

Monitorização de Estruturas com recurso a Radar Interferométrico

LUÍS CARLOS GONÇALVES SILVA

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

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel Meneses Carneiro de Barros

Coorientador: Mestre Jorge Fernando Martins Henriques

Coorientador: Mestre Fábio Moutinho Paiva

JUNHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

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

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

Aos meus Pais

Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto que cheias se baixam para a terra, sua mãe.

Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho, não se limita apenas a mais uma unidade curricular concluída, mas à conclusão de uma das etapas importantes da minha vida. Com este trabalho além de adquirir um nível de conhecimento numa área em específico, adquiri uma maior maturidade a nível académico e laboral que me permitirão encarar novas etapas com maior facilidade. Tudo isto foi possível devido a todas as pessoas que me acompanharam, não só nestes últimos meses, mas durante todo o percurso académico. Nesse sentido, expresso contudo, um agradecimento especial:

- Ao orientador Professor Rui Carneiro Barros, pelo conjunto de ferramentas que colocou ao meu dispor, porque sem estas o resultado final não teria sido tão conseguido. A nível pessoal agradeço, a disponibilidade e preocupação, bem como a simpatia e os conselhos fundamentais para que o resultado obtido fosse tão satisfatório;
- Aos coorientadores, Engenheiro Jorge Henriques e Engenheiro Fábio Paiva, pela ajuda que me foi facultada durante todo o desenvolvimento do trabalho, pelos conhecimentos que me transmitiram, porque sem estes o desenvolvimento do trabalho não seria de tanta qualidade. A nível pessoal destaco os grandes “amigos” que foram ao longo destes últimos meses, revelando-se na disponibilidade e preocupação que demonstraram para que os resultados obtidos fossem da maior precisão e qualidade, agradeço ainda os conselhos valiosos que foram facultados no sentido de me orientarem para o futuro;
- À empresa Metalgalva, pela disponibilidade demonstrada para a realização da monitorização dentro do recinto da empresa, bem como ao seu departamento técnico pelo fornecimento dos dados necessários à modelação do poste monitorizado;
- Ao projeto VHSS Poles, que permitiu adquirir o radar IBIS-FS para a Faculdade, sem o qual era impossível o desenvolvimento desta dissertação;
- Ao Professor Mário Jorge Leitão do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, pela ajuda e disponibilidade demonstrada no esclarecimento dos conceitos relacionados com o radar genérico, bem como os conselhos para que essa temática fosse de fácil abordagem nesta dissertação;
- Ao padre Bacelar, responsável da Paróquia Igreja de Santo António das Antas, que deu autorização à realização das monitorizações na torre sineira da igreja;
- Ao Engenheiro Franscesco Boscagli, da divisão de georadar da empresa IDS, pela disponibilidade e rapidez na resposta às questões relacionadas com os princípios de funcionamento do radar IBIS-FS, bem como o software de análise IBISDV;
- Ao Professor João Pires da Fonseca, projetista da ponte pedonal da FEUP, pela disponibilização da memória descritiva e dos desenhos necessários à análise da mesma;
- Aos meus amigos, pelo companheirismo e amizade. Pois sem eles este percurso não teria sido feito com a alegria necessária e não teria sido preenchido de tão bons momentos. Quero também agradecer aos meus companheiros de casa que nunca deixaram que a monotonia se apoderasse daquele sítio, e agradecer o carinho e amizade que o André e à Mariana demonstraram ao longo destes cinco anos;
- Ao meu pai e minha mãe, aqui deixo um agradecimento muito especial, por serem um exemplo para mim e me terem formado enquanto pessoa, e por me terem dado o apoio necessário de forma a alcançar esta etapa com sucesso.

RESUMO

O trabalho de investigação desenvolvido nesta dissertação, teve como principal objetivo a monitorização de estruturas com o recurso a um sistema de monitorização desenvolvido recentemente. Esse sistema é composto por um radar que utiliza como princípio de funcionamento a técnica de interferometria. O objetivo principal da dissertação consiste na validação dos resultados obtidos a partir do radar e sua comparação com modelos numéricos e outros sistemas de monitorização estrutural.

Neste contexto, inicialmente serão apresentados os fundamentos teóricos das temáticas da monitorização estrutural e do radar interferométrico. Dentro da monitorização estrutural, foram referidos os vários tipos de monitorização existentes e a sua adequabilidade, com o intuito de inserção do radar interferométrico nesta temática. Para a caracterização do radar interferométrico são abordadas as temáticas que estão na sua origem. Em primeiro lugar é caracterizado o radar genérico, sendo explicados os seus conceitos básicos, bem como justificada a sua classificação. Posteriormente é apresentada a técnica interferométrica bem como todas as outras que contribuem para o funcionamento do radar interferométrico.

Depois de abordados os conceitos de radar e da técnica interferométrica, é apresentado o radar IBIS-FS descrevendo a sua constituição, a sua base de funcionamento e todas as características que lhe permitem obter uma boa execução das monitorizações. É também realizada uma abordagem às características principais dos sinais obtidos e os fatores que podem ter influência na qualidade destes.

Ainda no contexto do radar, abordou-se a base do pós-processamento de dados, com explicação da temática da análise modal, com especificidade na análise modal operacional explicitando os métodos associados a este tipo de análise. Ainda como importante complemento, são abordados os métodos de identificação modal no domínio da frequência, utilizados no pós-processamento e tratamento dos dados recolhidos das monitorizações efetuadas.

Finalmente, são descritos os vários casos de estudo abordados na realização deste trabalho. Para cada um deles, apresentam-se os resultados obtidos a partir do uso do radar interferométrico, são realizadas as devidas comparações com os resultados do modelo numérico e de outras monitorizações efetuadas com sistemas de monitorização diferentes, e é avaliado o rigor e a ordem de grandeza de erros associados a esta nova técnica de monitorização estrutural.

PALAVRAS-CHAVE: Monitorização, Radar, Interferometria, Análise Modal, Modelo Numérico.

ABSTRACT

The research developed in this thesis, aimed to the structural monitoring with the use of a recently developed monitoring system. This system comprises a radar which uses as working principle the interferometry technique. The main purpose of this work is to validate the results obtained from the radar and its comparison with numerical models and other structural monitoring systems.

In this context, it will initially be presented the theoretical foundations of the thematic of structural monitoring as well as of the interferometric radar. Within the structural monitoring, were addressed the various types of existing structural monitoring systems and their adequacy, with the purpose of inserting the radar interferometric in this issue. For the characterization of the radar interferometric, were addressed the issues that are behind its adequate use. First the generic radar is characterized, and some basic concepts are explained, as well as justified its classification. Subsequently the interferometric technique is presented, as well as all other functionalities that contribute to the radar interferometry.

After tackling radar concepts and the interferometric technique, the IBIS-FS radar is presented, describing its constitution, its operating base and all its features that allow a good implementation of the monitoring. It is also carried out an approach to the main characteristics of the obtained signals and also of the factors that may affect the quality of these.

Still in the radar context, it is addressed the base of post-processing data, with a thematic explanation of modal analysis and more specifically of operational modal analysis characterizing the methods for this type of analysis. Yet as important complement, are addressed the modal identification methods in the frequency domain, used in post-processing the data collected during structural monitoring.

Finally, are described several case studies addressed during the accomplishment of this work. For each of those, the results obtained from the use of the interferometric radar are presented, appropriate comparisons are performed with the results of the numerical model and/or of other monitoring techniques, in order to assess accuracy and order of magnitude of errors inherent to this new structural monitoring technique.

KEYWORDS: Monitoring, Radar, Interferometry, Modal Analysis, Finite Element Model.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1 Introdução.....1

1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3

2 Monitorização Estrutural 5

2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 HISTÓRIA DA MONITORIZAÇÃO	6
2.2.1 A ORIGEM DA MONITORIZAÇÃO	6
2.2.2 CRONOLOGIA DA MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL	8
2.3 MONITORIZAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL.....	10
2.3.1 CONSTITUIÇÃO DA SHM.....	12
2.3.2 DANO ESTRUTURAL E DETEÇÃO DE DANOS.....	12
2.3.3 SHM COMO EVOLUÇÃO DA AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA	13
2.3.4 PLANOS DE MONITORIZAÇÃO	14
2.3.5 TIPOS DE SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO	15
2.4 OBJETIVOS DA MONITORIZAÇÃO	18
2.5 PROBLEMAS ASSOCIADOS AOS SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO	22
2.6 CONSTITUIÇÃO DOS SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO	24
2.6.1 SISTEMAS DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS (DATS).....	25
2.6.2 SENSORES	27
2.6.3 EXEMPLOS PRÁTICOS DE APLICAÇÃO DE SENSORES	39

3 Radar 41

3.1 PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO	41
3.2 HISTÓRIA DO RADAR	42
3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE RADAR.....	49
3.3.1 IMAGING RADAR E NON-IMAGING RADAR.....	49
3.3.2 RADAR PRIMÁRIO.....	49

3.3.3 RADAR SECUNDÁRIO	52
3.3.4 RADAR DE PULSO.....	53
3.3.5 RADAR DE ONDA CONTÍNUA	55
3.3.6 RADAR MONO-ESTÁTICO E BI-ESTÁTICO	56
3.4 BANDA DE FREQUÊNCIAS	57
4 Radar Interferométrico IBIS-FS	61
4.1 INTRODUÇÃO AO RADAR INTERFEROMÉTRICO IBIS-FS	61
4.1.1 NOTA INTRODUTÓRIA	61
4.1.2 DESCRIÇÃO DO RADAR INTERFEROMÉTRICO IBIS-FS	62
4.2 CAMPO DE APLICAÇÃO E REGULAMENTAÇÕES.....	63
4.3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO IBIS-FS	63
4.3.3 HARDWARE.....	65
4.3.4 SOFTWARE	72
4.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO IBIS-FS	75
4.4.1 ONDA CONTÍNUA COM PASSO DE FREQUÊNCIA.....	78
4.4.2 INTERFEROMETRIA	84
4.5 FATORES PRINCIPAIS QUE AFETAM O USO DESTA TÉCNICA	85
4.6 QUALIDADE DOS DADOS RECOLHIDOS E ANÁLISE DE FASE	87
4.6.1 RAZÃO SINAL-RUÍDO E PRECISÃO DOS DESLOCAMENTOS.....	87
4.6.2 RAZÃO SINAL-RUÍDO ESTIMADA	88
4.6.3 ANÁLISE DE FASE.....	89
5 Análise Modal Operacional.....	93
5.1 INTRODUÇÃO À ANÁLISE MODAL	93
5.1.1 ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS	93
5.1.2 ANÁLISE MODAL.....	95
5.1.3 MODELOS DE SISTEMAS DINÂMICOS.....	96
5.2 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL	97
5.3 ANÁLISE MODAL OPERACIONAL	97
5.4 MÉTODOS DA ANÁLISE MODAL OPERACIONAL	98
5.4.1 NOTA INTRODUTÓRIA	98
5.4.2 FUNÇÕES DE CORRELAÇÃO	99
5.4.3 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO MODAL.....	99
5.4.4 PROCESSAMENTO DO SINAL	101
5.5 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO MODAL NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	101
5.5.1 MÉTODO DA SELEÇÃO DE PICOS.....	102

5.5.2 MÉTODO DE DECOMPOSIÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA (FDD)	104
6 Casos de Estudo	107
6.1 NOTA INTRODUTÓRIA	107
6.2 POSTE DE TELECOMUNICAÇÕES	107
6.2.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA	107
6.2.2 DESCRIÇÃO DAS MONITORIZAÇÕES	110
6.2.3 DADOS OBTIDOS.....	112
6.2.4 MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	118
6.2.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM O MODELO NUMÉRICO	120
6.2.6 CONCLUSÕES	121
6.3 CHAMINÉ DE ALVENARIA DE TIJOLO.....	121
6.3.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA	121
6.3.2 DESCRIÇÃO DAS MONITORIZAÇÕES	123
6.3.3 DADOS OBTIDOS.....	125
6.3.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	127
6.3.5 CONCLUSÕES	129
6.4 TORRE SINEIRA	130
6.4.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA	131
6.4.2 DESCRIÇÃO DAS MONITORIZAÇÕES	132
6.4.3 DADOS OBTIDOS.....	134
6.4.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	137
6.4.5 CONCLUSÕES	140
6.5 PONTE PEDONAL FEUP	140
6.5.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA	141
6.5.2 DESCRIÇÃO DAS MONITORIZAÇÕES	142
6.5.3 DADOS OBTIDOS.....	144
6.5.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE DADOS.....	147
6.5.5 CONCLUSÕES	149
7 Considerações Finais	151
7.1 CONCLUSÕES.....	151
7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	152

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1- Teste de uma treliça em aço na Inglaterra, para ponte Ferroviária na Índia, século XIX [7] ...	7
Fig. 2.2 – Colapso da ponte Tacoma Narrows Bridge [17].....	9
Fig. 2.3 – Princípio e organização de um sistema de SHM, adaptado de [4].....	11
Fig. 2.4 - Origem Interdisciplinar da SHM	12
Fig. 2.5 - Níveis do procedimento da SHM, adaptado de [25].....	13
Fig. 2.6 – Esquematização de um sistema típico a) SHM, b) CM, c) NDE	16
Fig. 2.7 – Componentes principais do sistema SHM, adaptado de [25]	16
Fig. 2.8 – Diagrama esquemático de um procedimento típico do DP	17
Fig. 2.9 – Objetivos gerais no processo da monitorização estrutural [5]	19
Fig. 2.10 - Ilustração dos 5 níveis do processo de monitorização estrutural	19
Fig. 2.11 – Benefícios da Monitorização Estrutural para os utilizadores finais [4]	21
Fig. 2.12 – Potencial utilidade do sistema de monitorização versus operação sem monitorização [5].	21
Fig. 2.13 - Acidente de aviação, voo 243 Aloha Airlines, 1988, falta de controlo da corrosão pela equipa de manutenção [4]	22
Fig. 2.14 – Colapso da ponte <i>Injaka</i> , 1988, falta de controlo no processo construtivo [4]	22
Fig. 2.15 – Esquema de um sistema de monitorização estrutural [13]	24
Fig. 2.16 – Configuração de um sistema de aquisição e transmissão de dados, adaptado de [13].....	26
Fig. 2.17 – Conversão correta de sinal (à esquerda), efeito <i>aliasing</i> (à direita)[6]	26
Fig. 2.18 – Clinómetro biaxial fixo [6; 27; 28]	28
Fig. 2.19 – Ilustração do sistema de nivelamento eletrolítico de um clinómetro, adaptado de [29]	28
Fig. 2.20 – Clinómetro Portátil [30]	29
Fig. 2.21 - Sensor de viga [31]	29
Fig. 2.22 – Extensómetro de resistência elétrica (à esquerda), e sua aplicação numa peça (à direita) [32; 33]	30
Fig. 2.23 – Extensómetros de corda vibrante, de embeber no betão (em cima), de colocar á superfície do betão (em baixo) [34]	30
Fig. 2.24 – Sensores de fibra ótica, de embeber (à esquerda), de acoplar à estrutura (à direita) [6].....	31
Fig. 2.25 – Exemplo de um LVDT, na monitorização de uma ponte [35]	32
Fig. 2.26 – Sensores de temperatura, termopar (à esquerda), de fibra ótica (à direita) [36; 37]	32
Fig. 2.27 – Sensores de humidade: a) Resistivos, b) Capacitivos, c) Termo condutores [6; 37; 38]	33
Fig. 2.28 – Anemómetro, de hélice (à esquerda), ultrassónico (à direita) [39; 40]	34
Fig. 2.29 – Estação meteorológica móvel [41]	35
Fig. 2.30 – Recetor de GPS, fixo (à esquerda), portátil (à direita) [42]	36
Fig. 2.31 - Sismógrafo analógico de deslocamentos verticais (à esquerda) e deslocamentos horizontais (à direita) [43]	36
Fig. 2.32 - Estação sísmica portátil [44]	37
Fig. 2.33 – Acelerómetro piezoelétrico [45]	38
Fig. 2.34 – Acelerómetro piezoresistivo [46]	38
Fig. 2.35 – Acelerómetro do tipo <i>force balance</i> [47]	39
Fig. 3.1 – Princípio de reflexão de ondas sonoras (à esquerda), Princípio de funcionamento do RADAR (à direita) [51]	42
Fig. 3.2 – Telemobiloscópio e componentes, antena (à esquerda), recetor (ao meio), transmissor (à direita) [54]	43
Fig. 3.3 – Esquema do sistema desenvolvido por Hulsmeier, “ <i>Telemobiloscope</i> ” [54]	44
Fig. 3.4 – Recetor do RAPID, 1967, Moscovo, adaptado de [58]	45
Fig. 3.5 – Última torre do sistema <i>Chain Home</i> , Bawdsey, Inglaterra [60]	45

Fig. 3.6 – Robert Watson-Watt com o primeiro radar britânico [61]	46
Fig. 3.7 – Primeiros radares de controlo aéreo, nos Estados Unidos [59]	46
Fig. 3.8 – Cronologia da Evolução do Radar	48
Fig. 3.9 – Classificação de RADAR, baseada na sua função primária, adaptado de [63]	49
Fig. 3.10 - Classificação dos tipos de radar	49
Fig. 3.11 – Diagrama de funcionamento de um sistema de radar primário, adaptado de [64]	50
Fig. 3.12 – Forma da onda de transmissão do radar	51
Fig. 3.13 – Classificação dos tipos de radar	52
Fig. 3.14 – Diagrama de funcionamento radar secundário, adaptado de [65]	52
Fig. 3.15 - Tipos de Radar Primário-Radar de Pulso.....	54
Fig. 3.16 - Tipos de Radar Primário-Radar de onda Contínua	55
Fig. 3.17 – Desfasamento de sinal transmitido e refletido.	56
Fig. 3.18 – Esquema ilustrativo de um radar, mono-estático (à esquerda), e bi-estático (à direita), adaptado de [66].....	56
Fig. 3.19 – Diagrama de funcionamento e constituição do radar, mono-estático (à esquerda), e bi-estático (à direita).	57
Fig. 3.20 – Banda de frequências usadas pelo radar, adaptado de [63].....	57
Fig. 3.21 – Radares e suas bandas de frequência [GHz], nos 2 tipos de nomenclatura, adaptado de [63]	59
Fig. 4.1 – IBIS-FS, monitorização torre de Pisa[75]	62
Fig. 4.2 – Radar IBIS-FS	64
Fig. 4.3 – Vista Frontal do sensor.....	65
Fig. 4.4 – Vista Traseira do sensor	66
Fig. 4.5 – Vista Inferior do sensor	66
Fig. 4.6 – Mira telescópica	66
Fig. 4.7 – Par de antenas, IBIS-ANT3.....	67
Fig. 4.8 – Diagramas de radiação retangulares (cartesiano) com padrão de radiação no plano vertical (à esquerda) e plano horizontal (à direita) das antenas IBIS-ANT3, adaptado de [75]	68
Fig. 4.9 – Tripé IBIS-FS.....	70
Fig. 4.10 – Cabeça Rotativa (Rotação 3D).....	70
Fig. 4.11 – Computador de Aquisição e Controlo	71
Fig. 4.12 – Pormenorização dos cabos conectores, USB de transmissão de dados (à esquerda), de transmissão de energia (à direita)	71
Fig. 4.13 – Unidade de fonte de alimentação, 12V	71
Fig. 4.14 – Esquematização da conexão dos elementos de Hardware IBIS-FS	72
Fig. 4.15 – Interface do <i>IBIS-S Controller v.02.01.004</i>	72
Fig. 4.16 – Fluxograma do pós-processamento do software IBISDV, adaptado[76].....	73
Fig. 4.17 - Definição de Geometria	74
Fig. 4.18 – Fase de seleção dos pontos de medição.....	74
Fig. 4.19 – Esquema de um sistema de aquisição de um radar, gráfico de medição de um perfil (à esquerda), e geometria no plano de projeção (à direita), adaptado de [68]	76
Fig. 4.20 – Posicionamento típico do radar, pontes, adaptado de [76].....	77
Fig. 4.21 – Deslocamento radial, dr , versus deslocamento real (projetado) d , adaptado de [80]	77
Fig. 4.22 – Cone refletor e respetivo apoio de ligação utilizados nos casos de estudo	79
Fig. 4.23 - Conceito de resolução radial (<i>range resolution</i>), adaptado de [81]	79
Fig. 4.24 – Aplicação da técnica SF-CW, às ondas de sinal, no domínio da frequência (em cima), e no domínio do tempo (em baixo), adaptado de [76].....	80

Fig. 4.25 – Relação entre frequência e tempo, na modulação SF-CW, adaptado de [81]	81
Fig. 4.26 – Processo de focagem, adaptado de [76]	82
Fig. 4.27 – Perfil espacial de variação de amplitude dos ecos (em baixo), e planta espacial (em cima), ambos com respetivos intervalos (células radiais), adaptado de [76]	82
Fig. 4.28 – Frequência de amostragem versus distância máxima, para 3 tipos de resoluções de alcance, adaptado de [85]	83
Fig. 4.29 – Conceito de medição interferométrica, adaptado de [81]	84
Fig. 4.30 – Espectros de densidade de potência, com variação da altura do tripé, adaptado de [68]	85
Fig. 4.31 - Dados temporais do deslocamento de diferentes edifícios (representados a cores diferentes), observados através do radar, medições originais (à esquerda) e após <i>de-trending</i> (à direita), adaptado de [68]	86
Fig. 4.32 – Representação da fase, adaptado [76]	90
Fig. 4.33 – Efeito do <i>clutter</i> fixo (à esquerda), efeito do <i>clutter</i> fixo removido (à direita), adaptado [76]	91
Fig. 5.1 - Resposta estrutural de excitações dinâmicas, adaptado de [87]	94
Fig. 5.2 – Métodos de análise modal analítica, adaptado de [87]	95
Fig. 5.3 - Modelo de um sistema dinâmico, adaptado de [88]	96
Fig. 5.4 - Esquematização dos métodos de identificação modal da OMA	101
Fig. 6.1 – Poste tubular de telecomunicações	108
Fig. 6.2 – Esquematização do poste em secções e tabela com as respetivas características	108
Fig. 6.3 - Pormenorização da escada	109
Fig. 6.4 – Pormenorização da fundação do poste	110
Fig. 6.5 - Vista em planta do local dos ensaios (à esquerda) e vista frontal de cada ensaio (à direita)	110
Fig. 6.6 - Esquema representativo de corte das direções 1 e 2	111
Fig. 6.7 - Seleção das células radiais ótimas	113
Fig. 6.8 - Representação polar da fase discreta do sinal complexo da célula radial 36	114
Fig. 6.9 – Gráfico deslocamento-tempo das células radiais	114
Fig. 6.10 – Seleção das células radiais ótimas	115
Fig. 6.11 - Representação polar da fase discreta do sinal complexo da célula radial 57	116
Fig. 6.12 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais	116
Fig. 6.13 - Espectro de velocidades das células radiais selecionadas na direção 1	117
Fig. 6.14 - Espectro de velocidades das células radiais selecionadas na direção 2	117
Fig. 6.15 - Modelo numérico do poste	118
Fig. 6.16 - Modelo numérico da flange	119
Fig. 6.17 - Modos de vibração do modelo numérico	119
Fig. 6.18 - Comparação das deformadas dos modos de vibração	120
Fig. 6.19 - Chaminé de alvenaria de tijolo	122
Fig. 6.20 – Esquematização (em corte) da chaminé em secções e tabela com respetivas características	122
Fig. 6.21 - Ilustração do desvio no topo da chaminé	123
Fig. 6.22 - Representação do cenário envolvente da estrutura	123
Fig. 6.23 - Vista panorâmica do local dos ensaios (à esquerda) e vista frontal do ensaio na direção 1 (à direita)	124
Fig. 6.24- Esquema representativo de corte da direção 1	124
Fig. 6.25 – Gráfico de energia dos pontos da estrutura com seleção das células radiais	126
Fig. 6.26 - Representação polar da fase discreta do sinal complexo da célula radial 50	126
Fig. 6.27 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais	127

Fig. 6.28 - Espectro de velocidades das células radiais selecionadas na direção 1	128
Fig. 6.29 - Espectro de velocidades da célula radial 27 na direção 1	128
Fig. 6.30 - Vista panorâmica da Igreja de Santo António das Antas, com respetiva orientação	130
Fig. 6.31 - Vista frontal da torre com orientação NO-SE (à esquerda) e corte lateral com orientação NE-SO (à direita), adaptado de [99].....	131
Fig. 6.32 - Secção transversal da torre, adaptado de [99].....	132
Fig. 6.33 - Vista pormenorizada da torre com orientação NO-SE	132
Fig. 6.34 - Vista panorâmica do local dos ensaios (ao centro) e vista frontal de cada ensaio nas respetivas direções (à esquerda e direita)	133
Fig. 6.35- Esquema representativo de corte das direções 1 e 2	133
Fig. 6.36 - Gráfico de energia dos pontos da estrutura com a seleção das células radiais	135
Fig. 6.37 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais	135
Fig. 6.38 - Gráfico de energia dos pontos da estrutura com a seleção das células radiais.....	136
Fig. 6.39 - Representação polar da fase discreta do sinal complexo da célula radial 33.....	137
Fig. 6.40 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais	137
Fig. 6.41 - Espectro de velocidades das células radiais selecionadas na direção 1	138
Fig. 6.42 - Espectro de velocidades da célula radial 22 na direção 1	138
Fig. 6.43 - Espectro de velocidades das células radiais selecionadas na direção 2	139
Fig. 6.44 - Ponte Pedonal FEUP	140
Fig. 6.45 - Corte Longitudinal da Ponte	141
Fig. 6.46 - Seção transversal tipo	141
Fig. 6.47 - Colocação dos cones refletorres	142
Fig. 6.48 - Posicionamento do radar e direção de monitorização, vista panorâmica (à esquerda) e vista frontal (à direita).....	142
Fig. 6.49 - Esquema representativo em alçado da geometria da monitorização.....	143
Fig. 6.50 - Gráfico de energia dos pontos da estrutura com seleção das células radiais	144
Fig. 6.51 - Representação polar da fase discreta do sinal complexo da célula radial 54.....	145
Fig. 6.52 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais	145
Fig. 6.53 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais 10, 19 e 28	145
Fig. 6.54 - Gráfico de energia dos pontos da estrutura com seleção das células radiais	146
Fig. 6.55 - Representação polar da fase discreta do sinal complexo da célula radial 10.....	146
Fig. 6.56 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais	147
Fig. 6.57 - Espectro de velocidades das células radiais selecionadas no primeiro caso.....	147
Fig. 6.58 - Espectro de velocidades das células radiais selecionadas no segundo caso	148

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Aplicação de NDE para estruturas de betão, adaptado de [26]	17
Quadro 2.2 - Pontes equipadas com sistemas de monitorização [13]	40
Quadro 3.1 – Bandas, intervalos de frequência de radares e suas aplicações	58
Quadro 4.1 – Amplitude do lóbulo principal das antenas IBIS-ANT3 a -3dB e -10dB, adaptado de [75]	68
Quadro 4.2 – Características das antenas de banda, Ku e X, adaptado de [75]	69
Quadro 4.3 – Características dos Refletores	79
Quadro 5.1 - Cronologia dos desenvolvimentos mais importantes em dinâmica estrutural	93
Quadro 6.1 – Parâmetros geométricos das monitorizações na direção 1 e 2.....	111
Quadro 6.2 - Parâmetros de análise.....	112
Quadro 6.3 - Frequências identificadas nas direções 1 e 2.....	118
Quadro 6.4 - Frequências calculadas através do modelo numérico	119
Quadro 6.5 - Comparação das frequências experimentais com as frequências do modelo numérico	120
Quadro 6.6 - Parâmetros geométricos das monitorizações na direção 1	125
Quadro 6.7 - Parâmetros de análise.....	125
Quadro 6.8 - Frequências identificadas na direção 1	129
Quadro 6.9 - Comparação das frequências experimentais com as frequências do estudo [98].....	129
Quadro 6.10 - Parâmetros geométricos das monitorizações na direção 1 e 2	134
Quadro 6.11 - Parâmetros de análise.....	134
Quadro 6.12 - Frequências identificadas nas direções 1 e 2.....	139
Quadro 6.13 - Comparação das frequências experimentais com as frequências do estudo de Paulo Baião	139
Quadro 6.14 - Parâmetros geométricos das monitorizações nos casos 1 e 2	143
Quadro 6.15 - Parâmetros de análise para os casos 1 e 2.....	144
Quadro 6.16 - Frequências identificadas os casos 1 e 2.....	148
Quadro 6.17 - Comparação das frequências experimentais com as frequências do estudo	149

1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Desde que o homem começou a construir que foi observando atentamente tudo o que foi executando, tendo daí resultado importantes lições que foram sendo aplicadas nas construções que se seguiram. Ainda que o homem desconhecesse os conceitos de segurança e durabilidade estrutural, que são utilizados atualmente, foram essas observações que permitiram desde sempre o desenvolvimento de novas técnicas construtivas e a aplicação de novos materiais na Engenharia Civil.

A necessidade de garantir condições de segurança, apesar de ser bastante abordada na atualidade, não é um tema recente. As técnicas de conservação usadas pelo império romano nas suas construções, a análise à torre de Pisa em 1292[1] e a primeira monitorização documentada (cúpula de S.Pedro em 1742[1]), são um bom exemplo disso. Com a degradação das estruturas e monumentos já existentes, e com a construção de novas infraestruturas, essas condições mostram uma necessidade que se verifica não só nas fases iniciais de projeto, mas também nas eventuais fases posteriores de exploração ou até mesmo de reabilitação. Hoje em dia a reabilitação e a conservação, devido à sua complexidade exigem uma abordagem técnica mais cuidada, exigente e especializada, dando ênfase aos aspetos relacionados com a sustentabilidade, as questões ambientais, a preservação e durabilidade das estruturas correntes. Como resultado de tal abordagem surge a Monitorização Estrutural.

A Monitorização Estrutural assume um papel importante e necessário, para o conhecimento do comportamento real das estruturas, que se traduz na avaliação da segurança e da integridade estrutural, recorrendo a sistemas de monitorização. Tais sistemas permitem com maior ou menor facilidade a deteção de danos ou degradação nas estruturas monitorizadas. A utilização destes sistemas numa fase inicial de construção, permite a deteção de anomalias precoces que possam ter interferência no correto comportamento da estrutura, ajudando de certo modo a reduzir os custos de intervenção e manutenção, e aumentando o tempo de vida útil das estruturas. Inicialmente os sistemas de monitorização envolviam, métodos de deteção de danos baseados em inspeções visuais ou métodos experimentais localizados. Contudo a realização dos métodos experimentais envolve algumas limitações, como o acesso ao local específico do dano detetado (que muitas das vezes não é possível), bem como a necessidade de conhecimento das condições fronteira do dano.

Atualmente e como solução às limitações anteriores, as condições de segurança das estruturas são habitualmente analisadas com base no desenvolvimento de modelações numéricas. Contudo dentro das análises efetuadas, a maior preocupação é a minimização dos seus erros, para tal, deve ter-se em consideração, as condições de apoio das estruturas e as incertezas associadas à caracterização dos parâmetros geométricos e mecânicos da estrutura. Como meio de solução e de suporte de comparação e validação do modelo numérico, surgem também as técnicas de identificação dos parâmetros modais das

estruturas (frequências naturais, modos de vibração, coeficientes de amortecimento modais). Estas técnicas baseiam-se na realização de ensaios dinâmicos e/ou estáticos da estrutura para obtenção da resposta estrutural às forças de excitação externas.

Devido ao desenvolvimento dos procedimentos de identificação das características dinâmicas de estruturas através das suas respostas, a monitorização da integridade estrutural tem sofrido uma grande expansão, principalmente para estruturas com maior importância (económica e social). Esse desenvolvimento deve-se muito aos avanços computacionais no processamento de dados e à economia dos microprocessadores, que se traduzem numa melhoria das medições estáticas e/ou dinâmicas, durante as monitorizações. Com isto é possível afirmar, que devido à existência de procedimentos capazes de identificar as características dinâmicas das estruturas, existe uma maior potencialidade dentro dos sistemas de monitorização, pois a partir destes é possível recolher grandes quantidades de informação e assim estimar em qualquer momento os parâmetros modais das estruturas que permitem uma avaliação da integridade estrutural.

Como resultado de todo o desenvolvimento atribuído aos sistemas de monitorização, surge então recentemente uma tecnologia mais avançada de monitorização estrutural sem contacto, baseada nos princípios gerais do radar, mais propriamente reflexão de ondas eletromagnéticas. Este sistema foi inteiramente projetado por engenheiros italianos e tem como principal fundamento, a técnica de interferometria.

O sistema de radar surge como resposta aos problemas apresentados pelos outros sistemas de monitorização de integridade estrutural, como por exemplo, os acelerómetros. Pois o sistema de radar, ao contrário dos acelerómetros, não necessita de colocação de sensores em pontos estratégicos da estrutura, reduzindo assim o potencial perigo associado na maioria dos casos à colocação desses sensores. Visto que a instalação (fixação e cabeamento) dos sensores era uma das tarefas, dentro da monitorização da integridade estrutural, que mais tempo ocupava, o radar com a não necessidade de colocação de sensores, assegura assim mais uma vantagem em relação aos outros tipos de monitorização. Aliadas a estas e a muitas outras vantagens, deve-se ao fato de o radar interferométrico apresentar a possibilidade de medição simultânea das deflexões estáticas e dinâmicas dos vários pontos da estrutura com precisões sub-milimétricas. E ainda ter em consideração as descontinuidades nas superfícies das estruturas, bem como as interseções de vigas ou zonas e canto, como sendo alvos virtuais que o radar considera para efetuar as monitorizações.

O sistema de radar apresenta assim várias vantagens em relação a outros sistemas de monitorização, traduzindo-se numa aposta viável para o futuro das monitorizações de integridade estrutural.

1.2 OBJETIVOS

Face à nota introdutória apresentada anteriormente, o presente trabalho tem como principal objetivo abordar dentro da temática da monitorização estrutural, a potencialidade do sistema de monitorização com recurso ao radar interferométrico, através da realização de ensaios de vibração ambiental (AVT) em 4 casos práticos diferentes e validação dos resultados obtidos através de modelação numérica e com comparações de estudos já efetuados. Ainda com este trabalho, pretende-se adquirir experiência prática e *know-how* ao nível da realização de ensaios dinâmicos em estruturas verticais (postes, chaminés) e estruturas horizontais (pontes) com o recurso ao radar interferométrico.

Para que os objetivos acima descritos fossem cumpridos, foi necessário a realização das seguintes tarefas:

- Estudo da origem e princípios básicos da monitorização e tipos de sistemas de monitorização para uma melhor compreensão do grau de importância e utilidade de cada um deles;
- Estudo dos conceitos base do radar genérico para melhor compreensão das metodologias de funcionamento do mesmo e melhor introdução ao conceito do radar interferométrico;
- Compreensão das funcionalidades do radar interferométrico e estudo das metodologias de funcionamento do mesmo;
- Estudo da análise dinâmica de estruturas com foco na análise modal operacional, para uma melhor compreensão da aquisição e pós-processamento dos dados obtidos;
- Realização dos casos práticos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Na realização deste trabalho, os temas abordados foram organizados em sete capítulos.

No primeiro capítulo são apresentadas as motivações que levam à realização da monitorização nas estruturas novas e nas estruturas já existentes, inserindo também os tipos de sistemas mais utilizados até aos dias de hoje. É introduzido também o radar interferométrico, como resposta às dificuldades apresentadas pelos outros tipos de sistemas. São ainda apresentados neste capítulo os principais objetivos da realização deste trabalho, com a enumeração das tarefas para alcançar esses objetivos, e a organização deste trabalho.

O segundo capítulo começa com a apresentação do estado de arte da monitorização estrutural, onde é descrita a revisão histórica da monitorização e respetiva cronologia dos acontecimentos mais importantes. O capítulo segue-se com a descrição dos principais objetivos e problemas associados aos sistemas de monitorização, a constituição dos sistemas de monitorização, incluindo a descrição dos sensores mais utilizados nesses sistemas, e a descrição detalhada do tipo de monitorização mais usual (Monitorização da Integridade Estrutural, SHM).

No terceiro capítulo são apresentados os princípios básicos referentes ao radar genérico, bem como é apresentada uma evolução histórica do mesmo onde são apresentados os desenvolvimentos mais importantes que se sucederam nesta área, são também descritas as principais classificações de um radar e as bandas de frequência em que operam.

O quarto capítulo aborda em específico o radar interferométrico estudado e utilizado durante este trabalho. Deste modo é apresentada uma descrição detalhada do mesmo com os seus campos de aplicação, as suas características técnicas em termos da sua constituição, os princípios de funcionamento e a qualidade dos dados recolhidos.

No quinto capítulo como consequência do pós-processamento dos dados recolhidos das monitorizações do radar interferométrico, é realizada uma abordagem à análise modal, com especificidade na análise modal operacional (adotada na presente dissertação). É descrito o conceito da análise modal operacional, bem como os métodos utilizados na mesma para que se possa efetuar o processamento de dados, por último e com foco neste trabalho em específico, são descritos dois métodos de identificação modal no domínio da frequência, utilizados no pós-processamento dos casos de estudo efetuados durante a realização do trabalho.

No sexto capítulo são descritos todos os casos de estudo efetuados para a realização da dissertação, bem como todos os resultados obtidos e consequentes comparações com outros estudos já efetuados (com outros sistemas de monitorização) e modelos numéricos. Os casos de estudo realizados são, uma torre de telecomunicações, uma chaminé em alvenaria de tijolo, uma torre sineira e uma ponte pedonal.

Finalmente no sétimo e último capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho e apontadas as maiores preocupações a nível futuro, dentro da área da monitorização e uso deste sistema.

2

MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

2.1 INTRODUÇÃO

A sociedade atual tem demonstrado um forte crescimento na dependência de sistemas estruturais e mecânicos, como aeronaves, pontes, edifícios, plataformas de petróleo, etc. Muitos destes sistemas atualmente estão perto do limite da vida útil para o qual foram projetados. Consequentemente a reparação desses sistemas por vezes não demonstra ser economicamente viável, e por isso a monitorização das estruturas é um fator importante para que se possam detetar os danos estruturais previamente e garantir a sua integridade e segurança.

Diferentes métodos de avaliação não destrutivos (*Non Destructive Evaluation*, NDE), tem sido desenvolvidos para a deteção de danos. Nos últimos anos tem surgido uma série de novas técnicas de deteção de danos baseadas em tecnologias com equipamentos de sensor. As técnicas de inspeção ultrassónicas e técnicas com recurso a sistemas de radar, são um bom exemplo de tecnologias avançadas que têm sido atualmente utilizadas na deteção de danos estruturais. Estes métodos ao permitirem que sejam efetuadas monitorizações globais de grandes estruturas, caem dentro da área da monitorização da integridade estrutural (*System Health Monitoring*, SHM).

Os sistemas de monitorização da integridade estrutural requerem a instalação de sensores de base elétrica ou ótica, ligados a equipamentos automáticos de aquisição e de transmissão de sinal, com elevado grau de fiabilidade, que associados a sistemas de gestão de dados são capazes de transmitir em permanência (podendo ser efetuado de forma online) à entidade responsável, informação relacionada com o estado de conservação e segurança da estrutura. Por outro lado, quando instalados durante o processo construtivo, estes sistemas permitem o apoio e o controlo da execução, fundamentando decisões que de outro modo dificilmente poderiam ser conscientemente tomadas. Como uma alternativa de monitorização mais recente, existe a possibilidade de não serem instalados sensores na estrutura, sendo a aquisição de dados efetuada através de sensores “virtuais”, esta técnica está associada ao uso do radar interferométrico, tema que será desenvolvido nos próximos capítulos.

Embora os sistemas de monitorização de integridade estrutural utilizem métodos de avaliação não destrutivos como ferramentas, existem muitas diferenças nos seus princípios de funcionamento. As técnicas de avaliação não destrutivas são normalmente aplicadas localmente, nas regiões onde é expectável a existência de danos, enquanto os métodos de monitorização da integridade estrutural devem fornecer uma monitorização em tempo real de toda a estrutura, durante o seu normal funcionamento. A monitorização da integridade estrutural é considerada uma evolução do conceito de deteção de danos implementado sob a forma de sistemas de monitorização da condição estrutural (*Condition Monitoring*, CM). Os sistemas de monitorização de condição estrutural, devem ser capazes de detetar danos com base numa avaliação global das estruturas durante o seu funcionamento.

A implementação dos sistemas de monitorização permitem assim uma gestão adequada dos recursos, traduzindo-se na economia das soluções e na garantia da durabilidade e da segurança estrutural. Neste sentido pode-se afirmar que os sistemas de monitorização asseguram ou aumentam o período de exploração das estruturas com qualidade e eficiência económica, assegurando uma maior facilidade de manutenção e a sua sustentabilidade. Está previsto que o desenvolvimento da monitorização da integridade estrutural atinja maiores patamares, como na capacidade de deteção de danos em fases iniciais do seu desenvolvimento, ou no caso ideal de prever a sua ocorrência[2-8].

2.2 HISTÓRIA DA MONITORIZAÇÃO

2.2.1 A ORIGEM DA MONITORIZAÇÃO

Desde há milhares de anos que dentro da engenharia têm sido efetuadas análises ao desempenho contínuo e ao comportamento das estruturas, com o objetivo de prolongar a vida útil das mesmas e garantir a segurança pública[9]. Com o desenvolvimento da sociedade, houve também a necessidade de criar estruturas de grandes dimensões e importância, para que fosse possível o acompanhamento do desenvolvimento e necessidades da população.

Nos países mais desenvolvidos, ao longo dos anos e principalmente nas últimas décadas, têm ocorrido uma acumulação de *stock* de estruturas como pontes, túneis, edifícios, barragens, etc. Em comparação com os parâmetros atuais de segurança, o nível de segurança de muitas dessas estruturas, que continuam em serviço, pode ser considerado como inadequado. Daí a necessidade de maior atenção por parte das entidades de inspeção, para que sejam asseguradas todas as normas de segurança nas estruturas consideradas como inadequadas ou com falta de segurança para os demais utilizadores. Para que a segurança das estruturas possa ser assegurada, é necessário recorrer à monitorização estrutural.

Apesar do termo Monitorização Estrutural ser recente na Engenharia Civil (tendo em conta que o conceito de monitorização difere em vários pontos do termo inspeção), o uso de instrumentos para a verificação da integridade das estruturas têm vindo a ser utilizado desde os séculos passados. Não existem datas concretas da sua realização, mas foram os romanos os pioneiros na área da inspeção e manutenção de estruturas. Ainda em 1292 foram realizados estudos na torre de Pisa em Itália, devido à grande instabilidade da mesma, causada por fenómenos sísmicos. Apesar de todas as inspeções realizadas ao longo do desenvolvimento da humanidade, a primeira inspeção documentada é do ano de 1742, e visou o reforço da cúpula de S. Pedro em Roma. Estes e outros acontecimentos mostram um a importância que têm sido dada à inspeção estrutural ao longo dos séculos, fazendo também evidência à preocupação do homem em garantir a segurança e estabilidade das suas construções.

A reabilitação das construções, tal como a conhecemos nos dias de hoje, teve a sua origem nos séculos XVIII e XIX. Uma das primeiras referências relativas ao conceito de Monitorização Estrutural data dos inícios do século XIX, e refere-se a ensaios que foram realizados para detetar fissuras em rolamentos ferroviários[10]. Com a revolução industrial nesse mesmo século, a monitorização estrutural começou a ter um papel mais importante, devido à necessidade de se garantir a segurança e a estabilidade das estruturas quando sujeitas aos vários tipos de carga ou instabilidades. Observando a Fig. 2.1, a utilização de vários instrumentos de medição no ensaio de uma ponte, demonstra a preocupação em garantir a segurança da mesma dentro dos parâmetros da Engenharia Civil.

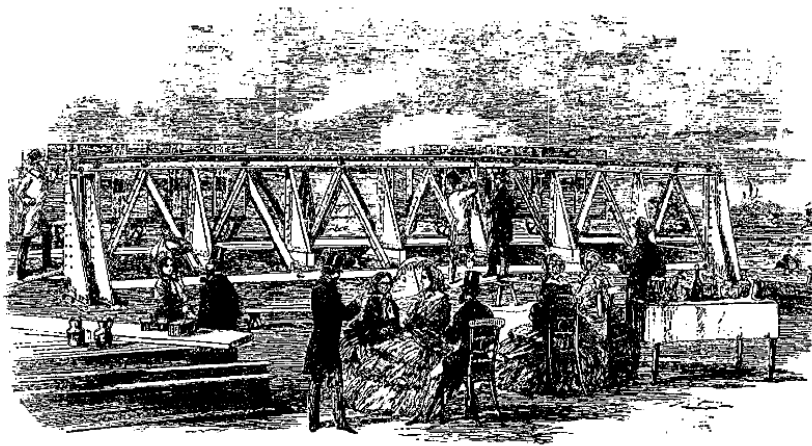


Fig. 2.1- Teste de uma treliça em aço na Inglaterra, para ponte Ferroviária na Índia, século XIX [7]

Nos primórdios o conceito aplicado na manutenção consistia na inspeção periódica, que normalmente se iniciava com uma prévia inspeção visual[7], sendo provavelmente o método mais antigo usado para a avaliação estrutural. Desde sempre existiu a preocupação com o estado e a segurança das estruturas, ou seja avaliação do estado estrutural ou monitorização. Esta era efetuada pelo toque, visualmente ou quando se induzia propositadamente distúrbios na estrutura e se registava os ruídos da mesma. Apesar de ser um método antiquado, continua a ser importante nos dias de hoje para que numa primeira avaliação se possa garantir a integridade das estruturas, tendo desempenhado um papel de maior importância nas duas últimas décadas.

O *New York State Department of Transportation* descreve a avaliação visual como um método de “*Sight, Sound and Touch*”[11], ou seja, visão, som e toque, querendo traduzir neste conceito a deteção de fendas, ou outro tipo de instabilidades, a olho nu. Se uma avaliação deste tipo for efetuada por um especialista com bastante experiência, com o auxílio do seu senso comum pode ser considerada uma avaliação importante e valorizável mesmo tendo em conta toda a tecnologia e métodos utilizados na Monitorização Estrutural, porque no final alguém responsável terá sempre de tomar uma decisão a partir dos dados recolhidos através dos vários métodos e tecnologias utilizados na avaliação.

Apesar das origens da monitorização estarem ligadas à engenharia aeroespacial e mecânica, a tecnologia rapidamente convergiu para a engenharia civil, ajudando a resolver problemas relativos a infraestruturas, como proteção de edifícios e pontes, a ações extremas devido ao vento e aos sismos[12]. É portanto impossível indicar precisamente como e quando foi a primeira monitorização estrutural, mas retirando o tempo das simples observações estruturais periódicas, formalmente a monitorização estrutural e sua interpretação por meio de instrumentos começou na segunda metade do século passado e foi acelerando com o uso do armazenamento de dados eletrónico e sua aquisição por meio computacional. A grande atenção que tem sido dada pela comunidade científica na monitorização estrutural apenas tem tido grande foco nas pontes, ofuscando a aplicação formal da monitorização a outros tipos de infraestruturas[13].

Desde os finais do século XIX que têm sido realizados ensaios dinâmicos em pontes. Muitos destes ensaios foram efetuados como parte da inspeção de segurança e monitorização (maioritariamente em pontes ferroviárias). Mas foi nas décadas de 60 a 80 que esses ensaios tiveram uma maior importância para a identificação de frequências naturais e configurações modais de pontes, barragens e edifícios. Em termos de instrumentação, nesses ensaios foram utilizados sismógrafos, acelerómetros mecânicos ou

extensómetros elétricos. Como os sensores utilizados tinham uma precisão e fiabilidade limitadas, os ensaios dinâmicos eram efetuados principalmente como complementos dos estudos analíticos ou numéricos. Estes ensaios, permitiram adquirir um melhor conhecimento estrutural e desenvolvimento dos sensores e sistemas de medição utilizados. Já os testes de ensaio mais recentes são evoluções mais sofisticadas daqueles que eram usados anteriormente. Muitos destes testes mais recentes tem tido a grande preocupação de tentar desenvolver e melhorar a análise e os procedimentos de projeto na monitorização do comportamento das pontes em serviço[14].

No entanto, com a evolução da informática e o desenvolvimento das capacidades computacionais passou a existir uma maior facilidade de transmissão de dados. A utilização da internet, permitiu efetuar um grande desenvolvimento das técnicas experimentais, que nos dias de hoje são um fator fundamental no apoio ao projeto e verificação de estruturas mais complexas. Começou a existir também uma maior interação com os sistemas de gestão de construção, com a finalidade de apoiar a decisão de implementação de reparações/modificações em prol da deteção de danos[15].

Como demonstração de preocupação e desenvolvimento da sociedade, estudos efetuados recentemente, reportam que mais de 150 edifícios na Califórnia, mais de 100 edifícios no Japão e mais 40 na Tailândia estão equipados com sistemas de monitorização para a avaliação de movimentos fortes devido a excitação sísmica e avaliação dos danos pós-sísmicos.

A sustentabilidade de uma infraestrutura é um problema que a sociedade moderna já não pode ignorar, uma sensibilização geral para sua necessidade e a implementação de programas detalhados de Monitorização estrutural é fundamental para o sucesso da próxima geração de engenheiros.

2.2.2 CRONOLOGIA DA MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

2.2.2.1 Monitorização Estrutural Internacional

Os programas de monitorização têm vindo a ser implementados ao longo do tempo, com o propósito de perceber e eventualmente calibrar os modelos de carga e resposta da estrutura. Inicialmente estes eram principalmente de caráter dinâmico e efetuados especialmente em estruturas de pontes. É de certa forma impossível fazer uma apresentação exaustiva de todas as monitorizações feitas ao longo do tempo, no entanto de seguida irão ser apresentados as principais e mais importantes monitorizações efetuadas em pontes e edifícios, respetivamente.

Os primeiros trabalhos a serem referenciados no âmbito da avaliação experimental das características dinâmicas de estruturas de Engenharia Civil remetem-se a Dean S. Carder em 1936, desenvolvidos em parceria com a *United States Coast and Geodetic Survey*, relativamente a estruturas de depósitos metálicos elevados e estruturas de edifícios. Posteriormente, Dean S. Carder em 1937 apresentou resultados importantes, decorrentes da observação de vibrações induzidas pelas ações ambientais, durante a construção das pontes *San Francisco-Oakland Bay* e *Golden Gate*. Os resultados foram obtidos através da medição do período de vários componentes durante as suas construções, com o objetivo de obter uma melhor perceção do comportamento dinâmico das estruturas[13]. O equipamento utilizado nas medições foi um sismógrafo, que permitia registar as acelerações em filme fotográfico, tendo este estudo como principal objetivo a avaliação da probabilidade de existência de danos devido a fenómenos de ressonância durante a ocorrência de sismos[16].

Após esta primeira abordagem da monitorização estrutural dinâmica, muitas outras pontes e edifícios foram observados por todo o mundo e por vários especialistas, na medida de se poder melhorar cada vez mais a segurança das estruturas e as próprias técnicas de monitorização. Sendo o principal foco dos

especialistas o estudo do comportamento das estruturas quando sujeitas à acção do vento, do tráfego e outro tipo de ações ambientais.

Os estudos mais relevantes relacionados com a ação do vento foram realizados por G. S. Vincent em 1958, em *San Francisco* na ponte *Golden Gate*, através da aplicação de acelerómetros mecânicos. Dentro deste contexto em 1967, Mason e Carder, efetuaram medições das acelerações verticais a meio vão (vão central de 488m) na ponte *Cheasapeake Bay*, situada em *Maryland*, Estados Unidos. Com o recurso a técnicas de análise espectral Mc Lamore em 1971, avaliou frequências, configurações e coeficientes de amortecimento dos modos de vibração naturais das pontes suspensas *Newport Bridge* e *William Preston Lane Memorial Bridge*, situadas em *Rhode Island* e *Maryland* respetivamente, devido às vibrações induzidas pelo vento e tráfego rodoviário. A ponte suspensa *Vicent Thomas Bridge*, em *Los Angeles* foi analisada por Abdel-Ghaffar em 1978[16], que efetuou ensaios de medição de velocidades e deslocamentos sob o efeito do vento e tráfego rodoviário[16].

O colapso da ponte Tacoma Narrows Bridge (Fig. 2.2) em *Wagshington* nos Estados Unidos (1940), levou à inspeção e modificações em outras pontes suspensas, incluindo o reforço da ponte *Golden Gate*. A generalização dos programas de inspeção em pontes deu-se só em 1967, e está diretamente ligada ao colapso da ponte *Point Pleasant*, localizada em *West Virginia* nos Estados Unidos[13].



Fig. 2.2 – Colapso da ponte Tacoma Narrows Bridge [17]

Muitos outros estudos a nível internacional, contribuíram de forma importante para a evolução da monitorização, tal como, Abdel-Ghaffar e Scanlan em 1985 na ponte *Golden Gate*, Brownjohn em 1986 na ponte *Humber*, Sriemer em 1986 na ponte atirantada *Annacis Bridge*, Brownjohn em 1989 fez a análise da primeira ponte do Bósforo na Turquia, Ventura em 1996 realizou ensaios de medição de vibrações ambientais em três passagens superiores na Califórnia, Felber e Cantieni em 1996 efetuaram ensaios e medição de vibrações ambiente na *Ganter Bridge* na Suíça, Ventura em 1996 realizou ensaios dinâmicos na ponte sobre o rio *Colquitz* no Canadá, Harik em 1997 efetuou ensaios na *Brent-Spence Bridge* em Cincinnati, Yamaguchi em 1999 realizou ensaios dinâmicos *in situ* na ponte de Tataru no Japão, de realçar ainda o trabalho de Gates e Smith, que apresentaram um relatório de ensaios de medição de vibrações ambientais em 57 pontes na Califórnia[16].

A monitorização em edifícios, inicialmente focava-se no estudo da instabilidade estrutural provocada principalmente pela ação do vento e por ações do tipo ambiental.

Crawford e Ward em 1964, efetuaram ensaios de vibrações ambientais num edifício de 19 pisos, permitindo fazer a avaliação das suas frequências naturais de vibração a partir da análise dos espectros dos registos de velocidade obtidos. Esses ensaios permitiram também estimar a configuração do

primeiro modo de translação numa das direções. Em 1972 Jennings e Trifunac realizaram ensaios de vibração em edifícios, com a finalidade de identificar as suas características dinâmicas. Jennings efetuou um ensaio de vibração forçada num edifício de 22 pisos e comparou-o com o ensaio de vibração ambiental efetuado por Trifunac, num edifício de 9 pisos. Quando compararam os resultados, foi verificada uma boa concordância entre as frequências e configurações modais avaliadas. Em 1977 ensaios do mesmo gênero, de medição de vibrações ambientais e vibração forçada, foram efetuados por Rainer e Van Selst, na *Lion's Gate Bridge*, uma ponte suspensa em *Vancouver*, no Canadá[16].

2.2.2.2 Monitorização Estrutural em Portugal

No domínio da monitorização estrutural dinâmica de estruturas, é de referir a importância dos estudos efetuados em Portugal, principalmente pelo LNEC. Este conta já com mais de 100 relatórios técnicos, sendo a maioria relacionado com estruturas de pontes, mas também com barragens, edifícios e monumentos históricos.

A primeira monitorização efetuada, para obtenção das características dinâmicas de uma estrutura, foi realizada em 1954 na ponte em arco sobre o rio Sousa, pelo Engenheiro José Marecos. Na área de estruturas de pontes ao longo de 50 anos foram efetuados diversos estudos em mais de 100 estruturas diferentes, de todos esses estudos existem alguns de maior relevância pela forma como foram efetuados. Um bom exemplo desses estudos são os ensaios realizados na ponte suspensa sobre o rio Tejo em Lisboa no ano de 1967 pelo Engenheiro José Marecos, ainda na mesma ponte, no ano de 1970 é de destacar a implementação do sistema de monitorização dinâmica pelo Engenheiro José Marecos e Engenheiro Mário Castanheta. Realça-se ainda os ensaios efetuados nas pontes atirantadas sobre o rio Guadiana e sobre o rio Arade, em 1992 pelo Engenheiro Alfredo Campos Costa e Engenheiro Corrêa[16].

Ainda dentro do contexto da monitorização estrutural, mas em edifícios, os primeiros ensaios efetuados foram desenvolvidos pelo Professor M.J. Nigel Priestley em 1969, 7 edifícios de Lisboa foram selecionados para a realização dos ensaios. Nestes estudos, foi estimada a configuração dos primeiros modos de translação em duas direções ortogonais, para além da avaliação das frequências naturais de vibração. Dentro da metodologia efetuada nestes estudos, em 1970 foram estimados os mesmos parâmetros para o corpo do atual edifício do Palácio da Justiça em Lisboa[16].

É de destacar o trabalho também realizado nas instituições de ensino em Portugal, como na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Onde estudos de caracterização dinâmica foram efetuados, como o exemplo da ponte Vasco da Gama em 1998, com base em ensaios de medição de vibrações ambiente, pelo Professor Álvaro Cunha. Estudos do mesmo gênero foram efetuados na ponte de D.Luiz I no Porto, em 1999 pelos Professores Álvaro Cunha e Rui Calçada, e ainda na nova ponte Hintze Ribeiro em Castelo de Paiva pelos Professores Álvaro Cunha e Elsa Caetano, no ano de 2003[16]. Muitos outros estudos no domínio da análise dinâmica foram efetuados na mesma instituição, evidenciando-se algumas teses de mestrado, como a de Nuno Neves[18] (2004) em edifícios, Pedro Almeida[19] (2008) numa ponte em arco, Daniel Silva[20] (2009) em estruturas de pontes, Nuno Martins[21] (2009) numa ponte suspensa, Paulo Mendes[22] (2010) em estruturas de barragens, Cristiana Bonifácio[23] (2012) numa ponte ferroviária, Miguel Tavares[24] (2013) numa ponte em arco, entre muitos outros estudos já realizados.

2.3 MONITORIZAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

O termo Monitorização da Integridade Estrutural (*Structural Health Monitoring, SHM*) é normalmente usado para se referir ao processo de implementação de um plano/processo de deteção de danos

(descrição da variedade de sistemas utilizados em infraestruturas), em aeronaves e infraestruturas a nível civil ou mecânico. Tem como objetivo auxiliar os operadores a perceber as alterações que se vão manifestando na infraestrutura devido a ações internas ou externas, e identificar de forma adequada quais os mecanismos correspondentes de carga e resposta da infraestrutura. Este processo envolve a observação da estrutura ou do sistema mecânico ao longo do tempo, utilizando, medições de resposta dinâmica espaçadas periodicamente, extração de características referentes aos danos a partir das medições efetuadas, e a análise estatística dessas características para a determinação do estado corrente da estrutura ou sistema em análise. Ou seja, através de planos de monitorização com um bom planeamento é possível ter uma perceção do comportamento das estruturas bem como a sua evolução no tempo, nomeadamente sobre a evolução dos danos, podendo em último caso funcionar como sistema de alerta. A longo prazo a informação que é fornecida pelo sistema de monitorização vai sendo atualizada, à medida que a estrutura se vai degradando e envelhecendo, devido às ações ambientais.

