

**Inspeção e Monitorização de Estruturas em  
Engenharia Civil - Utilização de UAV na  
Inspeção e Monitorização**

DISSERTAÇÃO DE Mestrado

**Sérgio Lobato Agostinho**  
Mestrado em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE da MADEIRA

*A Nossa Universidade*  
www.uma.pt

setembro | 2012

**Inspeção e Monitorização de Estruturas em  
Engenharia Civil - Utilização de UAV na  
Inspeção e Monitorização**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Sérgio Lobato Agostinho**

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO

Domingos Manuel Martins Rodrigues



## Índice Geral

Agradecimentos .....	III
Resumo .....	V
Abstract.....	VI
Palavras-Chave .....	VII
Simbologia.....	VII
Índice de Texto .....	IX
Índice de Figuras .....	XI
Índice de Tabelas .....	XV
Capítulo 1 - Introdução.....	1
Capítulo 2 - Monitorização e Observação de Estruturas .....	5
Capítulo 3 - Monitorização com UAV .....	49
Capítulo 4 - Casos Práticos.....	67
Capitulo 5 - Considerações finais.....	83
Bibliografia.....	84



## Agradecimentos

Com a elaboração deste trabalho encerro este meu ciclo de estudos e gostaria de agradecer a todas as pessoas que de uma forma ou de outra me ajudaram a manter focado no objetivo primordial que foi a conclusão deste curso com sucesso.

Para a elaboração deste trabalho foi importante a ajuda e apoio de várias entidades e pessoas que disponibilizaram algum tempo, sabedoria e paciência para que o resultado deste trabalho fosse o melhor possível e por isso gostaria de agradecer de uma forma especial.

Ao meu orientador, Doutor Domingos Manuel Martins Rodrigues, pela partilha do seu vasto conhecimento, experiência e tempo dedicado a este trabalho.

À Universidade da Madeira por ter-me dado a oportunidade e condições ao longo destes anos para concluir este trabalho e este ciclo de estudos.

Aos meus colegas de viagem diária para a universidade e a todos os amigos e colegas que sempre estiveram disponíveis para ajudar ao longo dos últimos tempos.

À minha família que ao longo dos meus vinte e cinco anos sempre procurou dar-me condições e apoio para que pudesse terminar esta importante etapa da minha vida.

E por último quero agradecer à minha namorada pelo seu apoio e paciência incondicionais demonstrados ao longo destes anos, pois mesmo sem ser a sua área tudo procurou fazer para me ajudar.

A todos o meu muito obrigado...



## Resumo

Nesta tese são abordadas as tipologias e metodologias de monitorização e observação de infraestruturas em engenharia civil, nomeadamente através de aplicação de vários métodos de medição, de ensaios e também com implementação de sensores.

Esta tese pretende abordar de uma forma mais concreta a utilização de plataformas UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) que apresentam vantagens consideráveis para ser utilizado na monitorização de infraestruturas devido à rapidez de aquisição de dados, mobilidade, segurança e ao baixo custo de aquisição e exploração.

A monitorização com UAV consiste no aproveitamento de uma plataforma que pode transportar variadíssimos equipamentos para registo de dados, como câmaras e sensores de várias ordens, de uma forma rápida, económica e segura.

Os UAV's possibilitam o tratamento rápido da informação por eles recolhida, em tempo real ou em pós-processamento. Os dados recolhidos, dependendo do tipo de infraestruturas e objetivos, podem ser analisados com diversas aplicações que tratam os dados de acordo com as necessidades, tais como, modelação em 3D, modelos de elevação, cálculo de áreas, termografia, fotogrametria, etc.

Nesta tese são apresentados alguns casos práticos onde se evidencia a vantagem da utilização do UAV na monitorização de infraestruturas, onde se verifica a rapidez, eficiência e qualidade na recolha de informação com o reduzido custo de exploração.

## Abstract

This thesis addresses the types and methodologies for monitoring and observation of civil engineering infrastructures, including through applying various methods of measuring, testing and also deployment of sensors.

This thesis aims to address in a more practical use of UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) platforms which have considerable advantages to be used in monitoring infrastructures due to the speed of data acquisition, mobility, safety and low cost of acquisition and operation.

Monitoring with UAV consists in the use of a platform that can carry numerous different equipment to record data such as cameras and sensors of various orders, in a quick, economical and safe.

UAVs allow for the rapid treatment of the information they have collected in real time or post-processing. The data collected, depending on the infrastructure and objectives can be analyzed with various applications that process data according to the needs, such as 3D modeling, elevation models, calculation of areas, thermography, photogrammetry, etc.

This thesis presents some practical cases where it shows the advantage of using UAVs for monitoring infrastructure, which checks the speed, efficiency and quality in data collection with low running costs.

## **Palavras-Chave**

Inspeção

Monitorização

Observação

Estruturas

UAV

## **Key Words**

Inspection

Monitoring

Observation

Structures

UAV

## **Simbologia**

UAV - Unmanned Aerial Vehicle

LVDT - Linear Variable Differential Transformer

LFR - Laser Range Finder

CCD – Charge-Couple Device

MEMS – Micro-Eletro-Mechanical Systems



## Índice de Texto

<b>Agradecimentos .....</b>	<b>III</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>V</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>VI</b>
<b>Palavras-Chave .....</b>	<b>VII</b>
<b>Simbologia .....</b>	<b>VII</b>
<b>Índice de Texto.....</b>	<b>IX</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>XI</b>
<b>Índice de Tabelas .....</b>	<b>XV</b>
<b>Capítulo 1 - Introdução.....</b>	<b>1</b>
<i>1.1 - Considerações Gerais .....</i>	<i>1</i>
<i>1.2 - Objetivos e motivações na realização da dissertação .....</i>	<i>3</i>
<b>Capítulo 2 - Monitorização e Observação de Estruturas.....</b>	<b>5</b>
<i>2.1 - Introdução .....</i>	<i>5</i>
<i>2.2 - Estado da arte .....</i>	<i>6</i>
<i>2.3 - Métodos de medição.....</i>	<i>8</i>
2.3.1 - Medição de deformações.....	8
2.3.2 - Medição de deslocamentos.....	9
2.3.3 - Medição da temperatura .....	12
2.3.4 - Medição da rotação .....	15
2.3.5 - Medição da força.....	16
<i>2.4 - Monitorização, Observação e Reabilitação de Estruturas já existentes .....</i>	<i>17</i>
2.4.1 - Ensaios “in situ” .....	18

2.4.2 - Ensaio Laboratoriais .....	20
2.4.3 - Sensores baseados em sistemas de satélite.....	20
2.4.4 - Sensores baseados em Fibras Óticas .....	21
2.4.5 - Sistema de varrimento baseado em LRF.....	28
2.4.6 - Unidade de aquisição de dados .....	32
2.4.7 - Monitorização de estruturas antigas usando tecnologia Wireless.....	34
2.4.8 - Monitorização e gestão de Pontes .....	36
<b>Capítulo 3 - Monitorização com UAV .....</b>	<b>49</b>
3.1 - <i>Introdução</i> .....	49
3.2 - <i>Fotogrametria através de UAV</i> .....	52
3.2.1 - Planeamento do projeto e aquisição de dados de imagem .....	53
3.2.2 - Software Waypoint Editor.....	55
3.2.3 - Ground Control Station Software.....	56
3.2.4 - Agisoft PhotoScan.....	57
3.2.5 - DroneMapper .....	62
3.3 - <i>Termografia com UAV</i> .....	64
<b>Capítulo 4 - Casos Práticos .....</b>	<b>67</b>
4.1 - <i>Introdução</i> .....	67
4.2 - <i>Monitorização de infraestruturas com UAV</i> .....	69
4.3 - <i>Termografia em edifícios e infraestruturas</i> .....	79
<b>Capítulo 5 - Considerações finais .....</b>	<b>83</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>84</b>

## Índice de Figuras

Figura 1: Imagem do Aeroporto Internacional do Funchal .....	2
Figura 2: Maquete do Aeroporto Internacional do Funchal .....	2
Figura 3: Ponte de Wheatstone .....	8
Figura 4: Comparador digital de deslocamento.....	10
Figura 5: Medição de flechas com LVDT's .....	11
Figura 6: Transdutores de deslocamento resistivos .....	11
Figura 7: Transdutor potenciométrico .....	12
Figura 8: Sensor de temperatura.....	12
Figura 9: Câmara térmica de infravermelhos .....	13
Figura 10: Fotografia com câmara normal .....	13
Figura 11: Fotografia ao mesmo objeto com câmara térmica .....	14
Figura 12: Fotografia a uma parede com aparente humidade .....	14
Figura 13: Fotografia ao mesmo objeto com câmara térmica .....	15
Figura 14: Fotografia ao mesmo objeto com câmara térmica .....	15
Figura 15: Instrumentos utilizados para medir rotações nomeadamente o clinómetro e o inclinómetro .....	16
Figura 16: Sensores óticos a) intrínsecos e b) extrínsecos .....	22
Figura 17: Monitorização de condutas de petróleo e gás .....	24
Figura 18: Monitorização de Barragens .....	24
Figura 19: Monitorização de Campos petrolíferos .....	24
Figura 20: Monitorização de Pontes.....	24
Figura 21: Monitorização de Linhas de Alta Tensão .....	24
Figura 22: Monitorização de Perímetros de Segurança.....	24
Figura 23: Monitorização de Reservatórios.....	25
Figura 24: Mapas Sísmicos .....	25

Figura 25: Monitorização de Plataformas Continentais .....	25
Figura 26: Monitorização da Temperatura da água.....	25
Figura 27: Ponte D. Luiz I em 2004 .....	26
Figura 28: Intervenção na Rede Holandesa de Alta Velocidade em 2006 .....	26
Figura 29: Intervenção no túnel do Rossio em 2007 .....	27
Figura 30: Viadutos de Anzo e Deza – Espanha em 2008 .....	27
Figura 31: Esquema da medição de distância por tempo de voo.....	28
Figura 32: Esquema da medição de distâncias por triangulação laser .....	29
Figura 33: Esquema da medição de distâncias por diferença de fase.....	30
Figura 34: Esquema do perfil de varrimento .....	30
Figura 35: Sobreposição de dados relativos a vários varrimentos efetuados ao mesmo perfil de uma parede .....	31
Figura 36: Ampliação dos dados adquiridos para o mesmo perfil de uma parede .....	31
Figura 37: Representação gráfica dos dados relativos ao perfil de um Pilar.....	32
Figura 38: Visão geral do desenvolvimento da tecnologia wireless desde os primeiros passos até 2008 .....	35
Figura 39: Fases do ciclo de vida de uma ponte.....	36
Figura 40: Organização geral do sistema – ligações entre elementos .....	38
Figura 41: Equipamentos de auxílio visual numa inspeção .....	43
Figura 42: Ferramentas de limpeza e auxílio na inspeção.....	43
Figura 43: Ferramentas inspeção.....	44
Figura 44: Ferramentas de medição.....	44
Figura 45: Computador portátil como suporte à inspeção.....	44
Figura 46: Aparelho rotativo de percussão para identificação de anomalias no betão... 44	44
Figura 47: Inspeção principal (à distância de um braço dos elementos) .....	45
Figura 48: Ensaios Ultrasónicos .....	45
Figura 49: Inspeção com veículo de gaiola basculante .....	45

Figura 50: Inspeções Subaquáticas em estações secas .....	46
Figura 51: Inspeções subaquáticas .....	47
Figura 52: Sensores de deformação no arco da Ponte Luiz I .....	47
Figura 53: Visão sobre alguns dos sistemas de UAV existentes.....	51
Figura 54: Screenshot do Waypoint Editor .....	55
Figura 55: Screenshot do Software weGCS .....	56
Figura 56: Janela de Aplicação do Agisoft PhotoScan .....	57
Figura 57: Definição do melhor ângulo para obtenção de fotos.....	60
Figura 58: Atribuição de coordenadas de referência .....	62
Figura 59: Exemplo de um modelo 3D com Orthomosaic e DSM .....	63
Figura 60: Foto com alguns dos vários layers disponíveis (coordenadas de GPS, modelo de elevação).....	63
Figura 61: Modelo de elevação de um terreno .....	64
Figura 62: Ilustração de fugas de calor nas portas.....	65
Figura 63: Oktokopter da empresa Mikrokopter (Alemanha).....	68
Figura 64: Oktokopter GEOUMA -1 da Universidade da Madeira .....	68
Figura 65: Plataforma interna do GEOUMA - 1 .....	69
Figura 66: Voo do GEOUMA -1 em recolha de imagens .....	69
Figura 67: Voo no interior do edifício Dolce Vita .....	70
Figura 68: Fotografia de outro ângulo no interior do Dolce Vita.....	70
Figura 69: Voo junto a um gerador eólico.....	70
Figura 70: Imagem captada pelo GEOUMA 1 do gerador eólico.....	70
Figura 71: Exemplos de fotografia aérea, obtida com o UAV, do cais e dos tetrápodes	71
Figura 72: Modelo digital do terreno do cais do porto do Funchal obtido a partir da fotografia aérea.....	71
Figura 73: Fotografia panorâmica da Ponte João Gomes.....	72
Figura 74: Foto retirada com UAV a cerca de 10m de altura.....	72

Figura 75: Foto retirada com UAV a cerca de 30m de altura.....	73
Figura 76: Foto retirada com UAV a cerca de 60m de altura.....	73
Figura 77: Foto do UAV no topo do pilar .....	74
Figura 78: Foto do UAV inicio ( base do pilar) da recolha de imagens.....	74
Figura 79: Modelo digital do terreno com ortofotomapa .....	76
Figura 80: Modelo digital de elevação final do edifício da Universidade da Madeira ..	77
Figura 81: Foto retirada com UAV no Edifício da Universidade da Madeira .....	78
Figura 82: Foto retirada com UAV no Edifício da Universidade da Madeira .....	78
Figura 83: Fotografia a uma das paredes da Universidade da Madeira.....	79
Figura 84: Fotografia Térmica à parede da Universidade da Madeira .....	80
Figura 85: Imagem térmica ( Flir i7).....	81

## Índice de Tabelas

Tabela 1: Características de fiabilidade entre os sensores de rede de Bragg e de Fabry-Perot.....	23
Tabela 2: Inspeções previstas no sistema Danbro – Dinamarca .....	37
Tabela 3: Inspeções em França.....	41
Tabela 4: Inspeções a pontes na REFER.....	42
Tabela 5: Níveis de avaliação da conservação de pontes na REFER .....	43
Tabela 6: Classificação de UAV .....	50



# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 - Considerações Gerais

Tendo em conta que o tema que irei abordar se encontra em fase de investigação e desenvolvimento, grande parte da bibliografia que foi utilizada, encontrava-se em língua estrangeira e por isso a tradução desses mesmos trechos são da autoria de quem redige o texto.

Desde os primeiros tempos que o ser humano vem acompanhando e observando as construções que vai executando com o objetivo de tentar sempre melhorar e aumentar a qualidade e segurança das estruturas. Esta constante observação permite também otimizar os processos construtivos.

Associado ao crescimento socioeconómico foram surgindo novas necessidades que obrigaram à construção de infraestruturas de grande porte e elevado grau de complexidade como pontes, túneis, edifícios altos, barragens, etc.

Inicialmente a observação e monitorização era quase exclusivamente qualitativa e resultava de observações visuais e inspeções. Atualmente estão disponíveis diversos meios baseados na eletrónica e optoelectrónica tal como lasers, câmaras e sensores. Estes novos meios permitem medir grandezas tão diversas como a extensão, o deslocamento, a temperatura, a humidade relativa, a pressão, a inclinação, entre outras.

O desenvolvimento e aplicação dos sistemas de monitorização são cada vez mais importantes, não só por fatores diretamente relacionados com o comportamento e segurança das estruturas, mas também com considerações de ordem económica.

A realização de estruturas em escala reduzida, executadas e conservadas em laboratório e em condições controladas de temperatura e humidade submetidas a ações conhecidas, permitem também testar e fazer leituras que poderão se adequar à estrutura real. Um dos exemplos que mais se destacou na região foi o Aeroporto da Madeira, pois a sua maquete foi extremamente importante não só para simular as condições a ser submetidas antes da sua construção, mas também para ajudar a projetar futuras estruturas em condições semelhantes.



**Figura 1: Imagem do Aeroporto Internacional do Funchal**



**Figura 2: Maquete do Aeroporto Internacional do Funchal**

## 1.2 - Objetivos e motivações na realização da dissertação

A monitorização de estruturas permite acompanhar o seu comportamento durante as fases de construção, exploração ou em situações de acidente. Os sistemas de monitorização assumem um papel de grande importância pois recolhem informação que ao ser enviada para os modelos de análise e decisão permitem acompanhar e detetar avarias estruturais e prever atempadamente situações de degradação e até colapso de infraestruturas, aumentando deste modo a sua vida útil.

Estes modelos de decisão são programados tendo em conta as condições de segurança e de durabilidade da estrutura, atuando como um alarme quando a informação recolhida não se encontram dentro do padrão de comportamento adequado.

Assim é possível aumentar ao máximo o período de vida das estruturas, salvaguardando a segurança e os interesses da sociedade atual e futura.

A monitorização assume maior importância nas obras de maior dimensão, em sistemas estruturais complexos e nas situações em que no caso de ocorrência de danos resultem prejuízos severos ou irreversíveis para a sua manutenção em serviço.

A avaliação das condições de utilização das estruturas de engenharia civil constitui atualmente um dos maiores desafios para as entidades exploradoras, não só devido aos regulamentos relativamente às questões de segurança e utilização serem mais exigentes, mas também porque o envelhecimento das estruturas traduz-se numa redução progressiva das características mecânicas do comportamento estrutural [1].

As intervenções de rotina podem ter um caráter preventivo e serem essenciais para manter a estrutura dentro dos limites aceitáveis de segurança, assegurando e até aumentando o período de exploração da estrutura com qualidade e eficiência económica.

Atendendo à atual conjuntura económico-financeira do país bem como de toda a Europa, é de extrema importância implementar sistemas de monitorização não só nas novas infraestruturas que se encontram em fase de construção, bem como nas construções já existentes, algumas de capital importância social e cultural, pois a monitorização pode reduzir significativamente o custo de manutenção porque esta é feita assim que é detetada a anomalia.

O objetivo desta tese de mestrado visa mostrar e analisar as potencialidades e benefícios da monitorização, principalmente através do recurso ao UAV de uma forma isolada ou simplesmente como complemento aos outros mecanismos já existentes, pois este aparelho vem permitir a obtenção de dados e imagens de infraestruturas de difícil acesso.

É também importante avaliar a qualidade, fiabilidade e segurança deste equipamento na Engenharia Civil.

Finalmente é também importante referir o que já é feito neste âmbito em Portugal e avaliar a relação custo-benefício numa perspetiva de investimento público ou privado no futuro.

## Capítulo 2 - Monitorização e Observação de Estruturas

### 2.1 - Introdução

A observação de qualquer estrutura, tanto em fase de construção como já concluída, assenta em quatro pilares fundamentais que são o ambiente, a superestrutura ou obra de arte, a sua fundação e a envolvente.

Na superestrutura distinguem-se dois tipos de comportamento, o comportamento global da estrutura onde se destacam os deslocamentos, rotações, forças, movimentos de juntas de dilatação e dos aparelhos de apoio, enquanto que as grandezas que caracterizam o comportamento local da estrutura são as tensões, extensões e abertura de fendas.

Relativamente à fundação as grandezas que mais se destacam são as deformações, os deslocamentos e as subpressões.

A monitorização consiste, em geral, no registo e análise dos parâmetros anteriormente referidos, e para medir essas grandezas existe uma vasta gama de equipamentos de medição.

Idealmente, o registo deveria ser contínuo e acompanhado com um sistema de aquisição e armazenamento de dados para um tratamento mais diário e detalhado, porém este sistema torna-se mais complexo e dispendioso para ser utilizado de uma forma contínua, justificando-se apenas em casos especiais de construções de valor histórico e cultural inestimável. Na maioria dos casos os instrumentos são instalados e as leituras são efetuadas periodicamente em sucessivas visitas à construção.

O tipo de monitorização mais comum, principalmente em pequenas infraestruturas é o controlo de abertura de fendas ou de juntas, pois é uma análise que não exige grandes investimentos a nível de equipamentos de medida.

Existem várias técnicas, desde a mais clássica e antiga que consiste na colocação de testemunhos de gesso até às mais sofisticadas que consistem no uso de extensómetros elétricos, sensores de fibra ótica e lasers.

## 2.2 - Estado da arte

As estruturas introduzidas no património arquitetónico que se destacam quer pela sua natureza ou pela sua história apresentam um grande desafio no que toca a conservação, nomeadamente a nível de diagnóstico, monitorização e consolidação de estruturas.

Atendendo à complexidade e idade de algumas obras de arte, a melhoria e implementação de métodos não destrutivos, ou pouco destrutivos, para a análise, diagnóstico e prevenção de danos no património merece toda a atenção das entidades responsáveis pela conservação e restauro do património.

Existem atualmente diversos ensaios, aparelhos e técnicas para avaliar o estado de conservação destas estruturas. Nesta área destacam-se os sensores manuais e sensores elétricos que são os mais clássicos e antigos.

Relativamente aos manuais, os que mais se destacam são a colocação de testemunhos, esclerómetros de pêndulo ou ensaios com o martelo de Schmidt.

