



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM PARA A MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS

**Aplicação à Medição dos Deslocamentos Verticais e Transversais
de Tabuleiros de Pontes Suspensas ou Atirantadas**

CARLOS MANUEL ALMEIDA SANTOS

(Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores)

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil e submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, no âmbito do protocolo de cooperação entre a UC e o LNEC

Lisboa, Junho de 2011



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

AUTOR:

Carlos Manuel Almeida Santos
Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

ORIENTADORES:

Jorge Manuel Moreira de Campos Pereira Batista
Professor Associado
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Carlos António de Oliveira Costa
Investigador Principal
Centro de Instrumentação Científica
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil e submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, no âmbito do protocolo de cooperação entre a UC e o LNEC

Lisboa, Junho de 2011

TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM PARA A MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS

Aplicação à medição dos deslocamentos verticais e transversais de tabuleiros de pontes suspensas ou atirantadas

Resumo

A observação do estado estrutural de grandes obras, nomeadamente de pontes, é imprescindível para detectar eventuais anomalias que possam vir a ocorrer durante o processo de construção e ao longo do tempo de utilização da infra-estrutura. O conhecimento atempado de um comportamento anómalo da estrutura permite desencadear um conjunto de medidas correctivas de forma a eliminar a fonte de anomalia e reduzir eventuais efeitos devastadores, salvaguardando a segurança dos seus utilizadores e da própria infra-estrutura.

No caso particular de uma ponte suspensa ou atirantada, o plano de observação contempla a medição de um conjunto de grandezas onde se incluem os deslocamentos vertical e transversal do tabuleiro da ponte. Nestes casos, a medição destas grandezas coloca dificuldades específicas de realização, sendo necessário recorrer a sistemas de medição sem contacto directo com a zona a observar.

Os sistemas de medição por meio de visão satisfazem os requisitos necessários para realizar esta actividade, sendo bastante eficientes. No entanto, os sistemas de medição actualmente existentes apresentam limitações que condicionam o grau de eficiência e restringem a sua aplicabilidade em condições reais de aplicação.

A presente dissertação pretende contribuir para o desenvolvimento de metodologias de calibração de sistemas de visão equipados com ópticas telescópicas, aplicados a cenários de longa distância, e de seguimento da trajectória do movimento do tabuleiro, para estimação do movimento de translação e de rotação deste. Estas metodologias visam a realização de um sistema de medição por meio de visão, destinado à observação da evolução dinâmica dos deslocamentos vertical e transversal do tabuleiro de pontes suspensas ou atirantadas, com uma frequência de aquisição superior a 20 Hz, amplitude de alguns metros e exactidão melhor do que 10 mm.

Palavras chave: Metrologia de visão; Medição sem contacto; Ponte suspensa; Deslocamento; Dispositivo óptico; Calibração de sistemas ópticos com grande distância focal; Fotogrametria de longa distância; Observação do estado estrutural.

TECHNIQUES FOR IMAGE PROCESSING APPLIED TO DISPLACEMENTS MEASUREMENT

Application to the vertical and transversal displacements measurement of suspended and cable-stayed deck bridge

Abstract

Structural Health Monitoring is an emergent powerful diagnostic tool to identify and prevent failures of the various components that comprise an infrastructure. Without an efficient monitoring system, a component failure can cause irreversible damages in the infrastructure.

In case of a suspension bridge, the vertical and transversal displacements of the deck bridge are of utmost importance, namely at the middle span where the displacements usually are more significant and can reach a couple of meters. However, in this case the traditional displacement transducers cannot be used because there is not a fixed point in the neighborhood of the part to be monitored.

Besides some limitations, nowadays, the solution for large structures built with steel, like a deck bridge, is a non-contact vision-based system. Though, the actual vision-based systems have a few drawbacks which limit their performance and usefulness.

The main purpose of the present dissertation is to contribute to the development of efficient and robust methodologies to perform the vision system calibration and to track the deck bridge motion, having in mind the measurement of the vertical and the transversal displacements of the deck bridge with amplitude of a couple of meters, accuracy better than 10 mm and a minimum sampling rate of 20 Hz.

The calibration methodology is adequate to perform the calibration of a vision system equipped with long focal length lens whereas only requires a minimum set of information, namely the distance between the targets, and can be performed in-situ while the deck bridge is moving.

The developed tracking methodology allows to estimate the translation displacement as well as the rotation of the deck bridge and only requires a minimum of two cameras and four targets to achieve the accuracy's goal.

Keywords: Vision Metrology; Non-contact measuring system; Suspension bridge; Displacement; Calibration of affine cameras; Long range photogrammetry; Structural Health Monitoring.

Agradecimentos

A realização deste estudo é o culminar do esforço e dedicação do seu autor, mas também de um conjunto de pessoas e de entidades que de alguma forma estiveram presentes ao longo dos últimos anos, contribuindo com o seu estímulo, a sua participação e o seu empenho para levar a bom termo esta missão. A todos o autor deseja expressar o seu reconhecimento.

As primeiras palavras de agradecimento são para o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), na pessoa do seu Presidente Engenheiro Carlos Pina, pelas facilidades inextinguíveis e meios técnicos que colocou à disposição do autor, sem os quais não teria sido possível concretizar este estudo.

O autor manifesta também o seu agradecimento à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, instituição que confere o grau, pelo apoio institucional prestado.

Agradeço ao anterior e ao actual Chefe do Centro de Instrumentação Científica (CIC) do LNEC, Investigador Engenheiro Francisco Carvalhal e Investigador Engenheiro Carlos Oliveira Costa, respectivamente, pelo interesse e convicção demonstrados no tema do estudo e pelo inextinguível apoio e incentivo no prosseguimento das sucessivas etapas de trabalho.

Em particular, o autor deseja agradecer:

Ao Professor Doutor Jorge Pereira Batista, os ensinamentos transmitidos, que começaram ainda como aluno de licenciatura e se foram intensificando ao longo destes últimos anos. Pela disponibilidade que sempre demonstrou, desde logo ao aceitar orientar este estudo, pela partilha de conhecimentos e ensinamentos, pelas ideias sugeridas, enriquecedoras para o estudo desenvolvido e sem as quais este teria ficado empobrecido.

Ao Investigador Engenheiro Carlos Oliveira Costa, pela sua constante presença e contribuição na formação científica do autor. Pelo interesse, dedicação e capacidade demonstrados na orientação, e pela sua disponibilidade permanente para trocas de impressões e formulação de sugestões, pelos seus ensinamentos que nunca recusou partilhar, quer por sua iniciativa quer quando solicitado. Por aceitar e tomar a seu cargo a difícil e árdua tarefa de resolução dos muitos problemas, dificuldades e preocupações que surgiram ao longo destes anos.

Ao Investigador Engenheiro Francisco Carvalhal, pelo acompanhamento constante na formação do autor, desde a sua admissão no LNEC como bolseiro de investigação. Pelos fortes e constantes incentivos de apoio e de solidariedade, pela sua disponibilidade a tempo inteiro, pelos seus

ensinamentos, sempre interessantes e nada monótonos, pelo seu estado de espírito de crença, reforçado e renovado dia após dia.

Ao investigador Engenheiro José Luís de Almeida Garrett, como chefe do Núcleo de Sistemas Electrotécnicos do CIC e, principalmente, como formador do autor. Pelas suas ideias e ensinamentos peculiares, muitos deles fruto da sua longa experiência de trabalho ao serviço do LNEC.

Ao Investigador Engenheiro Paulo Morais, chefe do Núcleo de Sistemas Mecânicos (NSM) do CIC, pelo seu apoio e incentivo constantes, pela sua disponibilidade permanente e competência aplicadas no desenvolvimento de acessórios e de mecanismos, indispensáveis à realização dos ensaios em modelo físico. Pela forma como prontamente colocou à disposição do autor os serviços da oficina de mecânica.

