



**UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR**

**Departamento de Engenharia Civil**

**MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS**

**Filipe Alexandre Cavaleiro Monteiro**

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE**

**EM**

**ENGENHARIA CIVIL**

**Covilhã**

**Outubro 2010**

Tese realizada sob a supervisão de

**Prof. Doutor Marcin Górski**

Professor do

Departamento de Engenharia Civil da

Universidade da Beira Interior

*Aos meus Pais, que tornaram possível todo o meu percurso académico, o meu muito obrigado.*

## *RESUMO*

Este trabalho incidiu na nova perspectiva referente ao estado de conservação das estruturas, visto actualmente ser umas das principais preocupações no respeito à longevidade das obras de engenharia civil.

Simultaneamente abordam-se diferentes sistemas de monitorização assim como a sua aplicabilidade em obra. Salienta-se ainda a relevância de estruturas inteligentes, cada vez mais comuns, permitindo monitorizar continuamente as estruturas. Podendo inclusivamente estas, proceder a alarmes ajudando na sua protecção, evitando danos nos utilizadores bem como na própria estrutura.

Foca-se ainda a parte experimental direccionada para a medição de humidade e temperatura, com recurso a sensores embutidos no betão para registar dados durante o processo de cura.

### *Palavras chave*

Monitorização, Temperatura, Humidade, Cura do betão, Sensores, Estruturas

## *ABSTRACT*

This work focused on the new perspective regarding the conservation status of the structures, as currently being one of the main concerns in the longevity of civil engineering works.

Simultaneously to address different monitoring systems as well as its applicability to work. Referred also the importance of smart structures, increasingly common, allowing continuously monitor. They may even trigger alarms to help in their protection, avoiding damage to the users as well as the structure itself.

Also focus the experimental measurement of humidity and temperature, using sensors embedded in concrete to record data during the healing process.

### *Key words*

Monitoring, Temperature, Moisture, Concrete curing, sensors, Structures

## AGRADECIMENTOS

*Aos meus pais, pelo amor, pela paciência e por acreditarem em mim, respeitando minhas decisões. Apoiando-me sempre.*

*Não posso deixar de colocar em lugar de destaque o meu orientador científico Prof. Doutor Marcin Górski, pela sua compreensão e sua preciosa contribuição na estruturação e escrita da tese.*

*Outra pessoa que tenho que destacar é o Prof. Doutor João Paulo de Castro Gomes, pois foi graças a ele que pude realizar a parte experimental, foi sempre incançável e esteve pronto para me ajudar, disponibilizou o laboratório, ajudou na compra dos sensores e solicitou o betão para este trabalho.*

*Ao IT - Lab. da Covilhã, em especial ao Professor Fernando J. Velez e aos investigadores Luís M. Borges e Norberto Barroca pela paciência no desenvolvimento do protótipo usado neste trabalho, pois sem eles a parte prática deste trabalho não seria possível.*

*Também não posso deixar de agradecer à Sandra Cavaleiro pelo amor, amizade, companhia, paciência e por toda a ajuda que sempre me deu.*

*Aos meus verdadeiros amigos por estarem sempre presentes, nos pequenos e grandes momentos.*

*E por fim a todos aqueles que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização do presente trabalho.*

# Índice

# ÍNDICE DE TEXTO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....	2
1.1. Tema.....	2
1.2. Objectivos da dissertação .....	3
1.3. Âmbito .....	3
CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE .....	5
2.1. Considerações iniciais .....	5
2.2. Sistemas de Monitorização de Estruturas .....	7
2.2.1. Medição de deslocamentos .....	7
2.2.2. Medição da extensão.....	12
2.2.3. Medição da rotação .....	15
2.2.4. Medição da força .....	17
2.2.5. Medição da temperatura .....	18
2.2.6. Medição de humidade .....	20
2.2.7. Medição de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).....	21
CAPÍTULO 3. Estruturas Inteligentes .....	24
3.1. Introdução .....	24
3.2. Conceito de estruturas inteligentes .....	25
3.3. Generalidades .....	26
3.3.1. Constituição de um sistema de monitorização de uma estrutura inteligente... ..	28
3.3.2. Identificação Inteligente de Danos .....	30
3.3.3. Reconhecimento de Padrões.....	31
3.3.4. Redes Neurais Artificiais .....	33
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	36
3.5. COMPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO.....	37
3.5.1. Rede de Sensores .....	38
3.5.2. Sistemas de Aquisição .....	39
3.5.3. Sistema de Transmissão de Dados .....	40
3.5.4. Processamento e Armazenamento de Dados.....	40

3.5.5.	Tratamento dos Dados .....	41
3.6.	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL.....	41
3.6.1.	Subsistemas de Monitorização da Integridade Estrutural.....	42
3.6.2.	Processo de Identificação Estrutural .....	47
3.6.3.	Níveis de Avaliação Estrutural .....	50
CAPÍTULO 4.	Ensaio realizados .....	55
4.1.	Introdução .....	55
4.2.	Análise de resultados .....	59
4.3.	Conclusão do trabalho experimental.....	60
CAPÍTULO 5.	CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		65
ANEXOS .....		70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fissurómetro [F1] .....	5
Figura 2 - Inclínómetro [F2] .....	5
Figura 3 - Comparador digital deslocamentos [F3] .....	8
Figura 4 - Estrutura básica de um LVOT [F4].....	8
Figura 5 - Exemplo de LVDT [F5] .....	9
Figura 6 - Transdutor de deslocamento resistivo, exemplo de medidor de abertura de fendas [F6].....	10
Figura 7 - Exemplos de sistemas de GPS [F7].....	11
Figura 8 - Panorâmica do Viaduto de Millau (esquerda) [F8] e junção do tabuleiro do viaduto (direita) [F9]. .....	11
Figura 9 - Extensómetro de corda vibrante [F10]. .....	13
Figura 10 - Exemplo de um clinómetro [F11].....	15
Figura 11 - Exemplo de inclinómetro eléctrico da Sherborne Sensors, LSI Series [F12]. .....	16
Figura 12 - Exemplo de células de carga [F13]. .....	17
Figura 13 - Exemplo de Termopares para medição de temperatura [F14]. .....	19
Figura 14 - Sistema de medição de humidade no ar [F15]. .....	20
Figura 15 - Exemplo de destaque do betão provocado por oxidação do aço [F16].....	21
Figura 16 - Exemplo sensor para medição de temperatura [F17]. .....	22
Figura 17 - Analogia entre um sistema de monitorização biológico e um sistema de monitorização estrutural inteligente [F18].....	26
Figura 18 - Monitorização estrutural inteligente [F18].....	29
Figura 19 - Níveis para completa identificação de danos estruturais [F18].....	30
Figura 20 - Esquema de funcionamento de um sistema de reconhecimento de padrões [F18].	32
Figura 21 - Esquema do algoritmo para treinar as redes neurais [F18].....	35
Figura 22 - Subconjuntos de um sistema de monitorização [F18]. .....	38
Figura 23 - Subsistemas de monitorização da integridade estrutural [F18]. .....	43
Figura 24 - Contexto dos níveis de avaliação estrutural [F18]. .....	52
Figura 25 - Sensor SHT21S (esquerda) e sensor SHT15 (direita) ambos da Sensirion [F19]. ....	55
Figura 26 - Preparação e colocação dos sensores nos cubos de protecção [F18]. .....	56
Figura 27 - Segundo teste realizado (esquerda) e verificação dos resultados (direita) [F18]. .	56
Figura 28 - Sistema de monitorização (protótipo) na sua caixa de protecção [F18]. .....	57
Figura 29 - Início da betonagem [F18]. .....	57
Figura 30 - Colocação do sensor dentro do betão (esquerda), arranque do sistema após betonagem (direita) [F18]. .....	58
Figura 31 - Valores registados nos primeiros minutos do teste [F18].....	58

# Capítulo 1

# CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Tema

A construção e manutenção de estruturas de Engenharia Civil foi desde sempre uma actividade com enorme impacto social e económico [1].

Actualmente com as preocupações ambientais, os crescentes problemas económicos a nível mundial, as exigências na qualidade de construção, na segurança e a necessidade de manutenção originou a necessidade de se ter uma resposta adequada a estas questões. A resposta surge através do conhecimento do estado das estruturas através da sua monitorização.

Assim a análise do comportamento estrutural e eventuais intervenções em construções, requerem, em geral, uma prévia inspecção da zona envolvente, para sustentar um correcto diagnóstico do estado real da estrutura.

No caso de construções históricas, e devido à complexidade das suas estruturas bem como da sua zona envolvente, pois as estruturas não existem num contexto isolado existe uma interacção entre as pessoas e o ambiente envolvente bem como uma alteração constante deste, conduz geralmente a dificuldades acrescidas no que respeita á percepção real do funcionamento da estrutura bem como das condições em que esta se encontra.

Naturalmente, a inspecção e diagnóstico tem um papel preponderante neste campo, pois tendo em conta o valor histórico, cultural ou mesmo económico da estrutura é imperativo que os métodos utilizados quer para diagnosticar e monitorizar sejam não destrutivos.

O método de inspecção visual é dos mais antigos e a mais importante forma de ensaios não destrutivos, para a detecção de anomalias/patologias, contudo outros métodos para ajudar na inspecção visual têm vindo a ser desenvolvidos.

O controlo do comportamento estrutural através da colocação de instrumentos de medição apropriados constitui um meio muito valioso e fidedigno de apoio à avaliação do estado real em que se encontra uma estrutura. A observação e o acompanhamento da evolução de patologias numa estrutura contribuem para clarificar os fenómenos que lhes deram origem, para assim melhor se conseguir definir as estratégias e técnicas a adoptar para diminuir ou mesmo eliminar as patologias existentes/encontradas.

Como tal a monitorização surge de uma forma natural como mais um dos processos essenciais na Engenharia Civil.

A monitorização consiste em geral no registo de parâmetros tais como, deformações, movimentos de juntas ou aberturas de fendas, nivelamento, verticalidade, variações de temperatura, tensões, assentamentos das fundações, variações da humidade, etc. Para todos

estes tipos de patologias existe actualmente uma vasta gama de equipamentos de medição, adequados a cada caso em estudo.

Idealmente, o registo e medição deveriam ser executados de forma contínua e de preferência com ligação a um sistema de aquisição e armazenamento de dados, possibilitando assim um registo detalhado da evolução das patologias, bem como o registo de novas patologias que possam surgir, contudo, e devido á complexidade e recursos necessários para este tipo de registo, o registo contínuo raramente é utilizado sendo substituído por um registo periódico que é realizado através de visitas periódicas á estrutura monitorizada, este espaço de tempo entre as visitas realizadas difere de estudo em estudo dependendo sobretudo dos recursos e equipamentos que se dispõe.

Outro factor preponderante é a durabilidade das estruturas de Engenharia Civil, como tal, quanto mais detalhada for a informação registada sobre uma determinada estrutura, melhor se pode actuar para prolongar a sua vida útil e assim preservar a integridade desta.

Com estes avanços podemos então dizer que estamos cada vez mais próximos de uma nova geração de estruturas a que chamamos estruturas inteligentes. Este tipo de estruturas possuem capacidades notáveis, no que respeita a registar informação sobre o seu estado, que se reflecte na possibilidade de se fazer um diagnóstico muito eficiente num espaço de tempo muito curto.

## 1.2. Objectivos da dissertação

Esta dissertação tem como principais objectivos estudar os diversos sistemas de monitorização, nomeadamente os referentes a estruturas inteligentes, os diferentes métodos e respectiva aplicabilidade, assim como elaboração de pequenos testes práticos onde se demonstra a possível simplicidade de todo o sistema.

## 1.3. Âmbito

A principal contribuição deste trabalho está assente na apresentação de um sistema que se possa utilizar para monitorizar uma estrutura, em particular durante a sua cura e posterior vida útil.

# Capítulo 2

# CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE

## 2.1. Considerações iniciais

A monitorização surge de uma forma natural como o próximo grande passo na engenharia civil [1].

Até há pouco tempo a monitorização de estruturas só era levada a cabo durante a fase de obra, no sentido de aplicar acções correctivas e de garantir segurança, após esta fase terminar a monitorização era menosprezada, fazendo-se simplesmente inspecções visuais periódicas.

Contudo a aplicação da monitorização de estruturas não se fica só pela monitorização de estruturas em fase de construção, também se aplica a estruturas já em fase de exploração, pois existe uma crescente preocupação de preservar estas estruturas, devido alterações na sua zona envolvente, que está em constante evolução.

Assim podemos falar que a monitorização de estruturas deve ser executada em diferentes fases de obra, que são elas a fase de projecto, a fase de obra e a fase de exploração, esta monitorização consiste em analisar o comportamento das estruturas projectadas bem como analisar o comportamento das estruturas adjacentes á obra.

Existe actualmente uma grande pressão social e económica para que se execute a monitorização quer a quando da realização de novas estruturas quer para a preservação das já existentes, tornando-se mais uma parte essencial na Engenharia Civil. Tal pressão surgiu devido a questões de segurança, assim como também questões de optimização quer dos processos de construção quer da manutenção.

O que inicialmente começou por uma necessidade de medir fendas, inclinações ou assentamentos usando fissurómetros (Figura 1), inclinómetros (Figura 2) e deflectómetros, depressa começou a aumentar surgindo novos parâmetros a analisar, como por exemplo a temperatura, humidade, deformações e tensões.

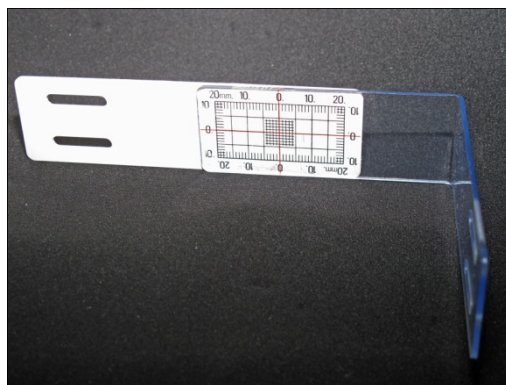


Figura 1 - Fissurómetro [F1]



Figura 2 - Inclinómetro [F2]

Como referido, a inspecção visual é ainda o método mais utilizado na monitorização de estruturas, devido a questões orçamentais e de limitação de recursos humanos, estas realizam-se com pouca frequência sendo na maior parte das vezes, simples e superficiais.

Os inspectores recorrem por vezes em obras de grandes dimensões, a métodos de monitorização de elevada precisão, onde se inclui a utilização de extensómetros mecânicos, sistemas de triangulação e um número considerável de sensores de base eléctrica. Estes métodos requerem normalmente a presença de pessoal técnico especializado, oferecendo em geral uma precisão e resolução baixas, bem como um elevado custo que está associado à obtenção de dados, limitando o número de inspecções periódicas. Por outro lado, a instalação de sistemas de monitorização em tempo real baseados em sensores eléctricos torna-se muito complexa, devido a uma elevada quantidade de cablagens. Com tal quantidade quer de cablagens quer de sensores resultam problemas de ruído electromagnético.

Assim, e com o forte crescimento que se tem sentido das comunicações ópticas e indústria optoelectrónica, a evolução da tecnologia das fibras ópticas tem sido uma constante, o que permite um elevado progresso nos sensores em fibra óptica, que surgem como uma alternativa cada vez mais válida, em termos de desempenho e custo, para a monitorização em tempo real das mais diversas estruturas. Estes avanços, em associação com o desenvolvimento de materiais compósitos, tem aberto novas portas para um novo tipo de estruturas inteligentes. O fácil processamento dos materiais compósitos permite o bom embebimento dos sensores em fibra óptica no material durante o fabrico do mesmo. As estruturas assim obtidas são capazes de sentir alterações, de as interpretar e de reagir às mesmas.

Os sensores em fibra óptica são atractivos por oferecerem uma série de vantagens comparativamente com os métodos e sensores convencionais. Face a estes as fibras ópticas destacam-se pois possuem uma transmissão com baixas perdas, imunidade a interferências electromagnéticas, baixo peso, pequenas dimensões e isolamento eléctrico. No que respeita à resistência, são capazes de suportar altas temperaturas, bem como podem ser operadas em diferentes meios químicos e aquosos permitindo medições em áreas não acessíveis de um outro modo [3].

Ao embeber sensores em fibra óptica em materiais compósitos, é possível melhorar o processo de fabrico, dado que se podem monitorizar parâmetros como a temperatura, a pressão, a deformação, o grau de cura, a viscosidade e o conteúdo químico. Os sensores podem ainda ser aplicados na avaliação da integridade de uma estrutura em serviço [3].

Os sensores em fibra óptica são classificados de acordo com os parâmetros da luz a ser modulados (intensidade, fase ou comprimentos de onda) [4].

Três tipos de sensores evidenciaram-se ao demonstrarem ser mais apropriados para aplicações em materiais compósitos inteligentes, os interferómetros extrínsecos de Fabry-Pérot, sensores de Brillouin e Raman e redes de Bragg em fibra óptica.

Os interferômetros extrínsecos de Fabry-Pérot em fibra óptica (EFPI) são de maior sensibilidade, particularmente aos fenômenos transitórios. Os sensores EFPI têm sido utilizados com sucesso para a medição de deformação e na detecção de emissão acústica.

Sensores de Brillouin e Raman estão a ser usados em conjunto por forma a medir tanto a tensão como a temperatura, pois usando só os sensores de Brillouin não é possível distinguir entre a mudança de frequência devido à temperatura ou devido à luz. Então através da intensidade de luz de Raman retira-se informações só da temperatura e sabendo esta a tensão pode ser obtida pela mudança de frequência do sinal de Brillouin. Esta medição é útil para a monitorização em tempo real de uma parte crítica da estrutura.

Os sensores de Bragg (FBG) embebidos em material compósito têm demonstrado grande potencial na medição simultânea de deformações e temperatura.

Assim estamos a avançar cada vez mais para a próxima geração de estruturas inteligentes, com capacidades notáveis de diagnóstico.

## 2.2. Sistemas de Monitorização de Estruturas

### 2.2.1. Medição de deslocamentos

Existe uma grande variedade de instrumentos destinados à medição de deslocamentos, contudo os que têm vindo a ser bastante utilizados são os transdutores capacitivos, os indutivos e os resistivos.

#### *Transdutores de deslocamento capacitivos*

Os transdutores de deslocamento capacitivos baseiam-se na variação da capacidade de um condensador por variação da distância entre placas, este fenómeno é utilizado de modo a que a uma variação da distância corresponda a uma indicação numérica da mesma.

Como exemplo destes instrumentos temos o paquímetro digital e o comparador digital (Figura 3).



Figura 3 - Comparador digital deslocamentos [F3]

### *LVDT*

O LVDT (Linear Variable Differential Transformer) pertence à classe de transdutores indutivos de deslocamento, onde o seu modo de funcionamento consiste no uso de um núcleo móvel é usado para variar o acoplamento do campo magnético entre três enrolamentos. A sua estrutura básica é constituída por um núcleo de material permeável e três enrolamentos (Figura 4). O núcleo, ao ser excitado com um enrolamento primário percorrido por corrente alternada, gera um campo magnético. Os dois enrolamentos secundários têm tensões induzidas devido ao acoplamento de fluxo com o primário. Quando o núcleo está centrado, a tensão induzida em cada secundário é a mesma. Mas quando o núcleo é deslocado, a variação no acoplamento de fluxo faz aumentar a tensão num secundário e diminuir no outro. Os dois secundários estão geralmente ligados em série e oposição de modo que as tensões produzidas em cada um estão desfasadas. Neste caso, a amplitude da tensão de saída é zero quando o núcleo está centrado, e aumenta à medida que o núcleo é deslocado num sentido ou noutro.

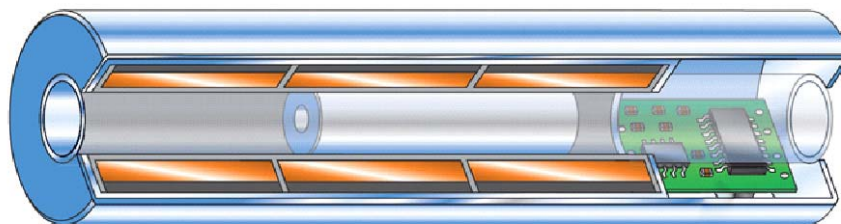


Figura 4 - Estrutura básica de um LVDT [F4]

Verifica-se que a amplitude da tensão é linear com o deslocamento do núcleo num certo percurso.