A organização de um sistema de SHM[4] é representada na Fig. 2.3, através desta é possível acompanhar todos os temas abordados neste subcapítulo, e a sua integração e importância num sistema SHM.

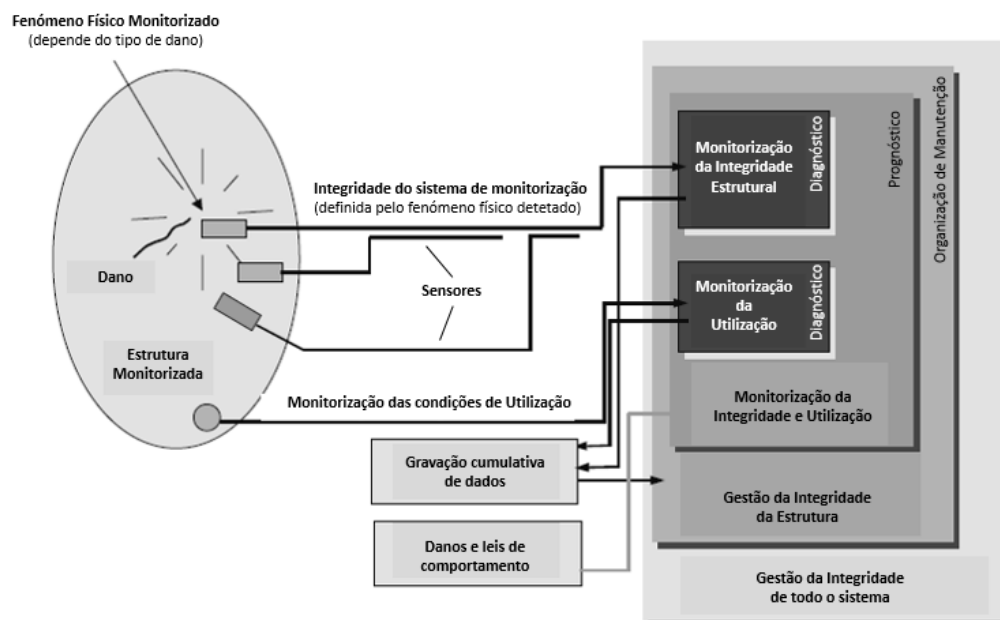


Fig. 2.3 – Princípio e organização de um sistema de SHM, adaptado de [4]

O primeiro nível do sistema, que corresponde à função de monitorização da integridade estrutural, é definido pelo tipo de fenómeno físico que é detetado pelos sensores (relacionado diretamente como dano) e pelo tipo de fenómeno físico que é associado pelo sensor para a produção do sinal do diagnóstico. Com a junção da informação do sub-sistema da monitorização de integridade com o sistema de monitorização de utilização e com conhecimentos baseados em danos mecânicos e leis de comportamento é possível determinar o prognóstico (integridade residual) e a gestão da integridade da estrutura (organização da manutenção, operações de reparação, etc).

2.3.1 CONSTITUIÇÃO DA SHM

A monitorização da integridade estrutural (SHM) é uma área interdisciplinar de pesquisa que integra ciências básicas como, ciência dos materiais, mecânica, eletrónica e ciência de computorização, e que está fortemente relacionada com as estruturas e o seu ciclo de vida[25], como ilustra o esquema da Fig. 2.4.

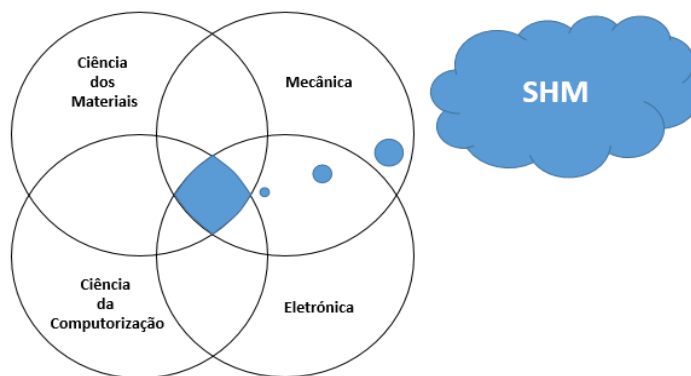


Fig. 2.4 - Origem Interdisciplinar da SHM

A constituição (origem) interdisciplinar da SHM requer uma abordagem dedicada durante o projeto, fabricação e operação das estruturas[25]. O projeto dos sistemas de SHM depende essencialmente do tipo de danos que podem ocorrer na estrutura, tipo de materiais aplicados no projeto e os fenómenos físicos implementados para a deteção de danos.

Um dos fatores que torna difícil a aquisição dos dados numa estrutura danificada é a acessibilidade aos seus componentes durante a fase de operação. Isto requer um estudo do comportamento local da estrutura, para uma melhor compreensão do comportamento da estrutura danificada. Devido aos custos elevados da implementação de um projeto cuidadoso, é recomendado um processo de otimização, que tenha em conta a minimização da influência do sistema no desempenho da estrutura, a minimização de custos de hardware e a maximização da deteção e avaliação de danos.

A tecnologia de SHM ajuda a atingir uma melhor segurança operacional e tem um impacto económico na diminuição dos custos de manutenção e funcionamento, pois permite a previsão de um possível dano muito antes da sua ocorrência, e que consequentemente dá aos operadores o tempo suficiente para que se possa planejar um serviço de manutenção.

2.3.2 DANO ESTRUTURAL E DETEÇÃO DE DANOS

A deteção de danos é um problema que tem estado sob desenvolvimento, por parte de vários grupos de investigação, com recurso a uma variedade de técnicas analíticas e experimentais. As técnicas de deteção de danos podem ser classificadas como locais ou globais[25]. Os métodos globais tem como finalidade a avaliação de toda a estrutura, enquanto os métodos locais se focam em ferramentas de avaliação não destrutiva em componentes específicos da estrutura.

Existem diferentes definições para o termo “dano” estrutural (*structural damage*), que na área da SHM pode ser entendido intuitivamente como uma imperfeição. As estruturas podem ser modeladas como sistemas com excitações de entrada (*input*) e sinais de resposta (*output*). Neste contexto o dano pode ser

considerado como uma excitação adicional, conduzindo a alterações dos sinais de resposta. Como consequência, a deteção de danos é um problema inverso, em que as respostas medidas são usadas para a deteção dos danos[25]. O dano pode ser considerado também como uma modificação das propriedades do material ou dos parâmetros físicos estruturais (sedimentação, plastificação do material, fadiga, corrosão, etc).

A deteção de danos forma o objetivo primário do problema global de identificação de danos. Os sistemas de SHM podem ser classificados como um processo que consiste em 5 tarefas importantes, esquematizadas na Fig. 2.5.

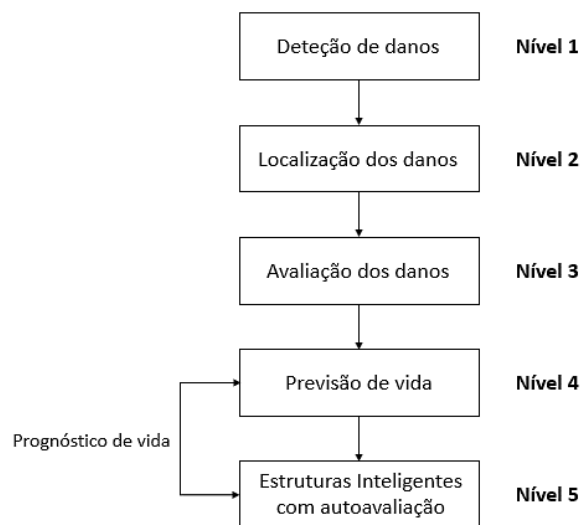


Fig. 2.5 - Níveis do procedimento da SHM, adaptado de [25]

A deteção de danos (nível 1) dá uma indicação qualitativa do dano que pode estar presente na estrutura, a localização (nível 2) dá informações sobre a posição provável dos danos, a avaliação (nível 3) dá uma estimativa da sua gravidade fornecendo informações sobre o tipo e tamanho do dano, finalmente o prognóstico (nível 4 e 5) estima a vida estrutural residual e prevê possíveis avarias ou falhas. Os primeiros três níveis (deteção, localização e avaliação) são normalmente associados ao sistema de identificação, o nível do prognóstico cai no campo da análise de confiabilidade e análise estatística. A Fig. 2.5, apresenta um resumo da Fig. 2.3.

2.3.3 SHM COMO EVOLUÇÃO DA AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA

A deteção de danos, a avaliação não destrutiva e a monitorização da integridade estrutural são muitas vezes termos confundidos como sinónimos entre si, e podem até ter o mesmo significado em algumas áreas[25]. Dano, integridade e monitorização de estruturas podem ser descritos usando várias definições. Na generalidade, integridade é a capacidade de manter o funcionamento correto durante todo o tempo de vida da estrutura e a monitorização é o processo de diagnóstico e prognóstico de danos num material ou estrutura.

A monitorização da integridade estrutural, deteção de danos e avaliação não destrutiva são também muitas vezes usados para descrever o processo de avaliação não destrutiva da condição estrutural[3; 25]. No entanto, apenas a monitorização da integridade estrutural define o processo de implementação de

uma estratégia que inclui cinco elementos de identificação importantes (ou níveis). O que distingue a monitorização da integridade estrutural da avaliação não destrutiva é a implementação online (dentro da estrutura - integrados) e global de várias tecnologias de deteção de danos que requerem medições (ou observações) espaçadas periodicamente. Este processo de implementação online requer um processamento de sinal mais avançado para uma deteção de danos mais confiável, do que as técnicas clássicas de avaliação não destrutiva.

A avaliação não destrutiva é normalmente realizada offline (fora da estrutura - desintegrados) e localmente, ou periodicamente para melhorar o desempenho da estrutura. As técnicas de avaliação não destrutiva são usadas principalmente para caracterizar danos e avaliar a sua gravidade, se a sua localização for conhecida.

2.3.4 PLANOS DE MONITORIZAÇÃO

A definição do plano de monitorização é o primeiro passo para a realização de qualquer campanha de monitorização. Consiste na definição e escolha do equipamento e da estratégia da monitorização tendo em conta os seus objetivos e as condições existentes no local a monitorizar. Estas campanhas podem envolver a utilização de sensores mais ou menos complexos: mecânicos, elétricos, com ou sem fios. Podem envolver a medição de deslocamentos (absolutos ou relativos), velocidades ou acelerações, inclinações, aberturas de fissuras ou juntas, entre muitas outras quantidades, tendo como objetivo a análise do comportamento local e/ou global das estruturas, nomeadamente o controlo da evolução de anomalias ou danos. Em função do tipo de estrutura poderá optar-se por equipamentos com registo contínuo de dados e/ou controlo remoto, reduzindo assim custos de deslocações e permitindo um acompanhamento mais próximo da estrutura.

Ainda dentro dos planos de monitorização também deve ser especificado qual o tipo de inspeção que deverá ser efetuado na estrutura em análise. Existem dois tipos de inspeção de uma estrutura, a inspeção periódica/rotina e a inspeção detalhada.

A inspeção periódica/rotina tem como definição, a inspeção visual da estrutura (todas as partes visíveis da mesma). Tem como objetivo principal, a avaliação e o controlo do estado da estrutura, através de parâmetros de classificação do estado de conservação de estruturas[6]. Este tipo de inspeção tem como ações características a deteção e caracterização de anomalias em peças de betão, tais como delaminação, fissuração, existência de corrosão nas armaduras, etc. Como exemplo de inspeções periódicas, atualmente nos Estados Unidos as pontes tem uma inspeções de 2 em 2 anos[13], normalmente usando técnicas de inspeção visual, com a ajuda de alguns métodos de inspeção não destrutivos, como métodos acústicos e ultrassónicos. A probabilidade de alguns dos danos não serem detetados entre as inspeções periódicas é muito grande.

A inspeção detalhada surge com a finalidade de identificar e caracterizar, mais aprofundadamente, os problemas detetados pela inspeção periódica/rotina. O objetivo principal desta inspeção é quantificação dos efeitos dos danos na estrutura. Esta inspeção quantifica os efeitos dos danos através da realização de campanhas de ensaios não destrutivos e ligeiramente destrutivos. Ainda dentro do contexto dos ensaios experimentais, podem ser ainda realizados ensaios de carga, para uma melhor avaliação do desempenho e estado da estrutura em análise[6].

Apesar das inspeções mencionadas serem uma boa ferramenta da avaliação do estado da estrutura, a sua periodicidade induz algumas limitações, como a ausência de controlo na evolução de uma anomalia e no aparecimento de situações novas, e o desconhecimento real do desempenho da estrutura.

Como solução às limitações apresentadas pelas inspeções técnicas, pode adotar-se um sistema de monitorização contínua. Este permite deteção do dano e a quantificação e avaliação das possíveis alterações produzidas por este no desempenho e capacidade resistente da estrutura[6]. Com isto é possível obter os padrões das patologias ao longo do tempo.

As monitorizações estruturais podem assim ser, contínuas ou periódicas, podendo ainda cada uma delas ser caracterizada como dinâmica ou estática.

A monitorização dinâmica é efetuada através do estudo das ondas de vibração que percorrem a estrutura, com recurso a acelerómetros e sistemas de aquisição de dados, permitindo assim caracterizar a resposta dinâmica da estrutura. A monitorização estática é efetuada com sensores específicos para cada caso e previamente selecionados, que controlam e quantificam variações lentas das grandezas, que são definidas como importantes para a análise e conhecimento do comportamento da estrutura[6].

Indiscutivelmente, durante o ultimo século tem sido usadas varias formas e técnicas de Monitorização Estrutural em infraestruturas, mas apenas na última ou nas últimas duas décadas é que os sistemas de computadorização tem tido um maior desenvolvimento nesta área, com o objetivo de prestar um maior auxílio na análise das infraestruturas, fornecendo informações ‘diretas’ em tempo real, tornando-se assim, uma operação contínua, segura e económica. Neste contexto, nas últimas três décadas, muitas tem sido as tentativas de detetar todos os danos estruturais a partir dos dados de vibração recolhidos, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Os métodos de análise baseados na vibração tem alcançado algum sucesso nas áreas da Engenharia Mecânica e Aeroespacial, já a sua aplicação á Engenharia Civil de grande escala, tem tido algumas limitações devido às singularidades das estruturas e aos fatores ambientais, que podem tornar o processo ainda mais complexo[13].

2.3.5 TIPOS DE SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO

Existem ainda vários sistemas de monitorização que são muito próximos da SHM e que tem como objetivo principal a monitorização de estruturas[25], são eles:

- Monitorização da Condição (*Condition Monitoring*, CM);
- Avaliação Não Destrutiva (*Non Destructive Evaluation*, NDE);
- Controlo do Processo Estatístico (*Statistical Process Control*, SPC);
- Sistema de Monitorização de Utilização (*Health and Usage Monitoring System*, HUMS);
- Prognóstico de danos (*Damage Prognosis*, DP).

Os sistemas de CM dependem das medições das respostas estruturais durante a sua operação, não utilizando excitadores para a ajuda na deteção de danos[25]. As diferenças dos sistemas CM, NDE e SHM em termos de integração de hardware com a estrutura, estão ilustradas na Fig. 2.6.

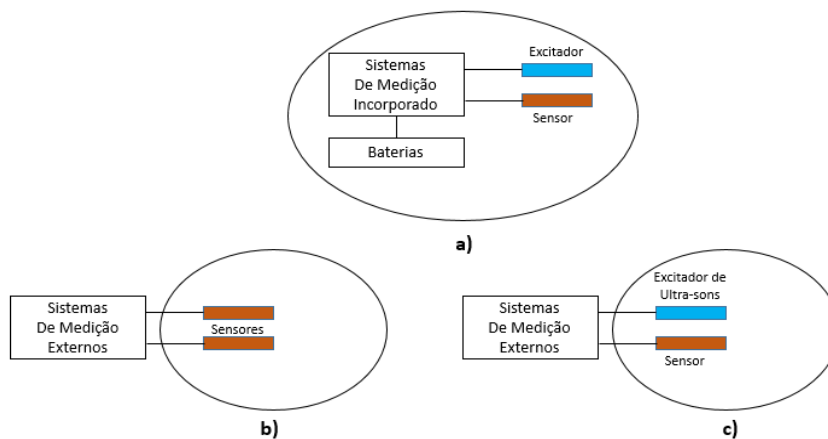


Fig. 2.6 – Esquematisação de um sistema típico a) SHM, b) CM, c) NDE

Os métodos de deteção de danos correntes são, a inspeção visual ou métodos experimentais de localização, tais como emissão acústica e métodos de ultra-sons[26]. Todas estas técnicas experimentais exigem que seja conhecida a zona envolvente (vizinhança) do dano, bem como a acessibilidade à zona da estrutura onde se encontra o dano. É necessário também ter em conta que estes métodos podem não ser aplicáveis para a inspeção de danos que não se desenvolvem perto da superfície da estrutura. Para tal, são utilizados métodos experimentais locais de NDE.

A principal diferença entre os sistemas NDE e SHM está relacionada com a arquitetura do hardware. No caso do sistema de SHM, os sensores e os excitadores são integrados na estrutura, enquanto NDE é um sistema externo com um conjunto de sensores e excitadores independentes (não integrados na estrutura)[25]. Os componentes principais do SHM estão ilustrados esquematicamente na Fig. 2.7.

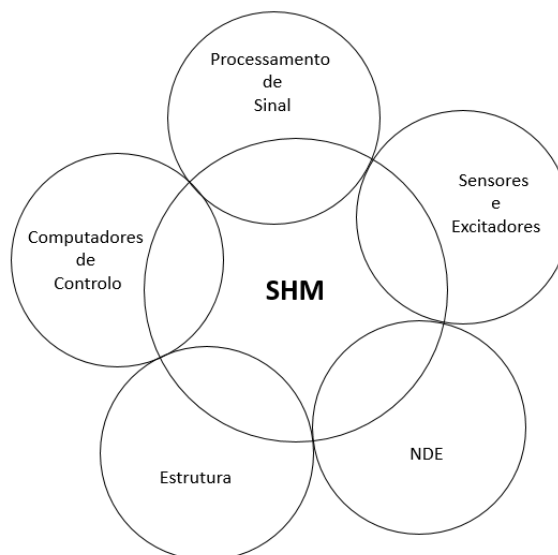


Fig. 2.7 – Componentes principais do sistema SHM, adaptado de [25]

A diferente implementação dos sistemas NDE e SHM, faz com que as tarefas de SHM sejam muito mais complexas do que as aplicações autónomas da NDE.

No Quadro 2.1, é apresentada uma lista de aplicações de alguns métodos NDE em estruturas de betão existentes. Neste quadro, pode reconhecer-se que cada método tem as suas vantagens e desvantagens, sendo esta a razão pela qual os Engenheiros ou inspetores combinam dois ou mais métodos para a avaliação estrutural.

Quadro 2.1 – Aplicação de NDE para estruturas de betão, adaptado de [26]

Categoria	Tipo de Dano	Método de detecção
Resistência e Rigidez	Distribuído	Fotografia digital, Termografia
	Fendas de grande largura	Fotografia digital, Termografia
Fendas	Fendas de grande profundidade	Ultra Sónico
	Fendilhação geral	Emissão acústica

O SPC tem objetivos semelhantes à SHM, tendo como objetivo final, para além da deteção de danos, o processo de diagnóstico. Este utiliza uma variedade de sensores para a monitorização das alterações nos parâmetros do processo. Os parâmetros do processo podem alterar devido a uma falha estrutural.

O DP é utilizado para prever o tempo de vida restante das estruturas. Os sistemas de DP usam conhecimento sobre tamanho e localização de danos bem como cargas operacionais esperadas. A previsão de vida restante é baseada num modelo de previsão, que adquire informação a partir do sistema de monitorização de utilização HUMS (sistema que faz a monitorização de um ciclo de carregamento durante o funcionamento da estrutura)[25]. Hoje em dia os sistemas de DP dão apenas uma estimativa muito grosseira do prognóstico de tempo de vida útil, devido à complexidade física da destrutividade dos materiais, se o dano for considerado ao nível material. A interação entre diferentes tipos de sistemas de monitorização em DP é esquematizado na Fig. 2.8.

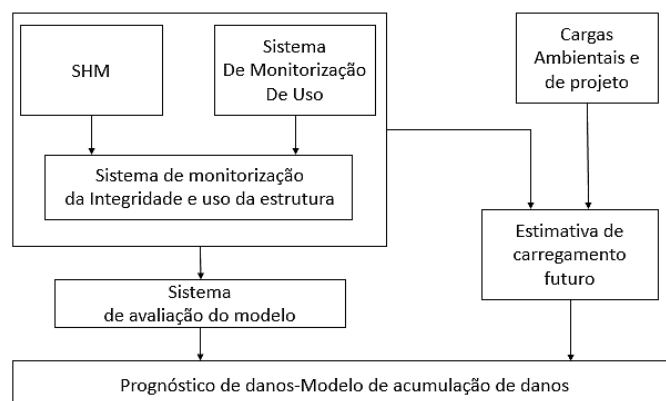


Fig. 2.8 – Diagrama esquemático de um procedimento típico do DP

2.4 OBJETIVOS DA MONITORIZAÇÃO

Atualmente muitas das infraestruturas em serviço, apresentam imperfeições devido a vários fatores. A origem de tais imperfeições deve-se principalmente ao fato da não adequação da estrutura ao projeto ou até mesmo devido aos incumprimentos durante a fase de construção. Outro fator que importa ter em conta na origem das imperfeições, é a degradação das estruturas devido a ações ambientais e/ou fadiga ao longo dos anos de serviço.

Como um exemplo estatístico pode-se recorrer aos dados recolhidos pela *American Society of Civil Engineers*, que estima que entre um terço a metade das infraestruturas civis nos Estados Unidos, são estruturalmente deficientes, sendo necessário um grande investimento a curto prazo para as suas reparações[13].

Devido ao crescimento económico mundial, um grande número de infraestruturas civis de grande escala como pontes ou edifícios, tem sido construídas durante os últimos vinte anos. No entanto, enormes custos serão necessários para a manutenção destas estruturas e para a sua proteção contra possíveis danos. É portanto fundamental que sejam efetuados estudos com intuito de identificar métodos de monitorização eficazes para que se possa efetuar uma correta avaliação e manutenção das infraestruturas.

Ross & Matthews e Mita, após vários estudos, identificaram os casos em que é estritamente necessário o uso monitorização estrutural[8], sendo estes:

- Alterações a nível estrutural das estruturas existentes;
- Afetação de obras externas na estrutura;
- Demolições parciais;
- Estruturas sujeitas a deslocamentos a longo prazo ou a degradação de materiais;
- Avaliação de fadiga;
- Implementação de novos sistemas de construção;
- Avaliação da integridade estrutural pós-sismo.

A monitorização estrutural pode desempenhar um papel na prevenção e mitigação no decurso dos danos estruturais, daí que uma falha estrutural prematura possa ter grandes consequências na segurança pública e económica. Como ferramenta para prevenção prematura dessas falhas a monitorização tradicional recorria ao método da inspeção visual, possivelmente com o auxílio de instrumentos simples, como fios-de-prumo e níveis[5].

A um nível mais simples, o processo de observação visual e avaliação de condição estrutural (fendilhação, escamação e deformação) pode ser visto como um sistema de monitorização estrutural, mas que atualmente não é o suficiente para garantir a informação necessária sobre a estabilidade da estrutura. Hoje em dia o objetivo das pesquisas é o de desenvolver eficazmente meios de aquisição, gerenciamento, integração e interpretação dos dados de comportamento estrutural para um máximo de obtenção de informação útil a um custo mínimo[8], fatores estes que são muito importantes para os fabricantes, os utilizadores finais e as equipas de manutenção.

A monitorização estrutural tradicional para além do recurso a observações visuais, também combina com estas os pressupostos heurísticos através de modelos matemáticos do comportamento estrutural previsto. Já a monitorização moderna inclui sensores e técnicas de raciocínio mais automatizadas. A Fig. 2.9 mostra uma representação hierárquica simplificada de um processo de raciocínio da monitorização atual. A implementação efetiva das ações de monitorização de alto nível na Fig. 2.9, requer uma execução de etapas com sucesso, desde a instalação e operação do sensor até ao

processamento de dados, integração de dados e integração com as necessidades dos proprietários e sociedade em geral[5].

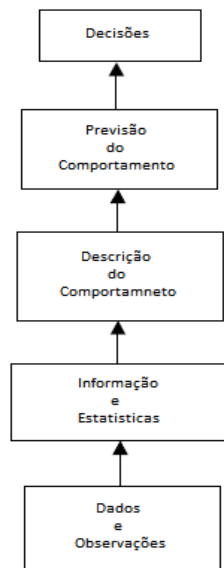


Fig. 2.9 – Objetivos gerais no processo da monitorização estrutural [5]

A monitorização estrutural pode ser definida e classificada em cinco níveis diferentes, uma melhor percepção pode ser obtida através da relação entre as Fig. 2.5 e Fig. 2.9 e Fig. 2.10. Os níveis geralmente são apresentados por uma ordem sequencial de acontecimento[5]:

1. Detecção – Determina se o dano está presente na estrutura;
2. Localização – Localiza o dano na estrutura;
3. Avaliação – Estima a dimensão do dano;
4. Prognóstico – Estima o progresso do dano e a restante vida útil da estrutura;
5. Reparação – Determinar, implementar e avaliar as medidas e reparações a aplicar.



Fig. 2.10 - Ilustração dos 5 níveis do processo de monitorização estrutural

Os sistemas de monitorização estrutural apresentam assim como principais objetivos, a monitorização das condições de carga a que as estruturas estão sujeitas, a verificação do seu comportamento quando sujeita a vários tipos de carga, a verificação ou atualização das regras usadas em fase de projeto, a deteção dos danos e deterioração da estrutura e a orientação da inspeção e manutenção[13]. Todos estes aspetos são tidos em conta da seguinte forma[13]:

- O projeto estrutural de pontes e arranha-céus geralmente adota algumas hipóteses e parâmetros, cuja geometria está além dos padrões de projeto. Essas premissas necessitam de ser verificadas no local da monitorização estrutural. Os resultados da monitorização podem também, fornecer evidências mais precisas para a projeção de novas estruturas no futuro e atualizar as especificações de projeto mais antigas;
- As infraestruturas estão normalmente sujeitas a desastres naturais ou provocados pelo homem, tais como, furacões, sismos de grande intensidade, inundações, incêndios, e colisões. A falha de uma destas infraestruturas civis, pode ser catastrófica, não só em termos de perdas de vida e económica, mas também impactos sociais e psicológicos posteriores. Através do sistema de monitorização estrutural online, as respostas estruturais são monitorizadas continuamente, e possíveis anomalias podem ser assim detetadas numa fase inicial, prevenindo assim um potencial colapso da estrutura e perdas de vidas;
- A monitorização estrutural tradicional era baseada principalmente na experiência. O sistema de monitorização estrutural, consegue fornecer a condição realista e mais recente da estrutura, de modo a que a autoridade de manutenção possa fazer uma inspeção eficaz e eficiente, e consiga aplicar medidas de manutenção, para que o benefício dos clientes seja maximizado no tempo de vida útil.

Outro dos grandes objetivos da monitorização estrutural é permitir que seja efetuado um uso ótimo da estrutura, ou seja com tempos de inatividade (paragens devido a reparações) minimizados, permitindo ao construtor ter um aperfeiçoamento no processo construtivo, e apresentando assim um grande impacto na mudança da organização de trabalho dos serviços de manutenção:

- Com o objetivo de substituir a inspeção periódica, com base no desempenho da manutenção a longo prazo ou pelo menos reduzindo o presente trabalho de manutenção, evitando em particular desmontagens de partes da estrutura, onde não existe nenhum defeito oculto;
- Minimizando drasticamente o envolvimento humano, e conseqüentemente, reduzindo o numero de horas de trabalho e o tempo de inatividade da estrutura, melhorando assim a confiabilidade e segurança[4].

Finalmente e talvez o objetivo que mais interessa à sociedade, é a motivação económica (custo-benefício), que demonstra ser mais relevante nos usuários finais. Isto porque o uso de sistemas modernos de monitorização, inevitavelmente envolve despesas adicionais, que precisam ser justificadas em termos de aumento de benefícios para os proprietários e operadores das estruturas. Quando a principal preocupação é manter a integridade de uma estrutura, então é relativamente simples neste caso, justificar o esforço financeiro[5]. Com efeito, para as estruturas com sistema de monitorização estrutural, os benefícios esperados são custos de manutenção constantes que assegurem o máximo de estabilidade da estrutura, em vez de custos elevados de manutenção e diminuição de segurança, como acontece nas estruturas mais clássicas sem sistemas de monitorização, na figura Fig. 2.11 é ilustrada a curva qualidade-custo da monitorização numa estrutura, ao longo da sua vida[4].

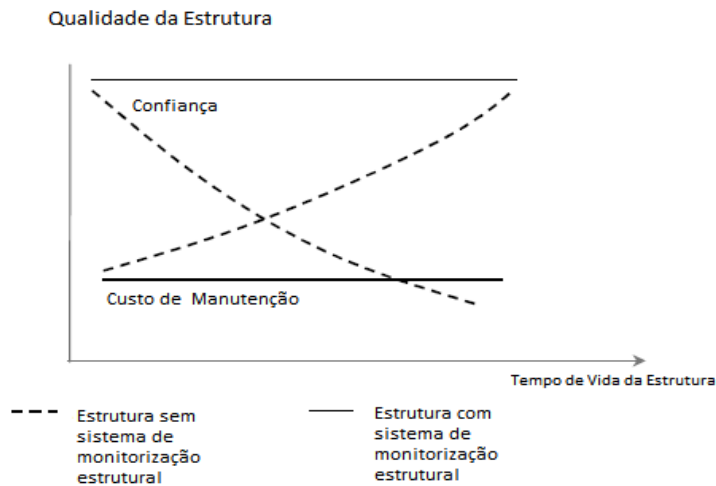


Fig. 2.11 – Benefícios da Monitorização Estrutural para os utilizadores finais [4]

Na Fig. 2.12 é representada a potencial utilidade da monitorização estrutural. O eixo vertical corresponde ao índice de integridade do sistema estrutural, e que para valores elevados desse índice, significa um aumento de integridade estrutural, quando o valor é zero significa que o sistema não está a funcionar como o desejado. As curvas A,B,C representam possíveis percursos de vida de um sistema estrutural. O sistema associado á curva A, experimenta um tempo de vida mais curto do que o esperado, Este fato pode ser devido ao excesso de ações elevadas ou de má construção. A curva B, corresponde a um sistema médio. A curva C, representa um percurso, em que o sistema apresenta um tempo de vida mais longo do que a média, tal percurso pode surgir devido ao fato de estar sujeitos a cargas mais leves, ou a uma elevada qualidade na construção[5].

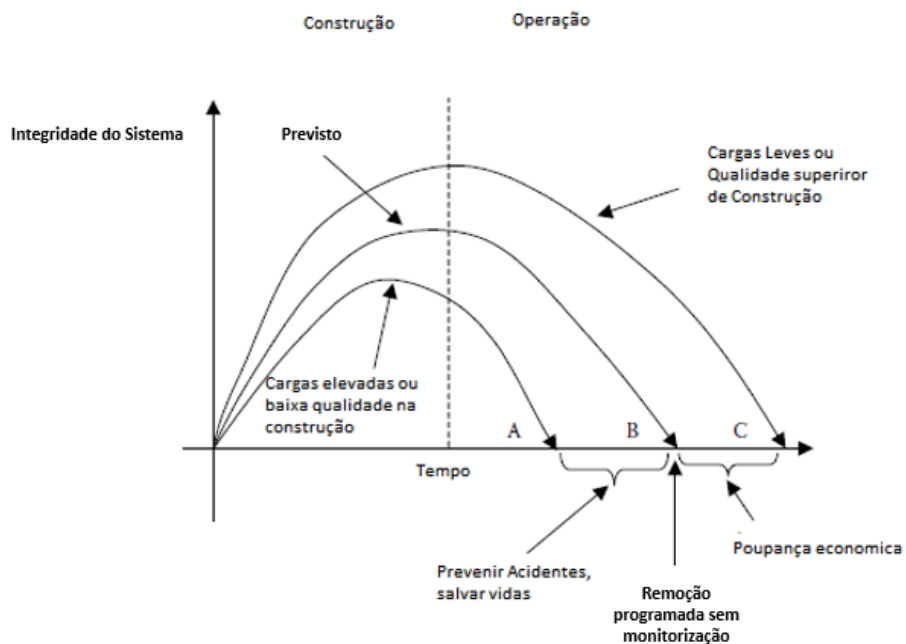


Fig. 2.12 – Potencial utilidade do sistema de monitorização versus operação sem monitorização [5]

A utilização de um sistema de monitorização, pode aumentar a certeza quanto á trajetória de vida que o sistema está a seguir. Isto permite uma tomada de decisão em particular para cada caso (Fig. 2.12), no sentido de evitar acidentes[5].

2.5 PROBLEMAS ASSOCIADOS AOS SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO

Os objetivos da monitorização estrutural acima referidos tem sido bem aceites pela comunidade, mas existem ainda pontos de vista, que devem ser esclarecidos. Em primeiro lugar, embora as análises numéricas e experimentais de laboratório tenham algumas limitações, a monitorização estrutural não reduz ou minimiza a importância destas. Além disso, o número de sensores de um sistema de monitorização é sempre limitado, devido ao orçamento disponível e a outras limitações como o acesso a locais onde não é possível chegar para a colocação dos sensores. Pelo contrário, a análise numérica oferece informação mais detalhada dos parâmetros monitorizados[13].

A melhoria da segurança é uma forte motivação, principalmente depois de alguns acidentes de grande dimensão terem ocorrido, devido à falta de manutenção como por exemplo no campo da aeronáutica, no acidente *Aloha Airlines* (Fig. 2.13), ou no campo da Engenharia Civil, com o colapso da ponte *Mianus River*, e com o colapso da ponte *Injak* (Fig. 2.14), devido a um mau controlo/acompanhamento ou até mesmo a falta dele no processo de construtivo[4].



Fig. 2.13 - Acidente de aviação, voo 243 Aloha Airlines, 1988, falta de controlo da corrosão pela equipa de manutenção [4]



Fig. 2.14 – Colapso da ponte *Injaka*, 1988, falta de controlo no processo construtivo [4]

Tanto na Engenharia Aeronáutica como na Engenharia Civil, os problemas de degradação das estruturas foram descobertos e consequentemente programas foram estabelecidos para a sua resolução. Para se perceber a importância dos problemas em causa, pode-se recorrer às estatísticas de inspeção de pontes, que tem sido efetuadas desde os anos 80, nos Estados Unidos. E em 576000 pontes rodoviárias existentes, 236000 foram classificadas como deficientes pelos parâmetros atuais de classificação.

Através das estatísticas apresentadas de um dos países (Estados Unidos) com mais construções de pontes pode-se constatar que o uso de um sistema de monitorização é uma necessidade de garantia da estabilidade estrutural. Mas ainda que seja utilizado um sistema de monitorização, se este não possuir um meio claro de reabilitação ou reparação estrutural, pode aumentar a responsabilidade dos proprietários e engenheiros, sem prever qualquer aumento de proteção[5]. Uma complicação adicional é fato da maioria das estruturas serem bem projetadas, sendo muito improvável o aparecimento de algum tipo de falha. Sem uma falha iminente, a colocação dos instrumentos de medida do sistema de monitorização numa estrutura, pode não conduzir a benefícios económicos. Claramente, o valor da monitorização estrutural não reside apenas na imposição de medidas, mas também no fornecimento de informações úteis. Ainda assim em alguns casos pode ser vantajoso continuar com patamares mínimos de manutenção e monitorização.

Como referido anteriormente o acompanhamento das estruturas com um sistema de monitorização estrutural pode ser muito benéfico, mas em alguns casos pode também não o ser. De seguida serão apresentadas quatro regras, para avaliação da implementação das técnicas de monitorização[5].

- **O problema estrutural deve ser importante:** Se o problema é importante, a monitorização é viável. É um desperdício fazer a monitorização de problemas sem importância. Há que saber fazer uma boa distinção, entre quais são as instabilidades problemáticas e as que não são.
- **O problema estrutural deve ser resolvido ou evitado** (se for detetado numa fase inicial de desenvolvimento): Algumas falhas podem acontecer tão rapidamente, ou inevitavelmente, que a monitorização não oferece muito suporte para a reparação.
- **As medições estruturais e o processamento de dados deve ser de fácil execução:** As medições devem ser relativamente fáceis de efetuar e interpretar. O desenvolvimento contínuo de sensores de monitorização, das tecnologias de análise e a internet, tem tornado cada vez mais facilitada esta tarefa.
- **As medições devem-se correlacionar bem com o problema subjacente, com um mínimo de confusão possível:** Por exemplo, mudanças de temperatura, podem produzir grandes variações nas propriedades de vibração das estruturas, devido a processos mecânicos que tem muito pouco a ver com a integridade estrutural.

Num curto prazo, a evolução dos sistemas de monitorização em infraestruturas civis, pode não ser a esperada para que se possa ter uma capacidade inerente para a localização e quantificação de danos[8]. É uma realidade que muitos dos problemas da deteção de danos em estruturas civis de grande escala ainda não tenham sido resolvidos. E por várias razões (por exemplo, margens de segurança e redundâncias), das estruturas construídas recentemente, muito poucas tem tido danos consideráveis. De certeza, a deteção de danos é o objetivo mais importante na monitorização estrutural, mas não o único. Mais atenção deve ser dada a outros objetivos da monitorização estrutural[13].

2.6 CONSTITUIÇÃO DOS SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO

Os sistemas de monitorização tem como objetivos, os apresentados no capítulo anterior e geralmente tem como constituintes principais[13]:

- Sistema sensorial (*Sensory System*, SS);
- Sistema de aquisição e transmissão de dados (*Data Acquisition and Transmission System*, DATS);
- Sistema de processamento e controlo de dados (*Data Processing and Control System*, DPCS);
- Sistema de organização de dados (*Data Management System*, DMS);
- Sistema de avaliação estrutural (*Structural Evaluation System*, SES).

Em estruturas de maior porte como as pontes, existem ainda um sistema de aquisição de dados portátil (*Portable Data Acquisition System*, PDAS) e um sistema de manutenção e inspeção portátil (*Portable Inspection and Maintenance System*, PIMS)[13], na Fig. 2.15 é representado esquematicamente todos os sistemas referidos. Os primeiros dois sistemas, estão embebidos na estrutura, os três restantes, estão normalmente localizados no centro de controlo dos serviços administrativos da estrutura.

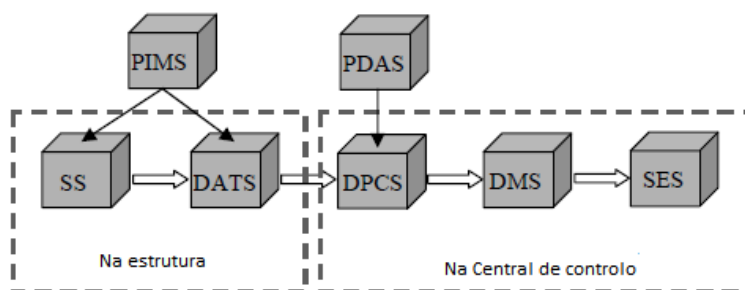


Fig. 2.15 – Esquema de um sistema de monitorização estrutural [13]

O esquema apresentado na Fig. 2.15, da monitorização estrutural, é idealizado para estruturas de pontes, mas a ideologia é a mesma para outro tipo de estrutura.

O sistema sensorial é composto por vários sensores, que estão distribuídos ao longo da estrutura com o intuito de extrair diferentes sinais, em diferentes pontos de interesse. O sistema de aquisição e transmissão de dados, é responsável por receber os sinais dos sensores e transmiti-los para o servidor de dados central. O sistema de controlo e processamento de dados, é necessário para controlar a aquisição, transmissão, processamento, armazenamento e exibição de dados. O sistema de organização de dados, serve para organizar de forma temporal e espacial os dados recebidos pelo banco central de dados. Já o sistema de avaliação estrutural pode ter diferentes aplicações, dependendo dos objetivos de monitorização, tanto pode integrar um sistema de avaliação estrutural online como um sistema de avaliação offline (como mencionado no subcapítulo 2.3.3).

Como se pode observar na Fig. 2.15, cada sistema é isolado, o que implica que se alguns dos sistemas falhar, não vai haver detrimento nos restantes sistemas, podendo o sistema de monitorização continuar a operar. Este é um conceito que se deve ter em conta durante a fase de projeto do sistema de monitorização. Por exemplo, se o servidor da central de controlo falhar, não haverá problemas com o sistema de aquisição de dados da estrutura.

A projeção de um sistema de monitorização estrutural, requer que o projetista perceba alguns conceitos básicos, como o que vai ser monitorizado, objetivo da monitorização, características da estrutura, condições ambientais e algumas considerações económicas. Os projetistas do sistema de monitorização

devem trabalhar em conjunto com os projetistas da ponte, para de uma melhor maneira saberem quais as principais preocupações e cuidados a ter. O último passo da projeção é a decisão do número de sensores a colocar na estrutura, que deve ser determinado de acordo com o tamanho, a complexidade da estrutura e os objetivos de monitorização, apenas depois de todos os parâmetros serem identificados.

2.6.1 SISTEMAS DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS (DATS)

O sistema de aquisição de dados é um dispositivo intermediário entre os sensores e os computadores, que recebe e acumula os sinais gerados pelos sensores, converte-os, e transmite-os para os computadores, para posterior análise e processamento. Os sensores podem gerar sinais analógicos ou digitais, que representam os parâmetros físicos a serem monitorizados. A seleção do sistema deve basear-se no tipo, quantidade e condicionamento de sinal necessário para cada um dos sensores aplicados nas estruturas.[13]

O tamanho da rede, atualmente poderá influenciar o tipo de comunicação que devera ser feita entre os sensores e os sistemas de aquisição de dados. Existem dois tipos de comunicação atualmente, através de cabos, ou no caso de grandes estruturas e para sistemas de monitorização mais sofisticados, através de uma ligação remota sem fios (*wireless*). A configuração do sistema de aquisição e transmissão de dados num sistema de monitorização a longo prazo, geralmente é mais complexa. Normalmente consiste na ligação por cabos da rede local (unidades de aquisição de dados (*Data Acquisition Units*, DAUs) ou subestações) e ligação por cabos da rede global, como ilustrado na Fig. 2.16. O cabeamento da rede local, refere-se aos cabos de conexão entre os sensores e DAUs, e o cabeamento da rede global refere-se à conexão dos DAUs e os servidores do banco de dados central[6; 13].

A implementação adequada de DAUs, tem um papel muito importante, para assegurar a qualidade e fidelidade dos dados adquiridos em grandes estruturas. Ligações por cabo muito extensas, podem causar ruído e perda significativa de sinais analógicos (especialmente sinais de tensão), porque os sensores distribuídos ao longo da estrutura, estão distantes da central de controlo de dados (normalmente a centenas ou até milhares de metros de distância). Os DAUs são assim colocados em algumas secções transversais da ponte, para poder receber os sinais dos sensores adjacentes e posteriormente transmitir esses dados para a central de dados.

Note-se que alguns sensores como GPS, camaras de vídeo, sensores de fibra ótica e sensores de corrosão, tem os seus sistemas específicos de aquisição de dados. Estes sistemas de recolha de dados, transformam a informação recolhida em dados digitais, e fazem a conexão diretamente com o servidor de dados central, para o posterior processamento. Para um sistema, como o ilustrado na Fig. 2.16, é desejável ter uma plataforma que assegure a funcionalidade e durabilidade do sistema[13].

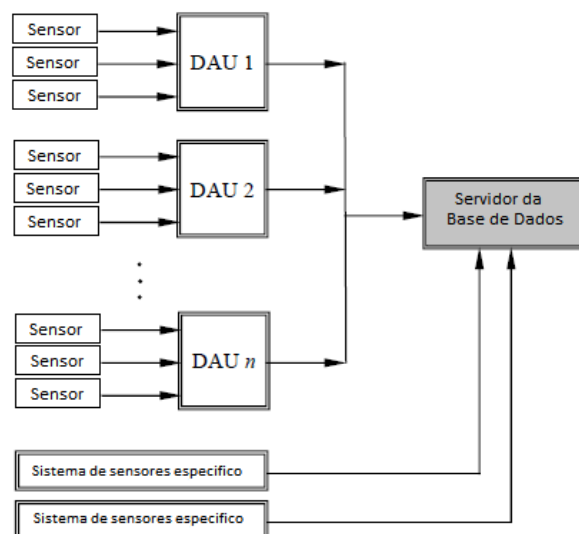


Fig. 2.16 – Configuração de um sistema de aquisição e transmissão de dados, adaptado de [13]

Durante o normal funcionamento, a aquisição e transmissão de dados são realizadas de uma forma sistemática e organizada. Dependendo da natureza dos parâmetros monitorizados, alguns sensores podem funcionar continuamente, enquanto outros podem trabalhar num modo de disparo, no qual os sinais dos sensores são recolhidos apenas quando os parâmetros estão acima de determinados valores limite (sismos, tsunamis, tufões)[13]. Estes dois modos podem ser utilizados, simultaneamente num sistema de aquisição de dados.

A taxa de amostragem (ou frequência de amostragem) é um fator importante, que afeta a velocidade de aquisição de dados, pois baseia-se na variação de velocidade dos parâmetros monitorizados. Por exemplo, a temperatura ambiente normalmente varia lentamente com o tempo e pode ser tratada como medição estática, com uma baixa taxa de amostragem. A aceleração, por outro lado varia mais rapidamente com tempo e é geralmente considerada, como um parâmetro dinâmico com uma elevada taxa de amostragem. Se um parâmetro não é amostrado com rapidez suficiente, que é conhecido como subamostragem, o sinal digitalizado resultante não vai representar com precisão o sinal real, gerando assim um erro, mais conhecido como erro de *aliasing* (representado na Fig. 2.17) [6; 13].

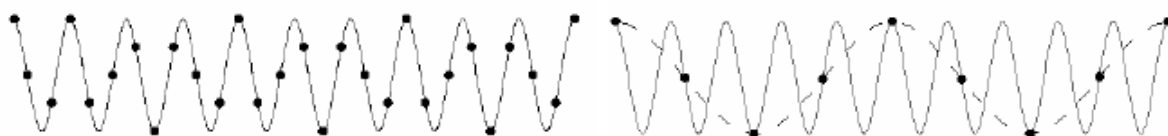


Fig. 2.17 – Conversão correta de sinal (à esquerda), efeito *aliasing* (à direita)[6]

Depois de todo o *hardware* ser instalado, o DATS deve ser testado ou verificado, através de ensaios de campo, como por exemplo ensaios e carga. É necessário efetuar estas verificações, porque o desempenho do *hardware* é incerto quando exposto a condições adversas, a longo prazo. Além disso, depois das estruturas entrarem em serviço, é difícil na prática identificar, reparar e substituir instalações danificadas. A verificação de campo pode ajudar a identificar problemas de *hardware*, instalação de

cabos e software, de tal modo que os problemas podem ser corrigidos antes do funcionamento normais[13].

2.6.2 SENSORES

Os sensores são um elemento fundamental na monitorização de estruturas. Existem diferentes tipos de sensores disponíveis no mercado, dependendo do tipo de aplicação. Atualmente existem dois tipos de aplicação na monitorização estrutural, são a monitorização estática e a monitorização dinâmica.

A seleção de sensores no plano de monitorização depende de alguns parâmetros, como o custo, o número de sensores a utilizar, os prós e contras da sua colocação, a sua proteção contra danos mecânicos ou químicos, e a necessidade de recolha de dados mais significantes. Um exemplo de preocupação com danos mecânicos dos sensores, é a utilização de sensores de humidade, em que é necessário especial atenção quando a medição a longo prazo é prevista particularmente num ambiente hostil[2].

Disposições especiais são muitas vezes necessárias para proteger os sensores a fim de obter medições aceitáveis. Uma vez que os sensores estão previstos para ser usados por um longo período, a sua fonte de alimentação (energia) também necessita de ser tida em conta como um elemento essencial[2].

Inicialmente os sensores com fios eram os mais utilizados nas monitorizações, mas como alternativa surgiram os sensores sem fios, que demonstram ser na maioria dos casos a opção mais viável e economicamente acessível. Os sensores sem fio são normalmente considerados como sensores inteligentes. Normalmente os sensores inteligentes têm a capacidade de compensar os erros aleatórios, podendo adaptar-se a mudanças no ambiente e ajustar as não-linearidades, tendo também à disposição mecanismos de autocalibração[2].

Apesar dos parâmetros essenciais já mencionados para a seleção dos sensores, é necessário também ter em conta varias características próprias das capacidades dos sensores, tais como:

- Alcance (*Range*);
- Sensibilidade;
- Precisão;
- Estabilidade;
- Repetibilidade;
- Características estáticas e dinâmicas;
- Captação de energia;
- Compensações devido á mudança de temperatura e aos parâmetros ambientais.

Abaixo serão apresentados alguns dispositivos disponíveis no mercado, tanto para a monitorização estática como para monitorização dinâmica, com o acompanhamento de uma breve descrição das suas aplicações mais frequentes nas estruturas.

2.6.2.1 Clinómetros e Sensores de Viga

Os clinómetros (*Tiltmeters*) e os sensores de viga (*Electrolevel Beam Sensor*) são dispositivos que tem como função, observar e controlar, a ocorrência ou a existência, de rotações ou inclinações na estrutura a monitorizar.

Os clinómetros utilizados podem ser mono ou biaxiais (Fig. 2.18), e o deslocamento final é o resultado da combinação dos deslocamentos obtidos nas duas direções.

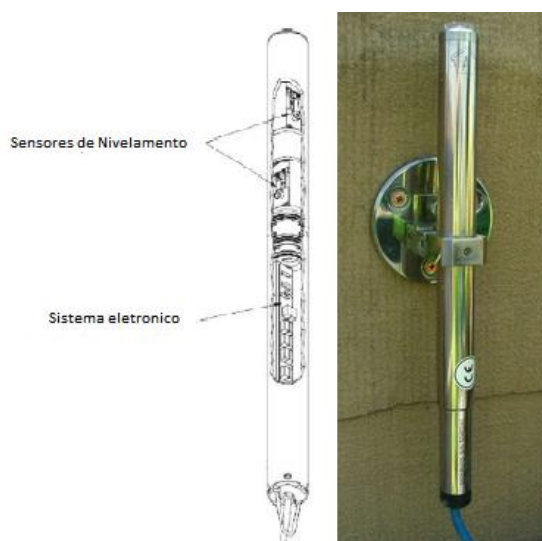


Fig. 2.18 – Clinómetro biaxial fixo [6; 27; 28]

Os sensores tem na sua constituição um dispositivo de nivelamento horizontal (nível de bolha), que permite controlar e monitorizar alterações que ocorram a partir do seu estado inicial, e ainda permite assegurar o nivelamento inicial do dispositivo durante a sua instalação.

A constituição do sensor é dotada de uma capsula de vidro, que contem um fluído condutivo no seu interior, sendo também constituída por um sistema de eléctrodos eletrolíticos (Fig. 2.19). Sempre que ocorrer uma movimentação da bolha de ar (sempre no sentido contrário ao do deslocamento real), esta vai provocar alterações na forma como os eléctrodos de excitação são ou não envolvidos pelo líquido condutivo[6]. Estas alterações, vão originar variações de resistência entre os eléctrodos de excitação e o eléctrodo de referência, sempre proporcional á rotação verificada.

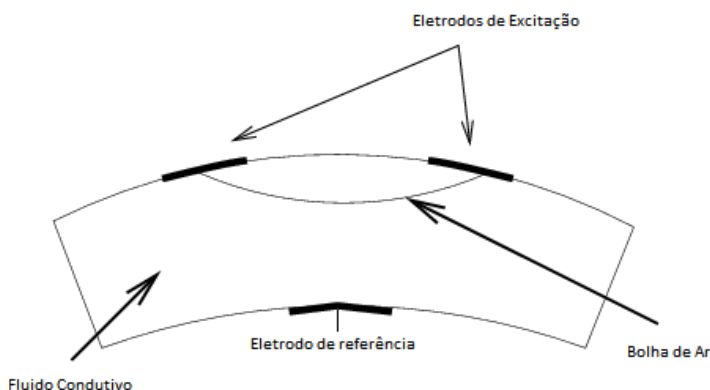


Fig. 2.19 – Ilustração do sistema de nivelamento eletrolítico de um clinómetro, adaptado de [29]

As versões mais correntes no mercado atual para este tipo de sensores, são os sensores de viga, os clinómetros portáteis e os clinómetros fixos. Este tipo de sensores é mais utilizado para avaliação do comportamento estrutural de um edifício em carga e para o controlo de deformações numa estrutura.



Fig. 2.20 – Clinómetro Portátil [30]



Fig. 2.21 - Sensor de viga [31]

2.6.2.2 Extensómetros

Como o estado de tensão numa estrutura é obtido de forma indireta, pode recorrer-se ao uso de extensómetros para a sua obtenção. Quando a estrutura é solicitada por ações externas, as deformações produzidas por essas ações são medidas através dos extensómetros. Com o respetivo conhecimento dos materiais solicitados e das deformações devidas às ações externas, através da lei de Hooke determina-se o estado de tensão das partes da estrutura monitorizadas[6].

Os extensómetros de resistência elétrica (*Foil Strain Gauge*), os extensómetros de corda vibrante (*Vibrating Wire Strain Gauge*) e os sensores de fibra ótica (*Fibre optic strain gauges*), são os sensores de medição de deformações (extensões) mais usados em estruturas de engenharia civil[13].

Os extensómetros de resistência elétrica, são o tipo de sensores mais comum para a medição de tensões. Como se pode observar na Fig. 2.22, a sua constituição consiste numa grelha de um condutor com secção reduzida, aplicada numa base flexível, que garante o isolamento elétrico entre o extensómetro e a peça. O extensómetro é depois ligado á peça por um adesivo adequado, e á medida que a peça se deforma, a película alonga ou encurta, causando assim alteração na sua resistência elétrica, proporcionalmente á tensão. A sua aplicação deixa de ser viável para a monitorização de peças ou elementos de grandes comprimentos, devido ás potenciais interferências dos campos eletromagnéticos[6; 13].

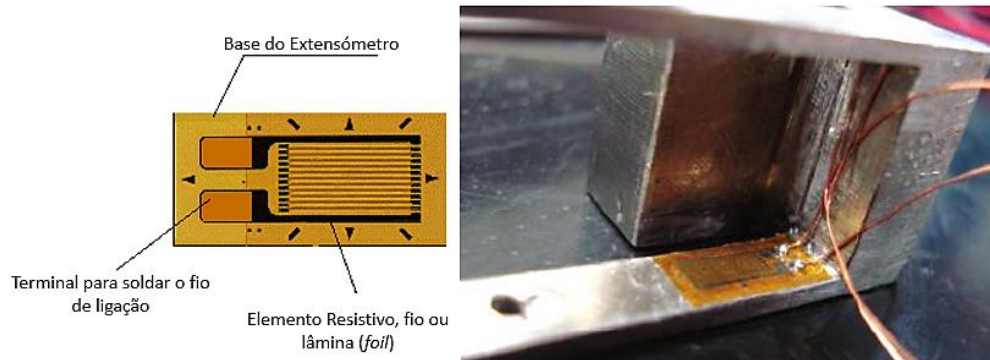


Fig. 2.22 – Extensómetro de resistência elétrica (à esquerda), e sua aplicação numa peça (à direita) [32; 33]

Os extensómetros de corda vibrante, medem variações no estado de tensão da corda, quando esta a ser comprimida ou tracionada, através da leitura das diferentes frequências de vibração emitidas pelas cordas. Estes extensómetros são constituídos por um fio de aço fino (corda), mantido em tensão entre dois pontos de extremidade fixos. O fio vibra devido a excitações de pulso curto, sendo essa frequência de vibração medida. Quando a distância entre os pontos de fixação se altera, a tensão dos fios consequentemente também se altera e o mesmo se sucede com a frequência de vibração. A alteração da frequência de vibração do fio é assim proporcionalmente associada a uma mudança de tensão. Consequentemente, a tensão retirada pode ser transmitida através de uma longa distância (algumas centenas de metros a quilómetros) sem muita degradação, sendo esta, uma das suas grandes vantagens[6].

Os extensómetros de corda vibrante podem ser facilmente instalados na superfície do betão, ou até mesmo embebidos neste, a sua respetiva representação é ilustrada na Fig. 2.23. A principal desvantagem destes extensómetros, é a limitação à medição estática, uma vez que leva alguns segundos para se obter a frequência de vibração dos fios[6].



Fig. 2.23 – Extensómetros de corda vibrante, de embeber no betão (em cima), de colocar á superfície do betão (em baixo) [34]

Os sensores de fibra ótica embora não seja uma tecnologia desenvolvida recentemente, é a mais recente na área da monitorização. O seu objetivo é tirar o maior proveito das características vantajosas do cabo de fibra ótica, como por exemplo reduzidas dimensões, baixo peso e imunidade à interferência de ondas eletromagnéticas devido à utilização de luz para a deteção do sinal de transmissão[2].

Para desenvolver um sistema de sensores de fibra ótica, são particularmente necessários, uma fonte de luz, uma fibra ótica, um sensor ótico ou transdutor na ponta de entrada da luz e um recetor especial na ponta que faz a conexão à unidade de leitura. De uma forma mais simplificada, as fibras óticas são superfícies cilíndricas bastante finas que permitem a difusão de luz pela sua estrutura interna, proporcionando assim a monitorização e a recolha de dados a grandes distâncias, sem deterioração dos dados. O transdutor tem o papel de fazer a modulação particular dos parâmetros do sistema ótico, como por exemplo a intensidade, o comprimento de onda, a polarização e a fase[2; 6].

Os sensores de fibra ótica, podem ser classificados em quatro categorias, sensores de modulação de intensidade, sensores interferométricos, sensores polarimétricos e sensores de espetrometria. São capazes de medições estáticas e dinâmicas, com um intervalo de frequências entre as centenas e os milhares de Hertz. Em contrapartida, as fibras são muito frágeis, pelo que, se deve ter muito cuidado, aquando da sua instalação[6]. Na Fig. 2.24 são apresentados dois tipos de sensor de fibra ótica, um de embeber na estrutura e outro de fixação na estrutura.



Fig. 2.24 – Sensores de fibra ótica, de embeber (à esquerda), de acoplar à estrutura (à direita) [6]

Quando a peça que está a ser monitorizada se deforma, o sensor de fibra ótica sofre a mesma extensão que a peça no qual está acoplado. Com a deformação, a peça vai alterar o seu comprimento inicial, que induzirá a introdução de alterações na intensidade e refração da luz que percorre a fibra, na frequência ótica, na fase e na polarização[6].