Aos colegas, Engenheiro Fernando Oliveira e Engenheiro Luís Martins, pela disponibilidade, empenho e entusiasmo demonstrados quando solicitados a colaborar na realização dos ensaios com modelo físico.

Ao Técnico superior, João Paixão, pelo seu perfeccionismo em tudo o que faz, designadamente nos trabalhos de oficina de electrónica, e do qual faz questão de não abdicar. Pela sua disponibilidade e prontidão para colaborar no aperfeiçoamento de soluções apresentadas ou em propor, de forma desinteressada, soluções alternativas a problemas concretos apresentados pelo autor.

Ao Coordenador técnico Rogério Pereira e ao Coordenador técnico Joaquim Ribeiro, da oficina de mecânica do NSM, pelo empenho, dedicação, eficiência e prontidão demonstrados, sempre que para tal foram solicitados.

A Mr. Graham Stephen e a Mr. J. Macdonald, da Universidade de Bristol, pelo gesto simpático que tiveram ao disponibilizarem documentos bibliográficos que possuíam e em fornecer os elementos necessários que possibilitaram o acesso a outros documentos igualmente importantes.

A todos os colegas do LNEC e em especial aos colegas e amigos do CIC, pelas constantes manifestações de incentivo e de apoio e pelo bom ambiente de trabalho que proporcionam e fazem questão de cultivar e transmitir às sucessivas gerações.

Por último, e não menos importante, o autor deseja expressar o seu profundo e reconhecido agradecimento à esposa, e restante família, por todas as privações e momentos difíceis que suportaram ao longo dos últimos anos, pela vontade de auxílio e partilha de preocupações e dificuldades, pelo incentivo e apoio constantes, pela sua presença e companhia, nos bons e nos maus momentos e, sobretudo, pela sua crença na realização e conclusão deste trabalho.

Índice Geral

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Objectivos	10
1.3 Organização da dissertação	12
Capítulo 2 – MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DO TABULEIRO DE PONTES SUSPENSAS OU ATIRANTADAS	15
2.1 Observação do comportamento estrutural	15
2.2 A Ponte 25 de Abril	17
2.3 Medição dos deslocamentos do tabuleiro de pontes	17
2.3.1 Sistema de posicionamento global	18
2.3.2 Sistema de radar	24
2.3.3 Sistema laser	29
2.3.4 Fotogrametria	30
2.3.5 Sistema de visão	35
2.3.5.1 Análise crítica	48
2.4 Conclusões	52
Capítulo 3 – CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE VISÃO	53
3.1 Introdução	53
3.2 Parâmetros intrínsecos e extrínsecos	54
3.3 Modelos de projecção	56
3.3.1 Formação da imagem	56
3.3.2 Perspectiva central	57
3.3.3 Câmara afim	58
3.3.3.1 Projecção ortográfica	62
3.3.3.2 Projecção de perspectiva fraca	63
3.3.3.3 Projecção de para-perspectiva	64
3.4 Algoritmos para calibração de sistemas ópticos	64

3.4.1	Configuração monocular	65
3.4.1.1	Algoritmo DLT	65
3.4.1.2	Algoritmo de Heikkilä	68
3.4.1.3	Algoritmo de Tsai	69
3.4.1.4	Algoritmo de Zhang	71
3.4.2	Configuração multi-câmara	76
3.4.2.1	Restrição epipolar	77
3.4.2.2	Algoritmo de Wilczkowiak	82
3.4.2.3	Algoritmo de Fraser	84
3.4.2.4	Algoritmo de Tomasi	86
3.4.2.5	Algoritmo de Kahl	88
3.5	Conclusões	89
Capítulo 4 – CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE VISÃO COM GRANDE DISTÂNCIA FOCAL		91
4.1	Introdução	91
4.2	Modelo de projecção afim	93
4.2.1	Preservação do centro geométrico (centroide)	94
4.2.2	Erro gerado pelo modelo afim	95
4.3	Calibração de câmaras do tipo afim	99
4.3.1	Formulação do problema	99
4.3.2	Estabelecimento dos sistemas de coordenadas na imagem e no espaço	100
4.3.3	Reconstrução afim	101
4.3.4	Rectificação de afim para Euclidiana	104
4.3.4.1	Rectificação com câmaras ortográficas	104
4.3.4.2	Rectificação baseada em parâmetros intrínsecos	105
4.3.4.3	Rectificação baseada em características do objecto	106
4.3.5	Reconstrução métrica	111
4.3.6	Refinamento da solução	112
4.3.7	Orientação do sistema de coordenadas de referência	113
4.3.8	Imagem média	115

4.3.9	Determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos -----	118
4.4	Resultados de reconstrução métrica com duas câmaras -----	118
4.5	Conclusões -----	132
Capítulo 5 – ESTIMAÇÃO DA TRAJECTÓRIA DE MOVIMENTO POR MEIO DE UM FIL- TRO RECURSIVO -----		133
5.1	Introdução -----	133
5.2	Filtro de <i>Kalman</i> -----	135
5.3	Formulação do estimador de movimento -----	138
5.3.1	Considerações gerais -----	139
5.3.2	Sistemas de coordenadas -----	141
5.3.3	Formulação dos modelos matemáticos -----	141
5.3.3.1	Modelo de projecção -----	141
5.3.3.2	Modelo do espaço -----	144
5.3.3.3	Modelo do objecto -----	145
5.3.3.4	Modelo cinemático -----	147
5.3.4	Estimação do movimento cinemático -----	151
5.3.4.1	Filtro de <i>Kalman</i> estendido -----	151
5.3.4.2	Filtro de <i>Kalman</i> estendido iterativo -----	152
5.3.5	Algumas observações -----	154
5.4	Conclusões -----	156
Capítulo 6 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS -----		157
6.1	Introdução -----	157
6.2	Simulação numérica -----	158
6.2.1	Configurações -----	158
6.2.2	Calibração -----	160
6.2.2.1	Avaliação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos -----	162
6.2.2.1.1	Configurações -----	162
6.2.2.1.2	Objecto composto por oito alvos -----	165
6.2.2.1.3	Objecto composto por quatro alvos -----	171

6.2.3	Seguimento	173
6.2.3.1	Parametrização do estado inicial do vector de estado	174
6.2.3.2	Configuração	175
6.2.3.3	Predição da trajectória	181
6.2.3.4	Número de alvos	186
6.3	Simulação física	188
6.3.1	Descrição do sistema de medição	189
6.3.1.1	Subsistema de visão	189
6.3.1.2	Estrutura de suporte dos alvos	190
6.3.1.3	Alvo	191
6.3.1.4	Sistema de medição de referência	195
6.3.1.5	Sincronismo das câmaras	195
6.3.2	Ensaio em ambiente de exterior	196
6.3.2.1	Processamento das imagens	198
6.3.2.2	Resultados obtidos	198
6.3.2.2.1	Calibração do sistema de visão	198
6.3.2.2.2	Seguimento do movimento do sistema de alvos	201
6.3.3	Ensaio em ambiente de interior	206
6.3.3.1	Resultados obtidos	209
6.3.3.1.1	Calibração do sistema de visão	209
6.3.3.1.2	Seguimento do movimento do sistema de alvos	211
6.3.3.1.3	Seguimento do movimento do sistema de alvos de simulação numérica	216
6.4	Conclusões	221
Capítulo 7 – CONCLUSÕES		223
7.1	Considerações gerais	223
7.2	Acerca do estudo realizado	223
7.3	Acerca dos resultados obtidos	225
7.3.1	Testes de calibração	225