No caso dos sensores elétricos podem ser utilizados ensaios de impulso mecânico, ensaios com macacos planos e podem também ser introduzidos nas estruturas dispositivos de monitorização como fissurómetros e comparadores de deslocamento.

Ao longo dos últimos anos tem sido aprofundada a monitorização de estruturas através de sensores de fibra ótica. Neste campo, surgem muitos desenvolvimentos que resultaram por exemplo na implementação de sistemas de monitorização estrutural baseados em sensores de Bragg em fibra ótica, com capacidade para monitorizar deformações à escala micrométrica.

Este sistema foi implementado numa avaliação estrutural do Arco Cruzeiro da Igreja da Santa Casa da Misericórdia de Aveiro e é composto por 19 sensores de deslocamento e 5 sensores de temperatura, colocados sobre as principais fendas detetadas nesta mesma estrutura [2]

A utilização destes sensores apresenta muitas vantagens e é uma mais-valia para a estrutura, no entanto a sua implementação isolada poderá revelar-se insuficiente para um estudo rigoroso do seu comportamento estrutural, pois estes sensores limitam-se a movimentos de reduzidas dimensões.

Ultimamente tem-se verificado também um maior desenvolvimento e utilização de sistemas de varrimento laser. Neste sistema o deslocamento ou deformação é determinado após o segundo varrimento da estrutura, onde os dados são comparados com os dados obtidos no primeiro varrimento.

Segundo *Park et al*, este método em comparação com outros métodos de monitorização como sistemas de fibra ótica ou extensómetros elétricos apresenta um erro de 1,6% relativamente à medição direta, enquanto os restantes apresentaram diferenças de respetivamente 0,7-10,0% e 6,1-10,0%. O sistema laser utilizado por estes autores para aquisição de distâncias baseia o seu princípio de funcionamento na triangulação laser com o tempo de voo do sinal associado ao feixe laser.

Outro método utilizado na monitorização de obras de arte é a topografia convencional. Através da topografia é possível obter um nivelamento relativamente preciso que permita depois uma criação de um modelo 3D da infraestrutura. No entanto este tipo de monitorização exige um trabalho intensivo e demorado obtendo uma área de cobertura reduzida, logo a sua eficiência é considerada reduzida.

Este tipo de monitorização apresenta algumas vantagens pois permite alcançar em tempo real as coordenadas em 3D dos pontos de monitorização, podendo detetar movimentos bruscos e criar mecanismos de alerta.

Relativamente ao uso do UAV na monitorização de obras de arte ainda há muito pouca informação, pois o uso de UAV ainda não é muito conhecido e utilizado, no entanto perspectiva-se que nos próximos anos surjam muitas entidades interessadas em explorar esta área pois é sem dúvida o futuro da inspeção e monitorização como será comprovado ao longo desta tese.

O UAV irá permitir fazer o que já feito através da topografia, mas de uma forma muito mais rápida, eficiente e prática, podendo acrescentar ainda outros mecanismos que não são possíveis de utilizar com a topografia convencional como é a recolha de imagens e a termografia.

## 2.3 - Métodos de medição

### 2.3.1 - Medição de deformações

Para proceder à medição de deformações existem vários tipos de sensores, tais como:

➤ Sensores mecânicos

Estes foram os primeiros a ser desenvolvidos para a monitorização de estruturas de Engenharia Civil. O princípio básico de funcionamento destes sensores consiste na medição da variação de um comprimento de referência medido na peça analisada. Estes sensores têm o inconveniente de apenas poderem ser utilizados em peças estáticas e devido ao avanço da tecnologia não são compatíveis com os mais recentes sistemas de aquisição de dados.

➤ Sensores elétricos

Os sensores elétricos são também conhecidos como extensómetros e o seu princípio de funcionamento baseia-se na relação existente entre a variação da resistência elétrica e a deformação. Para a avaliação e medição dos sinais geralmente emprega-se a ponte de Wheatstone, um circuito desenvolvido por Charles Wheatstone que permite medir impedâncias com grande sensibilidade.

Como podemos verificar na figura 3, a ponte de Whatstone é um esquema de montagem de um circuito composto por uma fonte de tensão, um voltímetro e quatro resistores,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_x$ , respetivamente.

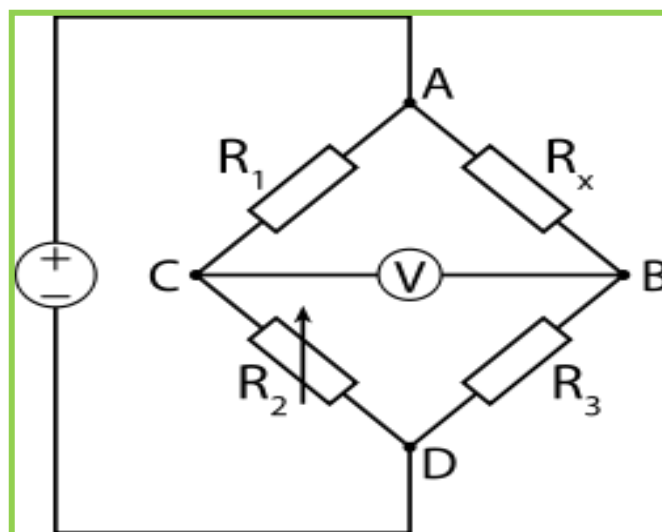


Figura 3: Ponte de Wheatstone

➤ **Sensores Acústicos ou de Corda Vibrante**

O princípio de funcionamento destes sensores é fundamentado na relação existente entre a frequência de uma corda tensionada, de frequência natural conhecida e a tensão à qual a corda está submetida.

Estes sensores são muito utilizados na observação de pontes ou barragens e também na construção de células de carga ou transdutores de deslocamentos.

➤ **Sensores de Fibra Ótica**

Estes são os sensores mais recentes pois a tecnologia da fibra ótica ainda está a ser estudada e desenvolvida, mas mesmo sendo uma tecnologia recente tem sido aplicada com sucesso na monitorização do comportamento de barragens e pontes.

Estes sensores têm permitido obter informação essencial acerca do comportamento destas mesmas obras ao longo do tempo.

Os sensores de Bragg e os sensores de Fabry-Perot são os mais utilizados para medir temperaturas e extensões.

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. Os extensómetros mais utilizados são os de corda vibrante e os extensómetros de resistência.

### **2.3.2 - Medição de deslocamentos**

Para proceder à medição de deslocamentos podemos recorrer a:

➤ **Comparadores elétricos**

São transdutores constituídos por um elemento elástico, geralmente em aço, cuja deformação é captada por extensómetros de resistência elétrica.

A deformação medida é convertida em deslocamento a partir da curva de calibração do dispositivo.

➤ **Transdutores (capacitivos, indutivos, resistivos)**

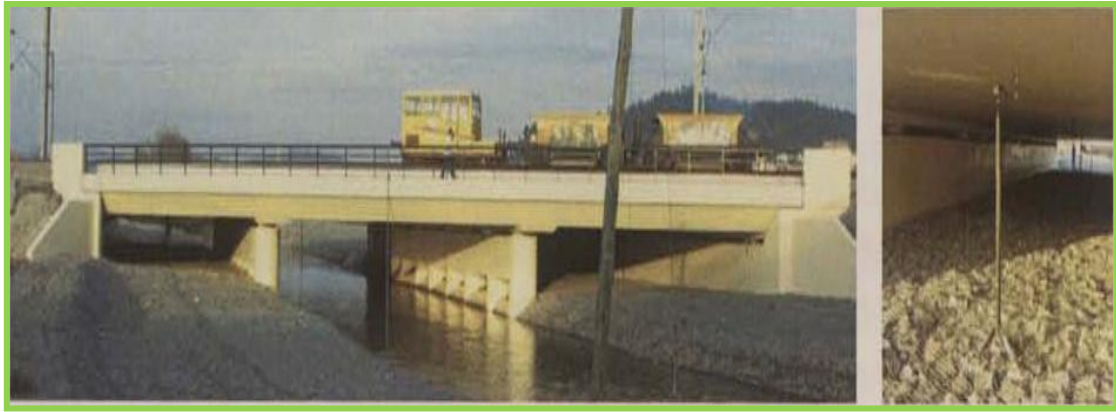
Transdutores são dispositivos que convertem uma forma de energia em outra forma de energia. Na maioria dos casos consiste em converter uma grandeza física tal como som, temperatura, pressão, velocidade ou luz, numa grandeza elétrica.

Transdutores capacitivos – baseiam-se na variação da capacidade de um condensador por variação entre placas. Estes equipamentos são utilizados de modo a transformar uma variação da distância numa indicação numérica. São exemplo o paquímetro digital e o comparador digital de deslocamento [1]



Figura 4: Comparador digital de deslocamento [1]

Transdutores indutivos – associam a variação de uma grandeza não elétrica a uma alteração da indutância ou autoindução de uma bobine. Nesta classe de transdutores destaca-se o LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). Estes transdutores apresentam uma elevada repetibilidade, boa estabilidade a longo prazo, prolongada vida mecânica, excelente resistência à humidade e corrosão e boa resposta tanto em medidas estáticas como também em medidas dinâmicas. Este instrumento é frequentemente utilizado na medição de flechas em obras de arte de pequena altura e na observação de movimentos de juntas de dilatação.



**Figura 5: Medição de flechas com LVDT's [1]**

Transdutores resistivos – nestes transdutores é estabelecido uma relação entre o deslocamento imposto e a resistência do elemento sensor. Neste ramo destacam-se os extensómetros de resistência e os potenciómetros [1] . Nas figuras 6 e 7 pode-se observar alguns exemplos de transdutores de deslocamento resistivos e potenciómetros de posição.

➤ Sistema de nivelamento hidrostático – permite a medição de flechas em tabuleiros de pontes com elevada precisão e está especialmente indicado para situações em que é difícil ou impossível estabelecer referências ao solo [1] .

➤ Outros sistemas de medição como métodos de triangulação com recurso a técnicas topográficas, bem como o GPS, são ferramentas cada vez mais utilizadas com a evolução das novas tecnologias.



**Figura 6: Transdutores de deslocamento resistivos [1]**

a) Transdutor de deslocamento de mola

b) Medidor de abertura de fendas

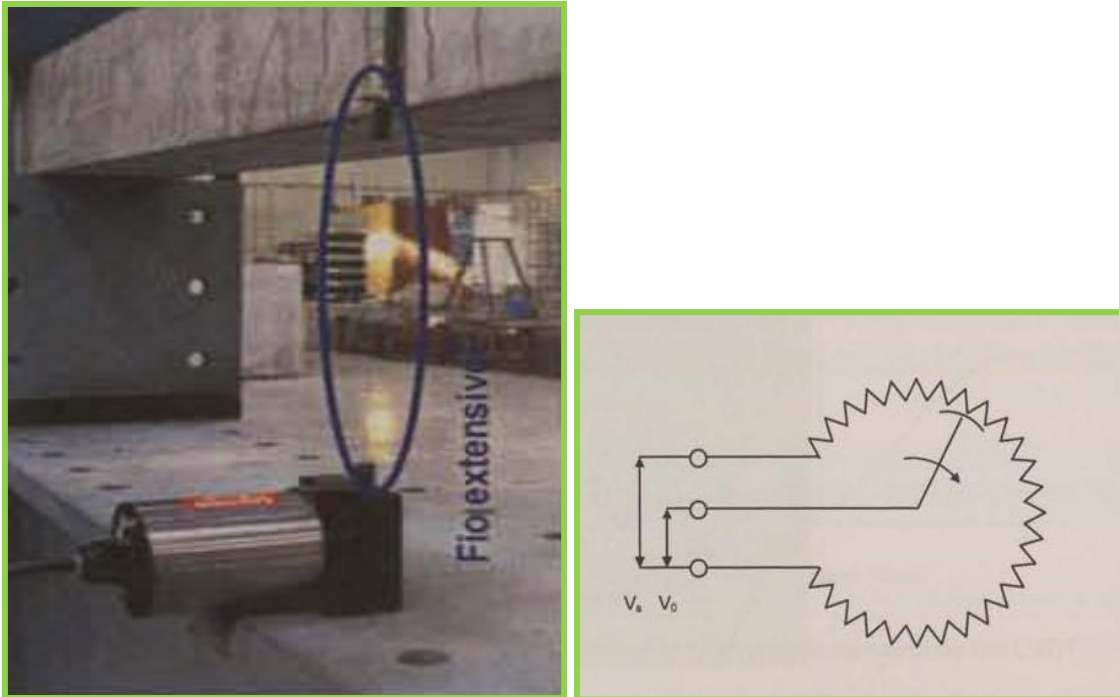


Figura 7: Transdutor potenciométrico [1]

a) Transdutor linear de posição

b) Potenciómetro de posição

### 2.3.3 - Medição da temperatura

A grande maioria das patologias dos materiais e seus componentes está associada às constantes mudanças de temperatura, pelo que a sua medição e monitorização é cada vez mais importante para eliminar ou reduzir as anomalias nas estruturas. A medição de temperaturas no interior do betão é importante para determinar os gradientes térmicos da estrutura e, numa fase inicial, para avaliar o efeito do calor de hidratação durante a cura do betão. Os meios mais utilizados são os pares termoeletrônicos ou termómetros de resistência elétrica.

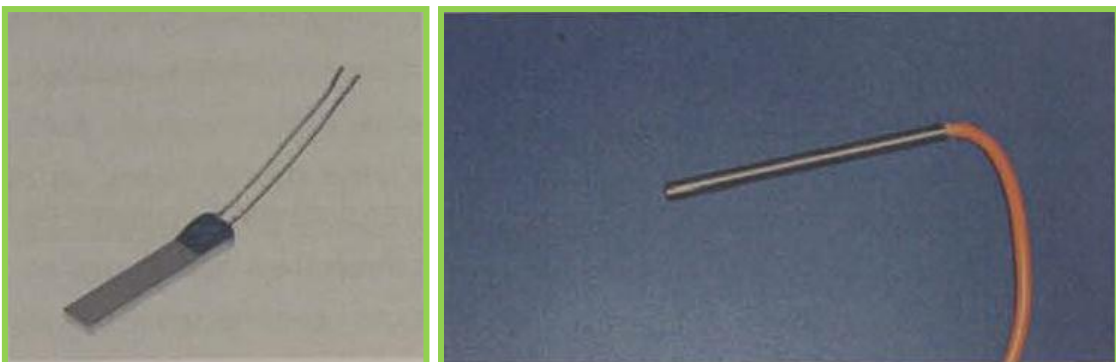


Figura 8: Sensor de temperatura [1]

Relativamente à temperatura superficial dos objetos, esta poderá ser determinada com recurso a equipamentos de termografia de infravermelhos. Os detetores captam a radiação e depois transformam-na em sinais elétricos que definem uma imagem térmica, correspondendo a cada cor uma determinada temperatura.

A termografia tem como principais vantagens a medição de pontes térmicas e deteção de objetos não visíveis sem implicar contacto físico e sem qualquer tipo de destruição ou alteração do objeto.

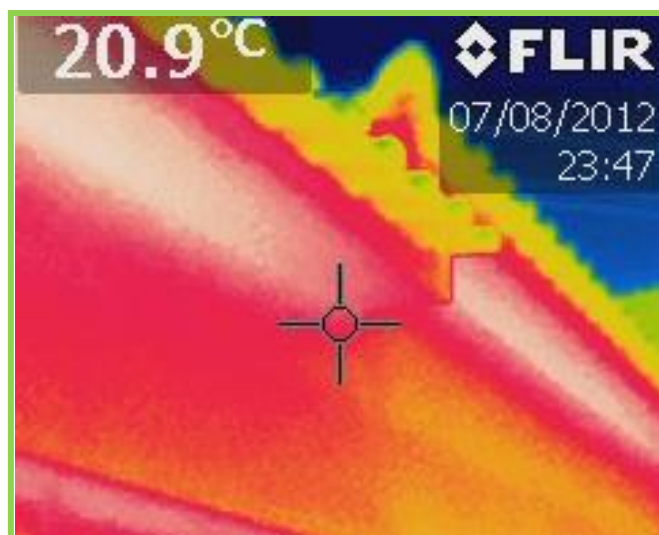
Uma ponte térmica corresponde a uma parte da envolvente cuja condutibilidade térmica é significativamente mais elevada do que nas restantes zonas. Exemplos disso pode ser uma laje de pavimento que suporta uma parede exterior isolada ou que esteja em consola para formar uma varanda, neste caso forma-se uma ponte térmica que facilita a transferência de calor do interior para o exterior [3] .



Figura 9: Câmara térmica de infravermelhos (foto do autor 2012)



Figura 10: Fotografia com câmara normal (foto do autor 2012)

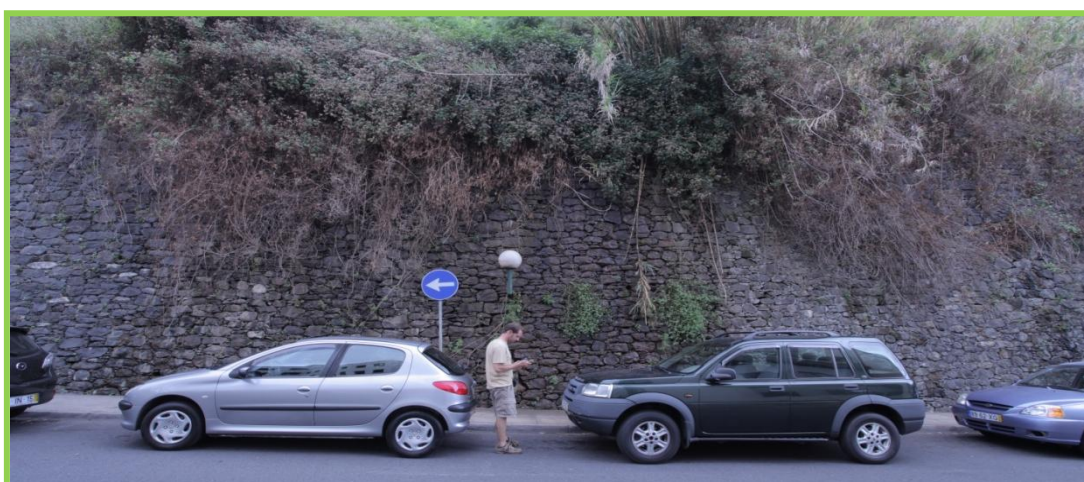


**Figura 11: Fotografia ao mesmo objeto com câmara térmica (foto do autor 2012)**

Como podemos ver nas figuras 10 e 11, com a ajuda da termografia é muito simples detetar pontes térmicas para depois tentar minimizar as perdas de calor, reduzindo a necessidade de recorrer a equipamentos de aquecimento no interior das habitações para melhorar o conforto térmico.

No entanto a emissividade do objeto em estudo, a sua reflexão, bem como a energia emitida pelos corpos vizinhos poderão ser parâmetros que podem provocar alguma influência na recolha da informação, principalmente para distâncias superiores a 10m.

A realização destes testes permite também detetar a presença de humidade nos materiais, devido às heterogeneidades térmicas criadas nos processos de humidificação e secagem dos mesmos.



**Figura 12: Fotografia a uma parede com aparente humidade (Foto de Domingos Rodrigues)**

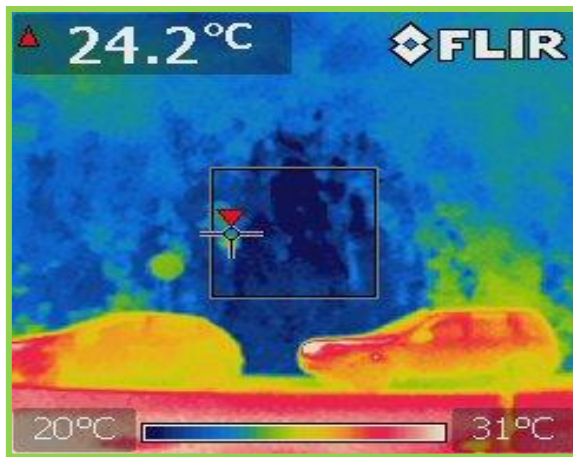


Figura 13: Fotografia ao mesmo objeto com câmara térmica (foto de Domingos Rodrigues)

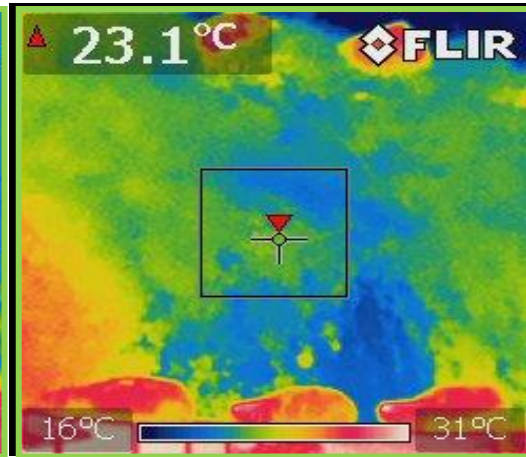


Figura 14: Fotografia ao mesmo objeto com câmara térmica (foto Domingos Rodrigues)

Como podemos verificar nas imagens anteriores existe uma variação térmica na parede identificada sendo as cores mais claras as mais quentes e as escuras as mais frias, devido à presença de humidade.

Após ser localizada a anomalia deve ser feita uma recolha de material através da extração de uma amostra para análise do estado do material, devendo também ser feita a impermeabilização do muro bem como uma análise da rede de drenagem neste local.