2.6.2.3 Transdutores de deslocamento de indutância variável (LVDT's)

O deslocamento de estruturas serve como um indicador eficaz, da sua condição e desempenho. Grandes deslocamentos ou deformações, podem criar situações perigosas, como por exemplo, para o tráfego na estrutura de uma ponte, excessivos deslocamentos podem assim afetar a integridade estrutural da ponte. É necessário nestes casos, uma monitorização de deslocamentos. Um dos equipamentos mais utilizados para este tipo de medições são os transdutores de deslocamentos de indutância variável (Linear Variable Differential Transformer, LVDT), representados na Fig. 2.25[6; 13].

O LVDT consiste num tubo metálico oco, que contém uma bobina primária e duas secundárias e um núcleo ferromagnético separado. As bobinas produzem um sinal elétrico, que é proporcional à posição do núcleo em movimento. O transdutor refere-se ao deslocamento por indutância, devido à mudança da distribuição espacial induzida pela alternância do campo magnético[7].

As vantagens fundamentais dos LVDTs são, o seu elevado grau de robustez, resolução infinita e capacidade de operar em altas temperaturas e em condições ambientais extremas. A sua gama de medições, varia entre os milésimos de centímetro até vários centímetros.

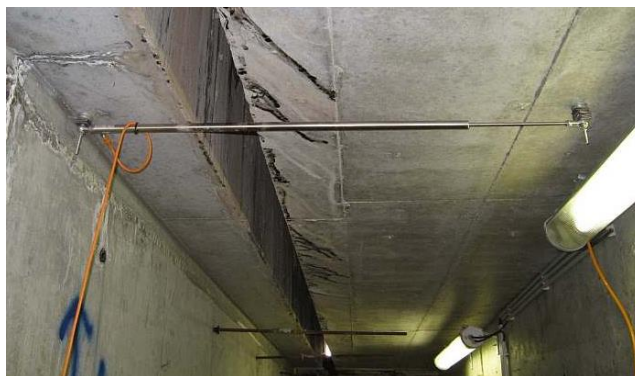


Fig. 2.25 – Exemplo de um LVDT, na monitorização de uma ponte [35]

2.6.2.4 Sensores de medições ambientais (Temperatura, Humidade, Vento)[7]

As variações de temperatura podem influenciar significativamente a deformação e deflexão total das estruturas, logo em muitos sistemas de monitorização é frequente que seja medida a temperatura estrutural e a temperatura ambiental. A restrição do movimento nas estruturas pode induzir tensões significativas, devido ao efeito da temperatura, que geralmente tem uma distribuição não uniforme ao longo de toda a estrutura e é diferente da temperatura ambiente devido à transferência de calor. Os sensores de temperatura permitem assim, a determinação das variações térmicas da estrutura e a correção de outras medições efetuadas a partir de outros sensores[13].

Este tipo de sensores para além da sua habitual função, podem ainda ser utilizados de uma forma igualmente importante durante a construção das estruturas, em que a sua função é monitorizar os efeitos de calor de hidratação na pasta de cimento a utilizar[7], controlando assim eventuais fenómenos de retração e consequente fissuração do betão fresco.

Os sensores de temperatura, utilizados mais frequentemente são os termopares (*thermocouples*), termístores (*thermistors*), sensores de resistência de temperatura e de fibra ótica (Fig. 2.26). Os termopares tem uma ampla gama de medição, são economicamente viáveis mas menos estáveis do que os outros tipos. Os termístores e os sensores de resistência de temperatura, são baseados no princípio de que, se temperatura subir a resistência de um material aumenta. Estes são geralmente mais precisos e estáveis do que os termopares. Os sensores de temperatura, são geralmente feitos de platina[13].



Fig. 2.26 – Sensores de temperatura, termopar (à esquerda), de fibra ótica (à direita) [36; 37]

As moléculas de água podem atuar como um meio de transporte para iões agressivos à estabilidade da estrutura, como cloreto, sulfato, carbonato e amónio. A presença de tais iões na construção das estruturas

e no betão, representa um grande risco para a sua deterioração e corrosão[2]. Dentro deste contexto os sensores de humidade relativa, podem ser uma ferramenta muito útil para a monitorização de estruturas.

Este tipo de sensores, para além de ser muito útil para a determinação de humidade presente na estrutura, também desempenha um papel muito importante no que toca aos outros sensores de medição, dado que uma das principais causas para um deficiente funcionamento dos sensores de monitorização, é a presença de grandes teores de humidade no mecanismo dos dispositivos. Para além do ruído elétrico introduzido nos dados obtidos pelos sensores, o teor de humidade também contribui de igual forma para a degradação do sensor, como o ponto de partida para o processo de corrosão do mesmo. Os sensores de humidade, tem assim um papel importante na integração dos sistemas de monitorização, visto que permitem acima de tudo, verificar a integridade e controlar as medições efetuadas por outros sensores, aplicados na estrutura[2; 6].

A humidade relativa é definida como a razão, entre a quantidade de vapor de água presente na atmosfera, para a quantidade máxima que a atmosfera pode conter. Tradicionalmente eram utilizados sensores do tipo capacitivos, resistivos e higrométricos. No que se refere à fibra ótica, uma vez que é imune à humidade relativa, é necessário revestir a fibra com um material resistente e capaz de fazer medições da humidade relativa. Atualmente, estão disponíveis no mercado sensores de humidade do tipo capacitivo, resistivo, termo condutor, de fibra ótica e sensores que utilizam a tecnologia MEMS (*Micro Eletro Mechanical Systems*)[2]. Na Fig. 2.27 são apresentados os principais sensores usados na atualidade.



Fig. 2.27 – Sensores de humidade: a) Resistivos, b) Capacitivos, c) Termo condutores [6; 37; 38]

Os sensores tradicionais mais usados para a monitorização do vento, são conhecidos por anemómetros e medem a velocidade do vento.

Os anemómetros de hélice e os ultrassónicos, representados na Fig. 2.28, são os dispositivos de medição *in situ* de velocidade e direção do vento, mais usados atualmente. O anemómetro de hélice, regista diretamente a direção do vento, e que faz com que seja o anemómetro mais conveniente e mais confiável para ambientes agressivos, mas em contrapartida não é sensível o suficiente para capturar a natureza dos ventos em frequências mais altas. O anemómetro ultrassónico mede a velocidade do vento através das suas, duas ou três, componentes ortogonais[13].

Os anemómetros são muitas vezes instalados, em algumas secções do tabuleiro de uma ponte, em ambos os lados, e também ao longo das torres, de modo a que se possa conhecer as características do vento em alguns dos pontos principais de instabilidade da estrutura, mas também para que a correlação entre a velocidade do vento, tanto na direção horizontal como na direção vertical, possa ser determinada[13].



Fig. 2.28 – Anemómetro, de hélice (à esquerda), ultrassónico (à direita) [39; 40]

Ocasionalmente transdutores de pressão, são instalados para medir pressões do vento e sua distribuição na estrutura, bem como a verificação da influência do vento no comportamento das estruturas através da determinação das pressões de compressão e de sucção que o vento provoca nos elementos estruturais.

Os transdutores de pressão do vento quando sentem pressão diferencial, convertem essa diferença de pressão numa corrente elétrica proporcional, tanto para a variação unidirecional como para a bidirecional. Para que a medição da diferença de pressão seja efetuada, a localização de referência do transdutor de pressão, tem de ser selecionada de forma adequada, de modo a evitar possíveis distúrbios no meio ambiente[13].

Nos últimos anos, com o desenvolvimento da tecnologia, o radar de Doppler, o GPS e outros dispositivos, tornaram-se muito eficazes na medição da camada de fronteira do vento[13].

2.6.2.5 Estações Meteorológicas

Com a necessidade de conhecimento da envolvente da estrutura a monitorizar, a monitorização estrutural recorre aos sensores de medição ambiental, que foram apresentados no subcapítulo anterior, mas quando é necessário a monitorização de vários parâmetros (por exemplo temperatura ambiente, humidade relativa, precipitação, pressão do ar e radiação solar) em simultâneo, é mais viável recorrer ao uso de uma estação meteorológica.

Uma estação meteorológica contém sensores que podem medir os parâmetros acima mencionados, além da velocidade e direção do vento. A intensidade de radiação solar, temperatura do ar e vento, são parâmetros importantes para derivar a distribuição de temperatura nas estruturas. Com a distribuição de temperatura, o efeito térmico nas respostas estruturais pode ser avaliado quantitativamente. O posicionamento da estação meteorológica (Fig. 2.29) no terreno, deve ser efetuado mediante os parâmetros a medir e das exposições (solares e eólicas) desejadas.



Fig. 2.29 – Estação meteorológica móvel [41]

2.6.2.6 GPS e Sistemas Topográficos

O sistema global de posicionamento (*Global Positioning System*, GPS) foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (*US Department of Defense*) em 1973, e teve como primeiro objetivo a assistência, aos soldados, veículos militares e navios. O sistema consiste em três partes, o segmento do espaço (satélites), o segmento de controlo e o segmento do utilizador[13].

Basicamente, o recetor de GPS ao receber sinais enviados pelos satélites, situados em orbitas em volta do planeta terra, determina o tempo de chegada de cada mensagem e a distância a cada satélite, permitindo assim calcular a posição do recetor. No entanto, inicialmente a probabilidade de ocorrerem grandes erros era enorme, devido à grande velocidade da luz, portanto os recetores atualmente utilizam quatro ou mais satélites para melhorar a precisão do posicionamento. Como essa precisão é da ordem dos metros, tradicionalmente o método não mostrava ser muito viável para a monitorização de grandes estruturas[6; 13].

De modo a corrigir eventuais erros e a melhorar a precisão dos dados recebidos, o sistema de GPS pode funcionar em modo diferencial (DGPS), em que são utilizados dois recetores em simultâneo, um recetor de referência e um recetor livre. O recetor de referência é posicionado num local com coordenadas conhecidas e fixas. O recetor livre é colocado numa qualquer posição. As leituras obtidas pelos recetores são guardadas, e posteriormente cruzadas, para a minimização de eventuais erros na obtenção das coordenadas de um determinado ponto[6; 13].

Com os recentes avanços na tecnologia, os recetores de satélite são capazes de determinar posições ao nível dos centímetros, com grande precisão, e debaixo de condições atmosféricas adversas. O avanço também na receção e no processamento de dados do GPS, fizeram com que o GPS seja uma tecnologia que pode ser integrada num sistema de monitorização contínuo, para grandes estruturas[13].

A fim de se poder operar com o GPS, é importante que a antena do GPS tenha uma visão clara, e sejam utilizados pelo menos 4 satélites diferentes. Por vezes o uso dos sistemas de GPS apresenta algumas adversidades, visto que os sinais dos satélites podem ser obstruídos pelos edifícios, árvores ou outro tipo de obstáculos. Daqui se conclui que o GPS não pode ser utilizado em ambientes fechados, dentro de edifícios. É portanto de grande dificuldade usar o sistema de GPS nos centros das cidades, e em zonas florestais[13].

Existem dois tipos de monitorização estrutural com o sistema de GPS, representados na Fig. 2.30, um deles, baseado numa rede fixa de sensores, o outro é baseado em sensores móveis[6; 13].



Fig. 2.30 – Recetor de GPS, fixo (à esquerda), portátil (à direita) [42]

2.6.2.7 Sensores Sísmicos

Os sensores sísmicos ou mais conhecidos como sismógrafos, são instrumentos que medem oscilações do solo, incluindo ondas sísmicas geradas por terremotos, explosões e outro tipo de fontes. Estas oscilações são registadas nos sismógrafos, que conseqüentemente geram traçados gráficos denominados de sismogramas. A partir dos sismogramas, os especialistas conseguem avaliar as características principais (localização, epicentro, magnitude) da oscilação que está a incidir na estrutura.

Como se pode observar na Fig. 2.31, os sensores sísmicos tem como base de princípio de funcionamento a inercia de uma massa suspensa por uma mola, que tenderá a manter-se estável se ocorrer algum tipo de deslocamento. Mas o princípio da inercia define que um corpo só está em movimento, se possuir uma aceleração não nula. Como o interesse prático do sismógrafo é a medição do deslocamento de superfícies, este então faz a medição da aceleração ou velocidade da superfície e depois recorre-se ao processo de integração.

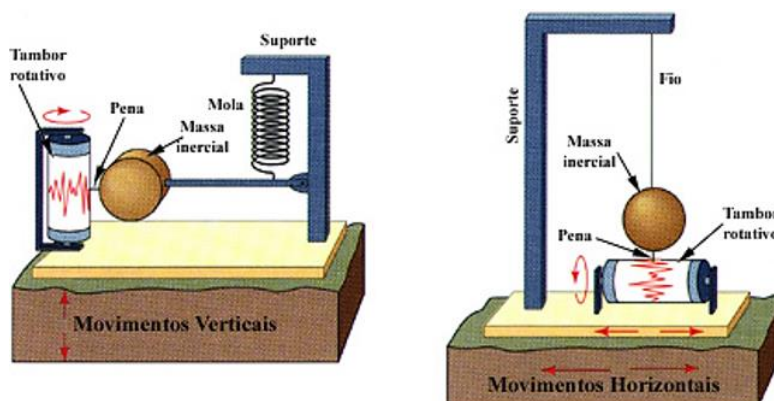


Fig. 2.31 - Sismógrafo analógico de deslocamentos verticais (à esquerda) e deslocamentos horizontais (à direita) [43]

Existem ainda dois tipos de sismógrafos que podem ser utilizados, os sismógrafos de curto período ou os sismógrafos de longo período. Para sismógrafos de curto período, a fonte de inercia produzida por

um sismo, desvia o movimento de massa a partir da posição de equilíbrio, e o deslocamento ou velocidade da massa é então convertida num sinal elétrico de saída proporcional ao movimento sísmico do solo. Os sismógrafos de longo período são constituídos de acordo com o princípio do equilíbrio de força, em que a força de inércia é compensada com uma força gerada eletricamente, de modo a que a massa se mova o menos possível[13].

Na monitorização reabilitação e manutenção de edifícios é mais corrente o uso de estações sísmicas portáteis, como se pode observar na Fig. 2.32, esta regista os impulsos elétricos de todos os sensores micro-sismógrafos associados.



Fig. 2.32 - Estação sísmica portátil [44]

2.6.2.8 Acelerómetros

Apesar da vibração poder ser medida em termos de velocidade e de deslocamento dinâmico, a aceleração pode ser medida ainda com mais precisão. De todos os dispositivos abordados os acelerómetros, são os mais indicados e mais utilizados para monitorizações dinâmicas, como por exemplo, na medição da aceleração das estruturas, induzidas pela força de excitação exteriores (vibrações ambientais ou vibrações forçadas).

A resposta dinâmica de uma estrutura devido a vibrações ambientais, pode ser medida usando diferentes métodos. Na prática corrente, o uso de acelerómetros é o mais adequado para fazer este tipo de medições (medições do movimento, deformações ou forças pontuais), devido à grande precisão dos resultados apresentados. Para além dos acelerómetros existem ainda outros tipos de sensores (alguns já apresentados) que podem ser usados na monitorização dinâmica de uma estrutura, tais como transdutores de velocidade, transdutores laser de velocidade e deslocamento, os LVDT's, sistemas GPS, extensómetros, entre outros.

Basicamente um acelerómetro consiste num sistema massa-mola-amortecedor, que produz sinais elétricos proporcionais à aceleração, numa banda de frequências abaixo da própria frequência de ressonância. Os resultados obtidos pelos acelerómetros, são posteriormente processados por algoritmos através da transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT), que transforma as ondas de vibração em espetros de frequências, permitindo assim a identificação das frequências próprias da estrutura.

Quanto à seleção dos acelerómetros, esta deve ter em conta os seguintes parâmetros:

- Resposta da frequência própria;
- Sensibilidade;
- Sensibilidade da tensão de base dinâmica;
- Sensibilidade térmica transiente.

A instalação de acelerómetros e cabos também pode constituir um ponto crítico, para a obtenção de boas medições de vibração. Existem assim três tipos principais de acelerómetros, os piezoelétricos, os piezoresistivos ou capacitivos, e do tipo *force balance* ou tipo servo.

Os acelerómetros do tipo piezoelétricos (Fig. 2.33) são muito robustos e estáveis, muito aconselháveis para utilizações de longo prazo. Este tipo de acelerómetros também apresenta vantagens, porque não necessitam de alimentação externa, são autossuficientes e praticamente imunes aos efeitos de variação de temperatura, para além de apresentarem um comportamento linear para uma larga gama de vibrações. A principal desvantagem apresentada por estes sensores é que o material piezoelétrico, envelhece com o tempo.



Fig. 2.33 – Acelerómetro piezoelétrico [45]

Ao contrário dos acelerómetros piezoelétricos, os piezoresistivos (Fig. 2.34) necessitam de energia elétrica externa para o seu funcionamento. Quando o acelerómetro está sujeito a alguma ação exterior, os elementos piezoresistivos sofrem deformações devido à vibração da massa. Essas deformações provocam uma alteração da resistência elétrica, criando um diferencial no circuito elétrico do sensor proporcional à aceleração estrutural.



Fig. 2.34 – Acelerómetro piezoresistivo [46]

Os acelerómetros tipo *force balance* (Fig. 2.35) também necessitam de alimentação exterior para o seu funcionamento. A sua constituição é feita pelos seguintes elementos:

- Massa sísmica;
- Sistema servo, que controla o posicionamento da massa sísmica;
- Circuito elétrico.

O princípio de funcionamento deste acelerómetro, consiste em manter a massa sísmica na sua posição inicial quando submetida a algum tipo de vibração, para esta se manter na sua posição inicial é necessário que o sistema induza uma força magnética a partir de uma corrente elétrica proporcional á aceleração atuante no acelerómetro.



Fig. 2.35 – Acelerómetro do tipo *force balance* [47]

2.6.3 EXEMPLOS PRÁTICOS DE APLICAÇÃO DE SENSORES

Desde os anos 90 que sistemas de monitorização de longo alcance tem sido implementados nas pontes de maiores dimensões, principalmente na China, Japão, América e Europa. No , serão apresentadas uma lista das maiores e mais importantes pontes a nível mundial e os respetivos sensores utilizados nos seus sistemas de monitorização, que serão apresentados de seguida.

1. Anemómetro;
2. Sensor de Temperatura;
3. Extensómetro de resistência elétrica;
4. Acelerómetro;
5. Transdutor de deslocamento;
6. Velocímetro;
7. GPS;
8. Sensor de peso em movimento (*weigh-in-motion sensor*);
9. Sensor de corrosão;
10. Sensor de fibra ótica;
11. Clinómetros;
12. Sensor de medição do nível de água;
13. Sismómetro;
14. Sensor de tensão nos cabos;
15. Sensor de deslocamento de juntas (*joint meter*);
16. Sensor a laser de deslocamentos;
17. Estação Meteorológica;
18. Camara de Vídeo.

Quadro 2.2 - Pontes equipadas com sistemas de monitorização [13]

Nome	Tipo	Localização	Vão Principal (m)	Sensores
Akashi Kaikyo Bridge	Suspensa	Japão	1991	1,2,4,5,6,7,16
Great Belt East Bridge	Suspensa	Dinamarca	1624	1,2,3,4,5,9,11,16,17
Runyang South Bridge	Suspensa	China	1490	1,2,3,4,7
Humber Bridge	Suspensa	Grã-Bretanha	1410	1,2,3,4,6,9
Tsing Ma Bridge	Suspensa	China	1377	1,2,3,4,5,7,8
Golden Gate Bridge	Suspensa	Estados Unidos	1280	1,4,13
Minami Bisan-Seto Bridge	Suspensa	Japão	1100	4,7,9,13
Forth Road Bridge	Suspensa	Grã-Bretanha	1006	2,3,7,9,14
Gwangang Bridge	Suspensa	Coreia do Sul	500	1,2,3,4,11,14,15,16
Normandie Bridge	Cabos	França	856	1,2,3,4,7
Rio-Antirio Bridge	Cabos	Grécia	560	2,3,4,5,12,13,18
Skarnsundet Bridge	Cabos	Noruega	530	1,2,3,4,5,11,16
Oresund Bridge	Cabos	Suécia	490	1,2,3,4,17
Rama IX Bridge	Cabos	Tailândia	450	2,3,4,5,10
Pereria-Dos Quebradas Bridge	Cabos	Colômbia	211	1,2,3,4,5,9,11,15,17
Confederation Bridge	Viga Caixaão	Canadá	250	1,2,3,4,5,8,9,10,11,18
Lupu Bridge	Arco	China	550	2,3,4
Commodore Barry Bridge	Treliçada	Estados Unidos	548	1,2,3,4,5,8,11,15,17,18
Dongying Yellow River	Rígida	China	220	2,3,4,10

3

RADAR

3.1 PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO

O termo RADAR é muito comum na linguagem do quotidiano. Este termo, é um acrónimo constituído pelas palavras *RA*dio *DE*tecting *AN*d *R*anging, que são referentes à deteção e variação de ondas de rádio[48]. O termo é normalmente usado para fazer referência aos equipamentos eletrónicos, que inferem informações (localização, direção, altura e distância) sobre objetos localizados remotamente, a partir de reflexões de ondas de rádio geradas por radiação eletromagnética, quando sujeita a uma certa gama de frequências.

O princípio básico de funcionamento do radar é de fácil compreensão. No entanto, para se poder implementar e operar corretamente sistemas de radar é necessário ter um conhecimento fundamental da sua teoria, que envolve matérias de engenharia mecânica e elétrica, engenharia de micro-ondas de alta potência, técnicas de processamento de dados, entre outras.

As medições de alcance ou distância efetuadas pelo radar, só são possíveis devido às propriedades da radiação da energia eletromagnética, que tem como princípios básicos:

- As ondas da energia eletromagnética, normalmente viajam através do espaço em linha reta e a uma velocidade constante, que pode variar ligeiramente devido às condições meteorológicas e atmosféricas;
- A energia eletromagnética viaja com uma velocidade aproximadamente igual à velocidade da luz ($c = 300.000 \text{ km/s}$);
- As ondas eletromagnéticas são refletidas, quando encontram uma superfície dielétrica. Se as ondas refletidas forem recebidas novamente no ponto original de partida, significa que existe um obstáculo na direção de propagação das ondas.

Estes princípios podem ser basicamente implementados num sistema de radar, permitindo assim a determinação da distância, direção e altura do objeto refletor.

Os pontos mais favoráveis que o sistema de radar apresenta apoiam-se na base de que a energia eletromagnética utilizada na frequência do radar não é afetada pela falta de luminosidade sobre o objeto, bem como o fato de apresentar uma grande resistência a condições climáticas adversas (dependendo apenas da frequência utilizada). Tudo isto, permite que os sistemas de radar demonstrem capacidades de determinação de posições de navios, aviões e massas de terra, a grandes distâncias e em condições climáticas adversas, que impeçam até mesmo a clara visão a olho nu.

O princípio de funcionamento eletrónico do radar é muito semelhante ao princípio da reflexão de ondas sonoras, como ilustra a Fig. 3.1. Este último princípio consiste na produção de som na direção de um objeto refletor (como um desfiladeiro rochoso ou uma caverna), que irá permitir que se obtenha uma

resposta em forma de eco (onda refletida). Sendo conhecida a velocidade do som num meio de propagação (ar, água, solo,...), é possível estimar a distância e direção do objeto, ou seja, o tempo de retorno do eco pode ser convertido para distância se o valor da velocidade do som for conhecido. O radar utiliza impulsos de energia eletromagnética, como se observa na Fig. 3.1. A energia da frequência de rádio transmitida é refletida a partir do objeto refletor, mas apenas uma parte dessa energia volta para o aparelho de radar. A energia devolvida é chamada de eco (tal como na reflexão de um som). Aparelhos de radar usam o eco para determinar a direção e distância do objeto refletido[49; 50].

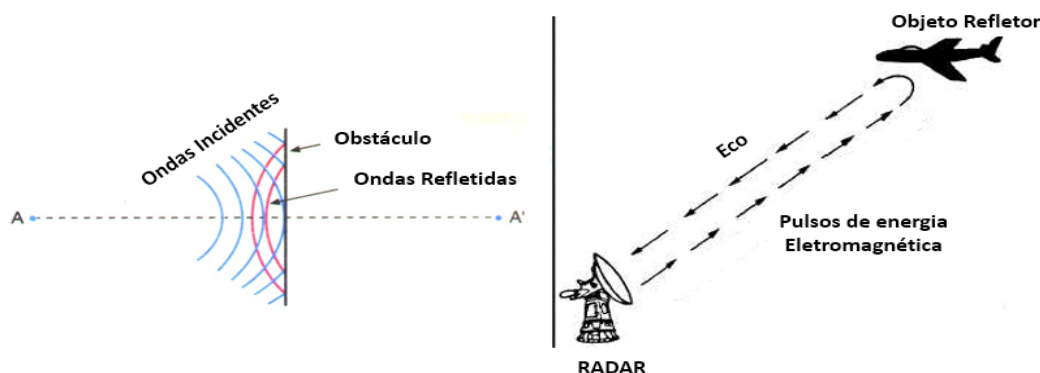


Fig. 3.1 – Princípio de reflexão de ondas sonoras (à esquerda), Princípio de funcionamento do RADAR (à direita)
[51]

O desenvolvimento do radar, que se encontra incorporado nos sistemas altamente complexos, utilizados hoje em dia, é um acumulado de desenvolvimento de muitas pessoas e nações ao longo dos anos[51]. Os princípios gerais do radar são conhecidos pela comunidade científica há um longo período de tempo, mas muitas descobertas eletrônicas foram necessárias, antes de um sistema de radar útil ter sido desenvolvido.

A segunda guerra mundial proporcionou um forte incentivo para o desenvolvimento do sistema de radar, e as primeiras versões do radar foram logo usadas após o início da guerra. Desde então a tecnologia do radar sofreu grandes desenvolvimentos. Atualmente existem sistemas de radar mais compactos, mais eficientes e melhores do que as primeiras versões.

Os sistemas de radar modernos, são usados para a deteção prévia de superfícies (ou áreas de objetos) e fornecimento de informação precisa da distância, direção, altura e velocidade dos objetos. O radar é também utilizado para guiar mísseis e direcionar o disparo dos sistemas de canhão, bem como para fornecer informações de longa distância em sistemas de vigilância e navegação[51].

3.2 HISTÓRIA DO RADAR

Para uma melhor percepção do desenvolvimento da história do radar, convém entender à partida os princípios básicos que estiveram na origem deste. Como mencionado no capítulo 3.1, o radar emite radiação eletromagnética geralmente numa gama de frequências denominada de ondas de rádio. A radiação eletromagnética constitui assim o ponto de partida da história do radar. De seguida será apresentada uma breve introdução histórica sobre este tipo de radiações, seguida da evolução histórica do radar.

A primeira abordagem à radiação eletromagnética, foi teoricamente prevista por James Clerk Maxwell, em *A dynamical theory of the electromagnetic field*, trabalho matemático desenvolvido pelo próprio em 1865[52]. Nesse trabalho Maxwell verificou a existência de propriedades ondulatórias da luz e similaridades em observações elétricas e magnéticas, revelando assim a sua natureza e simetria. Como resultado desse estudo propôs equações que descrevem as ondas de luz e de rádio como as ondas de eletromagnetismo que viajam no espaço.

A teoria de Maxwell foi confirmada mais tarde por Heinrich Hertz, que em 1887 fez a demonstração da existência das ondas eletromagnéticas, gerando experimentalmente ondas de rádio com as seguintes características: ciclos por segundo de 3kHz a 300GHz e comprimento de onda 10km a 1mm[53]. Além desta demonstração Heinrich Hertz foi autor de outra descoberta significativa para o desenvolvimento do sistema de radar, quando afirmou que as ondas eletromagnéticas podiam ser refletidas através de diferentes tipos de materiais, tais como objetos metálicos (condutores) e dielétricos. Estas descobertas tornaram Hertz, o primeiro a conseguir gerar e detetar ondas de rádio. Estas ondas foram, no ano de 1887, apelidadas por Hertz de ondas indutivas ou ondas aéreas[53], sendo atualmente conhecidas como ondas hertzianas, em homenagem ao seu descobridor. Posteriormente muitas invenções foram criadas, fazendo uso das ondas de rádio para transmissão de informação pelo espaço.

No entanto, o desenvolvimento dos estudos nos sistemas capazes de usar os princípios das ondas de radar, não teve grandes desenvolvimentos até ao início do século 20. Em 1903, o inventor Christian Hulsmeier ao aprofundar os estudos de Heinrich Hertz, em que as ondas eletromagnéticas poderiam ser refletidas em superfícies metálicas, desenvolveu um sistema capaz de prevenir colisões entre navios, em condições atmosféricas adversas e sem qualquer visibilidade entre os mesmos[54]. O seu dispositivo, consistia num transmissor de abertura de faísca (*spark-gap transmitter*), ligado a uma matriz de antenas dipolo e um recetor coesor (*coherer receptor*) com uma antena parabólica cilíndrica capaz de rodar a 360 graus[54]. Alguns autores referem que a invenção de Hulsmeier, foi a primeira versão do sistema de RADAR. O seu sistema, tinha um alcance que permitia detetar a presença de navios até 3km. Com o aprofundamento dos estudos, Hulsmeier tinha já intenções de alargar o alcance máximo para 10 km, mas devido a um problema no sistema de deteção, o sistema não tinha a capacidade necessária para efetuar o cálculo da distância do objeto ao aparelho, alertando apenas para a presença de um objeto nas imediações.

Hulsmeier patenteou o seu dispositivo, ao qual deu o nome de “*Telemobiloscope*”, que significa telemobiloscópio (Fig. 3.2 e Fig. 3.3). No entanto, a produção deste dispositivo não avançou, devido à falta de interesse por parte das autoridades navais, visto que a sua utilidade prática não se mostrou uma inovação necessária na época, para além de ainda não apresentar uma boa precisão. Nas duas décadas seguintes, inúmeros sistemas similares de deteção da direção dos objetos em curtas distâncias, foram desenvolvidos[54].



Fig. 3.2 – Telemobiloscópio e componentes, antena (à esquerda), recetor (ao meio), transmissor (à direita) [54]

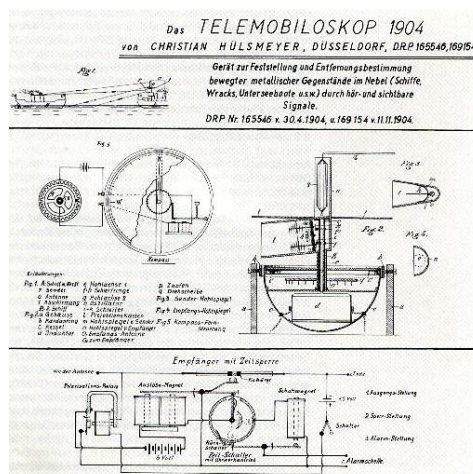


Fig. 3.3 – Esquema do sistema desenvolvido por Hulsmeyer, “Telemobiloscope” [54]

Com os estudos efetuados pelo cientista Nikola Tesla, em 1917 foi solucionado o problema de precisão apresentado no sistema de Hulsmeyer[55]. Tesla identificou qual era a frequência que deveria ser usada para detetar, tanto a presença de objetos como o seu movimento, ficando assim estabelecidos os princípios básicos de frequências e potência, que permitiram o desenvolvimento posterior do radar pelos cientistas, maioritariamente europeus e americanos.

Tyler e Young, em 1922, continuaram o estudo e desenvolvimento do sistema de deteção de navios, com as suas experiências em transmissão e reflexão de ondas de radio. Em 1930, Hyland aprofundou o estudo de deteção e localização de objetos, mas no campo da aeronáutica[48].

Com todos estes desenvolvimentos, as nações com maior poder económico, após a primeira guerra mundial, ganharam perceção da utilidade que o sistema de radar poderia providenciar em cenários de guerra. Foi este tipo de visão que levou a que todas as investigações que decorreram entre a primeira guerra mundial e a segunda guerra mundial, levassem ao desenvolvimento do radar moderno em tempo recorde.

O desenvolvimento de sistemas capazes de produzir pulsos curtos de energia, foi o avanço chave que permitiu a existência dos sistemas de radar modernos. Com a cronometragem dos impulsos com auxílio de um osciloscópio, foi possível determinar a gama de energia da onda e a direção da antena revelava a localização angular dos alvos. Os dois parâmetros combinados, davam a localização do alvo em relação à antena[56].

Durante o período de 1934 a 1939, oito nações (Grã-Bretanha, Alemanha, Estados Unidos, União Soviética, Japão, Holanda, França, Itália)[56] desenvolveram de forma independente este tipo de sistemas, sendo no entanto os ingleses os que mais se destacaram no desenvolvimento do radar.

Em 1934 o Engenheiro francês Emile Girardeau desenvolveu um trabalho em sistemas de radar multifrequência. Conseguindo com este feito registar a sua patente e ser destacado para a Normandia, França[57]. Ainda em 1934 na União Soviética o engenheiro P.K. Oschepkov inventou o RAPID (Fig. 3.4), um sistema de radar que conseguia detetar a presença de um avião a 3km de distância[58].

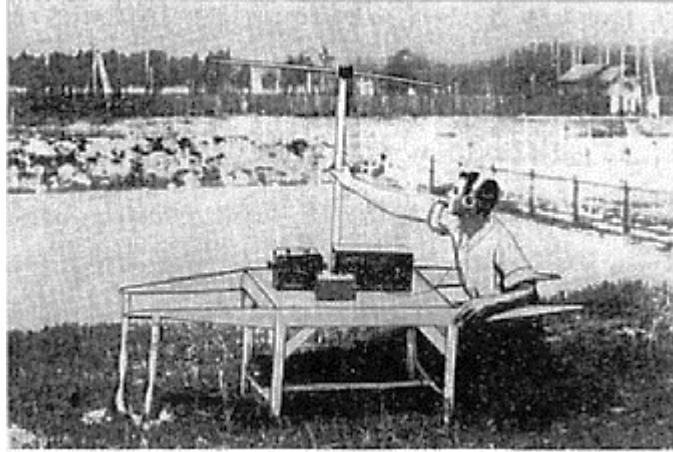


Fig. 3.4 – Recetor do RAPID, 1967, Moscovo, adaptado de [58]

Em 1935 a pedido do sistema de defesa britânico, o escocês Dr. Robert Page desenvolveu o primeiro radar mono-frequência, criando assim o primeiro sistema de radar britânico, denominado de *Chain Home System* [59]. Na Fig. 3.5 está representada a última torre desse sistema, visto que a maioria foi danificada com o decorrer da guerra. Estes primeiros equipamentos trabalhavam numa frequência de 25 MHz em bandas HF, VHF e UHF (ondas de rádio). As antenas de transmissão e receção eram separadas e de difícil distinção das antenas das estações de radio de ondas curtas.



Fig. 3.5 – Última torre do sistema *Chain Home*, Bawdsey, Inglaterra [60]

Ainda em 1935 o Engenheiro britânico Robert Watson-Watt, em seguimento de estudos já efetuados anteriormente ao seu, conseguiu desenvolver a capacidade de detetar aeronaves a longas distâncias (mais de 100km)[58]. Tal desenvolvimento fez com que fosse rapidamente integrado no sistema de defesa nacional britânico, reconhecido pelo Ministério da Aeronáutica Britânico. Na Fig. 3.6 é representado o sistema desenvolvido por Watson-Watt.

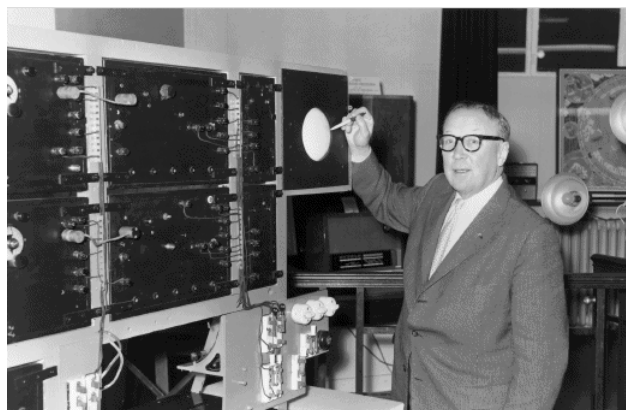


Fig. 3.6 – Robert Watson-Watt com o primeiro radar britânico [61]

Como tem vindo a ser mencionado, o grande estímulo para o desenvolvimento do radar foi a segunda guerra mundial. Permitiu uma evolução mais rápida na tecnologia de radar, pois tanto os ingleses como os alemães estavam num contratempo para ver quem produzia radares maiores e mais sofisticados. Esta corrida foi ganha largamente pelos ingleses, que souberam aproveitar de forma mais eficaz os sistemas de radares que possuíam.

Parte desse aproveitamento deveu-se ao fato da realização dos ensaios de viabilidade do radar (micro-ondas de pulso) por Watson-Watt, em 1936 na Grã-Bretanha. Era o início de um período (1936-1940) de desenvolvimento intensivo, não só na Grã-Bretanha mas também nos Estados Unidos. Na Fig. 3.7 estão representados os primeiros desenvolvimentos de radar por parte dos Estados Unidos.

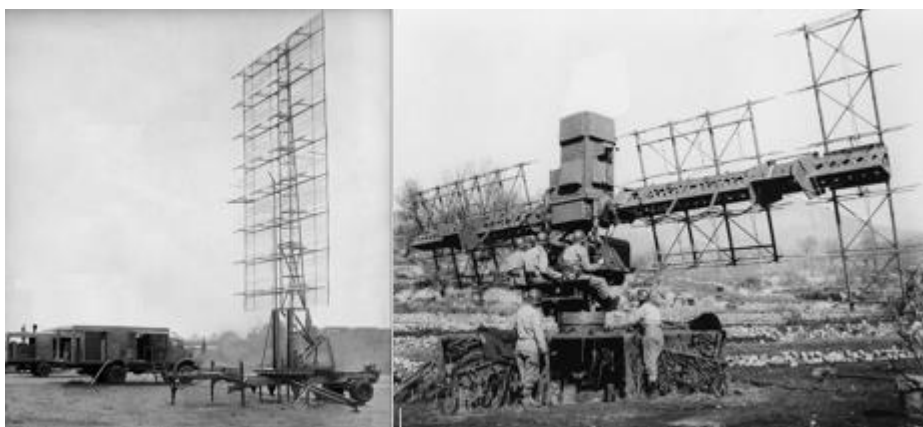


Fig. 3.7 – Primeiros radares de controlo aéreo, nos Estados Unidos [59]

Apesar de todo o desenvolvimento antecedente o termo RADAR, apenas foi acordado em 1939 pela companhia *United States Sinal Corps*, que trabalhou nestes sistemas para a marinha. Em 1940 foi fundado o Laboratório de radiação do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), que veio permitir a realização de diversos estudos e publicações sobre o radar.

O conhecimento adquirido durante a segunda guerra mundial, favoreceu o desenvolvimento de radares, desde 1941 até ao presente[62] e teve como principais desenvolvimentos de pós-guerra, os seguintes:

- O tubo de transporte de ondas (*travelling wave tube*), como forma de produção de grandes quantidades de micro-ondas;
- A criação de radares com sistemas de atraso de sinal (*phased array frequency*) que permitiram a obtenção de resoluções cada vez maiores,
- A construção do magnetron (*magnetron*) no Reino Unido, que permitiu a criação de sistemas relativamente pequenos com maiores resoluções,
- O desenvolvimento de amplificadores (*klystrons*) de alta potência, e todos os que melhoraram as capacidades de geração de energia e de amplificação de transmissores e recetores de radar.

Outros desenvolvimentos não listados mas também importantes foram o desenvolvimento de técnicas de monopulso, pulso curto e radares de abertura sintética (Synthetic Aperture Radar, SAR). Os desenvolvimentos que se seguiram estiveram mais relacionados com as melhorias na tecnologia de circuito integrado e todos os que contribuíram para técnicas de processamento de sinais digitais em sistemas de radar[48].

Com o aumento da capacidade de processamento de sinal, devido à introdução de computadores, houve um grande impacto sobre o uso de radar, e com o início da guerra fria, deu-se o desenvolvimento de radares mais sofisticados, que permitiram o acesso a novos sistemas e configurações como o *Pinetree Line*, feito e desenvolvido pelos Estados Unidos no início de 1950, ao qual se seguiram o *DEW Line*, o *Ballistic Missile Early Warning System*, o *Doppler* e o radar biestático[59].

Hoje em dia, a utilização do radar foi difundida em varias áreas mais pacíficas, do que a que deu origem ao radar. É usado desde a biologia à meteorologia, vigilância costeira, controlo de tráfego aéreo comercial, pela indústria aeroespacial, controlo de velocidade de veículos e mais recentemente dentro da Engenharia Civil na área de monitorização estrutural.

Na Fig. 3.8, é apresentada uma cronologia com um resumo do desenvolvimento do sistema de RADAR.

1865	James Clerk Maxwell, apresentou uma teoria detalhada da luz como um efeito eletromagnético, Teoria do Eletromagnetismo.
1886	Heinrich Hertz, comprova experimentalmente a existência de ondas radio, através de radiação eletromagnética.
1899	Guglielmo Marconi faz a primeira transmissão de ondas rádio, através do canal da Mancha.
1904	Hulsmeyer detetou ondas de radio refletidas em navios e patenteou o primeiro "radar" da história.
1917	Nikola Tesla descobre qual a frequência a utilizar no "radar" de Hulsmeyer para a deteção precisa da posição e movimento de objetos.
1922	Albert H. Taylor e Laurence C. Young, do NRL (<i>Naval Research Laboratory</i>), detetam barco de madeira, usando radar de onda continua (com emissor e recetor separados).
1925	Breit e Tuve, usam radar de impulso para medir a altura da ionosfera.
1930	Hyland, do NRL, deteta ondas de radio refletidas por aeronaves.
1931	Primeira vez que um navio é equipado com um sistema de radar.
1934	NRL, efetua os primeiros testes com radar de impulso devido às limitações do radar de onda continua.
1935	Robert Watson-Watt, desenvolve radar com capacidade para detetar aeronaves a longas distâncias (mais de 100km).
1936	O desenvolvimento do <i>Klystron</i> por Metcalf e Hahn. Componente importante nas unidades de radar como, amplificador ou tubo oscilador.
1936	Robert Watson-Watt, realiza ensaios de viabilidade do radar de micro-ondas de pulso, primeiros resultados com este tipo de radar.
1936	Inglaterra instala na sua costa uma cadeia de estações-radar para deteção de aviões inimigos.
1940	A Universidade de Birmingham desenvolve o Magnetron (<i>Magnetron</i>).
1939	Início da segunda guerra mundial, grandes evoluções do radar, aumento da sua precisão e dos amplificadores
1941	Construção do primeiro radar meteorológico.
1950	Início da Guerra fria, desenvolvimento de novos sistemas e configurações, como, <i>Pinetree Line</i> , <i>Drew Line</i> , <i>Ballistic Missile Early Warning System</i> , <i>Doppler</i> , e radar <i>Bistatic</i> .
(.....)	Desde 1950 até ao presente muitos outros sistemas foram desenvolvidos e testados por cientistas e Engenheiros.
2001	Começa a ser desenvolvido o primeiro radar de monitorização estrutural IBIS-FS.

Fig. 3.8 – Cronologia da Evolução do Radar

3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE RADAR

Como já referido anteriormente, um sistema de radar pode ter várias funcionalidades, tendo no entanto vários tipos de classificação. O radar pode ser classificado como primário ou secundário, *imaging* radar ou *non-imaging* radar, e ainda como mono-estático, bi-estático ou multi-estático. Através da Fig. 3.9 pode observar-se um esquema que traduz a forma como atualmente se classificam os diferentes tipos de radar, tendo em conta que a classificação de um radar é diretamente dependente da função primária do mesmo.

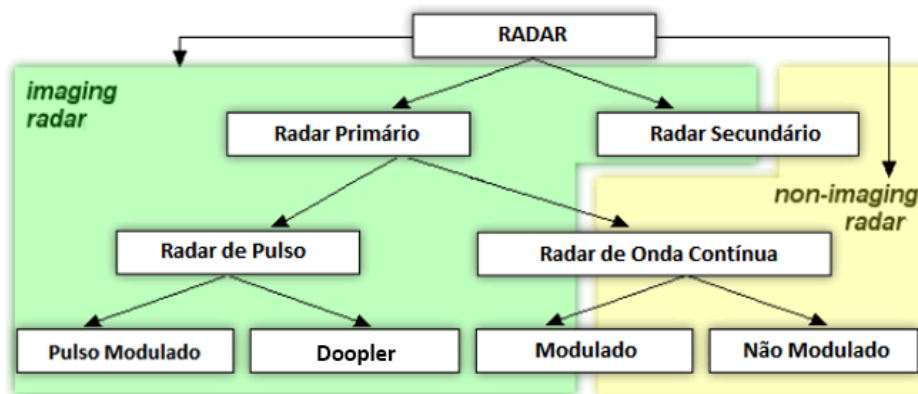


Fig. 3.9 – Classificação de RADAR, baseada na sua função primária, adaptado de [63]

3.3.1 IMAGING RADAR E NON-IMAGING RADAR

Um *imaging* radar, reproduz a imagem de um objeto ou área observada. Os sensores dos *imaging* radares medem, pelo menos, duas dimensões de coordenadas, para o cálculo do mapa da área coberta pelo alcance/feixe do radar. Os *imaging* radares, têm sido utilizados para fazer o mapeamento da superfície da terra, de outros planetas, de asteróides e para caracterizar objetos para sistemas militares[63]. Para o mapeamento da superfície terrestre o tipo de radar mais utilizado é o radar de abertura sintética (Synthetic Aperture Radar, SAR)

Os sensores dos *non-imaging* radares, como oposição aos sensores dos *imaging* radares, apenas fazem medições numa dimensão linear. Normalmente, este tipo de sensores tem como principal aplicação, os radares de velocidade e os altímetros[63].

3.3.2 RADAR PRIMÁRIO

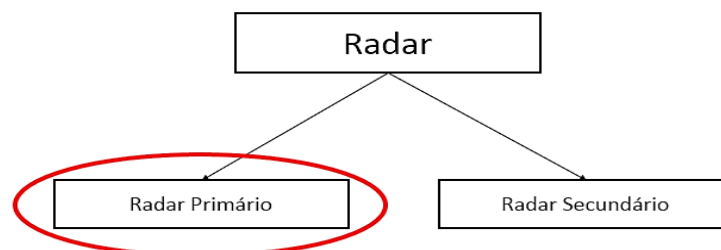


Fig. 3.10 - Classificação dos tipos de radar

Classificar uma unidade de radar como primária ou secundária (Fig. 3.10), é talvez o tipo de classificação mais intuitiva de todas as que foram mencionadas na introdução do subcapítulo 3.3. Uma unidade de radar quando classificada como primária significa que, transmite sinais de alta frequência, que posteriormente serão refletidos em alvos e os ecos que surgem da reflexão dos sinais de transmissão são recebidos e avaliados pela mesma unidade de transmissão, ou seja trabalha com sinais de resposta “ecos” passivos[63]. Isto significa, que a mesma unidade de radar tem capacidade para transmissão e receção de sinais, sendo esta a principal característica que define o radar primário. O radar clássico, (atualmente conhecido como radar primário), por definição, é uma tecnologia “não-cooperativa”, isto significa que não necessita de cooperação do alvo, para que este seja detetado pelo radar.

Tal como qualquer tipo de radar, os 3 princípios básicos do radar primário são a transmissão, propagação e reflexão. A Fig. 3.11 ilustra um diagrama funcional de um sistema de radar primário.

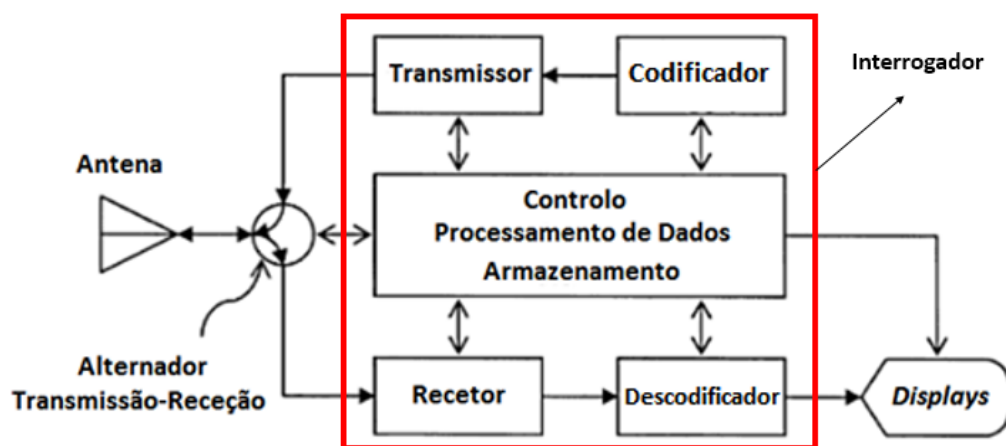


Fig. 3.11 – Diagrama de funcionamento de um sistema de radar primário, adaptado de [64]

Como forma de interpretação dos sinais recebidos e transmitidos, os radares primários são dotados de um sistema interrogador (*Interrogator*), como se pode observar na Fig. 3.11, que tem como objetivo o controlo de todo o processo funcional de um sistema de radar primário (será abordado com maior pormenor no subcapítulo 3.3.3).

Com o apoio no diagrama da Fig. 3.11, o funcionamento do radar primário pode ser descrito sequencialmente nos seguintes passos:

1. Geração de um pulso de energia eletromagnética (no transmissor), com uma oscilação de frequência f e duração τ ;
2. O pulso é direcionado através de um alternador de transmissão-receção (*duplexer*), até uma antena (o alternador de transmissão-receção, protege a sensibilidade do recetor da transmissão de pulsos de grandes energias);
3. O pulso é emitido para o espaço através de uma antena, propagando-se à velocidade da luz e intersetando objetos no espaço percorrido;
4. Parte do sinal que é intersetado pelos objetos, retorna ao radar (reflexão), sendo recebido pelo alternador transmissão-receção, e posteriormente é encaminhado para o recetor;

5. O sinal recebido, é detetado no recetor com frequência e duração de pulso iguais às do sinal emitido;
6. O sinal recebido é filtrado e processado, para que seja efetuada uma redução das interferências, e posteriormente todos os resultados são apresentados nos *displays* do radar[64].

Para além da capacidade de deteção de alvos, a grande finalidade do radar primário é a determinação das distâncias entre o radar e os alvos, com o recurso à emissão de pulsos. Para efetuar o cálculo dessas distâncias, o radar primário recorre a leis básicas da física, como distância é igual à velocidade vezes o tempo, como se pode comprovar pela equação (3.1). Na realidade o sistema de radar efetua uma contagem do tempo, através de um relógio contido no próprio sistema, quando um pulso é emitido e finda essa contagem quando o pulso é recebido (eco). Através das leis básicas da física a distância do radar ao objeto é calculada através da equação (3.1)[64].

$$2R = c \cdot \Delta t \Rightarrow R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (3.1)$$

Sendo R a distância entre o objeto e o radar (metros), c representa a velocidade da luz, igual a 3×10^8 (metros/segundo) e Δt é o tempo decorrido durante a viagem do pulso. Logo a distância que o pulso percorre é o dobro da distância entre o radar e o objeto, $2R$.

Os pulsos transmitidos tem uma onda de transmissão que adota a forma representada na Fig. 3.12, onde τ representa o período de um pulso e tem forma sinusoidal de $\sin(2\pi f_c t)$, com $2\pi f_c$ a representar a frequência angular ω . O tempo entre pulsos de radar é chamado de período de interpulso ou intervalo de repetição de pulso (*pulse repetition interval*, PRI), o número de pulsos enviados por cada intervalo de tempo é chamado de repetição da frequência de pulso (*pulse repetition frequency*, PRF), sendo a razão entre estes dois parâmetros, $PRF=1/PRI$. O comprimento de onda é obtido através da equação (3.2).

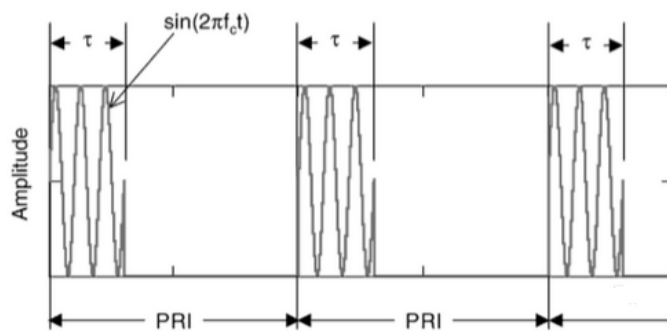


Fig. 3.12 – Forma da onda de transmissão do radar

$$\lambda = \frac{c}{f_c} \quad (3.2)$$

Sendo λ o comprimento de onda e f_c a frequência do radar.

3.3.3 RADAR SECUNDÁRIO

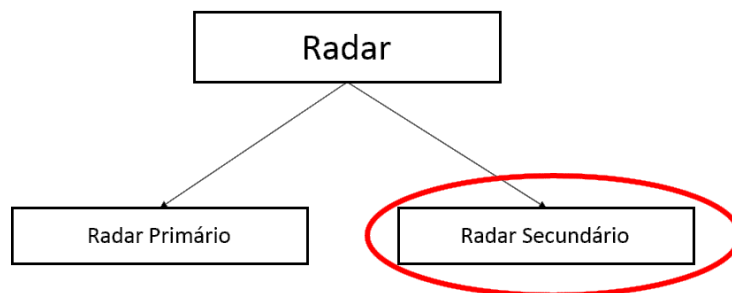


Fig. 3.13 – Classificação dos tipos de radar

Ao contrário das unidades de radar primário, as unidades de radar secundário (Fig. 3.13) necessitam de cooperação do alvo de modo a obterem a informação necessária para a sua deteção, ou seja trabalhar com sinais de resposta ativos[63]. O radar secundário tem como elementos constituintes, uma unidade de radar primário com o auxílio de outro componente, o *Transponder* (TRANSMitting resPONDER), que deve estar integrado no alvo. O sinal de resposta (eco) do *Transponder* pode conter mais informação (por exemplo, altitude, códigos de identificação, problemas técnicos, etc..) do que o sinal de resposta de um radar primário, permite também a operação em maiores alcances (sistema utilizado na aviação). O diagrama de funcionamento do radar secundário tal como os seus componentes, pode ser observado na Fig. 3.14.

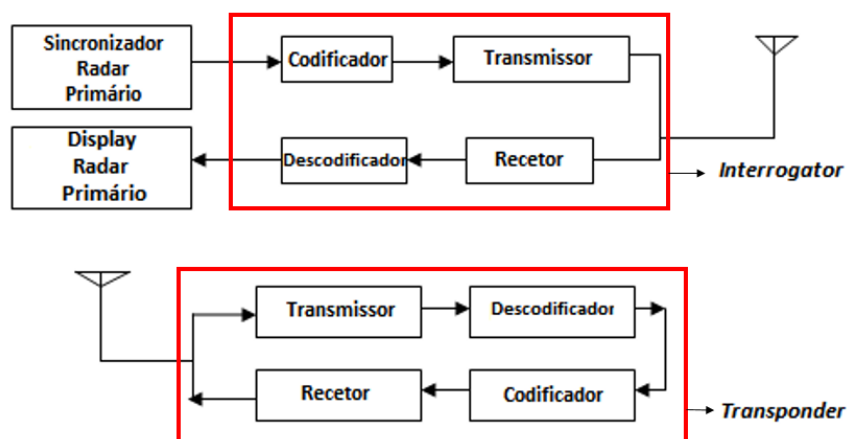


Fig. 3.14 – Diagrama de funcionamento radar secundário, adaptado de [65]

O que diferencia o princípio de funcionamento do radar secundário em relação ao radar primário, é o fato de o radar secundário necessitar de duas unidades para serem concretizados os 3 princípios básicos de funcionamento de um radar (transmissão, propagação e reflexão).

No caso do radar secundário os princípios básicos devem ser entendidos de maneira diferente, pois a sequência do seu funcionamento resume-se da seguinte forma: transmissão (Interrogador) → propagação → receção (*Transponder*) → transmissão (*Transponder*) → propagação → receção (Interrogador), nesta

mesma ordem sequencial. De maneira mais simplificada a sequência do princípio de funcionamento do radar secundário, pode ser entendida através do exemplo mais comum da sua utilização, a aviação:

1. O Interrogador (pertencente ao radar terrestre), transmite um pulso codificado com diferentes modos, cada modo corresponde a questões diferentes (por exemplo, velocidade, altitude, latitude, etc...)[63]. Todas as diferentes “perguntas”, servem para determinar o modo de operação entre Interrogador/*Transponder* (com diferentes modos, diferentes questões podem ser colocadas às aeronaves);
2. Uma antena recetora e um *Transponder*, estão situados na aeronave. Após a transmissão de sinal, o recetor amplifica e desmodula os pulsos enviados pelo Interrogador. O decodificador, analisa a questão enviada à aeronave e induz uma nova codificação para enviar a resposta. A resposta é codificada no codificador. O transmissor amplifica os pulsos e modula-os com uma frequência de radio de resposta[63; 65];
3. Novamente no Interrogador e através do alternador de transmissão-receção, o recetor amplifica e desmodula o impulso de resposta. Tal como no radar primário, possíveis interferências na resposta são filtradas. Posteriormente os resultados são enviados para os *displays* para a sua análise.

Tanto o radar primário como o radar secundário apresentam vantagens e desvantagens, devido aos seus diferentes princípios de funcionamento. Se o radar primário é melhor em recolher informação sobre, direções e distâncias ao radar, o radar secundário também traz vantagens, devido à informação adicional que providencia, como identificação de sinal e altitude do objeto.

A cooperação do alvo (*Transponder*) nas unidades de radar secundário é fundamental, para que se consiga diminuir a potência de transmissão e se consiga obter maiores alcances. A relação entre os dois parâmetros mencionados é demonstrada nas equações (3.3) e (3.4), tanto para o radar primário como para o secundário. A equação (3.3), demonstra a perda de potência, quando se opera com o radar primário (*Primary Surveillance Radar-PSR*), e a equação (3.4) quando se opera com o radar secundário (*Secondary Surveillance Radar-SSR*). Representando, P a perda de potência e o R (*Range*) a distância do radar ao alvo[63].

$$P_{PSR} \sim \frac{1}{R^4} \quad (3.3)$$

$$P_{SSR} \sim \frac{1}{R^2} \quad (3.4)$$

A potência de transmissão influencia assim diretamente a equação do radar. No caso do radar primário em duas “viagens” (transmissão e eco), no caso do radar secundário apenas influencia numa “viagem”, visto que a onda transmitida será posteriormente retransmitida.

3.3.4 RADAR DE PULSO

O radar primário pode ser classificado em dois tipos, radar de pulso ou radar de onda contínua (Fig. 3.15). O radar de pulso surge na tecnologia de radares como um sucessor do radar monopulso.