7.3.2	Testes de seguimento -----	227
7.4	Conclusão final e perspectivas futuras -----	229
BIBLIOGRAFIA -----		231
ANEXO I – Selecção do Comprimento de Onda da Fonte de Radiação		
ANEXO II – Caracterização das Condições Atmosféricas de Visibilidade da Zona Envolvente da Ponte 25 de Abril		
ANEXO III – Alvo		
ANEXO IV – Componentes do Sistema de Medição		

Índice de Figuras

Capítulo 1

1.1	<i>Princípio de funcionamento do sistema de medição de deslocamentos do tabuleiro de pontes suspensas ou atirantadas</i> -----	10
-----	--	----

Capítulo 2

2.1	<i>Duas vistas da Ponte 25 de Abril, sobre o rio Tejo, em Lisboa</i> -----	17
2.2	<i>Código C/A, código P e modulação da portadora de fase</i> -----	19
2.3	<i>Conceito associado à técnica de RTK-GPS</i> -----	19
2.4	<i>Antena de GPS de referência, instalada na cobertura do edifício</i> -----	19
2.5	<i>Localização das antenas de GPS na ponte Tsing Ma</i> -----	20
2.6	<i>Ponte Tsing Ma: antenas de GPS instaladas na torre, no cabo de suspensão e no tabuleiro</i> -----	20
2.7	<i>Efeito de múltiplo percurso, gerado pela reflexão do sinal</i> -----	22
2.8	<i>Antena com blindagem de anéis concêntricos (choke ring) e respectivo invólucro de protecção</i> -----	23
2.9	<i>Atraso para as portadoras L_1 e L_2 e resultante L_C, induzido pela presença de chuva e de gelo</i> -----	24
2.10	<i>Sistema de medição de deslocamentos IBIS-S, baseado na tecnologia de radar</i> -----	26
2.11	<i>Instalação de alvos passivos no tabuleiro da ponte Capriate, Itália</i> -----	26
2.12	<i>Identificação dos potenciais alvos na estrutura do tabuleiro da ponte, através da medição da distância na direcção de propagação do sinal</i> -----	26
2.13	<i>Discriminação de alvos; conceito de máxima resolução e de sector de discriminação</i> -----	26
2.14	<i>Estrutura do tabuleiro da P25A, vista da base do pilar P3</i> -----	27
2.15	<i>Representação geométrica do método de cálculo do deslocamento vertical</i> -----	28
2.16	<i>Sistema IBIS-L, vocacionado para a medição de deformações</i> -----	28
2.17	<i>Receptor óptico fixo na estrutura de um pórtico metálico</i> -----	29
2.18	<i>Sistema PSM-200, constituído por emissor laser e respectivo receptor óptico</i> -----	29
2.19	<i>Aquisição de imagens do objecto para reconstrução tridimensional</i> -----	31
2.20	<i>Geometria estéreo de fraca convergência e geometria multi-câmara de elevada convergência</i> -----	31
2.21	<i>Alvos fixos numa viga de betão armado, para ensaio até à ruptura. Geometria da rede de câmaras usadas para a aquisição das imagens</i> -----	32

2.22	<i>Observação do deslizamento de uma encosta, situada a cerca de 100 m de distância do sistema de visão, fazendo uso de 28 alvos</i> -----	33
2.23	<i>Ensaio de carga de uma ponte. Sistema de visão usado para a aquisição das imagens</i> -----	33
2.24	<i>Deslocamento do tabuleiro da ponte, registado pelo sistema de visão e por um transdutor de deslocamento, do tipo indutivo</i> -----	34
2.25	<i>Alvos de referência e de observação</i> -----	35
2.26	<i>Dispositivo de orientação exterior, com forma geométrica singular</i> -----	35
2.27	<i>Sistema de medição, sem contacto, desenvolvido pelo LNEC na década de sessenta</i> ----	35
2.28	<i>Esquema representativo dos elementos que compõem o sistema de medição baseado em dispositivos ópticos</i> -----	36
2.29	<i>Sistema de observação (subsistema óptico e subsistema mecânico)</i> -----	36
2.30	<i>Humber Bridge, com vão central de 1410 m</i> -----	38
2.31	<i>Alvo passivo montado no meio vão da Humber Bridge</i> -----	39
2.32	<i>Imagem do alvo adquirida pela câmara de vídeo</i> -----	39
2.33	<i>Iluminação do alvo passivo por uma fonte de iluminação artificial</i> -----	39
2.34	<i>Ponte Second Severn Crossing</i> -----	40
2.35	<i>Sistema de medição instalado na base de um dos pilares da ponte Second Severn Crossing</i> -----	40
2.36	<i>Sistema óptico de projecção dos dois alvos no único sensor da câmara de vídeo</i> -----	41
2.37	<i>No primeiro plano encontra-se o alvo de observação e no segundo plano o alvo de referência</i> -----	41
2.38	<i>Representação gráfica das funções $g(u, v)$ e $f(u, v)$, com w_{zone} igual a treze</i> -----	42
2.39	<i>Ponte Vincent Thomas, Califórnia</i> -----	43
2.40	<i>Imagem do alvo adquirida pela câmara de vídeo, com indicação da distância entre os LEDs</i> -----	44
2.41	<i>Imagem do LED, usado na observação do movimento do tabuleiro, após filtragem e processamento</i> -----	44
2.42	<i>Posicionamento do alvo, formado por dois LEDs, um dos quais usado, exclusivamente, para a realização da calibração do sistema de medição</i> -----	44
2.43	<i>Alvo passivo, formado por quatro marcas de secção circular, de cor branca sob fundo preto</i> -----	45
2.44	<i>Observação dos deslocamentos de um viaduto e de uma ponte pedonal</i> -----	46
2.45	<i>Representação ilustrativa do método do fluxo óptico, com a indicação do movimento do ponto j entre os instantes t_1 e t_1+dt</i> -----	47
2.46	<i>Sistema de visão na posição de observação dos cabos de suspensão da Ponte do Guadiana e imagem adquirida com indicação dos pontos analisados</i> -----	48
2.47	<i>Diagrama representativo do deslocamento vertical aparente induzido no sistema de medição, pelo deslocamento longitudinal do tabuleiro</i> -----	50

2.48	<i>Máximo deslocamento longitudinal do tabuleiro da P25A, registado desde Junho/Julho de 2008 até ao dia 24 de Setembro de 2009, nos apoios dos pilares P1, P2, P5 e P7</i>	51
2.49	<i>Deslocamento longitudinal do tabuleiro da P25A, registado nos apoios dos pilares P1, P2, P5 e P7, devido à passagem do comboio</i>	51

Capítulo 3

3.1	<i>Projectção do ponto C nos planos real e virtual da imagem</i>	56
3.2	<i>Diminuição do efeito de perspectiva, resultante do aumento da distância focal da óptica e da distância entre a câmara e o objecto, mantendo o mesmo campo de vista</i>	59
3.3	<i>Erro de projectção devido à adopção de um modelo de projectção aproximado</i>	60
3.4	<i>Modelos de projectção no plano da imagem</i>	63
3.5	<i>Projectção do ponto C no plano da imagem – colinearidade</i>	65
3.6	<i>Projectção de uma superfície circular no plano, segundo o modelo da perspectiva central</i>	68
3.7	<i>Painel tridimensional de calibração</i>	70
3.8	<i>Alinhamento radial entre os vectores $\overrightarrow{Oc_d}$, $\overrightarrow{Oc_u}$ e $\overrightarrow{C_zC}$, na presença de distorção radial</i>	70
3.9	<i>Imagem do painel de calibração, adquirida à distância aproximada de 0,75 m</i>	75
3.10	<i>Imagem do painel de calibração, adquirida à distância aproximada de 400 m</i>	75
3.11	<i>Imagens do painel de calibração, adquiridas à distância aproximada de 58 m</i>	75
3.12	<i>Geometria e restrição epipolar</i>	77
3.13	<i>Pontos de fuga obtidos a partir da projectção dos vértices de um paralelepípedo</i>	81
3.14	<i>Parâmetros intrínsecos de um paralelepípedo</i>	82
3.15	<i>Projectção do cubo canónico no plano da imagem</i>	83