Além disso, há variação da fase conforme o núcleo se desloca num ou noutro sentido, de modo que as mediadas de fase dão o sentido do movimento do núcleo. Estes transdutores

apresentam uma elevada repetibilidade, boa estabilidade a longo prazo, prolongada vida mecânica e uma boa resposta tanto em medidas estáticas como em dinâmicas [10].

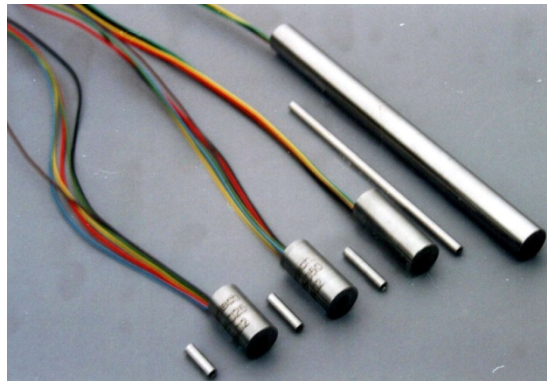


Figura 5 - Exemplo de LVDT [F5]

### *Transdutores de deslocamento resistivos*

Nos transdutores de deslocamento resistivos é estabelecida uma relação entre o deslocamento imposto e a resistência do elemento sensor. De entre estes salientam-se os transdutores que utilizam como elementos sensores os extensómetros de resistência e os potenciométricos.

No transdutor de deslocamento de mola, a variação de distância entre pontos de fixação traduz-se numa deformação da mola, que é medida por extensómetros de resistência eléctrica ligados em ponte completa. Para o transdutor em apreço, numa gama de medição de  $\pm 2\text{mm}$  existe uma relação linear entre o sinal de saída da ponte e o deslocamento. Este transdutor, com distância entre pontos de fixação que pode variar entre 100m e 300mm e gama de medição de  $\pm 2\text{mm}$ , pode ser utilizado, por exemplo, na medição da extensão média de um elemento de betão.

O transdutor é instalado numa base fixa e a extremidade do fio extensível é fixado à parte móvel. Do movimento resulta uma rotação interna de um veio que acciona um potenciómetro (Figura 6), cujo sinal de saída é proporcional ao movimento. Este tipo de sensores apresenta como principal vantagem ter uma gama de medição muito alargada, que pode ir até alguns metros.

Uma possível aplicação pode ser, por exemplo, na medição dos movimentos de juntas de dilatação em obras de grande dimensão.

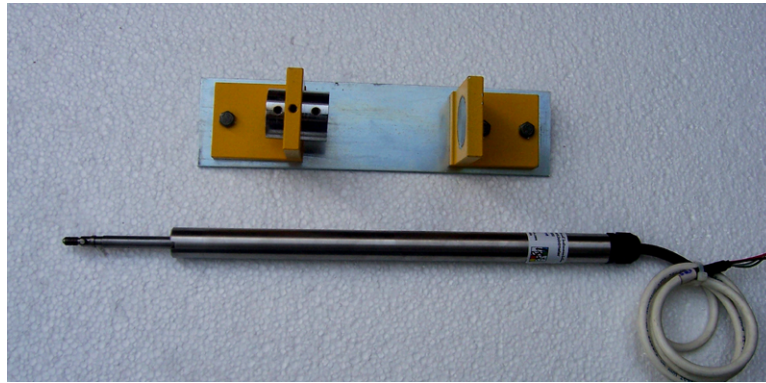


Figura 6 - Transdutor de deslocamento resistivo, exemplo de medidor de abertura de fendas [F6].

### *Outros sistemas de medição*

A medição dos deslocamentos é um processo corrente de controlar a execução da obra, sendo frequentemente realizada por triangulação com recurso a técnicas topográficas. O desenvolvimento dos sistemas laser tem contudo permitido a obtenção de resultados de melhor qualidade, a custos cada vez mais reduzidos. As principais aplicações tem sido o acompanhamento de provas de carga e o desenvolvimento de sistemas de inspeção de obras de arte. São processos muito sensíveis as condições atmosféricas, nomeadamente as variações localizadas da pressão que provocam a movimentação de grandes massas de ar quente e ao nevoeiro, responsáveis por desvios do laser que podem ser significativos.

No sistema GPS (Global Positioning System) cada ponto é instrumentado com um receptor que permite o seu posicionamento num sistema global de coordenadas através da medição da distância a pelo menos três satélites. Uma vez posicionado cada um dos pontos de medição pode então ser calculada a distância entre eles. Esta técnica tem sido usada na monitorização das flechas de tabuleiros de pontes de grandes dimensões e de deslocamentos do topo de torres de obras atirantadas, com uma precisão que pode ser superior a 2mm na medição de deslocamentos verticais e a 4mm para a medição de deslocamentos horizontais [11].



Figura 7 - Exemplos de sistemas de GPS [F7].

Outra aplicação dos sistemas de GPS é na fase de construção onde um dos exemplos de maior relevância é o Viaduto de Millau, na França, com um comprimento de 2460m e 32 m de largura, é formado por um tabuleiro constituído por oito trechos em aço, suportados por cabos ancorados em sete pilares de betão armado. Os pilares foram construídos primeiro, terminado este processo deu-se inicio a colocação do tabuleiro, onde lentamente e com recurso a macacos hidráulicos guiados por GPS e controlados por um sistema informático que monitorizava todo o processo foi possível começar de lados opostos do viaduto aquando o processo de junção do tabuleiro no centro [5].

Devida á extensa dimensão da obra e a elevada exigência de precisão todo o avanço foi controlada em permanência por meio de satélites GPS.

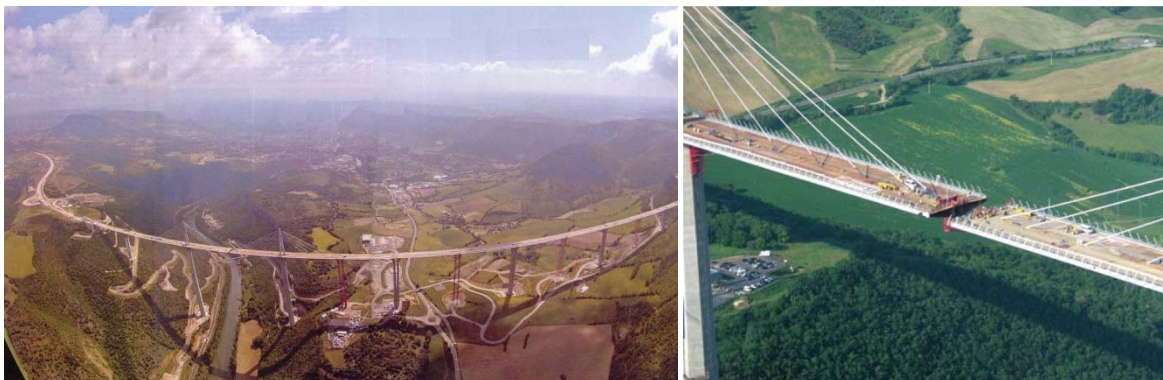


Figura 8 - Panorâmica do Viaduto de Millau (esquerda) [F8] e junção do tabuleiro do viaduto (direita) [F9].

### 2.2.2. Medição da extensão

Os instrumentos de medida destinados a medição pontual da extensão são designados extensómetros, podendo ser de aplicação à superfície ou de embeber. Os primeiros estão especialmente indicados para estruturas de madeira, alvenaria, aço, ou ainda de estruturas de betão existentes. Os extensómetros de embeber são os mais indicados na medição das extensões em estruturas de betão, necessitando para isso de ser instalados previamente à betonagem.

O conceito de ponto na medição da extensão é fictício, tratando-se na realidade de um segmento, de comprimento conhecido, ao longo do qual são medianizadas as extensões. O comprimento deste segmento deve ser definido de acordo com as características do material estrutural, nomeadamente tendo em atenção a sua heterogeneidade. Nos materiais mais homogêneos, como o aço, podem em geral ser adoptados extensómetros de menor dimensão. Nos materiais mais heterogêneos, como o betão, a dimensão dos extensómetros está condicionada pela dimensão dos inertes utilizados.

Os extensómetros eléctricos mais utilizados são os extensómetros de corda vibrante e os extensómetros de resistência [2].

#### *Extensómetros de corda vibrante*

Os extensómetros de corda vibrante baseiam-se no facto de existir uma relação entre a frequência de vibração de uma corda e a tensão a que essa corda está sujeita. No interior de uma cápsula é instalada uma corda de área, da ordem dos 0.3mm de diâmetro, fixada pelas suas extremidades, sujeita a elevada tensão de tracção. À variação de extensão do sensor imposta pela estrutura a qual está aplicado corresponde a uma variação de tensão na corda, e por consequência uma variação de frequência de vibração desta. Uma corrente ao percorrer uma bobine instalada na vizinhança da corda cria um campo electromagnético que excita a corda, a qual passa a oscilar a frequência determinada pela tensão a que está sujeita. A oscilação da corda no interior desse campo magnético induz uma corrente alternada na bobina que é detectada pelo sistema de aquisição. O dispositivo que excita a corda passa então a actuar como um dispositivo de aquisição de sinal.

O comprimento de referência do sensor corresponde à distancia entre pontos de fixação do extensómetro ao elemento estrutural, coincidindo aproximadamente com a distância entre pontos de fixação da corda, que pode ir, correntemente, de 140mm ate 250mm. A perda de sinal ao longo dos cabos que ligam o sensor ao sistema de aquisição é muito reduzida, podendo-se adoptar comprimentos de cabo até 2000m.

No que diz respeito à sensibilidade à temperatura, para variações até 10°C a temperatura pode afectar até 0.02% da gama de medida do sensor, o que é considerado

pouco. Para variações de temperatura superiores, recomenda-se a medição desta na zona onde o sensor é instalado, devendo então proceder-se a correcções a partir do respectivo coeficiente de compensação.

Existe um importante conjunto de transdutores construídos que tem por base o sensor de corda vibrante, nomeadamente células de pressão, células de carga, transdutores de deslocamento, sensores de temperatura, entre outros. No domínio dos extensómetros distinguem-se fundamentalmente os de embeber no betão e os de aplicar à superfície.



Figura 9 - Extensómetro de corda vibrante [F10].

### *Extensómetros de resistência eléctrica*

Os extensómetros de resistência eléctrica são baseados na variação da resistência de um condutor ou de um semicondutor, quando sujeito a uma deformação mecânica.

Se a resistência eléctrica estiver solidarizada a um dado material, é possível determinar a extensão que o material sofre a partir da medição da variação da resistência. Considera-se que todas as extensões ocorrem num mesmo plano, isto é, não existe deformação na direcção perpendicular aos fios condutores do extensómetro. Para se obter uma significativa resistência eléctrica do extensómetro este é constituído por um conjunto longitudinal de segmentos, ligados entre si por pequenos segmentos transversais com uma maior secção, formando uma malha. Deste modo a sensibilidade transversal será, em geral, de apenas 1% a 2% da sensibilidade longitudinal. A malha condutora e impressa por um processo de fotografação sobre uma película metálica de reduzida espessura, depositada sobre uma base de espessura também muito reduzida. A espessura do conjunto pode atingir os 0.025mm.

O processo de medição das deformações a partir de extensómetros de resistência tem-se revelado muito útil [2]. Há, contudo, um conjunto de limitações e de procedimentos que deve ser tido em atenção para assegurar a qualidade dos resultados obtidos, destacando-se:

Em primeiro lugar a extensão mecânica aplicada ao condutor constituinte do extensómetro não deve exceder o seu limite de elasticidade.

Em segundo lugar a medição só será correcta se toda a extensão for integralmente transmitida ao sensor. Contribui decisivamente para o sucesso da medição, a colagem

cuidadosa do extensómetro, com um adesivo elástico e estável com o tempo e com a temperatura. O extensómetro deve estar electricamente isolado do material ao qual está aplicado e protegido das condições ambientais.

### *Efeito da variação da temperatura sobre os extensómetros de resistência*

Numa situação ideal, a resistência de um extensómetro só deveria variar de acordo com as deformações impostas à peça á qual está aplicado. Contudo, verifica-se uma enorme sensibilidade destes sensores á variação da temperatura, que provocam a designada deformação térmica aparente, fundamentalmente por dois motivos:

Devido a resistividade eléctrica da malha do extensómetro, que varia com a temperatura, e por não serem iguais os coeficientes de dilatação térmica da liga que constitui a malha do extensómetro e do material ao qual está aplicado.

Mais recentemente surgiram os designados extensómetros auto-compensados para os efeitos da temperatura, cujo objectivo principal é eliminar, tanto quanto possível, e numa dada gama de temperaturas, os efeitos térmicos sobre o extensómetro. A auto-compensação para o efeito da temperatura é conseguida através da manipulação das características metalúrgicas das ligas que constituem a malha do extensómetro, conferindo-lhe uma variação de resistência muito reduzida sob o efeito da variação de temperatura, desde que aplicados a um material com coeficiente de dilatação térmica idêntico aquele para o qual a liga foi projectada.

### *Extensómetros em fibra óptica*

A aplicação dos sensores de fibra óptica á monitorização das estruturas de engenharia civil tem experimentado nos últimos anos um grande desenvolvimento [2]. Em particular, têm sido desenvolvidos e aplicados com sucesso em obra os sensores de Bragg e os sensores Fabry-Perot, com vista à medição da extensão e da temperatura. A imunidade aos campos electromagnéticos, a reduzida perda de sinal para grandes distâncias e as reduzidas dimensões são apenas algumas das suas principais vantagens. A validação desta nova família de sensores tem sido feita por comparação com os sensores convencionais dos quais há já uma grande experiência, procurando adquirir-se confiança e experiência na sua utilização.

### 2.2.3. Medição da rotação

Existem dois processos formalmente distintos para a medição da rotação na observação de estruturas de engenharia civil. Um assenta na medição da variação angular de um dado eixo, entre uma posição inicial e uma final. No segundo processo mede-se o desvio angular de um dado eixo em relação a um plano de referência que é fixo, ou seja, medem-se inclinações absolutas, o plano de referência adoptado é em geral o horizontal ou o vertical.

O instrumento de medida destinado a medir variações angulares é designado clinómetro, Figura 10, (do grego klínein, “inclin” + métron, “medida”). enquanto o destinado a medir rotações absolutas é o inclinómetro, Figura 2.

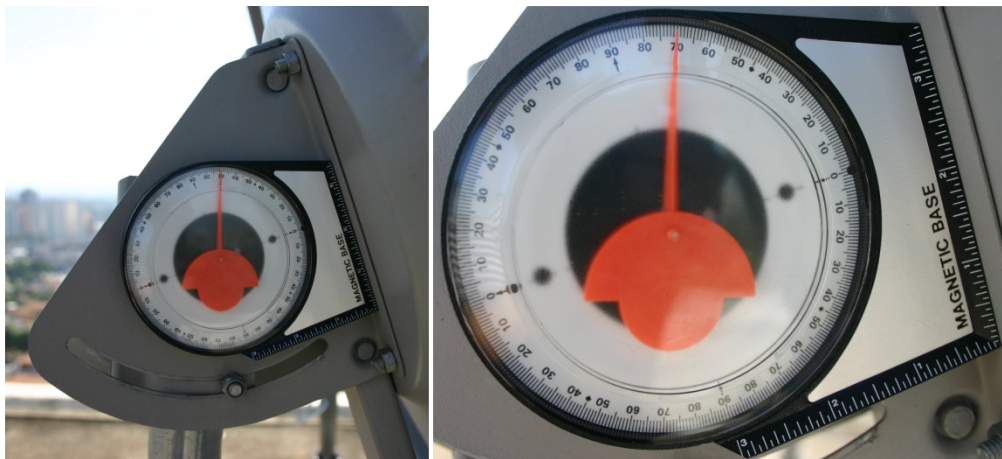


Figura 10 - Exemplo de um clinómetro [F11].

Os clinómetros foram os primeiros a surgir no mercado, destacando-se o clássico clinómetro de bolha de ar, já com largas décadas de utilização. Actualmente já existem disponíveis versões digitais deste instrumento de medida. Os inclinómetros são em geral eléctricos, e mais recentemente têm experimentado algum desenvolvimento.

Não obstante as tecnologias emergentes, a utilização dos clinómetros de bolha de ar aplicados a bases devidamente fixadas à estrutura continua a ser o processo mais preciso de medir variações angulares.

Uma das principais limitações do clinómetro de bolha de ar reside na necessidade de sempre que se tem de efectuar uma medição tem que se fazer deslocar um técnico ao local, o que não se torna muito prático. Com os avanços na tecnologia e como muitos locais são de difícil acesso tem se recorrido cada vez mais à medição angular em sistemas automáticos. As soluções de inclinómetros eléctricos disponíveis actualmente no mercado são de corda vibrante, indutivos ou resistivos.

### *Clinómetro de bolha de ar*

O clinómetro de bolha de ar é um instrumento de medida de variação angular, unidireccional, dotado de um mostrador de vidro em forma de calote esférica, no interior da qual a posição de uma bolha de ar indica a horizontalidade do sensor. O recipiente que contém a bolha de ar tem dois apoios, sendo um deles roscado, o que permite o seu nivelamento, um tambor de medida devidamente graduado mede o numero de voltas que é necessário dar ao apoio roscado, ao qual está ligado, para nivelar o sensor. Uma vez instalado numa base, devidamente fixada á estrutura, a variação angular é dada pelo numero de voltas que é necessário dar ao tambor, para que seja reposta a horizontalidade do sensor.

### *Inclinómetros eléctricos*

Os inclinómetros eléctricos actualmente disponíveis no mercado não têm a precisão dos clinómetros de bolha de ar, mas apresentam outras vantagens, nomeadamente a possibilidade de serem integrados num sistema automático de aquisição. Não existe um principio de funcionamento comum para todos eles. Cada fabricante desenvolveu o seu próprio sistema, e nem todos anunciam de uma forma clara o seu funcionamento.

A Figura 11 apresenta um inclinómetro eléctrico da Sherborne Sensors, LSI Series, que permite medir inclinações, numa dada direcção, em relação a um plano horizontal, cujo campo de medição é de  $\pm 14.5^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  e  $\pm 90^\circ$ .

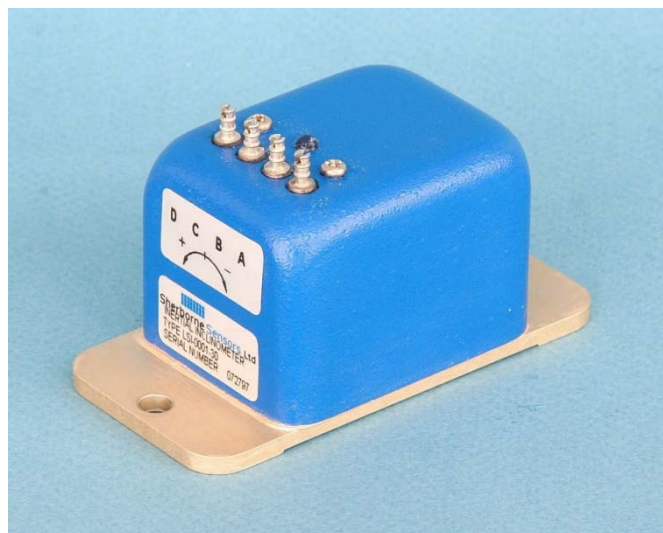


Figura 11 - Exemplo de inclinómetro eléctrico da Sherborne Sensors, LSI Series [F12].

Nos casos correntes da observação de superestruturas, o campo de medição de que é necessário dispor é em geral reduzido, dando-se maior importância aos erros cometidos na medição. Daí que, no caso dos inclinómetros, é preferível optar-se por transdutores que apresentem o campo de medição estritamente necessário para a obra em análise.