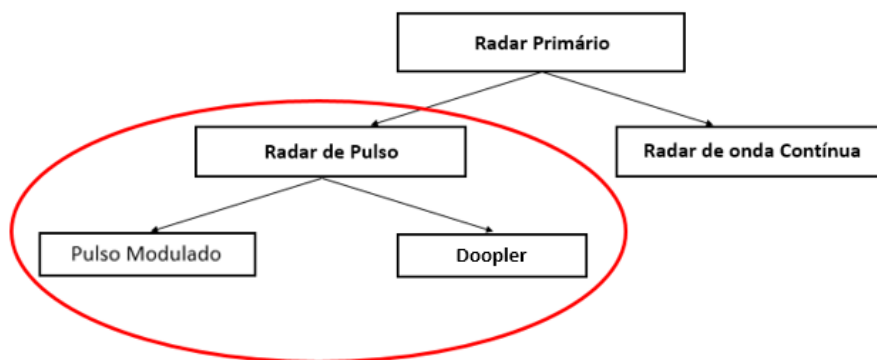


Fig. 3.15 - Tipos de Radar Primário-Radar de Pulso

O radar de pulso ou impulso, tem como princípio, a transmissão de um pulso de alta frequência, seguindo-se uma pausa até que seja recebido o eco e possa novamente ser transmitido outro sinal. De modo a obter-se uma boa resolução de alcance, este tipo de radares transmitem pulsos curtos, já para se obter o máximo de alcance, o radar emite pulsos com uma elevada potência. Daqui se conclui que é a frequência de repetição de pulso (Fig. 3.12) e a sua potência, que vão definir qual o alcance e resolução do radar.

Através da posição da antena e do tempo de propagação do sinal de pulso, podem ser determinados diversos parâmetros, como direção, distância e se necessário a altura do alvo. Os radares de pulso podem ser utilizados também na medição da velocidade dos alvos.

Existem dois tipos de radar de pulso, o de pulso modulado e o de frequência modulada (Doppler). O primeiro tipo, é o radar de pulsos simples, este envia um pulso de energia de cada vez. Após o pulso refletido ser detetado, o radar transmite outro pulso de energia. Este processo define uma distância entre radar e objeto, que permite estimar a velocidade com que o objeto se desloca, embora esta estimativa não seja precisa.

O outro tipo de radar é o radar de pulso de Doppler ou de frequência modulada. Este tipo de radar, é mais avançado do que o anterior, visto que funciona com base no princípio do deslocamento de Doppler. O efeito de Doppler é o responsável, pela diferença entre a frequência transmitida e recebida pelo radar. Tal diferença, neste caso é dupla, visto que o alvo recebe e emite ondas ao mesmo tempo. Tal efeito pode ser calculado através das equações (3.5) e (3.6).

$$f_r = f_t \left(1 + \frac{2v_r}{c} \right) \quad (3.5)$$

$$\Delta f = \frac{2f_t v_r}{c} = \frac{2v_r}{\lambda_t} \quad (3.6)$$

Onde f_t corresponde à frequência de transmissão, f_r à frequência de receção, Δf ao desvio de frequência, v_r à velocidade radial do alvo, c à velocidade da luz e λ_t ao comprimento de onda de transmissão

O radar de pulso de Doppler emite um fluxo constante de pulsos, ao analisar vários pulsos em vez de um só, consegue fazer uma leitura mais precisa da velocidade do objeto. Esta capacidade, torna-o mais eficaz e capaz de distinguir objetos em movimento, na presença de ecos provenientes de objetos estacionários. Estes radares vão comparando sempre os ecos recebidos num determinado momento, com os recebidos no momento anterior a esse, ou seja os ecos dos objetos estacionários terão a mesma fase, e portanto serão excluídos, enquanto os objetos em movimento terão mudança de fase e portanto serão facilmente distinguíveis dos objetos estacionários.

Existem alguns sistemas de radares de pulsos, entre eles, radares de procura, radares de seguimento (*Track While Scan-TWS*), radares indicadores de movimento (*Moving Target Indicator-MTI*) e radares meteorológicos[63].

3.3.5 RADAR DE ONDA CONTÍNUA

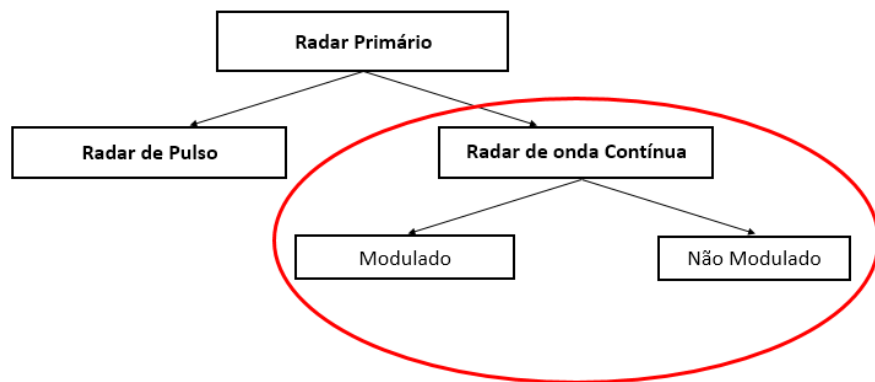


Fig. 3.16 - Tipos de Radar Primário-Radar de onda Contínua

O princípio de funcionamento dos radares de onda contínua consiste, na transmissão e receção contínua, de um sinal de alta frequência. O sinal transmitido por este tipo de equipamentos, é caracterizado pela frequência e amplitude constantes. Tendo como principal característica a medição da velocidade radial dos alvos.

Os radares de onda contínua podem ser de dois tipos, modulados ou não modulados. Os radares utilizados pela polícia para controlo de velocidade, são um bom exemplo de radares não modulados. Neste tipo de radares é possível efetuar a medição da velocidade de um objeto, apenas enviando um sinal não modulado e usando o efeito de Doppler. Em contrapartida este tipo de radares não consegue medir o alcance ao alvo (medição de distâncias), pelo fato de não conseguir efetuar medições de tempo.

Como alternativa para o cálculo de distâncias, recorre-se aos radares de onda contínua modulados. Este tipo de radares usa o método das frequências moduladas (*frequency shifting*). Neste método, um sinal que está em constante mudança de frequência, em torno de uma referência fixa, é usado para deteção de objetos estacionários. Quando algum sinal de reflexão é recebido, a frequência desse sinal é analisada, e sabendo a frequência que foi enviada inicialmente, através do atraso do sinal (pode ser observado através do gráfico da Fig. 3.17) pode-se fazer um cálculo semelhante ao efetuado no radar de pulso, para a medição da distância (*range*), através da equação (3.1). Os radares de onda contínua modulados, são normalmente usados como radares de aviação altimétricos, em que o objetivo é a medição da altura

exata das aeronaves, durante o procedimento de aterragem, servindo também como sistema de alerta, das aeronaves, quando estas estão a baixa altitude[63].

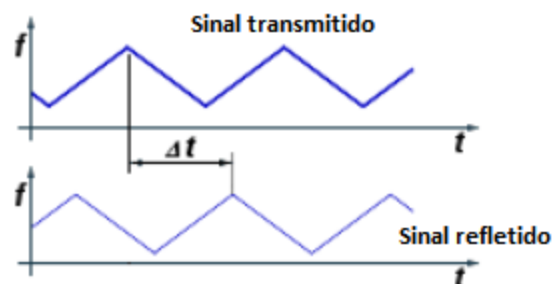


Fig. 3.17 – Desfasamento de sinal transmitido e refletido.

3.3.6 RADAR MONO-ESTÁTICO E BI-ESTÁTICO

Os radares primário e secundário para além da classificação que foi apresentada nos últimos subcapítulos, podem ainda ser classificados como radares mono-estáticos ou bi-estáticos (Fig. 3.18), à exceção do radar secundário que usualmente é apenas classificado como mono-estático.

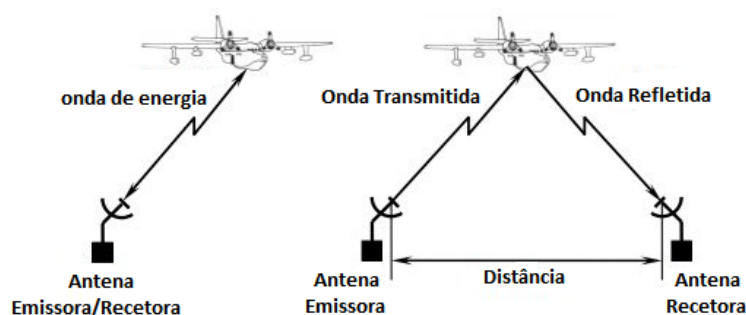


Fig. 3.18 – Esquema ilustrativo de um radar, mono-estático (à esquerda), e bi-estático (à direita), adaptado de [66]

A diferença entre estes dois tipos de radar, consiste essencialmente na sua constituição. No radar mono-estático, o sistema de transmissão e receção de ondas está diretamente ligado apenas a uma antena e a um alternador transmissão-receção (*duplexer*), como se pode observar na Fig. 3.19. A principal desvantagem associada a este tipo de sistema, é a necessidade de o recetor estar desligado durante o processo de transmissão, para que não se verifique uma perda inicial de sinal.

O radar bi-estático, é constituído por duas antenas, uma antena de transmissão e outra de receção, como se pode observar na Fig. 3.19. A vantagem principal deste sistema, é o isolamento completo entre a emissão e a receção de ondas. A maior desvantagem, para além de ser um radar que apresenta alguma complexidade na sua operação, é o fato das antenas terem de estar relativamente afastadas, para que não haja a interferência entre ondas transmitidas e refletidas como no radar mono-estático. Por estes motivos, é um radar muito utilizado em situações que se pretenda grande rigor e sensibilidade[48; 63].

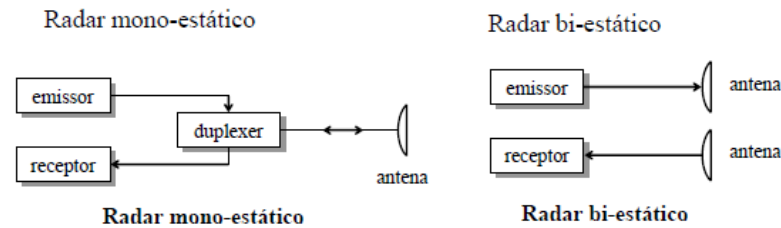


Fig. 3.19 – Diagrama de funcionamento e constituição do radar, mono-estático (à esquerda), e bi-estático (à direita).

3.4 BANDA DE FREQUÊNCIAS

O espectro eletromagnético contém toda a gama de comprimentos de onda, com frequências acima de 10^{24} Hz. Os sistemas de radar funcionam numa ampla gama de frequências, normalmente mais baixas (maior comprimento de onda), situando-se na região das ondas de rádio e das micro-ondas (0.3 GHz até 300 GHz)[67]. Como as micro-ondas são sensíveis a certas características da superfície dos alvos, interagem com os mesmos a um nível estrutural macroscópico e respondem consoante as propriedades elétricas dos alvos numa escala perto do comprimento de onda do radar.

Na teoria não existe limite para a frequência operacional de um radar, mas existem uma série de considerações práticas que influenciam fortemente a escolha da frequência do radar, como as propriedades atmosféricas, restrições físicas, e capacidade dos sistemas de radar[67]. Pois quanto maior a frequência de um sistema de radar, mais ela é afetada por condições climáticas, como chuva ou nuvens, mas quanto maior for a frequência transmitida, melhor vai ser a precisão do sistema de radar.

Existem dois tipos de nomenclatura em uso, para as bandas de frequência de radar, como se pode observar na Fig. 3.20. Um desses sistemas utiliza um aglomerado de letras historicamente mais conhecido e usado na comunidade científica, sendo um sistema padrão do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Originalmente estas letras foram designadas, para descrever as bandas de radar secretas, utilizadas durante a segunda guerra mundial. Em 1984, o IEEE adotou oficialmente a nomenclatura da Fig. 3.20, sendo esta uma das designações utilizadas por engenheiros e técnicos em todo o mundo. As aplicações dos radares militares da NATO (*North Atlantic Treaty Organization*), utilizam outro tipo de nomenclatura, com letras do abecedário. Este sistema, permite uma extensão da banda de frequências mais fácil, com larguras de banda mais abrangentes (por exemplo, a banda A, corresponde às bandas HF e VHF). Os limites das bandas de frequência, são distribuídos quase logaritmicamente[63; 67].

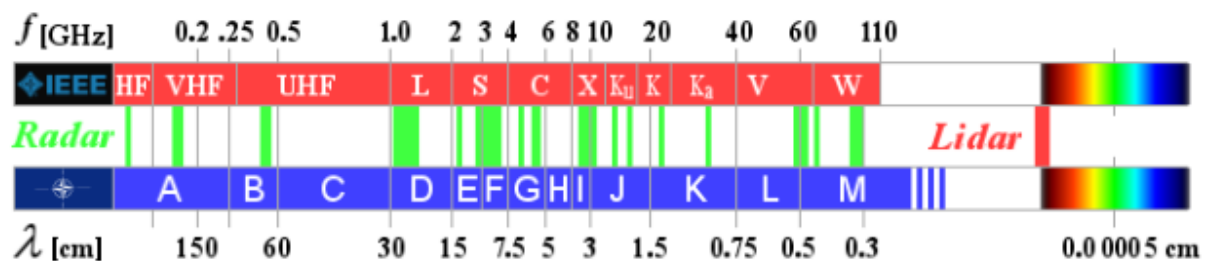


Fig. 3.20 – Banda de frequências usadas pelo radar, adaptado de [63]

As diferentes designações para as bandas de frequência dos radares, são muito confusas. Mas isso não constitui nenhum problema para o engenheiro ou técnico, problema real é por exemplo, afirmar que o gerador de frequência para as bandas I e J, serve também para as bandas X e Ku, e que a banda D interfere com a banda L[63].

A partir do Quadro 3.1, pode-se observar, a grandeza dos intervalos, utilizados nas bandas de frequência da nomenclatura do IEEE, e algumas das suas aplicações. A Fig. 3.21, vem como complemento do Quadro 3.1, e mostra alguns radares com as respetivas bandas de frequência do seu funcionamento.

Quadro 3.1 – Bandas, intervalos de frequência de radares e suas aplicações

Banda	Intervalo de Frequência	Aplicação
HF	3-30 MHz	Radares de longo horizonte, combinam uma gama muito longa e baixa resolução e precisão, utilizada para transmissões por radio.
VHF	30-300 MHz	Grande alcance, baixa a media resolução e precisão, livre de efeitos climatéricos, utilizadas para transmissões de radio e transmissões televisivas.
UHF	300-1000 MHz	
L	1-2 GHz	Grande alcance, com resolução media e efeitos climatéricos ligeiros
S	2-4 GHz	Rastreamento de longo alcance, com precisão media, sujeito a efeitos climatéricos moderados, é utilizada por alguns radares meteorológicos e alguns satélites de comunicação
C	4-8 GHz	Rastreamento de longo alcance, com precisão alta, com os efeitos climatéricos a serem preponderantes, utilizada nas comunicações com satélites
X	8-12 GHz	Rastreamento de longo alcance com clima limpo, sendo reduzido com o agravamento das condições climatéricas, utilizada para comunicação por satélite privada (uso militar)
K_u	12-18 GHz	Rastreamento de pequeno alcance, usado especialmente quando o alcance das antenas é limitado, usadas na comunicação por satélites, sondas espaciais e na comunicação da Estação Espacial Internacional com a Terra
K	18-27 GHz	
K_a	27-40 GHz	
V	40-75 GHz	Curto alcance de comunicação, não é uma banda muito utilizada, exceto para pesquisas de radar de ondas milimétricas e outro tipo de pesquisas científicas
W	75-110 GHz	Alta taxa de transferência de dados quando usada em grandes altitudes e no espaço, é usada em comunicações via satélite, pesquisa de radar de ondas milimétrica, radares militares e algumas aplicações não militares.

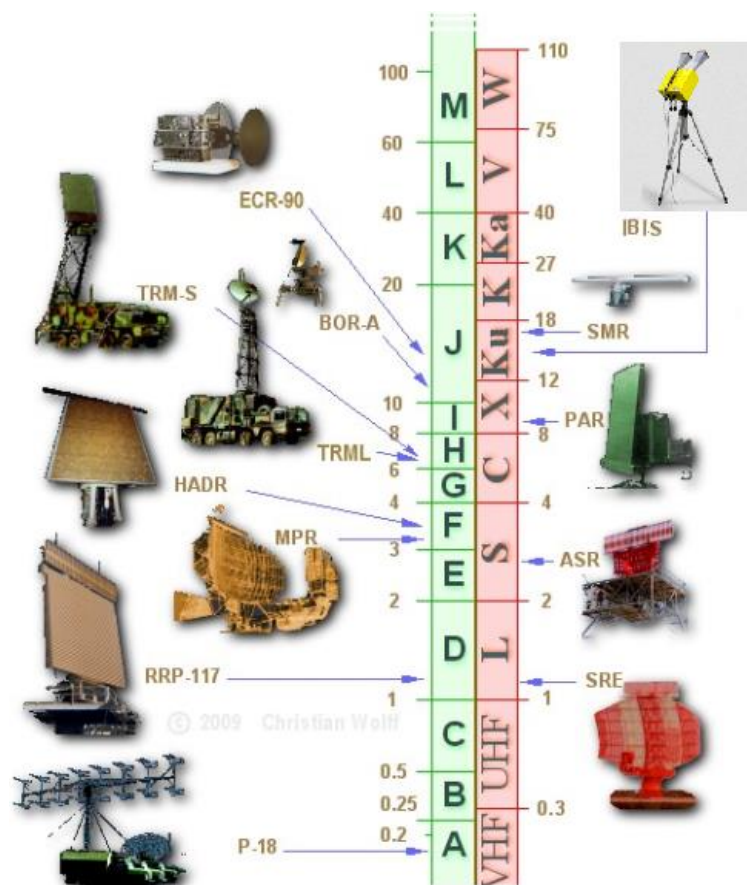


Fig. 3.21 – Radares e suas bandas de frequência [GHz], nos 2 tipos de nomenclatura, adaptado de [63]

4

RADAR INTERFEROMÉTRICO IBIS-FS**4.1 INTRODUÇÃO AO RADAR INTERFEROMÉTRICO IBIS-FS****4.1.1 NOTA INTRODUTÓRIA**

Vários sistemas radar tem sido concebidos ao longo do tempo, uns com maior aproveitamento e sucesso do que outros. Como em todas as áreas estes sofreram vários desenvolvimentos ao longo do último século, que contribuíram significativamente para o aumento do desempenho e precisão dos mesmos. Principais resultados desse desenvolvimento foram os sistemas de RADAR (o sistema base) e os sistemas do LIDAR (*Light Detection and Ranging*). O sistema de RADAR é muito semelhante ao LIDAR, visto que o seu princípio de funcionamento é semelhante, a principal diferença entre eles, é que o sistema de RADAR foca-se apenas na utilização de radiação de micro-ondas (faixa compreendida dentro da faixa das ondas de rádio)[68].

Como referido no Capítulo 2, a necessidade da monitorização na Engenharia Civil foi evoluindo ao longo dos anos, e tem tido um papel muito importante na identificação de anomalias estruturais. As técnicas de micro-ondas demonstram-se como um desses desenvolvimentos, tendo demonstrado ser uma boa ferramenta dentro das monitorizações de estruturas, quando os deslocamentos a considerar são de uma ordem de grandeza de frações de milímetros. A sua capacidade para adquirir dados, para uma posterior análise modal é muito aceitável, não pondo de parte também o problema específico de avaliação do estado de vibração e perda de informação, em edifícios urbanos quando solicitados pelo ruído ambiental.

A capacidade de realização de uma monitorização em serviço, é um requisito fundamental para o planeamento das tarefas, que visam a identificação precoce de problemas estruturais, a fim de permitir que sejam efetuadas ações de manutenção de menor custo possível[69]. A caracterização estática e dinâmica de estruturas torna-se assim de grande importância. As ferramentas mais convencionais de monitorização do comportamento estrutural, são representadas por uma variedade de técnicas (Capítulo 2.3.5). Essa variedade de técnicas são muito viáveis e precisas, mas para a sua função de monitorização é necessário que os sensores que utilizam estejam em contacto com a estrutura. Portanto a escolha do local ótimo para a colocação dos sensores, é o problema comum em muitas das aplicações na engenharia, sendo um “ponto” crítico na implementação do plano de monitorização estrutural. Além disso, durante a monitorização de grandes estruturas podem surgir alguns problemas de acessibilidade, muitas vezes exigindo o uso de ferramentas de acesso mais exigentes. Em certas situações, a colocação de sensores de contacto pode não ser possível, como no caso de estruturas em situação de risco eminente de colapso ou devido a algum tipo de instabilidade, como sismo ou explosão.

Dentro deste contexto, o uso inovador de sistemas com ausência de contacto (*non-contact*) tem sido muito atrativo, e nos últimos anos tem-se desenvolvido sistemas de radar baseados no uso do laser[70]

(como se pode observar na literatura de Ewins, [71]), capazes de realizar testes estáticos e dinâmicos de grandes estruturas, como em pontes, edifícios, barragens, torres eólicas, torres sineiras, etc. Os primeiros sistemas de sensores com ausência de contacto a serem utilizados, foram radares de abertura sintética (*synthetic aperture radar*, *SAR*), estes eram capazes de fornecer bons resultados em medições estáticas de estruturas, mas eram muito limitados (lentos) na deteção do comportamento dinâmico das mesmas[72].

A adaptação das técnicas de radar mais comuns para a avaliação da vibração das estruturas, tem sido estudada por várias equipas de investigadores ao longo da última década e alguns fatores relacionados com as capacidades de medição tem demonstrado ser pontos cruciais para a qualidade da aquisição de dados. Pois quando a vibração é unicamente estimulada pelo vento ou ruído ambiente, a amplitude do deslocamento sofrido pela estrutura é muito pequena, aproximadamente algumas dezenas de micron, e consequentemente exige uma precisão de medição muito elevada por parte do sistema de radar[68]. O recente progresso nas técnicas e sistemas de radar, levou então ao desenvolvimento de um sistema, direcionado para estruturas de Engenharia Civil, na aplicação em testes dinâmicos e vibrações, que tem como principal técnica de funcionamento a interferometria e é denominado de IBIS-FS[73].

4.1.2 DESCRIÇÃO DO RADAR INTERFEROMÉTRICO IBIS-FS

O radar primário de onda contínua modulada, IBIS-FS (*Image By Interferometric Survey of Structures*), apresentado na Fig. 4.1, é um radar interferométrico desenvolvido pela empresa italiana IDS (*Ingegneria Dei Sistemi, Pisa, Itália*) em colaboração com vários parceiros, entre eles, o Departamento de Eletrónica e Telecomunicações da Universidade de Florença, dentro do projeto *PARSANO-MATER* (2001-2010) financiado pelo governo italiano[74].



Fig. 4.1 – IBIS-FS, monitorização torre de Pisa[75]

Além de ser um sistema de ausência de contacto, o sensor do IBIS-FS apresenta entre outras vantagens uma ampla faixa de frequência de resposta, portabilidade e tempos de aquisição muito rápidos.

O equipamento de radar é controlado por um software de gestão, que fornece um conjunto limitado de resultados em tempo real. Para o aumento da capacidade em tempo real e facilidade no acesso a todas as informações recolhidas pelos sensores, foi desenvolvido uma ferramenta de software de pós processamento, visualização e processamento de dados, com o nome de IBISDV (*IBIS Data Viewer*)[76].

As características particulares do IBIS-FS, demonstram que pode operar à distância (até 1km), várias estruturas em simultâneo sem que seja necessário o contato direto com as mesmas e sobre qualquer tipo de condição climática (aparelho resistente à água), conseguindo fornecer de forma contínua praticamente todo o mapa de deformação estrutural (estático ou dinâmico), com grande precisão.

4.2 CAMPO DE APLICAÇÃO E REGULAMENTAÇÕES

A versão FS do sistema IBIS, tem um uso direcionado para o campo da monitorização quási-estática e dinâmica de estruturas. Quanto às restrições nacionais, em países Europeus, o sistema IBIS-FS foi classificado pelas administrações da CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications*) como um dispositivo de baixo alcance (*Short Range Device, SRD*), isto é, um aparelho que não causa interferência com outros sistemas que operam na mesma banda de frequências (X ou Ku). O IBIS-FS está incluído também na recomendação ERC 70-03 que define os equipamentos SRD[75].

Para bandas de frequência Ku, o uso do sistema IBIS-FS fora de laboratório, pode estar sujeito a uma autorização por parte do Ministério competente do país onde está a ser efetuado o uso do sistema. Já para frequências na banda X, quase todos os países europeus tem aplicada a recomendação ERC 70-03, causando assim menores dificuldades no uso do sistema IBIS-FS[75].

Este equipamento está em conformidade com os requisitos fundamentais e outras disposições relevantes da diretiva 1999/5/EC.[75]

4.3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO IBIS-FS

O IBIS-FS, representado na Fig. 4.2, é um sistema de radar que tem vindo a ser desenvolvido, e tem por base a seguinte constituição: módulo de sensor, um computador de controlo (PC) e um conjunto de baterias.



Fig. 4.2 – Radar IBIS-FS

Legenda:

1. Módulo de sensor;
2. Computador de controlo;
3. Bateria.

A sua compacidade torna-o mais fácil de transportar em qualquer tipo de terreno, e pode ser usado tanto de dia como de noite e em todo o tipo de condições climáticas. A sua instalação torna-se análoga à montagem de uma câmara digital, sobre um tripé com uma cabeça rotativa em 3 direções, facilitando o ajuste do sensor à posição mais favorável para a monitorização da estrutura.

O módulo de sensor tem um peso de aproximadamente 12 kg, incluindo as duas antenas de transmissão e receção de ondas eletromagnéticas, e é gerido por um computador de controlo, através de uma ligação USB 2.0. O software de controlo do sistema, é utilizado para a configuração dos parâmetros de aquisição, armazenamento de dados, e exibição dos deslocamentos em tempo real. Tanto o módulo de sensor como o computador dispõe ainda de duas unidades de bateria externas, com uma autonomia de 5 a 6 horas cada unidade.

O comportamento do radar depende fortemente do tipo de medição desejada, bem como das condições de operação (nomeadamente, material constituinte e forma da estrutura a examinar, cenário circundante). No entanto o desempenho do radar pode ser resumido como se segue:

- Máximo alcance: 1Km;
- Resolução de alcance máxima: 0,5m;
- Frequência máxima de amostragem (taxa máxima de aquisição de energia): 200 Hz (depende do máximo alcance selecionado);
- Precisão de medição de deslocamentos: 0.01-0.1mm (depende do alcance)

As suas principais características são:

- Frequência central: 17.2 GHz;

- Máxima largura de banda: 300 MHz;
- Número de pulsos na banda: 1-32767;
- Duração de pulso: 10-218 μ s;
- Energia de frequência de radio emitida: 4 dB m;
- Taxa de amostragem de medição: 1/(numero de saltos (steps) x duração de pulso);
- 2 Baterias: 24 V;
- Energia: 25 W;

4.3.3 HARDWARE

4.3.3.1 Módulo de Sensor

O módulo de sensor do IBIS-FS, é a unidade que contém todos os componentes de geração, transmissão, receção e aquisição dos sinais do radar. O sensor tem como estrutura, uma caixa metálica amarela de dimensões 375x270x115mm e está representado nas Fig. 4.3, Fig. 4.4, Fig. 4.5.

O sensor apresenta as seguintes características:

- 1 entrada fêmea USB 2.0 do tipo A na parte traseira do sensor (Fig. 4.4);
- 1 entrada de energia macho de 12 polos na parte traseira do sensor (Fig. 4.4);
- 2 entradas para as antenas na parte frontal do sensor (Fig. 4.3);
- 1 suporte de mira ótica na parte superior do sensor (Fig. 4.3 e Fig. 4.6);
- 1 encaixe para permitir a fixação do sensor ao tripé, na parte inferior do sensor (Fig. 4.5);
- 4 encaixes para fixação de um suporte do IBIS-FL (Fig. 4.5).

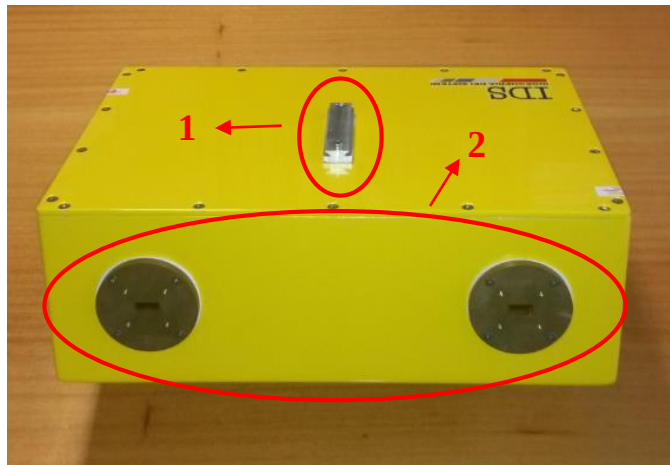


Fig. 4.3 – Vista Frontal do sensor



Fig. 4.4 – Vista Traseira do sensor



Fig. 4.5 – Vista Inferior do sensor



Fig. 4.6 – Mira telescópica

Legenda:

1. Suporte de mira telescópica;
2. Entradas de Antenas;
3. Porta USB;
4. Porta de Alimentação;
5. Encaixes para configuração IBIS-FL;
6. Encaixe de ligação ao tripé.

4.3.3.2 Antenas

O sistema IBIS-FS, é equipado com duas antenas do tipo IBIS-ANT3, como se pode observar na Fig. 4.7, estas operam em polarização vertical (a polarização de uma onda eletromagnética é o plano no qual se encontra a componente elétrica deste tipo onda, para um maior esclarecimento desta matéria sugere-se a consulta da seguinte bibliografia [77]) e são caracterizadas por um ganho máximo de 19dBi (o dB (decibel) é utilizado como uma unidade de medida de vários níveis de potência de forma relativa, já a unidade de dBi (decibel isotrópico) é utilizado para medir o ganho de uma antena isotrópica[78]).

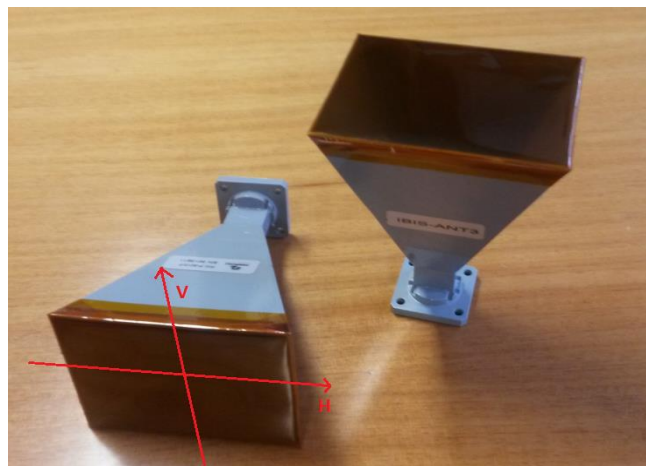


Fig. 4.7 – Par de antenas, IBIS-ANT3

O diagrama de radiação representa graficamente o comportamento da antena durante a radiação. Apesar da radiação ser tridimensional, esta é representada separadamente na horizontal e vertical. O diagrama de radiação pode ter representação cartesiana (Fig. 4.8) ou polar e é constituído por um lóbulo principal (representa o ângulo ou setor, também chamado de meia potência, onde a antena concentra a maior parte da sua energia), lóbulos secundários e lóbulo traseiro. As características de amplitude do lóbulo principal (*main lobe*) das antenas a -3dB e -10dB são visíveis no Quadro 4.1, e os seus padrões, horizontal e vertical, são demonstrados na Fig. 4.8.

Quadro 4.1 – Amplitude do lóbulu principal das antenas IBIS-ANT3 a -3dB e -10dB, adaptado de[75]

IBIS-ANT3	Plano Horizontal	Plano Vertical
-3dB	17°	15°
-10dB	34°	45°

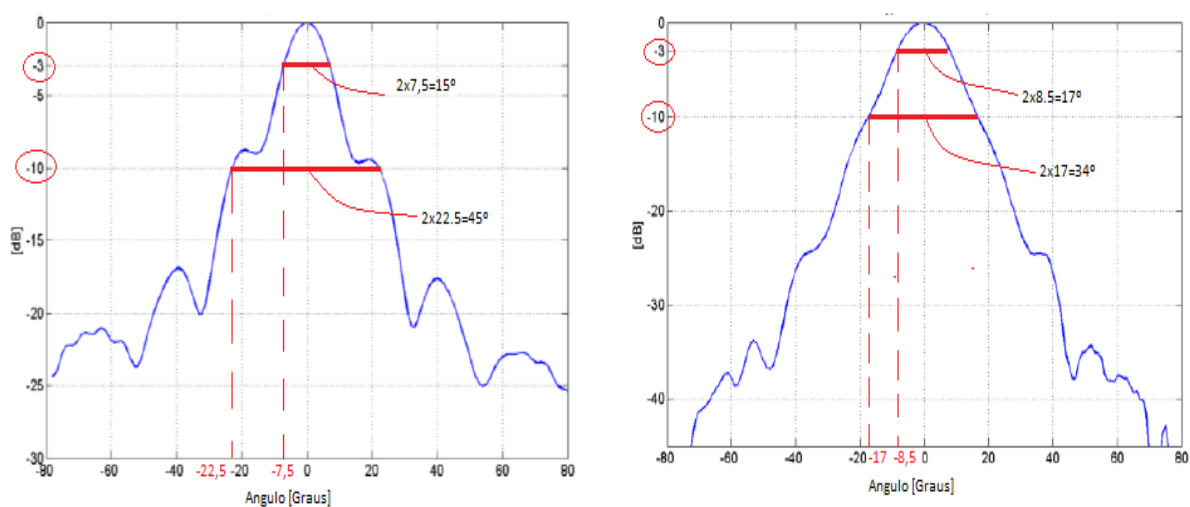


Fig. 4.8 – Diagramas de radiação retangulares (cartesiano) com padrão de radiação no plano vertical (à esquerda) e plano horizontal (à direita) das antenas IBIS-ANT3, adaptado de [75]

Por vezes a geometria da estrutura a analisar requer maiores ou menores áreas de abrangência das antenas, nesses casos estas podem ser substituídas por outro tipo. Os vários tipos de antenas para o sistema IBIS-FS estão resumidos no Quadro 4.2, para as bandas de frequência, Ku e X.

Quadro 4.2 – Características das antenas de banda, Ku e X, adaptado de [75]

Modelo de Antena	Ganho [dBi]		Abertura no Plano Horizontal [Graus]	Abertura no Plano Vertical [Graus]
Banda Ku				
IBIS-ANT1-H38V18	15	-3dB	38	18
		-10dB	70	30
IBIS-ANT2-H29V25	14	-3dB	29	25
		-10dB	53	49
IBIS-ANT3-H17V15	19	-3dB	17	15
		-10dB	34	45
IBIS-ANT4-H11V10	22	-3dB	11	10
		-10dB	23	30
IBIS-ANT5-H12V39	18	-3dB	12	39
		-10dB	25	69
IBIS-ANT6-H51V20	18	-3dB	51	20
		-10dB	76	59
Banda X				
	21	-3dB	15	15
		-10dB	27	25

4.3.3.3 Tripé e cabeça rotativa

O dispositivo de suporte do módulo de sensor IBIS-FS, é constituído por um tripé (Fig. 4.9), e uma cabeça rotativa (3D)(Fig. 4.10). O módulo de sensor é fixado à cabeça rotativa, seguindo-se uma posterior montagem do conjunto no tripé (devidamente nivelado e fixado ao terreno), através de um mecanismo de fecho rápido.



Fig. 4.9 – Tripé IBIS-FS

O tripé de alumínio, tem um peso aproximadamente de 4,3Kg e a sua altura a partir do solo pode variar entre os 43cm e 188cm. A cabeça rotativa tem um peso aproximadamente de 1,9Kg, tem uma rotação azimutal de 360°, uma rotação lateral que varia entre -30° e +90°, e uma rotação vertical que varia entre -25° e 90°[75].



Fig. 4.10 – Cabeça Rotativa (Rotação 3D)

Legenda:

1. Nível de bolha;
2. Rotação Horizontal (rotação em y);
3. Rotação Azimutal (rotação em z);
4. Rotação Vertical (rotação em x).

4.3.3.4 Computador de Aquisição e Controlo

O sistema IBIS-FS vem equipado com um *PC Touchbook Panasonic CF-19 Shook Proof*, como se pode observar na Fig. 4.11. Este contém um sistema de aquisição e controlo de dados pré-instalado, *IBIS-S Controller v.02.01.004*. O computador é principalmente caracterizado pela sua alta resistência, com semelhança a dispositivos militares, resistente ao choque e a água. Sendo estas características também comuns aos cabos conectores, representados na Fig. 4.12[75].

Tanto o módulo de sensor como o computador de controlo são alimentados por duas unidades de baterias, na figura Fig. 4.13 pode observar-se uma das suas unidades de 12V.



Fig. 4.11 – Computador de Aquisição e Controlo



Fig. 4.12 – Pormenorização dos cabos conectores, USB de transmissão de dados (à esquerda), de transmissão de energia (à direita)



Fig. 4.13 – Unidade de fonte de alimentação, 12V

Na Fig. 4.14 pode observar-se o esquema de montagem de ligação de todos os componentes atrás mencionados.

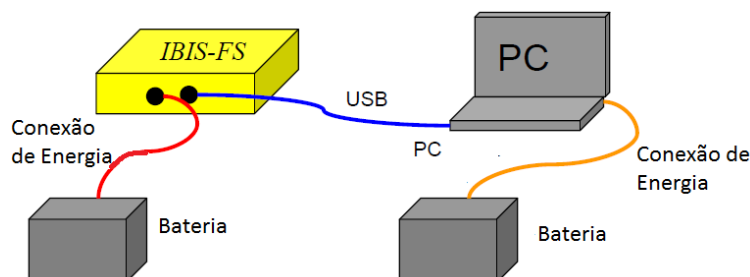


Fig. 4.14 – Esquemática da conexão dos elementos de Hardware IBIS-FS

4.3.4 SOFTWARE

Como mencionado em 4.3.3.4, o computador de controlo é equipado com um software pré-instalado de aquisição e visualização dos dados, recolhidos em tempo real. As capacidades de pré-processamento do programa fornecem o acompanhamento da evolução temporal da deflexão de alguns pontos da estrutura, permitindo uma verificação correta das condições do ensaio. A sua interface é a apresentada na Fig. 4.15.

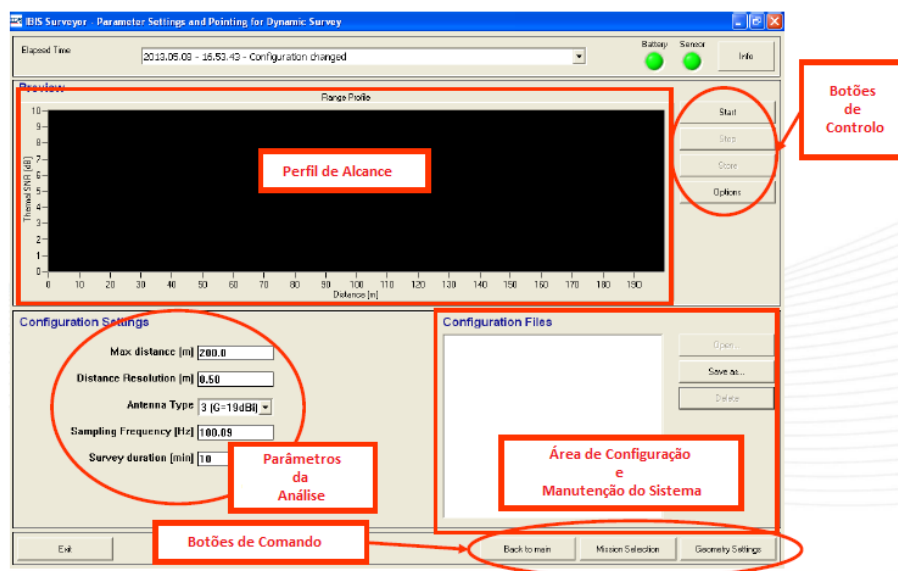


Fig. 4.15 – Interface do IBIS-S Controller v.02.01.004

Após a aquisição de dados, o seu tratamento requer outro tipo de software, devido às limitações do software de controlo no pós-processamento. O software fornecido pela IDS S.p.a, é o visualizador de dados IBIS (*IBIS Data Viewer*, *IBISDV*). O IBISDV é um software desenvolvido em MATLAB e fornece ao utilizador uma interface gráfica (*Graphical User Interface*, *GUI*)[76]. Este software está

preparado para guiar o utilizador, desde a leitura dos dados do radar até à extração dos deslocamentos ao longo do tempo.

O procedimento operacional do software pode ser dividido em 3 passos, como indicado na Fig. 4.16, o primeiro consiste na criação do projeto, seguido da etapa de processamento de dados, a última etapa está relacionada com a análise, visualização, e exportação de resultados.

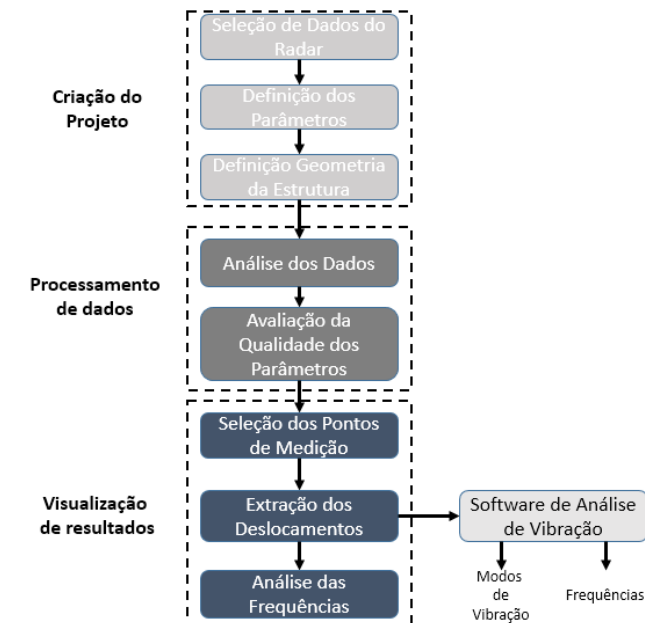


Fig. 4.16 – Fluxograma do pós-processamento do software IBISDV, adaptado[76]

O IBISDV possibilita a configuração de alguns parâmetros de projeto fundamentais para as etapas subsequentes. Especificamente, devem ajustar-se alguns parâmetros que afetam o processamento da transformada inversa discreta de Fourier (IDFT) e refinar os dados inseridos na definição da geometria[76].

A configuração da geometria de aquisição tem por objetivo auxiliar a identificação dos pontos de medição ao longo da estrutura analisada. Como se pode observar a partir da Fig. 4.17, o IBISDV fornece uma forma simplificada de definir a geometria de aquisição, em que a estrutura analisada é esboçada como uma linha reta com possibilidade de configuração do comprimento da estrutura, inclinação da estrutura e posição do sensor.

Uma vez definida a geometria segue-se o processamento dos dados. Observando a Fig. 4.18, é necessário fazer uma escolha dos pontos “ótimos” da estrutura para uma posterior análise modal. Os pontos “ótimos” da estrutura geralmente correspondem aos maiores picos do gráfico de energia (*Signal Noise Ratio*, SNR), mas em contrapartida se o cenário onde está inserida a estrutura possuir muito ruído, esses picos podem não corresponder a pontos da mesma estrutura, daí um cuidado necessário durante a análise e seleção dos pontos.

Após a seleção dos pontos de medição, são visualizados e extraídos os deslocamentos da estrutura ao longo do tempo de monitorização. Para estudos mais abrangentes, os dados extraídos podem ser facilmente importados para softwares de processamento mais avançados, como o exemplo do

ARTEMIS. No caso em que se pretenda determinar, de uma forma mais direta, apenas as frequências naturais e os modos de vibração, pode-se recorrer ao IBISDV.

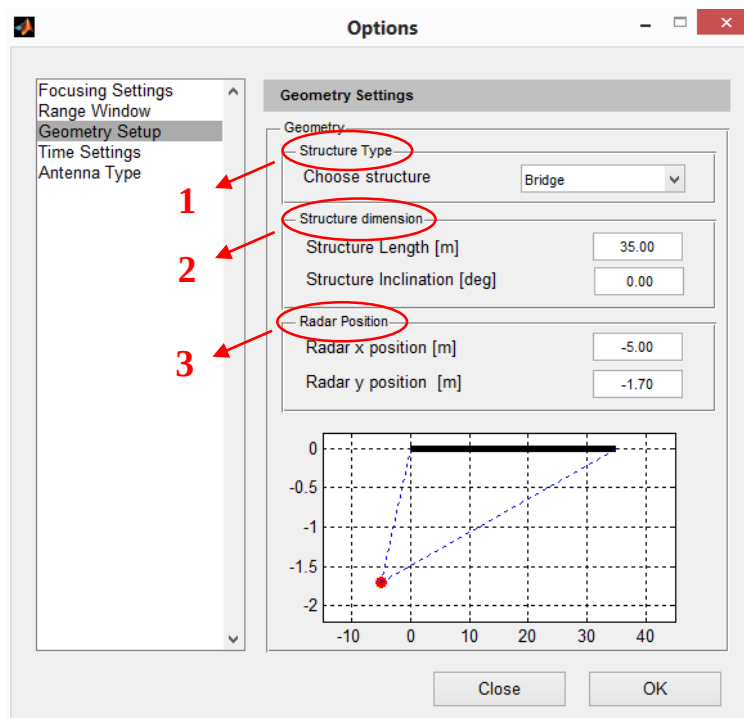


Fig. 4.17 - Definição de Geometria

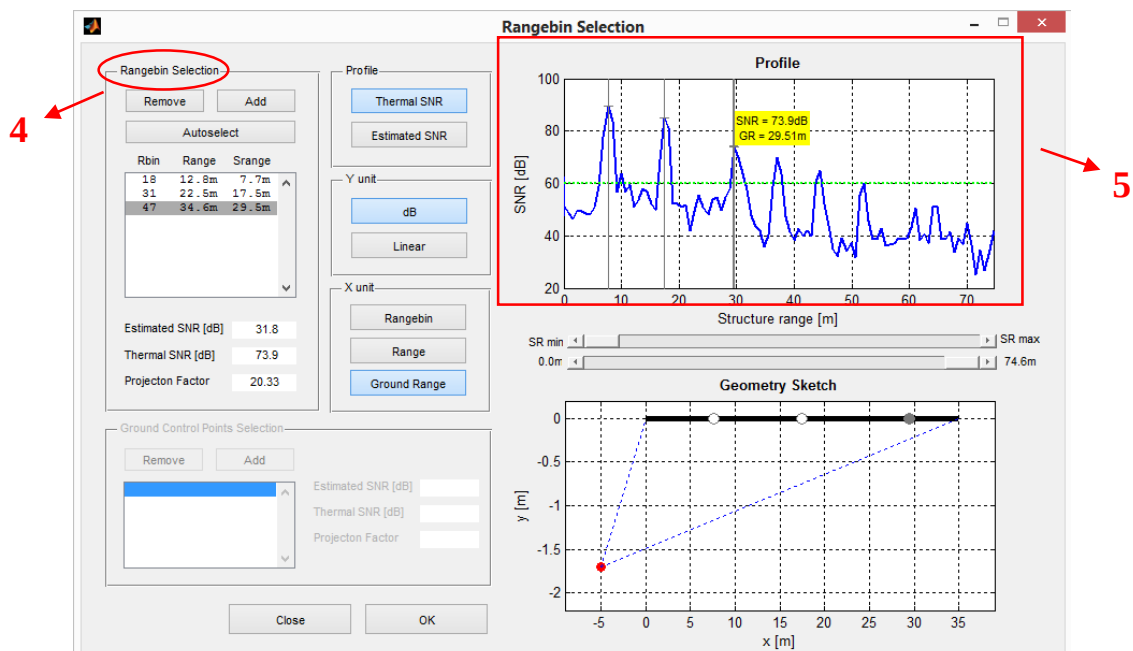


Fig. 4.18 – Fase de seleção dos pontos de medição

Legenda das Fig. 4.17 e Fig. 4.18:

1. Seleção do tipo de estrutura (ponte ou torre);
2. Dimensões da estrutura (comprimento (m) e inclinação (graus));
3. Posição do radar em relação ao ponto inicial da estrutura, em x e y;
4. Seleção dos pontos da estrutura;
5. Gráfico de energia dos pontos medidos (de referencia) na estrutura.

4.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO IBIS-FS

Como já mencionado no capítulo 3, a característica mais importante e particular de um radar convencional, é a sua capacidade de determinar distâncias. O radar IBIS-FS, não foge à regra, mas com a particularidade de conseguir efetuar medições de deslocamentos de pontos de uma estrutura ao longo do tempo. O IBIS-FS é um radar de micro-ondas, capaz de medir remotamente (operando à distância) a resposta de uma estrutura a partir de zonas onde se verificam concentrações de energia (medição simultânea), com grande precisão (sub-milimétrica) sem qualquer tipo de pré-instalação de sensores sobre a estrutura[70]. O radar usa o tempo decorrido entre a transmissão e receção de uma onda eletromagnética (dentro do feixe de abertura) para a localização de alvos (que refletem a radiação com diferentes intensidades e fase).

O radar IBIS-FS geralmente funciona dentro da banda de frequências Ku (mencionada no subcapítulo 3.4) com 17.2 GHz, ou seja, 1.74cm de comprimento de onda, permitindo obter uma grande resolução de alcance. Devido à sua grande taxa de aquisição (radiação eletromagnética, micro-ondas) e estabilidade a longo prazo, estes sistemas de radar são capazes de realizar tanto ensaios dinâmicos como ensaios estáticos, fornecendo num pós processamento dos dados, informações sobre as frequências naturais, amortecimentos críticos, deformações, modos de vibração, entre outros.[69]

O funcionamento do radar IBIS-FS, baseia-se na deteção simultânea da posição e deflexão de diferentes alvos (pontos, objetos, etc), situados a diferentes distâncias do radar. Para tal, combina duas técnicas muito utilizadas em sistemas de radar, sendo elas:

1. Onda contínua com passo de frequência (*Stepped-Frequency Continuous-Wave, SF-CW*), usada para diferenciar a posição dos diferentes alvos ao longo da linha de visão do radar;
2. Interferometria, usada para o cálculo do deslocamento de cada alvo através de comparação de informação da fase das ondas eletromagnéticas recebidas em diferentes instantes.

A técnica de interferometria surgiu recentemente como uma tecnologia inovadora, apropriada para a medição da vibração de estruturas de grande escala (sendo as pontes e as torres, o tipo de estrutura que mais frequentemente faz uso do radar IBIS-FS, tanto para análise dinâmica como para estática). As principais funções de um radar interferométrico, são a deteção simultânea da posição e da deflexão de diferentes pontos, situados a distâncias diferentes a partir do sensor do radar[76].

A técnica de SF-CW, proporciona ao radar IBIS-FS outra das suas características fundamentais, uma grande resolução de deslocamentos, que se obtém a partir de qualquer observação que seja efetuada com o aparelho, dentro dos limites de funcionamento do mesmo[79]. É uma técnica usada para a deteção da posição dos diferentes pontos, colocados ao longo da linha de vista do radar (*Line of Sight, LOS*).

Na Fig. 4.19 pode observar-se um exemplo de uma monitorização estrutural com a aplicação do sistema IBIS-FS. Na realização da monitorização de um edifício, os diferentes picos obtidos (gráfico de medições) correspondem a diferentes pontos da estrutura, localizados a distâncias diferentes.

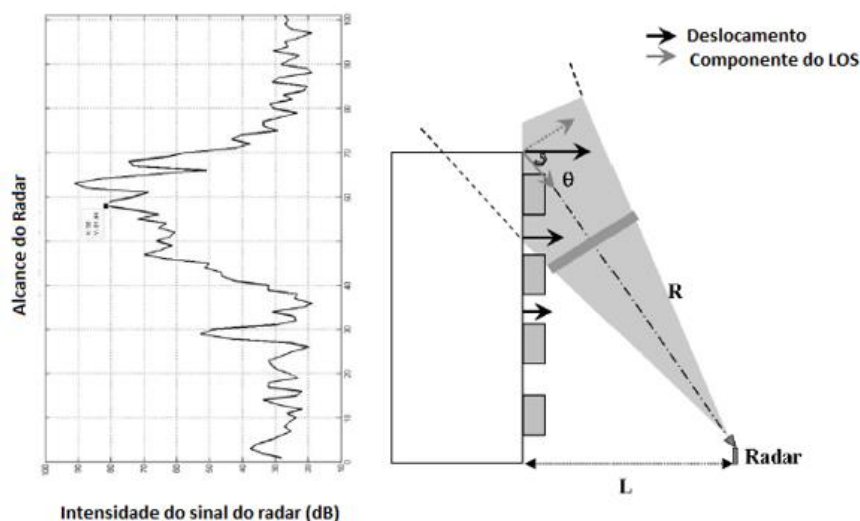


Fig. 4.19 – Esquema de um sistema de aquisição de um radar, gráfico de medição de um perfil (à esquerda), e geometria no plano de projeção (à direita), adaptado de [68]

A área do feixe de abertura (cone de visualização) do sensor de radar, é constituída por várias células radiais (*range bins*) distanciadas entre si pela resolução radial (*range resolution*). A Fig. 4.19 demonstra apenas o feixe de abertura, as células radiais e a resolução radial são temas que serão abordados nos seguintes subcapítulos.

Os deslocamentos esperados de uma construção, estimulados apenas por vibração ambiental, podem ser da ordem de grandeza de algum micron, e para a sua deteção o radar IBIS-FS recorre à técnica de interferometria, que pode estimar variações de distância (a partir do ângulo de fase dos sinais) mas apenas na linha de visão do radar (*Line of Sight, LOS*)[68]. Tem de se ter em conta também que apenas medições diferenciais podem ser realizadas e não absolutas. Por isso, é necessário definir com precisão a geometria da estrutura (Fig. 4.19) antes de se executar as monitorizações.

A partir da Fig. 4.21, a explicação do princípio de funcionamento do radar IBIS-FS torna-se mais evidente. O radar emite micro-ondas com uma dada frequência (que depende do tipo de antena que está a ser usada pelo sensor), essas ondas vão ser refletidas na estrutura, voltando novamente ao radar para que possa ser feito o processamento da onda de resposta (eco). As ondas refletidas vão ter mais ou menos qualidade, dependendo dos pontos de reflexão da estrutura. Este tipo de radar tem como pontos de reflexão ótimos, material de origem metálica (parafusos, perfis, soldaduras). Apesar de estruturas de betão ou de alvenaria não serem de origem metálica, o radar também consegue obter reflexões desses tipos de material, mas nesses casos o sinal recebido não é de tão boa qualidade (não tem tanta energia de reposta, o valor de SNR é mais baixo). É ainda de ressaltar que as estruturas de madeira não são cooperativas com este tipo de sistema, ou seja, a sua refletividade é quase nula, sendo o pior caso para a monitorização com sistemas de radar.

A superfície estrutural é também um fator que pode condicionar os dados obtidos com o IBIS-FS, cada uma das discontinuidades da superfície pode significar uma fonte de reflexão ou difusão das ondas eletromagnéticas provenientes do radar (gerando assim um eco), desde que as suas dimensões sejam maiores ou iguais ao comprimento de onda do radar. Isto porque, as propriedades refletoras estão diretamente relacionadas com a sua geometria e as características dielétricas do material constituinte[68]. Uma estrutura que apresente uma superfície rugosa será certamente mais favorável do que uma estrutura com superfície lisa. Isto significa que dentro do feixe de abertura, cada célula radial

que contenha um eco com intensidade suficiente (com boa refletividade ou distinguível do ruído instrumental), será tida em conta e passará a ser um sensor virtual de deslocamentos do IBIS-FS.

Na Fig. 4.20, pode observar-se o local típico (exemplo de uma ponte) de posicionamento do aparelho, para que possam ser detetados os potenciais pontos de reflexão (interseções entre vigas, longitudinal e transversal, parafusos, soldaduras e zonas de canto, que atuam como sensores virtuais).



Fig. 4.20 – Posicionamento típico do radar, pontes, adaptado de [76]

O radar mede deslocamentos na sua linha de visão (LOS), ou seja realiza a medição de deslocamentos radiais (d_r). Posteriormente os dados recolhidos (vários pontos da estrutura) terão de ser tratados, por meio de uma projeção geométrica para se obter os deslocamentos reais dos pontos (d). Esse tratamento de dados vai depender da geometria adotada na monitorização, visível na Fig. 4.19. Os parâmetros a ter em conta são sempre no plano que se pretende monitorizar. No caso da Fig. 4.21, representativa de um troço do tabuleiro de uma ponte, os parâmetros que terão de ser definidos são, o *tilt* (ângulo α , rotação vertical) e o h (altura entre o alvo e o sensor).

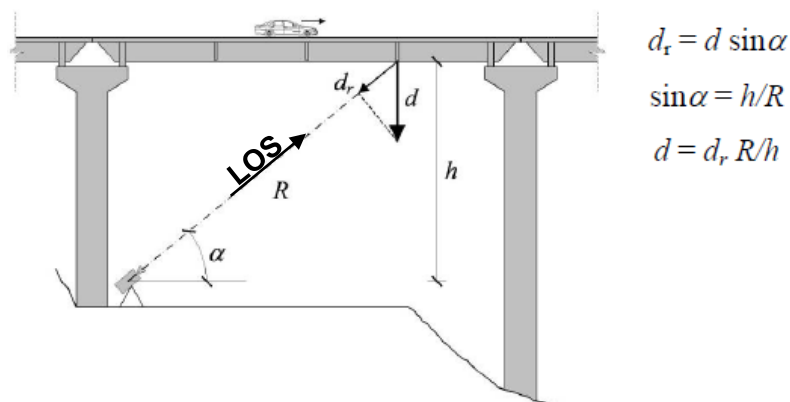


Fig. 4.21 – Deslocamento radial, d_r , versus deslocamento real (projetado) d , adaptado de [80]

Quando uma das células radia, está a uma distância R do radar e inclui um único alvo em vibração, cujo deslocamento é dado em função do tempo $d(t)$, a resposta do radar é dada pelo campo eletromagnético E de acordo com a expressão (4.1)[68].

$$E = KSe^{-j\frac{4\pi}{\lambda}(R + \frac{R \times d(t)}{R} + R_{inst})} \quad (4.1)$$

Sendo λ o comprimento de onda (que está relacionado com a velocidade da luz c), K e R_{inst} são parâmetros do aparelho, S é o coeficiente que tem em conta as características de reflexão do alvo (*backscattering*) e j é a unidade imaginária. A fase da onda de propagação está linearmente relacionada com a variação da distância entre o sensor e o alvo. Os termos constantes R_{inst} e R , deixam de ter influência no cálculo, quando se pretende calcular a variação de fase ao longo do tempo numa célula radial específica, enquanto o termo restante está diretamente relacionado com o deslocamento devido às vibrações na linha de visão (LOS) do radar[68]. A relação entre a fase interferométrica e a variação da distância na linha de visão do radar d_{LOS} , é conhecida como a relação básica interferométrica expressa em (4.2).

$$d_{LOS}(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi(t) \quad (4.2)$$

É altamente recomendável encontrar o melhor sinal de resposta (SNR), mudando o ângulo de observação do radar, antes de se monitorizar qualquer estrutura ou edificação. Isto porque o aumento da precisão que é possível obter em medições de fases está diretamente relacionado com o sinal de resposta (SNR)[68].