Capítulo 4

4.1	<i>Erro de projectção devido à adopção de um modelo de projectção aproximado</i>	96
4.2	<i>Estabelecimento dos sistemas de coordenadas no espaço e na câmara e sua interligação</i>	101
4.3	<i>Segmentos paralelos geram uma única restrição de relação de comprimento e uma única restrição de ângulo</i>	110
4.4	<i>Nuvem de pontos gerada por cada um dos b pontos de controlo, no espaço e no plano da imagem. Indicação do centroide da nuvem de pontos no espaço e na imagem</i>	116
4.5	<i>Duas configurações de câmaras: S – N e SE – SW</i>	120

4.6	<i>Dois objectos formados por quatro e oito pontos de controlo, com a indicação de segmentos e de ângulos usados na formulação de restrições de ângulo e de relação de comprimento</i> -----	120
4.7	<i>Desvio absoluto médio e respectivo desvio padrão dos parâmetros das câmaras, obtido com a configuração SE – SW e com um objecto composto por quatro pontos de controlo</i> -----	125
4.8	<i>Desvio absoluto médio e respectivo desvio padrão dos parâmetros das câmaras, obtido com a configuração S – N e com um objecto composto por quatro pontos de controlo</i> -----	125
4.9	<i>Desvio absoluto médio e respectivo desvio padrão dos parâmetros das câmaras, obtido com a configuração SE – SW e com um objecto composto por oito pontos de controlo</i> -----	128
4.10	<i>Desvio absoluto médio e respectivo desvio padrão dos parâmetros das câmaras, obtido com a configuração S – N e com um objecto composto por oito pontos de controlo</i> -----	128
4.11	<i>Desvio absoluto médio e respectivo desvio padrão dos parâmetros intrínsecos das câmaras, obtidos com a configuração SE – SW e com um objecto composto por dois pontos de controlo em movimento pendular 3D</i> -----	131
4.12	<i>Desvio absoluto médio e respectivo desvio padrão dos parâmetros intrínsecos das câmaras, obtidos com a configuração S – N e com um objecto composto por dois pontos de controlo em movimento pendular 3D</i> -----	131

Capítulo 5

5.1	<i>Sistemas de coordenadas empregues na modelação do movimento da estrutura (tabuleiro), para uma configuração composta por dois subsistemas de visão</i> -----	142
5.2	<i>Posição do ponto de controlo j vista por cada um dos sistemas de coordenadas</i> -----	144

Capítulo 6

6.1	<i>Esquema representando a posição das várias câmaras, no sistema de coordenadas de referência O_I, e respectiva orientação do sistema de coordenadas</i> -----	159
6.2	<i>Esquema representando a orientação das câmaras posicionadas nas bases dos pilares</i> -----	159
6.3	<i>Disposição relativa dos alvos, usados no processo de calibração, formando uma malha com a forma geométrica de um paralelepípedo</i> -----	160
6.4	<i>Interface disponibilizada pela aplicação, desenvolvida em ambiente Matlab, para uma configuração composta por quatro câmaras</i> -----	161
6.5	<i>Componentes do movimento de translação e de rotação da trajectória do tabuleiro, criada por meio de simulação numérica, para a realização da calibração dos subsistemas de visão</i> -----	164

6.6	<i>Projectão dos oito alvos no plano da imagem das câmaras S e N da configuração 1</i>	164
6.7	<i>Projectão dos oito alvos no plano da imagem das câmaras SE e NW da configuração 5</i>	165
6.8	<i>Desvio absoluto médio da estimativa dos parâmetros intrínsecos, obtidos com as seis configurações e oito alvos, em função do nível de ruído</i>	166
6.9	<i>Desvio absoluto médio da estimativa dos parâmetros extrínsecos (pose), obtidos com as seis configurações e oito alvos, em função do nível de ruído</i>	167
6.10	<i>Reconstrução do objecto, após a aplicação das equações indicadas, ao longo do processo de calibração com a configuração 2</i>	169
6.11	<i>Reconstrução do objecto, após a aplicação das equações indicadas, ao longo do processo de calibração com a configuração 5</i>	169
6.12	<i>Desvio absoluto médio da estimativa dos parâmetros intrínsecos, obtidos com as quatro configurações e oito alvos, em função do nível de ruído</i>	170
6.13	<i>Desvio absoluto médio da estimativa dos parâmetros extrínsecos (pose), obtidos com as quatro configurações e oito alvos, em função do nível de ruído</i>	170
6.14	<i>Desvio absoluto médio da estimativa dos parâmetros obtidos com a configuração SE – SW e oito alvos, em função da distância entre as câmaras e considerando uma perturbação de dois píxeis</i>	171
6.15	<i>Desvio absoluto médio da estimativa dos parâmetros intrínsecos, obtidos com as cinco configurações e com quatro alvos, em função do nível de ruído</i>	172
6.16	<i>Desvio absoluto médio da estimativa dos parâmetros extrínsecos (pose), obtidos com as cinco configurações e com quatro alvos, em função do nível de ruído</i>	173
6.17	<i>Interface disponibilizada pela aplicação, desenvolvida em ambiente Matlab, para configuração dos parâmetros da trajectória do tabuleiro, entre outros parâmetros</i>	175
6.18	<i>Interface gráfica disponibilizada pela aplicação de estimação do movimento do tabuleiro, com possibilidade de visualização de vários parâmetros característicos</i>	175
6.19	<i>Componentes do movimento de translação e de rotação da trajectória do tabuleiro, gerada por meio de simulação numérica, correspondente a 20 minutos de observação</i>	177
6.20	<i>Desvio médio da estimativa do deslocamento, medido em XY e em XYZ, obtido com cinco configurações de câmaras e oito alvos, em função do nível de ruído presente na fase de seguimento e para dois níveis de ruído na fase de calibração</i>	178
6.21	<i>Desvio absoluto médio da estimativa dos ângulos de rotação obtido com cinco configurações de câmaras e oito alvos, em função do nível de ruído presente na fase de seguimento e para dois níveis de ruído na fase de calibração</i>	178
6.22	<i>Desvio médio da estimativa do movimento de deslocamento e de rotação do tabuleiro, obtido com a configuração SE – SW e oito alvos, em função da distância entre as câmaras e para diferentes níveis de ruído na fase de seguimento</i>	180
6.23	<i>Desvio da estimativa do movimento de deslocamento, em XY e em XYZ, assumindo um píxel de ruído nas fases de calibração e de seguimento</i>	182