### 2.3.4 - Medição da rotação

Existem dois processos formalmente distintos para efetuar esta medição. Um assenta na medição da variação angular de um dado eixo, entre uma posição inicial e uma posição final. No segundo processo mede-se o desvio angular de um determinado eixo em relação a um plano de referência fixo e assim mede-se as inclinações absolutas. O plano de referência adotado é em geral e por uma questão de simplificação de processos o horizontal ou o vertical.

O instrumento de medida destinado para medir variações angulares é designado clinómetro, enquanto o destinado a medir rotações absolutas é o inclinómetro [1]. Na figura 15 é possível observar um exemplo de um clinómetro e de um inclinómetro respectivamente.

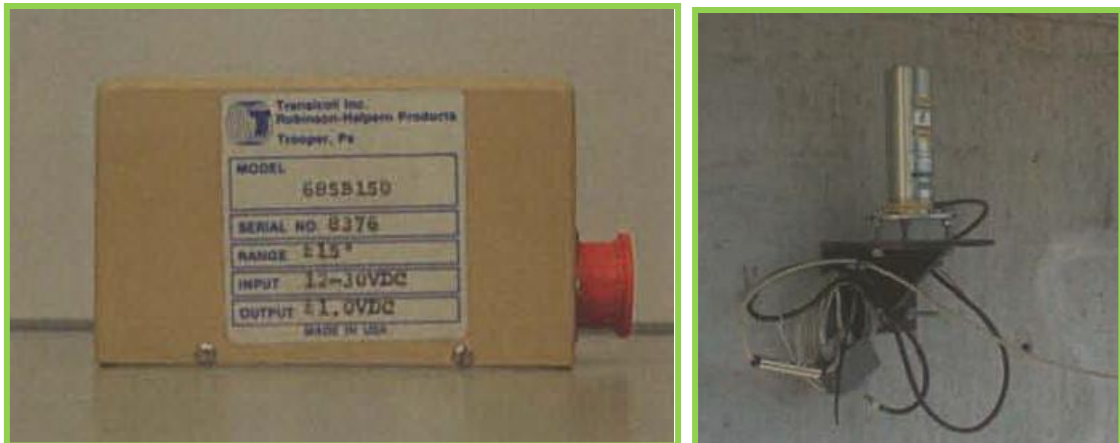


Figura 15: Instrumentos utilizados para medir rotações nomeadamente o clinómetro e o inclinómetro [1]

### 2.3.5 - Medição da força

A medição da força interessa fundamentalmente quando se pretende acompanhar a tração em tirantes, em cabos de pré-esforço ou em reações de apoio.

Mais recentemente têm também sido desenvolvidos sistemas que permitem a pesagem de veículos em movimento.

#### 2.3.5.1 - Medição de forças em tirantes

Nas pontes suspensas ou atirantadas, a tensão instalada nos cabos fornece informação importante sobre o comportamento global da estrutura.

O modo mais direto e económico para medir forças em tirantes consiste na pré-instalação de células de carga em pelo menos um dos cordões do tirante, pois admite-se que todos os cordões estão sujeitos à mesma tensão. Este método no entanto é um pouco dispendioso e com exigências de instalação delicadas pois interferem no sistema estrutural, mas em compensação permite um acompanhamento permanente viabilizando uma melhor monitorização contínua e automática.

### **2.3.5.2 - Medição de forças em cabos de pré-esforço**

A medição da força em cabos de pré-esforço pode ser feita do mesmo modo que o caso anterior, mas esses processos apenas permitem observar o valor do pré-esforço nas extremidades do cabo, a medição do esforço a que é sujeito o cabo nas outras secções poderá ser feito através da instalação de extensómetros ao longo do cabo.

## **2.4 - Monitorização, Observação e Reabilitação de Estruturas já existentes**

Como é referido neste trabalho, o diagnóstico estrutural deve requerer ensaios experimentais sobre a estrutura ou sobre os seus materiais de modo a permitir de um modo mais preciso a avaliação das suas características físicas e mecânicas para uma melhor análise estrutural.

As técnicas de ensaio em estruturas existentes são geralmente classificadas em destrutivas, ligeiramente destrutivas e não-destrutivas.

Para salvaguardar e preservar o património histórico e cultural da maior parte das estruturas já existentes, as técnicas de ensaios destrutivos não são aconselhadas, principalmente nas estruturas mais antigas. Estes tipos de ensaios destrutivos podem no entanto ser utilizados em outros tipos de construções que estejam destinadas à demolição e já não possam ser preservadas ou não possuam qualquer valor histórico a preservar. Neste caso pode-se utilizar ensaios destrutivos com a intenção de recolher resultados com significativa valia científica.

Assim, nos parágrafos seguintes apresento um resumo dos outros métodos e técnicas de diagnóstico, tal como ensaios “in situ”, em laboratório e de simulação.

No entanto antes de proceder aos ensaios é necessário criar um procedimento de atuação e procurar obter a máxima informação possível devido ao desconhecimento, diversidade e heterogeneidade das estruturas, e por isso estes passos devem ser analisados caso a caso.

Essa informação baseia-se em [4] :

- Recolha de informação possível;
- Inspeção visual, incluindo o seu estado de conservação geral;
- Levantamento fotográfico;
- Identificação dos pontos de maior fragilidade;
- Primeira avaliação e tentativa de interpretação;
- Procura de sinais e informação relativamente à envolvente;
- Estudo sobre o histórico da estrutura
- Relatório com as conclusões

### **2.4.1 - Ensaios “in situ”**

Estes tipos de técnicas e ensaios baseiam-se em trabalhos muito detalhados de levantamentos e sondagens. Estes ensaios podem ser: de inspeção visual, não destrutivos, parcialmente destrutivos ou destrutivos.

#### **2.4.1.1 - Ensaios com métodos de inspeção visual**

- Fotogrametria
- Levantamento tradicional (permite proceder ao levantamento do objeto em estudo, com alguma falta de rigor, sendo um processo bastante moroso e de difícil concretização em certos locais devido à dificuldade de acesso. Contudo, numa pequena abordagem para pequenas situações podem ser utilizados instrumentos bastante práticos e suficientes para o pretendido, como é o caso da arqueologia e levantamento de determinados elementos arquitetónicos. Os instrumentos utilizados neste método podem ser esquadro, régua, micrómetro, metro, fita métrica, etc.)[4]
  - Levantamento com instrumentos eletrónicos e lasers (teodolitos)
  - Visão interior de estruturas (através de câmaras baroscópicas)
  - Avaliação de fissuras
  - Avaliação de deslocamentos

#### **2.4.1.2 - Ensaios não destrutivos**

Estes ensaios não requerem intervenções diretamente invasivas na estrutura, sendo o seu resultado geralmente qualitativo, fornecendo uma avaliação preliminar das características mecânicas dos materiais, nomeadamente índices de qualidade dos mesmos. Os ensaios que mais se destacam são:

- Ensaios superficiais
- Ensaios dinâmicos
- Ensaios de radar
- Termografia por infravermelhos
- Termografia sónica
- Análise eletromagnética
- Impacto a eco
- Identificação da porosidade com mercúrio
- Permeabilidade
- Radioativos
- Ensaios de carga estáticos
- Abertura de poços de dolos e de fundações [4]

#### **2.4.1.3 - Ensaios parcialmente destrutivos**

Apesar das técnicas de ensaio não-destrutivas fornecerem uma visão qualitativa da estrutura, a informação mais detalhada sobre as características dos materiais deve, sempre que possível ser apoiada com ensaios mais específicos que induzem em pequenas perturbações na estrutura.

- Macacos planos
- Carotagem
- Dilatómetro
- Furação e arranque
- Penetração controlada
- Microperfuração
- Abertura para exame visual

#### 2.4.1.4 - Ensaios destrutivos

- Ensaios de carga

#### 2.4.2 - Ensaios Laboratoriais

- Raios X
- Difração dos raios X
- Fluorescência de raios X
- Análise petrográfica
- Caracterização dos blocos de pedra
- Compressão uniaxial
- Tração por compressão diametral
- Corte
- Determinação módulo de elasticidade
- Determinação do coeficiente de Poisson
- Caracterização de juntas
- Análises térmicas
- Argamassas em pasta ou endurecidas
- Ensaios “in situ” sobre revestimentos endurecidos

#### 2.4.3 - Sensores baseados em sistemas de satélite

Em estruturas flexíveis, como pontes com grandes vãos e edifícios muito altos, é possível utilizar sistemas de GPS para medir o deslocamento em 3 direções. Dependendo do aparelho recetor, da distância entre as estações e do número e distribuição geométrica dos satélites utilizados conseguem-se obter valores com elevada precisão.

**Vantagens** - permitem através de um sistema de fácil instalação, a monitorização tridimensional da estrutura de uma forma contínua.

**Condicionantes** - os sinais emitidos pelos satélites nem sempre chegam nas melhores condições aos recetores, podendo estes serem bloqueados ou obstruídos por obstáculos que se encontram na mesma trajetória, estes casos são ainda mais comuns

em estruturas localizadas em ambiente urbano. O número e a forma dos satélites visíveis depende do local onde está a ser feita a medição e nem sempre a localização é a melhor para assegurar uma boa precisão das medições ao longo de todo o período de observação. Uma maneira de ultrapassar estes contratempos consiste na utilização de pseudo-satélites que são transmissores de sinais de GPS instalados em Terra.

A vantagem destes pseudo-satélites é a otimização da sua localização, melhorando a corrente de informação transmitida pelos restantes satélites.

#### **2.4.4 - Sensores baseados em Fibras Óticas**

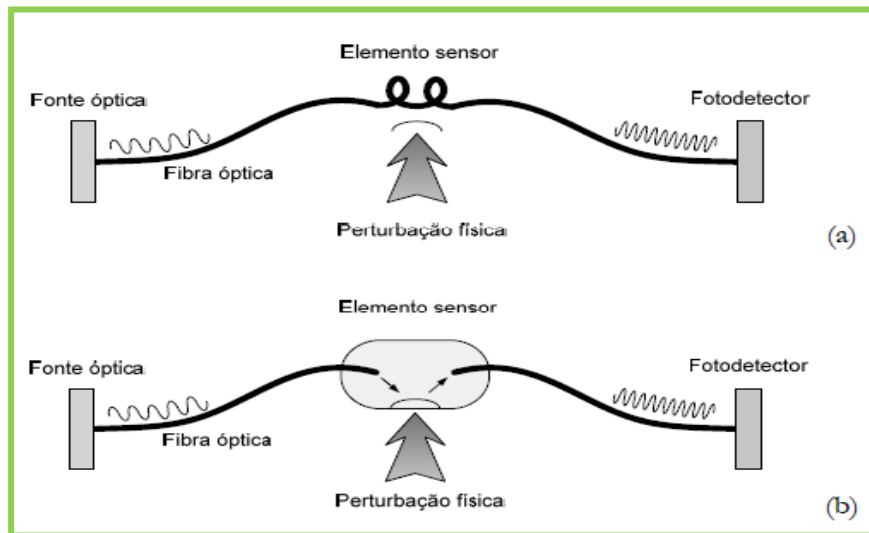
As alterações físicas que ocorrem num material provocam em geral variações na fase, intensidade, no comprimento de onda ou na polarização da luz propagada através de uma fibra ótica, a partir da qual é possível extrair alguma informação sobre as grandezas a medir.

Relativamente a sensores de fibra ótica existem dois grupos. Os intrínsecos em que a fibra é ao mesmo tempo a condutora e o sensor pois o mensurado atua diretamente na fibra, alterando as características da radiação. Os sensores deste género têm a vantagem de serem imunes a ambientes sujos pois o caminho ótico é fechado, e os extrínsecos onde a fibra é apenas usada para guiar a luz enquanto que o efeito ótico ocorre fora da fibra. Neste caso o elemento sensor recebe a luz da fibra ótica, alterando-a consoante a perturbação física que esteja a sofrer e reencaminha-a para o foto-detector.

São geralmente apontadas algumas vantagens aos sensores do tipo intrínseco face aos do tipo extrínseco, nomeadamente:

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

De um ponto de vista comercial, e pelas razões apontadas, os sensores do tipo intrínseco tendem a ser mais robustos e mais versáteis na sua instalação. Estas vantagens conseguem superar um dos seus aspetos mais negativos, o facto de apresentarem um maior investimento financeiro em relação aos sensores do tipo extrínseco [5].



**Figura 16: Sensores óticos** a) intrínsecos e b) extrínsecos [6]

Na monitorização estrutural através de fibra ótica destacam-se:

- Sensores de Fabry-Pérot
- Interferómetros de luz branca em fibra ótica
- Sensores de Raman e Brillouin
- Redes de Bragg em fibra ótica
- Sensores interferométricos de Mach-Zehnder e Michelson

### **Vantagens**

- Passividade elétrica
- Baixo consumo de corrente
- Imunidade às interferências eletromagnéticas
- Tolerância a temperaturas elevadas
- Possibilidade de utilizar em ambientes corrosivos e elevado teor de humidade.
- Dimensões e pesos reduzidos
- Grande largura de banda
- Elevada sensibilidade

- Longa distância de transmissão
- Possibilidade de multiplexação dos sinais para implementar redes de sensores.

### **Desvantagens**

- Fragilidade
- Dificuldade em realizar conexões e junções com baixo nível de perdas
- Elevado custo dos sensores

Em 2002, um investigador do instituto aeroespacial do Canadá chamado Nezhir Mrad, construiu uma tabela onde resume os vários tipos de sensores óticos, que já foram anteriormente referidos, onde avalia o respetivo desempenho em vários parâmetros. Desta tabela sobressaem sobretudo os de Fabry-Perot e os de rede de Bragg [5] .

	<b>Rede de Bragg</b>	<b>Fabry-Perot</b>
<b>Humidade</b>	Sem alterações das propriedades da rede após 1000h, a 85°C e a 85% de humidade relativa	Não são conhecidos trabalhos publicados sobre o assunto
<b>Temperatura</b>	Sem alterações das propriedades da rede após 1000 ciclos térmicos entre -40 a 85°C ou 512 ciclos entre 21 e 427°C	Operação estável entre -20 e 350°C e entre -272 e 750°C (utilização de revestimento de ouro)
<b>Tensão</b>	Falha média a uma tensão de 1,38GPa	Muito baixa (valores não especificados)
<b>Perdas</b>	As perdas de ligação entre redes são inferiores a 0,1 dB	Muito elevadas (mas não consideradas importantes, dado que estes sensores não são normalmente multiplexados por endereçamento individual)
<b>Deformação</b>	Sem alteração das propriedades de rede após 1,4 milhões de ciclos entre 0 e 2500 µε	Demonstrados 10 milhões de ciclos entre 0 e 3600 µε mas não em sensores comerciais

**Tabela 1: Características de fiabilidade entre os sensores de rede de Bragg e de Fabry-Perot[5]**

### 2.4.4.1 - Áreas de intervenção atuais e futuras



Figura 17: Monitorização de condutas de petróleo e gás [24]



Figura 18: Monitorização de Barragens [24]



Figura 19: Monitorização de Campos petrolíferos [24]



Figura 20: Monitorização de Pontes [24]



Figura 21: Monitorização de Linhas de Alta Tensão [24]



Figura 22: Monitorização de Perímetros de Segurança [24]

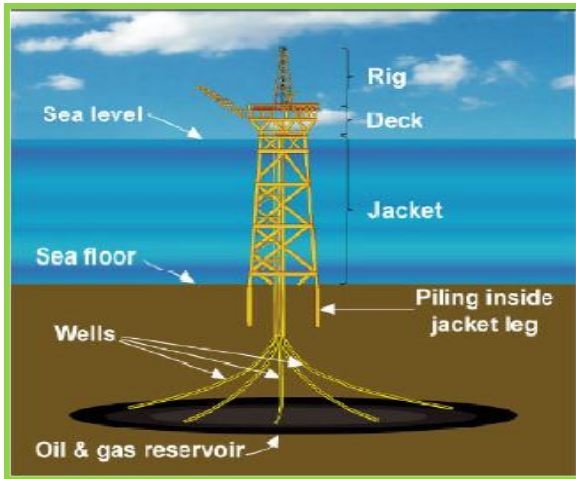


Figura 23: Monitorização de Reservatórios [24]

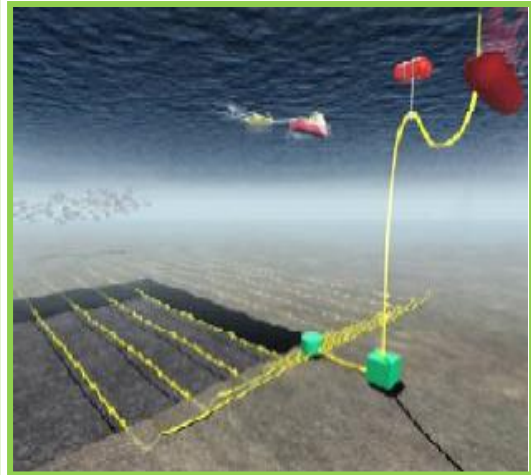


Figura 24: Mapas Sísmicos [24]

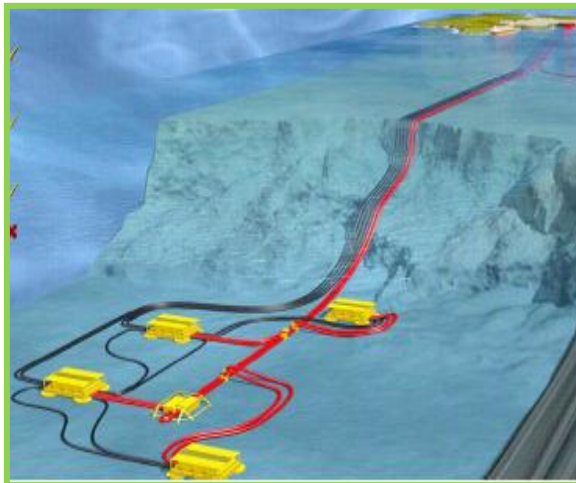


Figura 25: Monitorização de Plataformas Continentais [24]



Figura 26: Monitorização da Temperatura da água [24]

#### 2.4.4.2 - Algumas das intervenções já efetuadas e conhecidas



128 Sensores

3 km de cabos de fibra ótica

Equipamentos de medida

Figura 27: Ponte D. Luiz I em 2004 [24]



408 Sensores

Figura 28: Intervenção na Rede Holandesa de Alta Velocidade em 2006 [24]



840 Sensores

18 km de cabos de fibra ótica

Equipamentos de medida

Gestão de dados

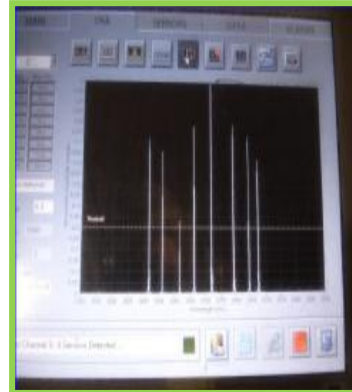


Figura 29: Intervenção no túnel do Rossio em 2007 [24]



22 Sensores

Equipamentos de medida

Gestão de dados



Figura 30: Viadutos de Anzo e Deza – Espanha em 2008 [24]

### 2.4.5 - Sistema de varrimento baseado em LRF

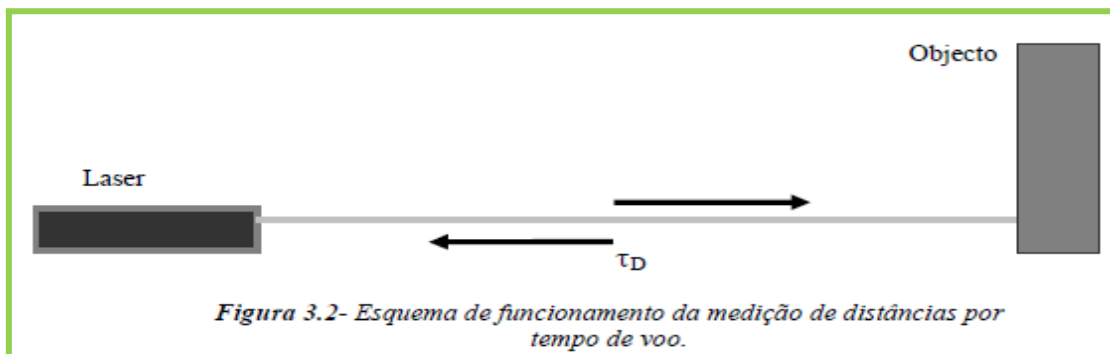
O sistema de varrimento é feito com um laser medidor de distâncias. Estes equipamentos podem ter vários tipos de funcionamento, no entanto o seu princípio base é sempre o mesmo e consiste na emissão de um determinado sinal ótico para um objeto e posterior análise do sinal refletido.

O varrimento laser tem sido muito utilizado para diferentes funções, nomeadamente na aquisição de dados sobre objetos com cariz histórico e sua posterior reconstrução tridimensional.

O processo de receção e análise desse sinal varia consoante o tipo de laser que poderá ser através do tempo de voo, por triangulação ou por diferença de fase [7]

Para a medição de distâncias por tempo de voo, é gerado um impulso ótico através de um laser e projetado num determinado alvo, sendo então medido o tempo que esse impulso demora até atingir o alvo, ser refletido e voltar até ao detetor.

Na figura 31 é mostrado o princípio de funcionamento deste método de medição.