4.4.1 ONDA CONTÍNUA COM PASSO DE FREQUÊNCIA

A técnica de modulação de Onda contínua com passo de frequência, permite evitar a necessidade de instalar dispositivos de medição sobre a estrutura. O fator relevante desta técnica, é a obtenção de um mapa de deslocamentos de vários pontos da estrutura (sensores virtuais). Na verdade, as medições são efetuadas em pequenas heterogeneidades ou descontinuidades da estrutura (tal como zonas de canto, interseção das vigas transversais e longitudinais do tabuleiro de uma ponte), onde incidem as ondas eletromagnéticas. Em casos, em que a refletividade da estrutura não é suficiente ou quando é necessário observar pontos específicos, recorre-se ao uso simples de cones refletores (*corner reflectors*, *CR's*)[81], que seguem as características apresentadas no Quadro 4.3.

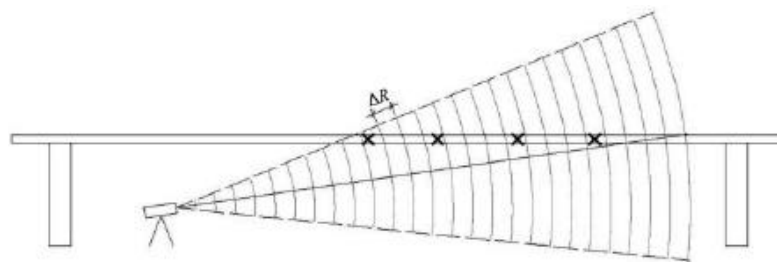


Fig. 4.22 – Cone refletor e respetivo apoio de ligação utilizados nos casos de estudo

Quadro 4.3 – Características dos Refletores

Distância de medição	Tipo de face	Dimensão do lado
0-50m	Triangular	20cm
50-100m	Triangular	24cm
>100m	Quadrada	24cm

No caso de um sistema de radar abranger dois ou mais alvos dentro do feixe de abertura, terá a capacidade de os distinguir individualmente, se os ecos de resposta (ondas refletidas nos alvos) tiverem diferentes energias. Um dos conceitos utilizados pelo radar para efetuar essa distinção é a resolução de alcance ou resolução das células radiais (*range resolution*, ΔR), conceito ilustrado na Fig. 4.23, e corresponde à distância mínima que o radar é capaz de medir entre dois alvos ao longo da sua linha de visão (distância entre as células radiais). Cada célula radial que contenha um eco com intensidade suficiente (distinguível do ruído instrumental), será tida em conta e passará a ser um sensor virtual de deslocamentos. Acima da distância ΔR os alvos são distinguíveis pelo sistema.

Fig. 4.23 - Conceito de resolução radial (*range resolution*), adaptado de [81]

Nos radares de pulso clássicos, a resolução das células radiais ΔR , está diretamente relacionada com a duração de pulso τ , de acordo com a expressão (4.3)[74; 76].

$$\Delta R = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (4.3)$$

Onde c representa a velocidade da luz no espaço. Desde que Jr.Marple considerou que $\tau = \frac{1}{B}$ [82], a resolução de alcance passou a ser expressa como na equação (4.4)[74; 76].

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (4.4)$$

As equações (4.3) e (4.4) demonstram que o aumento da gama de resolução radial (que corresponde a um valor numérico menor) pode ser obtida através da diminuição de τ ou do aumento de B (expressão (4.6)).

A técnica de SF-CW explora este último conceito aumentando a resolução de alcance através do uso sinais de grande largura de banda, em vez do recurso a pulsos de curta duração. A técnica é baseada na transmissão de um derrame (*burst*) de N pulsos monocromáticos, normalmente chamados de tons (*tones*), cujas frequências sofrem aumentos lineares (em passos discretos), pulso a pulso, pelo constante incremento de frequência Δf , como se pode observar na Fig. 4.24, e são definidos pela expressão (4.5).

$$N = \frac{2R_{max}}{\Delta R} \quad (4.5)$$

Um sinal SF-CW reproduz ao mesmo tempo uma largura de banda estreita (correspondente ao pulso individual), alcançando posteriormente uma grande largura de banda (conjunto de todos os N pulsos), como se pode observar na Fig. 4.24. Na expressão (4.6) B representa a largura total de banda após todos os incrementos de frequência (largura da banda de frequências emitida e recebida pelo radar)[74; 76].

$$B = (N - 1) \cdot \Delta f \quad (4.6)$$

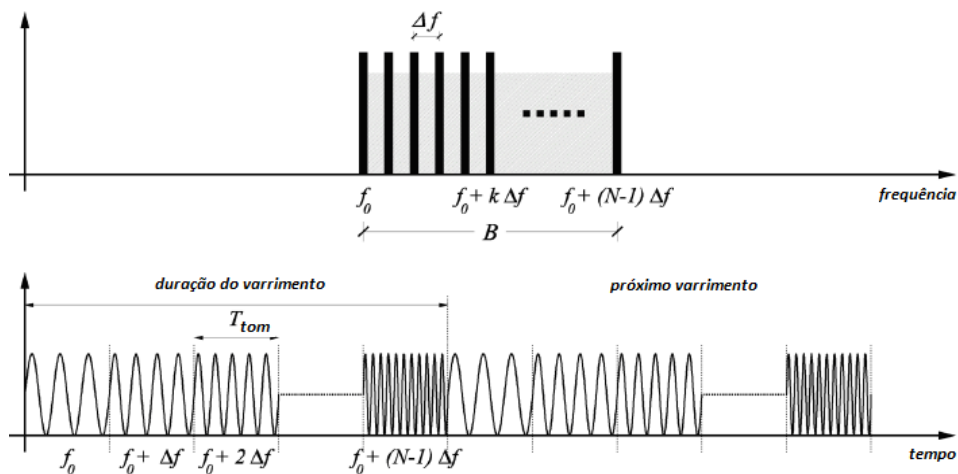


Fig. 4.24 – Aplicação da técnica SF-CW, às ondas de sinal, no domínio da frequência (em cima), e no domínio do tempo (em baixo), adaptado de [76]

Num radar de SF-CW a fonte de sinal reside em cada frequência f_k (com $f_k = f_0 + k\Delta f$ ($k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$)), o tempo suficiente para permitir que o sinal de resposta do alvo mais distante alcance o recetor (como se pode observar na Fig. 4.25), ou seja o tempo programado (expressão (4.7)) permite que o radar receba a resposta do alvo mais distante, antes que seja transmitido um novo tom. Assim conclui-se que a duração de cada pulso T_{tom} (expressão (4.7)), depende da distância máxima R_{max} a ser monitorizada[74; 76; 81].

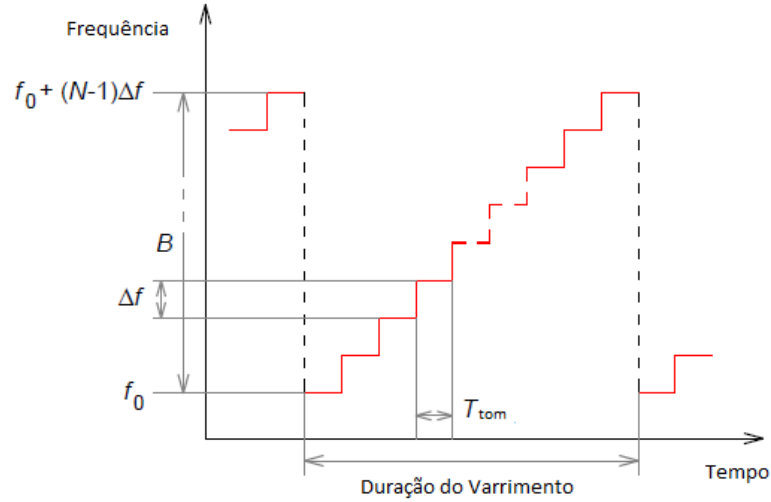


Fig. 4.25 – Relação entre frequência e tempo, na modulação SF-CW, adaptado de [81]

$$T_{tom} = \frac{2R_{max}}{c} \quad (4.7)$$

Por consequência, a duração de cada varrimento é $T_{varrimento} = NT_{tom}$. No final de cada varrimento, o sensor adquire uma amostra complexa de sinais refletidos (ecos) S_k ($k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$), passando os dados obtidos em cada intervalo de tempo $T_{varrimento}$ a consistir um vetor de N amostras complexas, como se pode observar na equação (4.8).

$$S_k = I_k + jQ_k \quad (4.8)$$

Com I_k e Q_k a representarem os componentes de fase e quadratura, respetivamente, dos sinais recebidos. Estes componentes são adquiridos pelo sistema resultando num vetor N das amostras complexas, que representa a frequência de resposta das N frequências discretas medidas[69; 76; 83].

Através da transformada inversa discreta de Fourier (*Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT*), a resposta é reconstruída no domínio do tempo do radar. A k -ésima amostra complexa, no domínio do tempo, corresponde ao eco proveniente a partir do intervalo (distância) $k\Delta R = k(\frac{c}{2B})$. Para uma melhor compreensão da aplicação numérica da IDFT num radar SF-CW, sugere-se a leitura do artigo (*Continuous-Wave Stepped-Frequency Radar for Target Ranging and Motion Detection*,[83]).

A avaliação dos sinais através da IDFT, geralmente é referida como um processo de centragem ou focagem, porque centra os sinais recebidos em N células de resolução diferentes. O processo está resumido na Fig. 4.26.

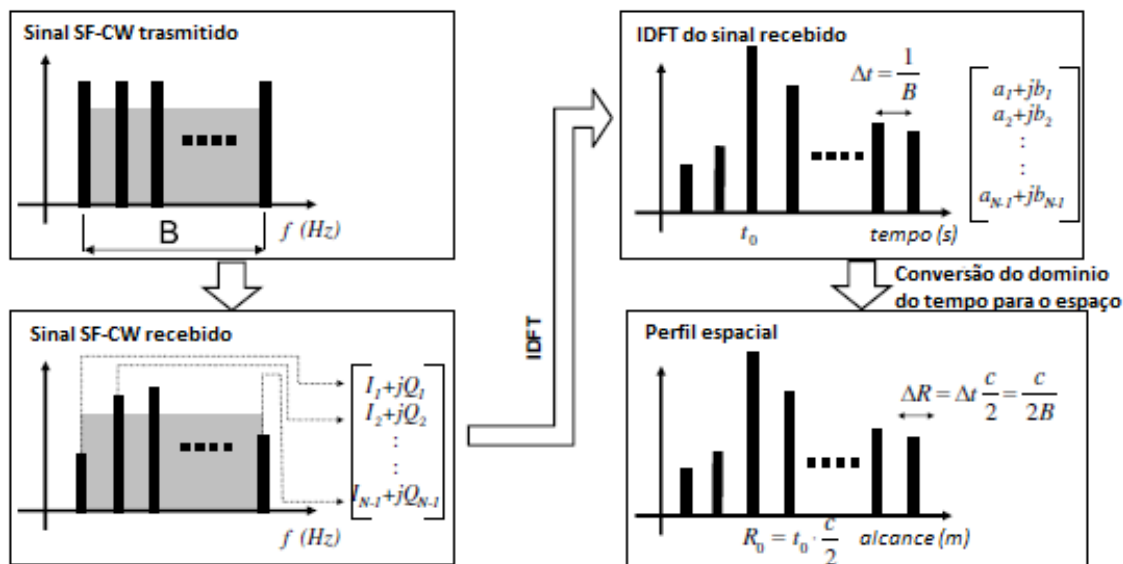


Fig. 4.26 – Processo de focagem, adaptado de [76]

O perfil de variação de amplitude dos ecos de radar, representado na Fig. 4.27, é obtido através do cálculo da magnitude da IDFT dos vetores de amostras adquiridos, resultando num mapa de dispersão unidimensional (1D) dos alvos, que se encontram no espaço iluminado pelos feixes de abertura das antenas, em função da sua distância a partir do sensor. O conceito de perfil espacial (*range profile*) é mais perceptível na Fig. 4.27 onde é ilustrado um perfil espacial ideal, como o esperado, quando o feixe das antenas intersesta vários alvos com diferentes ângulos e distâncias em relação ao eixo do sistema. Os picos representados no gráfico do perfil da Fig. 4.27, correspondem aos pontos de “boas” medições (ou seja, pontos com boa refletividade eletromagnética)[74; 76; 84].

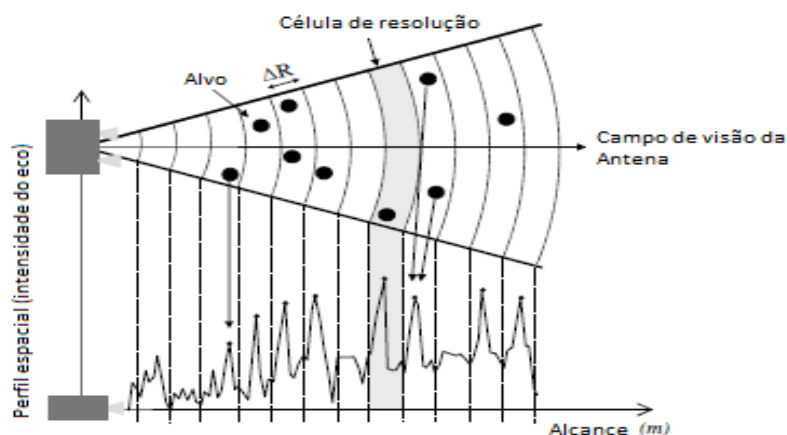


Fig. 4.27 – Perfil espacial de variação de amplitude dos ecos (em baixo), e planta espacial (em cima), ambos com respetivos intervalos (células radiais), adaptado de [76]

Vale a pena sublinhar que um radar SF-CW, fornece apenas capacidades de imagem unidimensionais (1D). Assim diferentes alvos, podem ser detetados individualmente, se as suas distâncias relativas e ao radar forem maiores ou iguais à resolução das células radiais. O radar interferométrico IBIS-FS, foi projetado para uma resolução máxima (resolução de células radiais mínima) de 0.50m, portanto, dois alvos podem ser individualmente detetados, se a distância relativa entre estes for superior aos 0.50m[74].

Além disso, como se pode observar a partir da Fig. 4.27, existe uma grande probabilidade de ocorrerem erros de medição, devido à multiplicidade de interferências provenientes de alvos localizados na mesma área de uma qualquer célula de resolução. Neste caso e como é perceptível pela Fig. 4.27, quando dois alvos se encontram dentro da mesma célula radial, o radar não consegue fazer a sua distinção.

Os perfis espaciais são avaliados no fim de cada varrimento, de modo a que o intervalo de tempo de amostragem (somatório de todos os tons num varrimento) seja igual à duração do tempo (período) de varrimento. Assim a frequência de amostragem do radar pode ser descrita como na expressão (4.9)[74; 76].

$$f_a = \frac{1}{NT_{tom}} = \frac{c}{2NR_{max}} \quad (4.9)$$

É de referenciar ainda, que a frequência de amostragem (varrimento) do radar diminui à medida que a distância máxima de monitorização aumenta.

A relação entre a frequência de amostragem e a distância máxima é demonstrada na Fig. 4.28. Pode-se observar que para uma resolução de alcance de 0.5m a frequência de amostragem diminui para distâncias superiores a 150m, já para uma resolução de alcance de 1.0m a frequência de amostragem começa a diminuir só para distâncias acima dos 300m e atinge o valor mínimo de 35 Hz aos 1000m. Ainda na Fig. 4.28, pode-se observar que para o radar IBIS-FS a frequência de amostragem foi limitada a 200 Hz, porque o conteúdo significativo de frequências nas linhas temporais de deslocamentos geralmente tem uma gama de frequências de 0-20 Hz, para estruturas de grandes dimensões[74].

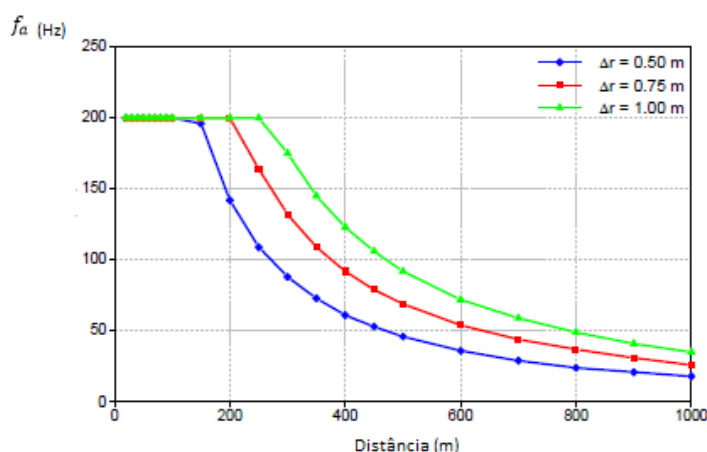


Fig. 4.28 – Frequência de amostragem versus distância máxima, para 3 tipos de resoluções de alcance, adaptado de [85]

Os vetores das N amostras complexas, dos ecos recebidos no final de cada varrimento, são armazenados num arquivo pelo software do IBIS-FS, arquivo este, que posteriormente servirá de base ao pós-processamento dos dados noutra ferramenta de software que será referida mais adiante.

4.4.2 INTERFEROMETRIA

Uma vez determinado o perfil de distâncias (range profile), em intervalos uniformes $T_{\text{varrimento}}(\tau)$, o deslocamento medido de cada célula radial, é avaliado usando a técnica de interferometria. De acordo com esta técnica, o deslocamento de um alvo é avaliado através da comparação da fase das ondas eletromagnéticas refletidas pelos alvos, em diferentes instantes[76].

De duas captações de radar obtidas em diferentes instantes, vão resultar diferentes fases, dependentes do movimento do objeto ao longo da linha de visão do radar (direção radial). Como se pode observar pela Fig. 4.29, o movimento de um ponto na direção da onda de propagação, induz uma diferença de fase a partir da superfície dos alvos.

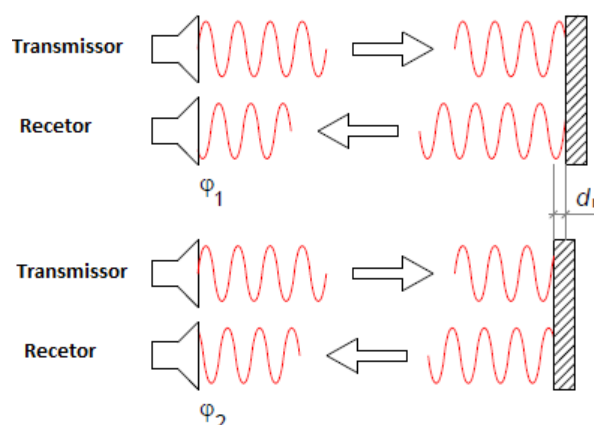


Fig. 4.29 – Conceito de medição interferométrica, adaptado de [81]

O deslocamento radial d_r , é obtido através da diferença de fase, expressão (4.10)[81], onde λ representa o comprimento da onda eletromagnética, φ representa a fase e $\Delta\varphi$ representa a diferença de fase.

$$d_r = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\varphi \quad (4.10)$$

Convém sublinhar que a técnica de interferometria, representada pela expressão (4.10), proporciona uma medição de deslocamento radial de todas os alvos inseridos nas células de radiais, da estrutura abrangida pelo feixe das antenas do radar. Deste modo, a avaliação do deslocamento real requer o conhecimento prévio da direção do movimento real. As estruturas que tem usufruído de uma maior utilização do radar interferométrico IBIS-FS, são estruturas de diferentes configurações geométricas, como pontes rodoviárias (estrutura horizontal), torres e postes (estruturas verticais). No caso das pontes rodoviárias o deslocamento sob cargas de tráfego pode ser assumido como vertical, e facilmente pode ser avaliado fazendo simples projeções geométricas como demonstrado na Fig. 4.21, no caso de postes ou torres o deslocamento é horizontal.

4.5 FATORES PRINCIPAIS QUE AFETAM O USO DESTA TÉCNICA

Na aquisição de dados de uma estrutura, a geometria considerada no radar é normalmente do género da apresentada na Fig. 4.19, e como já referido anteriormente, pode variar dependendo do tipo de estrutura a monitorizar (horizontal e vertical). O radar normalmente é posicionado perto da base do edifício, observando a estrutura ao longo da linha de visão do radar, que forma um ângulo de inclinação θ com o respetivo horizonte. É ainda de relembrar, que o IBIS-FS apenas possibilita medições de deslocamentos ao longo da linha de visão (LOS) do mesmo, fazendo com que o cálculo dos deslocamentos seja dado com uma expressão do tipo (4.11)[68].

$$d_{LOS} = \Delta S \frac{L}{R} = \Delta S \cos \theta \quad (4.11)$$

Onde L é a distância entre a posição do radar e a base do edifício, R é o alcance inclinado do radar e ΔS representa o deslocamento real.

A partir do perfil de medição das células radiais (*bins*) correspondentes a diferentes partes da estrutura, são selecionadas aquelas com valores mais altos de SNR, permitindo que se obtenha a melhor precisão possível na obtenção do deslocamento sub-milimétrico da fase interferométrica. Para cada célula radial, o deslocamento pode ser derivado ao longo do tempo.

É de notar que o SNR depende de vários fatores e varia muito de estrutura para estrutura, podendo ter uma influência direta na medição a partir do radar, que devido à sua propagação e a sua grande sensibilidade pode ser afetada por diversos fatores. De seguida serão apresentados alguns fatores que podem ter influência na medição de uma estrutura.

O primeiro efeito, deve-se à vibração dos equipamentos de medição (sensor, tripé, cabeça rotativa). De acordo com um estudo efetuado por Luzi[68], para medição das frequências de vibração dos equipamentos de medição, conclui-se que as frequências podem variar de $10\text{Hz} \pm 2\text{Hz}$ para condições de medição típicas. A Fig. 4.30, mostra os resultados específicos dos testes experimentais realizados para a obtenção do espectro de vibração do equipamento, obtido a partir da variação da altura do tripé. Considerando que se espera para os edifícios monitorizados, frequências, normalmente, inferior a 10Hz, a vibração do tripé pode ser facilmente removida por aplicação de filtros no software de tratamento de dados.

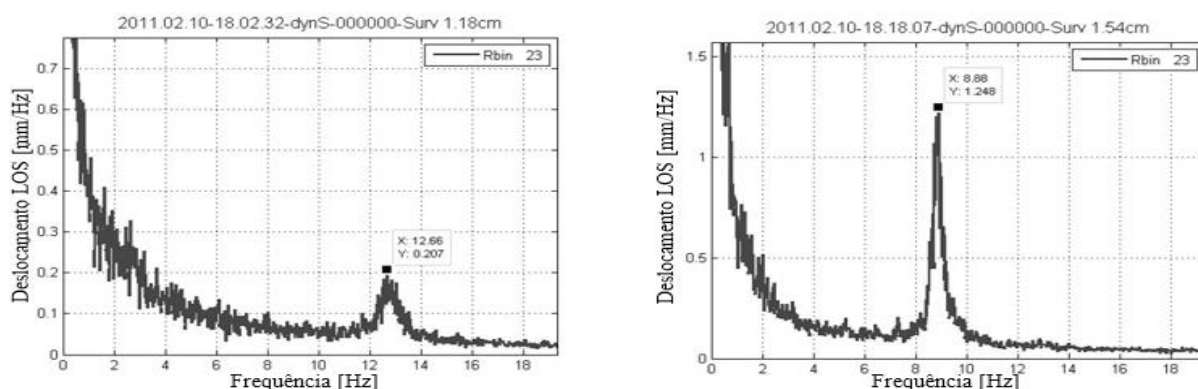


Fig. 4.30 – Espectros de densidade de potência, com variação da altura do tripé, adaptado de [68]

O segundo fator a ter em conta, é o efeito de propagação atmosférica nas fases de medição, e como consequência nos deslocamentos estimados. Embora a propagação de micro-ondas seja claramente menos afetada pela variação das condições atmosféricas, no que diz respeito a técnicas óticas, este efeito não pode ser negligenciado devido à extrema sensibilidade das medições das fases. Os efeitos atmosféricos nas series temporais de deslocamento estimadas, geralmente está fortemente correlacionado com o tempo, em períodos curtos (menos de um minuto). Isto está relacionado com a natureza física dos parâmetros atmosféricos, que ao longo do espaço compreendido entre o sensor e o edifício e em poucos minutos, normalmente experimenta variações suaves. Para uma limpeza do sinal e redução deste efeito, o sinal medido é normalmente processado através de um *de-trending* (técnica de tratamento/limpeza de dados que se foca apenas na parte flutuante do sinal) seguido de um filtro com um corte de frequência de 0.2/0.3 Hz. A Fig. 4.31 mostra alguns registos de deslocamento obtidos a partir da monitorização de diferentes edifícios.

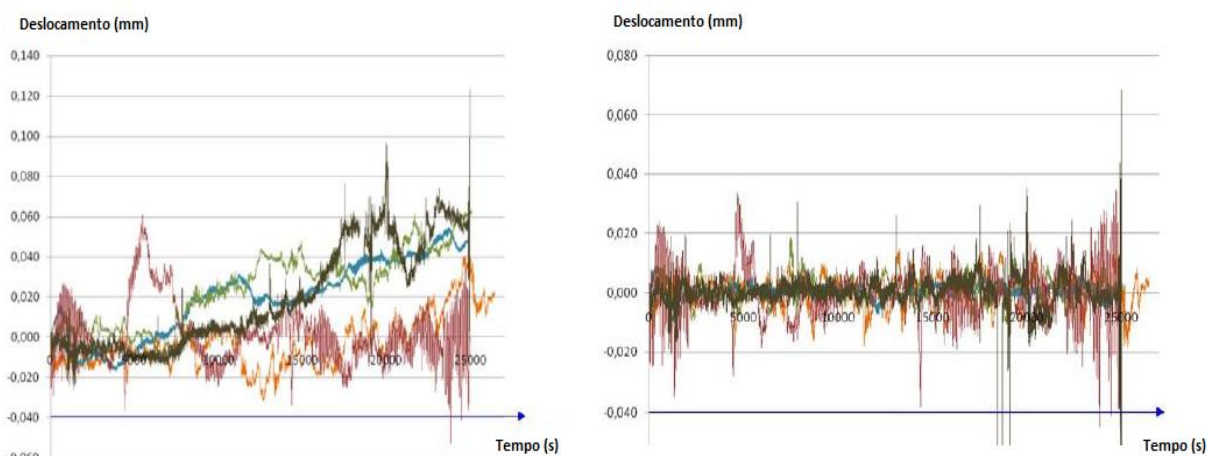


Fig. 4.31 - Dados temporais do deslocamento de diferentes edifícios (representados a cores diferentes), observados através do radar, medições originais (à esquerda) e após *de-trending* (à direita), adaptado de [68]

Este procedimento ao ser aplicado permite melhorar o desvio-padrão numa certa ordem de grandeza (passando de algumas dezenas de micron para alguns micron).

Um terceiro fator a ser considerado é dado pela contribuição dos vários alvos espúrios, como persianas, balaustradas, fontes de vibração perto das janelas, etc., que podem vibrar de forma independente da estrutura principal. Todas as contribuições espúrias mencionadas são misturadas com a vibração principal, porque o radar realiza uma integração das áreas iluminadas. Só elementos cuja resposta do radar é significativa em relação à área iluminada podem deteriorar informação, contribuições de pequenos alvos espúrios que ocupam uma pequena fração da área iluminada, podem ser insignificantes. Em qualquer caso, pode ser efetuada uma análise cuidada das características espectrais e temporais, para reduzir o desentendimento e melhorar a interpretação dos dados, mas a análise só tem proveito com altas frequências (acima de 200 HZ), visto que fornece uma grande redundância nas amostras temporais do radar, geralmente com durações de 5min[68].

4.6 QUALIDADE DOS DADOS RECOLHIDOS E ANÁLISE DE FASE

Uma das etapas mais importantes no procedimento de pós-processamento dos dados é a seleção dos pontos de medição. É importante, que a ferramenta de software forneça uma orientação, na seleção dos pontos de reflexão, simplificando a interpretação de alguns conceitos relacionados com o radar. Para que o software responda às expectativas, 2 parâmetros, com o objetivo de caracterizar a precisão e/ou qualidade da medição efetuada pelo radar, são avaliados durante a fase de processamento, sendo eles Razão sinal-ruído térmica (*thermal Signal to Noise Ratio*, SNR_t) e Razão sinal-ruído estimada (*estimated Signal to Noise Ratio*, SNR_e). Além disso, a representação em fase (*phasor representation*) dos sinais adquiridos no software IBISDV, fornece uma avaliação direta da qualidade dos dados[76].

4.6.1 RAZÃO SINAL-RUÍDO E PRECISÃO DOS DESLOCAMENTOS

Seguido de um processo de focagem (Fig. 4.26), um sinal discreto complexo está associado a cada intervalo de célula radial (isto é, para cada distância, Δr , a partir do sensor) num intervalo de tempo T_a (tempo de amostragem ou tempo de varredura). Cada sinal discreto complexo pode ser caracterizado como na expressão (4.12)[76].

$$S_m = S(t_m) = A(t_m)e^{j\varphi(t_m)} = A_m e^{j\varphi_m} \quad t_m = mT_a \quad (m = 0, 1, \dots, M) \quad (4.12)$$

A amplitude A_m representa a intensidade dos sinais de resposta dos alvos situados dentro de cada célula radial, enquanto a fase φ_m (ver equação (4.10)) contém informações da deflexão, ao longo da linha de vista do radar.

De um modo geral, o deslocamento medido pode ser modelado como na expressão (4.13), correspondente à soma do deslocamento atual $d_t(t)$ e do ruído adicional $e(t)$ (devido ao sistema de medição).

$$d(t) = d_t(t) + e(t) \quad (4.13)$$

Considerando um intervalo de tempo onde o $d_t(t)$ é quase constante, o desvio padrão do deslocamento medido quantifica a precisão da medição ($\sigma_d = \sigma_e$). De acordo com a expressão (4.10), que relaciona o deslocamento e a fase, o desvio padrão do deslocamento pode ser considerado como na expressão (4.14).

$$\sigma_d = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sigma_\varphi \quad (4.14)$$

Visto que o desvio padrão da fase inversa depende da razão sinal-ruído (SNR), a precisão do deslocamento é dada pela expressão (4.15).

$$\sigma_d = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{SNR}} \quad (4.15)$$

No caso ideal, em que a célula radial contém apenas um alvo, o recetor de ruído térmico é a única fonte de informação de ruído e o sinal complexo é dado pela expressão (4.16).

$$S_m = A_m e^{j\varphi_m} + (n_I + jn_Q) \quad (4.16)$$

Onde n_I e n_Q são, respetivamente, as componentes de fase e quadratura do recetor de ruído térmico. Tanto n_I como n_Q podem ser modeladas como um aditivo de ruído branco gaussiano (*Additive White Gaussian Noise*, AWGN)[86], com valores médios de raiz quadrada $E[n_I^2(t)] = E[n_Q^2(t)] = \sigma_n^2$. Neste caso, o SNR passa a Razão Sinal-Ruído térmica (*thermal Signal to Noise Ratio*, SNR_t), e é definido pela expressão (4.17)[76].

$$SNR_t = \frac{S}{N_t} = \frac{E[|S_m|^2]}{2\sigma_n^2} = \frac{|S|^2}{2\sigma_n^2} \quad (4.17)$$

Sendo $N_t = 2\sigma_n^2$ a potência do recetor de ruído térmico (*receiver thermal noise power*) e geralmente é um parâmetro conhecido, enquanto a potência do sinal S corresponde ao quadrado da amplitude média $E[|S_m|]$. Assim, cada célula de radial pode ser caracterizada por diferentes valores de SNR_t , obtidos pela avaliação da amplitude média.

Recordando a equação (4.15), é claro que o SNR_t pode ser usado para verificar a qualidade de medição associada a cada célula de resolução, porque valores altos de SNR_t podem levar à obtenção de boas precisões de deslocamentos, isto é, baixo desvio padrão do deslocamento e vice-versa[76].

O SNR_t é obtido durante a fase de processamento do IBISDV, pelo cálculo da média da amplitude de cada célula de radial. O perfil de alcance resultante do SNR_t fica disponível no IBISDV no procedimento da seleção dos pontos de medição, como se pode observar na Fig. 4.18.

4.6.2 RAZÃO SINAL-RUÍDO ESTIMADA

Ao contrário do que foi afirmado no capítulo 4.6.1, o ruído térmico pode não ser a única fonte de ruído que afeta a precisão de medição. Normalmente, dentro de cada célula radial existe um alvo dominante (o de maior interesse), enquanto os outros menos refletivos serão secundários. Os alvos secundários representam uma espécie de ruído ambiental que afeta o deslocamento do alvo dominante. Na linguagem de radar os alvos secundários são conhecidos como *clutter* (palavra com significado equivalente de desordem), que representa o eco proveniente dos alvos menos relevantes para as medições. Nestes casos, o sinal discreto é dado pela expressão (4.18)[76].

$$S_m = A_m e^{j\varphi_m} + \sum_{p=1}^p C_m^p e^{j\varphi_m^p} \quad (4.18)$$

Por uma questão de simplicidade, o ruído térmico não foi considerado na equação (4.18). O sinal relacionado com cada alvo secundário, pode ser modelado como uma variável aleatória, de modo a que os alvos secundários possam ser vistos como um conjunto de variáveis aleatórias independentes com a mesma estatística[76]. Aplicando o teorema do limite central[86], a soma dos alvos secundários pode ser modelada como um aditivo de ruído branco gaussiano (AWGN), para que a equação (4.18) assuma a forma da equação (4.15), dando assim origem à equação (4.19).

$$S_m = A_m e^{j\varphi_m} + (n_{cl} + jn_{cQ}) \quad (4.19)$$

O $E[n_{cl}^2(t)] = E[n_{cQ}^2(t)] = \sigma_{nc}^2$, corresponde ao valor médio da raiz quadrada dos componentes de *clutter*, fase (I) e quadratura (Q). Consequentemente, um novo parâmetro de razão sinal-ruído pode ser definido pela expressão (4.20).

$$\frac{S}{N_c} = \frac{E[|S_m|]^2}{2\sigma_{nc}^2} \quad (4.20)$$

Onde N_c corresponde à potência equivalente de ruído de *clutter*. Nada produz efeito enquanto a potência do ruído térmico for um parâmetro conhecido para o recetor, N_c depende do envolvimento ambiental e portanto é desconhecido. No entanto, é possível estimar N_c através da análise da magnitude do sinal de cada célula de radial, como demonstrado através da expressão (4.21).

$$\sigma_{nc}^2 \cong E[(|S_m| - E[|S_m|])^2] = \sigma_{|S|}^2 \quad (4.21)$$

Isto significa que a variação da magnitude do sinal complexo de cada célula de resolução é aproximadamente igual à variação de *clutter*. Assim, a razão estimada sinal-ruído (*estimated Signal to Noise Ratio*, SNR_e), pode ser definida como na expressão (4.22).

$$SNR_e = \frac{|\bar{S}|^2}{2\sigma_{|S|}^2} \quad (4.22)$$

Com o SNR_e e a partir da equação (4.15), pode-se estimar o desvio padrão do deslocamento associado a cada célula radial (isto é, precisão do deslocamento). O SNR_e é de um certo modo mais realista do que o SNR_i , para expressar a precisão do deslocamento medido, uma vez que contém informação do cenário ambiental e o seu efeito na medição[76]. O SNR_e é calculado durante a fase de processamento do IBISDV, o perfil de alcance do SNR_e assim como o do SNR_i é usado para a seleção dos pontos de medição, como se pode observar na Fig. 4.18.

4.6.3 ANÁLISE DE FASE

Uma vez que a seleção das células radiais, mostra-se dependente das intensidades (SNR_e e SNR_i) do sinal de resposta (eco), uma forma muito eficaz de perceber a qualidade dos dados de deslocamento reside na

representação da fase do sinal complexo discreto das células de radiais[76]. A Fig. 4.32, demonstra a representação de fase em diferentes casos.

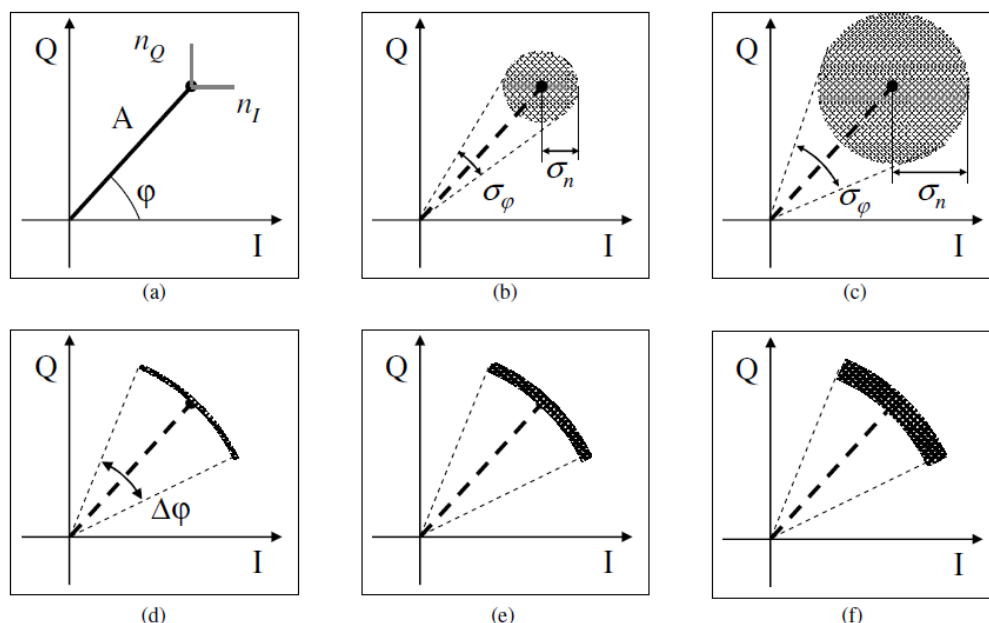


Fig. 4.32 – Representação da fase, adaptado [76]

Como se pode observar na Fig. 4.32(a), a fase de uma célula radial com um único alvo, num dado instante é dada pela soma instantânea da contribuição do alvo mais a contribuição do ruído. Se o alvo for fixo, tanto A como φ são constantes ao longo do tempo, enquanto o ruído aditivo varia ao longo do tempo como uma variável aleatória com estatísticas Gaussianas. Tendo em conta que o tempo é contínuo, o trajeto de fase corresponde a uma nuvem de pontos circular, no qual o raio é igual ao desvio padrão σ_n , como se pode verificar na Fig. 4.32(b).

A variação aleatória do ruído reflete-se numa variação aleatória da fase do sinal, com um desvio padrão σ_φ , e como consequência uma variação aleatória do deslocamento medido com um desvio padrão dado pela equação (4.14). Quanto maior for o ruído correspondente à amplitude do alvo (menor razão sinal-ruído), maior será a variação aleatória de fase, e em contrapartida pior será a precisão do deslocamento, Fig. 4.32(c).

No caso de um alvo em movimento, quando o ruído de amplitude do alvo é baixo, o traçado da fase no tempo será um arco circular de baixa espessura, como representado na Fig. 4.32(d), e a variação de fase $\Delta\varphi$ do deslocamento do alvo, será dada pela equação (4.10). Quanto maior for o ruído em relação à amplitude do alvo, mais espesso será o traçado da fase, como representado nas Fig. 4.32(e) e Fig. 4.32(f).

A boa qualidade de medição da fase de um alvo, é caracterizada pela estabilidade do alvo, se é alvo fixo (ponto estável, Fig. 4.32(a)), ou se é um alvo móvel (arco circular, Fig. 4.32(d)). Um alvo de má qualidade na medição de fase é caracterizado por uma nuvem de pontos (alvo fixo, Fig. 4.32(b)(c)) ou um arco circular espesso (alvo móvel, Fig. 4.32(e)(f))[76].

O software IBISDV permite a visualização da fase de um ponto de medição selecionado, como ferramenta adicional para avaliação da qualidade e confiabilidade da medição do radar. Outra situação que deve ser tomada em consideração, verifica-se quando existem dois alvos dentro da mesma célula de

resolução, sendo um deles fixo e outro móvel. Assumindo, que neste caso o interesse é a medição do deslocamento do alvo móvel, o sinal discreto complexo da célula de resolução é dado pela expressão (4.23).

$$S_m = A_m e^{(j\phi_m)} + B_0 \cdot e^{(j\phi_0)} \quad (4.23)$$

A representação de fase do sinal, expressão (4.23), é demonstrada na Fig. 4.33. De acordo com o procedimento padrão, o sensor de radar irá medir a variação de fase $\Delta\phi'$, em vez de $\Delta\phi$, consequentemente o deslocamento subestimado do alvo móvel será obtido pela equação (4.10). A fim de evitar esse erro, o IBISDV implementa um procedimento automático que remove a parte fixa do sinal complexo (*clutter* fixo), trazendo a fase em movimento para o centro do plano complexo, de modo a que variação estimada de fase seja a correta.

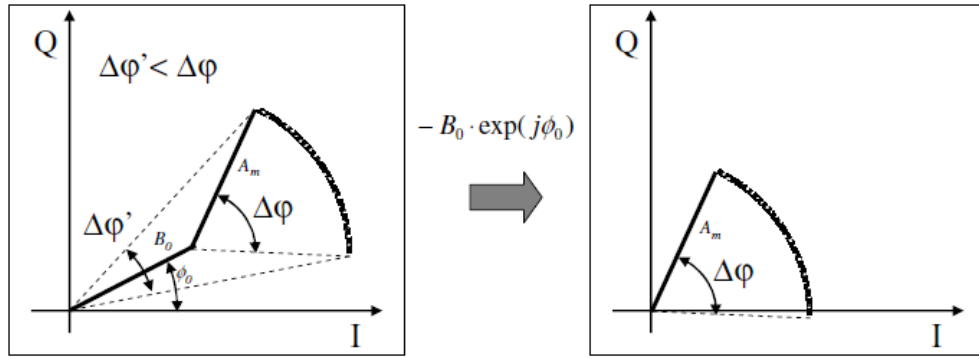


Fig. 4.33 – Efeito do *clutter* fixo (à esquerda), efeito do *clutter* fixo removido (à direita), adaptado [76]

5

ANÁLISE MODAL OPERACIONAL

5.1 INTRODUÇÃO À ANÁLISE MODAL

5.1.1 ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS

O comportamento dinâmico de estruturas tem sido um elemento de estudo ao longo da história. Como um dos principais resultados deste estudo, é conhecido que a partir das frequências próprias das estruturas é possível tirar conclusões da condição estrutural. Portanto, desde há bastante tempo que se tem vindo a efetuar ensaios dinâmicos em estruturas, o primeiro caso remonta a 1920 na Suíça, onde foram efetuados ensaios num mastro metálico[87]. No entanto, a sua utilização prática não se verificou, devido à inadequação dos equipamentos de medição. A partir deste ensaio, muitos outros foram realizados até aos dias de hoje, sofrendo ao longo do tempo vários desenvolvimentos práticos e tecnológicos que permitiram alcançar a precisão dos ensaios efetuados hoje em dia. De seguida será apresentada uma cronologia dos principais desenvolvimentos ao longo do tempo.

Quadro 5.1 - Cronologia dos desenvolvimentos mais importantes em dinâmica estrutural

Ano	Acontecimento
1800 - 1900	Desenvolvimento de seções relevantes para dinâmica estrutural
1920 - 1945	Execução de ensaios dinâmicos simples em estruturas bem definidas
1955 - 1965	Desenvolvimentos nas tecnologias de medição
1965 - 1975	Desenvolvimento do método linear de elementos finitos
1970 - 1980	Desenvolvimento dos ensaios de vibração forçada
1975 - 1990	Integração do método linear de elementos finitos no processo geral de projetos de engenharia
1980 - 1990	Avanços na tecnologia computacional
1990 - 2000	Introdução da análise não-linear de elementos finitos na prática da engenharia
1992 - 1995	Introdução dos ensaios de vibração ambiental
1993 - 1996	Introdução da tecnologia de computacional na medição de deslocamentos e recolha de dados

A dinâmica é definida como a ciência do movimento sobre a influência de forças. Esta definição não é considerada pelos Engenheiros Cívicos, porque normalmente se usam considerações estatísticas para a solução dos problemas. Num projeto de estruturas, a maioria dos problemas dinâmicos (sismos, vento, etc.) são resolvidos através de procedimentos estatísticos de substituição (multiplicação de cargas estáticas equivalentes com fatores de segurança). Com este procedimento a ocorrência de esforços e deformações máximas numa estrutura devido excitações dinâmicas pode ser gravada através de sistemas de recolha de dados, mas o comportamento de vibração dessas estruturas apenas pode ser modelado através de uma análise dinâmica.

A resposta de uma estrutura a uma excitação dinâmica é determinada pelo tipo de influência e pelas propriedades da própria estrutura. As excitações dinâmicas podem ocorrer de forma variante (esforços de operação) ou como acontecimentos naturais (sismos). As propriedades dinâmicas de uma estrutura podem ser avaliadas pelas frequências próprias e modos de vibração. As frequências próprias são diretamente dependentes da rigidez, massa e amortecimento da estrutura para o seu cálculo. A resposta da estrutura é composta por um conjunto de esforços e vibrações, sendo possível apenas efetuar a medição direta das vibrações[87]. Na Fig. 5.1 é ilustrada uma esquematização da resposta estrutural quando sujeita a excitações dinâmicas.

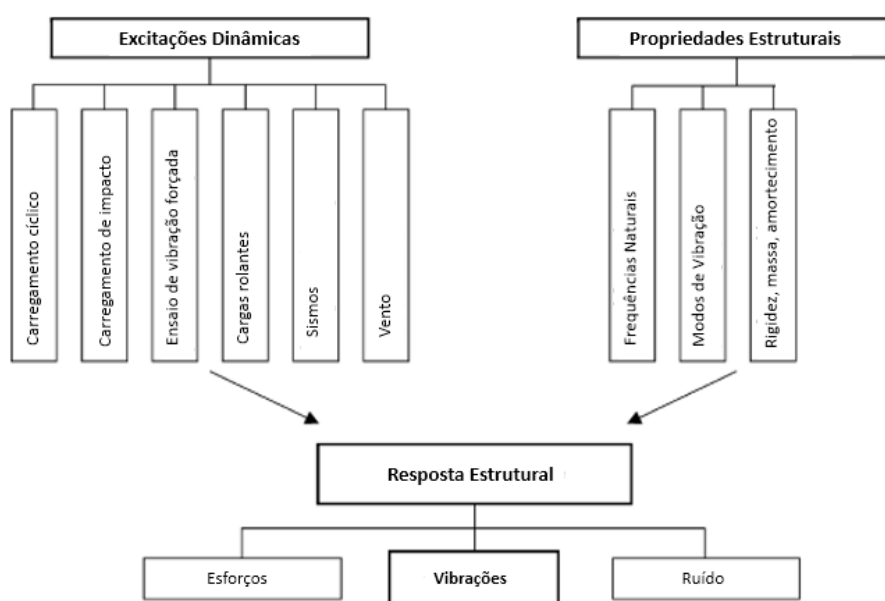


Fig. 5.1 - Resposta estrutural de excitações dinâmicas, adaptado de [87]

O passo mais importante para a base do cálculo dos métodos usuais de cálculo dinâmico, é a correta definição dos modelos (subcapítulo 5.1.3). Para este propósito a rigidez e a massa bem como os apoios da estrutura, necessitam de ser caracterizados com grande precisão. Por vezes o cálculo da influência do amortecimento é de grande complexidade, mas valores empíricos e resultados de medição podem servir como base.

Os métodos de cálculo dinâmico podem ser basicamente divididos em dois grupos: métodos lineares e métodos gerais (lineares e não-lineares), onde as não-linearidades podem ser causadas pela estrutura (condições fronteira) ou pelo material (lei do material). Como os métodos gerais de cálculo dinâmico,

na forma de análise não-linear, para a determinação das respostas estruturais são bastante demorados, geralmente o cálculo dinâmico considera a linearidade através do método dos espectros de resposta. Neste caso, as frequências próprias e os modos de vibração são calculados através de uma análise modal. A máxima resposta estrutural a excitações externas é obtida através da multiplicação dos modos de vibração pelos valores espectrais das frequências naturais.

5.1.2 ANÁLISE MODAL

A análise modal surge como uma ferramenta no âmbito da análise dinâmica, visto que através da determinação das frequências próprias e modos de vibração de uma estrutura é possível perceber o comportamento da estrutura. A análise modal pode ser efetuada através de diferentes métodos analíticos, como se pode verificar na Fig. 5.2.

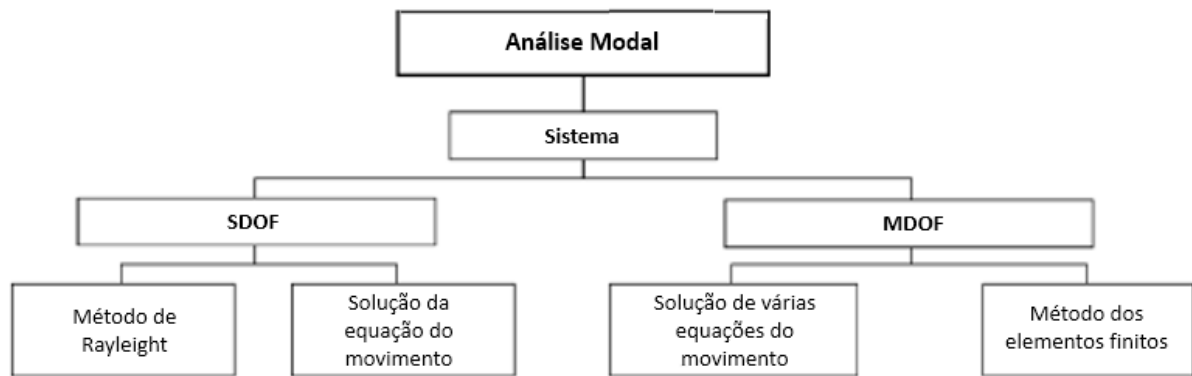


Fig. 5.2 – Métodos de análise modal analítica, adaptado de [87]

Um pré-requisito que todos os métodos tem em conta é o comportamento linear da estrutura. O método de Rayleigh pode ser aplicado a sistemas com um grau de liberdade (*Single Degree of Freedom*, SDOF) ou a sistemas com múltiplos graus de liberdade (*Multiple Degree of Freedom*, MDOF), mas só no primeiro caso é que é possível obter uma solução exata. A solução direta da equação do movimento é sempre possível se a matriz de amortecimento for desprezável ou for representada como uma combinação linear das matrizes de massa e rigidez. Na prática o método de elementos finitos (*Finite Element Method*, FEM) é universalmente utilizado para a simulação numérica de estruturas. O método de elementos finitos é também usado em problemas não-lineares para o cálculo dos esforços da resposta estrutural[87].

A identificação dos parâmetros modais geralmente é realizada com o objetivo de se obter com precisão, estimativas das frequências naturais, modos de vibração e rácios de amortecimento modal, que podem ser correlacionados com os respetivos valores, estimados numericamente a partir de um modelo de elementos finitos da estrutura em análise.

A análise modal pode ainda ser caracterizada como análise modal experimental ou análise modal tradicional, e como análise modal operacional. Nos capítulos seguintes serão abordados os conceitos de cada uma delas.

5.1.3 MODELOS DE SISTEMAS DINÂMICOS

A noção de sistema é um conceito amplo. Na presente dissertação o sistema é especificado como sendo uma estrutura de Engenharia Civil, onde diferentes tipos de variáveis interagem e produzem sinais, como ilustrado na Fig. 5.3.

Quando este tipo de estruturas são sujeitas a uma análise modal operacional, normalmente são excitadas por ações de natureza ambiental. Devido à natureza da excitação, a análise toma como suposição básica, que a resposta de saída é resultado de um processo estocástico, com a entrada a ser constituída por ruído branco desconhecido (não medido). Deste modo, a determinação de um modelo, que ajuste os dados de medição, é denominado de sistema estocástico de identificação.

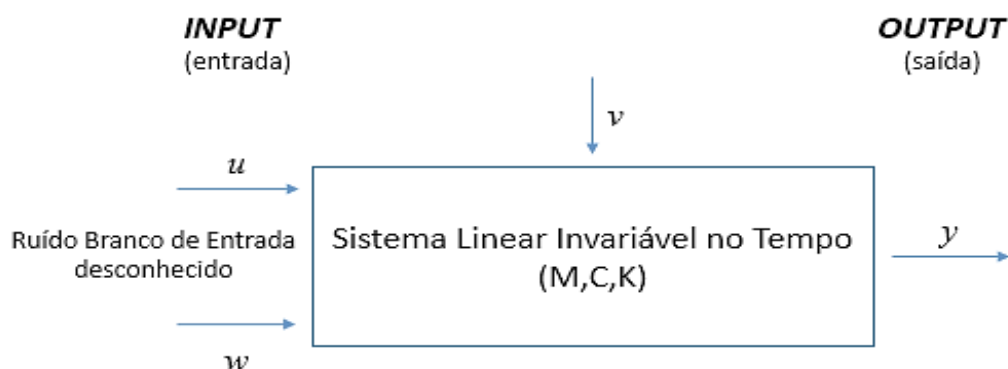


Fig. 5.3 - Modelo de um sistema dinâmico, adaptado de [88]

O sistema apresentado na Fig. 5.3, é caracterizado por um conjunto de matrizes, M (massa), C (amortecimento) e K (rigidez). Os sinais observados que contêm a informação desejada, são denominados de sinais de saída ou resposta (*output*) (y), já os sinais de entrada (*input*) são provenientes de estímulos externos ao sistema, quando esses sinais demonstram capacidade de manipulação/controlo por parte do observador (por exemplo, o caso dos FVT), são denominados de sinais de entrada conhecidos (u), os restantes são conhecidos como distúrbios, e podem ser divididos em dois grupos, naqueles que são conhecidos (w) e aqueles que tem apenas influência nos sinais de saída (v)[88].

Todos os modelos dinâmicos podem ser estabelecidos no domínio do tempo ou da frequência, com equações de tempo contínuas (modelos analíticos) ou equações de tempo discretas, sendo estas últimas as que normalmente mais se utilizam para ajustar dados experimentais. Os modelos que consideram uma entrada (*input*) desconhecida ou estocástica são os usados na análise modal operacional.

O Capítulo 5 destina-se à apresentação de alguns métodos de identificação modal, que se podem designar de estocásticos. Como a excitação é do tipo ambiental, ou seja, tem proveniência de várias fontes (tráfego na estrutura, vento, funcionamento de aparelhos na estrutura ou em redor), é normal admitir-se que o processo estocástico que caracteriza a ação sobre a estrutura é um ruído branco. O ruído branco é caracterizado como sendo um espectro constituído por todas as frequências possíveis.

5.2 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL

A identificação experimental dos parâmetros modais é um tópico de pesquisa que tem sido desenvolvido ao longo das últimas seis décadas[89], como se pode confirmar no Quadro 5.1. Começou por ser aplicada em engenharia mecânica, para a avaliação do comportamento dinâmico de pequenas estruturas. Essa primeira avaliação, hoje em dia é denominada de Análise Modal Experimental (*Experimental Modal Analysis*, EMA) ou Análise Modal Tradicional (*Tradicional Modal Analysis*, TMA)[90], que em conjunto com a análise de séries temporais (*Time Series Analysis*, TSA) se baseia na medição da resposta estrutural, quando sujeita a uma ou mais excitações dinâmicas. Atualmente, EMA é um campo bem desenvolvido, com sólidas bases teóricas e largamente utilizada na prática, nas indústrias aeroespacial e automóvel.

A EMA pode ser adotada também para a identificação dos parâmetros modais em estruturas de Engenharia Civil, como pontes, barragens ou edifícios. Porém as grandes dimensões estruturais implicam desafios adicionais, em particular, a aplicação de excitação dinâmica, mais conhecida como ensaios de vibração forçada (*Forced Vibration Tests*, FVT), que requerem o uso de dispositivos muito dispendiosos e pesados para a sua medição e controlo.

No caso de estruturas de Engenharia Civil, os ensaios de vibração ambiental (*Ambient Vibration Tests*, AVT), são mais práticos e económicos, uma vez que a indução de vibração por dispositivos pesados é substituída por excitações ambientais como o vento ou o tráfego que circula sobre a estrutura ou perto dela. Por isso, na Engenharia Civil o recurso aos AVT, tem como principal objetivo a identificação das propriedades dinâmicas estruturais, a fim de calibrar e atualizar os modelos de elementos finitos, bem como construir uma linha de base para a monitorização contínua dinâmica. Como ponto relevante, os AVT têm a vantagem de permitir a avaliação dinâmica de estruturas, sem perturbar o seu normal funcionamento. Além disso, as estruturas são caracterizadas usando condições de operação reais, em casos de existência de comportamento não-linear, os resultados obtidos são associados a níveis realísticos de vibração e não a vibrações geradas artificialmente. No entanto, como o nível de excitação é baixo, são necessários sensores com elevado nível de precisão e sensibilidade. Mesmo assim, os AVT mostram duas desvantagens em relação aos FVT, a massa modal não é estimada (modos de vibração não são estimados de forma absoluta), e a frequência da excitação pode não abranger toda a banda de frequências de interesse, especialmente quando estruturas de grande rigidez, com altas frequências, estão sob análise[89].

5.3 ANÁLISE MODAL OPERACIONAL

Como alternativa à EMA, para caracterização dinâmica de estruturas, na década de 90 recorreu-se ao uso da Análise Modal Operacional (OMA), denominada também por análise modal de vibrações ambientais, análise modal de excitação natural ou análise modal só de saída (*Output-Only Modal Analysis*)[90].

A motivação para a realização de testes OMA, surge inicialmente na Engenharia Civil, devido à dificuldade e dispendiosidade da excitação artificial (ensaios de vibração forçada, FVT) em grandes estruturas, como pontes, barragens ou edifícios. Daqui surgiu um grande avanço, na década de 90, na identificação dos parâmetros modais de um sistema estrutural. Pois este tipo de análise demonstra capacidade de efetuar medições da resposta da estrutura em condições operacionais, quando sujeita apenas a excitações ambientais ou naturais (sendo os exemplos mais comuns, vento, tráfego e sismo), não necessitando de nenhuma excitação de entrada (*input excitation*).