Podemos ainda encontrar transdutores que permitem a medição simultânea da inclinação em relação ao plano horizontal segundo duas direcções distintas, designando-se por isso de inclinómetro biaxial.

Existem outros tipos de inclinómetros eléctricos, que costumam ser usados na medição de inclinações em barragens ou em obras geotécnicas. Deslizam no interior de tubos pré-instalados no maciço (ver Figura 2), podendo medir inclinações em diversos pontos ao longo desse trajecto. É neste tipo de aplicações que são usuais, além dos inclinómetros resistivos, os de corda vibrante.

#### 2.2.4. Medição da força

O processo mais frequente para a medição directa de forças é através da interposição de células de carga (Figura 12). Na observação do comportamento das estruturas estes dispositivos são tradicionalmente hidráulicos ou de deformação, consoante o processo adoptado para a transdução da força. No primeiro caso, um fluido de baixa compressibilidade preenche uma câmara que se deforma elasticamente por acção da força que se pretende medir. E então estabelecida uma relação entre a pressão do fluido, medida com um sensor de pressão, e a força aplicada. No segundo caso, a força aplicada induz uma deformação elástica numa peça devidamente instrumentada com extensómetros.



Figura 12 - Exemplo de células de carga [F13].

A deformação elástica medida e convertida no valor da força, por calibração. Os modelos de células de carga mais comuns utilizam extensómetros de resistência eléctrica ou de corda vibrante.

A medição da força interessa fundamentalmente quando se pretende acompanhar a tracção em tirantes, em cabos de pré-esforço ou as reacções de apoio. Mais recentemente tem também sido desenvolvidos sistemas que permitem a pesagem de veículos em movimento.

### 2.2.5. Medição da temperatura

Em engenharia civil a medição de temperatura tem maior importância durante a cura e o endurecimento do betão que são etapas críticas e inevitáveis de qualquer obra que envolva estruturas de betão armado. A taxa de desenvolvimento da resistência na fase inicial da vida do betão está fortemente relacionada com a sua taxa de hidratação, sendo o elevado aumento de temperatura causado pela reacção de hidratação que está a acontecer.

Durante a fase inicial da vida do betão, é necessário evitar a fissuração causados pela rápida secagem devido ao elevado aumento de temperatura.

Existe actualmente uma grande variedade de instrumentos destinados á medição da temperatura, cada um dos quais apresentando características que os tornam particularmente indicados para determinadas aplicações específicas. De entre estas características salienta-se a gama de medição e a linearidade. Os sensores de temperatura actualmente mais utilizados nas aplicações de engenharia civil são os termopares e os detectores resistivos.

#### *Termopares*

Quando se mantém dois pontos de um dado metal a temperaturas distintas,  $T_1$  e  $T_2$ , a vibração dos átomos e o movimento dos electrões são afectados de tal forma que se cria uma diferença de potencial entre os dois pontos do metal. Esta diferença de potencial está relacionada com o facto de os electrões na zona mais quente terem mais energia térmica do que os da zona mais fria, e por conseguinte aqueles tenderem a deslocar-se para esta última. Este movimento varia consoante as condutibilidades térmicas dos metais. Se se fechar um circuito ligando as extremidades por meio de outro condutor verifica-se que passa uma corrente na malha fechada. Diz-se que se estabeleceu uma força electromotriz termoeléctrica no circuito, que faz circular a corrente. Sendo este efeito conhecido como Efeito de Seebeck, no qual assenta o funcionamento dos termopares.

Nas aplicações na área da engenharia civil trabalha-se com gamas de temperatura definidas em intervalos muito mais pequenos do que a capacidade real dos termopares, que é

em geral compreendido entre  $-20^{\circ}\text{C}$  e  $+100^{\circ}\text{C}$ . Para este intervalo de valores pode dizer-se que os termopares apresentam um comportamento linear.

Uma das limitações destes sensores resulta de a gama de tensões geradas por um termopar ser muito baixa, em geral inferior a 80mV, e a sensibilidade variar entre  $5\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$  e  $50\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ , resultando numa necessidade de blindar os fios do termopar desde a junção até ao equipamento de medição, nas aplicações em obra. Melhorando-lhe assim as características de protecção electromagnética.



Figura 13 - Exemplo de Termopares para medição de temperatura [F14].

### *Detectores de Temperatura Resistivos*

Um detector de temperatura resistivo (RTD - sigla do inglês de Resistance Temperature Detector) é um sensor de temperatura baseado no princípio do aumento da resistência do metal com a temperatura. O metal mais usado neste tipo de sensores é a platina, sendo por vezes designado por PRT (sigla do inglês de Platinum Resistance Thermometer), embora outros metais possam ser utilizados como o cobre e o níquel. Mais recentemente têm surgido ligas de metais que apresentam características muito idênticas às da platina, constituindo para certas gamas de medição uma solução economicamente mais atraente.

O níquel apresenta uma elevada sensibilidade mas a gama de medição onde este é linear é mais pequena do que a da platina. A resistividade é um parâmetro muito importante. Este deve ser elevado para que o sensor tenha um elevado valor óhmico, permitindo a utilização de fios de ligação ao equipamento de aquisição mais compridos. A platina apresenta o mais elevado valor de resistividade. Sensores de elevada resistência apresentam também uma massa reduzida, permitindo tempos de resposta mais curtos.

Nas aplicações em obra o elemento sensor mais utilizado é a platina, com a resistência de  $100\Omega$  a  $0^{\circ}\text{C}$ , recebendo por isso a designação corrente de PT100. Construído inicialmente

com base num enrolamento de um fio muito fino. Exteriormente a resistência é revestida por uma camada protectora e devidamente encapsulada.

### 2.2.6. Medição de humidade

Na última década, começou-se a tomar consciência dos danos que podem advir do excesso de humidade no betão.

Actualmente a medição de humidade tem duas vertentes, a medição dentro da estrutura e à sua superfície.

Quando a humidade se encontra dentro da estrutura ocorre um fenómeno chamado carbonatação, descrito em pormenor no ponto 2.2.7, que provoca a perda de alcalinidade da estrutura e para valores de humidade relativa entre 55 e 75 por cento, este fenómeno ocorre causando sérios danos nas estruturas, Figura 15.

A outra vertente é a medição de humidade na superfície da estrutura, estando esta ligada ao conforto térmico dos residentes, o excesso de humidade resulta muitas vezes pela má ou mesmo falta de isolamento térmico da estrutura, como não faz parte deste trabalho falar de isolamentos não irei aprofundar mais o tema.



Figura 14 - Sistema de medição de humidade no ar [F15].

### 2.2.7. Medição de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Um dos mecanismos mais correntes de deterioração do betão armado é a carbonatação, efeito este que consiste na passagem do dióxido de carbono presente no ar para o interior do betão, através dos poros, e uma vez dentro do betão este reage com o hidróxido de cálcio formando carbonato de cálcio e água. Este processo é acompanhado pela redução da alcalinidade do betão.

Num betão homogéneo, a carbonatação progride com a frente paralela à superfície, quando a frente de carbonatação atravessa o recobrimento das armaduras, eliminando a camada de passivação das armaduras, permitindo o início da sua corrosão, devido à perda de alcalinidade, o pH passa de cerca de 13 para 10, e nesta altura já existe água e oxigénio dentro do betão, comprometendo, deste modo, a durabilidade do mesmo.

A taxa de carbonatação depende de vários factores, particularmente da permeabilidade do betão, quanto mais permeável maior será a sua taxa de carbonatação, e da humidade relativa, pois a carbonatação ocorre mais facilmente quando a humidade relativa se situa entre 55 e 75 por cento.

Quando a profundidade de carbonatação atinge a zona das armaduras, estas oxidam formando-se óxidos ferrosos que aumentam de volume, fracturando o betão até ao ponto de se destacar do betão de recobrimento, Figura 15. Este fenómeno ocorre mais facilmente em estruturas de betão sem protecção ou com recobrimento insuficiente.



Figura 15 - Exemplo de destaque do betão provocado por oxidação do aço [F16].

Conhecendo a posição da frente de carbonatação em vários pontos numa estrutura de betão armado, é possível avaliar a sua durabilidade e estimar a extensão das zonas a reparar.

Então e com recurso a sensores, Figura 16, que meçam CO<sub>2</sub> é possível monitorizar o avanço deste processo e tomar medidas preventivas antes que sejam causados danos graves nas estruturas.



Figura 16 - Exemplo sensor para medição de temperatura [F17].

# Capítulo 3

# CAPÍTULO 3. Estruturas Inteligentes

## 3.1. Introdução

A observação estrutural tem sofrido uma mutação significativa, tanto na forma como no conceito, devido aos desenvolvimentos tecnológicos, sendo hoje a monitorização de estruturas uma área multidisciplinar.

No início a avaliação da integridade estrutural era simplesmente realizada através de inspecções visuais esporádicas auxiliadas com medições pontuais através de dispositivos mecânicos. Seguidamente, e já nas últimas décadas, e principalmente devido ao aparecimento dos primeiros computadores, fomentou-se a interface entre a experimentação e a comparação dos resultados com modelos numéricos de análise.

Na última década surgiu a ideia de monitorizar as estruturas continuamente quer durante a fase construtiva quer após a entrada em serviço, através dos primeiros sistemas de monitorização integrados, por intermédio da medição de grandezas tão diversas como a extensão, o deslocamento, a temperatura, a humidade relativa, a pressão, a inclinação, as acelerações, entre outras, que após serem devidamente tratadas e analisadas, permitem estudar a integridade estrutural, através da durabilidade e do comportamento reológico dos materiais, dos efeitos na estrutura resultantes da adopção de um determinado processo construtivo e da conformidade do comportamento real relativamente ao previsto na fase de projecto.

Os avanços dos sistemas de aquisição automáticos e programáveis, da transmissão remota dos dados e dos algoritmos para tratamento e análise dos resultados permitem o acompanhamento contínuo e a longo prazo das estruturas, dando lugar ao conceito da monitorização da integridade estrutural. Hoje, este conceito engloba também, e para além do descrito anteriormente, a identificação de danos e a previsão de vida útil da estrutura. Contudo, actualmente começa-se a dar os primeiros passos numa nova fase da monitorização estrutural dentro do conceito das estruturas inteligentes.

O conceito de estrutura inteligente emergiu na Europa na segunda metade da década de oitenta. A actividade entretanto desenvolvida associada a este conceito está relacionada com os avanços na ciência dos materiais, nas técnicas computacionais e nas tecnologias dos sistemas de sensores. Uma estrutura inteligente pressupõe sobretudo a atribuição de uma capacidade sensorial mas também de uma capacidade de compreensão e previsão do comportamento estrutural com eventuais potencialidades reactivas.

A capacidade sensorial é conferida por um sistema de monitorização baseado numa rede de sensores distribuída na estrutura capaz de, a cada instante, identificar e caracterizar as acções a que está sujeita, assim como medir os seus efeitos sobre a estrutura. A capacidade de compreensão e de previsão resulta da integração no sistema de monitorização de modelos

de análise estrutural desenvolvidos com base nas medições efectuadas em obra. Tais modelos, devidamente calibrados no final da execução da obra, vão sendo permanentemente ajustados, suportando um tratamento automático de interpretação e análise dos dados. Neste âmbito têm sido propostos e desenvolvidos algoritmos genéticos, estes têm sido aplicados essencialmente na detecção de danos na área da aviação.

Após a detecção de uma ocorrência de excepção na estrutura, podem ser accionados mecanismos de alerta, como a activação de dispositivos de base eléctrica ou a geração e transmissão de mensagens de aviso, ou, no caso de estruturas auto-adaptativas, serem introduzidas alterações ao próprio sistema estrutural. É neste contexto que se admite que a estrutura terá capacidade de intervir, reagindo às condições observadas no local.

Entende-se por estruturas auto-adaptativas aquelas que são capazes de alterar as acções a que estão sujeitas, as condições de apoio ou mesmo a sua geometria, através de sistemas mais ou menos complexos. Por exemplo, a redução de sobrecarga a que uma ponte está sujeita pode ser conseguida através de um dispositivo luminoso de sinalização vertical, ou da instalação de barreiras automáticas para interdição ao tráfego.

### 3.2. Conceito de estruturas inteligentes

Devido aos avanços registados nos meios tecnológicos, nomeadamente ao nível dos sistemas de aquisição automáticos e programáveis, na transmissão remota de dados e nos algoritmos para tratamento e análise de resultados, a visão da monitorização passa pela aplicação de um novo conceito - Estruturas Inteligentes.

Uma estrutura inteligente é constituída por um sistema de monitorização inteligente, inspirado no princípio de funcionamento do sistema nervoso do Ser Humano, dotado de um posto central de comando e controlo com capacidade de processamento inteligente, capaz de controlar dispositivos de alarmes, bem como a activação de actuadores capazes de corrigir a resposta estrutural perante os efeitos do meio ambiente.

Na Figura 17 está esquematizada a analogia entre o sistema de monitorização do Ser Humano e o sistema de monitorização estrutural inteligente a aplicar no conceito das estruturas inteligentes.

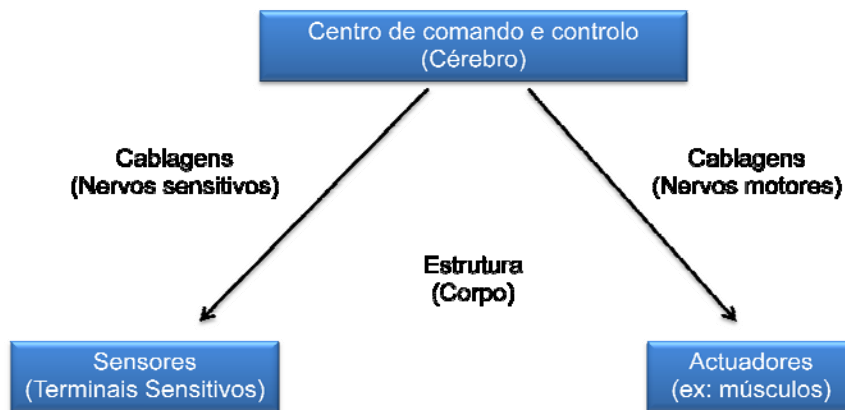


Figura 17 - Analogia entre um sistema de monitorização biológica e um sistema de monitorização estrutural inteligente [F18].

O sistema de monitorização inteligente é parte integrante de uma estrutura (o corpo) e contempla basicamente uma rede de sensores (terminais sensitivos), cablagens (nervos sensitivos e motores), actuadores (músculos) e um centro de comando e controlo (o cérebro e medula espinal).

Os algoritmos com grandes potencialidades na área da monitorização estrutural inteligente são os algoritmos baseados nos modelos computacionais de redes neuronais. Desde que o algoritmo esteja adequadamente “treinado” é possível prever comportamentos e identificar danos estruturais. A habilidade para aprender através de exemplos, faz deste método uma ferramenta muito flexível e poderosa tanto na análise como no controlo estrutural.

### 3.3. Generalidades

Nas últimas décadas, os proprietários das obras de arte de engenharia civil têm sido confrontados com a necessidade de as monitorizarem continuamente, para avaliar o seu comportamento e a sua integridade estrutural. Ao mesmo tempo, os recentes avanços na tecnologia dos materiais e estruturas inteligentes têm oferecido condições para responder a estas questões de forma eficiente.

A visão da inteligência das estruturas está relacionada a uma acção racional, e é segundo essa linha que se diz que as estruturas são inteligentes. A inteligência de um ser, tal como nas estruturas, reside na escolha da melhor acção para uma determinada situação.

As estruturas inteligentes têm origem no campo de investigação que idealizam uma correlação entre o sistema muscular e o sistema nervoso do Ser Humano. A ideia essencial das

estruturas inteligentes na engenharia civil é o de produzir estruturas não biológicas que respondam de forma otimizada, tal como os sistemas biológicos na natureza, através das suas capacidades adaptativas.

A definição de estrutura inteligente é mais ou menos consensual no seu todo, por definição no campo da engenharia civil, as estruturas inteligentes consistem em estruturas dotadas de sensores, que estão embebidos ou colados nestas como partes integrantes e por actuadores que respondem em função de uma unidade de controlo através das informações recolhidas pelos sensores. As estruturas possuem capacidade de agir e reagir de forma programada e inteligente, em função das solicitações e do meio ambiente, tal como o Ser Humano reage no seu dia-a-dia.

Desta forma, as estruturas inteligentes pressupõem um controlo activo sobre a mesma através de meios mecânicos, geralmente designados por actuadores, que actuam em função de um sistema de monitorização. O controlo activo das estruturas tem sido reconhecido como uma das áreas de maior desafio na engenharia estrutural nos últimos anos, com especial destaque na área da dinâmica estrutural.

Através do uso de controladores activos, o comportamento da estrutura pode ser modificado durante acções dinâmicas como impacto, vento e sismos. Esta solução tem imensas vantagens no aumento do tempo de vida útil da estrutura e na prevenção de danos estruturais, bem como na construção de estruturas cada vez mais arrojadas e esbeltas. Por exemplo, através de controlo activo em pontes é possível limitar a deformação da estrutura dentro do limite elástico e, portanto, prevenir danos estruturais e não estruturais. Desta forma é possível evitar os danos não estruturais e assim evitar o aparecimento de danos que no seu contexto podem ser substancialmente mais graves a longo prazo do que propriamente danos estruturais, como por exemplo o aparecimento de fissuração e a consequente corrosão das armaduras.

Numa estrutura inteligente pode-se dimensionar um determinado número de membros activamente controlados, onde cada membro tem um sensor ou um actuador. O sensor mede, por exemplo os deslocamentos dos graus de liberdade, e o actuador aplica a força necessária para correcção apropriada na resposta. Toda a comunicação é realizada por um sistema de monitorização permanente que garante um permanente feedback entre os sensores, computador central e os actuadores.

O controlo activo pode ser realizado a dois níveis. No primeiro nível a estrutura reage quando uma grandeza de entrada ultrapassa certos limites anteriormente estabelecidos. No segundo nível as grandezas de entrada são processadas de forma inteligente, para, posteriormente ser formulada uma resposta adequada na estrutura.

Este conceito usa técnicas do campo da inteligência artificial para os actuadores agirem de maneira “inteligente”. Controladores inteligentes podem ser entendidos como algoritmos adaptativos, que interagem e aprendem com o meio ambiente. O conceito de inteligência deriva do facto de os algoritmos utilizados, assumirem um funcionamento semelhante ao

cérebro do Ser Humano. Estes algoritmos são convencionalmente chamados de algoritmos inteligentes.

### 3.3.1. Constituição de um sistema de monitorização de uma estrutura inteligente

Resumidamente, o sistema de monitorização inteligente, que suporta o conceito anteriormente descrito, é constituído por cinco partes:

- Sensores e sistemas de aquisição (órgãos sensoriais);
- Sistemas de transmissão (nervos sensitivos);
- Unidade de comando e controlo (cérebro);
- Sistemas de instrução (nervos motores);
- Dispositivos de controlo ou actuadores (músculos).

Na Figura18 está esquematizado um possível sistema de monitorização inteligente, onde  $y$  é o vector de dados analógicos dos sensores directamente para o computador periférico ou unidade de controlo activo,  $w$  é o vector de dados analógicos que transitam directamente para o computador central e  $u_i$  é a instrução para os actuadores, sendo  $u_1$  originária da unidade de controlo activo e  $u_2$  originária da unidade de comando e controlo. A unidade de controlo activo tem a finalidade de reagir, tal como no Ser Humano, como um instinto. Logo, esta unidade obterá melhor rendimento usando como dados de entrada  $y$  independente de  $w$ , de uma pequena rede de sensores de forma a simplificar a decisão de reacção.

Observe-se que a selecção dos sensores e dos actuadores adequados, para um objectivo concreto, é um campo de investigação permanentemente em aberto.