**Figura 31: Esquema da medição de distância por tempo de voo [2]**

Sendo  $D$  a distância do medidor ao alvo,  $\tau D$  o tempo de que o pulso leva para efetuar todo o percurso e  $c$  a velocidade da luz, então [8] :

$$D = (c \times \tau_D) / 2 \quad (3.1)$$

A equação (3.1) traduz matematicamente o fenómeno anteriormente descrito, e permite determinar a distância existente entre o medidor e um determinado objeto/alvo.

Relativamente à medição de distâncias por triangulação laser, um feixe é projetado na superfície de um determinado objeto e a imagem do ponto de luz criado pelo mesmo feixe é visualizado numa câmara CCD (*Charge-Coupled Device*).

Quando o objeto se move, a imagem refletida muda de posição e a posição da câmara é conseqüentemente alterada.

Na figura seguinte está esquematizado o modo de funcionamento de um medidor laser por triangulação.

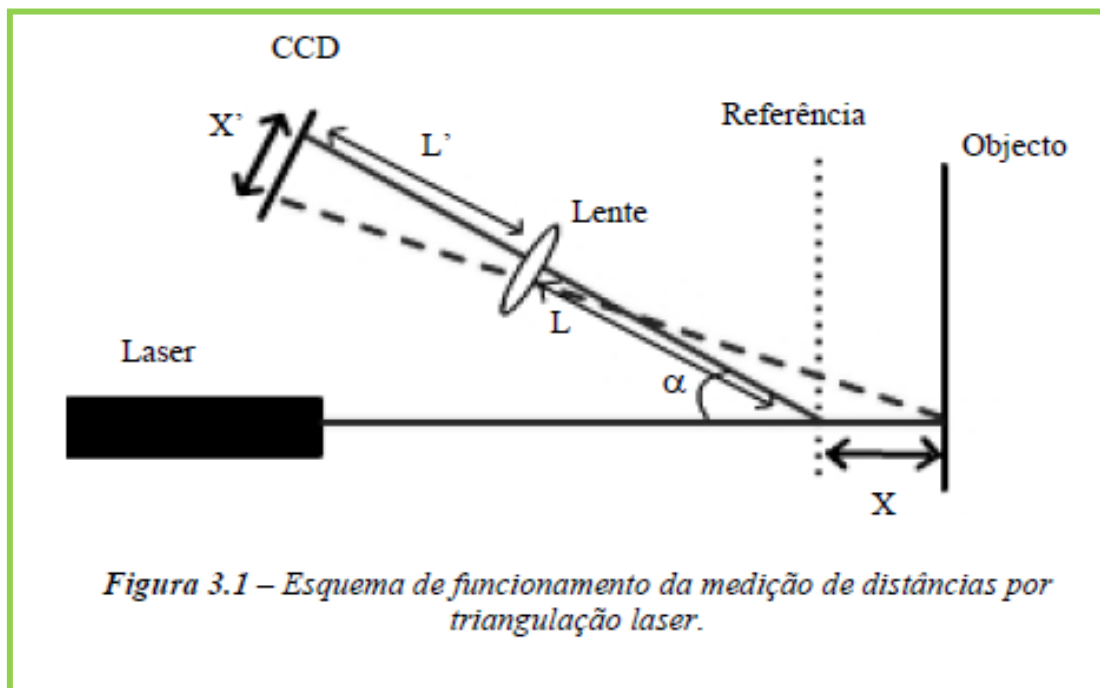


Figura 32: Esquema da medição de distâncias por triangulação laser [2]

A relação entre a variação da posição do objeto e a variação da posição da imagem na câmara CCD é dada por:

$$X = (X' \times L) / (L' \times \text{sen}\alpha - X' \times \text{cos}\alpha)$$

Onde X e X' representam o deslocamento real e o deslocamento da imagem na CCD respetivamente; L, L' e  $\alpha$  são parâmetros estruturais, determinados por requerimentos específicos. Assim, através da medição de X' é possível determinar o deslocamento do objeto [2].

Finalmente é verificada a medição de distâncias por diferença de fase, neste caso é emitido pelo laser um sinal óptico modulado com uma frequência  $f$  constante. Após reflexão na superfície do alvo situado a uma distância  $D$ , o sinal é recebido por um fotodiodo com uma diferença de fase  $\Delta\varphi$  [2] .

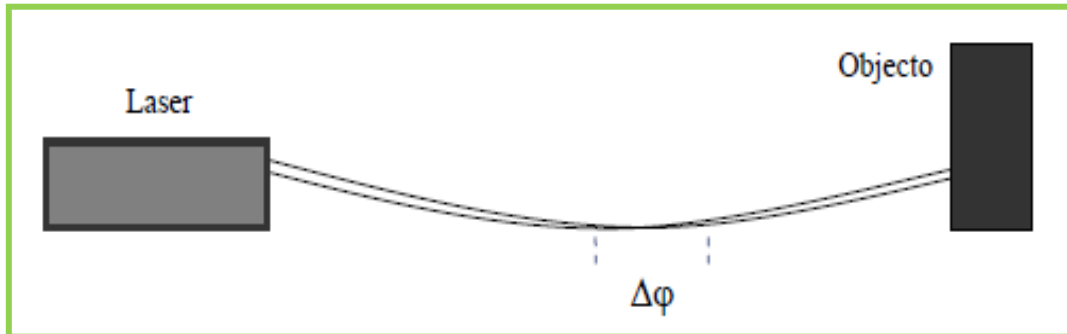


Figura 33: Esquema da medição de distâncias por diferença de fase [2]

Em seguida temos uma exemplificação da monitorização com este sistema.



Figura 34: Esquema do perfil de varrimento [2]

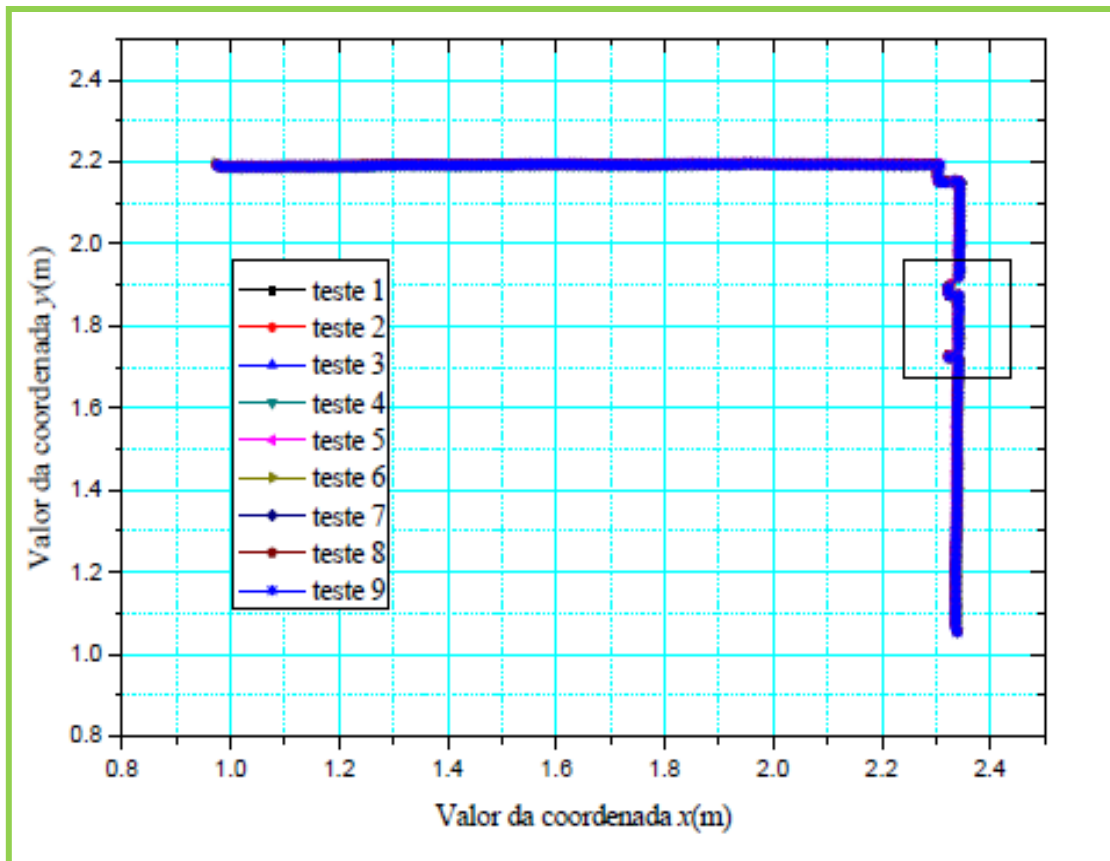


Figura 35: Sobreposição de dados relativos a vários varrimentos efetuados ao mesmo perfil de uma parede [2]

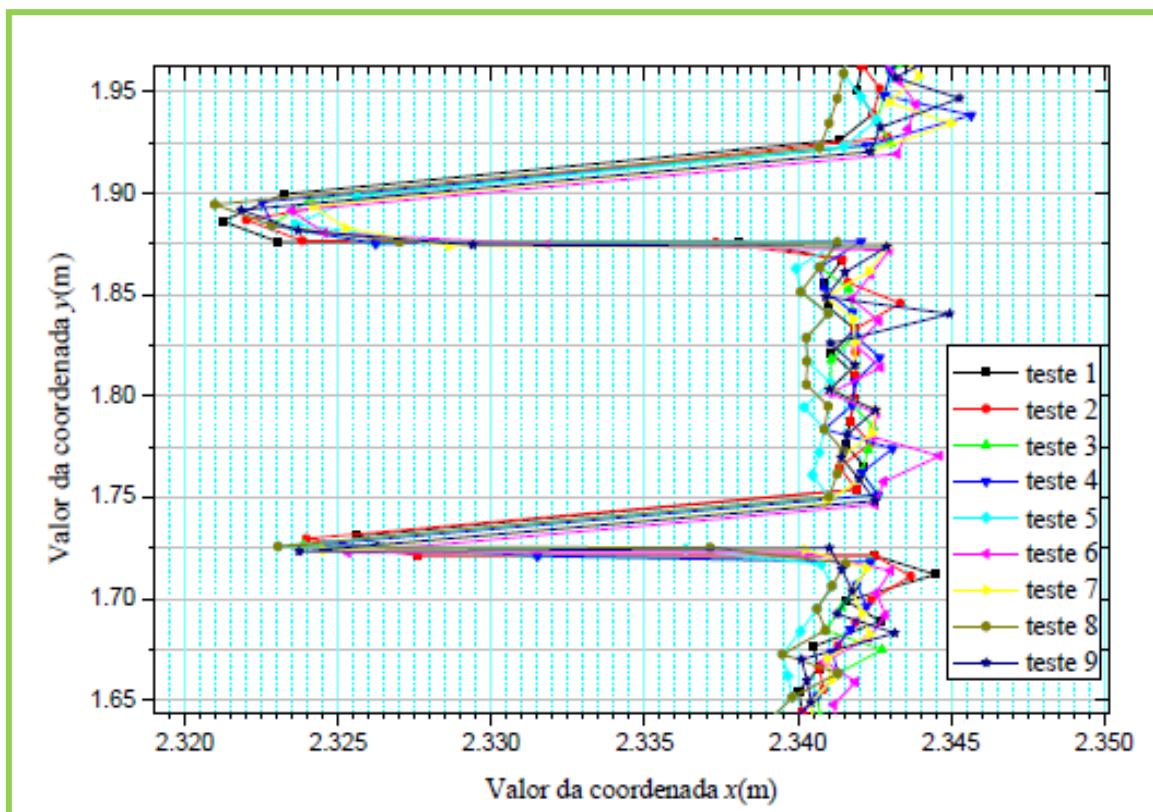


Figura 36: Ampliação dos dados adquiridos para o mesmo perfil de uma parede [2]

Foram também efetuados varrimentos laser num dos pilares do Arco Cruzeiro da Igreja da Misericórdia em Aveiro, no entanto pelo facto de este edifício ser aberto ao público, foram encontradas algumas dificuldades na implementação do sistema de varrimento. As correntes de ar geradas no interior do edifício, bem como as próprias vibrações do edifício, podem provocar variações na aquisição de distância que não são diretamente relacionáveis com o movimento estrutural associado ao seu estado de conservação.

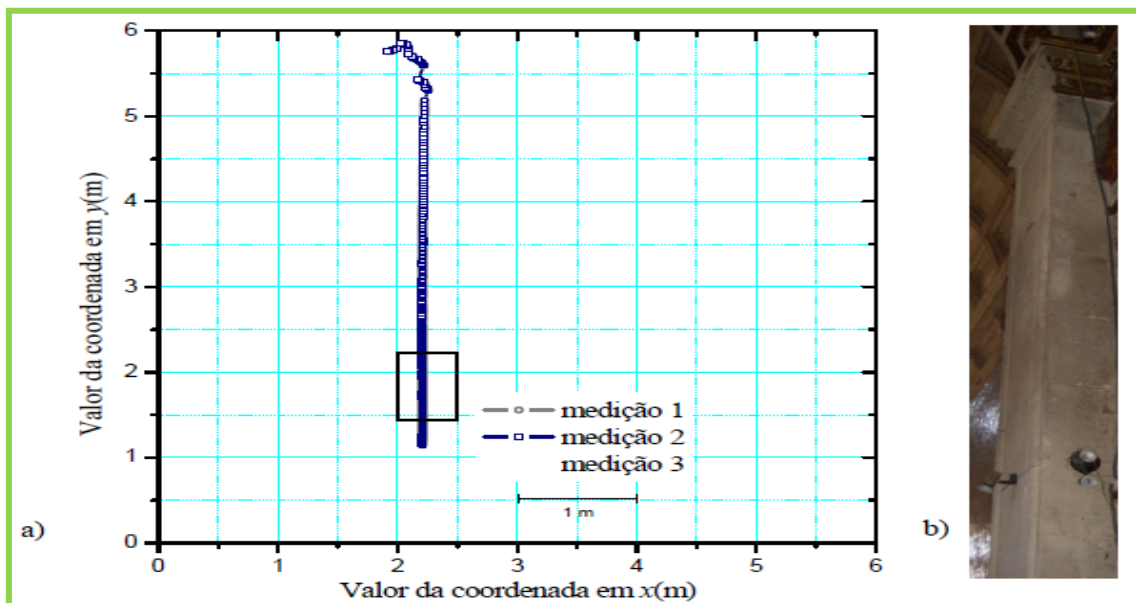


Figura 37: Representação gráfica dos dados relativos ao perfil de um Pilar [9] -

#### 2.4.6 - Unidade de aquisição de dados

A base destes equipamentos é composta pelos sensores e pelas unidades de aquisição. Os sensores tal como já foi referido anteriormente geram sinais analógicos ou digitais que representam grandezas físicas que estão a ser monitorizadas.

As unidades de aquisição recolhem os sinais produzidos pelos sensores e fazem o seu posterior condicionamento e conversão, estas podem arquivar e analisar os sinais adquiridos ou então transmiti-los para um computador onde possam ser guardados, analisados e interpretados de uma forma mais completa.

A alimentação das unidades de aquisição de dados pode ser feita através de baterias ou então com sistemas de energia renováveis.

Os sistemas de aquisição permitem:

- Registo automático dos sinais provenientes de todos os sensores, mesmo que tenham princípios de funcionamento diferentes
- Definir diferentes cadências de medição em função de cada equipamento ou da grandeza que se pretende adquirir
- Definir condições de alarmes e enviar sinais de aviso
- Implementar uma rede de unidades de aquisição, centralizando a monitorização numa destas unidades.
- Estabelecer ligações remotas ao centro de estudos permitindo a recolha de dados e a alteração e envio de programas.

Problemas / inconvenientes

- A dificuldade na instalação e manuseamento de um grande número de cabos
- Cabos muito longos podem eventualmente aumentar o erro de medição
- Durante a construção os cabos podem ser acidentalmente cortados ou danificados
- A proximidade de linhas de alta tensão ou sinais de rádio podem introduzir o ruído de origem eletromagnética nos cabos elétricos.

Como alternativa existem sistemas sem fios que vêm resolver alguns dos problemas referidos anteriormente, mas que acrescentam outros inconvenientes tais como:

- Custos superiores
- Transferência de dados de uma forma mais lenta
- A transmissão não é completamente segura o que poderá induzir em erro na análise da estrutura
- Elementos estruturais maciços de grandes dimensões constituem um sério obstáculo à transmissão de dados.

#### 2.4.7 - Monitorização de estruturas antigas usando tecnologia Wireless

A análise modal utilizada atualmente para a monitorização estrutural é feita basicamente através de diversos sensores que se conectam a uma plataforma de aquisição de dados através de fios. Esta abordagem no entanto torna-se um pouco inadequada quando se refere a edifícios antigos onde as preocupações estéticas e estruturais são outras, onde o uso de fios causa muito impacto e a sua manutenção e implantação tem um custo muito elevado podendo também afetar até a estrutura. Nestes casos, a utilização de plataformas e sensores sem fios beneficiam claramente estes casos.

A utilização de plataformas wireless e de micro-sensores começou a se desenvolver a partir de 1999 na Universidade da Califórnia, tendo surgido desde então inúmeros avanços neste tipo de tecnologia nos quatro cantos do globo.

Um sistema de monitorização baseado em plataformas Wireless e MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) é composto por 3 partes: unidades de medição estação base e sistemas de ligação e conexão remota. Com a tecnologia dos MEMS é possível termos um chip em miniatura capaz de avaliar vários parâmetros como temperatura, humidade, pressão, etc.

Através destes micro-sensores é possível realizar todas estas medições com um custo relativamente baixo e baixo consumo de energia.

No entanto as plataformas sem fios têm também as suas vantagens e desvantagens. Relativamente às vantagens que vão para além dos aspetos económicos, passando pelo facto de que as plataformas sem fios são mais leves em comparação com os acelerómetros ou outros instrumentos de medida, o processo de aquisição de dados que é também geralmente mais fácil permitindo um trabalho em zonas difíceis.

Ainda nesta área surgem algumas limitações relativamente a uma resolução insuficiente sobre os sensores introduzidos, falta de sincronização, problemas de perda de dados e falta de soluções completamente garantidas para o consumo de energia. Porém, tendo em conta que a tecnologia wireless é ainda uma tecnologia em crescente desenvolvimento, o objetivo é de tentar corrigir e eliminar todas as limitações, como novas placas wireless com sensores mais rápidos e com resoluções mais altas, bem

como uma maior exploração de painéis solares e baterias para resolver o problema do fornecimento de energia.

A Figura 38 mostra de uma forma resumida o desenvolvimento da tecnologia wireless na área da monitorização estrutural e os principais responsáveis por esse mesmo desenvolvimento.

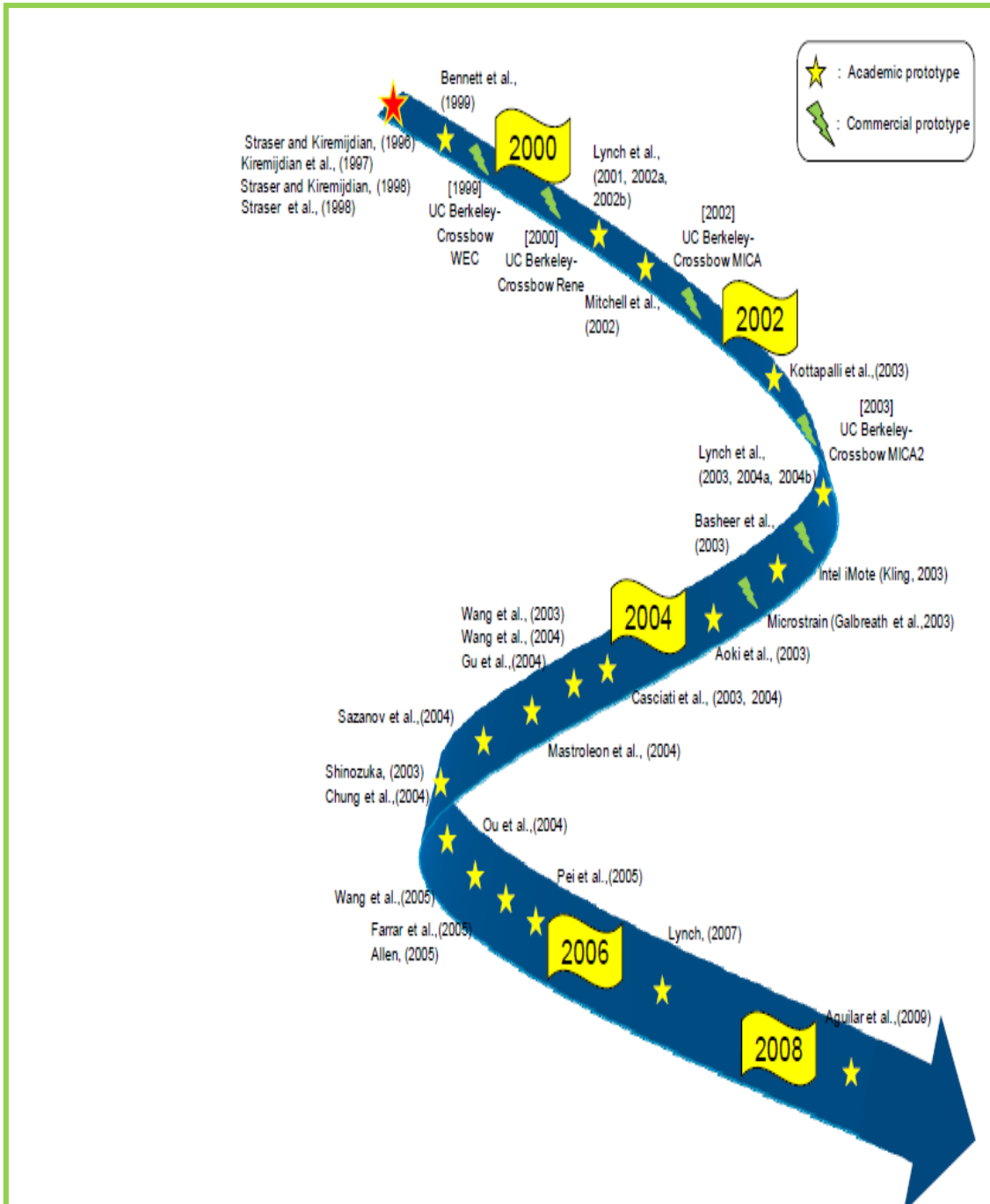


Figura 38: Visão geral do desenvolvimento da tecnologia wireless desde os primeiros passos até 2008 [10]

## 2.4.8 - Monitorização e gestão de Pontes

A monitorização e gestão de pontes inicia-se na fase da conceção da mesma e termina com o fim da vida útil da ponte. Esta gestão do ciclo da vida das pontes pode-se resumir em duas fases:

- Conceção, Projeto e Construção – Gestão preventiva.
- Vida útil – Gestão preventiva (inspeção e manutenção) e reativa (reparação)



Figura 39: Fases do ciclo de vida de uma ponte

Irei em seguida abordar de uma forma superficial e sucinta de como é feita a gestão e manutenção das pontes em vários países da Europa, dando especial atenção a Portugal.