6.24	<i>Desvio da estimativa do movimento de deslocamento, em XY e em XYZ, assumindo dois píxeis de ruído nas fases de calibração e de seguimento</i> -----	183
6.25	<i>Erro de estimação dos ângulos de rotação e erro de posição do centro de rotação do tabuleiro, obtidos com oito alvos e assumindo um píxel de ruído nas fases de calibração e de seguimento</i> -----	184
6.26	<i>Desvio absoluto de predição das coordenadas de projecção do alvo nº 8 numa das câmaras, considerando um píxel e dois píxeis de ruído nas fases de calibração e de seguimento</i> -----	185
6.27	<i>Desvio da estimativa do movimento de deslocamento e de rotação do tabuleiro, obtido com as configurações S – N, SE – SW – N e SE – SW – NE – NW, em função do número de alvos usados na fase de seguimento e do nível de ruído presente na fase de seguimento</i> -----	187
6.28	<i>Subsistema de visão empregue na realização dos ensaios com modelo físico</i> -----	190
6.29	<i>Estrutura de suporte dos alvos com liberdade de movimento segundo as direcções horizontal e vertical</i> -----	190
6.30	<i>Fixação dos LEDs à estrutura de suporte. Cada par de LEDs representa um alvo</i> ----	192
6.31	<i>Representação do ponto virtual, visto pelas duas câmaras</i> -----	192
6.32	<i>Identificação e distância (aproximada) entre os alvos, usados no ensaio experimental</i> -----	194
6.33	<i>Levantamento da posição 3D de cada um dos LEDs e calibração da cadeia de medição do sistema de referência, usando uma máquina de medição de coordenadas 3D, marca DEA (MMC3D) e modelo Gamma 22.03</i> -----	194
6.34	<i>Sistema de aquisição de dados, do sistema de medição de referência</i> -----	195
6.35	<i>Posicionamento dos subsistemas de visão relativamente à posição do sistema de alvos</i> -----	197
6.36	<i>Posicionamento do sistema de alvos na cobertura do edifício</i> -----	197
6.37	<i>Linha de vista do sistema de alvos para as câmaras C₁ e C₂</i> -----	197
6.38	<i>Imagens com a resolução de 1920 x 1080 píxeis, adquiridas pelas câmaras C₁ e C₂</i> ---	199
6.39	<i>Equipamento de ensaio, composto pelos subsistemas de visão C₁ e C₂</i> -----	199
6.40	<i>Deslocamento registado pelo sistema de medição de referência e estimado pelo sistema de visão, para vários movimentos impostos ao sistema de alvos – ensaio de exterior</i> -----	203
6.41	<i>Desvio de deslocamento, segundo as componentes horizontal e vertical, e rotação do sistema de alvos registada pelo sistema de visão – ensaio de exterior</i> -----	204
6.42	<i>Desvio de deslocamento registado no plano horizontal/vertical XY e no espaço XYZ, em função do tempo – ensaio de exterior</i> -----	205
6.43	<i>Desvio de deslocamento, segundo as componentes horizontal e vertical, e rotação do sistema de alvos registada pelo sistema de visão – ensaio de exterior – sem utilização do IEKF</i> -----	207
6.44	<i>Desvio de deslocamento registado no plano horizontal/vertical XY e no espaço XYZ, em função do tempo – ensaio de exterior– sem utilização do estimador IEKF de movimento</i> -----	208

6.45	<i>Posicionamento dos subsistemas de visão relativamente à posição do sistema de alvos, no interior do pavilhão</i> -----	210
6.46	<i>Linha de vista da câmara C_2 para o sistema de alvos. Imposição de movimento no sistema de alvos e linha de vista para a câmara C_1</i> -----	210
6.47	<i>Imagens adquiridas pela câmara C_1 e pela câmara C_2</i> -----	210
6.48	<i>Deslocamento registado pelo sistema de medição de referência e estimado pelo sistema de visão, para vários movimentos impostos ao sistema de alvos – ensaio de interior</i> -----	212
6.49	<i>Desvio de deslocamento, segundo as componentes horizontal e vertical, e rotação do sistema de alvos registada pelo sistema de visão – ensaio de interior</i> -----	213
6.50	<i>Desvio de deslocamento registado no plano horizontal/vertical XY e no espaço XYZ, em função do tempo – ensaio de interior</i> -----	214
6.51	<i>Desvio de deslocamento, segundo as componentes horizontal e vertical, e rotação do sistema de alvos registada pelo sistema de visão, obtidos com apenas quatro alvos (nº 1, 4, 5 e 12) – ensaio de interior</i> -----	217
6.52	<i>Desvio de deslocamento registado no plano horizontal/vertical XY e no espaço XYZ, em função do tempo, obtidos com apenas quatro alvos (nº 1, 4, 5 e 12) – ensaio de interior</i> -----	218
6.53	<i>Deslocamento de referência e deslocamento obtido por meio de simulação numérica, considerando uma perturbação de 2 píxeis de ruído nas fases de calibração e de seguimento</i> -----	219
6.54	<i>Desvio de deslocamento registado no plano horizontal/vertical XY e no espaço XYZ, em função do tempo, considerando 2 píxeis de ruído nas fases de calibração e de seguimento</i> -----	220

Índice de Tabelas

Capítulo 3

3.1	<i>Parâmetros intrínsecos e extrínsecos, de referência, empregues em dois casos de estudo</i> -----	73
3.2	<i>Parâmetros intrínsecos e extrínsecos obtidos da calibração efectuada a 1 m de distância da câmara, em função da resolução das coordenadas de projecção dos pontos de controlo</i> -----	73
3.3	<i>Parâmetros intrínsecos e extrínsecos obtidos da calibração efectuada a 500 m de distância da câmara, em função da resolução das coordenadas de projecção dos pontos de controlo</i> -----	74
3.4	<i>Parâmetros intrínsecos obtidos da calibração efectuada com modelo físico, a diferentes distâncias da câmara</i> -----	74

Capítulo 4

4.1	<i>Parâmetros intrínsecos das câmaras</i> -----	119
4.2	<i>Parâmetros extrínsecos das câmaras</i> -----	120
4.3	<i>Desvio absoluto médio e desvio padrão nos parâmetros intrínsecos das câmaras, obtidos com os vários testes, considerando um objecto composto por quatro pontos</i> -----	124
4.4	<i>Desvio absoluto médio e desvio padrão nos parâmetros intrínsecos das câmaras, obtidos com os vários testes, considerando um objecto composto por oito pontos</i> -----	127
4.5	<i>Desvio absoluto médio e desvio padrão nos parâmetros intrínsecos das câmaras, obtidos com os vários testes, considerando um objecto composto por dois pontos</i> -----	130

Capítulo 6

6.1	<i>Identificação das câmaras que constituem cada uma das configurações</i> -----	160
6.2	<i>Parâmetros intrínsecos dos subsistemas de visão</i> -----	162
6.3	<i>Parâmetros extrínsecos dos subsistemas de visão</i> -----	162
6.4	<i>Coordenadas do centro de rotação do tabuleiro</i> -----	163
6.5	<i>Parametrização do estado inicial do vector de estado</i> -----	176
6.6	<i>Desvio da estimativa do movimento de deslocamento e de rotação do tabuleiro, obtido com as cinco configurações e com quatro alvos, em função do nível de ruído presente na fase de seguimento. Calibração efectuada com quatro alvos e assumindo um nível de ruído de dois píxeis</i> -----	188

6.7	<i>Parâmetros extrínsecos dos subsistemas de visão – ensaio de exterior</i> -----	200
6.8	<i>Parâmetros intrínsecos e extrínsecos obtidos após a realização da calibração dos subsistemas de visão – ensaio de exterior</i> -----	200
6.9	<i>Parâmetros extrínsecos dos subsistemas de visão – ensaio de interior</i> -----	209
6.10	<i>Parâmetros intrínsecos e extrínsecos obtidos após a realização da calibração dos subsistemas de visão – ensaio de interior</i> -----	211