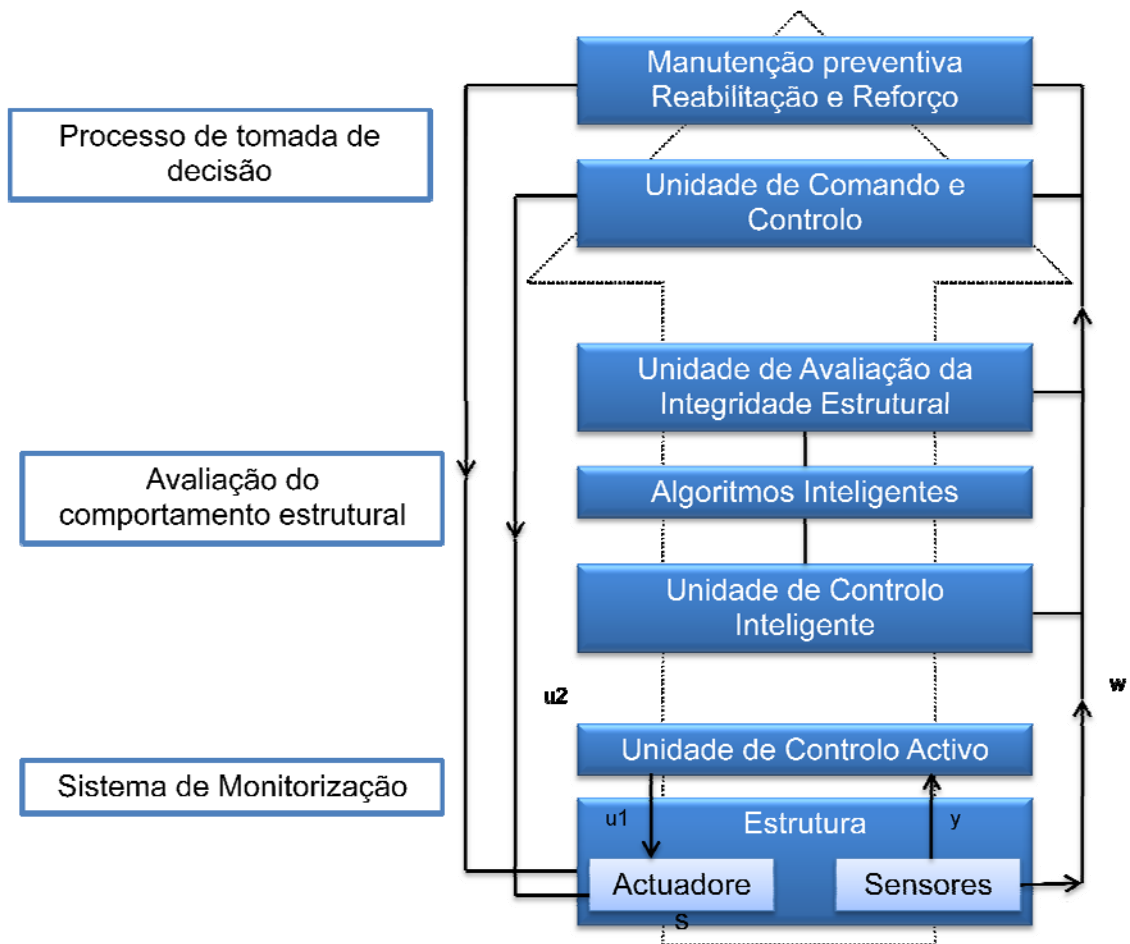


Figura 18 - Monitorização estrutural inteligente [F18].

Na Figura 18 está esquematizada a hierarquia da monitorização estrutural inteligente. O elemento chave deste tipo de monitorização reside no tratamento inteligente de dados num computador central, ao nível da avaliação do comportamento estrutural, através dos chamados algoritmos inteligentes. Estes algoritmos tratam os dados com dois objectivos bem definidos ao nível de duas unidades, unidade de controlo inteligente e unidade de avaliação da integridade estrutural.

Ao nível da unidade de controlo inteligente, os algoritmos devem ser capazes de avaliar comportamentos, prever respostas e propor ajustes estruturais à unidade de comando e controlo.

Ao nível da avaliação da integridade estrutural, os algoritmos devem ser capazes de identificar danos estruturais para em função do tipo de danos prever operações de manutenção, reabilitação ou reforço.

### 3.3.2. Identificação Inteligente de Danos

A ideia fundamental da identificação de danos estruturais está associada à necessidade de possuir um conhecimento alargado do tipo de dano, que medidas a tomar para o anular ou para ajudar a otimizar o processo de tomada de decisão.

Dano é definido como um conjunto de alterações introduzidas na estrutura e que afectam adversamente o comportamento actual e futuro da mesma. Geralmente, esta definição restringe-se a alterações nas propriedades do material (módulo de elasticidade e massa), condições de apoio e na compatibilidade dos elementos estruturais (fissuração ou redução de rigidez).

Os danos podem ser causados por várias motivos, sendo geralmente resultantes dos efeitos de deterioração no tempo devido à exposição ambiental. Contudo, as alterações no sistema estrutural podem ocorrer devido a variações no tempo (fadiga ou corrosão) ou serem introduzidas por acções ocasionais (sismos ou excesso de carga). Geralmente, a severidade de um dano é detectada, por exemplo, pela perda de rigidez devido à fissuração de elementos estruturais, com consequências na redução da capacidade de carga, ou por alterações na capacidade de dissipação de energia do sistema estrutural (amortecedores ou aparelhos de apoio).

Pensar na identificação de danos estruturais ou patologias como uma estrutura hierarquizada, pode ajudar a perceber o problema e o longo caminho a percorrer para uma exacta identificação dos danos. Inicialmente Rytter [12], propôs uma hierarquia com 4 níveis. Mais recentemente Worden [13] acrescentou mais um nível, definindo a hierarquia para identificação de danos nas estruturas segundo o esquema da Figura 19.

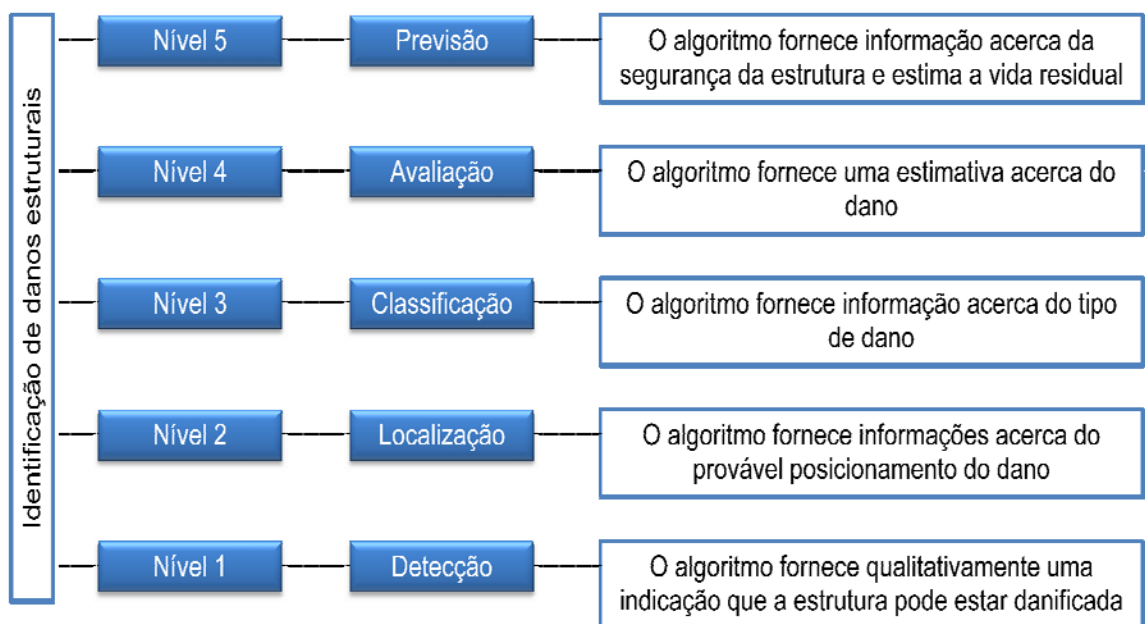


Figura 19 - Níveis para completa identificação de danos estruturais [F18].

A estrutura vertical é clara e cada nível requer que toda a informação dos níveis inferiores esteja disponível. Muitas das recentes aproximações desenvolvidas para identificação inteligente de danos estruturais baseiam-se na ideia de algoritmos de reconhecimento de padrões.

### 3.3.3. Reconhecimento de Padrões

O reconhecimento de padrões é uma disciplina científica que lida com métodos para descrição e classificação de objectos [14].

Durante a década de setenta assistiu-se a um considerável crescimento de interesse dos problemas de reconhecimento de padrões. Este interesse gerou um aumento da necessidade de desenvolvimento de métodos teóricos bem como software e hardware capazes de resolver sistemas de reconhecimento de padrões [15].

A noção fundamental do reconhecimento de padrões, independentemente do tipo de aproximação utilizada, é a noção de semelhança. É possível reconhecer dois objectos como sendo similares porque eles possuem atributos ou características semelhantes. Assim, a avaliação dos padrões de semelhança está fortemente relacionado com o conceito de reconhecimento de padrões.

O reconhecimento de padrões basicamente pressupõe a identificação de classes e ou descrição de um conjunto de objectos, processos ou acontecimentos [15]. Os processos ou acontecimentos com propriedades semelhantes são geralmente agrupados numa única classe. O número total de classes padronizadas num problema em particular é determinado pelo próprio processo, acontecimento ou pelo utilizador. Como a tarefa do reconhecimento de padrões está relacionada com capacidade de relacionar um objecto a uma classe, este método é geralmente conhecido como uma tarefa de classificação.

Por exemplo, na identificação de danos, as entradas na rede podem ser medidas que traduzam informações relevantes sobre os modos de vibração, as respostas estruturais em forma de deslocamentos ou extensões, ou as respostas devido às variações térmicas.

O problema de reconhecimento de padrões pode ser definido da seguinte forma: dado um conjunto de classes  $K$ , onde para cada classe  $k_i$  é conhecido um de padrão de comportamento tipo, dado um conjunto de dados que pertence a um comportamento qualquer, normalmente diferente do padrão tipo, e sem informar a sua classe, o sistema deve ser capaz de informar através da extracção de características  $X$  do conjunto de dados e por critérios de semelhança, a que classe pertence o conjunto de dados.

O problema de classificação de padrões pressupõe um esquema de unidades tal como esquematizado na Figura 20. Com base na aquisição de conjuntos de dados em bruto, que constituem o conjunto de entrada, o algoritmo do sistema faz a extracção de características desses dados, e armazena-os num vector  $X$ , que servirá de base para a classificação do

conjunto de entrada. Desta forma, e em termos gerais, o processo de classificação pode ser encarado como uma ferramenta, de identificação de comportamentos ou danos, e servir de apoio ao processo de tomada de decisão em estruturas de engenharia civil.

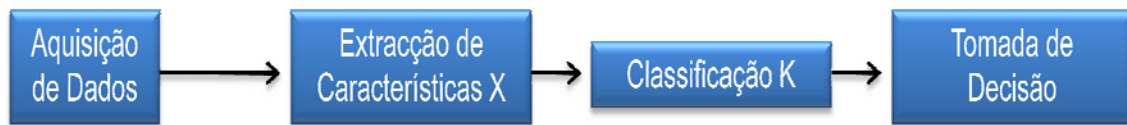


Figura 20 - Esquema de funcionamento de um sistema de reconhecimento de padrões [F18].

As unidades de um sistema de reconhecimento de padrões, no âmbito da monitorização estrutural, e as correspondentes tarefas são as seguintes:

- Aquisição de Padrões: que pode ser na forma de séries temporais de grandezas (deslocamentos, extensões, acelerações, etc.) da resposta estrutural;
- Extractor de Características: na forma de medidas, atributos ou primitivas derivadas dos conjuntos, que podem ser úteis na caracterização destes;
- Classificação: unidade fundamental do reconhecimento de padrões, na atribuição de classes a conjuntos de objectos, através de um algoritmo de aproximação;
- Tomada de Decisão: esta tarefa é o objectivo geral do âmbito da monitorização estrutural.

Resumidamente, um algoritmo baseado na ideia de reconhecimento de padrões simplesmente atribui uma classificação a um conjunto de dados de um comportamento, usualmente de um conjunto finito.

No caso de identificação de danos, os padrões de dados de entrada podem ser modos de vibração, respostas estruturais em forma de deslocamentos ou extensões, ou respostas devido às variações térmicas. A designação de uma classe pode, por exemplo, incluir o tipo de dano e localização deste na estrutura.

Contudo, serão necessários exemplos de conjuntos de dados correspondentes a cada classe, para poder treinar o algoritmo. Por exemplo, em ordem a classificar que um dado conjunto de dados observados indicam a presença de fissuração numa dada secção, o algoritmo terá de saber à priori como se comporta a estrutura com aquele tipo de dano e fazer corresponder uma classificação de dano com o observado [13]. Cada classe de dano deve ter um conjunto de leituras associadas unicamente a ela, para poder através da experiência, treinar ou ensinar o algoritmo.

Uma das aproximações mais usadas, para auxiliar o processo de classificação no conceito de reconhecimento de padrões, funciona através dos algoritmos baseados nas redes neuronais artificiais.

### 3.3.4. Redes Neurais Artificiais

Nos últimos anos a computação neuronal tem emergido como uma tecnologia prática e com aplicações de sucesso em muitos campos da engenharia [16]. A maioria dessas aplicações está relacionada com algoritmos de problemas de reconhecimento de padrões.

Os algoritmos foram originalmente desenvolvidos nos anos 50, com inspiração no funcionamento do cérebro humano e em particular os neurónios. Através de uma enorme semelhança entre o modelo computacional e o processo de aprendizagem do cérebro humano, este método realmente não resolve problemas na rigorosa definição matemática, mas fornece uma solução aproximada para esses mesmos problemas.

Devido aos seus atributos, tais como enorme adaptabilidade e robustez e a inerente capacidade para resolver sistemas lineares e não lineares, as redes neuronais artificiais começam a ser largamente usadas na identificação e classificação de danos estruturais, através do reconhecimento de padrões de um tipo de comportamento.

As redes neuronais artificiais têm provado, em vários campos de aplicação, serem uma ferramenta com utilidade, em problemas que de outra forma seria muito difícil de resolver usando outras formulações numéricas [17]. As principais aplicações podem ser encontradas em problemas tais como: reconhecimento de padrões (caracteres, voz, face, manuscritos), controlo, processamento de sinais, optimizações e associação de padrões [18].

Na engenharia estrutural, por exemplo, usando este método, o comportamento estático e dinâmico das estruturas pode ser empiricamente determinado, sem saber previamente as propriedades físicas destas, a partir do momento em que o algoritmo está devidamente treinado através dos dados recolhidos experimentalmente ou de um modelo numérico estrutural calibrado.

Este método é também conhecido como um método semi-paramétrico [19], em alternativa aos modelos paramétricos convencionais com distribuição probabilística bem definida, na medida em que a este método está associado a uma distribuição própria, independente das distribuições clássicas (por exemplo a distribuição Gaussiana).

#### *Princípio de Funcionamento*

Dada a elevada capacidade de processamento de informações do cérebro emergente das redes de neurónios, a Inteligência Artificial, ou mais conhecida actualmente por Inteligência Computacional, sempre procurou formular o processamento de dados recorrendo a modelos com redes de neurónios artificiais [20].

Ideologicamente é possível uma comparação entre o funcionamento dos neurónios do cérebro humano e as redes neuronais artificiais, tentando deduzir as características essenciais dos neurónios e das suas conexões. A Inteligência Computacional e as redes neuronais artificiais tentam representar as características essenciais dos neurónios e das suas conexões

por um processo de aprendizagem estatística. No entanto, dado que o conhecimento dos neurónios é ainda uma matéria complexa, e porque o poder computacional é limitado, os modelos são necessariamente idealizações grosseiras das redes de neurónios biológicos.

O funcionamento das redes neuronais artificiais é inspirado no conhecimento da organização do cérebro do Ser Humano. As redes são estruturadas como um conjunto de unidades ou nós (neurónios), interligados por conexões, usadas para transmitir sinais entre unidades, cuja intensidade é regulada pelo ajuste dos pesos das ligações.

### *Tipos de Redes Neuronais Artificiais*

Um enorme número de formulações de redes neuronais tem imergido na identificação ou classificação de sistemas. Exemplos dessas formulações são os Perceptrões Multicamada (Multilayer Perceptrons), Funções de Base Radial (RBF), as Máquinas de Vector de Suporte (SVM), as Redes Funcionais e as Redes Recorrentes.

As redes neuronais podem ser representadas graficamente com várias camadas de unidades de processamento interligadas entre si. O número de unidades por cada camada, bem como o próprio número de camadas, está relacionado com o dimensionamento da rede, o qual é definido pela complexidade do problema de reconhecimento de padrões. As unidades de processamento têm uma função de activação assumida pelo programador da rede. A escolha deste tipo de função depende do tipo de rede.

Uma rede com todas as entradas ligadas directamente às saídas é chamada de rede neuronal de uma camada, ou rede de perceptron [20]. Simplificadamente, em seguida centrasse o raciocínio numa rede Feedforward (de alimentação directa) com apenas uma camada.

### *Método de Aprendizagem*

Uma vez escolhida a estrutura e as funções de activação, as redes neuronais, tal como se ilustrou anteriormente, são treinadas para obter o ajuste dos pesos  $w$  de forma a minimizar uma determinada função de custo ou erro. Este procedimento é realizado através de conjuntos de dados de entrada até o somatório do erro, entre a saída do modelo e o alvo pretendido, seja inferior ao erro desejado ( $\text{erro}_{\max}$ ). Na Figura 21 está esquematizado o algoritmo para obter o ajuste dos pesos  $w$  de forma a minimizar uma determinada função de erro.

A ideia implícita a este algoritmo de aprendizagem é ajustar os pesos da rede para minimizar o erro entre o valor desejado e o valor processado. Deste modo, a aprendizagem é a procura da optimização do espaço dos pesos  $w$  [20].

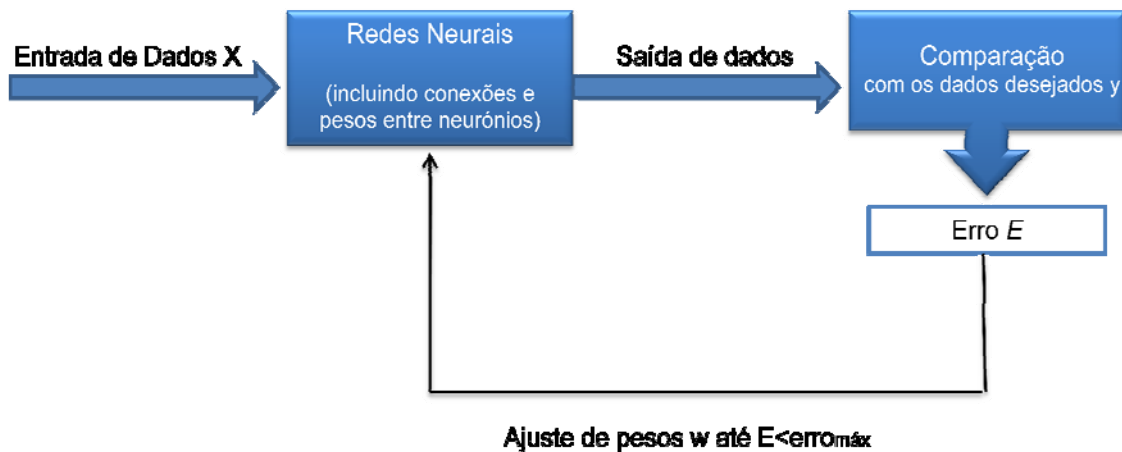


Figura 21 - Esquema do algoritmo para treinar as redes neurais [F18].