## Sistema de gestão e manutenção na Dinamarca

O sistema de gestão e manutenção de pontes em funcionamento neste país é denominado por Sistema DANBRO, foi desenvolvido por iniciativa dos caminhos-de-ferro e tem a seu cargo a gestão de 2500 obras de arte. De realçar que este sistema foi também adotado na Tailândia onde gere cerca de 10000 obras de arte.

Este sistema dinamarquês contempla 3 fases de inspeção que em seguida descreve-se resumidamente.

Inspeção	Descrição	Informação recolhida e resultados
Inspeção e manutenção de rotina	Inspeções de rotina realizadas por pessoal local	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Definição dos trabalhos de manutenção de rotina necessários à manutenção em boas condições de serviço da ponte.</li> <li>-Definição de um orçamento dos trabalhos a executar com a ajuda do catálogo de preços unitários pelo engenheiro responsável</li> </ul>
Inspeções principais	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Inspeção visual de todas as partes visíveis da ponte. A ponte é dividida em quinze elementos, um dos quais é a própria ponte.</li> <li>-Realizada em períodos de 1 a 6 anos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Registo do estado da ponte (índices de 0 a 5 onde 0- nenhum dano e 5- possível rotura da ponte ou do seu elemento).</li> <li>-Estimativas de custos para todos os programas de reabilitação com 5 anos de antecedência.</li> <li>-Lista de pontes a serem inspecionadas em cada ano</li> <li>-Lista de pontes que requerem uma inspeção especial</li> <li>-Registos que avaliem a eficácia da manutenção de rotina</li> <li>-Definição da data da próxima inspeção a ser feita à ponte.</li> </ul>
Inspeções especiais	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizada por técnicos altamente qualificados</li> <li>-Ensaios destrutivos “in situ” e em laboratório</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-São elaboradas duas ou três estratégias de reparação para um período de 25 anos e avaliadas as suas consequências económicas.</li> </ul>

**Tabela 2: Inspeções previstas no sistema Danbro – Dinamarca [11];[12]**

## Sistema de gestão e manutenção na Finlândia

O sistema de gestão e acompanhamento de pontes iniciou-se em 1986, tendo a seu cargo 13354 pontes e 2757 passagens inferiores e assenta numa base de dados recolhidos através de inspeções e avaliações dos danos observados [11].



**Figura 40: Organização geral do sistema – ligações entre elementos**

A recolha de informação nas inspeções serve para criar um modelo de deterioração das pontes ao longo da sua vida útil.

Para cada dano registado regista-se a sua gravidade, extensão e localização. A gravidade é classificada de 0 (nenhum dano) a 4 (gravoso). Para todos os tipos de danos estão descritos no Manual Finlandês de Inspeções a sua respetiva recomendação para a reparação. Estas técnicas são classificadas de A (tratamentos superficiais) a D (grandes reparações), a que estão associados custos [11].

## Sistema de gestão e manutenção na Suíça

O sistema de gestão de pontes utilizado pelos suíços é denominado KUBA-MS [11].

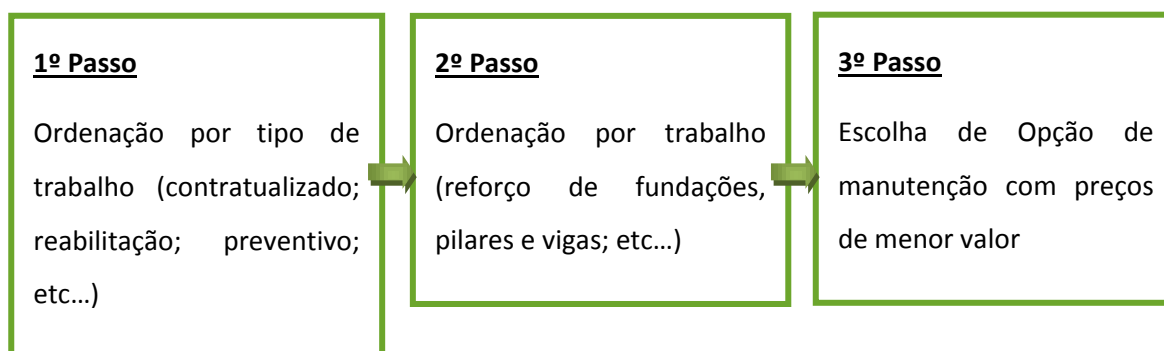
Neste sistema, a avaliação é feita ao nível dos elementos da estrutura, catalogando-os de acordo com elementos tipo existentes num catálogo, posteriormente na fase de avaliação, estes elementos são divididos em segmentos, nomeadamente em função da sua geometria, dimensão, função estrutural e exposição ambiental predominante. A avaliação é feita com uma escala de 5 estados de conservação, desde o bom estado (sem danos) até a alarmante (necessária intervenção urgente).

Este sistema possui um catálogo de ações de reparação e manutenção para cada tipo de anomalia, bem como o custo unitário médio de reparação (valor ponderado através de anteriores reparações). Assim a ordem de prevenção pode ser definida não só pelo seu estado, bem como pela sua relação custo-benefício.

## Sistema de gestão e manutenção no Reino Unido

A gestão das cerca de 150.000 pontes no Reino Unido é feita através do Departamento de Ambiente, Transporte e das Regiões. A base de dados e os respetivos procedimentos de manutenção têm o nome de NATS e mais recentemente tem sido desenvolvido um novo sistema de gestão denominado HiSMIS (*Highway Structures Management Information System*)[11].

O planeamento das ações de conservação é feito para um período de 30 anos, sendo este processo constituído por três passos:



## **Sistema de gestão e manutenção na França**

A gestão de pontes rodoviárias em França cabe ao Departamento de Estradas do Ministério dos Transportes francês (D.R.C.R-M.T). O regulamento utilizado em França só foi estabelecido em 1979 após o colapso de duas pontes. Este regulamento foi denominado “Normas técnicas para a vigilância e manutenção de obras de arte”.

Esta norma organiza-se em 2 capítulos, os manuais de inspeção onde se estabelece como será feita a inspeção consoante o tipo de estrutura, nomeadamente pontes de alvenaria, betão armado, metálicas, túneis, etc. E o segundo capítulo é dedicado ao dossier da obra onde se reúne toda a informação da obra, desde a sua conceção, construção e história, bem como a informação recolhida em anteriores inspeções.

O dossier de obra deve conter informação suficiente para o inspetor poder efetuar uma nova inspeção sabendo à partida os pontos particulares que deve investigar.

Na tabela 3 resume-se os tipos de inspeções efetuadas em França.

## **Sistema de gestão e manutenção em Portugal**

Em Portugal existem varias entidades responsáveis pelas obras de arte no nosso país. São elas:

- EP – Estradas de Portugal, S.A.
- REFER, EPE
- Brisa
- Autoestradas do Atlântico
- Vialitoral
- Viaexpresso
- Aenor
- LusoScut – Beiras Litoral e Alta
- LusoScut – Costa de Prata
- Scutvias

Inspeção	Descrição	Informação recolhida		
Vigilância corrente	<p>Contínua:</p> <p>-Demora alguns minutos</p>	<p>-Observação visual: Flechas importantes, obstrução da drenagem, humidades, estado da sinalização da ponte e das guardas.</p> <p>-É possível detetar defeitos graves que recomendem uma posterior inspeção detalhada</p>		
	<p>Periódicas</p> <p>-Inspeções anuais</p> <p>-Inspeções detalhadas.</p> <p>Realizadas em pontes com mais de 10 metros e de 5 em 5 anos (em alguns elementos a inspeção pode ser anual)</p>	<p>Inspeção anual:</p> <p>Inspeção de observação. Equipamento de inspeção leve e simples</p>	<p>-Estado do tempo, temperatura.</p> <p>-Possível existência de veículos muito pesados.</p> <p>-Exame da envolvente e leitura de equipamentos de monitorização se existir.</p> <p>-Relatório escrito com propostas de trabalhos de manutenção</p>	
		<p>Inspeção detalhada:</p> <p>Inspeção de análise, preparada detalhadamente, chefiadas por especialistas.</p>	<p>Referência: detetar erros de conceção/construção e realização de ensaios de carga e seu relatório.</p> <p>Periódica: análise prévia de inspeções anteriores e do dossier da obra. Extenso relatório com descrição, inventariação, classificação das anomalias e do estado geral da estrutura.</p> <p>Excecional: resulta da deteção de anomalias potencialmente graves</p>	
Vigilância reforçada	<p>Excecional. Serve para detetar o aparecimento ou acompanhar a evolução de uma situação perigosa.</p>	<p>-Análise muito aprofundado da estrutura</p> <p>-Análise preliminar das causas possíveis</p> <p>-Identificação do mecanismo de deterioração e previsão de evolução</p> <p>-Classificação da estrutura em 3 níveis. Quanto maior o nível mais rápido devem se tomar as medidas de prevenção.</p>		

**Tabela 3: Inspeções em França**  
(Fontes: [11]; [12]; [13]; [14])

No entanto todas elas têm um sistema de gestão semelhante pois todas utilizam o mesmo software denominado Sistema GOA (Sistema de gestão de obras de arte). Este sistema apresenta um conjunto de módulos que interagem entre si. Tais como:

- Inventário
- Inspeção Principal
- Inspeção de Rotina / Manutenção
- Inspeção Subaquática
- Transportes Especiais
- Estimativas de Custos
- Ajuste Orçamental
- Histórico
- Consulta

A maioria das pontes de Portugal estão sob a responsabilidade da REFER e esta assegura a realização da inspeção através do seguinte plano:

<b>Inspeção</b>	<b>Periodicidade</b>	<b>Ações</b>
Rotina	Anual	Realizada a toda a estrutura para deteção de anomalias evidentes.
Principal	5 em 5 anos	-Reconhecimento visual de toda a estrutura -nivelamento batimétrico, mapeamento -medição de fendas -Relatório final com classificação de estado por componente e global
Especial	Periodicidade curta ou ocasional (em pontes com avarias ou após situações climáticas adversas)	-Meios de observação complementares, residentes ou pontuais. -Relatório final com classificação do índice de estado por componente e global

**Tabela 4: Inspeções a pontes na REFER [11]**

Após a inspeção ser feita é definido um índice de estado dos elementos que pode variar de 0 a 4 sendo a atribuída a seguinte classificação a cada um dos números.

Índice	Definição	Seguimento
0	Estado normal	
1	Existência de avarias sem importância, cujo tratamento pode ser feito mais tarde, sem inconveniente	Registo para comparação com futuras informações da mesma obra.
2	Avarias sem repercussão a curto prazo na estabilidade da estrutura, implicando a médio prazo custos de manutenção cada vez mais elevados, carecendo de intervenção assim que possível.	Realização de inspeções de acompanhamento frequentes, podendo incluir a colocação de meios permanentes de medição
3	Avarias importantes, suscetíveis de provocar, a curto prazo, restrições às circulações, carecendo de intervenção logo que possível.	Inspeção detalhada imediata, seguida de vigilância permanente ou de trabalhos de reparação
4	Avarias que impõem atuação imediata	Trabalhos de reparação imediatos

**Tabela 5: Níveis de avaliação da conservação de pontes na REFER [11]**

Os equipamentos vulgarmente necessários para as inspeções periódicas são:

- Binóculos, lanternas, espelhos, máquina fotográfica, PDA com informação de suporte, etc (Figura 41).
- Ferramentas de limpeza ligeiras (Figura 42).
- Canivetes, martelo, chave de fendas, fita métrica, fio de prumo, termómetro, inclinómetro, etc (Figura 43 e 44).



**Figura 41: Equipamentos de auxílio visual numa inspeção [11]**



**Figura 42: Ferramentas de limpeza e auxílio na inspeção [11]**



Figura 43: Ferramentas inspeção [11]



Figura 44: Ferramentas de medição [11]



Figura 45: Computador portátil como suporte à inspeção [11]



Figura 46: Aparelho rotativo de percussão para identificação de anomalias no betão [11]

A Inspeção detalhada deve incluir:

- Inspeção visual a todos os elementos;
- Medição e recolha de amostras do material;
- Nivelamento topográfico;
- Relatório detalhado com fotografias que permitam alimentar os módulos de inspeção do sistema de gestão de pontes.
- Classificação do nível de conservação por elemento e para a ponte no global
- Avaliação de necessidades de manutenção e reparação
- Mapeamento detalhado das anomalias detetadas.



Figura 47: Inspeção principal (à distância de um braço dos elementos) [11]



Figura 48: Ensaios Ultrassônicos [11]

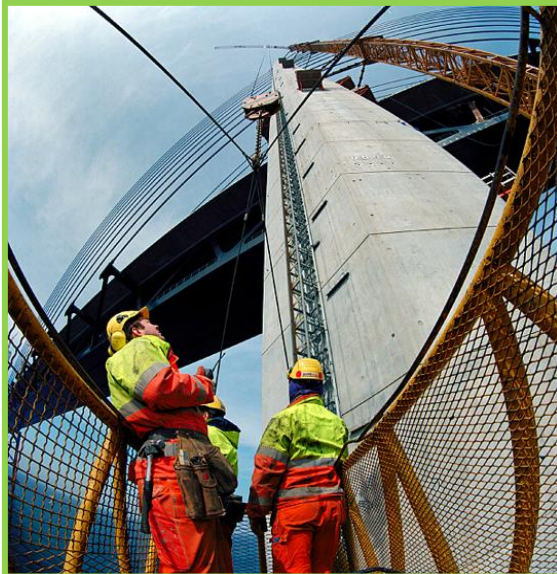


Figura 49: Inspeção com veículo de gaiola basculante [11]

Nos casos em que as pontes atravessem zonas com água deve-se acrescentar as seguintes inspeções:

- Inspeção subaquática para avaliação de possível infraescavação das fundações.
- Nivelamento topográfico e batimétrico

Relativamente às inspeções subaquáticas podem dividir-se em dois tipos:

- Inspeções de rotina, realizadas nas estações secas (nível da água está mais baixo), permitindo fazer uma avaliação das fundações sem necessidade de equipamento de mergulho especial.



**Figura 50: Inspeções Subaquáticas em estações secas [11]**

- Inspeções subaquáticas - devem ser realizadas de 5 em 5 anos, procurando fazê-las coincidir com as inspeções detalhadas. Porém, sempre que se verificarem condições climatéricas adversas, alterações do leito do rio (naturais ou por intervenção humana), construções de barragens a montante, obras na zona de influência da ponte ou situações imprevistas (danos estruturais, infraescavação, erosão, gelo, impacto de navio, etc.) este intervalo deve ser encurtado [11].



**Figura 51: Inspeções subaquáticas [11]**

E finalmente, a monitorização que tem vindo a assumir uma importância crescente ao longo dos últimos tempos fruto do desenvolvimento da ciência e das novas tecnologias através de sensores.

Em geral as anomalias só são visíveis muito tempo depois de se desencadear a anomalia, com estes sensores muitas dessas anomalias podem ser detetadas instantaneamente. Além da redução do risco, estes sensores permitem reduzir os custos de manutenção pois o custo de reparação é mais baixo (menor deterioração).



**Figura 52: Sensores de deformação no arco da Ponte Luiz I [11]**

Graças a estes sistemas de monitorização podemos:

- Reduzir o risco de rotura imprevista;
- Obter uma maior fiabilidade na construção de modelos de deterioração
- Implementar medidas de conservação mais rápidas e económicas
- Reduzir custos das atividades de inspeção (pode-se espaçar mais as inspeções de vigilância contínua visual).



## Capítulo 3 - Monitorização com UAV

### 3.1 - Introdução

O termo UAV significa veículo aéreo não tripulado (*Unmanned Aerial Vehicle*) e como o próprio nome indica, refere-se a uma classe de aeronaves que podem voar sem a presença de piloto a bordo. Estas aeronaves podem ser pilotadas a partir do solo em regime manual ou automático utilizando coordenadas de GPS definidas. Em termos de nomenclatura podem ainda ser utilizados outras expressões, tais como, RPV (*veículo remotamente pilotado – Remotely Piloted Vehicle*), Drone, ROA (*Remotely Operated Aircraft*) e UVS (*Unmanned Vehicle System*).

Os primeiros desenvolvimentos para UAV's começaram na década de 50 e destinavam-se exclusivamente para fins militares. Diferentes projetos foram iniciados em diferentes países com o objetivo de produzir veículos capazes de transportar missões sem piloto a bordo de modo a evitar ainda mais perdas. O desenvolvimento deste tipo de tecnologia foi aumentando rapidamente, através de novas tecnologias, muita investigação e muitos softwares de modo a satisfazer totalmente os requisitos solicitados no âmbito militar. O sucesso dos UAVs veio oferecer um estímulo e incentivo para desenvolver estes equipamentos para aplicações civis, especialmente no campo da monitorização ambiental, nas estruturas, na agricultura e na segurança pública. Ainda assim o investimento e utilização destes equipamentos em aplicações civis ainda são muito reduzidos.

Em 2004 apenas 2% destas aeronaves disponíveis eram utilizadas no mercado civil, sendo as restantes para uso militar [15] .

O primeiro UAV a tirar fotografias para o reconhecimento aéreo foi o Radioplane em 1955 nos Estados Unidos. Enquanto isso os franceses no final da década de 1950 iam desenvolvendo aparelhos com capacidades semelhantes.

Seguiram-se os italianos na década de 60 e os russos nos anos 70. Foram também levados Radar e TV em UAVs em 1941 nos Estados Unidos, mas apenas para orientação. Os UAVs começaram a ser utilizados para obter imagens de reconhecimento entre 1960 e 1970 durante a guerra do Vietname.

As primeiras aplicações civis surgiram um pouco mais tarde, quando em 1986 UAVs foram testados para monitorização de incêndios florestais em Montana [15] .

A tipologia das aeronaves é feita consoante as suas características e desempenhos, dando especial atenção à distância a percorrer, a altitude, a duração do voo e à massa a transportar.

UAV	Acrónimo	Distância (km)	Altitude (m)	Duração (horas)	Massa (kg)
Micro	Micro	<10	250	1	<5
Mini	Mini	<10	150 a 300	<2	150
Estreita faixa	CR (close range)	10 a 30	3000	2 a 4	150
Curto alcance	SR (short range)	30 a 70	3000	3 a 6	200
Médio alcance	MR (medium Range)	70 a 200	5000	6 a 10	1250
Médio alcance e resistência	MRE (medium range endurance)	>500	8000	10 a 18	1250
Baixa altitude e profunda penetração	LADP (Low altitude deep penetration)	>250	50 a 9000	0,5 a 1	350
Baixa altitude longa resistência	LALE (low altitude long endurance)	>500	3000	>24	<30
Medía altitude longa resistência	MALE (medium altitude long endurance)	>500	14000	24 a 48	1500

**Tabela 6: Classificação de UAV [16]**

Tendo em conta que no nosso caso em estudo o principal objetivo é apenas a monitorização de estruturas, as categorias que merecem maior destaque são as Micro e os Mini. O desenvolvimento da tecnologia permite que se possa incorporar o

equipamento necessário (camaras, sensores e GPS) sem que isso altere significativamente o aparelho. Neste momento é possível incorporar sistemas de navegação em pequenas plataformas de baixo custo sem que estas alterem significativamente o peso da aeronave.

Apesar de haver a possibilidade de recolher imagem através de satélite, a única fonte de dados aérea comparável ao UAV são as aeronaves pilotadas voando muito próximo do objeto ou local em estudo, no entanto as grandes desvantagens da aquisição de imagem através deste método são as superiores despesas operacionais e a segurança para os pilotos.

Embora as câmaras e sistemas de dados tenham uma resolução mais fina e nítida numa aeronave pilotada, o UAV apresenta várias vantagens que incluem uma plataforma de imagens e sensores menos dispendiosa, reduzindo os custos operacionais e uma capacidade de mobilização mais rápida do que o avião pilotado.