Em todo o tipo de estruturas, mas especialmente em estruturas flexíveis de grandes dimensões, como pontes suspensas, a excitação forçada requiere equipamentos caros que normalmente não estão disponíveis na maioria dos laboratórios de dinâmica. Felizmente, devido ao desenvolvimento recente da tecnologia, como, transdutores, conversores analógico-digitais (*Analogue-to-Digital (A/D) conversor*), radar interferométrico, tornou-se possível efetuar medições com grande precisão (níveis muito baixos) de resposta dinâmica, induzida por vibrações ambientais. No entanto, a OMA tem sido também amplamente utilizada noutros campos, como a engenharia mecânica ou aeroespacial. Um resumo de aplicações de OMA pode ser encontrado em [91; 92].

A OMA fornece diversas vantagens em relação aos outros métodos de análise modal, como:

- Economia e rapidez na realização de ensaios, devido à não necessidade de equipamentos de excitação da estrutura;
- Melhor representação do sistema analisado, devido à possibilidade de obtenção dos parâmetros dinâmicos do sistema completo e não apenas de alguns componentes;
- A operacionalidade da estrutura não é afetada pela realização dos ensaios experimentais;
- Possibilidade de monitorização *on-line*, integrada numa SHM, baseada nas características dinâmicas.

Consequentemente, a OMA também apresenta limitações nas medições da resposta da estrutura (incertezas nos dados recolhidos), podendo estas ter origens de diferentes fontes, como variações ambientais ou operacionais da estrutura, ou seja, variações que influenciam diretamente a resposta dinâmica da estrutura, refletindo-se na avaliação dos parâmetros dinâmicos. Portanto devido à possibilidade de medição dos dados em condições variáveis, é necessária a normalização dos dados, com a finalidade de estabelecimento de medições em ciclos similares de condições operacionais e ambientais, permitindo maior facilidade de comparação.

O crescente interesse na investigação e aplicação da OMA levou à criação de várias conferências nos últimos anos, tal como a Conferencia Internacional de Análise Modal Operacional (*International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC*), teve como primeira edição no ano de 2005[88].

5.4 MÉTODOS DA ANÁLISE MODAL OPERACIONAL

5.4.1 NOTA INTRODUTÓRIA

Durante a década de 90, foi proposto, para identificação de parâmetros modais, o uso da técnica de excitação natural (*Natural Excitation Technique, NExT*)[93]. O princípio subjacente à técnica NExT está relacionado com as funções de correlação (correlation functions, COR) entre as respostas, que podem ser expressas como o somatório dos sinusoides decedentes (ou sinal transiente), onde cada senoide tem uma frequência natural amortecida e uma relação de amortecimento que é idêntica ao correspondente modo estrutural.

As funções de correlação, são um dos principais parâmetros a ter em conta na identificação modal de OMA. Estas podem ser obtidas a partir de métodos como, Método direto, Método baseado no períodograma médio e Método do decremento aleatório[90].

Uma das principais vantagens da técnica de OMA é o fornecimento de um modelo modal estrutural completo sob condições de funcionamento, ou seja, dentro de verdadeiras condições fronteira, níveis de vibração e forças reais. A técnica de medição é semelhante ao tipo de procedimento dos modos de deflexão operacionais (*Operating Deflection Shapes*), onde um ou mais acelerómetros são utilizados como referencia, para a obtenção da resposta de todos os graus de liberdade[94].

O procedimento padrão de OMA exige a consideração de três elementos básicos, um conjunto de respostas de saída conhecidas (medidas), uma seleção de modelos, e metodologias para a identificação dessa seleção. Nos ensaios de OMA, a única informação disponível sobre o comportamento da estrutura, são as medições de saída.

Diferentes métodos de identificação baseados em modelos matemáticos, na OMA são capazes de fornecer informações precisas, das estimativas dos parâmetros modais da estrutura, para as respostas de saída. No entanto, é necessário obter algum tipo de compreensão de como todos os tipos de modelo, tanto no domínio da frequência como do tempo, se referem aos parâmetros modais[88].

5.4.2 FUNÇÕES DE CORRELAÇÃO

As funções de correlação referentes à resposta de uma estrutura submetida a excitação do tipo ruído branco, podem ser obtidas através da soma de sinusóides (de cada um dos modos de vibração da estrutura) com decaimento exponencial, com objetivo de determinação dos parâmetros modais da estrutura a partir destas.

O cálculo ou estimativa das funções de correlação pode ser efetuado de várias maneiras com formulações alternativas, como, o cálculo direto através de somatório, a partir da transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) inversa dos espectros e através do decaimento aleatório. Cada uma destas formulações apresenta vantagens e desvantagens, o estudo mais aprofundado destas formulações pode ser acompanhado em [95].

Após a sua estimação através dos decaimentos aleatórios, as funções de correlação podem ser utilizadas como entrada (*input*) de alguns métodos (por exemplo, Método de identificação estocástica em sub-espacos a partir de correlações e outros métodos de identificação estocásticos a partir das correlações), ou podem ser derivadas para o domínio da frequência, convertendo-se em espectros que podem ser utilizados como entrada dos métodos do domínio da frequência[95].

5.4.3 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO MODAL

Os parâmetros modais do sinal podem ser extraídos, a partir de diferentes metodologias, que tem como base a definição das funções de densidade espectral. As funções de densidade espectral são obtidas diretamente a partir das funções de correlação em combinação com a transformada de Fourier. No entanto, esta não demonstra ser a melhor técnica para a sua obtenção, as melhores estimativas de funções de densidade espectral são obtidas a partir da aplicação de uma média espectral de diferentes sub-amostras sobrepostas, do sinal (o método de Welch é a técnica usada para essas estimativas).

Os métodos de OMA são divididos em dois grupos, um deles com o intuito de processamento de dados de ensaios de vibração ambiental, o outro envolve métodos automatizados de longo termo com a finalidade de serem utilizados no processamento contínuo de sinais dinâmicos de monitorização[88].

No caso do processamento de dados, de ensaios de vibração ambiental, a resposta estrutural é obtida através de sensores, colocados em diferentes pontos da estrutura (pontos de referência) e com diferentes configurações. Os métodos disponíveis (de processamento da resposta estrutural) para efetuar a identificação de parâmetros modais, de sistemas dinâmicos, em que a sua resposta se baseia em excitações ambientais, geralmente são classificados como métodos paramétricos e não-paramétricos[89]. Os métodos não-paramétricos são essencialmente desenvolvidos no domínio da frequência, e os métodos paramétricos podem ser desenvolvidos no domínio do tempo ou da frequência. As funções utilizadas no domínio da frequência (baseia-se em estimativas espectrais das respostas da

estrutura), geralmente são denominadas de funções de resposta de frequência (*frequency response functions*, *FRFs*), no domínio do tempo recorre-se a funções de resposta de impulso equivalente (*equivalent impulse response functions*, *IRFs*), usando medições de entrada-saída[88].

As técnicas, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, são casos particulares de uma formulação polinomial mais geral, o que ajuda a clarificar a semelhança entre os vários métodos.

Quanto aos métodos automatizados de longo termo, da OMA, estes compreendem um sistema contínuo de monitorização dinâmica estrutural e uma ferramenta de identificação modal automática de resposta (*Output-Only*). O sistema contínuo de monitorização dinâmica inclui uma série de sensores, instalados permanentemente, recolhendo respostas estruturais e variações ambientais, nas condições de funcionamento, durante um longo período de tempo. Permitindo, não só fornecer dados de vibração para a análise modal automatizada, mas também a possível construção de um sistema de alerta relativamente simples ou ainda para uma caracterização precisa do desempenho estrutural (por exemplo, avaliação dos danos devido à fadiga). Conclui-se que, os procedimentos automáticos de identificação modal, são responsáveis por processar, os sinais contínuos acumulados da monitorização, e controlar as variações das propriedades dinâmicas estruturais, a fim de reproduzir o comportamento dinâmico estrutural a longo prazo. Neste caso e à semelhança do anterior os métodos disponíveis para efetuar a identificação dos parâmetros modais, são os métodos não-paramétricos.

Nos últimos anos, a OMA automatizada tem chamado à atenção na formulação de algoritmos, que dependem do controlo de técnicas convencionais de processamento de sinal[88]. Combinada com tecnologia de monitorização contínua dinâmica, e integrada numa estratégia de deteção de danos apropriada, a OMA automatizada pode ser implementada num sistema de SHM com o propósito específico de determinar o estado de condição estrutural[88].

Existe ainda um fator importante, que deve sempre ser tido em conta nos métodos de identificação modal, que assumem excitações do tipo ambiental. Trata-se do ruído branco, pois este assume uma média igual a zero (*zero mean white noise*). Esta suposição não é totalmente realista, o que significa que os parâmetros modais identificados, não são apenas associados à estrutura em análise mas também ao sistema imaginário que produz a excitação real.

Na Fig. 5.4, é ilustrado um esquema resumido dos métodos mais correntes de identificação modal, na OMA.

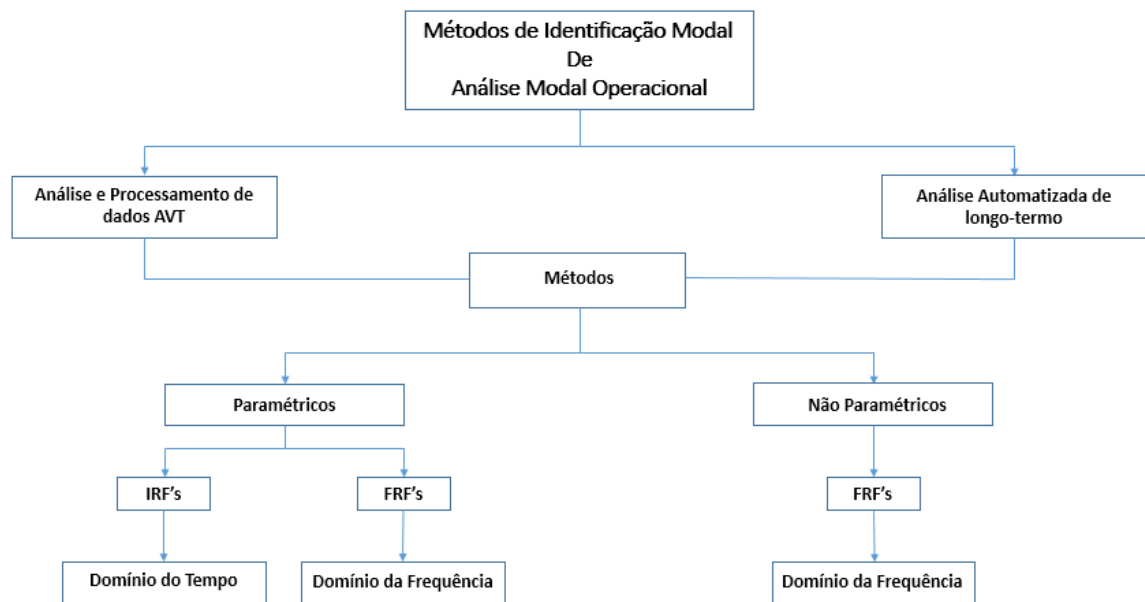


Fig. 5.4 - Esquematisação dos métodos de identificação modal da OMA

5.4.4 PROCESSAMENTO DO SINAL

A primeira etapa do processamento na OMA, é realizar uma Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform, DFT*) sobre os dados temporais recolhidos, com a finalidade de obter matrizes de densidade espectral de potência, que irão conter todas as informações sobre as frequências. A excitação sendo de banda larga e tendo um espectro do tipo contínuo, faz com que o descriptor de frequência seja uma função de densidade espectral de potência $((m/s^2)^2/Hz)$, que normaliza a medição em relação à largura de banda do ruído dos filtros de passagem de bandas (FFT).

Em geral, para todas as séries de medições ou conjuntos de dados, as dimensões da matriz de densidades espectral, são $n \times n$, sendo n o numero de transdutores (um por cada grau e liberdade). Cada elemento dessas matrizes é uma função de densidade espectral. Os elementos da diagonal da matriz são os valores reais das densidades espectrais entre uma resposta e ela mesma. Os elementos fora da diagonal são as densidades espectrais complexas entre duas respostas diferentes[94].

5.5 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO MODAL NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

No contexto da análise modal operacional (OMA), em engenharia civil, as estruturas podem ser excitados por várias forças de entrada desconhecidas, resultando numa só resposta estrutural. Sob a hipótese de que os dados de entrada são um processo estocástico (por exemplo, ruído branco), o comportamento estrutural pode ser idealizado por modelos matemáticos no domínio da frequência, a fim de se estabelecer a relação entre a matriz de saída espectral e os parâmetros modais da estrutura.

Os métodos no domínio da frequência encontram como base principal as funções de densidade espectral de um sistema, através das várias alternativas que a transformada de Fourier fornece. Isto porque, como demonstrado na dissertação de Araújo Gomez [90], o cálculo da densidade espectral da resposta do sistema permite que sejam determinadas diretamente as propriedades dinâmicas do sistema (tendo em conta a sua proporcionalidade com a função transferência).

Portanto, existem atualmente diversas metodologias de identificação modal no domínio da frequência, não paramétricas, tais como: Método de seleção de picos (*Peak-Picking Method, PP*), Método de decomposição no domínio da frequência (*Frequency Domain Decomposition, FDD*), Método melhorado do FDD (*Enhanced Frequency Domain Decomposition, EFDD*), Métodos RD-FDD e RD-EFDD (método do decremento aleatório (*Random Decrement, RD*) aplicado ao FDD e EFDD), Método decomposição do domínio da frequência-espço (*Frequency-Spatial Domain Decomposition, FSDD*), Método baseado em transmissibilidade (*Transmissibility Operational Modal Analysis, TOMA*), Método baseado em transmissibilidade escalar com densidade espectral (Power Spectrum Density Transmissibility, PSDT). A explicação de todos estes métodos pode ser consultada na dissertação de Araújo Gomez[90].

Como não é um dos objetivos deste trabalho, a explicação detalhada destes métodos, de seguida serão apresentados apenas, os métodos não-paramétricos essenciais, para a realização dos casos de estudo. Entre eles estão o método de seleção de picos (PP) e a decomposição no domínio da frequência (FDD). Os métodos PP e FDD são denominados de métodos não-paramétricos, são mais simples e portanto foram os primeiros a serem utilizados. Os parâmetros modais, são estimados apenas olhando para as características de base do sinal sem necessidade de estimação do modelo paramétrico. Apesar da sua simplicidade e rapidez os métodos não-paramétricos são bastante subjetivos na estimativa dos parâmetros modais[88].

Quanto às metodologias paramétricas, ou por outras palavras, métodos de identificação baseados no ajuste do modelo da densidade espectral de saída, podem também ser utilizados no domínio da frequência, como o exemplo do recente método *poly-Least Squares Complex Frequency domain method* (p-LSCF), também conhecido por *PolyMax*, analisado com maior pormenorização em nas dissertações de Araújo Gomez e Filipe Magalhães[89; 90].

5.5.1 MÉTODO DA SELEÇÃO DE PICOS

O método da seleção de picos (*Peak-Picking method, PP*), denominado também de método básico no domínio da frequência, é um método muito conhecido, e amplamente aplicado hoje em dia em ensaios dinâmicos de estruturas de Engenharia Civil. A sua intensa utilização deve-se a o fato de ser o método mais adequado para uma primeira verificação da qualidade dos dados recolhidos e obtenção de uma primeira visão sobre as propriedades dinâmicas do sistema.

Este método é caracterizado por ser muito rápido e de simples estimação das frequências de ressonância, através da seleção dos picos do espetro de saída (*auto-spectra of the measured outputs*). Tem como base a identificação de sistemas no domínio da frequência, este baseia-se na hipótese de que, para frequências próximas das frequências naturais da estrutura, a contribuição do modo ressonante é o fator essencial de condicionamento da resposta dinâmica.

A chave deste método incide sobre frequências naturais, pois estas são simplesmente retiradas a partir da observação dos picos dos gráficos dos espetros, sob o pressuposto básico de que os modos tem frequências bem separadas (distinguíveis uns dos outros). Assumindo que o espetro à volta de cada frequência ω_k é caracterizado por um único modo, este é designado pela expressão (5.1).

$$S_{yy}(j\omega) = -\frac{d_k \psi_k \psi_k^H}{\xi_k \omega_k} \quad (5.1)$$

Definindo o escalar constante α_i como na expressão (5.2), o espectro de ressonância aproximado é expresso em (5.3).

$$\alpha_k = -\frac{d_k}{\xi_k \omega_k} \quad (5.2)$$

$$S_{yy}(j\omega) \approx \alpha_k \psi_k \psi_k^H \quad (5.3)$$

Onde $S_{yy}(j\omega)$, representa o espectro de saída, com $j\omega$ a representar a variável de Laplace quando é restrita a um valor imaginário puro ($s = j\omega$)[88], ψ_k representa o modo de vibração k , a denotação $()^H$ corresponde ao elemento conjugado complexo e transposto, ξ_i é o coeficiente de amortecimento modal, d_k é um valor escalar constante (fator de escala no k -ésimo modo).

Do ponto de vista do método PP, a interpretação da equação (5.3) traduz que a frequência de ressonância ω_i , de cada coluna (ou linha equivalente) da matriz de espectros, pode ser considerada como uma estimativa do modo observado, até um certo fator de escala. Se a coluna (ou linha) corresponder a um grau de liberdade da estrutura, que está situado num nó de um certo modo, logo a frequência desse modo não pode ser identificada[88; 95].

A fim de assegurar que todas as frequências naturais da estrutura fossem identificadas, uma aplicação prática PP foi desenvolvida por Felber[96], que sugeria a consideração da média normalizada do espectro de densidades de potência (*Averaged Normalized Power Spectrum Density, ANPSD*) de todos os locais medidos, que corresponde aos elementos da diagonal da matriz de espectros $S_{yy}^+(j\omega)$ (half positive power spectra matrix)[88].

Já os modos de vibração derivam da análise de uma linha ou coluna da matriz do espectro, sob as condições de baixo amortecimento e modos bem separados. Uma única linha ou coluna do espectro da matriz, avaliada perto da sua frequência natural, pode ser considerada como uma estimativa do modo de vibração associado a essa frequência. A violação desses pressupostos conduz à identificação modos de deflexão operacionais que se originam a partir da sobreposição de dois ou mais modos muito próximos. No entanto, no caso particular de pontes, é possível, pré-combinar os sinais recebidos, de modo a que os diferentes tipos de modos (por exemplo, flexão vertical e torção) sejam analisados separadamente, evitando ou limitando a existência de modos com espaçamentos muito próximos em cada análise. Os rácios de amortecimento modal podem ser estimados diretamente a partir do espectro usando método de largura de banda de meia potência (*the half-power bandwidth method*), no entanto este é um procedimento bastante impreciso[89]. Usando o método simples PP, o coeficiente de amortecimento dificilmente será determinado.

Quando o método de seleção de picos é aplicado na identificação de modos de vibração, em vez de estimar a matriz de espectros $S_{yy}^+(j\omega)$, apenas os espectros entre o sensor de referência e os restantes sensores, são calculados. A razão desse acontecimento deve-se ao fato de apenas uma coluna (ou linha) da matriz de espectros ser suficiente para obter as estimativas da forma modal.

A função de coerência entre dois sensores pode auxiliar na seleção das frequências naturais, porque a função de coerência tende a ser uma em torno das frequências de ressonância amortecidas. Os ângulos de fase dos espectros transversais são úteis para a determinação das frequências naturais de amortecimento desde que os ângulos de fase sejam 0° ou 180° . O procedimento detalhado dos parâmetros modais poder ser acompanhado no estudo de Felber[96].

Visto que as estimativas modais são obtidas a partir da relação entre as respostas observadas em diferentes graus de liberdade da estrutura (e não originados a partir do ajuste de um modelo matemático representativo do comportamento da estrutura), os modos obtidos devem ser designados de modos de deformação operacionais. Ou seja, os modos não coincidem com os modos de vibração teóricos, estes apenas assumem a configuração da estrutura quando excitada por um harmónico puro.

5.5.2 MÉTODO DE DECOMPOSIÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA (FDD)

A decomposição no domínio da frequência (*Frequency Domain Decomposition, FDD*) é um método não paramétrico do domínio da frequência, que supera algumas limitações do método *Peak-Picking*[89], como a possibilidade de identificação de modos com frequências próximas e obtenção de boas estimativas dos coeficientes de amortecimento modais. No desenvolvimento deste trabalho o método foi implementado através do software IBISDV, que permite a sua aplicação de forma bastante automática.

O método de FDD é uma extensão da técnica básica no domínio da frequência (*Basic Frequency Domain, BFD*), ou mais frequentemente chamado de técnica de *Peak-Picking*. É uma técnica não paramétrica que estima os parâmetros modais diretamente a partir de cálculos de processamento de sinal, cálculos esses que podem ser acompanhados de seguida, com base no estudo de Gade[94]. A técnica de FDD estima os modos que usam a decomposição em valores singulares (*Singular Value Decomposition, SVD*) de cada um dos conjuntos de dados. Esta decomposição corresponde à identificação de um único grau de liberdade (SDOF) do sistema para cada valor singular (é um algoritmo que decompõe uma matriz qualquer, no produto de outras 3)[88]. A relação entre a entrada $x(t)$ e a saída $y(t)$ pode se rescreita como na expressão (5.4).

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* \cdot [G_{xx}(\omega)] \cdot [H(\omega)]^T \quad (5.4)$$

Onde $[G_{xx}(\omega)]$ é o *input* da matriz espectral densidade de potência (*Power Spectral Density, PSD*), $[G_{yy}(\omega)]$ é o *output* da matriz PSD e $[H(\omega)]$ é a matriz da função de resposta de frequência (FRF). Os símbolos “T” e “*”, correspondem à transposta e à conjugada complexa, respetivamente. A matriz FRF pode ser escrita numa forma típica de fração parcial (usada na análise modal clássica), em termos de polos λ , e resíduos R , como se pode observar na expressão (5.5).

$$[H(\omega)] = \frac{[Y(\omega)]}{[X(\omega)]} = \sum_{k=1}^m \frac{[R_k]}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[R_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (5.5)$$

Onde m é o numero total de modos de interesse, $\lambda_k = -\sigma_k + j\omega_{dk}$ e é o polo do k -ésimo modo, σ_k é o amortecimento modal (decrécimo constante) e ω_{dk} é a frequência natural amortecida do k -ésimo modo.

Usando a expressão (5.4) para a matriz $[G_{yy}(\omega)]$, e o teorema da fração parcial para expansões polinomiais, obtem-se a expressão (5.6) para a matriz de saída PSD, assumindo que a entrada é aleatória no tempo e no espaço e tem uma distribuição média zero de ruído branco, isto é PSD é constante.

$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_{k=1}^m \frac{[A_k]}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[A_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{[B_k]}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{[B_k]^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (5.6)$$

Considerando um modelo de amortecimento ligeiro e que a contribuição dos modos a para uma frequência particular é limitada a um número finito (normalmente 1 ou 2), então a matriz de resposta da densidade espectral pode ser descrita como na expressão (5.7).

$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_{k \in Sub(\omega)} \frac{d_k \psi_k \psi_k^T}{j\omega - \lambda_k} + \frac{d_k^* \psi_k^* \psi_k^{*T}}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (5.7)$$

Onde $k \in Sub(\omega)$ é o conjunto de modos que contribuem para a frequência particular, onde ψ_k é o modo de vibração e d_k é o fator de escala no k -ésimo modo.

Esta forma final da matriz é em seguida decomposta, recorrendo à técnica de SVD, dentro de um conjunto de valores singulares e os seus correspondentes vetores singulares, que são uma aproximação dos modos de vibração. Esta decomposição é realizada para identificar os modos dos graus de liberdade singulares do problema.

Outra maneira de perceber os sinais de resposta, $y(t)$ é a partir da sua decomposição nos diferentes modos $[\phi]$, expresso em coordenadas modais $q(t)$, como se pode verificar na expressão (5.8).

$$y(t) = [\phi] \cdot q(t) \quad (5.8)$$

Colocando a expressão (5.8) na expressão da matriz de correlação, $[C_{yy}(\tau)]$ das respostas, obtém-se a expressão (5.9).

$$[C_{yy}(\tau)] = E\{y(t + \tau)y(t)^T\} = E\{[\phi]q(t + \tau)q(t)^H[\phi]^H\} = [\phi][C_{qq}(\tau)][\phi]^H \quad (5.9)$$

Aplicando a transformada de Fourier na expressão (5.9), obtém-se a expressão (5.10).

$$[G_{yy}(\omega)] = [\phi][G_{qq}(\omega)][\phi]^H \quad (5.10)$$

Onde $[G_{yy}(\omega)]$ é a matriz dos espectros das coordenadas modais.

A técnica de FDD é baseada no SVD (que pode ser encontrada no estudo de Gade[94]) da matriz hermiana do espectro de resposta para cada frequência e para cada medição (conjunto de dados), como se pode observar na expressão.

$$[G_{yy}(\omega)] = [V][S][V]^H \quad (5.11)$$

Onde $[S]$ é o valor singular da matriz diagonal e $[V]$ é a matriz ortogonal dos vetores singulares. Os vetores singulares (colunas em $[V]$) são ortogonais entre si.

A equação (5.11) tem a mesma forma da equação (5.10), onde pode ser entendido que os vetores singulares apresentam uma estimativa dos modos de vibração e os correspondentes valores singulares apresentam uma resposta de cada um dos modos (SDOF) expressos pelo espectro de cada coordenada modal[94].

Existe ainda o método mais avançado do FDD, é o método melhorado da decomposição no domínio da frequência (*Enhanced Frequency Domain Decomposition*, EFDD). Este método corrige as principais falhas do método de seleção de picos e do método de decomposição no domínio da frequência.

6

CASOS DE ESTUDO

6.1 NOTA INTRODUTÓRIA

Neste capítulo serão apresentados os casos de estudo onde foi utilizado o sistema de radar IBIS-FS. Como especificado no Capítulo 4, a utilização do radar interferométrico incide maioritariamente sobre estruturas como torres ou pontes. Tendo em conta esse fator, foi efetuada uma seleção de estruturas verticais que envolvessem características do sistema estrutural diferentes entre si, tendo sido escolhido também o caso de estudo de uma ponte. Outro dos fatores que se teve em consideração para validação dos resultados obtidos pelo IBIS-FS, foi a seleção de casos de estudo que tivessem na sua maioria, estudos efetuados anteriormente. Dentro das estruturas verticais foram assim analisadas, uma torre sineira (Torre da Igreja das Antas), um poste de telecomunicações (Poste Metalogalva) e uma chaminé (Chaminé, Parque da cidade Ermesinde). No que diz respeito às estruturas horizontais, apenas foi realizada uma análise, sendo a estrutura escolhida uma ponte pedonal (Ponte Pedonal FEUP).

Nos casos de estudo acima referidos, foi efetuada uma análise dinâmica das estruturas sob efeito de vibrações ambientais (AVT) com o objetivo principal de se obterem as frequências e consequentes modos de vibração das mesmas. No caso do poste de telecomunicações foi possível obter os dados de projeto necessários para a caracterização geométrica da estrutura e possível realização de modelos numéricos. Com o recurso a esses modelos numéricos foi assim possível realizar uma análise modal, com a finalidade de se obter uma comparação das frequências dos modos de vibração entre o modelo numérico e a análise efetuada pelo radar IBIS-FS.

Como complemento às diferentes análises efetuadas, recorreu-se ainda a casos de estudo já efetuados por outros autores como medida de comparação dos dados obtidos nos mesmos com os dados obtidos nesta dissertação.

6.2 POSTE DE TELECOMUNICAÇÕES

6.2.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

O primeiro caso de estudo a ser monitorizado foi um poste metálico, também conhecido como mastro tubular e tem como funcionalidade o suporte de antenas de telecomunicações, como representado na Fig. 6.1. Este poste está situado no recinto da empresa Metalogalva, que se localiza no concelho da Trofa.

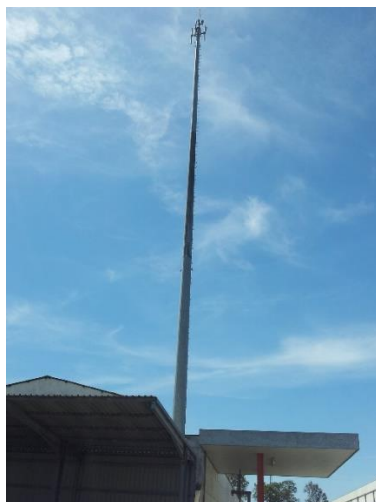


Fig. 6.1 – Poste tubular de telecomunicações

O poste apresenta como constituição geométrica, 4 troços de secção circular variável com um jorramento de aproximadamente 16,5mm/m, em aço de classe S275, e apresenta uma altura total de 33,11m. A representação esquemática do poste e respetiva divisão por troços e ligações é representada na Fig. 6.2, com o acompanhamento de uma tabela resumida das características de cada troço e ligação, ao longo do poste.

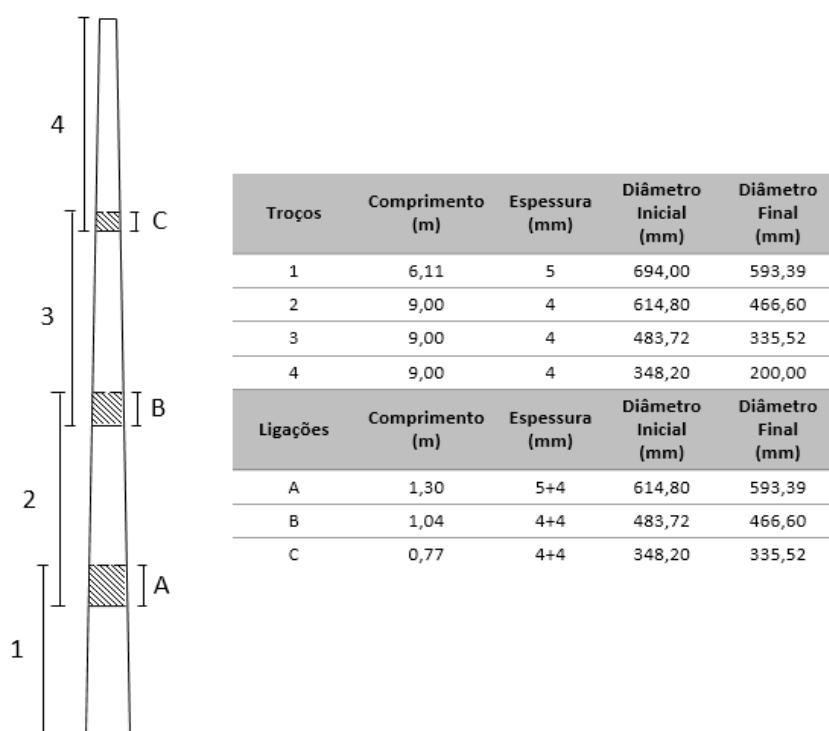


Fig. 6.2 – Esquematização do poste em secções e tabela com as respetivas características

Como se pode observar na Fig. 6.2, as ligações entre os quatro troços são realizadas por encaixe. Este tipo de ligação é o mais usual neste tipo de poste e consiste na sobreposição da parte inferior de um elemento ou troço sobre a parte superior do elemento seguinte (considerando que a leitura dos troços se efetua do 4 para o 1, as ligações são representadas pelas zonas tracejadas da Fig. 6.2). De forma a garantir um encaixe e contacto perfeito das paredes tubulares o jorramento entre peças deve ser igual e constante[97].

O poste monitorizado é constituído ainda por elementos auxiliares, como uma escada de acesso ao topo, onde existe um conjunto de antenas de telecomunicações. A escada está fixa à parte lateral do poste, na Fig. 6.3 é visível a pormenorização da escada e dos elementos de ligação desta ao poste. A escada é constituída por troços de 2,99m de um perfil T50x50x6 em aço S275 e cada troço é constituído por varões (degraus) $\phi 20$ em aço A400 NR espaçados entre si de 30cm. As ligações da escada ao poste estão espaçadas entre si de 2,99m e o seu tipo de aço é o S275. No topo do poste existe ainda um conjunto de antenas de telecomunicações que totalizam um peso de 90Kg.

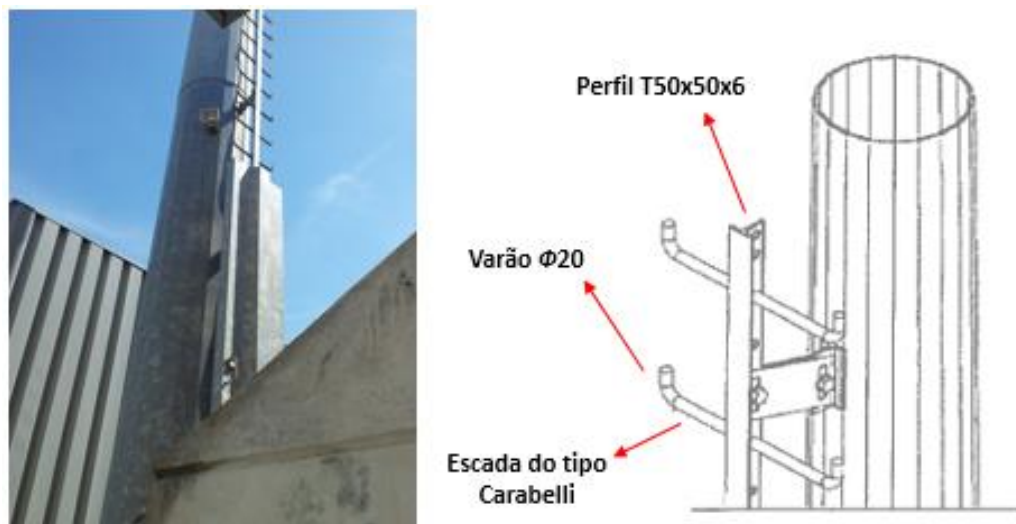


Fig. 6.3 - Pormenorização da escada

Quanto à ligação do poste à fundação, é realizada através de uma flange com diâmetro externo de 892mm e diâmetro entre chumbadouros de 792mm, ligada ao primeiro troço (troço da base) por soldadura com cutelos, que posteriormente transmite os esforços a um conjunto de chumbadouros 20M27 com classe de aço S235 dispostos em círculo, como se pode visualizar na Fig. 6.4.

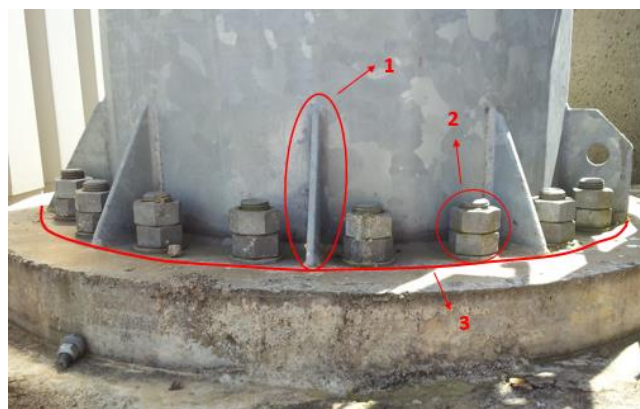


Fig. 6.4 – Pormenorização da fundação do poste

Legenda:

- 1. Cutelo;
- 2. Chumbadouro;
- 3. Flange.

6.2.2 DESCRIÇÃO DAS MONITORIZAÇÕES

Na preparação do plano de monitorização do poste, um dos principais fatores a ter em conta foi o posicionamento do radar IBIS-FS. Visto que o poste não é totalmente simétrico, devido à disposição da escada, existem duas direções principais de vibração da estrutura, que vão afetar os vários modos de vibração. As direções que foram consideradas como as principais de vibração, foram a direção 1 e direção 2, representadas na Fig. 6.5. Na mesma figura estão ainda representadas as vistas frontais das respetivas direções de monitorização.

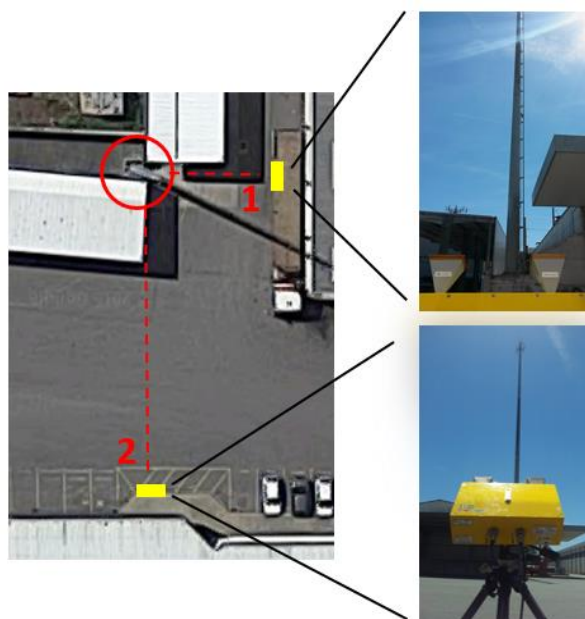


Fig. 6.5 - Vista em planta do local dos ensaios (à esquerda) e vista frontal de cada ensaio (à direita)

Na Fig. 6.6, está esquematizado o posicionamento (geometria) do radar em relação ao poste, nas direções 1 e 2. A geometria que caracteriza esta monitorização é definida de acordo com os seguintes parâmetros:

- x representa a distância horizontal (reta) entre o poste e o radar;
- $z - c$, representa a diferença de cotas entre as antenas (ponto inicial do feixe de abertura) e a base do poste;
- α representa a abertura das antenas e varia de acordo com os valores do Quadro 4.1 apresentado no subcapítulo 4.3.3.2;
- φ representa o *tilt* (rotação vertical, Fig. 4.10) do radar de forma a obter uma melhor abrangência da estrutura com o feixe de abertura.

No Quadro 6.1 são apresentados os valores destes parâmetros utilizados nas monitorizações, na direção 1 e na direção 2.

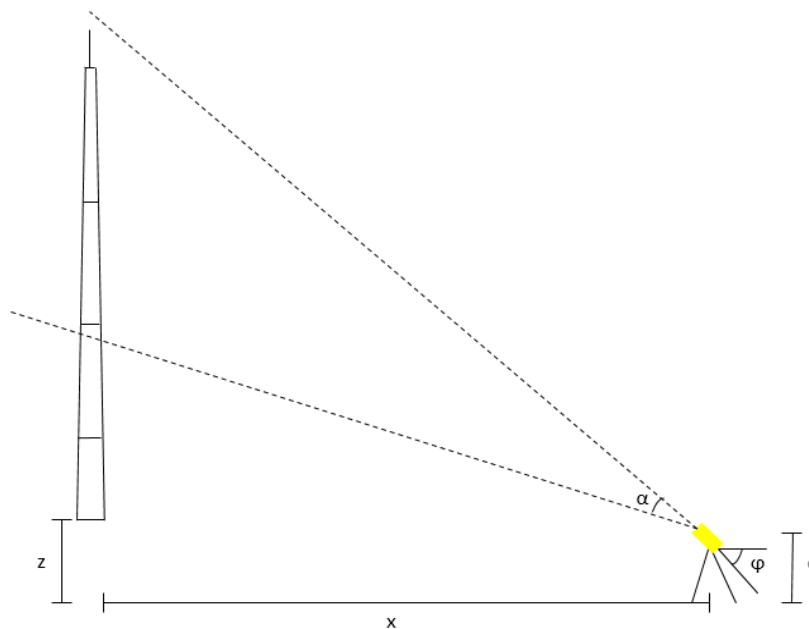


Fig. 6.6 - Esquema representativo de corte das direções 1 e 2

Quadro 6.1 – Parâmetros geométricos das monitorizações na direção 1 e 2

Direção	x (m)	z (m)	c (m)	z (m) - c (m)	φ (graus)
1	13,45	1,53	1,40	0,13	60°
2	29,30	1,53	1,40	0,13	45°

Depois de definidos os parâmetros geométricos da estrutura é necessário definir os parâmetros de análise (representados na Fig. 4.15) que influenciam a aquisição de dados no sistema do radar. Os parâmetros de análise a considerar são:

- Máxima distância a considerar na monitorização (para estruturas de grandes dimensões devem ser considerados 20m adicionais à dimensão da estrutura);

- Resolução de radial (largura das células radiais);
- Tipo de antena (mencionado no subcapítulo 4.3.3.2);
- Frequência de varrimento

No Quadro 6.2, são apresentados os valores dos parâmetros de análise usados em cada uma das monitorizações, nas respetivas direções 1 e 2.

Quadro 6.2 - Parâmetros de análise

Direção	Máx.Distância (m)	Resolução de alcance (m)	Frequência de Varrimento (Hz)
1	60	0,75	20
2	60	0,75	20

Com a definição dos parâmetros acima descritos, a aquisição de dados fica dependente apenas de um fator, o tempo de aquisição. Como regra de boa utilização do radar IBIS-FS, cada monitorização efetuada numa estrutura deve ter um período de medição entre 1000 a 2000 vezes o período da estrutura. Como à partida ainda não era conhecido o período da estrutura, houve a necessidade de se recorrer previamente ao modelo numérico. De acordo com o modelo numérico simplificado o primeiro modo de vibração é de aproximadamente 0.7Hz, portanto o tempo de cada monitorização deverá ser no mínimo 23min49s.

Para a direção 1 foram realizadas duas monitorizações, a primeira com período de 31min e a segunda com 30min. Na direção 2 foram realizados duas medições, ambas com período de 30min, mas apenas a segunda foi utilizada para análise de dados na direção 2. A não consideração da primeira medição consiste no fato de durante a realização desta ter havido grande movimento de veículos na zona do feixe de abertura, os quais causaram grandes interferências nos dados adquiridos, que fez com que não fossem aceitáveis para um pós-processamento.

6.2.3 DADOS OBTIDOS

O pós-processamento dos dados obtidos nas monitorizações foi efetuado através do programa IBISDV (já mencionado no subcapítulo 4.3.4).

Depois de efetuadas as monitorizações o primeiro passo de pós-processamento é a seleção das células radiais (range bins) que apresentam melhores resultados (de acordo com o subcapítulo 4.6.3).

6.2.3.1 Direção 1

A escolha das células foi efetuada de acordo com o método da seleção de picos e com base em 3 fatores, que são:

1. SNR_e, seleção das células radiais com bom sinal de resposta (maiores picos de energia), representado na Fig. 6.7;
2. Fase discreta do sinal complexo das células de radiais, através da representação polar como ilustrado na Fig. 6.8;

3. Observação e análise dos gráficos deslocamento-tempo das células radiais, representados na Fig. 6.9.

Na Fig. 6.7 é apresentada a seleção das células radiais na direção 1, através do gráfico de energias de Razão sinal-ruído estimado (dB) em função da altura da estrutura (m).

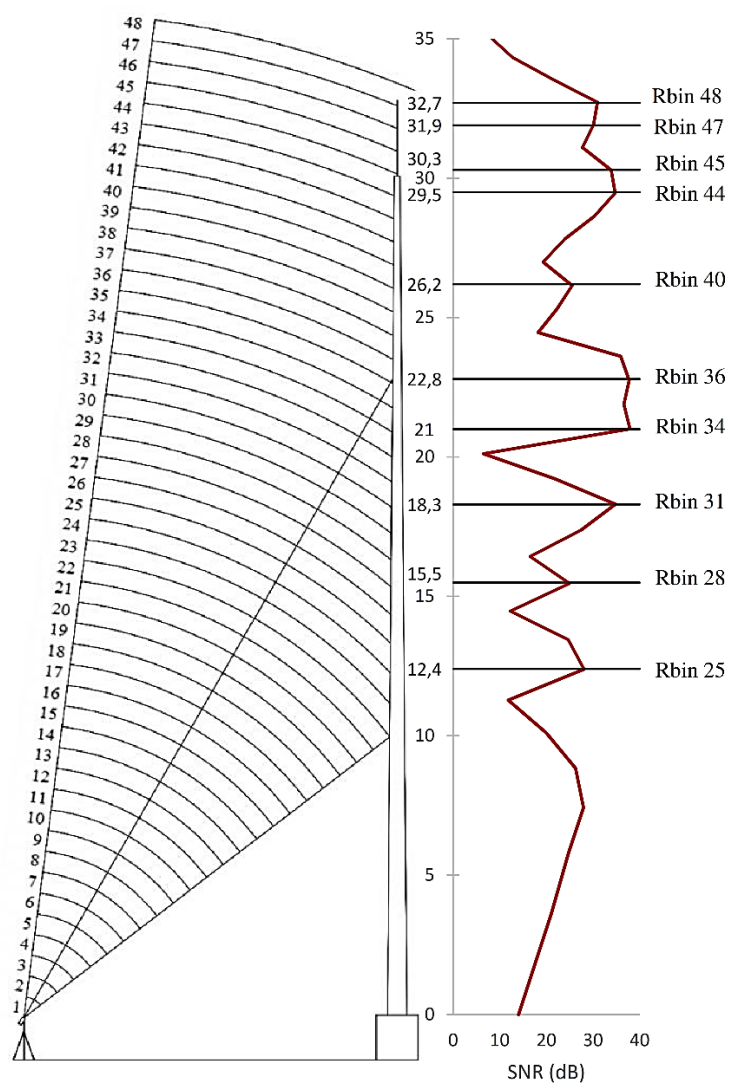


Fig. 6.7 - Seleção das células radiais ótimas

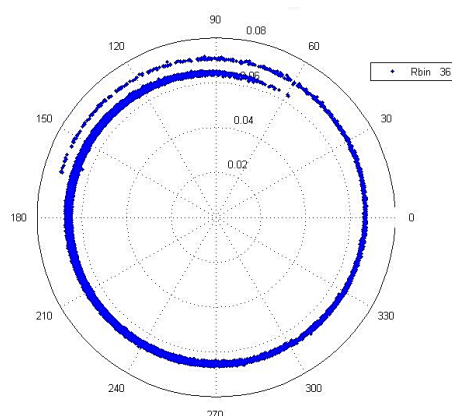


Fig. 6.8 - Representação polar da fase discreta do sinal complexo da célula radial 36

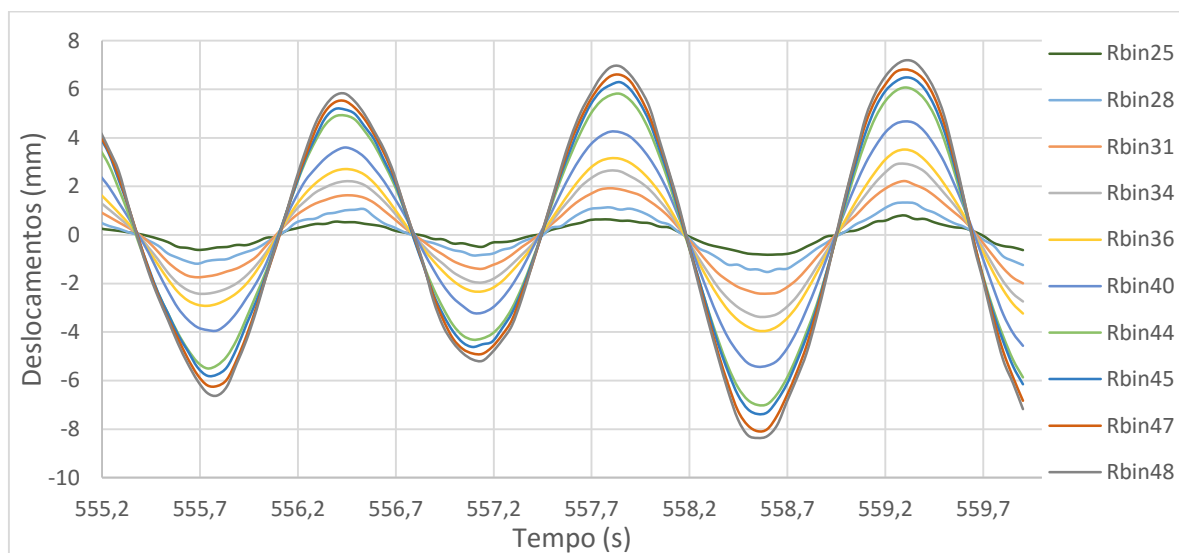


Fig. 6.9 – Gráfico deslocamento-tempo das células radiais

O gráfico de deslocamentos apresentado na Fig. 6.9 apenas corresponde a um intervalo de toda a série temporal, tendo como objetivo principal demonstrar que todas as células radiais tem deslocamentos em fase e portanto correspondem à mesma estrutura (o mesmo se sucede para todos os casos apresentados posteriormente). De acordo com os fatores de seleção das células radiais, de entre 107 células criadas pelo sistema IBIS-FS no feixe de abertura, a seleção compreendeu as células radiais 25, 28, 31, 34, 36, 40, 44, 45, 47, 48.

6.2.3.2 Direção 2

A escolha das células foi efetuada de acordo com o método da seleção de picos, com base em 3 fatores, que são:

1. SNR_e, seleção das células radiais com bom sinal de resposta (picos de energia), representado na Fig. 6.10;

2. Fase do sinal complexo discreto das células de radiais, através da representação polar como ilustrado na Fig. 6.11;
3. Observação e análise dos gráficos deslocamento-tempo das células radiais, representados na Fig. 6.12.

Na Fig. 6.10 é apresentada a seleção das células radiais na a direção 2, através do gráfico de energias da Razão sinal-ruído estimado(dB) em função da altura da estrutura (m).

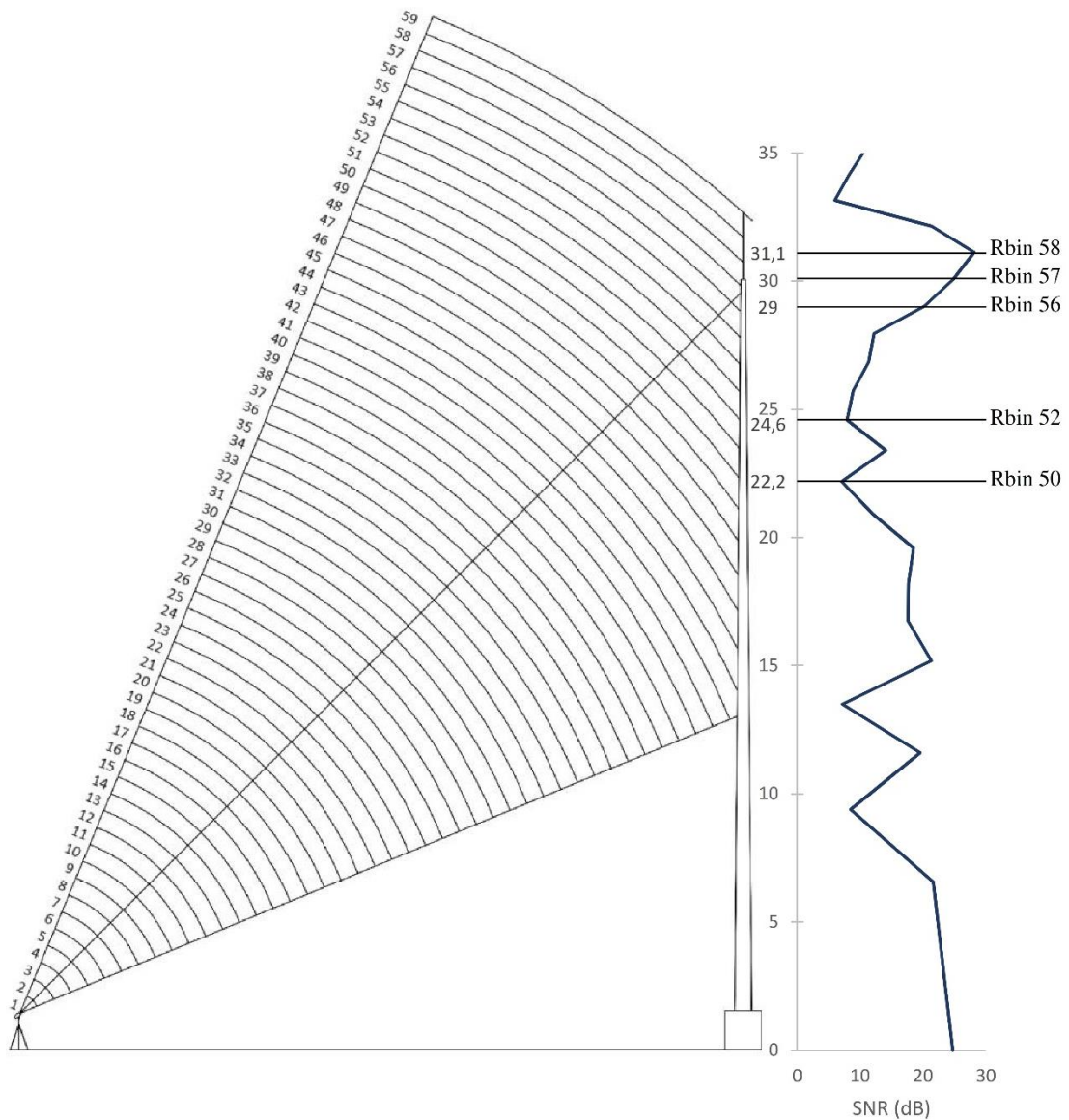


Fig. 6.10 – Seleção das células radiais ótimas

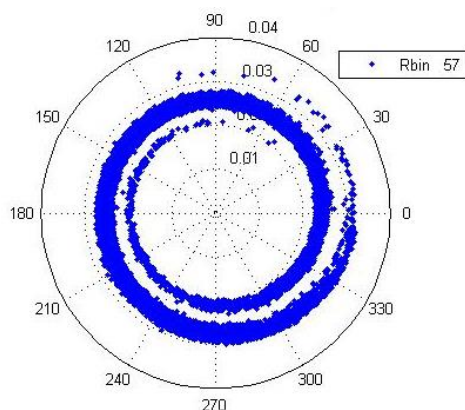


Fig. 6.11 - Representação polar da fase discreta do sinal complexo da célula radial 57

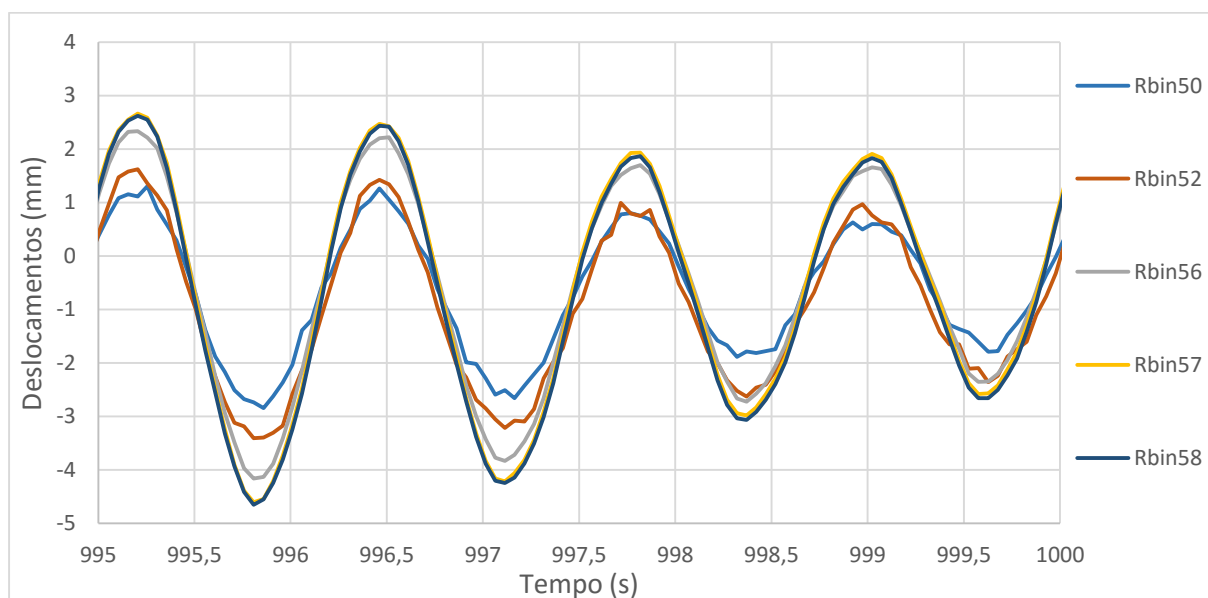


Fig. 6.12 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais

De acordo com os fatores de seleção das células radiais, de entre 107 células criadas pelo sistema IBIS-FS no feixe de abertura, a seleção ótima compreendeu as células radiais 50, 52, 56, 57, 58.

6.2.3.3 Análise de resultados

A escolha das células radiais na direção 1, revelou-se bastante satisfatória, pois numa extensão de 20m foi possível selecionar dez células radiais com bons resultados. Todas as células selecionadas apresentam bons sinais de resposta (picos de energia, Fig. 6.7), apresentam também bons resultados da fase discreta do sinal complexo, visto que todas as representações polares apresentaram pequena espessura e pouco ruído. Para além destes bons resultados, as células radiais demonstram deslocamentos em fase, como se pode observar na Fig. 6.9. Como resultado final e através da transformada de Fourier obteve-se o espetro de velocidades representado na Fig. 6.13, no qual é possível identificar com clareza as frequências correspondentes aos dois primeiros modos obtidos na direção 1.

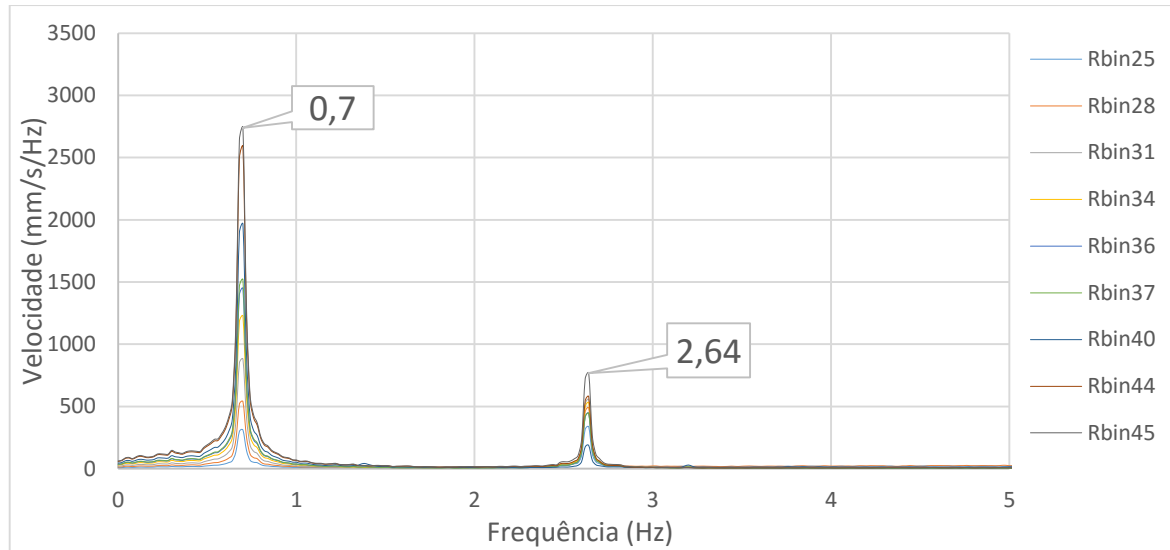


Fig. 6.13 - Espectro de velocidades das células radiais selecionadas na direção 1

Na direção 2, a escolha das células radiais, revelou-se mais complexa, visto que houve interferências externas ao ensaio, uma vez que o local onde foi efetuada a monitorização era propício à passagem de veículos, afetando assim as células radiais interseccionadas pelos veículos. Devido a este fator apenas se conseguiram identificar cinco células radiais com resultados aceitáveis, no entanto só as três superiores (56,57,58) apresentam bons resultados tanto a nível energético como a nível da fase discreta do sinal complexo. As células radiais 50 e 52 apesar de não apresentarem bons níveis de energia de sinal, demonstram uma razoável fase discreta do sinal complexo. No que diz respeito ao gráfico da Fig. 6.12, todas as células radiais apresentam deslocamentos em fase. Como resultado final e através da transformada de Fourier obteve-se o espectro de velocidades representado na Fig. 6.14, no qual é possível identificar com clareza as frequências correspondentes aos dois primeiros modos obtidos na direção 2.