Simbologia

- $a(t)$ – vector de aceleração (constante), no instante de tempo t ;
- a_{ij} – elemento da matriz fundamental F_A ;
- b – número de alvos;
– número de pontos de controlo;
- c – velocidade da luz;
- c_a – coordenadas 2D de projecção no plano da imagem, segundo o modelo de projecção afim;
- c_d – coordenadas 2D de projecção do ponto C no plano da imagem, considerando o efeito de distorção do sistema óptico;
- c_i – coordenadas 2D de um ponto na imagem;
- c_L – coordenadas homogéneas de projecção do ponto C no plano da imagem da câmara L ;
- c_o – coordenadas 2D do centro óptico da câmara;
- c_{oL} – coordenadas 2D do centro óptico da câmara L ;
- c_{oR} – coordenadas 2D do centro óptico da câmara R ;
- c_p – coordenadas 2D de projecção no plano da imagem, segundo o modelo de projecção de perspectiva central;
- c_R – coordenadas homogéneas de projecção do ponto C no plano da imagem da câmara R ;
- c_u – coordenadas 2D de projecção do ponto C no plano da imagem, considerando ausência de distorção do sistema óptico;
- c_i^f – coordenadas 2D de projecção no plano da imagem do ponto de controlo i , referentes à imagem adquirida f ;
- c'_{ij} – coordenadas 2D de projecção do ponto reconstruído j , na imagem da câmara i ;
- \bar{c} – coordenadas 2D, na imagem, do centroide;
- \tilde{c}_i – coordenadas 2D, na imagem, do ponto i , referenciadas a \bar{c} ;
- \ddot{c}_j – vector de coordenadas de projecção do ponto de controlo j , nas imagens das várias câmaras;
- \tilde{c}_j – vector de coordenadas de projecção do ponto de controlo j , nas imagens das várias câmaras, afectado por ruído;
- d – distância de profundidade do objecto;
– distância do ponto C ao plano Π ;
- $d(t)$ – vector de coordenadas 3D da posição do centro de rotação, O_R , no sistema de coordenadas de referência O_I , no instante de tempo t ;
- d_R – diâmetro da abertura do receptor;
- d_T – diâmetro da abertura do transmissor;
- d_u – erro de posição na componente horizontal da imagem devido a efeito de distorção;

- d_v – erro de posição na componente vertical da imagem devido a efeito de distorção;
- e_i – vector unitário i , no espaço do objecto;
- e_L – coordenadas 2D do epipolo no plano da imagem da câmara L ;
- e_R – coordenadas 2D do epipolo no plano da imagem da câmara R ;
- e'_i – vector unitário i , no espaço reconstruído;
- f – distância focal;
- $f(u, v)$ – função de Prewitt, avaliada no píxel de coordenadas (u, v) ;
- f_u – distância focal do sistema óptico, em unidades de píxel, segundo o eixo horizontal;
- f_v – distância focal do sistema óptico, em unidades de píxel, segundo o eixo vertical;
- g – vector de incógnitas (elementos da matriz F); c_{ij} – coordenadas 2D de projecção do ponto j na imagem da câmara i ;
- $g(u, v)$ – nível de cinzento (intensidade) do píxel de coordenadas (u, v) ;
- h – componente vertical (altura) entre o sistema de medição baseado em radar e o alvo;
– coordenada da componente vertical do ponto virtual (alvo), relativamente ao plano horizontal formado pelos dois LEDs;
- h_i – coluna i da matriz de transformação homográfica H ;
- h_S – altura da base das nuvens;
- i_L – recta epipolar no plano da imagem da câmara L ;
- i_R – recta epipolar no plano da imagem da câmara R ;
- k_1 – coeficiente de primeira ordem de distorção do sistema óptico;
- k_2 – coeficiente de segunda ordem de distorção do sistema óptico;
- k_a – factor de escala de uma câmara afim;
- l_i – comprimento do lado i do paralelepípedo;
- $\tilde{\mathbf{I}}$ – matriz das coordenadas de projecção dos b pontos de controlo nas N câmaras, referenciadas ao sistema de coordenadas da respectiva câmara, O_C ;
- $\tilde{\mathbf{I}}(t_i)$ – matriz das coordenadas de projecção dos b pontos de controlo nas N câmaras, referenciadas ao sistema de coordenadas da respectiva câmara, O_C , no instante de tempo t_i ;
- $\tilde{\mathbf{I}}_j(t_i)$ – valor médio da projecção do ponto j nas N câmaras, referenciadas ao sistema de coordenadas da respectiva câmara, O_C , obtido das sucessivas imagens adquiridas até ao instante de tempo t_i ;
- m_{ij} – elemento i, j da matriz de projecção afim, M ;
- \ddot{m}_{ij} – linha j da matriz M_{A_i} ;
- \tilde{m}_{ij} – elemento da matriz afim;
- n_{ij} – vector 2D de perturbação (ruído) do ponto de controlo j projectado na imagem da câmara i ;
- n_j – vector de perturbação (ruído) do ponto de controlo j projectado nas imagens das várias câmaras;

- n_{ij}^u – perturbação (ruído) na componente horizontal do ponto de controlo j projectado na imagem da câmara i ;
 n_{ij}^v – perturbação (ruído) na componente vertical do ponto de controlo j projectado na imagem da câmara i ;
 p – vector de incógnitas, da matriz de projecção P ;
 $p(t)$ – vector de percepção (constante), no instante de tempo t ;
 p_{ij} – elemento da matriz de projecção de perspectiva central P ;
 q – constante
 $q(t)$ – vector quaternião, no instante de tempo t ;
 q_i – elemento i do vector quaternião;
 r – raio;
– valor próprio;
– coordenadas 3D de posição do centro de rotação, O_R , no sistema de coordenadas O_B ;
 r_{ef} – raio efectivo;
 r_i – vector linha i da matriz R ;
 r_m – raio modal;
 s – parâmetro de não ortogonalidade (*skew*) de uma câmara de perspectiva;
– valor próprio;
 s_a – parâmetro de não ortogonalidade (*skew*) de uma câmara afim;
 s_x – factor de escala horizontal;
 $s_j(t)$ – vector de coordenadas 3D da posição do ponto j , no sistema de coordenadas de referência O_I , no instante de tempo t ;
 $\tilde{s}_j(t)$ – vector de coordenadas 3D da posição do ponto j , no sistema de coordenadas de referência O_I , no instante de tempo t , afectado por ruído;
 t – instante de tempo t ;
 t_i – instante de tempo t_i ;
 u – coordenada horizontal no plano da imagem;
 u_i – coluna i da matriz ortogonal U , obtida por SVD;
– coordenada horizontal do ponto i na imagem;
 u_{ij} – coordenada horizontal do ponto j na imagem da câmara i ;
 u_0 – componente horizontal de posição do ponto principal;
– componente horizontal de posição na imagem do sistema de coordenadas O_C ;
 u' – vector unitário, no plano da imagem, segundo a direcção horizontal;
 \dot{u} – componente de velocidade do ponto de interesse, segundo a direcção horizontal;
 \ddot{u}_{ij} – componente horizontal de posição do ponto de controlo j no plano da imagem da câmara i , referenciada a O_{Ci} ;
 \bar{u}_i – componente horizontal de posição do sistema de coordenadas O_{Ci} no plano da imagem da câmara i ;