**Figura 53: Visão sobre alguns dos sistemas de UAV existentes**

### 3.2 - Fotogrametria através de UAV

Atualmente os UAV são geralmente equipados com um sistema de navegação GPS e diferentes sensores fotográficos adequados para fotogrametria digital com elevada qualidade geométrica e radiométrica. São facilmente transportáveis, são capazes de descolar e aterrar de forma simples num campo por um par de operadores. É possível até realizar todo este processo apenas com um operador, no entanto é aconselhável pelo menos um par de operadores para que haja maior segurança e qualidade na obtenção de dados e no funcionamento de todo o projeto.

Foi criada uma plataforma de fotogrametria para o UAV que opera também de um modo autónomo ou semi-autónomo e remotamente controlado. Esta plataforma está equipada com câmara de vídeo, sistemas de câmara térmicos ou infravermelhos através de uma combinação com o sistema LiDAR.

A tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) é baseada num sistema semelhante ao RADAR, mas enquanto o RADAR utiliza ondas de rádio para localizar os objetos de interesse, o sistema LiDAR utiliza impulsos laser [18].

Esta ferramenta abre várias novas aplicações relativamente a fotografia aérea e terrestre, acrescentando assim uma nova opção com resultados em tempo real com a vantagem de serem uma alternativa de baixo custo.

As principais vantagens dos UAV's em comparação com as aeronaves tripuladas são que os UAV's podem ser usados em situações de alto risco, em áreas inacessíveis e a baixa altitude sem por em perigo vidas humanas.

A implementação de GPS/INS (*Global Positioning System/ Inertial Navigation System*), bem como unidades de estabilização mais precisas vieram também garantir uma melhor cobertura de imagem.

No entanto a utilização de UAV, especialmente os de baixo custo, limita a carga útil forçando a utilização de sensores mais pequenos, como câmaras amadoras de pequeno e médio formato, acabando assim por perder alguma qualidade na informação. Além desses inconvenientes, o facto de não serem tripulados reduz a qualidade de resposta em situações inesperadas.

A combinação de métodos de gravação de fotogrametria aérea e terrestre utilizando o UAV abre uma vasta gama de possíveis aplicações como vigilância e monitorização do meio ambiente e de infraestruturas.

Apesar dos UAV's possibilitarem uma recolha de informação rápida, eficaz e menos perigosa que em aeronaves tripuladas, o planeamento da missão é muito importante para uma posterior análise e recolha de dados mais detalhada.

O principal objetivo para o uso destes equipamentos nesta área é gerar informações de alta resolução como mapas, ortoimagens, topografia, modelos de elevação, deteção de obstáculos perigosos e modelos 3D de edificações e vegetação.

Mas antes de proceder a esta recolha detalhada deve ser efetuado um primeiro voo no caso de a área ser desconhecida, onde o operador define as velocidades de voo com o Joystick, assim o aparelho voa por cima da área de interesse e adquire uma imagem panorâmica única que é posteriormente georreferenciada usando coordenadas de GPS e mais algumas informações sobre o relevo e obstáculos.

Esta informação detalhada da área e dos seus perfis permite um planeamento da missão mais detalhado, facilitando e otimizando os tempos de resposta e a qualidade dos dados recolhidos.

### **3.2.1 - Planeamento do projeto e aquisição de dados de imagem**

O planeamento e desenvolvimento do projeto poderá variar consoante a capacidade de voo autónomo, consoante a qualidade dos resultados e consoante a consistência e precisão dos voos e da sua trajetória em 3D obtida.

No entanto, existem alguns módulos que devem ser seguidos de modo a obter um fluxo de trabalho produtivo e organizado.

Os módulos principais para a definição do projeto são os seguintes:

- Planeamento do voo;
- Voo fotogramétrico autónomo;
- Controlo da qualidade dos dados;
- Triangulação dos dados do UAV;
- Ortofotomapa, modelo 3D;

No planeamento do voo e definição do projeto e dos seus parâmetros poderá variar consoante algumas condicionantes e diferentes aplicações tais como:

- Tipo de objeto;
- Sensores da câmara;
- Tipo ou modelo de helicóptero;
- Restrições de voo;

Após análise das condicionantes anteriormente referidas existem três cenários que devem ser definidos antes de efetuar o voo:

- Documentação sobre o relevo do terreno
- Áreas de risco
- Modelação em 3D de edifícios e outros objetos existentes

Para a avaliação da exatidão da trajetória 3D dos mini-UAV é necessário analisar corretamente a sincronização do GPS, barómetro, bússola e da câmara. Os erros resultantes de falta de calibração destes equipamentos, aliados a alguma vibração da plataforma podem resultar em desfocagem da imagem.

A maior limitação na utilização dos UAV na fotogrametria prende-se com a dependência das condições climatéricas. A maior parte dos UAV comerciais são facilmente influenciáveis pelo vento, que é uma das maiores condicionantes climatéricas na nossa região.

No entanto têm sido desenvolvidas novas plataformas e sistemas UAV com maior estabilização para tentar minimizar esse problema, mas os sistemas de estabilização quanto mais apurados são, mais complexos de controlar e trabalhar são, exigindo assim maior prática e perícia.

Relativamente à recolha e controlo da qualidade de dados, é possível, em primeiro lugar com aplicações semelhantes à fotogrametria aérea mais comum (com aeronaves tripuladas), em segundo lugar, é de destacar que com os UAVs a recolha da documentação é mais rápida e económica.

Finalmente usando UAVs é possível efetuar uma análise mais próxima (poucos metros) para objetos que não podem ser documentados utilizando aeronaves tripuladas ou fotogrametria terrestre.

### 3.2.2 - Software Waypoint Editor



Figura 54: Screenshot do Waypoint Editor

O software Waypoint Editor permite a máxima flexibilidade para processar dados de aplicações estáticas ou cinemáticas usando dados de fabricantes de GNSS disponíveis comercialmente.

É disponibilizado um conjunto completo de ferramentas de diagnóstico, de modo a garantir uma melhor qualidade na recolha da informação. A funcionalidade de descarregar está embutido no software que permite o uso de dados de referência publicamente disponíveis ou de estações de satélite precisas e dados de órbita para “Posicionamento por Ponto Preciso” (PPP), que atinge 10 centímetros de precisão relativamente a uma estação base. O software está disponível como uma aplicação de base de dados para que possa também ser incorporada dentro de outro aplicativo [17].

O waypoint editor, mostrado na figura anterior, permite a definição dos pontos de aquisição de imagens com base num mapa retificado ou ortofoto integrado no software. Em seguida introduzem-se vários dados como posição no mapa, altura do solo, orientação do ângulo da câmara e a velocidade do movimento. Como alternativa, a orientação do voo também pode ser criada através do Google Earth e importados manualmente no editor de waypoint.

### 3.2.3 - Ground Control Station Software

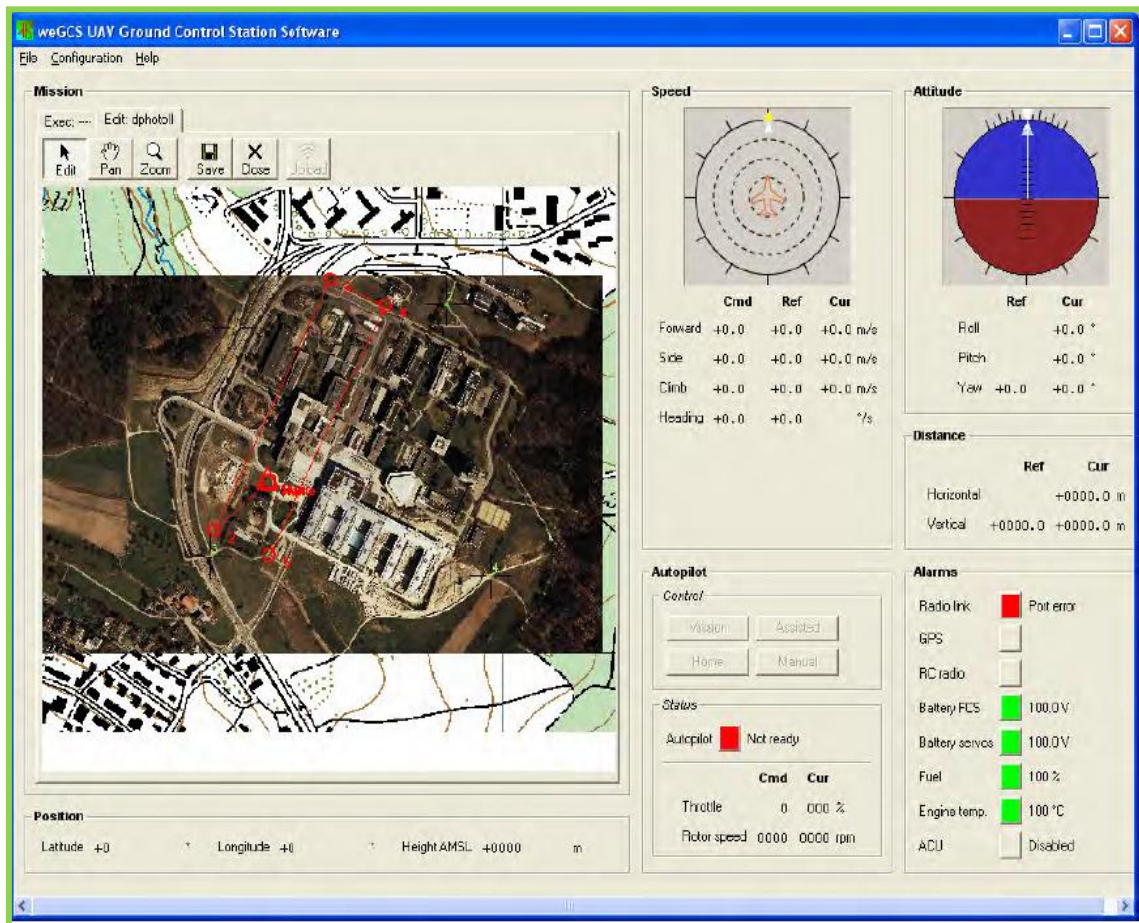


Figura 55: Screenshot do Software weGCS [15]

Este software permite, tal como o Waypoint, a definição de pontos usando um mapa referenciado. Os pontos obtidos podem ser classificados como pontos cruzeiro ou pontos de paragem. O ponto de partida e o ponto de chegada devem ser definidos antes do voo para que em caso de perda de conexão com o helicóptero, este possa voar de modo automático até ao ponto de paragem.

O weGCS tem também uma função de controlo e direção autónoma durante o voo, assim todas as manobras podem ser ativadas na estação de controlo.

### 3.2.4 - Agisoft PhotoScan

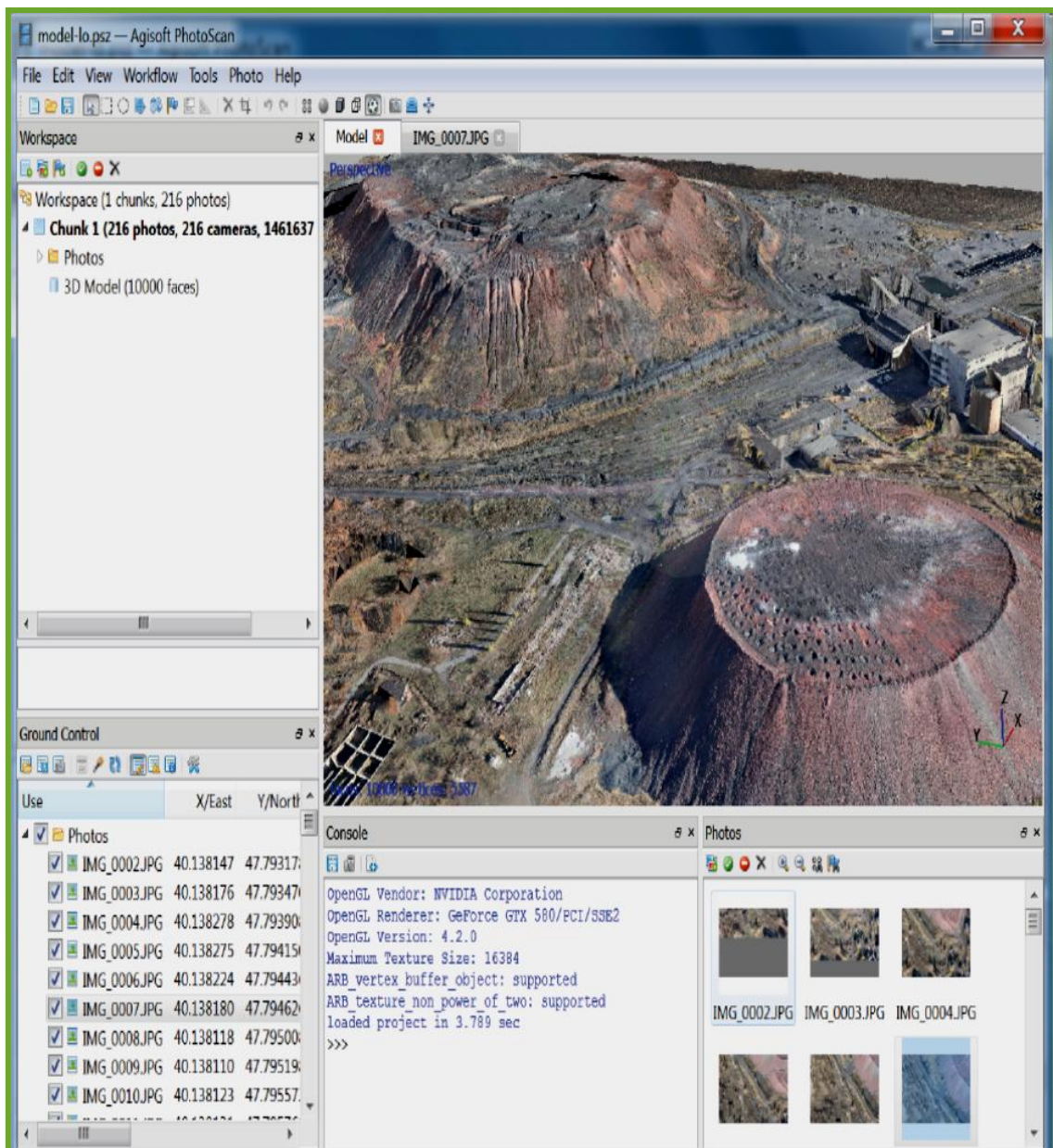


Figura 56: Janela de Aplicação do Agisoft PhotoScan [19]

O Agisoft é um software que gera ortofotomapas georreferenciados de alta resolução e permite que uma pessoa mesmo sem ser especialista possa processar imagens aéreas num computador para produzir dados com qualidade de profissionais [19].

O processamento de imagens através do Agisoft PhotoScan inclui as seguintes etapas principais:

- Carregar fotos em PhotoScan;
- Inspeccionar imagens carregadas, removendo as desnecessárias ou danificadas;
- Fotos de alinhamento;
- Construção de modelo 3D;
- Edição do mesmo modelo 3D;
- Exportação de resultados para outros programas

As principais características deste Software são:

- Triangulação aérea
- Geração do modelo poligonal
- Definição do sistema de coordenadas
- Modelo de criação digital georreferenciado de elevação (DEM)
- Criação de ortofotomapa

O Agisoft é um avançado programa de imagem com capacidade de modelar em 3D a partir de imagens estáticas. Através da mais recente tecnologia 3D é possível criar uma imagem 3D através de fotos arbitrárias, em condições controladas ou não controladas, desde que o objeto a ser reconstruído seja visível em pelo menos 2 fotos.

Com este software tanto o alinhamento da imagem como a sua reconstrução do modelo 3D é totalmente autónoma e automatizada.

O objetivo final desta recolha de dados é construir um modelo texturizado 3D e o seu funcionamento baseia-se em três etapas fundamentais:

- A primeira etapa é o alinhamento das fotografias. Nesta etapa o programa agrega os vários pontos em comum nas diversas fotos e compara-os e tenta definir a posição da câmara em cada imagem. No final desta etapa o resultado é a formação de uma nuvem dispersa e um conjunto de posições da câmara. Estes pontos ainda não estão prontos para serem utilizados no processo de construção do modelo 3D, mas podem ser exportados para posterior utilização em outros programas.

➤ A segunda etapa é a construção de geometria. Com base na nuvem de pontos dispersos criada na primeira etapa aliando a outros métodos algorítmicos é gerada uma malha em polígonos 3D

➤ Finalmente, após a construção da geometria é feita uma reconstrução do modelo em 3D com relevo e volumes texturizados. Esta operação pode levar algum tempo consoante a quantidade e qualidade de resolução das fotos carregadas, por isso é aconselhável construir um modelo com menor qualidade para testar a aplicabilidade do método escolhido e só depois recalcular os resultados para uma configuração mais detalhada e com maior qualidade.

As fotos podem ser tiradas com qualquer câmara fotográfica usual, desde que tenha uma qualidade de imagem razoável e desde que se sigam algumas indicações na captura de imagens para que depois possam ser aproveitadas para uma futura reconstrução em 3D.

As regras e indicações a ter em conta são as seguintes:

- A câmara deve ter uma resolução razoavelmente alta (no mínimo 5MP)
- Lentes com grande capacidade angular para estabelecerem uma melhor relação espacial entre os objetos
- Evitar objetos brilhantes, transparentes e objetos em movimento
- No caso de necessidade de fotografar objetos brilhantes, procurar fazê-lo com céu nublado
- Tirar o máximo de fotos possível de modo a ter muita sobreposição
- Estudar e analisar o local de modo a definir o melhor ângulo para a obtenção de fotos (Figura 57).

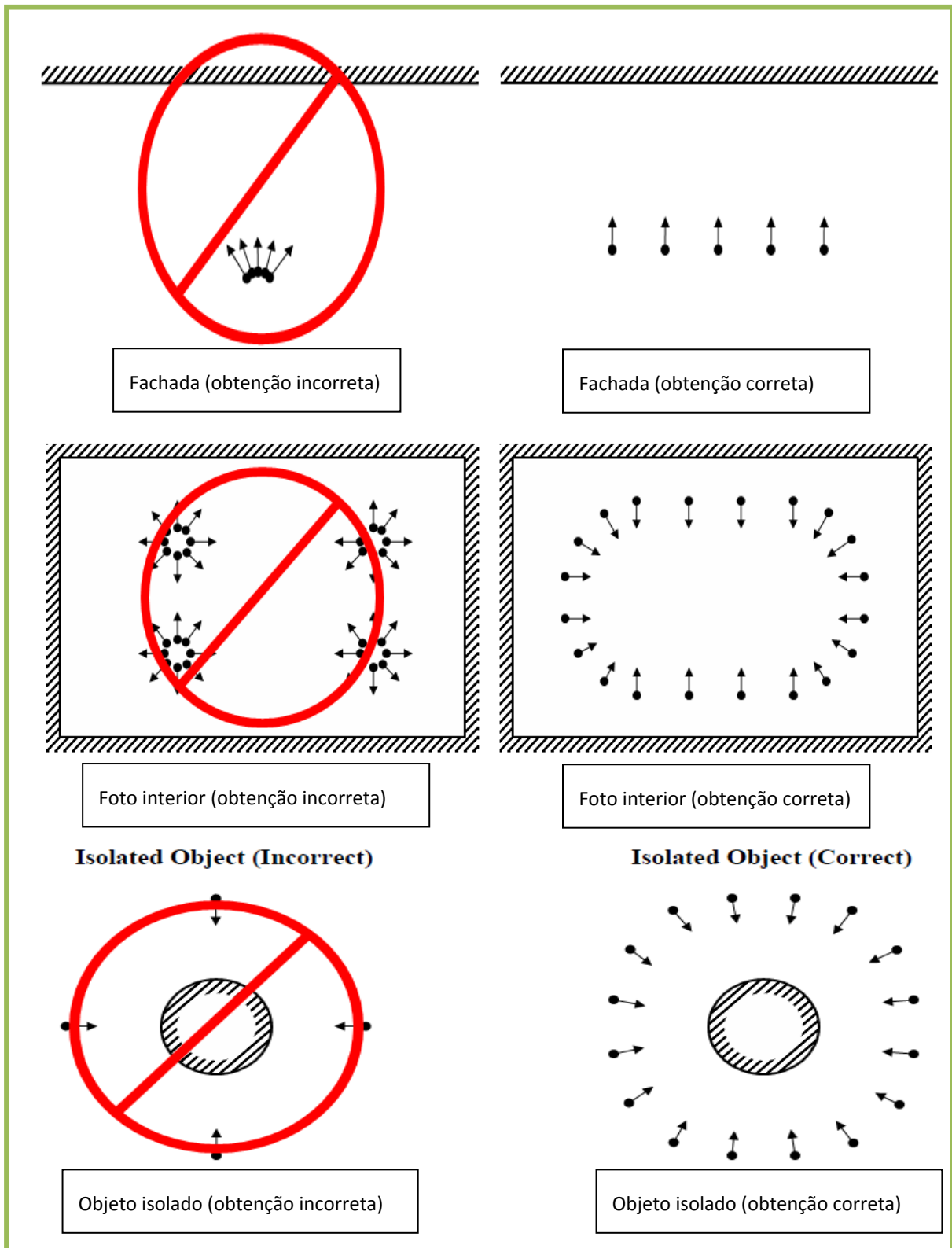


Figura 57: Definição do melhor ângulo para obtenção de fotos [19]

Em alguns casos, é muito difícil ou até mesmo impossível gerar um modelo 3D de todo o objeto de uma só vez. Isto pode acontecer quando a quantidade de fotografias é demasiado grande para ser processada toda de uma só vez.