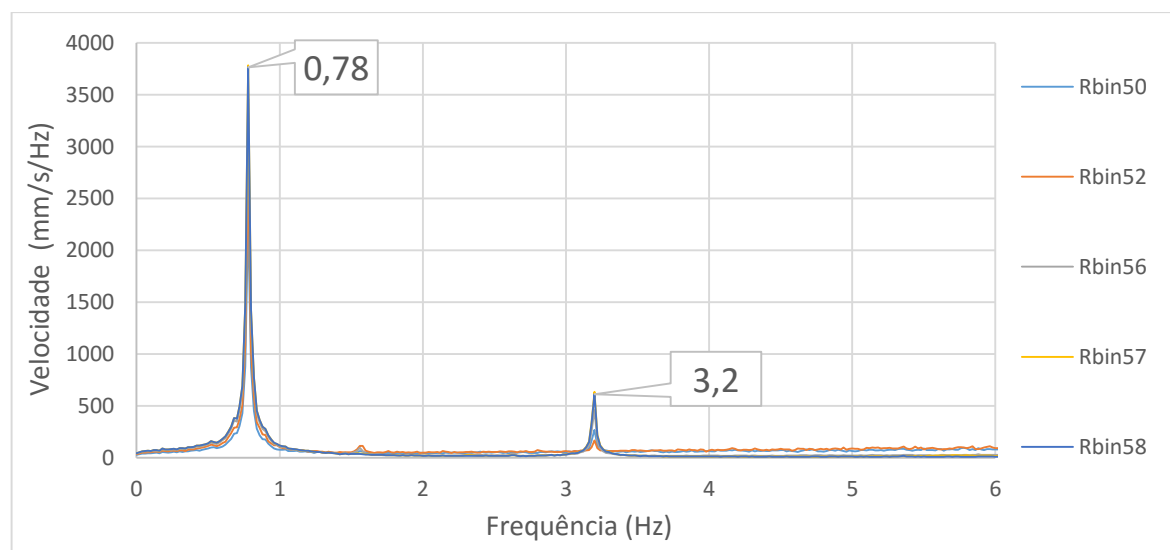


Fig. 6.14 - Espectro de velocidades das células radiais selecionadas na direção 2

No Quadro 6.3, são apresentados os valores das frequências identificadas em cada uma das direções, que correspondem aos primeiros quatro modos de vibração do poste.

Quadro 6.3 - Frequências identificadas nas direções 1 e 2

Modo	Direção	Frequência (Hz)
1	1	0,70
2	2	0,78
3	1	2,64
4	2	3,20

6.2.4 MODELAÇÃO NUMÉRICA

O modelo numérico do poste, foi elaborado no programa de elementos finitos Robot Structural Analysis. Na construção do modelo foram usados elementos de casca para a modelação dos vários troços tronco-cónicos, na modelação da escada foram utilizados elementos de barra e na modelação da ligação do poste à fundação foi utilizado um elemento de casca para a modelação da flange. No que diz respeito às antenas, a modelação não foi efetuada, sendo apenas modelada a massa das mesmas no topo do poste. Na Fig. 6.15 é ilustrado o modelo numérico, e na Fig. 6.16 é ilustrado o pormenor de modelação da flange.



Fig. 6.15 - Modelo numérico do poste

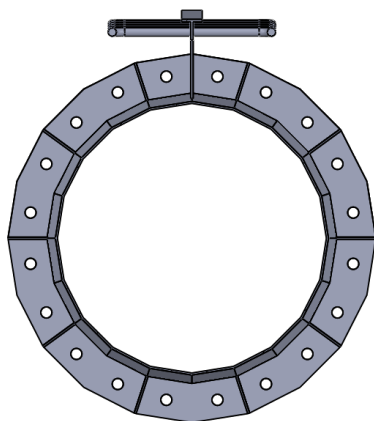


Fig. 6.16 - Modelo numérico da flange

Foi realizada uma análise modal do modelo, desprezando os efeitos de não-linearidade dos materiais, na qual foram identificadas as 4 primeiras frequências da estrutura e os respetivos modos. No Quadro 6.4 são apresentadas as frequências identificadas por via numérica e na Fig. 6.17 são apresentados os respetivos modos de vibração.

Quadro 6.4 - Frequências calculadas através do modelo numérico

Modo	Frequência (Hz)
1	0,69
2	0,79
3	2,64
4	3,12

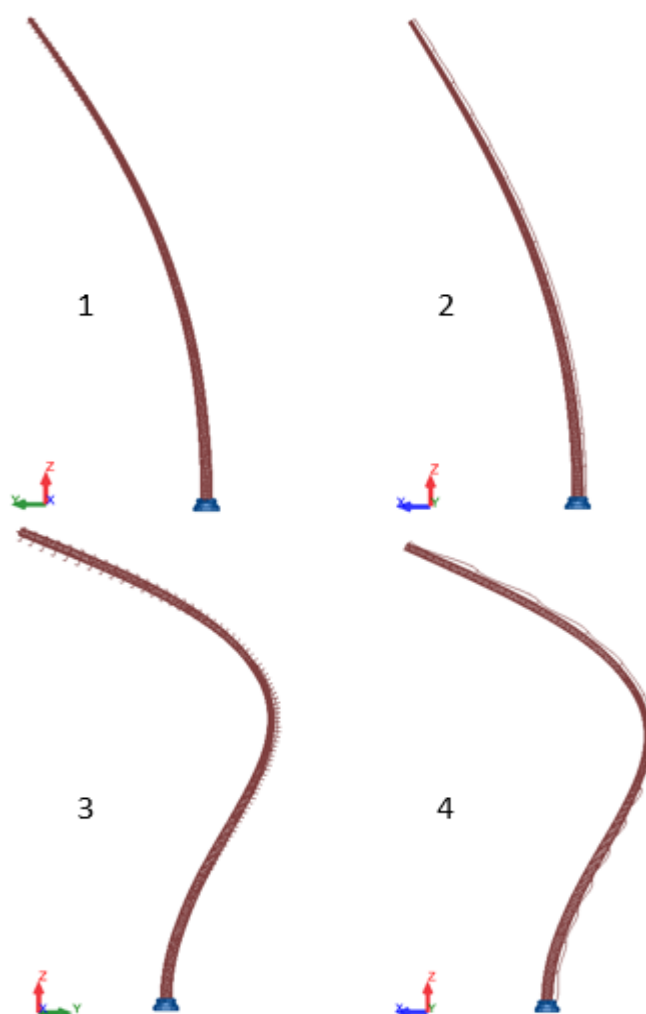


Fig. 6.17 - Modos de vibração do modelo numérico

6.2.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM O MODELO NUMÉRICO

No Quadro 6.5 são apresentados os valores das frequências monitorizadas e as frequências obtidas pelo modelo numérico. Através de uma comparação é efetuado o cálculo do erro entre os dois grupos de frequências.

Quadro 6.5 - Comparação das frequências experimentais com as frequências do modelo numérico

Modo	Experimental (Hz)	Modelo numérico (Hz)	Erro
1	0,70	0,69	1,4%
2	0,78	0,79	1,3%
3	2,64	2,64	0,1%
4	3,20	3,12	2,5%

Na Fig. 6.18 é possível observar-se a comparação dos modos de vibração obtidos no modelo numérico e na monitorização. Apenas são comparados o 1º e o 3º modo de vibração, que são os dois modos principais da direção 1. O 2º e 4º modos não foram comparados graficamente, visto que são os dois modos principais da direção 2, na qual não existem células radiais suficientes (como mencionado no subcapítulo 6.2.3.2) para a realização da comparação.

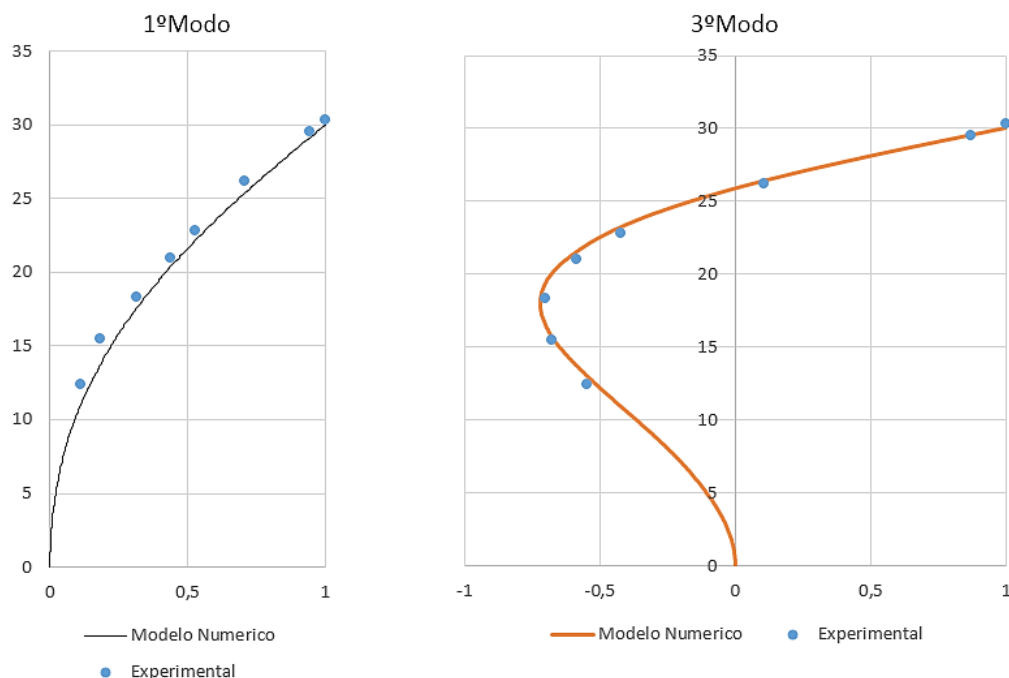


Fig. 6.18 - Comparação das deformadas dos modos de vibração

De acordo com o Quadro 6.5 e com a Fig. 6.18, pode-se concluir que existe alguma percentagem de erro entre o modelo numérico e a monitorização, sendo mais acentuado no 1º modo, já que o 3º modo apresenta um erro quase nulo, e que pode ser observado no gráfico das deformadas do 3º modo.

6.2.6 CONCLUSÕES

Neste caso de estudo, a monitorização apresenta resultados com precisões díspares nas diferentes direções. A qualidade dos resultados obtidos na direção 1 foi melhor, visto que, o cenário envolvente não apresentava tantas interferências como na direção 2. Mesmo em condições adversas na direção 2, foi possível identificar com clareza as 4 primeiras frequências da estrutura. No entanto, só foi possível identificar a deformada de vibração dos dois modos associados à direção 1, ou seja, o 1º e 3º modos de vibração.

No que diz respeito à comparação dos resultados experimentais com o modelo numérico o erro máximo obtido foi de 2,5 %, no 4º modo de vibração. Este erro, deve-se ao facto das dificuldades apresentadas na monitorização do poste na direção 2, e também é necessário ter em conta que um modelo numérico é apenas uma aproximação da realidade, tanto no que diz respeito a modelação geométrica, bem como no comportamento não-linear existente na realidade, que no modelo numérico foi considerado como linear.

6.3 CHAMINÉ DE ALVENARIA DE TIJOLO

Nos finais do século XIX e inícios do século XX, houve um desenvolvimento industrial considerável, caracterizado pelo crescimento da construção de estruturas industriais. As chaminés em alvenaria de tijolo são um dos elementos mais icónicos dessa época, e representam hoje em dia um dos elementos constituintes do património arquitetónico industrial.

Este caso de estudo focou-se na análise de uma chaminé de alvenaria, de uma antiga fábrica de cerâmica, que hoje em dia faz parte de um parque público de lazer, localizado na cidade de Ermesinde. Com o recurso ao sistema de radar IBIS-FS, efetuou-se a monitorização da chaminé com a finalidade de se obterem as frequências dos principais modos de vibração da estrutura. Para validação, os resultados obtidos foram comparados com um estudo efetuado em 2009, publicados no artigo “*Ambient vibration testing and seismic analysis of a masonry chimney*”[98], no *Journal of Building Appraisal*.

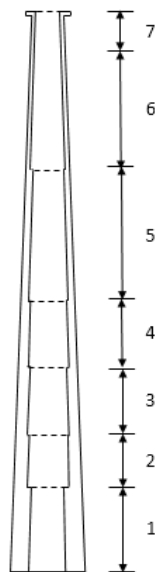
6.3.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

Como já mencionado anteriormente, a estrutura em análise neste caso de estudo foi uma chaminé de alvenaria de tijolo com secção circular, como se pode observar na Fig. 6.19.



Fig. 6.19 - Chaminé de alvenaria de tijolo

Com base no estudo de Valter Lopes [98], foi possível fazer uma caracterização geométrica, ilustrada na Fig. 6.20. A chaminé tem uma altura total de 41,40m, mas apenas são visíveis 39,90m, devido à construção de um reforço na fundação. A base tem um diâmetro exterior de 3,70m e um coeficiente de esbelteza de 11 (normalmente este tipo de estruturas tem coeficientes de esbelteza entre 8 e 11 [98]).



Troços	Comprimento (m)	Espessura (mm)
1	6	830
2	4	710
3	5	590
4	5	470
5	10	350
6	9,5	230
7	1,9	variável

Fig. 6.20 – Esquematização (em corte) da chaminé em secções e tabela com respetivas características

O mesmo estudo permitiu obter também informações mais detalhas das imperfeições existentes na torre, como o desvio (visível a olho nu) no topo da torre. Esse desvio tem um valor de 0,24m e é representado na Fig. 6.21, à esquerda é ilustrado o perfil da chaminé e à direita é ilustrada a vista em planta da chaminé, onde a parte tracejada corresponde à base e a preenchida a corresponde ao topo.

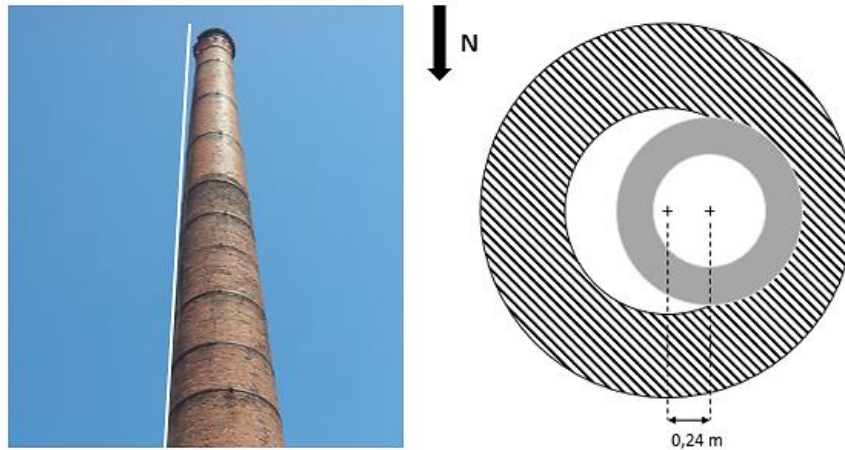


Fig. 6.21 - Ilustração do desvio no topo da chaminé

6.3.2 DESCRIÇÃO DAS MONITORIZAÇÕES

Tal como no ensaio do poste de telecomunicações, a primeira preocupação a ter em conta na monitorização da chaminé, foi a seleção das direções principais de vibração para o posicionamento do IBIS-FS. Tal como se pode observar na Fig. 6.22, a chaminé não é simétrica devido ao fato de existir uma abertura (assinalada na Fig. 6.22 com uma circunferência) junto à base, e também devido ao desvio apresentado no subcapítulo anterior. Aliado a estes fatores, a seleção das direções principais de vibração teve em conta também o cenário envolvente (andaimes, edifícios, árvores), para que pudesse ser escolhido um cenário de monitorização com pouco ruído. Devido a estes fatores as direções escolhidas para a monitorização foram a direção 1 e a direção 2, como ilustra a Fig. 6.23.



Fig. 6.22 - Representação do cenário envolvente da estrutura

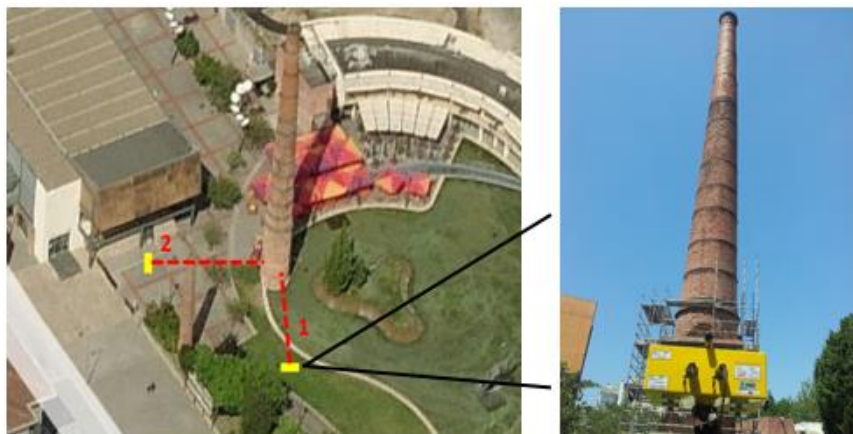


Fig. 6.23 - Vista panorâmica do local dos ensaios (à esquerda) e vista frontal do ensaio na direção 1 (à direita)

Na Fig. 6.24, está esquematizado o posicionamento (geometria) do radar em relação à chaminé, na direção 1. A geometria que caracteriza esta monitorização é definida de acordo com os seguintes parâmetros:

- x representa a distância horizontal (reta) entre a chaminé e o radar;
- c representa a altura do início do feixe das antenas ao solo;
- α representa a abertura das antenas e varia de acordo com os valores do Quadro 4.1 apresentado no subcapítulo 4.3.3.2;
- φ representa o *tilt* (rotação vertical, Fig. 4.10) do radar de forma a obter uma melhor abrangência da estrutura com o feixe de abertura.

No Quadro 6.6 são apresentados os valores destes parâmetros utilizados nas monitorizações na direção 1 (neste caso o parâmetro z , presente na geometria do poste de telecomunicações, não é considerado devido ao fato de a base considerada para a chaminé estar aproximadamente ao mesmo nível dos apoios do tripé do IBIS-FS).

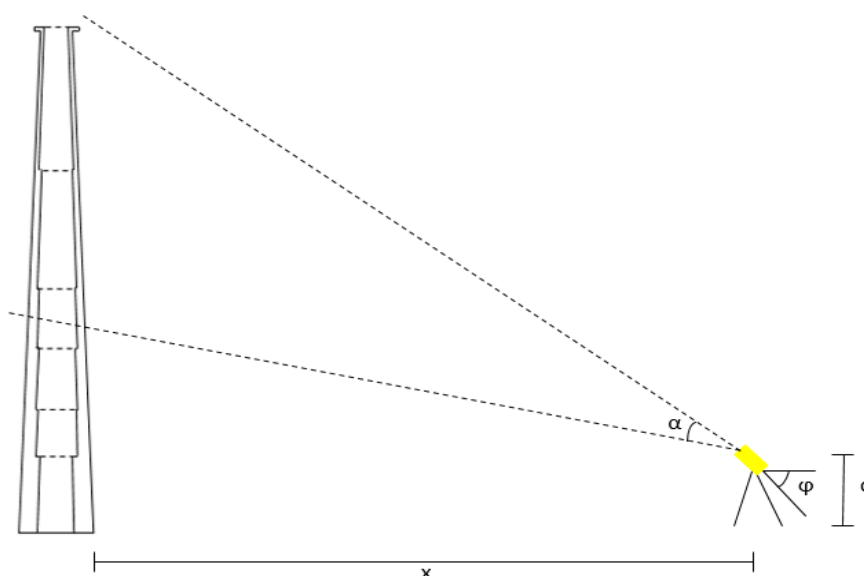


Fig. 6.24- Esquema representativo de corte da direção 1

Quadro 6.6 - Parâmetros geométricos das monitorizações na direção 1

Direção	x (m)	c (m)	φ (graus)
1	17,50	1,40	55°

Depois de definidos os parâmetros geométricos da estrutura é necessário definir os parâmetros de análise, representados na Fig. 4.15, que influenciam a aquisição de dados no sistema do radar. Estes parâmetros já foram descritos no subcapítulo 6.2.2, e os seus valores para a direção de monitorização 1, são apresentados no Quadro 6.7.

Quadro 6.7 - Parâmetros de análise

Direção	Máx.Distância (m)	Resolução de alcance (m)	Frequência de Varrimento (Hz)
1	60	0,75	60

Com a definição dos parâmetros acima descritos, fica dependente apenas de um fator, o tempo de aquisição. Nos resultados obtidos no estudo de Valter Lopes [98], a frequência natural da estrutura obtida foi de 0.61Hz. Com este valor foi assim possível calcular o tempo mínimo de monitorização, sendo este igual a 27min19s. Portanto para a direção 1 foram realizadas duas monitorizações, ambas com período de 30min.

6.3.3 DADOS OBTIDOS

O pós-processamento dos dados obtidos nas monitorizações foi efetuado através do programa IBISDV (já mencionado no subcapítulo 4.3.4).

Depois de efetuadas as monitorizações o primeiro passo de pós-processamento é a seleção das células radiais (range bins) que apresentam melhores resultados (de acordo com o subcapítulo 4.6.3).

6.3.3.1 Direção 1

A escolha das células foi efetuada de acordo com o método da seleção de picos e com base em 3 fatores, que são:

1. SNR_e, seleção das células radiais com bom sinal de resposta (maiores picos de energia), representado na Fig. 6.25;
2. Fase do sinal complexo discreto das células de radiais, através da representação polar como ilustrado na Fig. 6.26;
3. Observação e análise dos gráficos deslocamento-tempo das células radiais, representados na Fig. 6.27.

Na Fig. 6.25 é apresentada a seleção das células radiais na direção 1, através do gráfico de energias de razão sinal-ruído estimado (dB) em função da altura da estrutura (m).

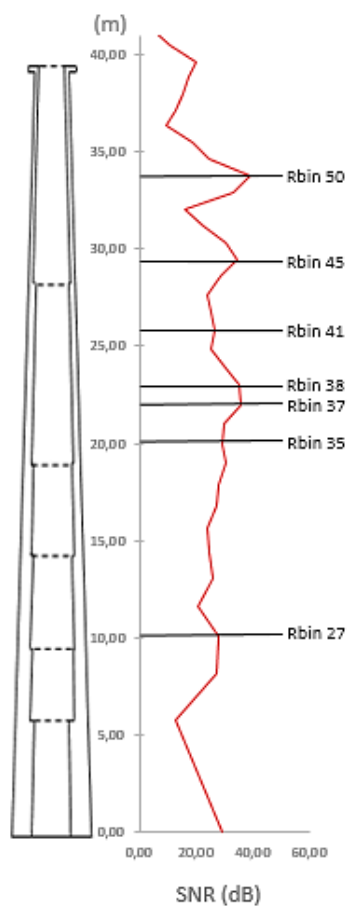


Fig. 6.25 – Gráfico de energia dos pontos da estrutura com seleção das células radiais

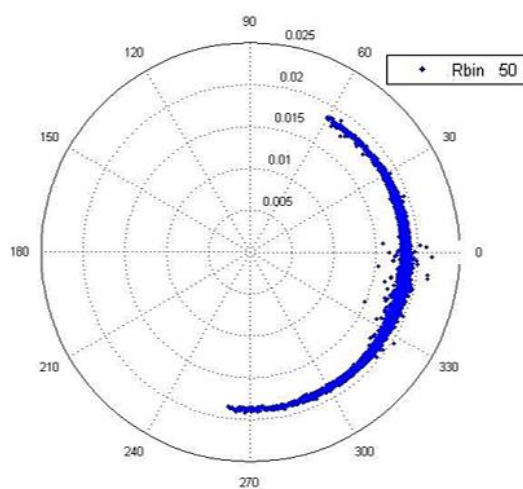


Fig. 6.26 - Representação polar da fase discreta do sinal complexo da célula radial 50

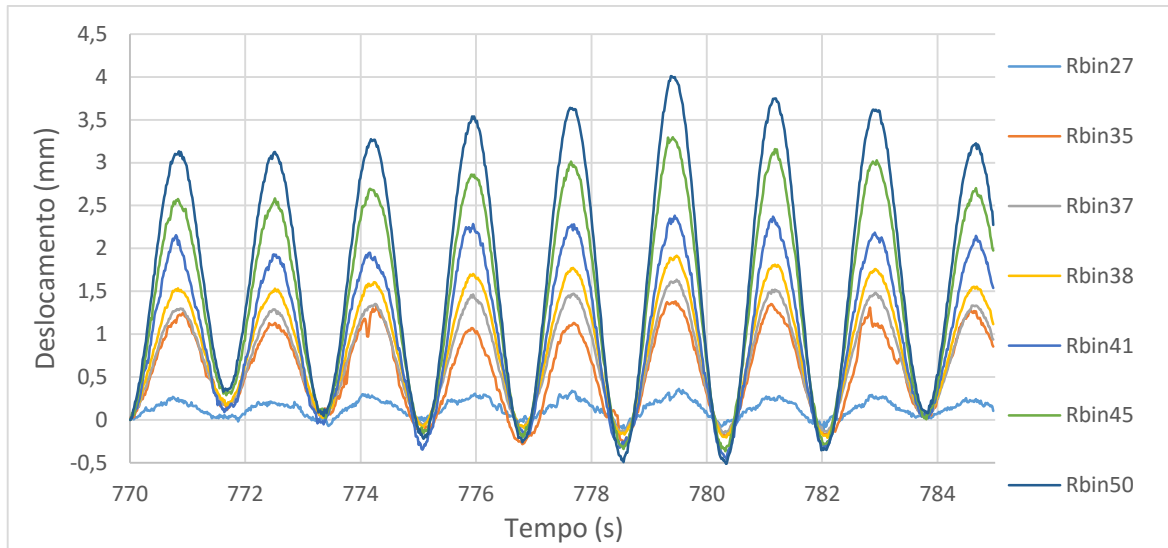


Fig. 6.27 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais

De acordo com os fatores de seleção das células radiais, de entre as células criadas pelo sistema IBIS-FS no feixe de abertura, a seleção compreendeu as células radiais 27, 35, 37, 38, 41, 45 e 50.

6.3.3.2 Direção 2

Na direção 2, que seria a direção perpendicular à direção 1, não foi possível efetuar qualquer tipo de monitorização, visto não existirem as condições necessárias para que tal se sucedesse. Os fatores que influenciaram a não realização das monitorizações foram, as obras de reabilitação que estavam a decorrer no momento dos ensaios e o cenário circundante da estrutura. Na Fig. 6.23 é possível visualizar o posicionamento que iria ser dado ao radar para a monitorização da chaminé na direção 2. Ainda na direção 2, mas no lado oposto ao posicionamento representado na Fig. 6.23 também não foi possível efetuar a monitorização, porque para além das razões anteriormente apresentadas existe ainda uma árvore que iria afetar os dados. Nas Fig. 6.19 e Fig. 6.22 são visíveis todas os fatores apresentados anteriormente.

6.3.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

A escolha das células radiais na direção 1, revelou-se satisfatória, visto que a estrutura apresenta pouca refletividade e só foi possível efetuar monitorizações a partir da altura de aproximadamente 10 metros (devido à colocação dos andaimes, Fig. 6.19). Assim, numa extensão de 30m foi possível selecionar sete células radiais com resultados aceitáveis perante os parâmetros de seleção. No espectro de velocidades da Fig. 6.28, são apresentados os resultados de todas as células radiais selecionadas.

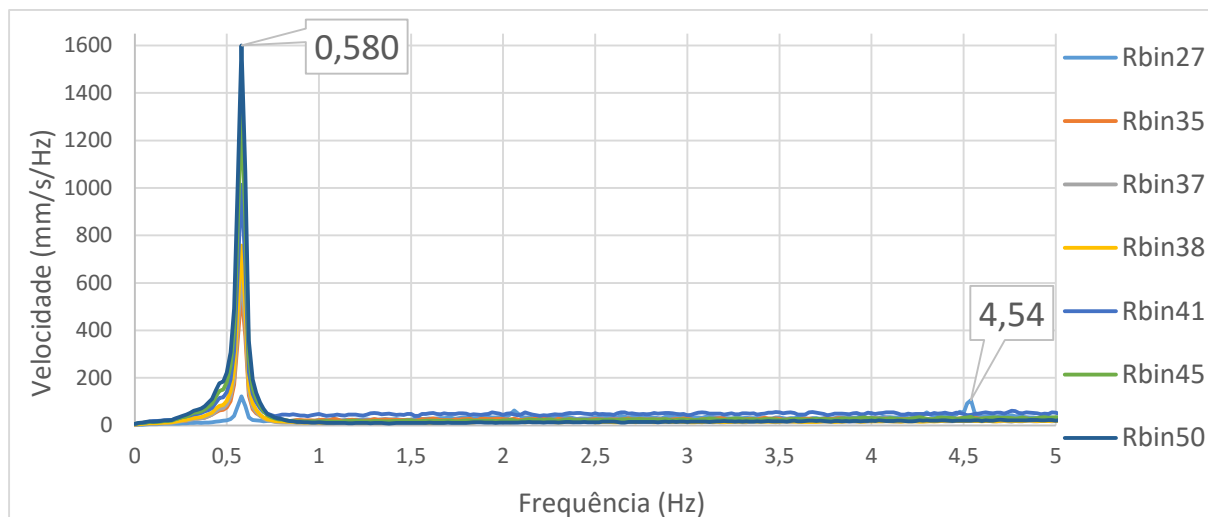


Fig. 6.28 - Espectro de velocidades das células radiais selecionadas na direção 1

As células radiais selecionadas permitem assim identificar com clareza a frequência do primeiro modo de vibração da estrutura na direção 1. No entanto para a identificação de outros modos foi necessário efetuar uma análise mais detalhada. Como quase todas as células radiais selecionadas incidem sobre pontos que se situam na metade superior da chaminé, é normal que os dados recolhidos se traduzam nas primeiras frequências da estrutura, neste caso apenas na primeira. No entanto foi possível selecionar uma célula radial num ponto mais baixo da estrutura, como se pode verificar na Fig. 6.25, onde foi realizada uma análise mais detalhada do espectro de velocidades e que se apresenta na Fig. 6.29.

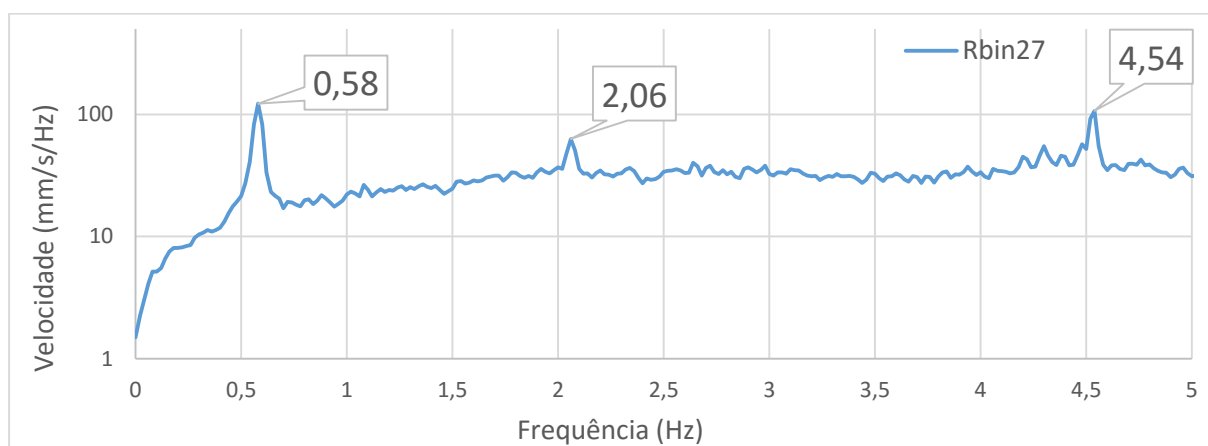


Fig. 6.29 - Espectro de velocidades da célula radial 27 na direção 1

Como se pode verificar através do espectro de velocidades da Fig. 6.29, a análise detalhada incidiu sobre a célula radial 27, que permitiu obter como resultados as frequências da estrutura para o 2º e 3º modos de vibração na direção 1.

A seleção das células radiais acima descritas, teve também em conta os resultados apresentados da fase discreta do sinal complexo (Fig. 6.26), que na direção 1 foram bastante satisfatórios tendo em conta o

tipo de estrutura presente. Além disso as células radiais apresentam ainda deslocamentos em fase como se pode observar na Fig. 6.27.

No Quadro 6.8, são apresentados os valores das frequências identificadas na direção 1 e a sua correspondência com os modos da estrutura.

Quadro 6.8 - Frequências identificadas na direção 1

Modo	Direção	Frequência (Hz)
1	1	0,58
3	1	2,06
5	1	4,54

No Quadro 6.9 são apresentados os valores das frequências monitorizadas e as frequências apresentadas no estudo de Valter Lopes [98]. Através de uma comparação é efetuado o cálculo da diferença entre os dois grupos de frequências.

Quadro 6.9 - Comparação das frequências experimentais com as frequências do estudo [98]

Modo	Experimental (Hz)	Estudo (Hz)	Diferença
1	0,58	0,61	4,92%
3	2,06	1,96	4,85%
5	4,54	4,53	0,22%

6.3.5 CONCLUSÕES

O caso de estudo analisado apresentou resultados satisfatórios, que poderiam ter sido mais precisos se a monitorização na direção 2 tivesse sido realizada. No entanto a monitorização realizada na direção 1, permitiu obter um conjunto de células radiais com bons resultados. Apesar da maioria das células radiais se situar na metade superior da estrutura, através de uma análise mais detalhada à célula radial 27, para além da frequência natural da estrutura foi ainda possível obter as frequências do 3º e 5º modos de vibração, como representado nos espetros de velocidade das Fig. 6.28 e Fig. 6.29. Por este motivo é perceptível que se os dados recolhidos nas células radiais inferiores, tivessem melhor sinal de energia, as frequências da estrutura teriam sido identificadas com maior facilidade no espetro de velocidades da Fig. 6.28. Mas como já referido anteriormente existiram fatores externos que influenciaram o tipo de monitorização que foi efetuada.

Como referido na descrição da estrutura, faz parte da sua constituição um conjunto de anéis metálicos. Devido à pouca refletividade da alvenaria, os anéis metálicos foram a principal fonte de refletividade e que fez deles os potenciais alvos “virtuais” considerados pelo IBIS-FS. Dentro deste contexto, o ruído apresentado nos sinais de resposta, visível no gráfico deslocamentos-tempo da Fig. 6.27, pode ter tido como principal causa a degradação da fixação desses anéis à estrutura.

A comparação dos resultados experimentais com os obtidos através do estudo de Valter Lopes[98], teve como diferença máxima 4,92 %, no 1º modo de vibração. Esta diferença, deve-se ao facto da alteração

da rigidez da estrutura (diminuição), possivelmente devido ao aumento do desvio (efeitos não lineares geométricos) com a degradação da estrutura, desde que foi efetuado o estudo no ano de 2009.

6.4 TORRE SINEIRA

Este subcapítulo é destinado à análise da torre sineira da Igreja de Santo António das Antas, situada na zona das Antas, no concelho do Porto. A sua construção começou a 20 de Março de 1948, e finalizou a 6 de Junho de 1954[99]. A equipa projetista da igreja envolveu grandes nomes, como os Engenheiros Joaquim Sarmento e Correia de Araújo (Ambos Professores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) e os Arquitetos Fernando Vouzela e Fernando Barbosa.

A Igreja de Santo António das Antas é delimitada por uma avenida e três ruas, sendo elas: a Avenida de Fernão Magalhães, a Rua de Naulila, a Rua de Fernando de Bulhões e a Rua de Santo António das Antas (Fig. 6.30).

A Igreja de Santo António das Antas é composta por seis corpos, sendo estes:

- 2 Corpos centrais, correspondentes ao local onde são celebradas as missas, sendo um dos corpos constituído pela capela principal, que possui o formato de um retângulo com uma semi-elipse na parte posterior deste corpo, e o outro corresponde a um paralelogramo que se sobressai em altura (referente à entrada da igreja).
- 2 Corpos frontais e 2 corpos posteriores que correspondem a paralelepípedos com a altura até aproximadamente a soleira da porta de acesso ao terraço deste;
- 1 Corpo adjacente, que corresponde à Torre Sineira[99].



Fig. 6.30 - Vista panorâmica da Igreja de Santo António das Antas, com respetiva orientação

Este caso de estudo focou-se apenas na análise dinâmica da torre sineira pertencente à igreja, visível na Fig. 6.30. A monitorização da torre foi efetuada com o recurso ao sistema de radar IBIS-FS, e permitiu identificar as frequências dos principais modos de vibração da estrutura. Posteriormente os resultados obtidos foram comparados com um estudo já efetuado em 2010 numa dissertação realizada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com autoria de Paulo Baião e título “Comportamento Dinâmico de uma Torre Sineira”[99].

6.4.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A partir do estudo já efetuado na torre [99], foi possível fazer a caracterização geométrica da estrutura, em ambas as direções de análise. Na Fig. 6.31 está representada parte dessa caracterização.

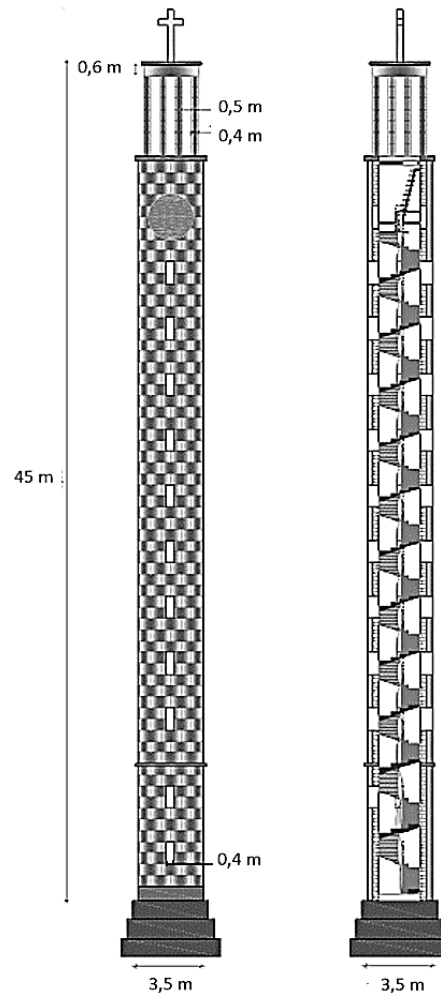


Fig. 6.31 - Vista frontal da torre com orientação NO-SE (à esquerda) e corte lateral com orientação NE-SO (à direita), adaptado de [99]

A torre apresenta uma altura de cerca de 45m ($\approx 45.05\text{m}$), e no topo é constituída por um carrilhão de 9 sinos. A sua seção adota um formato quadrangular, como se pode observar na Fig. 6.32, com 3.5 metros de lado (exterior). As paredes desta seção tem uma espessura de 0.65 metros que pode ser divisível em duas partes, a primeira de 0.35 metros realizada em alvenaria de granito e a segunda realizada em blocos de granito paralelepípedicos com 0,30 metros, entre estas duas partes existem ainda juntas preenchidas com argamassa. Nos cantos interiores existe um reforço, que foi colocado após a realização das escadas, e teve também como objetivo a compensação da espessura inicialmente prevista em projeto, que era de 0.70 metros.

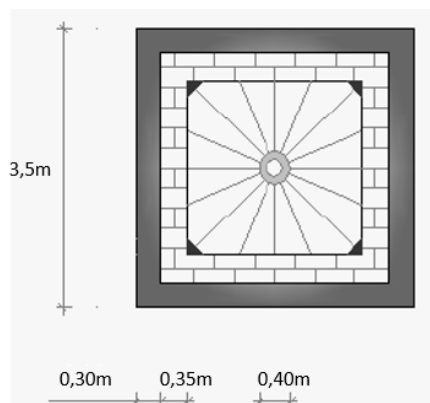


Fig. 6.32 - Secção transversal da torre, adaptado de [99]

No que diz respeito às fachadas, estas apresentam janelas com dimensões $0,4 \times 1,20 \text{ m}^2$. O número de janelas abaixo do nível do terraço varia entre 0 e 2 entre as diferentes fachadas, já acima do terraço existem 9 janelas, espaçadas de 3m. Todos estes pormenores são perceptíveis através da Fig. 6.33.



Fig. 6.33 – Vista pormenorizada da torre com orientação NO-SE

Como meio de acesso ao topo da torre existe uma escada em espiral realizada em betão armado, que conta com 186 degraus, cujas características geométricas variam à medida que a cota evolui.

6.4.2 DESCRIÇÃO DAS MONITORIZAÇÕES

Na realização do plano de monitorização o primeiro fator a ter em conta foi a geometria e constituição da estrutura. A seleção das direções principais de monitorização, teve em conta, não só o tipo de seção da estrutura (quadrangular), mas também a diferença de rigidez na parte inferior da torre, nas diferentes direções, como apresentado no subcapítulo anterior. A partir da Fig. 6.34, pode observar-se as direções

principais de vibração nas quais se realizaram as monitorizações, bem como o local onde foi colocado o radar IBIS-FS, tendo em conta os fatores acima descritos.



Fig. 6.34 - Vista panorâmica do local dos ensaios (ao centro) e vista frontal de cada ensaio nas respetivas direções (à esquerda e direita)

Na Fig. 6.35, está esquematizado o posicionamento (geometria) do radar em relação à torre, nas direções 1 e 2. A geometria que caracteriza esta monitorização é definida de acordo com os seguintes parâmetros:

- x representa a distância horizontal (reta) entre a torre e o radar;
- $z + c$, representa a diferença de cotas entre as antenas (ponto inicial do feixe de abertura) e a base da torre;
- α representa a abertura das antenas e varia de acordo com os valores do Quadro 4.1 apresentado no subcapítulo 4.3.3.2;
- φ representa o *tilt* (rotação vertical, Fig. 4.10) do radar de forma a obter uma melhor abrangência da estrutura com o feixe de abertura.

No Quadro 6.10 são apresentados os valores destes parâmetros utilizados nas monitorizações na direção 1 e na direção 2.

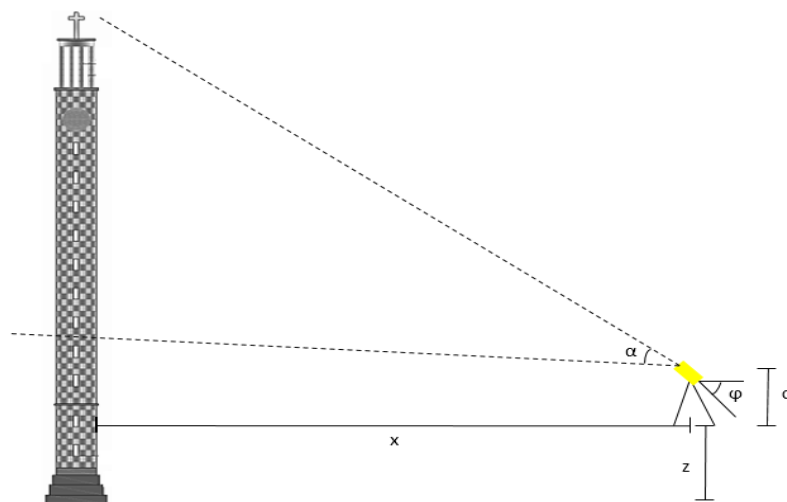


Fig. 6.35- Esquema representativo de corte das direções 1 e 2

Quadro 6.10 - Parâmetros geométricos das monitorizações na direção 1 e 2

Direção	x (m)	z (m)	c (m)	z (m) + c (m)	ϕ (graus)
1	8,00	2,50	1,30	4,30	60°
2	10,40	0,00	1,30	1,30	60°

Depois de definidos os parâmetros geométricos da estrutura é necessário definir os parâmetros de análise (representados na Fig. 4.15) que influenciam a aquisição de dados no sistema do radar. Estes parâmetros já foram descritos no subcapítulo 6.2.2, e os seus valores para as direções de monitorização 1 e 2, são apresentados no Quadro 6.11.

Quadro 6.11 - Parâmetros de análise

Direção	Máx.Distância (m)	Resolução de alcance (m)	Frequência de Varrimento (Hz)
1	60	0,75	60
2	60	0,75	60

Com a definição dos parâmetros acima descritos, a aquisição de dados fica dependente apenas de um fator, o tempo de aquisição. Com base na informação do estudo de Paulo Baião [99] a frequência natural da estrutura em ambas as direções é de aproximadamente 1Hz. Com este valor foi assim possível calcular o tempo mínimo de monitorização, sendo este igual a 16min40s. Portanto para as direções 1 e 2 foram realizadas duas monitorizações, ambas com período de 20min.

6.4.3 DADOS OBTIDOS

O pós-processamento dos dados obtidos nas monitorizações foi efetuado através do programa IBISDV (já mencionado no subcapítulo 4.3.4).

Depois de efetuadas as monitorizações o primeiro passo de pós-processamento é a seleção das células radiais que apresentam melhores resultados (de acordo com o subcapítulo 4.6.3).

6.4.3.1 Direção 1

A escolha das células foi efetuada de acordo com o método da seleção de picos e com base em 2 fatores, que são:

1. SNR_e, seleção das células radiais com bom sinal de resposta (maiores picos de energia), representado na Fig. 6.36;
2. Observação e análise dos gráficos deslocamento-tempo das células radiais, representados na Fig. 6.37.

Neste caso, à exceção de todos os outros, na seleção dos picos não se considerou a contribuição da fase do sinal complexo discreto das células radiais, visto que este não apresentava resultados decisivos para a seleção ótima dos pontos.

Na Fig. 6.36 é apresentada a seleção das células radiais na direção 1, através do gráfico de energias de Razão sinal-ruído estimado (dB) em função da altura da estrutura (m).

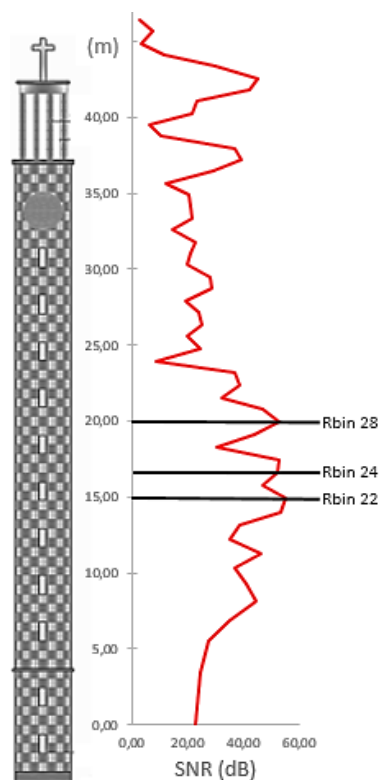


Fig. 6.36 – Gráfico de energia dos pontos da estrutura com a seleção das células radiais

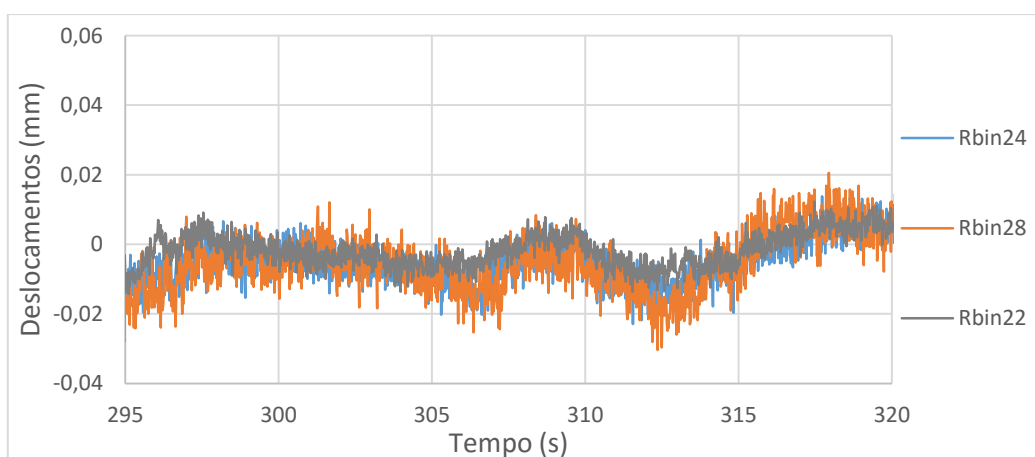


Fig. 6.37 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais

De acordo com os fatores de seleção das células radiais, de entre as células criadas pelo sistema IBIS-FS no feixe de abertura, a seleção compreendeu as células radiais 22, 24 e 28.

6.4.3.2 Direção 2

A escolha das células foi efetuada de acordo com o método da seleção de picos, com base em 3 fatores, que são:

1. SNR_e , seleção das células radiais com bom sinal de resposta (picos de energia), representado na Fig. 6.38;
2. Fase do sinal complexo discreto das células de radiais, através da representação polar como ilustrado na Fig. 6.39;
3. Observação e análise dos gráficos deslocamento-tempo das células radiais, representados na Fig. 6.40.

Na Fig. 6.38 é apresentada a seleção das células radiais na direção 2, através do gráfico de energias da razão sinal-ruído estimado (dB) em função da altura da estrutura (m).

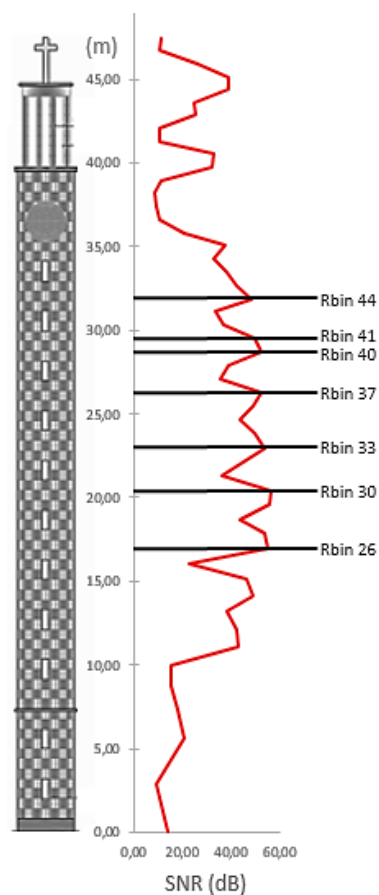


Fig. 6.38 - Gráfico de energia dos pontos da estrutura com a seleção das células radiais

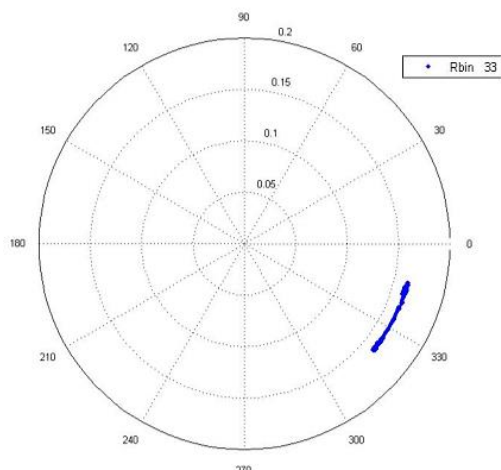


Fig. 6.39 - Representação polar da fase discreta do sinal complexo da célula radial 33

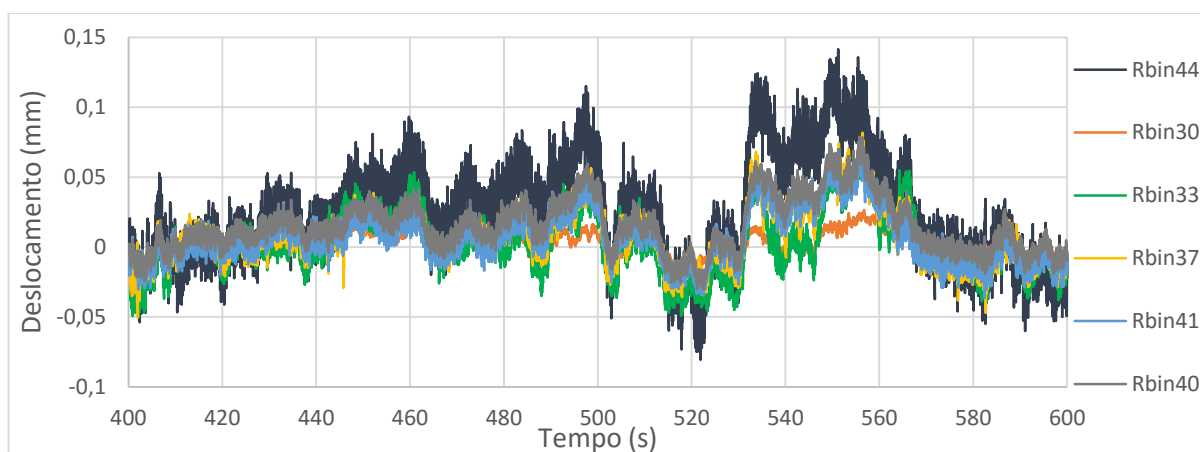


Fig. 6.40 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais

De acordo com os fatores de seleção das células radiais, de entre as células criadas pelo sistema IBIS-FS no feixe de abertura, a seleção ótima compreendeu as células radiais 26, 30, 33, 37, 40, 41 e 44.

6.4.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

A escolha de células radiais na direção 1, revelou-se complexa, visto que na extensão total da torre apenas foram identificadas 3 células radiais com bons resultados para análise. Das células radiais selecionadas, todas apresentam razoáveis sinais de resposta (picos de energia, Fig. 6.36), além disso todas as células radiais apresentam deslocamentos em fase, como se pode observar na Fig. 6.37. Como resultado final e através da transformada de Fourier obteve-se o espectro de velocidades apresentado na Fig. 6.41, no qual é possível identificar com clareza a frequência correspondente ao primeiro modo obtido na direção 1.

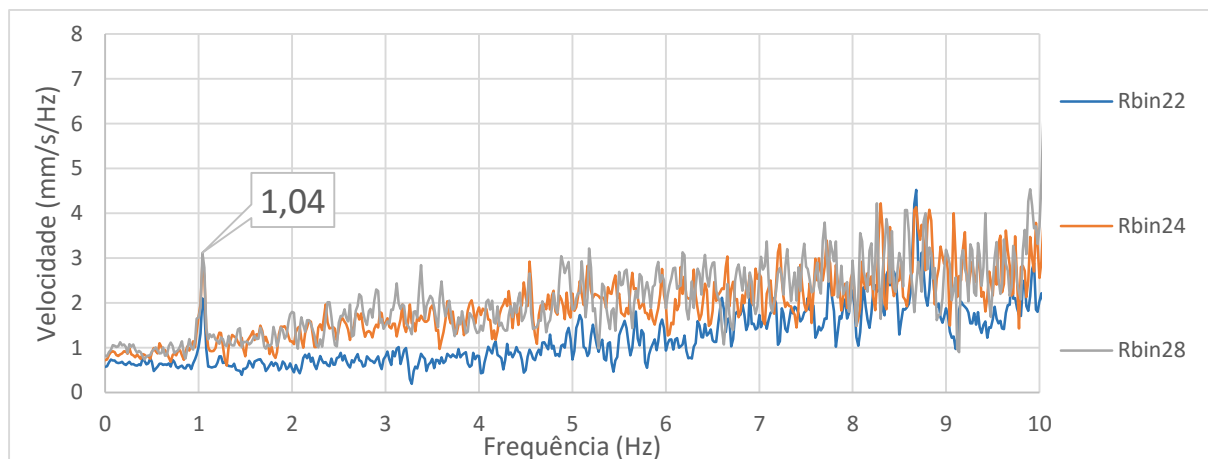


Fig. 6.41 - Espectro de velocidades das células radiais selecionadas na direção 1

Para a identificação das frequências dos restantes modos foi efetuada uma análise mais detalhada à célula radial 22, visto que era a célula radial que se situava mais perto da zona inferior da torre. Através desta análise foi possível identificar as frequências do primeiro e segundo modos de vibração, sendo estas representadas no espectro de velocidades da Fig. 6.42.

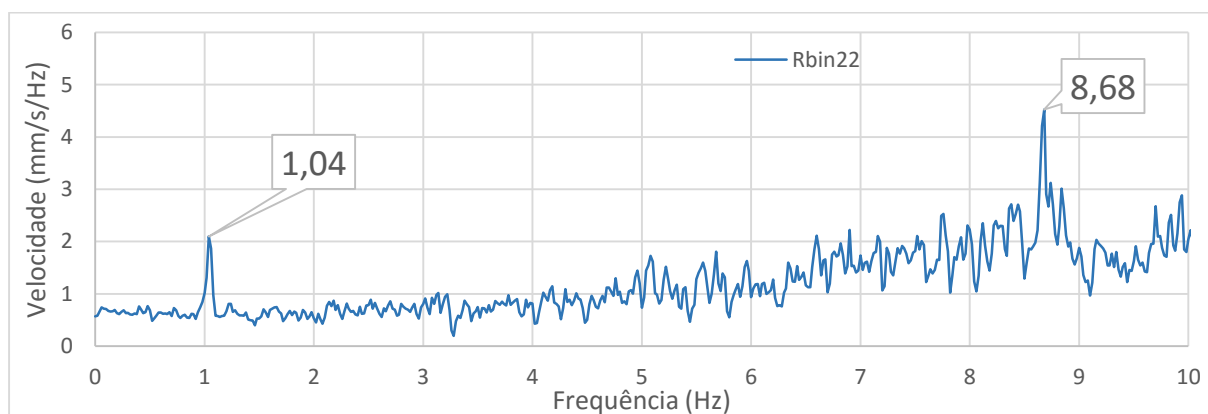


Fig. 6.42 - Espectro de velocidades da célula radial 22 na direção 1

Na direção 2, ainda que a localização do radar fosse numa zona propícia à passagem de veículos, como se pode verificar na Fig. 6.34, foi possível obter dados que permitiram a seleção de um maior número de células radiais para análise. Mesmo assim, com um maior número de células radiais selecionadas, a sua distribuição ao longo da estrutura voltou a não ser uniforme, concentrando-se apenas na zona central da torre, aproximadamente num intervalo de 15 metros como se pode observar na Fig. 6.38. A não uniformidade da distribuição de células radiais com bons resultados, traduziu-se no processamento de dados, visto que só foi possível identificar a frequência correspondente ao primeiro modo de vibração da estrutura na direção 2. No gráfico deslocamento-tempo apresentado na Fig. 6.40, todas as células radiais apresentam deslocamentos em fase. Como resultado final e através da transformada de Fourier obteve-se o espectro de velocidades da Fig. 6.43, no qual é possível identificar com clareza a frequência correspondente ao primeiro modo da estrutura na direção 2.