Alguns autores consideram as redes neuronais como caixas negras devido a estas serem modelos matemáticos de fenômenos com grande complexidade, que carecem de sistemas de equações diferenciais, integrais ou outras que os modelem convenientemente com base em leis físicas determinísticas ou probabilísticas[21]

#### *Vantagens e Desvantagens das Redes Neurais Artificiais*

As principais vantagens da utilização de redes neuronais, na generalidade dos problemas, são as seguintes [18]:

- Aprendizagem por exemplos: é desejado quando a complexidade computacional do problema a ser resolvido é elevada;
- Independência do problema: uma rede neuronal antes da aprendizagem não possui qualquer relação com os problemas que pretende resolver, o que significa que antes da aprendizagem o método é independente da estrutura.

As principais desvantagens da utilização são as seguintes:

- Caixa negra: por vezes o seu funcionamento complexo incentiva o utilizador das redes neuronais a utilizar esta ferramenta como uma autêntica caixa negra;
- O processo de aprendizagem, em redes complexas, pode ser moroso;
- O estado de arte das suas implementações ao nível da engenharia civil ainda limita certas aplicações.

### *Limitações e Problemas de Aplicação das Redes Neurais Artificiais*

Um dos problemas de aplicação das redes neuronais reside no facto de os danos poderem ocorrer em mais do que uma localização ao mesmo tempo. É necessário simular bastantes dados para treinar o algoritmo, onde todos os cenários devem ser simulados. Desta forma, o número de possíveis localizações de danos e níveis podem proporcionar um aumento exponencial do número de padrões de danos. Assim, o volume de dados em proporção com o número de danos, o ruído nos dados obtidos experimentalmente e a falta de algoritmos fiáveis de extracção de características para entrada nas redes neuronais são os maiores obstáculos à fiabilidade deste método.

As razões apontadas em cima vêm realçar o facto de quanto maior o número de classes, em princípio serão necessários mais critérios de semelhança para classificação, logo mais dados são requeridos para treinar a rede e mais complexa esta se torna.

Uma outra importante limitação das redes neuronais reside, e tal como todos os métodos que necessitam de serem treinados, no facto de requerem informação da estrutura com e sem danos. Este facto é uma dificuldade acrescida, sendo conhecidas as dificuldades em conseguir informação do comportamento de uma estrutural real com danos. Para ultrapassar este obstáculo é comum gerar-se informação através de modelos numéricos devidamente calibrados e simulando os danos possíveis de acontecer numa estrutura real. Desta forma, o sucesso deste método está estritamente ligado à precisão do modelo numérico na simulação da estrutura real.

## 3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Monitorizar as obras de arte é desejável com o objectivo de assegurar permanentemente a sua segurança e operacionalidade. A aplicação de um sistema de monitorização inteligente para além de uma permanente avaliação do comportamento e integridade estrutural, permitiria ainda ajustar o sistema estrutural em conformidade com as exigências do seu ambiente interno e externo. A monitorização inteligente, quando assumida na concepção estrutural, permite abrir novos caminhos à optimização estrutural e, portanto, as estruturas podem ser dimensionadas para funcionar na margem de segurança mínima. Consequentemente, os custos com os materiais estruturais podem ser significativamente reduzidos, tal como o valor total da obra.

A viabilidade da monitorização estrutural inteligente passa necessariamente pela implementação de algoritmos inteligentes de tratamento de dados ao nível de um computador central. Esses algoritmos teriam duas funções distintas. A primeira, e tal como o sistema nervoso do Ser Humano é capaz de apreciar as mudanças no meio externo e interno de forma consciente e inconsciente, os algoritmos inteligentes têm de ser capazes de

processar apenas a informação relevante para a unidade de avaliação da integridade estrutural e para a unidade de controlo inteligente. A segunda, e também como no Ser Humano onde o sistema nervoso garante a comunicação entre diferentes órgãos de forma ao corpo reagir em função do meio ambiente, na monitorização estrutural há necessidade de se estabelecerem critérios de alarme ou acção, ao nível do desenvolvimento de algoritmos inteligentes.

Os algoritmos inteligentes com grandes potencialidades na área da monitorização estrutural são os algoritmos baseados nos modelos computacionais de redes neuronais. Uma das vantagens de usar preferencialmente as redes neuronais artificiais, em detrimento de outras técnicas matemáticas, é que uma vez o algoritmo esteja adequadamente treinado, este requer não mais do que um segundo de processamento do computador para obter resultados, tal como na previsão de comportamentos e identificação de danos. A habilidade para aprender através de exemplos faz desta formulação uma ferramenta muito flexível e poderosa tanto na aplicação de métodos de reconhecimento de padrões para identificação inteligente de danos, como na previsão de respostas ou comportamentos estruturais.

Resumidamente, o papel dos algoritmos inteligentes, incorporados na monitorização inteligente de estruturas, passa necessariamente por:

- Filtragem de informação relevante recolhida pelos sensores;
- Avaliação da integridade estrutural;
- Identificação inteligente de danos estruturais;
- Identificação de veículos para controlo de tráfego;
- Previsão de comportamentos estruturais;
- Controlo estrutural inteligente.

### 3.5. COMPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Um sistema de monitorização ideal para a avaliação da integridade estrutural deve ser capaz de fornecer informação, a mais pormenorizada possível, acerca de danos estruturais. Contudo muitas vezes a identificação dos danos estruturais é complexa e difícil na medida em que existem muitos parâmetros difíceis de quantificar correctamente.

O objectivo deste ponto é introduzir as diversas partes de um sistema de monitorização, expor conhecimentos teóricos acerca do seu funcionamento e apresentar estratégias e recomendações para uma correcta caracterização do comportamento estrutural em obras.

Numa tentativa de clarificar as diversas partes de todo o processo de um sistema de monitorização, dividiu-se este em seis subconjuntos tal como se esquematiza na Figura 22. Observe-se que existem outras formas de divisão sem demarcação definida, contudo na generalidade todas as formas de divisão sobrepõem-se. Assim, o processo divide-se em rede

de sensores, sistemas de aquisição, sistema de transmissão de dados, processamento e armazenamento de dados, tratamento dos dados e finalmente avaliação do comportamento estrutural.

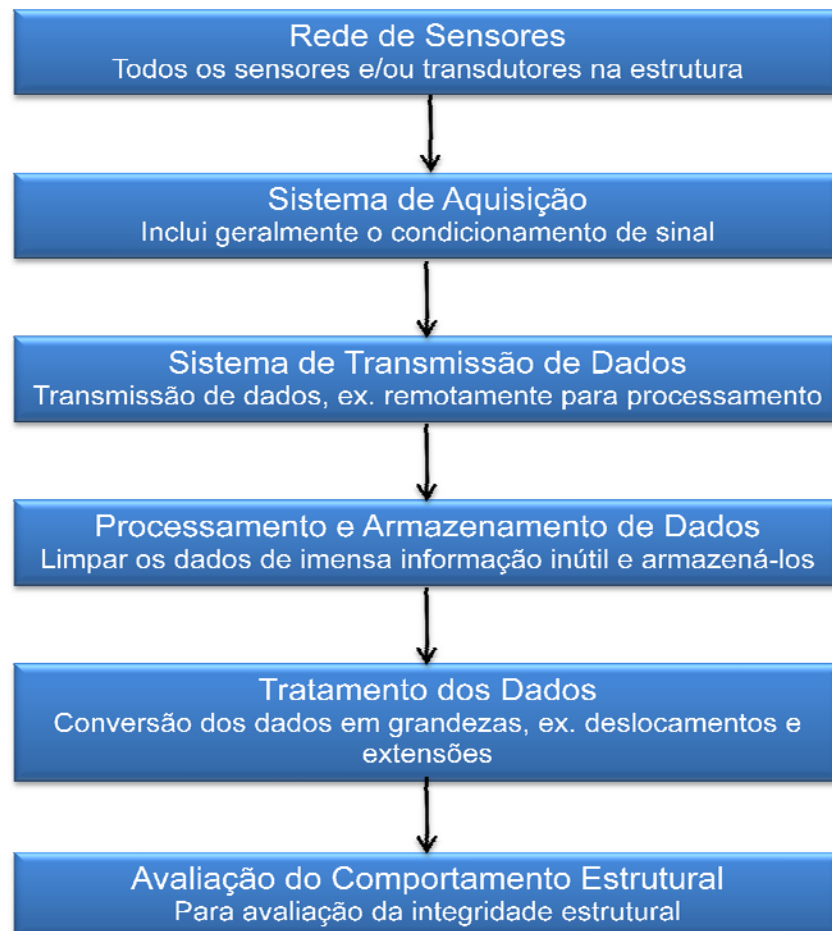


Figura 22 - Subconjuntos de um sistema de monitorização [F18].

A implementação de um sistema deste tipo envolve a coabitação de várias disciplinas, tais como estruturas, materiais, electrónica, informática, etc.

### 3.5.1. Rede de Sensores

Os sensores devem ser claramente seleccionados em função das suas potencialidades, para que assim forneçam com maior precisão a informação pretendida acerca da resposta estrutural. Para a monitorização de estruturas os sensores devem ser robustos, fiáveis e estáveis no tempo.

Também deve ser assegurado que as características de medição destes não sejam vulneráveis às condições ambientais como temperatura, humidade e às influências

electromecânicas em forma de ruído como campos eléctricos e magnéticos. Para precaver ou anular os efeitos de ruído no sinal de saída do sensor, estes devem ser devidamente protegidos ou compensados.

O comprimento dos cabos ou cablagens, para transferir o sinal dos sensores ou transdutores para os sistemas de aquisição, deve ser o menor possível para evitar perdas de sinal ou introdução de ruído.

No programa de monitorização para instalação de sensores, cabos e sistemas de aquisição deve estar sempre presente que geralmente as estruturas não estão protegidas contra actos de vandalismo, e que para o sistema de monitorização ser durável e económico todos os componentes devem ser facilmente substituíveis e sempre que possível recuperáveis. Embora existam transdutores com sistemas integrados de condicionamento de sinal, este também pode ser realizado no sistema de aquisição.

### 3.5.2. Sistemas de Aquisição

Existem vários sistemas de aquisição no mercado e para várias soluções. Geralmente os critérios básicos na escolha de um sistema de aquisição são a sua autonomia em obra e a frequência de aquisição de dados.

Existem vários tipos de sistemas de aquisição, com diversas funcionalidades, mas que na generalidade se sobrepõem. Contudo, o sistema de aquisição, em geral, é o dispositivo responsável pela recepção, condicionamento, armazenamento e transmissão das leituras registadas nos sensores.

O sistema de aquisição está dividido em sistema analógico e sistema digital. A transição entre os dois sistemas é realizada pelo conversor analógico-digital (A/D) ou digital-analógico (D/A).

Uma das potencialidades de um sistema de aquisição é a possibilidade de automaticamente emitir alarmes, sempre que determinados valores previamente programados sejam excedidos. Os alarmes podem accionar um sinal de saída, através dos canais digitais para outros sistemas auxiliares, como por exemplo a emissão de um sinal sonoro ou luz e alteração da frequência de aquisição de parte ou totalidade dos sensores instalados. Este sistema permite também gerir o processo de armazenamento dos dados, pois por vezes pode ser vantajoso armazenar apenas dados que excedem um determinado limite.

### 3.5.3. Sistema de Transmissão de Dados

Quando se fala do sistema de transmissão de dados, entende-se como o meio de comunicação dos dados do sistema de aquisição no local da obra de arte para o sítio de processamento de dados, geralmente em laboratório, gabinete de projecto ou posto de controlo. Durante os testes estáticos ou dinâmicos esta comunicação é geralmente realizada da forma mais básica, isto é, com ligação directa do sistema de aquisição ao computador, por exemplo através de um cabo.

Os recentes avanços dos sensores, dos sistemas de aquisição, tecnologia sem fios wireless e a transmissão de dados em banda-larga tornou possível adquirir fluxos de dados em tempo real do local da obra para o laboratório, permitindo uma rápida e uma automática avaliação do comportamento estrutural, bem como a disponibilização da informação na Internet para os donos de obra.

### 3.5.4. Processamento e Armazenamento de Dados

Os dados recolhidos directamente pelos sensores por vezes contém muita informação que não é relevante e cujo armazenamento para tratamento é desnecessário. Técnicas eficientes de processamento tornam a interpretação dos dados mais fácil, mais rápida e com maior precisão.

Depois de os dados serem processados há necessidade de armazená-los, para criar uma base de dados ou para serem devidamente tratados durante a avaliação do comportamento estrutural. A base de dados é fundamental para que os dados possam ser reutilizados mais tarde na análise da evolução da resposta estrutural ou para futuras interpretações. Observe-se que os dados devem ser armazenados ordenadamente e catalogados para fácil interpretação. O problema de gestão dos dados armazenados surge com a monitorização contínua, na medida em que o armazenamento e a capacidade de transmissão de dados são limitados.

Um bom exemplo de abordagem do problema do processamento e armazenamento dos dados reside na própria abordagem da avaliação da integridade estrutural. No caso de pontes e viadutos, a avaliação da integridade estrutural através de um sistema de monitorização pode ser realizado de duas formas: através da comparação de valores de pico provocados pelo tráfego ou através da comparação da resposta estrutural no tempo devido às acções ambientais.

As duas formas de avaliação requerem um processamento diferente dos dados. A gestão de algoritmos adequados para controlo da aquisição e armazenamento de dados é uma questão importante num sistema de monitorização e afecta directamente o volume de dados armazenados bem como o tipo de avaliação que se pretende obter.

Por exemplo, as extensões lidas nos diversos elementos estruturais permanecerão basicamente as mesmas caso não haja atravessamento de tráfego ou serão sujeitas a variações lentas devido aos efeitos térmicos. Para evitar excessivos ficheiros de dados não será necessário armazenar toda a quantidade de dados lidos. Através do desenvolvimento de algoritmos de optimização, desenvolvidos especificamente para o caso, um sistema de processamento deve ser capaz de apenas gravar dados que ultrapassem um certo limite estabelecido e que descarte os restantes.

A avaliação da integridade estrutural através da comparação dos picos da resposta estrutural em determinadas secções não requer armazenamento contínuo dos dados. Neste caso apenas seria necessário por exemplo recolher amostras periódicas de passagens de veículos e comparar as sucessivas passagens. Caso fosse registada uma tendência da resposta estrutural, esta seria sinal de anomalias estruturais que teriam de ser posteriormente diagnosticadas. No caso das variações lentas devido, por exemplo, à temperatura, o sistema de aquisição poderá estar preparado para apenas armazenar dados com frequências de aquisição muito baixas. Devido à forte correlação entre a temperatura ambiente e a resposta estrutural, seria de esperar que qualquer anomalia alteraria a tendência de resposta. Em qualquer dos casos o sistema de aquisição terá de ser sempre programado de forma a ir de encontro com o tipo de avaliação que se pretende fazer.

Numa outra linha de optimização dos dados armazenados, em muitos casos pode ser vantajoso descartar os dados em bruto depois de estes terem sido correctamente convertidos em grandezas relacionadas directamente com a resposta estrutural.

### 3.5.5. Tratamento dos Dados

Depois de os dados serem processados e armazenados, estes estão disponíveis para serem tratados com a finalidade de os transformar em informação útil, pois até esta fase os dados estão geralmente em forma de leituras de variações eléctricas.

## 3.6. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

A instalação de sensores e de sistemas automáticos de aquisição é só o início da monitorização estrutural. A interpretação dos dados recolhidos é a razão da existência do sistema de monitorização.

A avaliação do comportamento pode-se dividir em quatro subsistemas de monitorização:

1. testes estáticos;

2. testes dinâmicos;
3. monitorização periódica;
4. monitorização contínua.

Na avaliação do comportamento estrutural deve estar sempre presente que é impraticável utilizar um raciocínio totalmente determinístico, uma vez que os dados do problema - acções e propriedades dos materiais - são quase sempre afectados por incertezas que tornam difícil a definição de valores exactos. As fontes de incerteza são fundamentalmente as seguintes:

- Incertezas na previsão das acções;
- Dispersão estatística das propriedades mecânicas dos materiais;
- Incertezas introduzidas pelas tolerâncias dimensionais das peças e elementos estruturais;
- Defeitos de execução, por exemplo nas peças de betão armado. Estes defeitos introduzem incertezas nas dimensões das peças, no posicionamento das armaduras e na resistência exacta do betão;
- Incertezas inerentes aos métodos de cálculo, pois geralmente os métodos são baseados em hipóteses simplificativas e pressupostos, tais como linearidade da relação tensão-extensão e manutenção da geometria inicial das estruturas, sendo que com o tempo estes pressupostos podem não permanecer válidos devido à degradação dos materiais.

Devido a estes factores aleatórios, a avaliação da integridade estrutural e a verificação da segurança têm necessariamente uma base probabilística, uma vez que é impossível garantir uma probabilidade nula de serem atingidos estados limites.

### 3.6.1. Subsistemas de Monitorização da Integridade Estrutural

Para fácil descrição das diversas formas de monitorização da integridade estrutural, em seguida subdivide-se em quatro subsistemas, tal como esquematizado na Figura 23. Embora utilizando por vezes métodos diferentes, todos os subsistemas têm o objectivo último de avaliação do comportamento estrutural e da sua integridade.

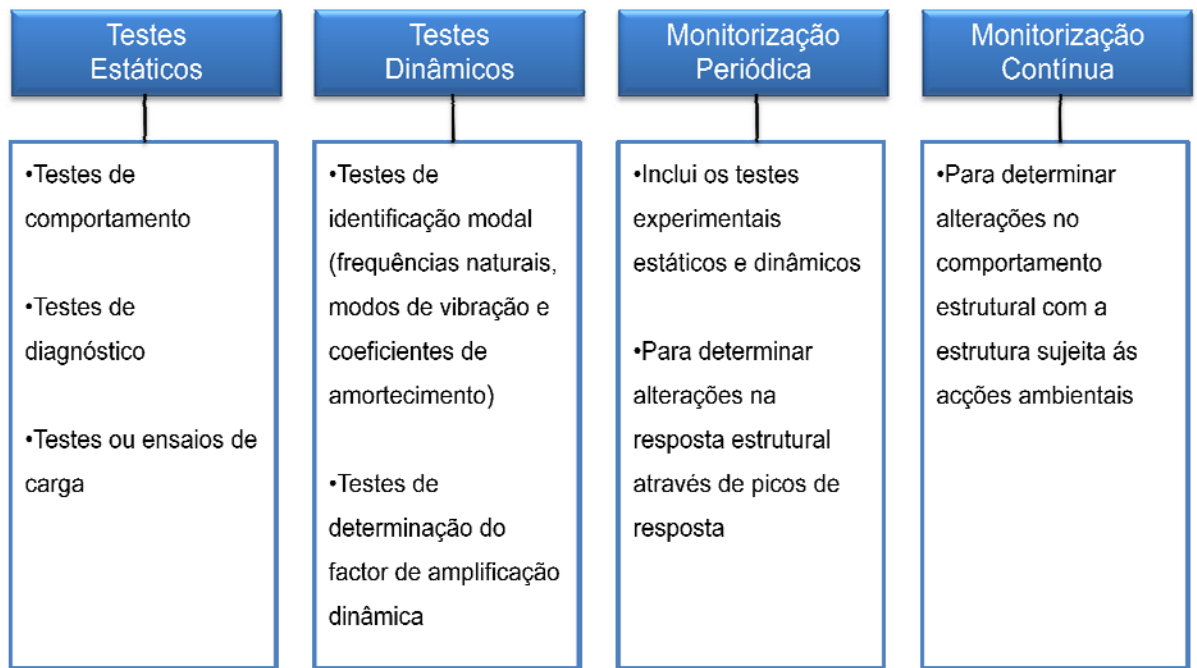


Figura 23 - Subsistemas de monitorização da integridade estrutural [F18].

### *Testes Estáticos*

Os testes estáticos são a forma mais básica de observação de estruturas, podendo ser realizados em obras com ou sem sistemas de monitorização. Em ambos os casos a selecção das grandezas a observar depende das características e da dimensão da estrutura. No caso geral podem ser medidos os deslocamentos verticais nos vãos, as rotações nos apoios, a abertura de fendas no betão caso existam e os deslocamentos horizontais nas juntas de dilatação.