No caso da ilha da Madeira, tendo em conta a sua orografia, nas situações em que o caso em estudo seja um talude ou uma outra zona com algum relevo, é muito comum isso acontecer devido à necessidade de termos que recolher muitas fotografias para uma definição mais exata do seu modelo 3D.

Para superar este problema o PhotoScan oferece a possibilidade de dividir o conjunto de fotos em vários “blocos” separados dentro do mesmo projeto. Assim, o alinhamento das imagens e a construção da sua geometria é feita por parcelas, e no final podem ser novamente combinadas numa só imagem.

### **Definição do sistema de coordenadas**

A definição do sistema de coordenadas é um dado muito importante neste projeto, pois uma boa definição das coordenadas irá fornecer um dimensionamento correto do modelo permitindo uma melhor definição da área de superfície bem como uma melhor definição e medição de volumes.

O Photoscan pode suportar vários tipos de sistemas de coordenadas. O sistema de coordenadas pode ser estabelecido através de um ponto de controlo (marcador) ou através das coordenadas da câmara. Em ambos os casos as coordenadas ficam especificadas no painel de controlo do solo.

A utilização de coordenadas em câmara é utilizada de uma forma mais frequente quando a câmara já possui GPS integrado.

### **Atribuição de coordenadas de referência**

Para referenciar um modelo real através de coordenadas de referência são necessários pelo menos 3 pontos no local em estudo.

Cada ponto deve ser devidamente especificados e separados, tal como mostra a figura 58.

# <label>	<x>	<y>	<z>
IMG_0159.JPG	40.165011	48.103654	433.549477
IMG_0160.JPG	40.165551	48.103654	434.724281
IMG_0161.JPG	40.166096	48.103640	435.630558

Figura 58: Atribuição de coordenadas de referência [19]

### Medição de área de superfície e volume

A medição da área de superfície e volume só pode ser realizada após definição do sistema de coordenadas.

O modelo de geometria deve estar fechado e sem faltas de dados na superfície, caso contrário o resultado das medições do volume irá dar zero.

A medição da área de superfície também poderá ser obtida através da exportação dos dados para outros programas específicos para medição de áreas e volumes.

### 3.2.5 - DroneMapper

O DroneMapper é outro software especializado no tratamento e organização de dados recolhidos com UAV.

Como podemos verificar na figura 59, este software oferece ao piloto um modo muito funcional de trabalhar, pois o software de processamento pode produzir diversos layers sobrepostos, que podem ser apagados ou sobrepostos consoante a necessidade e interesse do piloto. Assim a obtenção dos resultados desejados torna-se mais rápida e automática.

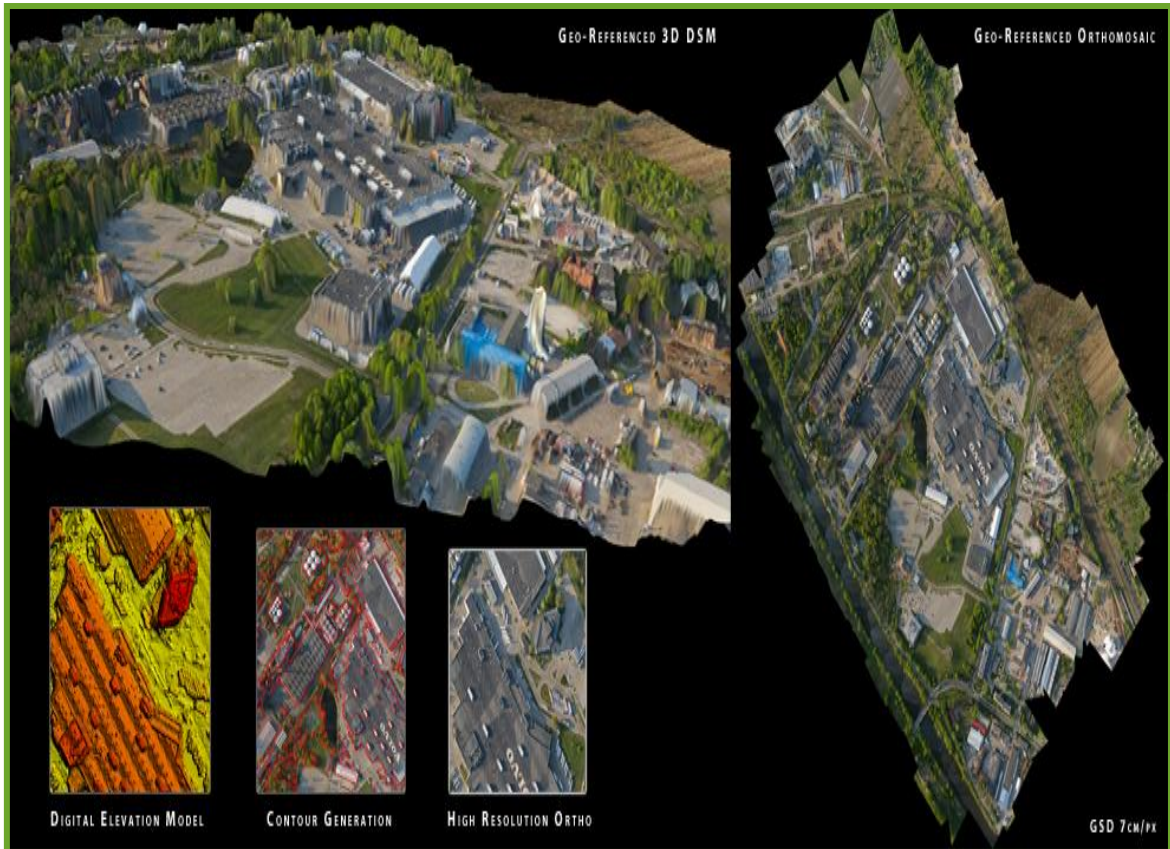


Figura 59: Exemplo de um modelo 3D com Orthomosaic e DSM [20] -

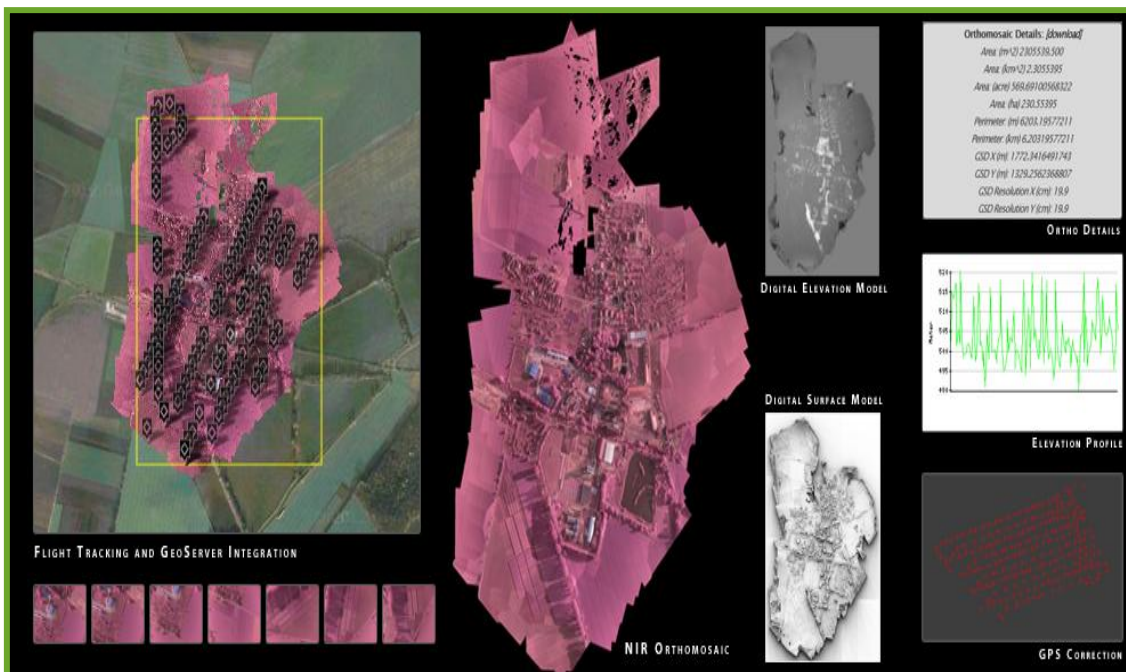


Figura 60: Foto com alguns dos vários layers disponíveis (coordenadas de GPS, modelo de elevação) [20] -

E tal como nos outros softwares anteriormente referidos, após o processamento das imagens, os dados e imagens obtidas podem ser utilizados nas mais diversas e variadas ferramentas, tais como: ArcGis, Global Mapper, Google Maps, etc.

Como o DroneMapper possui uma resolução relativamente alta é também possível gerar o modelo digital de elevação do terreno, para um posterior cálculo de áreas e volumes.



Figura 61: Modelo de elevação de um terreno [20] -

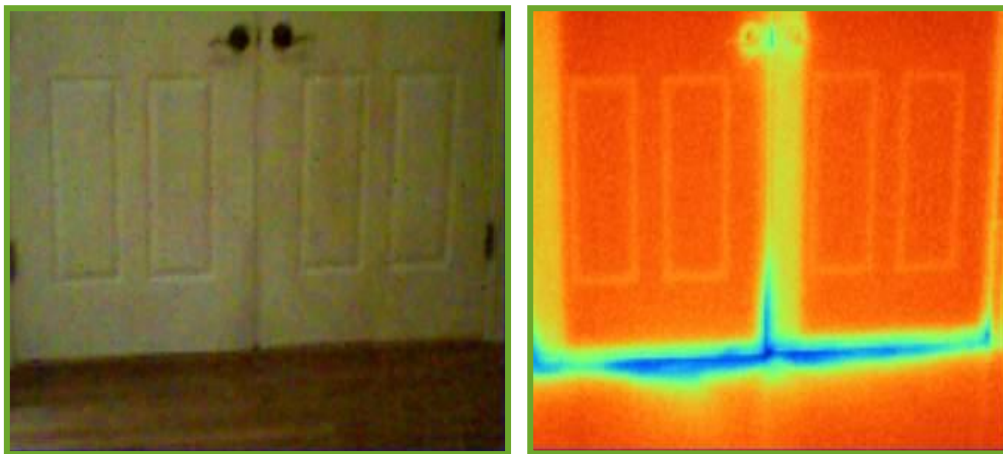
### 3.3 - Termografia com UAV

Devido à atual situação económica mundial, bem como a maior sensibilidade para a poluição ambiental o ser humano tem procurado de todas as formas possíveis otimizar os seus recursos de modo a poder ter um bom conforto nas suas casas evitando ao máximo o recurso a aquecedores, ar condicionado, etc. Estando a contribuir para uma diminuição da poluição ambiental e reduzindo a despesa inerente à utilização desses mesmos equipamentos.

Atualmente já existem vários softwares que simulam a exposição solar do edifício, podendo assim o seu proprietário definir a orientação do edifício para aproveitar a exposição solar.

Nas novas construções já se nota maior atenção ao isolamento térmico, até porque a legislação também obriga a essa atenção, através de várias normas e diretivas tais como o RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) aprovado pelo decreto-lei 80/2006, de 4 de Abril, a ISO / EN 13187 que é a norma que especifica como deve ser realizada uma inspeção termográfica num edifício, bem como a EPBD (Diretiva de desempenho energético dos edifícios) entre outras.

Quando se fala em desempenho energético a maior atenção prende-se com a utilização de paredes com isolamento térmico para reduzir as perdas de calor nos edifícios durante o inverno, no entanto essa atenção deve se estender aos outros componentes mais fracos como janelas e portas.



**Figura 62: Ilustração de fugas de calor nas portas**

Mas se em construções novas estas aplicações são mais fáceis de aplicar, nas estruturas que já estão construídas torna-se um pouco mais complexo.

Nestes casos a análise tem de ser feita praticamente objeto por objeto e é denominada por termografia.

A termografia resume-se na medição da temperatura numa determinada área ou superfície e é muito eficaz para medição de:

- Infiltrações de humidades
- Perda de calor ou frio
- Fugas de água
- Instalações elétricas
- Instalações AVAC

A termografia é feita maioritariamente com câmaras térmicas, podendo no entanto ser utilizados outros equipamentos tais como:

- Medidores de humidade ou de temperatura
- Medidores de pressão diferencial [21]

Tirar fotografias como uma câmara térmica é tão fácil como tirar uma fotografia com uma câmara digital comum, basta simplesmente apontar, regular, focar e finalmente captar a imagem. Porém, se no interior do edifício a utilização da câmara térmica tem uma utilização relativamente simples, nas paredes exteriores já começamos a ter alguns obstáculos, pois tal como referido em 3.2.3 a qualidade do sinal começa a não ser muito fiável a distâncias superiores a 10m e é nesta fase que a utilização do UAV se torna uma ferramenta extremamente útil e versátil pois permite que se analise toda a estrutura independentemente do acesso.

## Capítulo 4 - Casos Práticos

### 4.1 - Introdução

A corrosão do aço é uma das principais causas de deterioração das estruturas de betão armado e pode causar grandes problemas em termos de segurança e dificultar a sua manutenção podendo os seus danos serem irreversíveis.

A ilha da Madeira por ser uma pequena ilha rodeada por mar está constantemente exposta à carbonatação e cloretos, que são os maiores agentes erosivos para o aço.

Atendendo também ao seu clima tropical a ilha da Madeira é caracterizada por possuir um elevado teor de humidade no ar que também condiciona as infraestruturas.

As consequências da corrosão podem colocar em causa a segurança da estrutura pois o betão armado perde ductilidade, aderência e aumenta a fissuração [22].

Existem várias técnicas eficazes na avaliação da condição do aço, no entanto é necessário detetar a corrosão nos seus estágios iniciais e implementar a sua proteção adequada reduzindo o custo da manutenção e da sua reparação, e como já foi referido ao longo desta dissertação, nos últimos anos estes fatores têm recebido maior atenção devido à sua crescente degradação e aos elevados custos de reparação associados [23].

O betão é a única barreira que protege o aço, no entanto este também é afetado pelas ações térmicas, pelo tempo, pelas sobrecargas, etc.

Assim a qualidade e espessura do betão de recobrimento é extremamente importante pois evita a penetração de cloretos no betão armado.

Foram efetuados levantamentos de algumas infraestruturas com o oktokofter da Universidade da Madeira (GEOUMA-1) e uma câmara térmica Flir i7.

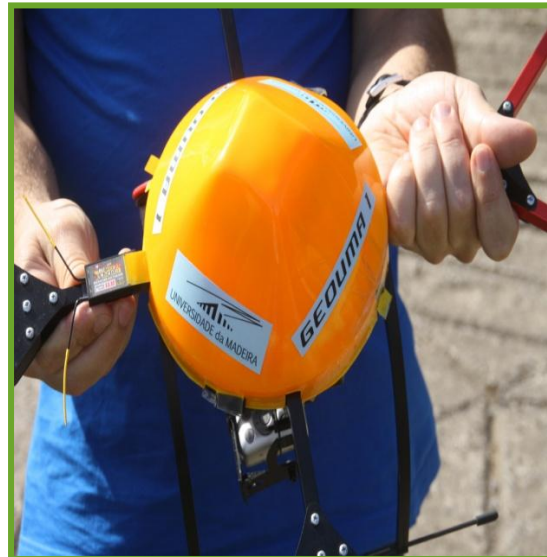
Esta aeronave possui uma plataforma básica ((HiSystemsGmbH), tem uma capacidade de carga útil máxima de 2kg, a autonomia de voo pode variar consoante as condições climáticas entre 15 a 30 minutos e a sua placa principal possui já incorporado o GPS, bússola e antena de GPS.

O nome Oktokopter, como o próprio nome indica deve-se ao facto da aeronave possuir 8 hélices, sendo controlada através de um transmissor instalado no oktokofter e outro no comando em terra ambos ligados à mesma frequência de rádio.

Na zona inferior do oktokofter encontra-se a estrutura onde pode ser colocada uma câmara fotográfica ou câmara térmica consoante os dados que pretendemos obter. A câmara fotográfica utilizada nos nossos casos práticos foi uma Canon PowerShot G12 programada para tirar fotos de 2 em 2 segundos de modo a que as fotografias tenham uma sobreposição suficiente para poder posteriormente obter um modelo 3D. No entanto existe também a possibilidade de programar o disparo da máquina através do comando da aeronave se necessário.



**Figura 64: Oktokopter da empresa Mikrokofter (Alemanha)**



**Figura 63: Oktokopter GEOUMA -1 da Universidade da Madeira**

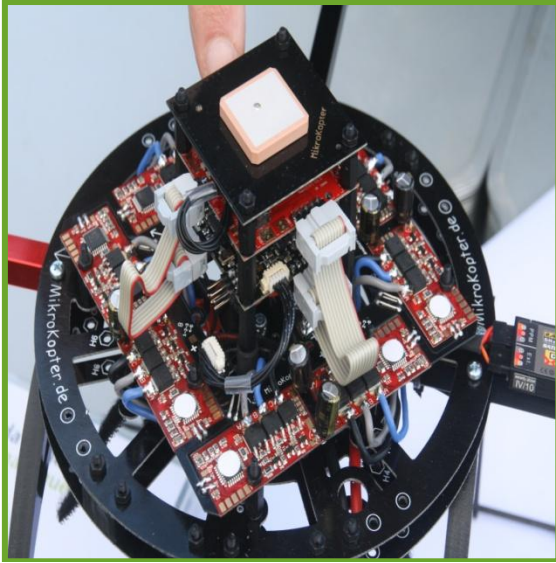


Figura 65: Plataforma interna do GEOUMA - 1



Figura 66: Voo do GEOUMA -1 em recolha de imagens

## 4.2 - Monitorização de infraestruturas com UAV

O facto de os UAV poderem voar automaticamente com um percurso pré-programado permite a realização de voos sistemáticos de recolha de dados em percursos preestabelecidos e assim efectuar uma monitorização sistemática, ao longo do tempo, de edifícios ou infraestruturas. Essa monitorização pode ser realizada tanto no exterior como no interior de edifícios, como podemos verificar nas fotos obtidas nos voos feitos no interior do Dolce Vita (Funchal) (Figuras 67 e 68) e no voo efetuado no Paúl da Serra junto aos geradores eólicos (Figuras 69 e 70).

Estes dois voos foram experimentais com a intenção de verificar a segurança e fiabilidade do aparelho em diferentes ambientes.



**Figura 67: Voo no interior do edifício Dolce Vita**



**Figura 68: Fotografia de outro ângulo no interior do Dolce Vita**



**Figura 69: Voo junto a um gerador eólico**



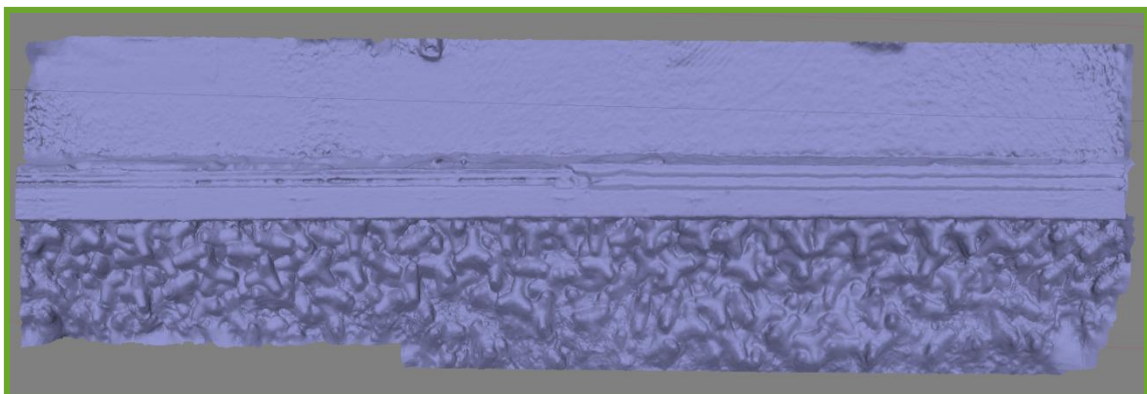
**Figura 70: Imagem captada pelo GEOUMA 1 do gerador eólico**

**Caso 1** - Voo no cais do Porto do Funchal com o intuito de monitorizar e observar o estado de conservação da estrutura bem como o movimento dos tetrápodes, provocado pela agitação marítima. A força das ondas faz com que estes elementos de proteção da orla costeira se desloquem, chocando entre si, provocando a diminuição da proteção ao cais e a sua crescente deterioração.

Os exemplos de fotografias aéreas na figura 71, são algumas das fotografias obtidas com a camera instalada no UAV para posteriormente introduzir no Software Agisoft para posteriormente obter o modelo digital do cais que se encontra na figura 72.



**Figura 71:** Exemplos de fotografia aérea, obtida com o UAV, do cais e dos tetrápodes



**Figura 72:** Modelo digital do terreno do cais do porto do Funchal obtido a partir da fotografia aérea

Com a obtenção e comparação dos vários modelos digitais do cais (figura 72) a partir de voos efetuados de forma sistemática é possível quantificar o deslocamento dos tetrápodes ou do cais ao longo do tempo. No entanto não foram verificados movimentos no período de elaboração desta tese devido a não se ter verificado agitação marítima significativa.