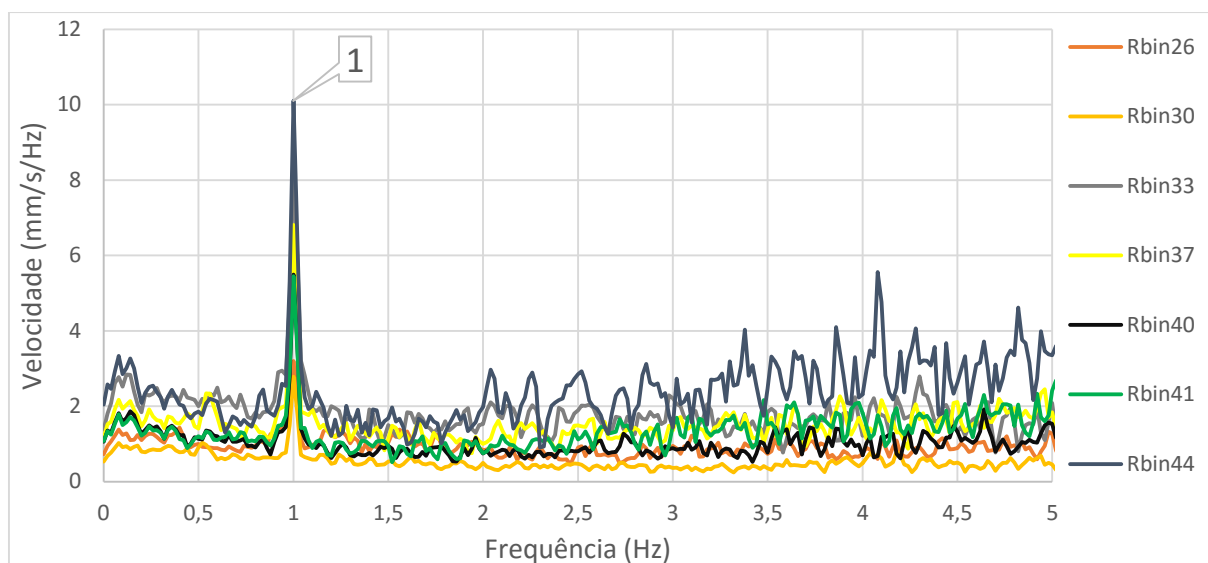


Fig. 6.43 - Espectro de velocidades das células radiais selecionadas na direção 2

No Quadro 6.12, são apresentados os valores das frequências identificadas em cada uma das direções, e os correspondentes modos de vibração da estrutura.

Quadro 6.12 - Frequências identificadas nas direções 1 e 2

Modo	Direção	Frequência (Hz)
1	2	1,00
2	1	1,04
4	1	8,68

No Quadro 6.13 são apresentados os valores das frequências monitorizadas e as frequências obtidas na no estudo de Paulo Baião[99]. Através de uma comparação é efetuado o cálculo da diferença percentual entre os dois grupos de frequências.

Quadro 6.13 - Comparação das frequências experimentais com as frequências do estudo de Paulo Baião

Modo	Experimental (Hz)	Estudo (Hz)	Diferença
1	1,00	0,995	0,5%
2	1,04	1,040	0,0%
4	8,68	8,496	2,1%

6.4.5 CONCLUSÕES

Tendo em conta as condicionantes na análise da torre sineira os resultados obtidos foram satisfatórios. Foi possível a identificação das frequências de três modos de vibração da estrutura. Com os dados obtidos na direção 2, foi apenas possível a identificação da frequência do 1º modo de vibração, bem distinguível no espetro de velocidades da Fig. 6.43. Na direção 1 e com um menor número de células radiais em relação à direção 2, foi possível identificar duas frequências, correspondentes ao 2º e 4º modo de vibração, como se pode verificar no espetro de velocidades da Fig. 6.41 e mais pormenorizadamente no espetro de velocidades da Fig. 6.42. O 4º modo de vibração, é um modo que apresenta maiores deformações na parte inferior da estrutura, pelo que era expectável que a sua identificação fosse mais fácil em células radiais localizadas nessa zona. Portanto, a partir da célula radial 22, foi possível identificar o 4º modo, visto que era a célula que se encontrava mais próxima da zona inferior da estrutura. A grande dificuldade de identificação dos restantes modos da estrutura deve-se ao fato de, tal como nos casos de estudo anteriores, as células radiais dos pontos mais inferiores da estrutura não terem bons sinais de resposta e com isso não apresentarem dados aceitáveis para uma posterior análise.

Na análise dos gráficos de energia (SNR) apresentados nas Fig. 6.36 e Fig. 6.38 podem ser identificadas células radiais com níveis de energia satisfatórios, que no entanto não foram selecionadas para a análise modal. Isto deve-se ao fato de existirem elementos espúrios (subcapítulo 4.6.3) ao longo da estrutura. Esses elementos, tais como, janelas, sinos, vedação do topo da torre e a cruz, podem apresentar boa refletividade interferindo na recolha dos dados. Visto que estes elementos espúrios têm modos de vibração próprios, não podem ser selecionados como células radiais da estrutura em estudo (torre).

A comparação dos resultados experimentais com os obtidos através do estudo de Paulo Baião[99], demonstram que a utilização do radar mesmo em condições adversas permitiu obter três frequências de modos de vibração da estrutura, com baixas diferenças percentuais.

6.5 PONTE PEDONAL FEUP

Este último subcapítulo destina-se à análise do comportamento dinâmico de uma ponte pedonal situada no campus da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Fig. 6.44). Para tal foram efetuadas monitorizações com recurso ao radar interferométrico IBIS-FS, no sentido de se poderem identificar as frequências próprias da estrutura correspondentes aos principais modos de vibração. Como forma de verificação de resultados, serão consultados estudos efetuados em 2004 e 2009 pelos professores Elsa Caetano e Álvaro Cunha, cujos títulos são *Experimental and numerical assessment of the dynamic behaviour of a stress-ribbon footbridge*[100] e *Vandal Loads and Induced Vibrations on a Footbridge*[101].



Fig. 6.44 - Ponte Pedonal FEUP

6.5.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A partir dos dados de projeto da ponte[102] foi possível efetuar a caracterização geométrica da ponte, e que se pode observar na Fig. 6.45.

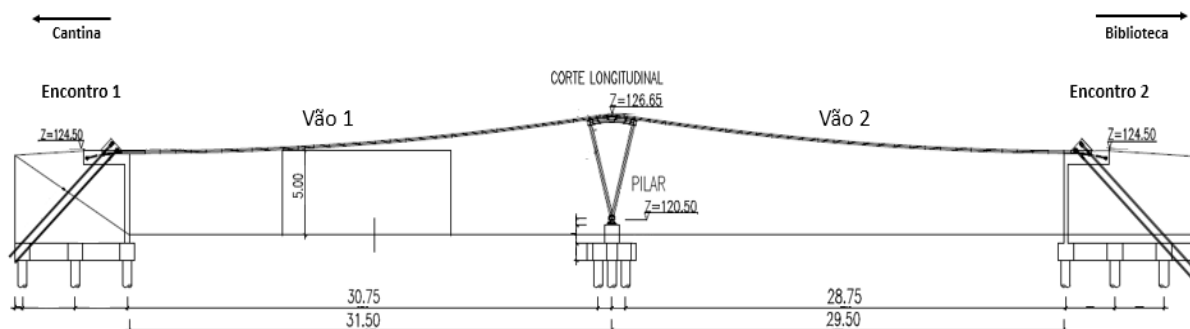


Fig. 6.45 - Corte Longitudinal da Ponte

A ponte apresenta um comprimento total de 61 metros, sendo maior o primeiro vão com um comprimento de 30 metros e o segundo com um comprimento de 28 metros. A zona do apoio central tem um comprimento total de 3 metros, 1,5 metros em cada vão. A ponte ao longo de todo o seu comprimento é constituída por um conjunto de pré-lajes que apresentam uma seção transversal retangular com medidas $3.80 \times 0.15 \text{ m}^2$, a sua distribuição é feita de 1 metro em 1 metro. Para a ligação entre pré-lajes foram utilizadas juntas com seção transversal de $3.80 \times 0.034 \text{ m}^2$. Ainda na seção transversal existem 4 cabos $7\phi 15.2 \text{ mm}$. A pormenorização da seção transversal encontra-se representada na Fig. 6.46.

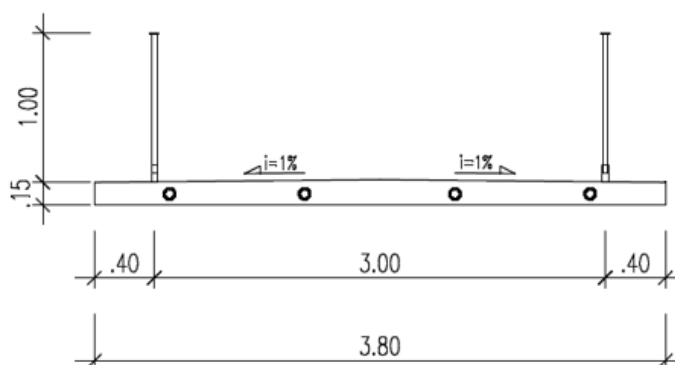


Fig. 6.46 - Seção transversal tipo

Quanto ao apoio central, este é formado por 4 pilares $\phi 193.7 \text{ mm}$ e espessura de 16mm em aço S355, apoiados numa base que é constituída por uma campânula fixa a um maciço de betão. Os 4 pilares suportam ainda 6 perfis HEB300, dois deles dispostos na transversal e os restantes na longitudinal.

6.5.2 DESCRIÇÃO DAS MONITORIZAÇÕES

Os fatores considerados para a realização das monitorizações nesta estrutura, tiveram ligeiras diferenças daqueles que foram adotados anteriormente. O tipo de geometria desta estrutura tem influência na escolha da localização do radar. A posição do radar ideal neste tipo de estruturas é por baixo do tabuleiro da ponte, isto porque, o radar apenas mede deslocamentos numa direção, logo os deslocamentos da estrutura necessários para identificação modal são maioritariamente verticais. Além disso, sendo a ponte constituída maioritariamente por betão, a sua refletividade às ondas eletromagnéticas será naturalmente muito reduzida. Como solução, durante a realização dos planos de monitorização, foram também consideradas estratégias para a colocação de cones refletivos na estrutura (subcapítulo 4.4.1). Dos planos de monitorização efetuados, resultaram dois casos de monitorização dependentes da disposição dos cones refletivos. No primeiro caso a monitorização é efetuada com a distribuição dos cones pelos dois vãos e no segundo caso a monitorização é efetuada com a distribuição dos cones apenas no 2º vão (Fig. 6.45).

Na Fig. 6.47, observa-se a colocação dos cones refletivos na zona do bordo do tabuleiro, devido a esta restrição a posição do radar sob o tabuleiro da ponte encontra-se também restringida à zona do bordo da laje, estando representada na Fig. 6.48. A localização do radar naquele ponto também teve influência direta do potencial movimento (pessoas, veículos) que poderia interferir no feixe de abertura das antenas.



Fig. 6.47 - Colocação dos cones refletivos



Fig. 6.48 - Posicionamento do radar e direção de monitorização, vista panorâmica (à esquerda) e vista frontal (à direita)

Na Fig. 6.49, está esquematizado o posicionamento (geometria) do radar em relação à ponte, na direção de monitorização. A geometria que caracteriza esta monitorização é definida de acordo com os seguintes parâmetros:

- x representa a distância horizontal (reta) entre a uma das extremidades da ponte e o radar;
- z representa a diferença de cotas entre as antenas (ponto inicial do feixe de abertura) e o tabuleiro da ponte;
- α representa a abertura das antenas e varia de acordo com os valores do Quadro 4.1 apresentado no subcapítulo 4.3.3.2;
- φ representa o *tilt* (rotação vertical, Fig. 4.10) do radar de forma a obter uma melhor abrangência da estrutura com o feixe de abertura.

No Quadro 6.14 são apresentados os valores destes parâmetros, utilizados nas monitorizações efetuadas.

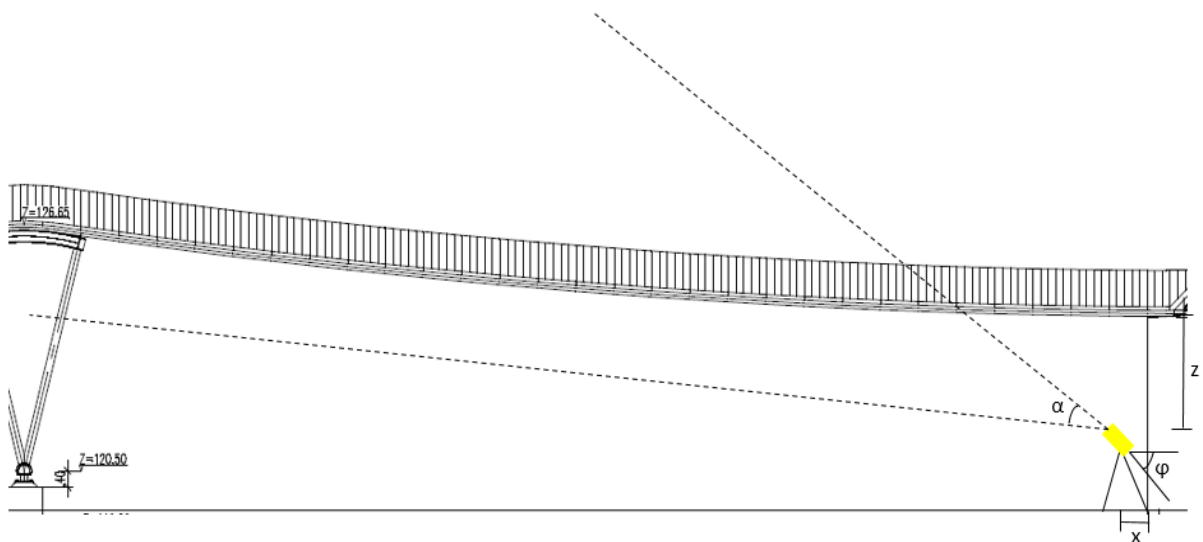


Fig. 6.49 - Esquema representativo em alçado da geometria da monitorização

Quadro 6.14 - Parâmetros geométricos das monitorizações nos casos 1 e 2

Casos	x (m)	z (m)	φ (graus)
1	0,60	2,50	20°
2	0,60	2,50	30°

Depois de definidos os parâmetros geométricos da estrutura é necessário definir os parâmetros de análise (representados na Fig. 4.15) que influenciam a aquisição de dados no sistema do radar. Estes parâmetros já foram descritos no subcapítulo 6.2.2, e os seus valores para as monitorizações efetuados no primeiro e segundo caso, são apresentados no Quadro 6.15.

Quadro 6.15 - Parâmetros de análise para os casos 1 e 2

Caso	Máx.Distância (m)	Resolução de alcance (m)	Frequência de Varrimento (Hz)
1	80	0,75	20
2	50	0,75	20

Com todos os parâmetros acima descritos definidos, a aquisição de dados fica dependente apenas de um fator, o tempo de aquisição. Com base na informação dos estudos dos professores Elsa Caetano e Álvaro Cunha[100; 101] a frequência natural da estrutura é de aproximadamente 1Hz. Com este valor foi assim possível calcular o tempo mínimo de monitorização, sendo este igual a 16min40s. Portanto para ambos os casos foram realizadas duas monitorizações, ambas com período de 20min.

6.5.3 DADOS OBTIDOS

O pós-processamento dos dados obtidos nas monitorizações foi efetuado através do programa IBISDV (já mencionado no subcapítulo 4.3.4).

Depois de efetuadas as monitorizações o primeiro passo de pós-processamento é a seleção das células radiais que apresentam melhores resultados (de acordo com o subcapítulo 4.6.3).

6.5.3.1 Primeiro Caso

A escolha das células foi efetuada de acordo com o método da seleção de picos e com base em 3 fatores, que são:

1. SNR_e , seleção das células radiais com bom sinal de resposta (picos de energia), representado na Fig. 6.50;
2. Fase do sinal complexo discreto das células de radiais, através da representação polar como ilustrado na Fig. 6.51;
3. Observação e análise dos gráficos deslocamento-tempo das células radiais, representados nas Fig. 6.52 e Fig. 6.53.

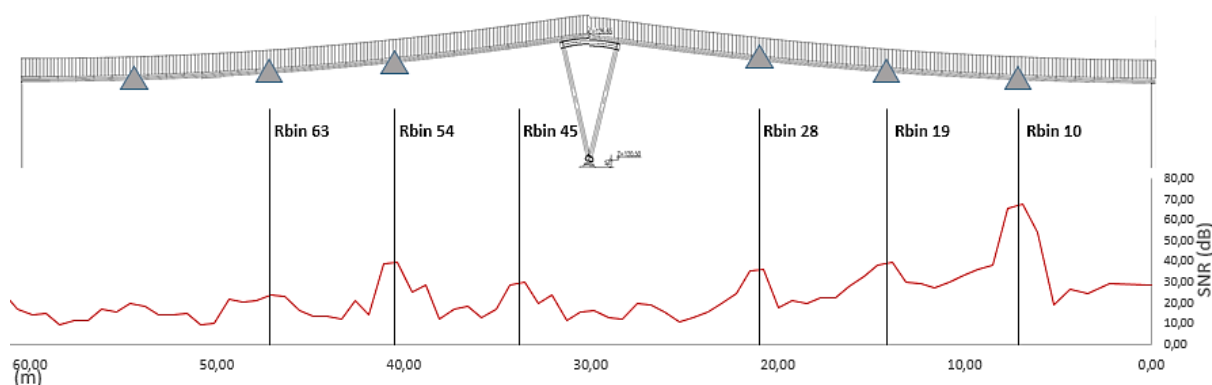


Fig. 6.50 - Gráfico de energia dos pontos da estrutura com seleção das células radiais

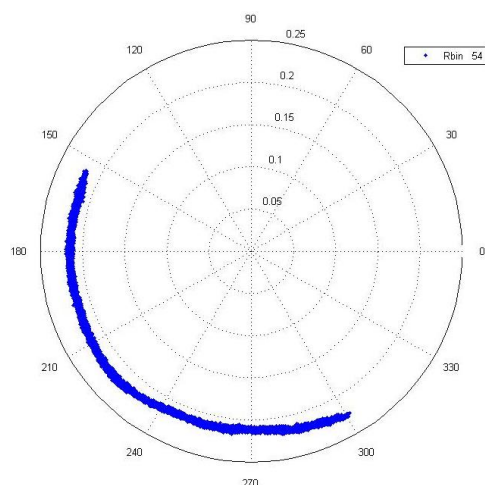


Fig. 6.51 - Representação polar da fase discreta do sinal complexo da célula radial 54

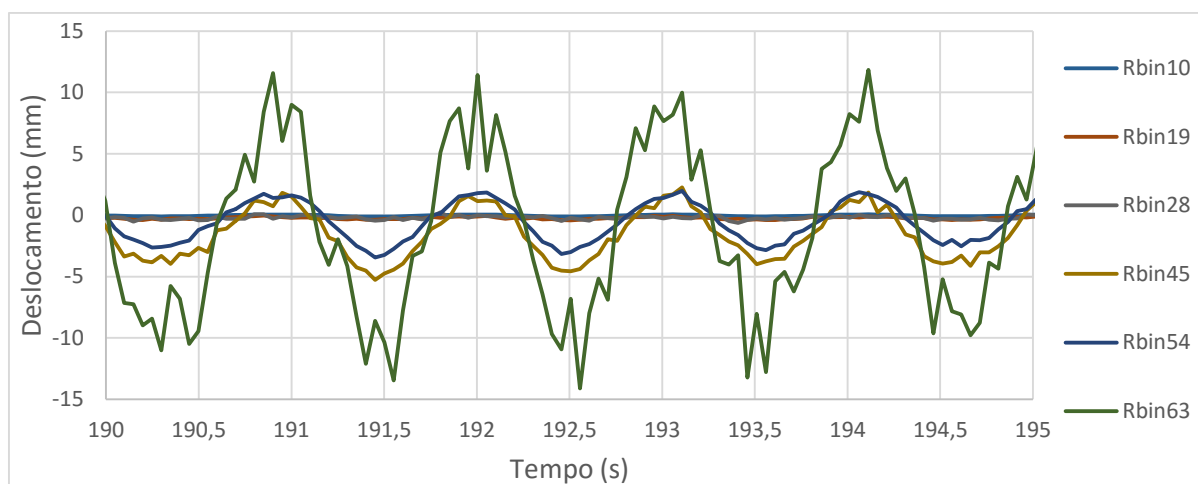


Fig. 6.52 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais

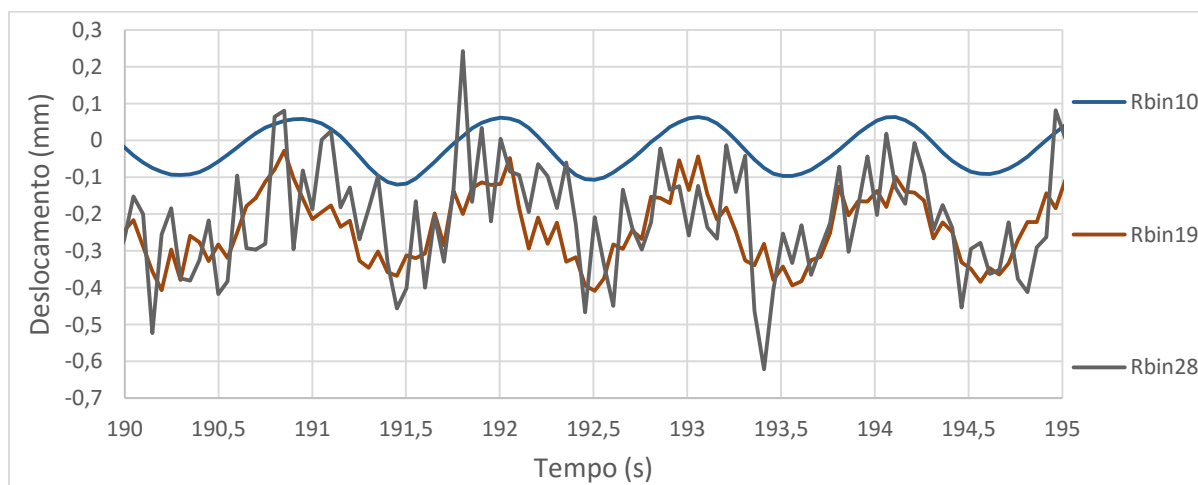


Fig. 6.53 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais 10, 19 e 28

De acordo com os fatores de seleção das células radiais, de entre 107 células criadas pelo sistema IBIS-FS no feixe de abertura, a seleção compreendeu as células radiais 10, 19, 28, 45, 54 e 63.

6.5.3.2 Segundo Caso

A escolha das células foi efetuada de acordo com o método da seleção de picos e com base em 3 fatores, que são:

1. SNR_e , seleção das células radiais com bom sinal de resposta (picos de energia), representado na Fig. 6.54;
2. Fase do sinal complexo discreto das células de radiais, através da representação polar como ilustrado na Fig. 6.55;
3. Observação e análise dos gráficos deslocamento-tempo das células radiais, representados na Fig. 6.56.

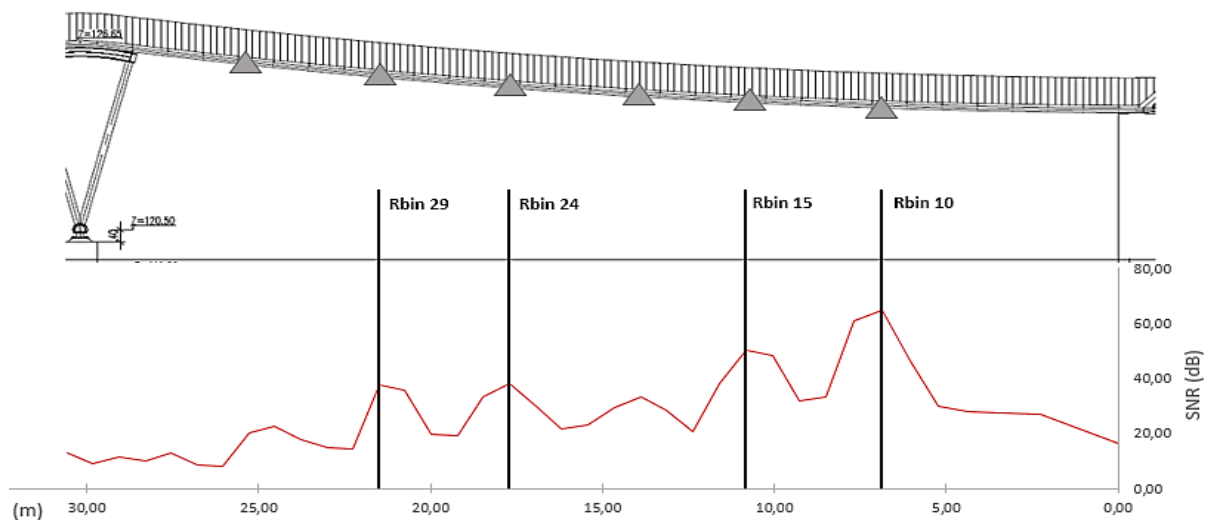


Fig. 6.54 - Gráfico de energia dos pontos da estrutura com seleção das células radiais

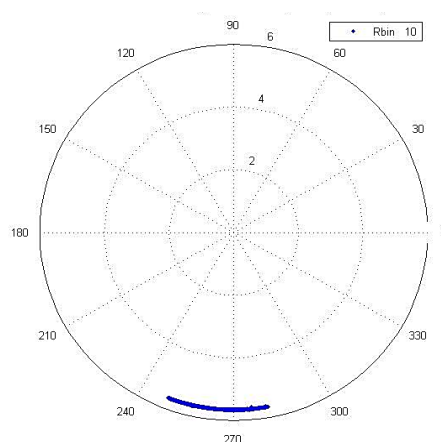


Fig. 6.55 - Representação polar da fase discreta do sinal complexo da célula radial 10

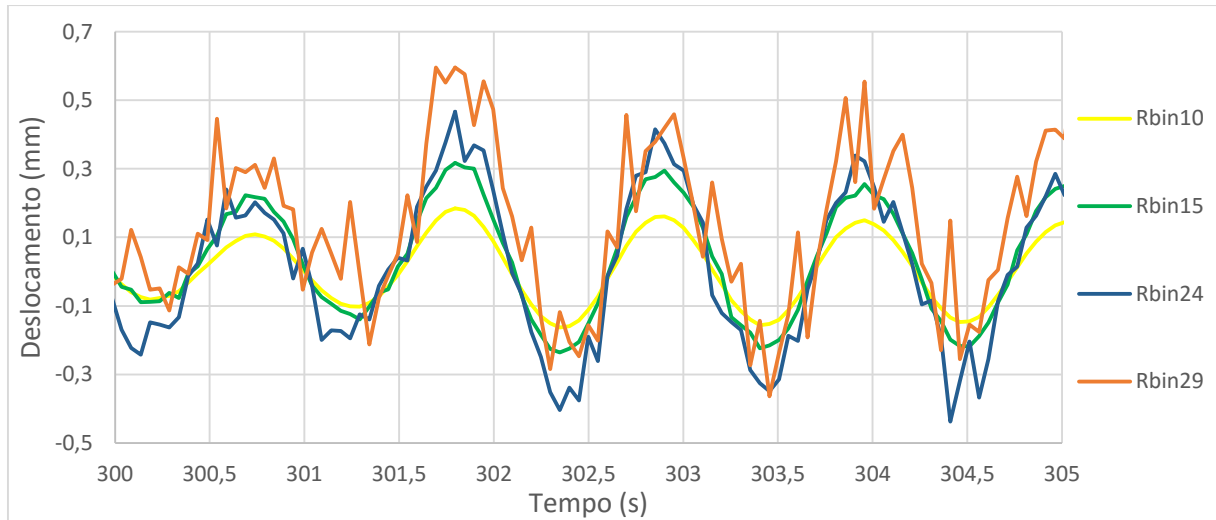


Fig. 6.56 - Gráfico deslocamento-tempo das células radiais

De acordo com os fatores de seleção das células radiais, de entre 67 células criadas pelo sistema IBIS-FS no feixe de abertura, a seleção compreendeu as células radiais 10, 15, 24 e 29.

6.5.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE DADOS

A escolha das células radiais no primeiro caso, revelou-se satisfatória, visto que quase todos os cones que foram colocados na estrutura apresentaram bons resultados em termos de energia, como se pode verificar no gráfico da Fig. 6.50, e que se traduziram em bons dados para a análise modal da estrutura. Além dos bons resultados obtidos, todas as células radiais apresentam deslocamentos em fase, como ilustrado nas Fig. 6.52 e Fig. 6.53. Como resultado final e através da transformada de Fourier obteve-se o espectro de velocidades da Fig. 6.57, no qual foi possível identificar as frequências correspondentes ao primeiro e terceiro modos de vibração.

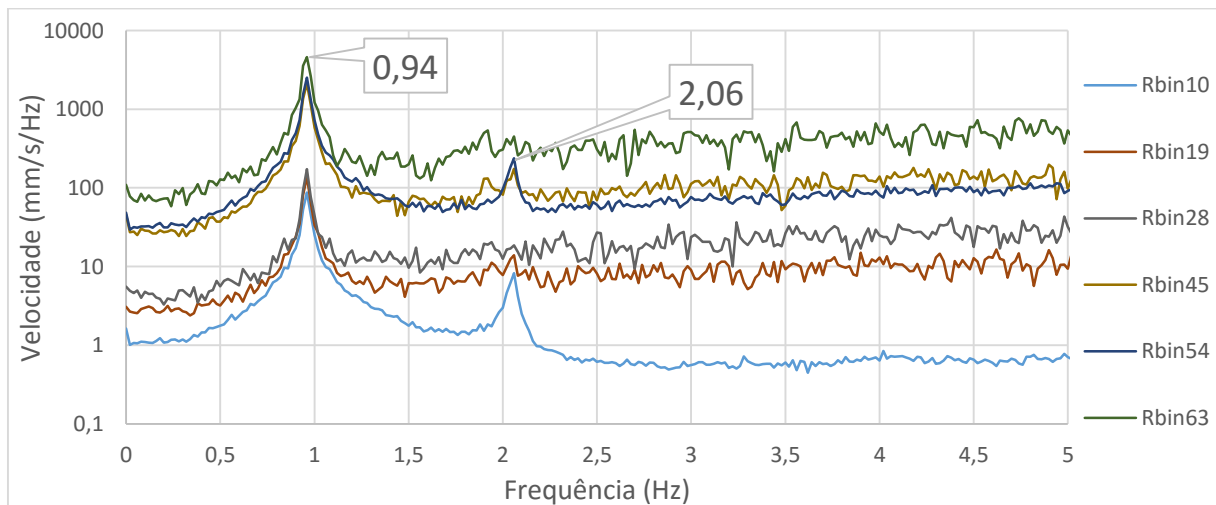


Fig. 6.57 - Espectro de velocidades das células radiais seleccionadas no primeiro caso

No segundo caso, a localização dos alvos incidu apenas sobre o 2º vão da ponte, com os resultados obtidos a não serem tão bons como os do primeiro caso, visto que dos seis cones apenas quatro apresentavam bons sinais de resposta, como se pode observar nos picos de energia do gráfico da Fig. 6.54. Mesmo assim as células radiais selecionadas demonstraram deslocamentos em fase, como ilustrado na Fig. 6.56, e através da transformada de Fourier foi possível obter duas frequências correspondentes a dois modos de vibração, identificados no espectro de velocidades da Fig. 6.58.

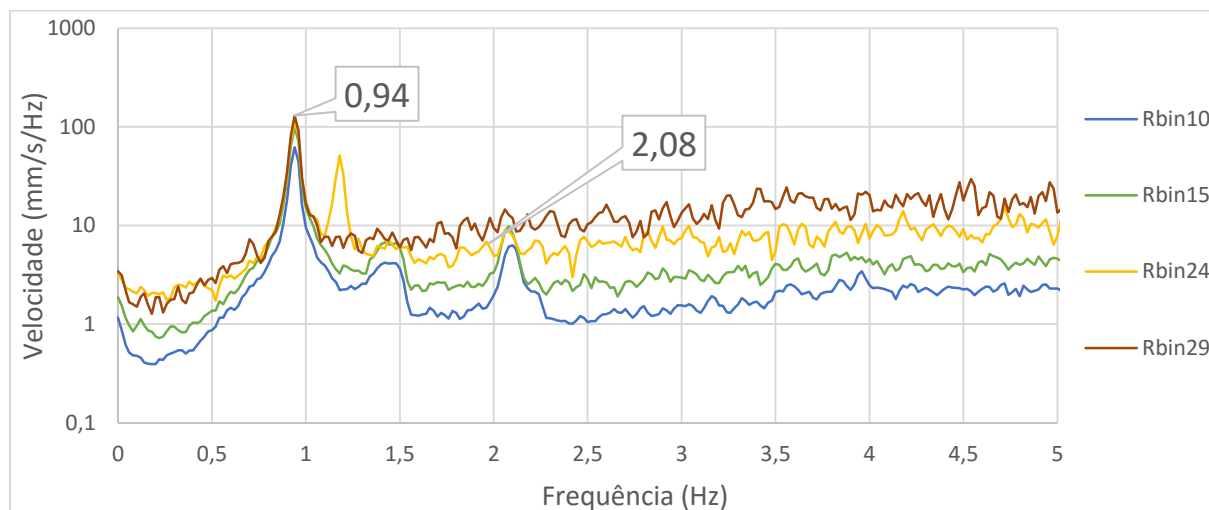


Fig. 6.58 - Espectro de velocidades das células radiais selecionadas no segundo caso

No Quadro 6.16, são apresentados os valores das frequências identificadas em cada uma das direções, e os correspondentes modos de vibração da estrutura.

Quadro 6.16 - Frequências identificadas os casos 1 e 2

Modo	Caso	Frequência (Hz)
1	1 e 2	0,94
3	1	2,06
2/3	2	2,08

No Quadro 6.17 são apresentados os valores das frequências monitorizadas e as frequências obtidas na no estudo dos professores Elsa Caetano e Álvaro Cunha[101]. Através de uma comparação é efetuado o cálculo da diferença percentual entre os dois grupos de frequências.

Quadro 6.17 - Comparação das frequências experimentais com as frequências do estudo

Modo	Experimental (Hz)	Estudo (Hz)	Diferença
1	0,94	0,97	3,1%
3	2,06	2,04	0,5%
2/3	2,08	2,07/2,04	0,5% - 1,92%

6.5.5 CONCLUSÕES

A análise da estrutura abordada neste caso de estudo, verificou-se à partida que seria de um maior grau de complexidade em relação a todas as outras analisadas anteriormente. Esta complexidade teve como causas:

- A complexidade do sistema estrutural, visto que apresenta modos de vibração muito próximos uns dos outros, como apresentado no estudo da ponte[101];
- O fato de se estar presente de uma estrutura de betão, ou seja, com baixa refletividade;
- A envolvente à ponte apresentar demasiados elementos espúrios com boa refletividade, tais como, colunas de iluminação, pinos de separação metálicos, redes de vedação, etc;
- Para além dos anteriores existem ainda estradas que passam na envolvente da ponte, onde existe uma grande afluência de veículos que afetam os resultados;

Para a minimização dos aspetos anteriores, foram adotados planos de monitorização tentaram contrariar tais adversidades, sendo um dos principais a utilização de cones refletores para identificação vários pontos ao longo da estrutura. Outras medidas como a definição de parâmetros e posição do radar também tiveram em conta as causas acima descritas.

Assim para a análise do comportamento dinâmico da estrutura quando sujeita a vibrações ambientais, foram considerados dois casos de monitorização. Para cada um dos casos foram apenas identificadas duas frequências da estrutura, como se pode verificar nas Fig. 6.57 e Fig. 6.58. O fato de não se ter identificado outras frequências da estrutura pode ter como origem a complexidade de monitorização da estrutura perante o equipamento disponível, IBIS-FS mais seis cones refletores. O uso de mais cones em pontos intermédios dos vãos da ponte pedonal, poderiam ter ajudado à identificação de outros modos de vibração.

A comparação dos resultados experimentais com os obtidos através do estudo dos professores Elsa Caetano e Álvaro Cunha[101], apresentam algumas diferenças percentuais. Para o primeiro modo de vibração, identificado por todas as células radiais selecionadas nos dois casos de monitorização, a diferença foi de 3.2%. Tais diferenças poderão ter origem em eventuais erros de medição do IBIS-FS e/ou dos aparelhos usados nos estudos efetuados anteriormente, mas também provavelmente devido ao fato da colocação recente de um TMD (*Tuned Mass Dumper*) para controlo de vibrações. No primeiro caso foi ainda possível a identificação da frequência do terceiro modo de vibração da estrutura, que em comparação com o valor obtido pelo estudo anterior teve uma diferença de 0,5%, ou seja quase nula. No segundo caso foi ainda identificada uma segunda frequência, que poderá corresponder ao segundo ou terceiro modo de vibração identificados no estudo da ponte[101]. Devido à proximidade dos valores obtidos para a segunda frequência no primeiro e segundo caso, não é possível apenas com estes dados concluir se os resultados correspondem ambos ao mesmo modo (erro do IBIS-FS entre os dois casos) ou se os resultados correspondem ao segundo e terceiro modo de vibração da estrutura.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS**7.1 CONCLUSÕES**

A monitorização estrutural é já nos dias de hoje, e será cada vez mais no futuro essencial para a Engenharia Civil. Com a ferramenta da monitorização estrutural, o Engenheiro Civil pode perceber o comportamento das estruturas ao longo do tempo, conseguindo com isso prever acidentes, aumentar o tempo de vida útil das estruturas, e por fim perceber melhor o comportamento destas, e assim contribuir para a melhoria de futuros projetos.

Apesar do recente desenvolvimento da monitorização estrutural, as primeiras monitorizações datam desde os séculos passados, percebendo-se assim que a preocupação com a integridade estrutural não é recente.

Os desenvolvimentos conseguidos nos sistemas de monitorização na Engenharia civil, levaram a adoção do conceito Monitorização da Integridade Estrutural (SHM) na Engenharia Civil. O SHM consiste num plano de monitorizações que permite perceber o comportamento da estrutura e assim detetar danos, localizar os danos na estrutura e avaliar o tipo de dano. Para a implementação do conceito SHM é necessário a instalação de dispositivos de medição. A variedade de dispositivos existentes na atualidade, permite a medição do mais variado tipo de parâmetros.

Apesar do Radar genérico ter sido criado nos inícios do século XX, as necessidades apresentadas durante a segunda guerra mundial levaram a um desenvolvimento exponencial das técnicas utilizadas na sua operação. Devido à multiplicidade de investigadores independentes a trabalhar nos princípios gerais do Radar, foram assim criados diferentes tipos de Radar, que permitem avaliação de diferentes parâmetros. Com os desenvolvimentos mais recentes da ciência foi possível aprimorar e criar novas técnicas que permitem inserir os sistemas de Radar em várias áreas, incluindo a monitorização de Estruturas em Engenharia Civil.

O IBIS-FS, Radar Interferométrico, surge como uma necessidade da Engenharia Civil na procura de novos dispositivos de medição com grande precisão, aliada à grande vantagem do Radar genérico, ou seja, uso de ondas eletromagnéticas que permitem a monitorização na ausência de contacto. O princípio de funcionamento do IBIS-FS, baseia-se na deteção simultânea da posição e deslocamento de diferentes alvos, situados a diferentes distâncias do Radar. As técnicas na base do princípio de funcionamento do Radar são: Onda Contínua com Passo de Frequência e Interferometria.

O processamento dos dados obtidos a partir dos dispositivos de medição, mostra-se importante para a caracterização do comportamento dinâmico das estruturas. Esse comportamento pode ser avaliado através de uma análise modal, dependendo do tipo de excitação a que a estrutura está sujeita durante a monitorização. Dentro deste contexto, a análise modal pode ser caracterizada como análise modal

experimental ou análise modal operacional e permite obter os parâmetros modais da estrutura necessários para a correta caracterização do seu comportamento.

Os resultados obtidos nas monitorizações realizadas no âmbito deste trabalho, com recurso ao IBIS-FS, permitiram identificar a frequência fundamental de todas estruturas monitorizadas. No entanto, em algumas estruturas, também foi possível identificar outras frequências para além da fundamental. Com os resultados obtidos, foi possível validar o Radar, quando comparado com modelo numérico e/ou estudos já efetuados anteriormente, com outros dispositivos de medição. Assim, a maior diferença obtida nas diferentes monitorizações foi de 4,92 %, sendo espectável que essa diferença se deve a alterações na estrutura e não em erros de medição do IBIS-FS.

O Radar Interferométrico, IBIS-FS, apresenta assim inúmeras vantagens em comparação com os sistemas correntes de monitorização estrutural. Tendo como principal vantagem a possibilidade de monitorização estrutural sem necessidade de contacto com a estrutura. Apresenta ainda outras vantagens, tais como, portabilidade, facilidade de montagem, aquisição rápida, apresentação de resultados em tempo real e possibilidade de aquisição perante condições atmosféricas e climatéricas adversas. No entanto apresenta algumas desvantagens, tais como, necessidade de instalação de alvos refletores em estruturas com superfícies pouco refletoras (geralmente estruturas de alvenaria e betão), a falta de capacidade de definir ligação entre as células radiais monitorizadas e os pontos reais da estrutura e suscetibilidade do Radar ao ruído e interferências inseridos nos cenários de monitorização.

As monitorizações dos quatro casos de estudo abordados, constitui um grande desafio, uma vez que para a sua realização foi necessário o recurso ao sistema de monitorização, radar interferométrico IBIS-FS. Os conceitos que definem o princípio de funcionamento do radar, por si só, constituíram um obstáculo, visto pertencerem a um aglomerado de conhecimentos de uma área diferente. Portanto a necessidade de perceber esses conceitos, e fazer a ligação ao radar IBIS-FS, para além de um desafio foi uma aprendizagem necessária para que a realização dos casos de estudo se pudesse efetuar com sucesso.

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Dado que de um modo geral as aplicações atualmente habituais do radar interferométrico na monitorização estrutural contemplam essencialmente estruturas em torre, será lógico sugerir a aquisição de dados de monitorização estrutural com o IBIS-FS realizando abordagem de estruturas mais complexas, não só sob ponto de vista de geometria como de tamanho ou massividade (nomeadamente pontes metálicas antigas; barragens; pontes de utilização mista e pontes espiadas).

Assim sugere-se completar a abordagem da aplicabilidade do radar interferométrico à Engenharia Civil estrutural com um padrão e tipologia de estruturas para as quais ainda não há trabalho consolidado válido, nomeadamente:

- Torres de transmissão e torres eólicas onshore;
- Torres de telecomunicações em consola e espiadas;
- Edifícios altos com notórias assimetrias espaciais, de massa e de rigidez;
- Barragens de vários tipos;
- Pontes metálicas antigas (ponte de D. Luís I ou de D. Maria Pia; entre outras)
- Pontes espiadas (até para a determinação da tensão nos cabos-espia, face à monitorização da sua vibração local);
- Edifícios monumentais ou patrimoniais em alvenaria;
- Estruturas de madeira; etc.

A falta de conhecimento e experiência atual sobre muitos destes casos sugeridos irá seguramente contribuir para o avanço da ciência e da técnica de SHM com este equipamento específico radar interferométrico IBIS-FS (ou equivalente), e também de técnicas de aquisição de dados para algumas destas estruturas.

Outra sugestão considerada importante é a aplicação do IBIS-FS às mesma estruturas, mas em períodos temporais em que o movimento do cenário envolvente da estrutura seja reduzido ou nulo, para que os registos ou dados de observação tenham menos fontes de ruído, de forma a melhorar o pós-processamento de dados. Nestas circunstâncias, deverão ser obtidos resultados com maior precisão. Em complemento, será também importante o desenvolvimento ou utilização apropriada de determinados filtros digitais para um melhor processamento de dados observados e consequente melhor determinação dos parâmetros modais das estruturas sob monitorização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CÓIAS, Vítor (2006) - Inspeções e ensaios: na reabilitação de edifícios. Editora IST PRESS. ISBN 9728469535.
2. MUKHOPADHYAY, S.C. (2011) - New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring. Springer. ISBN 9783642210990.
3. ANSARI, F. (2005) - Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring. Springer. ISBN 9781402036606.
4. BALAGEAS, D.; FRITZEN, C.P.; GÜEMES, A. (2006) - Structural Health Monitoring. Wiley. ISBN 9780470394403.
5. HUSTON, D. (2010) - Structural Sensing, Health Monitoring, and Performance Evaluation. CRC Press. ISBN 9781420012354.
6. MARQUES, Leandro (2008) - Monitorização estática e dinâmica: aplicações. Tese de Mestrado, Universidade do Minho.
7. BERGMEISTER, K.; CONCRETE, I.F.S.; 1, I.F.S.C.T.G. (2003) - Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures: State-of-art Report. International Federation for Structural Concrete (fib). ISBN 9782883940628.
8. BROWNJOHN, J.M.W (2007) - Structural health monitoring of civil infrastructure.
9. BISBY, L.A. (2004) - An Introduction to Structural Health Monitoring-Module5. In Educational Modules. Canadá: ISIS Canadá.
10. FARRAR, C.R.; WORDEN, K. (2012) - Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective. Wiley. ISBN 9781118443217.
11. ETTOUNEY, M.M.; ALAMPALLI, S. (2011) - Infrastructure Health in Civil Engineering: Theory and Components. CRC PressINC. ISBN 9781439866559.
12. HOUSNER, George William [et al.] (1997) - Structural control: past, present, and future. Journal of engineering mechanics. 123:9. 897-971. ISSN 0733-9399.
13. XU, Y.L.; XIA, Y. (2012) - Structural Health Monitoring of Long-Span Suspension Bridges. CRC Press. ISBN 9780203839669.
14. SALAWU, O. S.; WILLIAMS, C. (1995) - Review of full-scale dynamic testing of bridge structures. Engineering Structures. 17:2. 113-121. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/014102969592642L>>. ISSN 0141-0296.
15. CAETANO, E; CUNHA, A; MAGALHÃES, F (2010) - Novas perspectivas na análise do comportamento dinâmico de estruturas. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões ISSN. 1646: 7078.
16. RODRIGUES, Jorge Manuel Vieira Borges Lourenço (2012) - Identificação modal estocástica: métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
17. <http://www.ahmlk.org/wp-content/uploads/2013/09/Ponte-Tacoma-Narrows.jpg> [Consult. 10/03/2015].
18. NEVES, Nuno; COSTA, Aníbal; ARÊDE, António (2004) - Identificação Dinâmica e Análise do Comportamento Sísmico de um Quarteirão Localizado na Cidade da Horta Ilha do Faial. 2004.
19. ALMEIDA, Pedro Aires Moreira Montenegro (2008) - Comportamento dinâmico de uma ponte em arco existente para tráfego ferroviário de alta velocidade. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
20. SILVA, Daniel Henrique Amaral da (2009) - Análise sísmica de pontes contemplando a acção sísmica assíncrona. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
21. MARTINS, Nuno Miguel Esteves (2009) - Estudo dos cabos e pendurais de uma ponte pedonal suspensa face ao seu processo construtivo. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

22. MENDES, Paulo (2009) - Observação e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
23. BONIFÁCIO, Cristiana de Fátima Pacheco (2012) - Comportamento dinâmico de uma ponte ferroviária de pequeno vão para tráfego de alta velocidade. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
24. TAVARES, Miguel Afonso Oliveira (2013) - Identificação modal e monitorização dinâmica de uma ponte em arco. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
25. STEPINSKI, Tadeusz; UHL, Tadeusz; STASZEWSKI, Wieslaw (2013) - Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Applications. John Wiley & Sons. ISBN 1118536126.
26. ABDO, Mohamed Abdel-Basset (2014) - Structural Health Monitoring: History, Applications and Future. Open Science.
27. Structural Control: Past, Present, and Future. Journal of Engineering Mechanics (1997). 123:9. 897-971. Disponível em WWW: <URL: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9399%281997%29123%3A9%28897%29>>.
28. <http://feg.mota-engil.pt/wp-content/uploads/2012/04/InstrumentacaoClinometro.jpg> [Consult. 15/03/2015].
29. <http://www.wae.ciemat.es/~mfg/tilts/tiltmeter.gif>. [Consult. 15/03/2015].
30. <http://entornoseguro.com/wp-content/uploads/2015/01/Model-800P.jpg>. [Consult. 15/03/2015].
31. <http://soil.co.uk/wp-content/uploads/2014/10/Electrolevel-Beam-Sensor-main.jpg>. Consult. 15/03/2015].
32. <http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/images/extensometria/Image207.gif>. [Consult. 17/03/2015].
33. <http://www.mecatronicaatual.com.br>. [Consult. 17/03/2015]
34. <http://www.rstinstruments.com/Remote/Vibrating%20Wire%20Strain%20Gauges.jpg>. [Consult. 17/03/2015].
35. http://www.geosig.com/files/Metsovo_LVDT.jpg. [Consult. 20/03/2015].
36. http://www.exacta.ind.br/conteudo/upload/image/sensores/sensor_estampo.jpg. [Consult. 21/03/2015].
37. <http://www.mra.pt/repositorio/6909/imagenes/1149/4/sensores-medida-fibra-optica-redes-bragg-tp-02-1.jpg>. [Consult. 21/03/2015].
38. <http://kitsnspares.com/admin/pdf/Humidity%20sensors.jpg>. [Consult. 21/03/2015].
39. <http://www.uco.es/fitotecnica/riego/767.jpg>. [Consult. 23/03/2015].
40. <http://www.shoptta.com/img/p/20-37-thickbox.jpg>. [Consult. 23/03/2015].
41. <http://www.th.all.biz/img/th/catalog/5014.jpeg>. [Consult. 23/03/2015].
42. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/e/e4/Jiangyin_Bridge.JPG. [Consult. 24/03/2015].
43. http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5_Sismos/52_Sismologia/sismografo.jpg. [Consult. 23/03/2015].
44. <http://www.meteorcomm.com.ar/admin/images/1295467138.jpg>. [Consult. 23/03/2015].
45. http://www.alliancesystems.com.br/media/produtos/TM0782_1.jpg. [Consult. 25/03/2015].
46. http://www.sensores-de-medida.es/uploads/img/acelerometro_mems_serie_4610.jpg. [Consult. 25/03/2015].
47. http://www.kinematics.com/uploads/FBA-3_rv2_8b.png. [Consult. 25/03/2015].
48. RAEMER, H.R. (1996) - Radar Systems Principles. Taylor & Francis. ISBN 9780849394812.
49. <http://faculty.nps.edu/jenn/Seminars/RadarFundamentals.pdf>. [Consult. 05/04/2015].
50. <http://www.radartutorial.eu/01.basics/Radar%20Principle.en.html> [Consult. 05/04/2015].

51. <http://www.navymars.org>. [Consult. 05/04/2015].
52. MAXWELL, J Clerk (1865) - A dynamical theory of the electromagnetic field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London [Em linha]. 459-512. ISSN 0261-0523.
53. https://pt.wikipedia.org/wiki/Onda_de_r%C3%A1dio. [Consult. 10/04/2015].
54. <http://www.radarworld.org/huelsmeyer.html>. [Consult. 10/04/2015].
55. <http://origemdascosas.com/a-origem-do-radar/>. [Consult.10/04/2015]
56. RAYMOND C. WATSON, Jr (2009) - Radar Origins Worldwide. Trafford Publishing.
57. <http://www.radar-france.fr/Emile%20Girardeau.htm>. [Consult. 11/04/2015].
58. WILLIS, N.J.; GRIFFITHS, H. (2007) - Advances in Bistatic Radar. Institution of Engineering and Technology. ISBN 9781891121487.
59. BARTON, David K (1984) - A half century of radar. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on [Em linha]. 32:9. 1161-1170. ISSN 0018-9480.
60. <http://www.rafmuseum.org.uk>. [Consult. 12/04/2015].
61. <http://blog.sciencemuseum.org.uk/>. [Consult. 12/04/2015].
62. EAVES, J.L.; REEDY, E.K. (1987) - Principles of modern radar. Van Nostrand Reinhold. ISBN 9780442221041.
63. WOLFF, Christian - <http://www.radartutorial.eu/druck/Book2.pdf>. [Consult. 15/04/2015].
64. TOOMAY, J.; HANNEN, P.J. (2004) - Radar Principles for the NonSpecialist, 3rd Edition. Institution of Engineering and Technology. ISBN 9781891121340.
65. JAIN, Preeti - <http://www.engineersgarage.com/articles/types-of-radars?page=1>. [Consult. 15/04/2015].
66. <http://www.telecomabc.com/b/images/bistatic.jpg>. [Consult. 15/04/2015].
67. BARTON, D.K. (1997) - Radar Technology Encyclopedia. Artech House, Incorporated. ISBN 9781580532594.
68. LUZI, Guido; MONSERRAT, Oriol; CROSETTO, Michele (2012) - Real Aperture Radar interferometry as a tool for buildings vibration monitoring: Limits and potentials from an experimental study. 2012. AIP Publishing. ISBN 0094-243X.
69. PIERACCINI, Massimiliano (2007) - Survey and testing through interferometric radar: applications to Cultural Heritage and public utilities. 2007.
70. DE PASQUALE, G. (2009) - Ambient vibration testing of bridges by microwave interferometer. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE. 24:12. 17-23. ISSN 0885-8985.
71. EWINS, David John (2000) - Modal testing: theory, practice and application. Research studies press Baldock.
72. FARRAR, Charles R; CONE, Kerry M (1994) - Vibration testing of the I-40 bridge before and after the introduction of damage
73. PIERACCINI, Massimiliano (2007) - Static and dynamic testing of bridges through microwave interferometry. NDT & E International. 40:3. 208-214. ISSN 0963-8695.
74. GENTILE, C (2009) - Radar-based measurement of deflections on bridges and large structures: advantages, limitations and possible applications. 2009.
75. BARDELLI, Franco (2012) - IBIS-FS v.1.0-User Manual.
76. COPPI, Francesco; GENTILE, Carmelo; RICCI, Pier Paolo (2010) - A software tool for processing the displacement time series extracted from raw radar data. 2010. AIP Publishing. ISBN 0094-243X.
77. DAVIDOFF, Martin R (1984) - The satellite experimenter's handbook. American Radio Relay League.
78. BALANIS, Constantine A (2005) - Antenna theory: analysis and design. John Wiley & Sons. ISBN 047166782X.
79. GIKASA, V; DASKALAKISA, S (2011) - Radar-based measurements of the oscillation parameters of large civil engineering structures.

80. GENTILE, Carmelo; BERNARDINI, Giulia (2008) - Output-only modal identification of a reinforced concrete bridge from radar-based measurements. *NDT & E International*. 41:7. 544-553. ISSN 0963-8695.
81. KURAS, P (2011) - Comparison of methods for measuring deflection and vibration of bridges. 2011.
82. MARPLE JR, S Lawrence (1987) - Digital spectral analysis with applications. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, Inc., 1987, 512 p.
83. WEISS, DJM (2009) - Continuous-Wave Stepped-Frequency Radar for Target Ranging and Motion Detection. 2009.
84. GENTILE, Carmelo; BERNARDINI, Giulia (2010) - An interferometric radar for non-contact measurement of deflections on civil engineering structures: laboratory and full-scale tests. *Structure and Infrastructure Engineering*. 6:5. 521-534. ISSN 1573-2479.
85. GENTILE, Carmelo (2010) - Application of radar technology to deflection measurement and dynamic testing of bridges. INTECH Open Access Publisher. ISBN 9533070293.
86. PROAKIS, John G; SALEHI, Masoud (2001) - Communication systems engineering. Prentice-hall Englewood Cliffs.
87. WENZEL, Helmut; PICHLER, Dieter (2005) - Ambient vibration monitoring. John Wiley & Sons. ISBN 0470024313.
88. WEI-HUA, Hu (2012) - Operational modal analysis and continuous dynamic monitoring of footbridges.
89. MAGALHÃES, Filipe Manuel Rodrigues Leite de (2012) - Operational modal analysis for testing and monitoring of bridges and special structures.
90. GÓMEZ ARAÚJO, Iván Darío (2015) - Análise modal operacional: métodos de identificação baseados em transmissibilidade. Universidade de São Paulo.
91. CUNHA, Alvaro; CAETANO, Elsa; MAGALHÃES, Filipe (2007) - Output-only dynamic testing of bridges and special structures. *Structural Concrete*. 8:2. 67-85. ISSN 1751-7648.
92. HERMANS, Luc; VAN DER AUWERAER, Herman (1999) - Modal testing and analysis of structures under operational conditions: industrial applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 13:2. 193-216. ISSN 0888-3270.
93. JAMES III, George H; CARNE, Thomas G; LAUFFER, James P (1993) - The natural excitation technique (NEXT) for modal parameter extraction from operating wind turbines
94. GADE, Svend (2005) - Frequency domain techniques for operational modal analysis. 2005.
95. MAGALHÃES, Filipe Manuel Rodrigues Leite de (2004) - Identificação modal estocástica para validação experimental de modelos numéricos.
96. FELBER, Andreas Johann (1993) - Development of a hybrid bridge evaluation system. University of British Columbia.
97. ANTUNES, António Pedro Rocha Brito Martinho (2008) - Projecto de postes e mastros tubulares.
98. LOPES, Valter (2009) - Ambient vibration testing and seismic analysis of a masonry chimney. *Journal of Building Appraisal*. 5:2. 101-121. ISSN 1742-8262.
99. BAIÃO, Paulo Miguel Monteiro (2010) - Comportamento dinâmico de uma torre sineira. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
100. CAETANO, Elsa; CUNHA, A (2004) - Experimental and numerical assessment of the dynamic behaviour of a stress-ribbon footbridge. *Structural concrete*. 5:1. 29-38. ISSN 1751-7648.
101. CAETANO, Elsa; CUNHA, Álvaro; MOUTINHO, Carlos (2010) - Vandal loads and induced vibrations on a footbridge. *Journal of Bridge Engineering*. 16:3. 375-382. ISSN 1084-0702.
102. RAMALHO, Pedro Ramalho e Luis (1998) - Passagem para peões, Projeto de Execução - Memória Descritiva.