Os testes estáticos podem ser usados no processo de identificação estrutural ou para validar o sistema de monitorização permanente [22].

Existem três tipos de testes estáticos que diferem no objectivo inerente: testes de comportamento, testes de diagnóstico e testes de carga. Em seguida faz-se uma breve descrição dos vários tipos, realçando nos aspectos essenciais de cada um.

### *Testes de Comportamento*

Os testes de comportamento são geralmente realizados para estudar o comportamento mecânico da estrutura ou para verificar certos métodos de análise. Os testes de comportamento fornecem informação acerca da distribuição de cargas nos diferentes elementos estruturais. Os resultados destes testes podem, por exemplo, serem usados para calibrar métodos analíticos de análise.

### *Testes de Diagnóstico*

Os testes de diagnóstico têm a finalidade de explicar as razões de a estrutura apresentar um comportamento diferente do previsto na fase de projecto. Estes testes são executados para diagnosticar os efeitos da interacção dos elementos estruturais e não estruturais. Por exemplo, os testes de diagnóstico podem ser realizados para estabelecer as condições de restrição rotacional do tabuleiro no topo de um pilar de uma ponte. A vantagem dos testes de diagnóstico é a localização de fontes de desgaste que podem existir na estrutura, devido a interacções estruturais não previstas, e consequentemente determinar possíveis benefícios dessa mesma interacção estrutural.

### *Testes de Carga*

Os testes ou ensaios de carga são geralmente levados a efeito para estabelecer a capacidade de carga das estruturas em regime elástico. Sempre que possível é recomendável que a estrutura seja sujeita ao máximo de carga possível, de forma a maximizar as respostas estruturais e sem danificar a mesma.

Um teste de carga bem planeado pode ser realizado através do aumento gradual das cargas aplicadas, assegurando através da visualização na interface de um computador que as cargas aplicadas não submetem a estrutura a deformação para além do comportamento elástico.

Desta forma procura-se verificar para os níveis de carga introduzidos, se estes produzem perdas de rigidez na estrutura por ocorrência de fendilhação nas peças de betão armado ou plastificação nas peças em aço. As perdas de rigidez podem ser detectadas pela não recuperação elástica das grandezas medidas, através da confrontação das leituras finais com as registados antes da aplicação das cargas.

Observe-se que os testes de carga são testes de natureza não destrutiva. Desta forma, o valor da carga a aplicar deve ser avaliada antecipadamente através da construção de modelos simples.

### *Testes Dinâmicos*

Os testes dinâmicos são relativamente mais recentes do que os testes estáticos. O desenvolvimento tecnológico e informático permitiu uma plena implementação destes testes, sendo hoje parte integrante de um sistema de monitorização.

Os testes dinâmicos podem ser subdivididos em dois grupos: testes de identificação modal; e testes de determinação do factor de amplificação dinâmica.

*Testes de Identificação Modal*

Os testes de identificação modal são usados para determinar as propriedades modais da estrutura: frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento. O conhecimento das características dinâmicas tem importância geralmente para identificação de danos estruturais, para verificar a conformidade com o dimensionamento e para usar na calibração de modelos numéricos.

A forma de determinar as propriedades modais varia em conformidade com as ferramentas de aquisição disponíveis e com o tipo de estrutura. As aproximações experimentais correntemente utilizadas estão separadas em três tipos de testes:

1. testes em vibração forçada;
2. testes em vibração livre;
3. testes em vibração ambiental.

Os testes em vibração forçada usam uma fonte de excitação bem conhecida com bastantes vantagens. Tal como um sistema de monitorização é montado para captar certos aspectos do comportamento estrutural, dimensionar um sistema de excitação pode também ser usado para expor aspectos de comportamento estrutural desejados. Está ao alcance do operador escolher os parâmetros de excitação tais como localização da força, conteúdo de frequências excitáveis, amplitude, duração e hora do dia. A amplitude das excitações de vibração forçada pode ser programada de forma a ser mais elevada do que a ambiente ou níveis de ruído electrónico, para ajudar e isolar destes as alterações no sistema estrutural. Este factor é uma grande vantagem em relação aos testes em vibração ambiental, mas à custa de equipamentos mais caros. Os métodos geralmente utilizados para impor vibrações forçadas são o vibrador mecânico de massas excêntricas, vibradores electrodinâmicos, vibradores electro-hidráulicos e martelo de impulsos [23].

Os testes em vibração livre ocorrem geralmente em estruturas flexíveis. Através da libertação de um corpo ou uma massa de uma posição de repouso, deixando a estrutura a vibrar, com decaimento em vibração livre, por dissipação de energia por fricção ou geração de calor. A análise da estrutura em vibração livre pode ser usada para determinar as propriedades dinâmicas da estrutura.

Os testes em vibração ambiental utilizam fontes ambientais de excitação como o vento, tráfego e circulação de pessoas. As vantagens da utilização da excitação ambiental são o baixo custo, a não interrupção da livre circulação de tráfego e a excitação permanente. Contudo, existem factores que são apontados como desvantagens, tais como a variabilidade de amplitude da excitação, duração, direcção, conteúdo de frequências e a dificuldade em medir a excitação com precisão. Estes testes, pela sua operacionalidade, são geralmente os indicados para incorporar um sistema de monitorização. O funcionamento contínuo permite monitorizar, para além da evolução das propriedades dinâmicas, a resposta dinâmica da estrutura, a intensidade e direcção do vento, actividade sísmica e a densidade do tráfego.

Normalmente a resposta da estrutura é medida através do posicionamento estratégico de acelerómetros. A selecção da localização e do número de acelerómetros requerem experiência na condução de testes dinâmicos como também conhecimento prévio do comportamento da estrutura. A elaboração de um modelo numérico, em casos duvidosos, é essencial para seleccionar os pontos mais significativos para posicionamento dos acelerómetros.

#### *Monitorização Periódica*

A monitorização periódica pode ser usada especificamente para detectar alterações no comportamento estrutural, por comparação de respostas obtidas através de medições realizadas com um determinado intervalo de tempo. As técnicas e procedimentos neste sistema de monitorização são semelhantes às usadas para os testes estáticos e dinâmicos.

#### *Monitorização através de Testes sobre Cargas de Tráfego*

Através do sistema de monitorização é possível, periodicamente, proceder por exemplo à leitura de valores de pico de extensões provocadas por cargas de tráfego conhecidas. Por comparação directa dos valores de pico, pela distribuição transversal de esforços, reacções de apoio, etc., é possível detectar tendências de perda de rigidez. Nestes casos é útil proceder-se ao ajuste do modelo numérico estrutural de elementos finitos, para ajudar na interpretação dos comportamentos e na identificação dos danos.

#### *Monitorização através de Vibrações Ambientais*

Alterações no comportamento estrutural são geralmente associáveis com alterações nas características de vibração. Alterações como redução localizada de rigidez afectam o comportamento global da estrutura e, desta forma, as frequências naturais de vibração bem como os modos de vibração associados. Consequentemente, as alterações podem ser determinadas por testes de identificação modal.

Esta é uma técnica que tem sido muito usada para detecção de danos. Se os danos estruturais aumentam na estrutura, as frequências mais baixas diminuem e o amortecimento aumenta.

Uma solução passa por se fazerem medições na parte da estrutura com elevada probabilidade de estar danificada, para ajudar a detectar danos locais através de análises das respostas dinâmicas.

### *Monitorização da Abertura de Fissuras*

Os elementos de betão, com excepção dos elementos pré-esforçados, desenvolvem fissuras durante as primeiras idades, tanto devido a fenómenos de retracção como devido a cargas elevadas. Até à formação das fissuras estarem estabilizadas, o comportamento do elemento de betão permanece inelástico. Quando a abertura de fissuras interrompe o seu desenvolvimento, debaixo de um perfil de carregamento, a estrutura comporta-se em regime elástico. Caso contrário, se a formação de fissuras continua a aumentar indefinidamente a integridade estrutural pode estar ameaçada. Nestas situações, o acompanhamento da formação de fissuras e da sua abertura pode ser acompanhado através da monitorização periódica.

### *Monitorização Contínua*

A monitorização contínua actualmente começa a fazer parte integrante do projecto de uma obra. Todavia, a monitorização contínua apenas é aplicada em obras consideradas importantes pela sua integração no contexto social, quando existam dúvidas acerca da sua integridade estrutural ou quando o dimensionamento inclui materiais estruturais novos, cujo comportamento a longo prazo é ainda desconhecido.

A monitorização contínua é a que melhor caracteriza e quantifica acção ambiental e a corresponde resposta estrutural. Além disso, esta é um requisito das estruturas inteligentes, tanto para avaliar a integridade estrutural como no controlo estrutural.

Vários estudos têm sido feitos através da monitorização contínua, com o objectivo de aferir a influência da acção da temperatura na resposta estrutural, concluindo-se através da análise dos dados medidos que o comportamento da estrutura é essencialmente governado por flutuações diárias e anuais de temperatura.

## 3.6.2. Processo de Identificação Estrutural

O conceito de identificação estrutural foi introduzido na engenharia civil em 1978 por Liu e Yao. A identificação estrutural é o procedimento que permite caracterizar racionalmente as estruturas e as acções ambientais a que estão sujeitas. Geralmente este processo é usado para resolver numerosos problemas relacionados com a avaliação da integridade estrutural das infraestruturas de engenharia civil.

O uso da identificação estrutural como uma ferramenta permite o desenvolvimento de uma base de dados acerca da integridade da estrutura. É também uma ferramenta eficiente para detecção de danos estruturais e monitorização da evolução destes. Este procedimento

pode ajudar no entendimento de mecanismos de deterioração, na identificação da eficácia de técnicas de manutenção e na calibração de novas ferramentas para dimensionamento.

Uma completa identificação estrutural requer uma integração conjunta entre os testes experimentais e os modelos numéricos estruturais, para quantificar os parâmetros dos modelos, avaliar o comportamento estrutural e apoiar o processo de tomada de decisão.

Os testes estáticos e dinâmicos são elementos chave da identificação da estrutural, contudo neste campo os dinâmicos oferecem vantagens significativas, nomeadamente a análise modal através dos testes de identificação modal. A análise modal é a única técnica que fornece uma medida directa das características mecânicas globais da estrutura.

Apesar da importância dos testes experimentais, a condução de um programa completo de identificação estrutural é constituído por várias fases:

*a) Recolha de informação em documentos técnicos*

Uma primeira aproximação à avaliação da integridade estrutural passa inevitavelmente pela recolha de toda a informação em documentos técnicos, memórias descritivas, peças desenhadas ou relatórios geotécnicos que serviram de base para a construção da estrutura. Antes de iniciar a avaliação é imprescindível rever todos os documentos de dimensionamento e do processo construtivo (para conhecer todos os estados de tensão experimentados anteriormente pela estrutura) bem como anteriores relatórios de inspecções e manutenção, com a finalidade de reunir toda a informação da estrutura a ser avaliada. É desejável a construção de um modelo numérico prévio, que represente todo o conhecimento inicial da estrutura, para posteriormente ser refinado e calibrado. As propriedades dos materiais e a geometria da estrutura podem ser obtidas através de regulamentos, peças desenhadas e outros documentos de dimensionamento, de ensaios de conformidade durante a construção e relatórios de recentes inspecções de manutenção. As cargas de serviço podem ser determinadas, na falta de dados mais concretos, dos regulamentos em vigor.

*b) Avaliação da condição actual através de inspecções visuais*

Geralmente é conveniente uma abordagem inicial através de inspecções visuais, para fazer um levantamento de possíveis anomalias estruturais detectadas visualmente e confirmar se a estrutura foi executada de acordo com os documentos de projecto. Nesta fase deve também ser previsto a utilização de testes não destrutivos, nomeadamente na determinação do módulo de elasticidade do material.

*c) Preparação dos testes experimentais*

A preparação dos testes passa pela elaboração de um programa de trabalhos, através de análises de sensibilidade ou recorrendo ao modelo numérico inicial não calibrado e, sempre que possível, a ensaios prévios. O programa deve incluir o número e localização de sensores, a configuração e tipo de cargas estáticas a aplicar, bem como toda a organização dos testes. Um dos aspectos importantes nesta fase é a escolha adequada do tipo de cargas a utilizar durante os testes. Estas devem ser cuidadosamente estudadas de maneira a que a deformação estrutural ocorra sempre no domínio elástico.

*d) Testes experimentais*

Os testes estáticos são geralmente efectuados para averiguar a interacção entre os vários elementos estruturais, para calibrar o modelo numérico, para avaliar o efeito de danos e averiguar o efeito de medidas correctivas. Os testes dinâmicos são geralmente realizados para extrair as propriedades dinâmicas da estrutura, como frequências naturais, modos naturais de vibração e coeficientes de amortecimento, para verificar o comportamento global da estrutura e de mecanismos críticos que afectam os modos de vibração.

*e) Processamento dos dados experimentais*

O processamento e tratamento dos dados medidos dos testes experimentais são um passo muito importante para aumentar o nível de confiança da informação acerca da estrutura.

*f) Calibração do modelo numérico*

A calibração do modelo numérico é um processo de convergência entre a resposta estrutural medida e a do modelo numérico. No caso dos testes estáticos, estes são úteis depois de correlacionadas as implicações físicas dos dados experimentais, tais como deslocamentos ou rotações, com a distribuição de cargas. As propriedades mecânicas, as condições fronteira e a continuidade dos elementos estruturais são ajustados e calibrados até convergência da resposta numérica com a resposta medida experimentalmente.

*g) Avaliação da integridade estrutural*

Depois de o modelo estar devidamente calibrado, este serve como uma ferramenta para avaliação integridade estrutural e apoio ao processo de tomada de decisão. Este pode ser usado para avaliação da capacidade de carga, estimação das forças em elementos estruturais críticos, bem como avaliação das condições de serviço da estrutura, nomeadamente na avaliação das tensões, deformações e vibrações. Contudo, deve estar presente que os modelos calibrados com dados experimentais representam apenas a condição e a integridade da estrutura num espaço curto de tempo, uma vez que as cargas e as condições da estrutura podem estar em constante mutação. Desta forma, alguns testes experimentais devem ser repetidos periodicamente para monitorizar alterações em certas propriedades.

A relação entre a identificação estrutural e a monitorização estrutural pode ser resumida da seguinte forma: a monitorização da integridade estrutural consiste na utilização sucessiva de séries de processos de identificação estrutural, onde cada um fornece leituras válidas durante um curto período tempo de vida da estrutura. Quando comparadas a longo prazo, essas leituras podem ser entendidas como monitorização contínua dos efeitos de cargas críticas e da correspondente resposta estrutural. Desta forma, qualquer acontecimento que crie abruptamente ou lentamente alterações significativas no estado de tensão ou deformação, e que possam causar danos na estrutura, é reconhecida atempadamente e apropriadas decisões podem ser tomadas.

Quando a identificação estrutural é aplicada periodicamente, a variação das propriedades da estrutura no tempo, por processos de deterioração ou danos causados por acontecimentos inesperados, podem ser identificados e monitorizados. Para isso o modelo numérico terá de ser correctamente actualizado e de acordo com as novas medidas obtidas.

Note-se que as condições ambientais, especialmente a temperatura, podem ter larga influência nas leituras estáticas e dinâmicas. Este aspecto deve ser considerado quando se procede à avaliação das propriedades estruturais.

Observe-se que qualquer monitorização estrutural requer pelo menos um processo de identificação estrutural no início da sua entrada em serviço, para caracterização das propriedades iniciais da estrutura.

### 3.6.3. Níveis de Avaliação Estrutural

A avaliação da integridade das estruturas pode ser realizada através de vários métodos de análise estrutural, cujo grau de complexidade é proporcional ao refinamento da análise exigida. Os objectivos fundamentais de uma avaliação é analisar o estado corrente de capacidade de carga e prever o comportamento futuro com o máximo de rigor e mínimo esforço. Para isso, devem ser usados modelos que representem com o máximo rigor as cargas na estrutura, o comportamento desta e a resistência dos seus elementos para que, desta forma, o modelo seja capaz de reflectir as condições reais da estrutura.

Geralmente é preferível começar por métodos de análise mais simples e conservativos, e recorrer progressivamente a métodos mais complexos e sofisticados quando a capacidade de carga é insuficiente. No caso da avaliação através de um nível baixo falhar, deve-se passar para níveis superiores. Observe-se que a grande diferença entre o dimensionamento e a avaliação é que na avaliação as incertezas podem ser significativamente reduzidas através dos dados experimentais.

Associados a cada método de análise podem estar métodos de verificação da segurança, que traduzam margens de segurança como elemento indicador da distância entre o estado real da estrutura e o estado limite último. Estes métodos podem ser de natureza determinística baseados nos factores globais de segurança, semi-probabilística baseados nos factores parciais de segurança ou probabilística [23].

Na Figura 24 está representado um esquema dos vários níveis de análise para avaliação estrutural. Os seis níveis de análise propostos foram estabelecidos para estruturar o processo de avaliação, sendo assim apenas um dado indicativo com fronteiras flexíveis entre os diversos níveis. No esquema da figura está estipulado para cada nível o grau de complexidade dos métodos de análise e os métodos de verificação de segurança.

O Nível 0 corresponde a uma avaliação baseada em inspecções visuais e na experiência do engenheiro de estruturas. Neste nível podem ser tiradas algumas ilações sobre o comportamento da estrutura através da observação de efeitos de deterioração visual como a corrosão das armaduras, indícios de fissuração e destacamentos no betão.

O Nível 1 corresponde a uma avaliação baseada na leitura de variáveis de resposta em serviço e comparando-as com valores limite. Esta é uma das formas mais simples de avaliação,

através da comparação directa de valores medidos  $X_m$  com os valores limite pré-definidos  $X_l$ . A verificação da segurança é realizada por comparação, sendo suficiente a verificação a seguinte condição:

$$X_m \leq X_l$$

Esta avaliação pode ser realizada para cargas normais de serviço ou para testes de carga. A este nível não está previsto usar modelos numéricos estruturais. Os valores limite, tais como a limitação de flechas ou acelerações, podem ser dados em regulamentos ou normas específicas.

No Nível 2 a avaliação da capacidade de carga e do comportamento em serviço é realizado através de processos simples de identificação estrutural. Quando a estrutura ou o elemento estrutural é considerado como não conforme, deve-se avançar para o nível 3 para poder refinar a metodologia de análise. No Nível 3 o processo é semelhante, aumentando contudo o grau de refinamento do processo de identificação estrutural, onde se admite a utilização de ensaios não destrutivos para avaliação das propriedades da estrutura, e o aperfeiçoamento dos modelos numéricos de análise.

No Nível 2 e 3 a verificação da segurança é geralmente realizada segundo o conceito de factores parciais de segurança. Os factores parciais de segurança podem ser obtidos em regulamentos ou normas específicas. Caso não existam regulamentos ou normas específicas que estipulem os factores de segurança para avaliação, devem ser usados os factores parciais de acordo com os regulamentos de dimensionamento.