**Caso 2** – Neste caso foram efectuados voos para analisar o pilar oeste da Ponte João Gomes.

Esta ponte foi concluída em 1994, possuindo uma extensão total de 274,5 metros e um vão central de 125 metros. A altura do tabuleiro ao leito da ribeira é de 140 metros.



**Figura 73: Fotografia panorâmica da Ponte João Gomes**

Exemplos de fotografias obtidas com o UAV a diferentes alturas do mesmo pilar.



**Figura 74: Foto retirada com UAV a cerca de 10m de altura**



**Figura 75: Foto retirada com UAV a cerca de 30m de altura**



**Figura 76: Foto retirada com UAV a cerca de 60m de altura**

Devido a possibilidade de recolha de fotografias de excelente resolução é possível analisar as imagens obtidas, e verificar do estado de conservação das infraestruturas.

No caso da Ponte João Gomes a metodologia adotada foi efetuar um voo inicial para recolha de imagens de vídeo de todo o pilar e posteriormente escolher zonas preferências para efetuar voos de fotografia de grande resolução para avaliação do estado dos pilares

Neste caso, como a ponte é de construção recente não se verificaram sinais significativos de patologias.

As fotos que se seguem são ilustrativas da monitorização efetuada pelo GEOUMA-1 no pilar oeste da ponte da Rib. João Gomes.

Podemos verificar que o UAV realiza os voos a distâncias muito curtas do pilar (1-2m) o que lhe permite obter imagens de grande detalhe do pilar.



**Figura 77: Foto do UAV no topo do pilar**



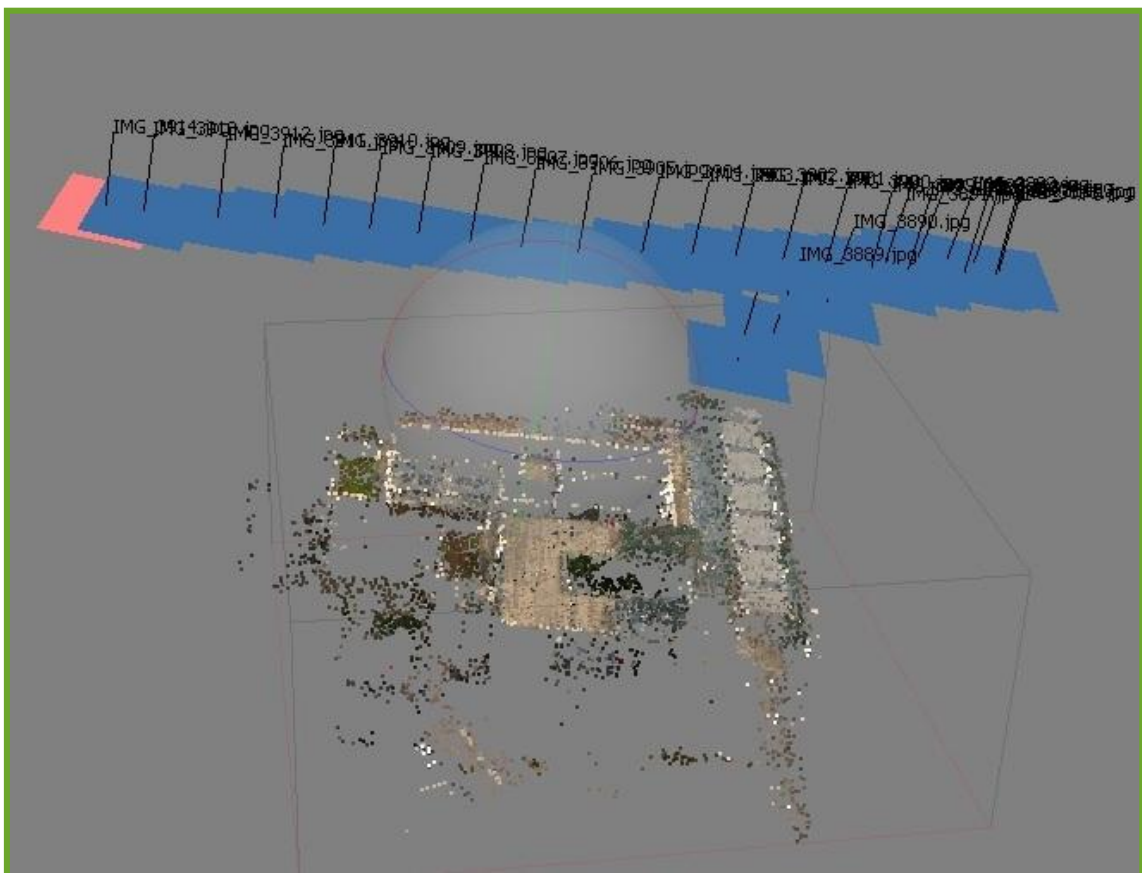
**Figura 78: Foto do UAV início ( base do pilar) da recolha de imagens**

**Caso 3** - O último caso prático (3) com o UAV foi realizado no edifício da Universidade da Madeira na Penteada, sendo também o caso prático que mereceu maior destaque e estudo.

Neste caso, inicialmente, foram efetuados voos e obtidas centenas de fotos para que fosse possível obter um modelo 3D do edifício da Universidade da Madeira

Para que fosse possível recolher imagens de todo o edifício com qualidade foi feito um plano de voo baseado num modelo de grelha de modo a criar uma sequência de fotos com a sobreposição adequada, para introduzir posteriormente no programa de tratamento de imagens, nomeadamente o Agisoft Photoscan.

Como referido em 3.2.4, o Agisoft é um software que gera ortofotomapas e modelos 3D de alta resolução. Para realizar o processamento dessas imagens é necessário começar por carregar as fotos no programa, após esta fase é feita uma análise detalhada das fotos, removendo as desnecessárias e colocando máscaras nas partes das fotos cujo objecto não é do nosso interesse. Em seguida procede-se ao alinhamento e processamento das fotos sendo criada uma nuvem de pontos.



**Figura 79: Nuvem de Pontos**

Após criar a nuvem de pontos é possível criar pontos imaginários para ajudar a aperfeiçoar a textura e forma do edifício para depois poder gerar o modelo digital de elevação do terreno, como se pode verificar na figura 79 e posteriormente na figura 80, sendo esta ultima a conclusão do trabalho de tratamento das imagens obtidas com o UAV. Posteriormente são selecionados pontos no modelo, cujas cordenadas são obtidas através de um DGPS no terreno, permitindo assim obter uma modelo digital georeferenciado. A obtenção de varios modelos ao longo do tempo, todos georeferenciados, vai permitir a sua comparação e verificação de alterações na sua volumetria, tais como deformações ou movimentos.



**Figura 79: Modelo digital do terreno com ortofotomapa**



**Figura 80: Modelo digital de elevação final do edifício da Universidade da Madeira**

Esta técnica pode ser utilizada para efetuar o levantamento de edifícios ou estruturas antigos que apresentem movimentos, bem como o levantamento de zonas de terreno onde se verifiquem movimentos. Esta recolha de imagens e criação de modelos digitais permite também poder criar uma base de dados importante para a monitorização de infraestruturas...

As fotos seguintes foram obtidas num voo vertical do UAV , no mesmo edifício da UMA, onde é possível observar com detalhe as várias patologias nas paredes do edifício. Como podemos verificar nas figuras 81 e 82, as fendas atingem já uma dimensão significativa, e é muito provável que estejam a provocar a corrosão das armaduras nas zonas mais afetadas.



**Figura 81: Foto retirada com UAV no Edifício da Universidade da Madeira**



**Figura 82: Foto retirada com UAV no Edifício da Universidade da Madeira**

### 4.3 - Termografia em edifícios e infraestruturas

Finalmente o último caso práticos foi a utilização de UAV com câmaras térmicas (Flir i7) para a avaliação térmica de edifícios, nomeadamente a localização de pontes térmicas.

Com a câmara térmica é possível detetar, avaliar a presença de pontes térmicas que podem causar não só perdas de calor como o aparecimento de zonas de condensação.

Neste local é visível, através da figura 83, uma anomalia junto a uma das janelas do edifício da Universidade. Através do recurso à câmara térmica observa-se uma ponte térmica com perda de calor (Figura 84).

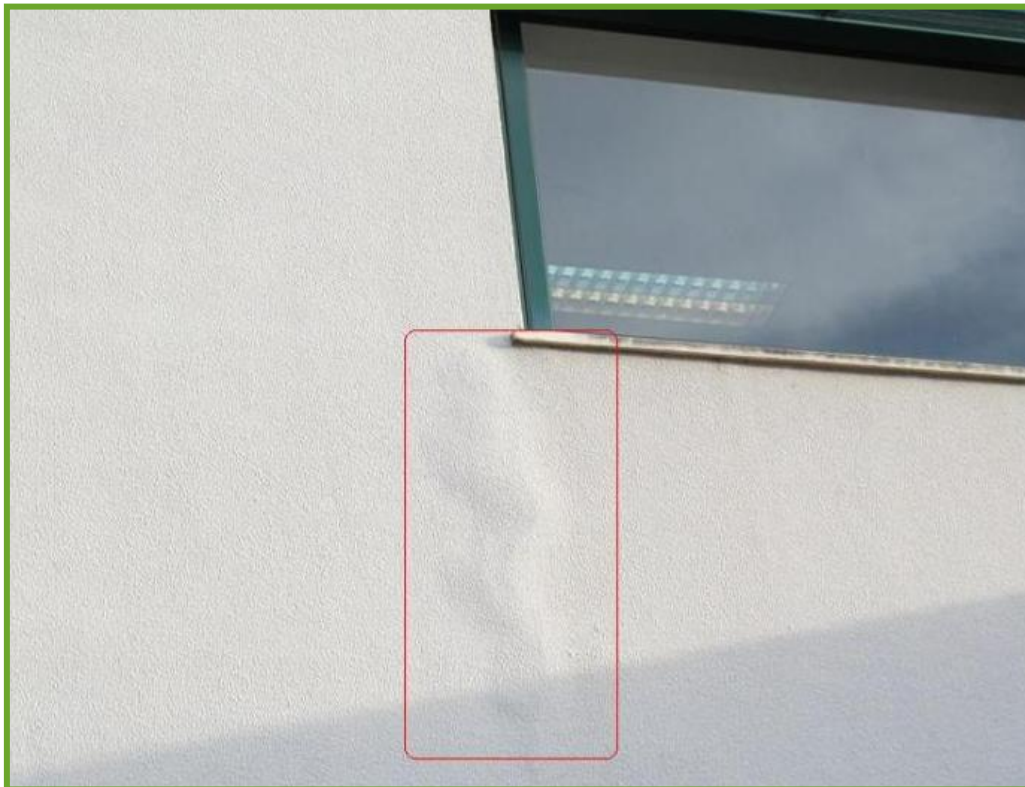
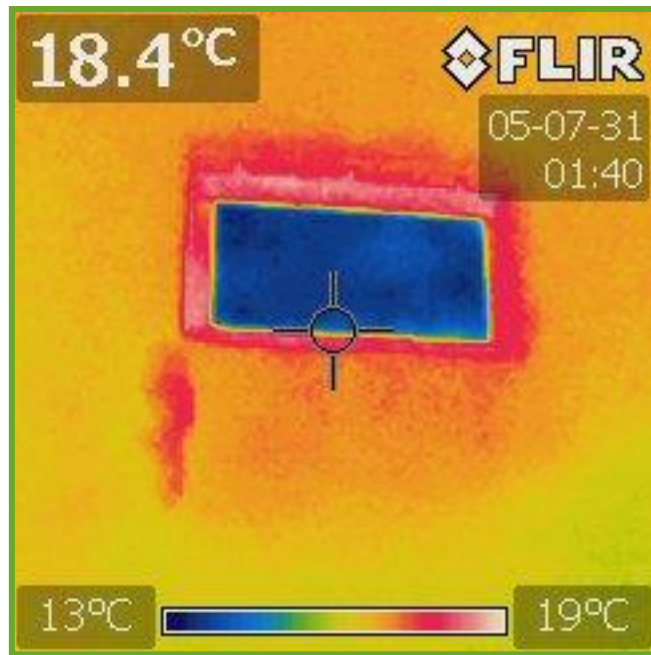


Figura 83: Fotografia a uma das paredes da Universidade da Madeira



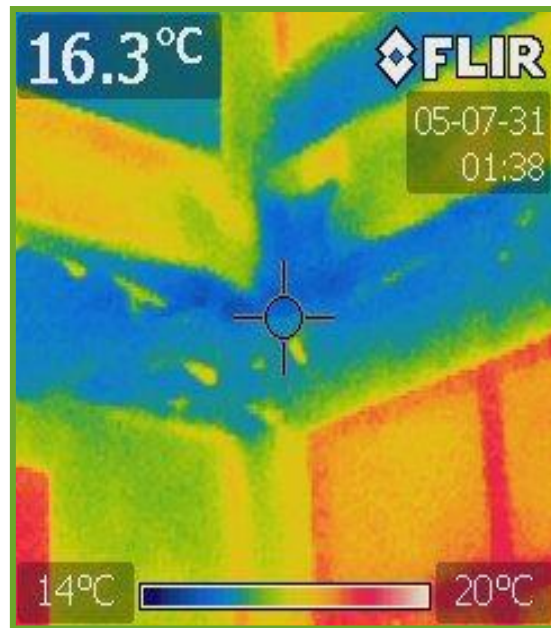
**Figura 84: Fotografia Térmica à parede da Universidade da Madeira**

Num outro local é visível uma zona com anomalias térmicas significativas neste caso particular provocadas pela presença de humidades e infiltrações pois como se observa na imagem térmica a temperatura nas zonas afetadas é mais baixa (Figura 86).

Neste caso em concreto já se observam patologias várias, com o descasque da tinta e da argamassa de reboco.

As consequências possíveis são:

- Perda de impermeabilidade da fachada;
- Aparecimento de humidades no interior;
- Desenvolvimento de fungos;
- Consequente aumento dos custos de reparação com o avançar do tempo de deterioração.



**Figura 85: Imagem térmica ( Flir i7)**

Tendo em conta o estado de degradação considera-se que a sua reabilitação deveria ser efetuada o mais breve possível. As medidas a adotar nesta situação deveriam ser a reabilitação dos elementos estruturais e o seu posterior isolamento.

As consequências possíveis são:

- Perda de impermeabilidade da fachada;
- Aparecimento de humidades no interior;
- Desenvolvimento de fungos;
- Consequente aumento dos custos com o avançar do tempo de deterioração.

A utilização de UAV para análise térmica de edifícios vem facilitar a sua execução dado o fácil acesso e rapidez que permite o UAV.



## Capítulo 5 - Considerações finais

Nos países mais desenvolvidos mais de 50% dos custos de construção são despendidos na reparação e reabilitação das estruturas o que evidencia a importância de preservar o património e a segurança das estruturas e das pessoas que as utilizam.

A monitorização é a melhor forma de assegurar as melhores condições de utilização das estruturas, garantindo uma maior duração do ciclo de vida das mesmas e reduzindo o custo de manutenção, pois as patologias poderão ser detetadas e corrigidas antes que atinjam situações irreversíveis, reduzindo os danos e otimizando os resultados.

A possibilidade de utilização de UAV para a inspeção e monitorização é uma ferramenta adequada, rápida, muito prática e com um custo bastante reduzido.

A aplicação deste tipo de plataforma, possibilita também o transporte de robôs e outros tipos de mecanismos para instalar nas infraestruturas para uma recolha de informação contínua.

Os UAV podem ainda executar uma monitorização periódica, com intervalos de tempo muito curtos se necessário, permitindo por conseguinte uma avaliação contínua e sistemática do estado das infraestruturas.

O UAV é considerado uma ferramenta de baixo custo, pois o seu investimento é relativamente baixo, cerca de dois mil euros para a aeronave, cerca de mil a 2 mil euros para a aquisição de uma câmara fotográfica/ térmica e quinhentos euros para o software, os restantes custos de manutenção são muito baixos pois resumem-se aos carregamentos das baterias elétricas.

Este equipamento tem uma importância mais vasta não só na monitorização das infraestruturas, como por exemplo na obtenção modelos digitais do terreno, permitindo cálculo de volumes de escavação, obtenção de ortofotomapas, etc.

O UAV é um meio eficaz de monitorização das infraestruturas com grande potencialidade devido ao seu rápido desenvolvimento no sentido de aumentar a capacidade de execução de tarefas cada vez com maior grau de dificuldade e precisão e uma capacidade cada vez maior de utilizar diversos tipos de sensores, sendo neste momento possível utilizar desde câmaras multi-espectrais com 6 bandas até lasers.

## Bibliografia

- [1] - FÉLIX, CARLOS MANUEL DA SILVA (2004) – Monitorização e Análise do Comportamento de Obras de Arte, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil pela FEUP
- [2] - DOMINGUES, MARIA DE FÁTIMA FONSECA (2008) – Monitorização de Estruturas por Varrimento Laser, Tese de Mestrado em Física Aplicada pela Universidade de Aveiro
- [3] - BARREIRA, EVA SOFIA BOTELHO MACHADO (2004) – Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios, Tese de Mestrado em Engenharia Civil pela FEUP
- [4] - OLIVEIRA, RUI ALEXANDRE FIGUEIREDO (2003) – Análise de Práticas de Conservação e Reabilitação de Edifícios com valor Patrimonial, Tese de Mestrado em Engenharia Civil pela FEUP
- [5] - MRAD, N. (2002). "Encyclopedia of Smart Materials, Volumes 1-2", John Wiley & Sons.
- [6] - ALVES, JOAQUIM FERNANDO ALMEIDA (2007) – Monitorização de estruturas de engenharia Baseada em redes de Bragg em Fibra Óptica
- [7] - JAIN, S., "A Survey of Laser Range Finding", 2003.
- [8] - BLAIS, F., "Review of 20 years of range sensor development", Journal of Electronic Imaging, vol.13 (1), January 2004
- [9] - LIMA, H.F., VICENTE, R., NOGUEIRA, R.N., ABE, I., ANDRÉ, P., FERNANDES, C., RODRIGUES, H., VARUM, H., KALINOWSKI, H.J., COSTA, A., PINTO, J.L., "Structural Health Monitoring of the Church of Santa Casa da Misericórdia of Aveiro using FBG sensors", aceite para publicação na IEEE Sensors Journal, 2008.
- [10] - RAFAEL AGUILAR, LUIS F. RAMOS, PAULO B. LOURENÇO, RICARDO SEVERINO, RICARDO GOMES, PAULO GANDRA, MARIO ALVES, EDUARDO TOVAR "Operational Modal Monitoring of Ancient Structures using Wireless Technology", 11-11-2009

- [11] - POÇAS, RICARDO FIGUEIREDO GONÇALVES (2009) – Gestão do Ciclo de vida de Pontes, Tese de Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade do Minho
- [12] - NCHRP SYNTHESIS 375 – Bridge Inspection Practices (2007) – Transportation Research Board - National Cooperative Highway Research Program REPORT 590.
- [13] - BRITO, JORGE MANUEL CALIÇO LOPES (1992) – Desenvolvimento de um sistema de gestão de obras de arte em betão, Tese de Doutoramento para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [14] - SAMCO - Final Report 2006, Practical Bridge Management, Structural Assessment Monitoring and Control - Consulta a 12-08-2007:  
[http://www.samco.org/network/download\\_area/bridge\\_management\\_1.pdf](http://www.samco.org/network/download_area/bridge_management_1.pdf)
- [15] - ALBERT RANGO, ANDREA LALIBERTE, JEFFREY E. HERRICK, CRAIG WINTERS, KRIS HAVSTAD, CAITI STEELE, AND DAWN BROWNING (2009) – “Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management”, Journal of Applied Remote Sensing, Vol. 3
- [16] - H. BENDEAA, F. CHIABRANDOA, F. GIULIO TONOLOB, D. MARENCHINO (2007) - Mapping of Archaeological Areas Using a Low-Cost UAV  
<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-C53/papers/FP025.pdf>, consulta a 12-08-2012
- [17] - EISENBEIß, HENRI (2009) - UAV Photogrammetry, dissertação para obtenção de grau de Doutor em Engenharia pela Universidade de Tecnologia de Dresden, Zurich
- [18] - MARCOS GIONGO, HENRIQUE SOARES KOEHLER, SEBASTIÃO DO AMARAL MACHADO, FLAVIO FELIPE KIRCHNER, MARCO MARCHETTI (2010) – “LiDAR: princípios e aplicações florestais”
- [19] - Agisoft PhotoScan User Manual-Professional Edition, Version 0.8.5 – Publicado em 2012 - [http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro\\_0\\_8\\_5\\_en.pdf](http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro_0_8_5_en.pdf), consulta a 12-08-2012
- [20] - Página Oficial do Software DroneMapper - <http://dronemapper.com/>, consulta a 12-08-2012

- [21] -Termografia em edifícios; Orador. VICENTE RIBEIRO, em 11/03/2009, [www.slideshare.net/Ingenheiro/termografia-edificios](http://www.slideshare.net/Ingenheiro/termografia-edificios), consulta a 12-08-2012
- [22] – Salta, M. Manuela, Prevenção da corrosão no betão armado, Seminário “Materiais em ambiente Marítimo”, Funchal, outubro de 2007
- [23] – FU, GONGKANG, Inspection and Monitoring Techniques for Bridges and Civil Structures, Cambridge England, 2005
- [24] – Dias, Irineu, Sistemas Ópticos de Sensorização em Larga Escala, Apresentação no Encontro com a Ciência em Portugal, Ciência 2008, promovido pelos Laboratórios Associados e pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior