003348]		0,9974	a_p	0,0011000	
b	0,0002633	[0,000249; 0,0002776]			b_p	0,0002450	
c	$-8,511 \times 10^{-6}$	[$-1,397 \times 10^{-5}$; $-3,053 \times 10^{-6}$]			c_p	~0	

*coeficientes previstos foram obtidos para uma temperatura ambiente de 298,15 K, usando uma resistência de referência de 10 k Ω (10% de tolerância) e os parâmetros de B (@4080 e @2780).

Posto isto, através da curva de calibração já definidas estimou-se a temperatura no interior da estufa e comparou-se com a temperatura programada, resultando assim a tabela 8.

Tabela 8 Valores de temperatura programadas e estimadas para ambos os sensores de temperatura (repetiu-se duas vezes aquisição para a temperatura de 42°C).

Sensor da estufa (°C)	Sensor ambiente (°C)	Sensor do interior do betão (°C)
24,00	24,99	25,19
27,00	28,27	28,30
32,00	33,57	33,37
37,00	39,04	38,59
42,00	42,20	41,39
42,00	42,37	42,69
46,00	47,38	47,77
52,00	52,85	53,22
57,00	58,82	58,88
62,00	64,86	64,77
65,00	66,76	66,65
61,00	61,95	61,97
57,00	57,23	57,30
51,00	52,68	52,86
47,00	48,00	48,09
41,00	43,44	43,48
36,00	37,87	38,00
31,00	33,97	33,79
27,00	28,87	28,95
25,00	25,10	25,31
22,00	24,99	25,19

Por último, a Figura 39 apresenta a interface da rotina em C para amostrar os dados experimentais referentes à monitorização, efetuando o cálculo da média móvel.

```

C:\Users\Licinio\Dropbox\tese\monitorizacao.exe
Software @Lbox version alpha

Monitorizacao do processo de cura do betao atraves de sensores opticos
-----
Departamento de Fisica
Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Aveiro
-----
Licinio

Programa consiste em filtrar dos dados e converter estes de bytes para as respe-
ctivas grandezas fisicas. O filtro e apenas a media temporal dos dados, entao
e pedido que introduza o numero de pontos, e so depois seleccionar a grandeza
que tenciona filtrar, do seguinte modo:

Prima '0' para Sinal Optico, canal 2;
Prima '1' para Humidade relativa;
Prima '2' para Temperatura no interior do betao;
Prima '3' para Temperatura ambiente;
Prima '4' para Sinal Optico, canal 1.

Numero de pontos para o calculo da media: 1000
Grandeza fisica? 4

```

Figura 39 Interface do programa para amostrar os dados através do cálculo da média móvel.