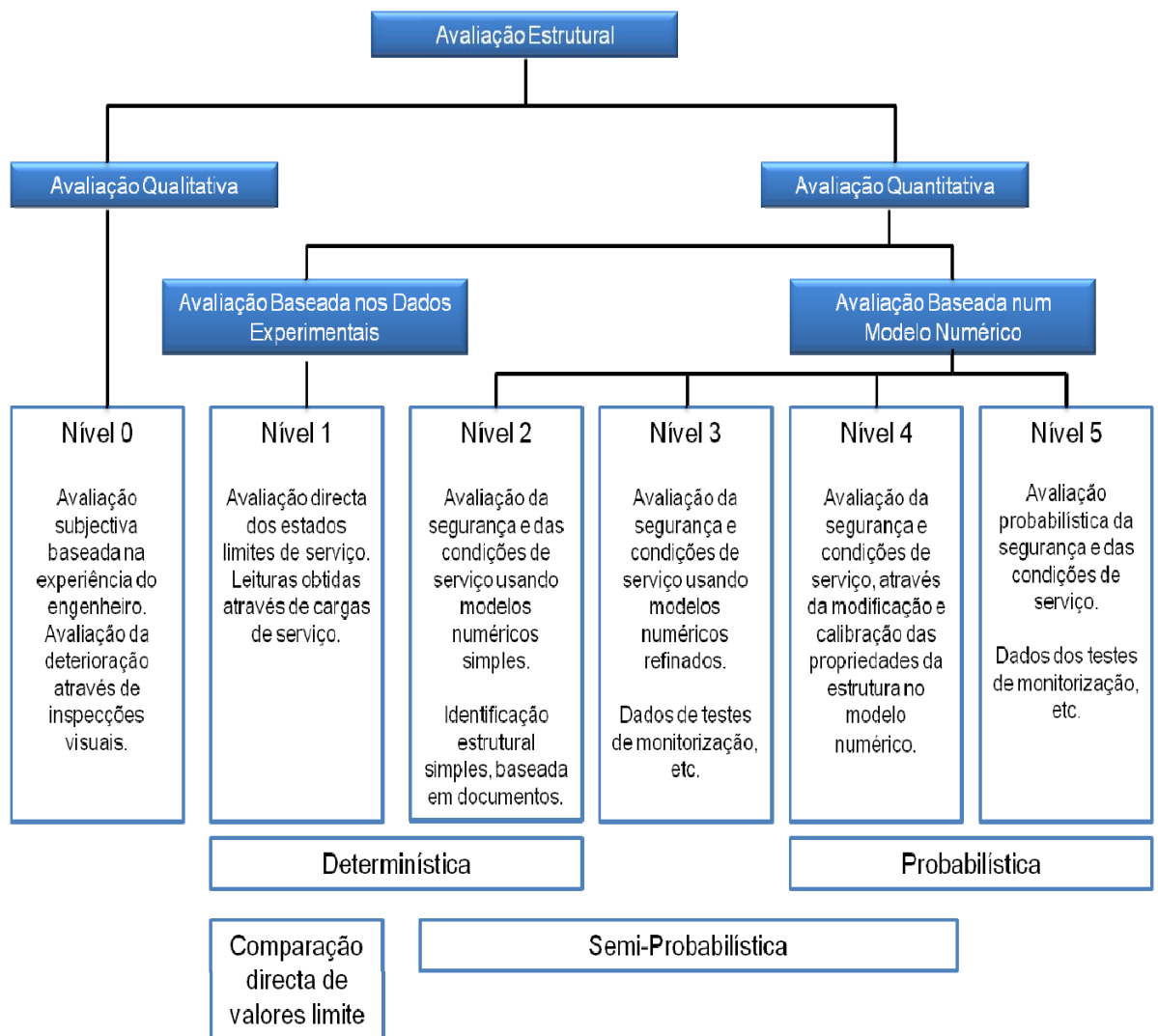


Figura 24 - Contexto dos níveis de avaliação estrutural [F18].

O Nível 4 é baseado em métodos probabilísticos apoiados em técnicas numéricas aproximadas. As variáveis intervenientes são caracterizadas através de medidas estatísticas que descrevem a tendência central e que são geralmente os valores médios. Na avaliação da probabilidade de rotura recorre-se a hipóteses simplificadas.

O Nível 5, correspondente ao nível mais sofisticado, assenta na ideia da avaliação estrutural baseada em técnicas que têm em conta a distribuição conjunta de todas as variáveis básicas com as suas propriedades estatísticas, isto é, tendo em conta a sua dispersão probabilística. As incertezas são modeladas com métodos puramente probabilísticos. Análises estruturais de segurança são usadas directamente em vez dos factores parciais de segurança. O resultado principal de uma avaliação probabilística é a probabilidade de rotura ou o índice de segurança equivalente da estrutura ou de membros estruturais. Ao contrário do conceito dos factores parciais de segurança, onde os parâmetros de dimensionamento são definidos e

as incertezas são garantidas nos factores de segurança, a probabilidade de rotura depende directamente das incertezas da carga e dos parâmetros de resistência.

As incertezas são modeladas usando funções de distribuição probabilística para cada variável básica e para estados limites definidos a probabilidade de rotura é calculada analiticamente usando métodos de simulação.

# Capítulo 4

# CAPÍTULO 4. Ensaio realizados

## 4.1. Introdução

No seguimento deste trabalho, e tendo por base as inúmeras aplicações que podem advir de um sistema de monitorização contínua irei explicar de seguida algumas das vantagens da aplicação de um sistema deste tipo em obras de Engenharia Civil.

A ideia base deste trabalho consistiu na implementação de um sistema de monitorização autónomo, cuja a sua função era controlar a cura do betão dentro de qualquer estrutura usando para isso um sensor que mede tanto a temperatura como a humidade e consoante estes valores caso haja necessidade irá accionar uma válvula que activa um sistema de rega mantendo os níveis de humidade adequados para a cura deste em função da sua localização.

Para tal foram usados dois tipos de sensores, sendo um deles uma evolução do outro, que como referido anteriormente mediam a temperatura e a humidade.

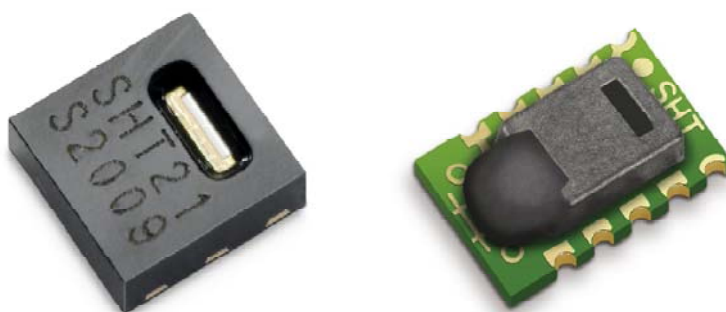


Figura 25 - Sensor SHT21S (esquerda) e sensor SHT15 (direita) ambos da Sensirion [F19].

Estes sensores foram colocados no interior do betão, e devido a este facto tiveram de se tomar algumas precauções para evitar que o sensor ficasse danificado no processo de colocação no betão, e tivesse falhas nas medições. Os sensores têm uma pequena ranhura que não deve ficar obstruída por forma a registarem os valores de humidade, daí a preocupação com a sua protecção. Após alguma pesquisa e recolha de ideias, optou-se por utilizar uma protecção feita de betão, mantendo assim a continuidade do material aquando da colocação no cubo usado para os ensaios.

Para proteger os sensores, fizeram-se dois pequenos cubos de beta com 4 cm de aresta e um traço de 3:1, tornando esta mistura semelhante a uma terra húmida e usando uma areia com uma só granulometria, removendo-se as partículas finas garantido assim que os sensores não ficassem obstruídos

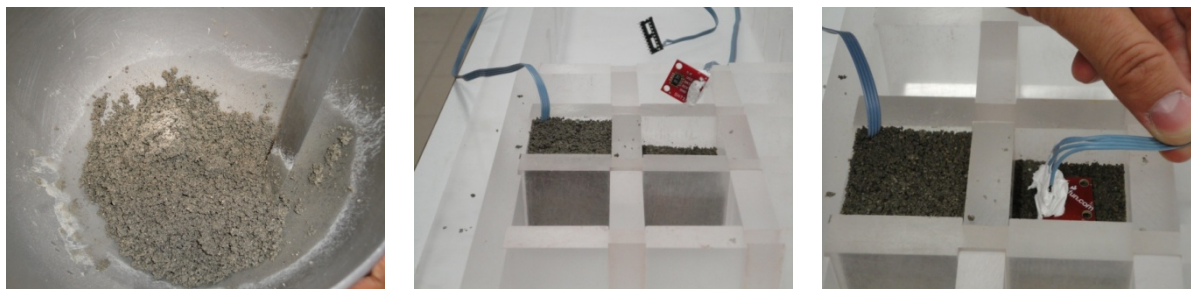


Figura 26 - Preparação e colocação dos sensores nos cubos de protecção [F18].

Depois da colocação do sensor no interior do cubo de betão de protecção houve a necessidade de se verificar a integridade dos sensores nos cubos de protecção assim como verificar a sua porosidade, para tal realizaram-se vários testes durante algumas horas.

Os testes consistiram em verter água sobre os cubos e verificar se os valores de humidade e temperatura variavam. Um segundo teste, foi colocar os cubos num tabuleiro com água no fundo, que tocava nos cubos em apenas 2-3mm e ver se era registada a subida de água por capilaridade nos cubos.

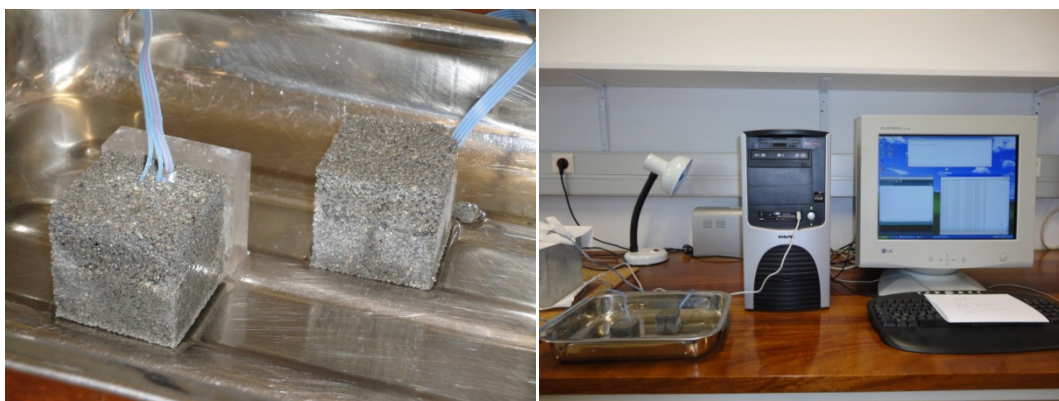


Figura 27 - Segundo teste realizado (esquerda) e verificação dos resultados (direita) [F18].

Cessados estes testes pode-se constatar através de comparação com o outro sensor, que um dos sensores só registava valores de temperatura correctos e o outro funcionava correctamente.

Feito isto, teve-se que pensar também numa forma de proteger o sistema que registava os valores, pois todo o teste iria decorrer em exterior e podiam acontecer inúmeras alterações climáticas. Então foi usado uma caixa de plástico para proteger todo o hardware necessário a este teste.

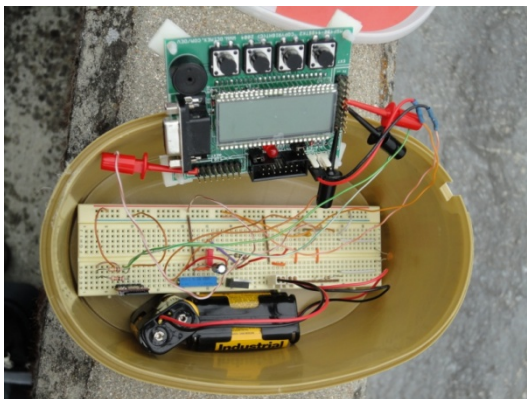


Figura 28 - Sistema de monitorização (protótipo) na sua caixa de protecção [F18].

Para os testes de exterior além do sistema de armazenamento de dados, pois neste protótipo não se incluiu o módulo IEEE 802.15.4 para transmissão sem fios devido ao elevado consumo de energia do mesmo quando alimentado por duas pilhas, foi incluído um ecrã para se poder ver os valores que iam ser registados sem se recorrer a um computador para se verificar os valores no local.



Figura 29 - Inicio da betonagem [F18].

Terminado tudo isto, pode-se então realizar a betonagem onde se procedeu da seguinte forma, colocou-se o sensor dentro do cubo de betão com 15cm de aresta, um provete normal, de seguida ligou-se o sistema de monitorização e como esperado e de uma forma automática começou a recolha dos valores que iam sendo registados pelos sensores de temperatura e humidade e guardados num cartão de memória microSD.



Figura 30 - Colocação do sensor dentro do betão (esquerda), arranque do sistema após betonagem (direita) [F18].

Após a betonagem e durante algum tempo foi verificado no local os valores registados, através do uso do ecrã, para se verificar se o sistema funcionava e registava correctamente, como se pode verificar na figuras seguintes.

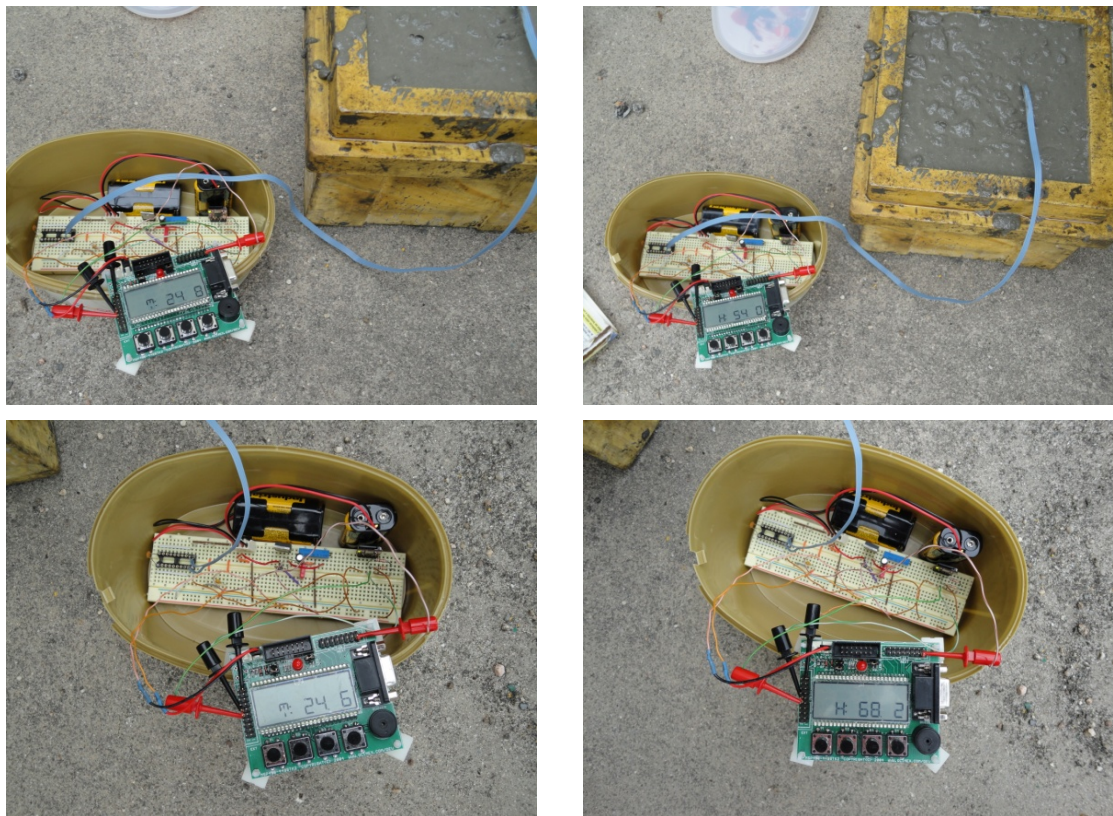


Figura 31 - Valores registados nos primeiros minutos do teste [F18].

Feito isso a caixa de protecção foi fechada e deixou-se durante alguns dias o cubo no exterior para se registar a variação de temperatura e humidade dentro do mesmo.

## 4.2. Análise de resultados

Cura é a designação usada para descrever os procedimentos utilizados para promover a hidratação do cimento, como tal, o desenvolvimento da resistência do betão. Os procedimentos de cura estão relacionados com o aumento da temperatura e o movimento de humidade dentro do betão e com o exterior. Este último afecta não só a resistência, como também a durabilidade.

A cura e o endurecimento do betão são etapas críticas e inevitáveis de qualquer obra que envolva estruturas de betão armado. Um conceito básico reside em que as propriedades do betão se desenvolvem com o tempo à medida que o cimento hidrata e ao mesmo tempo esta reacção liberta calor.

O objectivo da cura a temperaturas normais é manter o betão o mais saturado possível, até que os espaços inicialmente preenchidos por água, na pasta de cimento fresca, tenham sido ocupados pelos produtos da hidratação do cimento.

A taxa de desenvolvimento da resistência na fase inicial da vida do betão está fortemente relacionada com a sua taxa de hidratação, sendo o calor gerado pela reacção de hidratação o que contribui para o aumento da temperatura no seu interior. Não importa o local onde estrutura está colocada, se se trata de um ambiente mais frio ou mais quente, o sistema anteriormente apresentado tem como principal função detectar e avaliar onde está inserido para assim controlar a cura do betão garantindo uma melhor qualidade do mesmo.

Durante a fase inicial da vida do betão, é necessário evitar estragos causados pela rápida secagem. Assim, dever-se-á evitar a secagem prematura da superfície do betão, hidratando-o, evitando assim a fissuração.

A velocidade de endurecimento do betão depende de vários factores, sendo os mais influentes, a temperatura e a humidade.

Relativamente aos dados obtidos durante o ensaio, elaborou-se toda a informação recolhida em gráficos possibilitando uma rápida leitura e interpretação dos valores obtidos.

O Gráfico 1 mostra a variação de humidade e temperatura dentro do cubo usado nas 24 horas após a betonagem do mesmo. Podemos ver que durante a cura do betão, e como seria de esperar, há um aumento da temperatura e uma diminuição da humidade. Penso que as primeiras 12 horas demonstra isso muito bem, sendo uma variação constante e progressiva que se assemelha a variação linear mas inversa, isto é, aumento da temperatura e uma diminuição da humidade. Entre as 12 horas e as 24 horas após o início do registo de valores, verificamos que à um decréscimo muito acentuado seguido de uma aumento nos valores registados, isto não era esperado e aconteceu entre as 13 horas e as 16horas, altura em que o sensor deixou de registar valores de temperatura.

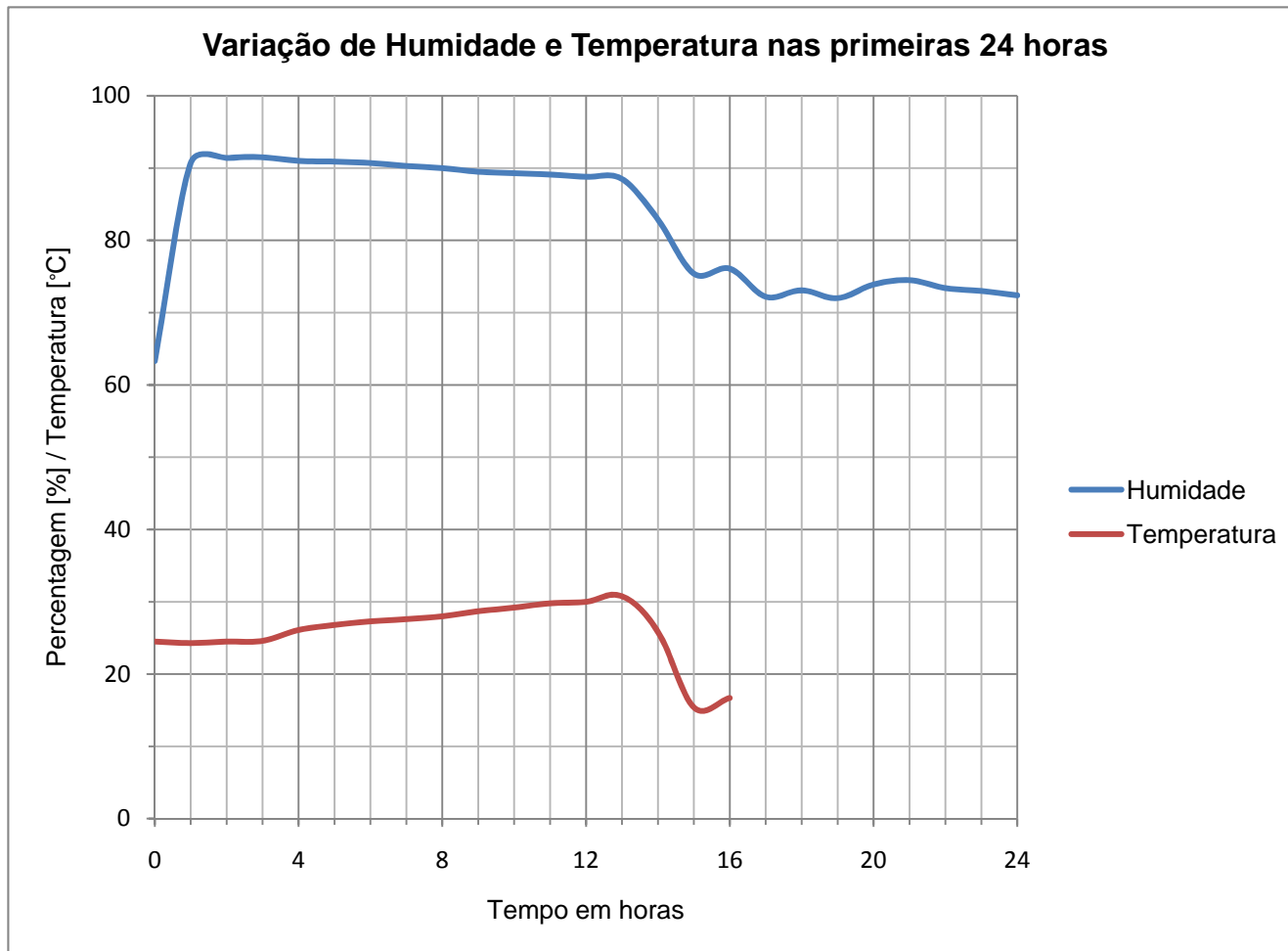


Gráfico 1 - Apresentação dos resultados medidos durante as primeiras 24 horas do teste.

### 4.3. Conclusão do trabalho experimental

Após a realização deste trabalho, pode-se retirar várias conclusões.

Um sistema destes pode ser muito vantajoso quando se efectua grandes obras em betão, como por exemplo, barragens ou pontes onde o volume de betão envolvido é muito grande e o processo de cura é um processo preponderante para a qualidade do betão, como sabemos os valores da humidade e temperatura podemos evitar a secagem prematura da superfície do betão, hidratando-o, evitando assim a fissuração.

Este sistema também é simples de aplicar em estruturas já existentes em locais onde o betão esteja num meio agressivo para se prevenir por exemplo a corrosão das armaduras.

Tudo o que foi referido neste estudo, foi tendo em conta o protótipo elaborado pelos investigadores Luís M. Borges e Norberto Barroca do IT. Relativamente ao protótipo o módulo iEEE 802.15.4 para transmissão sem fios foi retirado devido ao elevado consumo de energia, uma vez que era alimentado por duas pilhas AA com a tensão conjunta de 3v, este deixava de

medir assim que o valor das duas pilhas fosse inferior a 2,6v dado que este valor é o requisito mínimo de hardware para o sistema funcionar. Outra limitação era o alcance da transmissão, pois quanto mais longe mais energia necessita, tendo isto sido resolvido com recurso a um módulo que registava os valores num cartão microSD. Como primeiro protótipo penso os resultados são muito bons com o único inconveniente de ter alguém que se deslocar ao local para recolher os valores.

O sensor ficou sem a medição de temperatura passado 13 horas do início do teste, contudo gostava de referir que o sensor já estava inserido no pequeno cubo de protecção há uma semana, mesmo assim e para o tipo aplicação pretendida e caso este trabalho tenha continuidade, a protecção do sensor tem que ser revista de modo a aumentar a fiabilidade e vida útil do sensor.

O sensor que ficou danificado após a colocação no cubo de protecção e após alguns testes realizados pelo investigador Norberto Barroca do IT, pode-se concluir que aconteceu por não se ter protegido as ligações entre o sensor e os cabos que saíam para fazer as ligações necessárias aos módulos que aquisição de dados. Isto devido a reacções químicas durante a cura dos cubos de protecção que oxidaram as ligações ao sensor, tornando impossível a sua utilização.

# Capítulo 5

# CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES

A tese que agora se finaliza constitui um apanhado de uma nova perspectiva que tem emergido na engenharia civil nos últimos anos, a monitorização de estruturas.

Este trabalho teve como objectivos principais a abordagem de alguns dos diferentes sistemas de monitorização assim como a sua aplicabilidade em obra, de um ponto de vista mais teórico. Outro objectivo era criar um sistema de monitorização contínuo capaz de enviar dados via wireless. Como referido anteriormente esta ideia teve que ser abandonada devido ao elevado consumo energético, o problema poderia ter sido ultrapassado com uma bateria de maior capacidade ou com recurso um mini painel solar para aquisição de energia.

No entanto solucionou-se o problema recorrendo a um sensor que regista simultaneamente os valores de temperatura e humidade, para além das medições, armazenando-os num cartão de memória micro SD

O primeiro capítulo tinha como principal função a introdução do tema bem como alertar para o impacto da monitorização na engenharia.

No segundo capítulo foi onde se referiu a parte mais teórica da monitorização, falando nos vários sistemas assim como a sua aplicabilidade em obra.

Para o terceiro capítulo ficou reservado uma outra vertente da monitorização, as estruturas inteligentes, que se estão a tornar cada vez mais comuns, permitindo monitorizar continuamente as estruturas e emitirem alarmes ajudando na sua protecção quer na de utilizadores.

No quarto capítulo fez-se referência à parte experimental direccionada para a medição de humidade e temperatura, com recurso a sensores embutidos no betão. A lamentar o facto de o sensor ter ficado sem a medição da temperatura pois apenas se conseguiu registar valores para o processo de cura do betão durante aproximadamente 13 horas.

Em conclusão deste trabalho, que futuramente esta área vai ser uma parte integrante em todas as obras de engenharia pois com a crise económica mundial a durabilidade das estruturas vai ter cada mais relevante.

Espero que este trabalho tenha continuidade no futuro, corrigindo algumas das falhas que aponte e que se possa desenvolver um novo método para a monitorização continua.

## Referências Bibliográficas

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. *Redes de Bragg em fibra óptica - Contribuições para o desenvolvimento de uma tecnologia revolucionária em monitorização estrutural*. Ferreira, L. A., et al. 2004. Encontro Nacional Betão Estrutural.
2. Simas, Marcos da Silva Lopes. *Sistemas de protecção do betão face à carbonatação*. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2007.
3. Oliveira, R. de, et al. Aplicação de sensores em fibra óptica embebidos para a monitorização da saúde de estruturas compósitas. *Mecânica Experimental*. 2007, Vol. 14, pp. 89-97.
4. Krohn, D. A. *Fibre Optic Sensors: Fundamentals and Applications*. third . s.l. : Instrument Society of America, 2000. ISBN 1-55617-714-3.
5. *Oz - Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda*. [Online] <http://www.oz-diagnostico.pt>.
6. *Inspecção e Diagnóstico Estrutural de Construções Históricas*. Arêde, A. e Costa, A. Porto : FEUP, 2002. A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação.
7. Félix, Carlos Manuel da Silva. *Monitorização e Análise do Comportamento de Obras de Arte*. Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
8. Figueiredo, Elói João Faria. *Monitorização e Avaliação do Comportamento de Obras de Arte*. Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
9. wikipedia.org. *wikipedia.org*. [Online] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Viaduto\\_de\\_Millau](http://pt.wikipedia.org/wiki/Viaduto_de_Millau).
10. Bastos, Ana Maria S. Teixeira. *A Experimentação como Metodologia de Interpretação do Comportamento de Estruturas de Betão*. Porto : FEUP, 1997.
11. Roberts, Gethin W., et al. *Monitoring the Height Deflections of the Humber Bridge by GPS, GLONASS and Finite Element Modelling*. Berlin : IAG Symposia Geodesy Beyond 2000, 2000. Vol. vol. 121. ISBN 3-540-67002-5.
12. Rytter, a. *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Dinamarca : Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, 1993.
13. Worden, K. e Dulieu-Barton, J. M. *An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures*. 2004 : Sage Publication.

14. Sá, J. P. Marques de. *Pattern Recognition: Concepts, Methods and Applications*. s.l. : Springer, 2001.
15. *Applications of Pattern Recognition*. Fu, K. S. Florida : s.n., 1882.
16. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Bishop, Christopher M. Oxford : s.n., 1995.
17. Fraser, Michael Swain. *Development and Implementation of an Integrated Framework for Structural Health Monitoring*. San Diego : University of California, 2006.
18. Loesch, Claudio e Sari, Solange T. *Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Modelos*. 1996.
19. Jovanovic, Olivera. Identification of Dynamic System Using Neural Network. *Architecture and Civil*. 4, 1998, Vol. 1, pp. 525-532.
20. Russell, Stuart e Norvig, Peter. *Inteligência Artificial*. s.l. : Editora Campus, 2004.
21. Weber, Felix, Feltrin, Glauco e Huth, Olaf. *Guidelines for Structural Control*. Dubendorf : Structural Engineering Research Laboratory, 2006.
22. Sousa, Helder, et al. *Viaduto Misto Parque da Maia: Sistema de Monitorização Permanente e Ensaio de Carga*. Porto : LABEST/Metro do Porto, 2006.
23. Caetano, Elsa. *Identificação Experimental de Parâmetros Dinâmicos em Sistemas Estruturais*. 1992 : FEUP, Porto.
24. Henriques, António A.R. *Aplicação de Novos Conceitos de Segurança no Dimensionamento do Betão Estrutural*. Porto : FEUP, 1998.
25. Félix, C. *Monitorização do Comportamento de Estruturas de Betão*. s.l. : ISEP, 2002.
26. Araújo, Francisco M. *Redes de Bragg em Fibra Optica*. Porto : Faculdade de Ciencias da Universidade do Porto, 1999.
27. Brito, Jorge, Santos, Sónia e Branco, Fernando A. Inspeçyao e Manutenyao de Obras de Arte. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. 50, Fevereiro de 2002.

## Referências das Figuras

## REFERÊNCIAS DAS FIGURAS

F1. Disponibilizada pelo Professor Doutor Pedro Gabriel de Almeida

F2. <http://www.mgs.co.uk/geotechnical-instrumentation/inclinometers-tilt-sensors/37/vertical-mems-inclinometer-system.html>

F3. <http://www.mahr.com/index.php?NodeID=8282&ContentID=1615&Language=PT>

F4. <http://iprinceps.egloos.com/1404109>

F5. <http://news.thomasnet.com/fullstory/Compact-LVDTs-are-ac-operated-16796>

F6. <http://www.inngeo-india.com/joint%20meter.htm>

F7. <http://www.gambaengineering.com/surveying/index.html>

F8. [http://4.bp.blogspot.com/\\_Xc\\_3qMG21Cw/RuHtekYqGWI/AAAAAAAAAfc/0suXuoQqcI8/s1600-h/millau+viaduct+01.jpg](http://4.bp.blogspot.com/_Xc_3qMG21Cw/RuHtekYqGWI/AAAAAAAAAfc/0suXuoQqcI8/s1600-h/millau+viaduct+01.jpg)

F9. [http://1.bp.blogspot.com/\\_Xc\\_3qMG21Cw/RuHvH0YqGcl/AAAAAAAAAgM/jXiTw8Dyvoc/s1600-h/millau+viaduct+05.jpg](http://1.bp.blogspot.com/_Xc_3qMG21Cw/RuHvH0YqGcl/AAAAAAAAAgM/jXiTw8Dyvoc/s1600-h/millau+viaduct+05.jpg)

F10. <http://www.mra.pt/alava/noticias.html?idn=cw4a5616b677f07>

F11. <http://jpassosp.blogspot.com/2010/04/o-uso-do-clinometro.html>

F12. <http://www.directindustry.com/prod/sherborne-sensors-limited/servo-inclinometer-37503-376390.html>

F13. <http://www.metrolog.net/transdutores/force/elfs.php?lang=ptbr>

F14. <http://www.ionsistemas.es/sondas.html>

F15. <http://www.splabor.com.br/equipamentos-laboratorio/termohigrometro/termohigrometro-medidor-de-umidade-temperatura-compacto-e-portatil-modelo-hi-93640.html>

F16. <http://projest-engenharia.com/forum/viewtopic.php?t=76>

F17.

<http://www.parallax.com/desktopmodules/catalogstore/ProductDetails.aspx?ProductID=672>

F18. Realizada pelo autor

F19. [http://www.sensirion.com/en/01\\_humidity\\_sensors/00\\_humidity\\_sensors.htm](http://www.sensirion.com/en/01_humidity_sensors/00_humidity_sensors.htm)

# Anexos

## ANEXOS

Tempo em horas	Tempo em minutos	Humidade [%]	Temperatura [°C]
0	0	63,3	24,5
	5	63,3	24,5
	10	76,8	24,5
	15	83,9	24,5
	20	88,1	24,5
	25	88,5	24,5
	30	88,8	24,5
	35	89,2	24,4
	40	89,4	24,5
	45	89,8	24,5
	50	90,2	24,3
	55	90,5	24,4
	1	60	90,7
65		90,9	24,4
70		91,1	24,3
75		91,1	24,3
80		91,3	24,3
85		91,3	24,4
90		91,4	24,4
95		91,4	24,4
100		91,4	24,4
105		91,4	24,4
110		91,5	24,5
115	91,5	24,4	
2	120	91,4	24,5
	125	91,5	24,4
	130	91,5	24,6
	135	91,6	24,5
	140	91,5	24,5
	145	91,5	24,5
	150	91,5	24,4
	155	91,5	24,5
	160	91,6	24,5
	165	91,5	24,7
	170	91,5	24,5
	175	91,5	24,5

Tempo em horas	Tempo em minutos	Humidade [%]	Temperatura [°C]
3	180	91,5	24,6
	185	91,5	24,7
	190	91,5	24,8
	195	91,4	24,8
	200	91,4	25
	205	91,4	25,1
	210	91,4	25,2
	215	91,3	25,4
	220	91,2	25,6
	225	91,1	25,7
	230	91,1	25,8
	235	91,1	26
	4	240	91
245		91	26,1
250		91	26,2
255		91,1	26,2
260		91,1	26,3
265		91,1	26,2
270		91,1	26,4
275		91	26,4
280		91	26,5
285		91	26,5
290		91,1	26,7
295		91	26,7
5	300	90,9	26,8
	305	-3,1	28,9
	310	90,7	26,9
	315	90,7	26,9
	320	90,8	26,9
	325	90,8	27
	330	90,7	27
	335	90,7	27,1
	340	90,8	27,2
	345	90,7	27,2
	350	90,7	27,2
355	90,7	27,2	

Tempo em horas	Tempo em minutos	Humidade [%]	Temperatura [°C]
6	360	90,7	27,3
	365	90,6	27,3
	370	90,6	27,2
	375	90,6	27,2
	380	90,6	27,4
	385	90,5	27,4
	390	90,6	27,6
	395	90,5	27,4
	400	90,5	27,4
	405	90,4	27,6
	410	90,4	27,5
	415	90,4	27,6
7	420	90,3	27,6
	425	90,4	27,6
	430	90,3	27,6
	435	90,3	27,7
	440	90,2	27,7
	445	90,3	27,7
	450	90,3	27,8
	455	90,2	27,8
	460	90,2	27,8
	465	90,2	27,9
	470	90,2	27,9
	475	90,2	27,9
8	480	90	28
	485	90	28
	490	90	28,2
	495	89,9	28,2
	500	89,9	28,2
	505	89,8	28,3
	510	89,7	28,4
	515	89,6	28,4
	520	89,6	28,5
	525	89,6	28,5
	530	89,5	28,6
	535	89,5	28,5

Tempo em horas	Tempo em minutos	Humidade [%]	Temperatura [°C]
9	540	89,5	28,7
	545	89,4	28,7
	550	89,6	28,8
	555	89,6	28,7
	560	89,6	28,7
	565	89,6	28,9
	570	89,8	28,9
	575	89,5	29
	580	89,4	28,9
	585	89,4	29,1
	590	89,4	29,1
	595	89,3	29,1
	10	600	89,3
605		89,2	29,3
610		89,2	29,3
615		89,2	29,4
620		89,2	29,5
625		89,2	29,5
630		89,1	29,6
635		89,1	29,7
640		89,1	29,7
645		89,2	29,8
650		89,1	29,9
655		89,1	30
11		660	89,1
	665	89,1	29,9
	670	89	30
	675	89	30
	680	89,1	29,9
	685	89	29,8
	690	88,9	30
	695	88,9	30
	700	89	30,1
	705	88,9	30,1
	710	88,8	30
715	88,8	30	

Tempo em horas	Tempo em minutos	Humidade [%]	Temperatura [°C]
12	720	88,8	30
	725	88,8	30
	730	88,8	30
	735	88,8	30,1
	740	88,8	30,6
	745	85,3	30,2
	750	88,7	30,3
	755	88,6	30,4
	760	88,5	30,5
	765	88,6	30,5
	770	88,5	30,6
	775	88,6	30,6
	13	780	88,5
785		88,4	30,8
790		88,4	30,9
795		88,4	30,9
800		88,4	30,9
805		88,4	31,1
810		82,7	21,9
815		82,5	23,2
820		81,1	24,1
825		82	25,1
830		80,7	24,4
835		83,8	25
14	840	82,9	25,9
	845	82,3	24,1
	850	83,1	24,9
	855	83,9	26,9
	860	80,3	24,5
	865	83,2	29,4
	870	82,8	27,3
	875	83	25
	880	79,8	25,1
	885	79,8	24,5
	890	73,9	14,9
	895	75,3	14,5

Tempo em horas	Tempo em minutos	Humidade [%]	Temperatura [°C]
15	900	75,4	15,4
	905	74,8	17,6
	910	76	19
	915	75,2	18,3
	920	75,5	17,4
	925	76	17
	930	75,7	17,6
	935	75,3	18,5
	940	75,3	15,7
	945	74,6	18,8
	950	76,9	19,6
	955	76,1	19,5
	16	960	76,1
965		76,1	18,9
970		77,8	16,4
975		75,3	18,7
980		77,5	17,8
985		75,5	19
990		76,5	19,8
995		71,8	5
1000		72,3	
1005		72,1	
1010		72,1	
1015	72,1		
17	1020	72,2	
	1025	72,1	
	1030	72,6	
	1035	72,8	
	1040	73,3	
	1045	72,9	
	1050	72,9	
	1055	73,7	
	1060	73,7	
	1065	73,8	
	1070	73,3	
1075	72,9		

Tempo em horas	Tempo em minutos	Humidade [%]	Temperatura [°C]
18	1080	73,1	
	1085	72,1	
	1090	73,2	
	1095	72,9	
	1100	72,1	
	1105	71,8	
	1110	72	
	1115	71,6	
	1120	71,2	
	1125	71,3	
	1130	71,3	
	1135	71,9	
	19	1140	72
1145		72	
1150		71,9	
1155		72,1	
1160		72,3	
1165		72,7	
1170		73,1	
1175		73,4	
1180		73,3	
1185		73,2	
1190		73,3	
1195	74		
20	1200	73,9	
	1205	74,1	
	1210	74,2	
	1215	74,1	
	1220	74	
	1225	74,2	
	1230	74,6	
	1235	74,9	
	1240	75,2	
	1245	75,1	
	1250	74,9	
1255	74,8		

Tempo em horas	Tempo em minutos	Humidade [%]	Temperatura [°C]
21	1260	74,5	
	1265	74,5	
	1270	74,3	
	1275	74,1	
	1280	74	
	1285	74	
	1290	73,6	
	1295	73,7	
	1300	73,4	
	1305	73,4	
	1310	73,3	
	1315	73,3	
22	1320	73,4	
	1325	73,4	
	1330	73,3	
	1335	73,3	
	1340	73,3	
	1345	73,2	
	1350	73,3	
	1355	73,2	
	1360	73,2	
	1365	73,2	
	1370	73,1	
	1375	73	
23	1380	73	
	1385	72,9	
	1390	72,9	
	1395	72,8	
	1400	73	
	1405	73,1	
	1410	73,1	
	1415	72,9	
	1420	72,6	
	1425	72,2	
	1430	72,3	
1435	72,3		
24	1440	72,4	