- \hat{u}_i – coordenada horizontal da projecção da origem do sistema de coordenadas estabelecido no objecto, O_B , referenciada no sistema de coordenadas da câmara i (O_{Ci});
- \tilde{u}_{ij} – componente horizontal de posição do ponto de controlo j , na imagem da câmara i , afectado por ruído;
- \hat{u}_{ijk} – coordenada horizontal do ponto de controlo k , na imagem da câmara j , referente à imagem adquirida i ;
- $[\hat{u}, \hat{v}]^T$ – vector de fluxo óptico;
- v – coordenada vertical no plano da imagem;
- V – matriz de posição do paralelepípedo;
- $v(t)$ – vector de velocidade linear, no instante de tempo t ;
- v_i – coluna i da matriz ortogonal V , obtida por SVD;
- v_i – coordenada vertical do ponto i na imagem;
- V_i – matriz de posição do paralelepípedo i ;
- v_{ij} – coordenada vertical do ponto j na imagem da câmara i ;
- v_{maxf} – coordenada vertical, na imagem, correspondente ao valor máximo de $f(u, v)$
- v_0 – componente vertical de posição do ponto principal;
- v_0 – coordenada vertical de posição na imagem do sistema de coordenadas O_C ;
- \dot{v} – componente de velocidade do ponto de interesse, segundo a direcção vertical;
- \ddot{v}_{ij} – componente vertical de posição do ponto de controlo j no plano da imagem da câmara i , referenciada a O_{Ci} ;
- v' – vector unitário, no plano da imagem, segundo a direcção vertical;
- \hat{v}_i – componente vertical da projecção da origem do sistema de coordenadas estabelecido no objecto, O_B , referenciada no sistema de coordenadas da câmara i (O_{Ci});
- \bar{v}_i – componente vertical de posição do sistema de coordenadas O_{Ci} no plano da imagem da câmara i ;
- \tilde{v}_{ij} – componente vertical de posição do ponto de controlo j , na imagem da câmara i , afectado por ruído;
- \hat{v}_{ijk} – coordenada vertical do ponto de controlo k , na imagem da câmara j , referente à imagem adquirida i ;
- w – vector de discrepância;
- $w(t)$ – vector de velocidade angular, no instante de tempo t ;
- w_{zone} – dimensão da janela, em píxeis;
- x – eixo xx ;
- $x(t)$ – vector de estado, no instante de tempo t ;
- $x(t_i^+)$ – vector de estado actualizado, no instante de tempo t_i ;
- $x(t_{i+1}^-)$ – vector de estado predito, no instante de tempo t_{i+1} ;
- $\hat{x}(t_i)$ – vector de estado estimado no instante de tempo t_i ;
- \tilde{x}_k – vector de estado, referente à iteração k (IEKF);

- \tilde{x}_0 – coordenadas 2D do ponto principal;
- \tilde{x}_0 – coordenadas do ponto principal;
- y – eixo yy ;
- y_w – coordenada segundo o eixo yy , no sistema de coordenadas O_I ;
- z – eixo zz ;
- z_w – coordenada segundo o eixo zz , no sistema de coordenadas O_I ;
- \hat{z}_k – vector das observações, referente à iteração k (IEKF);
- $\hat{z}(t_i)$ – vector das observações preditas, no instante de tempo t_i ;
- B – matriz de transformação de rotação;
- B_j – coordenadas 3D de posição do ponto de controlo j , no sistema de coordenadas O_R ;
- C – matriz de posição 3D, no espaço, (reconstrução) dos b pontos de controlo;
 - ponto no espaço;
- C_A – matriz de estrutura do objecto, no espaço afim;
- C_{A_i} – coordenadas 3D do ponto de controlo i , no espaço afim;
- C_E – matriz de estrutura do objecto, no espaço Euclidiano;
- C_{E_i} – coordenadas 3D do ponto de controlo i , no espaço Euclidiano;
- C_i – coordenadas 3D de um ponto no espaço;
- C_M – matriz de estrutura do objecto, no espaço métrico;
- C_n^2 – coeficiente estrutural do índice de refacção;
- C_i^f – coordenadas 3D de posição, no espaço, do ponto de controlo i , referentes à imagem adquirida f ;
- C'_j – coordenadas 3D de reconstrução do ponto de controlo j ;
- \bar{C} – coordenadas 3D, no espaço, do centroide;
- $\bar{C}_{E_{kq}}$ – distância entre os pontos de controlo k e q , medida no espaço Euclidiano reconstruído;
- \bar{C}_{kq} – distância entre os pontos de controlo k e q , medida no espaço do objecto;
- \bar{C}_{kq} – distância real entre os pontos de controlo k e q , medida no espaço;
- \bar{C}'_{kq} – distância entre os pontos de controlo k e q , medida no espaço reconstruído;
- \tilde{C}_i – coordenadas 3D, no espaço, do ponto i , referenciadas a \bar{C} ;
- \tilde{C}_O – coordenadas 3D de posição da câmara, no sistema de coordenadas do mundo;
- D – matriz diagonal dos valores próprios, obtida da decomposição de valores próprios (SVD);
 - distância do plano II ao centro óptico da câmara;
 - distância entre a câmara e o objecto;
 - distância entre as duas câmaras;
 - divergência do feixe óptico;
- D_L – diâmetro da frente de onda do feixe óptico;
- D_{A_i} – vector no espaço afim, representativo do segmento i ;

- $D_{A(t=t_i)}$ – vector no espaço afim, no instante $t = t_i$;
 D_E – vector no espaço Euclidiano;
 \ddot{D} – submatriz 3×3 , formada pelas primeiras três linhas e colunas da matriz D ;
 E – matriz essencial;
 F – matriz fundamental;
– número de imagens adquiridas;
 F_A – matriz fundamental da câmara afim;
 H – desnível (altura) entre o plano das câmaras e o plano dos alvos;
– matriz de transformação homográfica;
– transformação afim;
 I – intensidade luminosa;
– matriz identidade;
 $I_{u,v,t}$ – derivada parcial do vector de intensidade luminosa em ordem a u , v e t ;
 K – matriz dos parâmetros intrínsecos da câmara de perspectiva central;
 K_i – matriz dos parâmetros intrínsecos da câmara afim i ;
 $K_k(t_{i+1})$ – matriz de ganho do filtro de *Kalman*, obtido na iteração k para o instante de tempo t_{i+1} ;
 \hat{K}_{ortho} – matriz dos parâmetros intrínsecos de uma câmara de projecção ortogonal;
 \hat{K}_{para} – matriz dos parâmetros intrínsecos de uma câmara de projecção de perspectiva fraca;
 \hat{K}_{weak} – matriz dos parâmetros intrínsecos de uma câmara de projecção de perspectiva fraca;
 L – comprimento de um segmento;
– distância do receptor à fonte de radiação;
– distância entre dois LEDs, pertencentes ao mesmo alvo;
– matriz de forma do paralelepípedo;
 L_i – comprimento do segmento i ;
 L_j – coordenadas 3D de posição do ponto de controlo j , no sistema de coordenadas O_B ;
 L_x – comprimento do segmento segundo a componente x ;
 L_y – comprimento do segmento segundo a componente y ;
 $L_j(t_i)$ – posição 3D do ponto de controlo j no sistema de coordenadas O_B , no instante de tempo t_i ;
 M – matriz de projecção afim;
 M_A – matriz de movimento, no espaço afim;
 M_{A_i} – matriz de movimento da câmara i , no espaço afim;
 M_E – matriz de movimento, no espaço Euclidiano;
 M_i – matriz de projecção da câmara afim i ;
 M_M – matriz de movimento, no espaço métrico;
 M_{M_i} – matriz de movimento, no espaço métrico, da câmara i ;
 \tilde{M} – matriz de projecção afim;

- M^∇ – matriz pseudo-inversa da matriz M ;
 M'_i – matriz de projecção da câmara i , em processo de optimização;
 N – número de câmaras;
– número de fontes luminosas;
– número de iterações (IEKF);
– número total de partículas;
 O_B – sistema de coordenadas, móvel, posicionado no centro geométrico do objecto;
 O_C – sistema de coordenadas da câmara C ;
 O_{C_i} – sistema de coordenadas da câmara C_i ;
 O_I – sistema de coordenadas de referência (espaço do objecto);
 O_R – sistema de coordenadas, móvel, posicionado no centro de rotação, move-se solidário com o objecto;
 P – matriz de projecção da câmara;
– potência óptica;
 P_M – matriz de projecção da câmara de perspectiva central;
 P_R – potência recebida;
 P_T – potência transmitida;
 $P(t_i^+)$ – matriz de covariância actualizada, para o instante de tempo t_i ;
 $P(t_{i+1}^-)$ – matriz de covariância predita, para o instante de tempo t_{i+1} ;
 Q – matriz resultante da decomposição QR;
 R – distância entre o sistema de medição baseado em radar e o alvo;
– matriz de rotação da câmara de perspectiva central;
– ritmo de precipitação;
 R_i – matriz de rotação da câmara i ;
 $R(t)$ – matriz de rotação do sistema de coordenadas estabelecido no centro de rotação O_R , relativamente ao sistema de coordenadas de referência O_I , no instante de tempo t ;
 R_ψ – matriz de rotação em torno do eixo longitudinal, ângulo ψ ;
 S – matriz de forma do objecto;
– matriz de rotação do paralelepípedo;
 S_i – matriz de forma do objecto i ;
– matriz de rotação do paralelepípedo i ;
 S_L – secção recta do feixe óptico;
 S_{Rx} – área de captura do receptor óptico;
 T – vector de translação;
 T_X – coordenada de posição segundo o eixo xx ;
 T_Y – coordenada de posição segundo o eixo yy ;
 T_Z – coordenada de posição segundo o eixo zz ;
 \hat{T} – vector de translação da câmara afim;

- \hat{T}_i – vector de translação da câmara afim i ;
- U – matriz ortogonal, obtida da decomposição de valores próprios (SVD);
- \ddot{U} – submatriz formada pelas primeiras três colunas da matriz U ;
- V – distância de visibilidade;
- matriz ortogonal, obtida da decomposição de valores próprios (SVD);
- \ddot{V} – submatriz formada pelas primeiras três colunas da matriz V ;
- W – conteúdo de água líquida;
- matriz das medições ou observações;
- \ddot{W} – matriz das observações, no plano da imagem das N câmaras, referenciada ao respectivo sistema de coordenadas O_C ;
- \tilde{W} – matriz das observações, no plano da imagem das N câmaras, referenciada ao respectivo sistema de coordenadas O_C , afectadas por ruído;
- X – submatriz 3×3 da denominada matriz de projecção canónica;
- X_0 – componente horizontal de posição no espaço do sistema de coordenadas O_I ;
- X_C – componente horizontal de posição no espaço do ponto C ;
- coordenada horizontal de posição da câmara no sistema de coordenadas de referência O_I ;
- X_i – componente horizontal de posição do ponto de controlo i no sistema de coordenadas O_I ;
- X_R – coordenada horizontal de posição do centro de rotação do tabuleiro no sistema de coordenadas de referência O_I ;
- \hat{X}_{ij} – componente horizontal de posição no espaço do ponto de controlo j , relativo à imagem adquirida i ;
- Y_0 – componente vertical de posição no espaço do sistema de coordenadas O_I ;
- Y_C – componente vertical de posição no espaço do ponto C ;
- coordenada vertical de posição da câmara no sistema de coordenadas de referência O_I ;
- Y_i – componente vertical de posição do ponto de controlo i no sistema de coordenadas O_I ;
- Y_R – coordenada vertical de posição do centro de rotação do tabuleiro no sistema de coordenadas de referência O_I ;
- \hat{Y}_{ij} – componente vertical de posição no espaço do ponto de controlo j , relativo à imagem adquirida i ;
- Z_0 – componente longitudinal de posição no espaço do sistema de coordenadas O_I ;
- distância entre a câmara e o sistema de coordenadas de referência O_I ;
- Z_C – componente longitudinal de posição no espaço do ponto C ;
- coordenada longitudinal de posição da câmara no sistema de coordenadas de referência O_I ;
- Z_i – componente longitudinal de posição do ponto de controlo i no sistema de coordenadas O_I ;

- Z_R – coordenada longitudinal de posição do centro de rotação do tabuleiro no sistema de coordenadas de referência O_I ;
- \hat{Z}_{ij} – componente longitudinal de posição no espaço do ponto de controle j , relativo à imagem adquirida i ;

Simbologia Grega

- α – ângulo de rotação de azimute;
– ângulo de rotação do sistema de medição baseado em radar, relativamente ao plano horizontal;
– constante não nula;
– relação de dimensão;
- α_a – coeficiente de atenuação por absorção de aerossol;
- α_m – coeficiente de atenuação por absorção molecular;
- β – constante não nula;
- β_a – coeficiente de atenuação por dispersão de *Mie*;
- β_m – coeficiente de atenuação por dispersão de *Rayleigh*;
- δ – valor de correcção;
- ε – função de erro;
– ângulo de rotação de elevação;
- ε_a – erro de projecção gerado pelo modelo de projecção afim, comparativamente ao modelo de projecção de perspectiva;
- ϕ – ângulo de rotação em torno do eixo horizontal (xx);
- γ – parâmetro de relação de aspecto (*aspect ratio*) de uma câmara de perspectiva;
- γ_a – parâmetro de relação de tamanho (*aspect ratio*) de uma câmara afim;
- κ – ângulo de rotação de rolamento;
– relação de comprimento entre dois segmentos;
– parâmetro (empírico);
- κ_i – relação de comprimento entre dois segmentos;
- λ – factor de escala global;
– comprimento de onda;
- λ_i – valor próprio i ;
- λ_x – factor de escala na direcção horizontal;
- λ_y – factor de escala na direcção vertical;
- $\bar{\lambda}$ – valor médio do factor de escala global;
- μ – cónica absoluta do paralelepípedo;
- $\mu_{M/B}$ – valor médio de brilho nas regiões da marca e do fundo do alvo;
- θ – ângulo de rotação em torno do eixo vertical (yy);
– ângulo formado por dois segmentos no espaço Euclidiano;
– ângulo sólido de divergência do feixe óptico;
- $\theta_{i,j}$ – ângulo formado pelas faces i e j do paralelepípedo;
- θ_x – ângulo de projecção segundo a direcção horizontal, no modelo de projecção de perspectiva fraca;

- θ_y – ângulo de projecção segundo a direcção vertical, no modelo de projecção de perspectiva fraca;
- σ – coeficiente de atenuação;
- σ_γ – variância radial do feixe óptico;
- σ_C – atenuação por efeito de cintilação;
- σ_G – coeficiente de atenuação geométrica;
- σ_M – coeficiente de atenuação de *Mie*;
- $\sigma_{M/B}$ – desvio padrão de brilho das regiões da marca e do fundo do alvo;
- σ_R – coeficiente de atenuação de *Rayleigh*;
- τ – coeficiente de transmissividade da atmosfera;
– duração do sinal emitido;
– intervalo de tempo decorrido entre os instantes t_1 e t_2 – período de amostragem;
- ω – imagem da cónica absoluta;
- υ – vector de resíduos;
- ψ – ângulo de rotação em torno do eixo longitudinal (zz);
- Δc_i – coordenadas 2D do ponto i , referenciadas a um ponto em particular (ex. origem do sistema de coordenadas);
- Δr – resolução do sistema de medição baseado em radar;
- ΔC_i – coordenadas 3D do ponto i , referenciadas a um ponto em particular (ex. origem do sistema de coordenadas);
- Λ – matriz dos parâmetros intrínsecos do paralelepípedo;
- Π – plano no espaço;
- Ω_∞ – cónica absoluta;
- Ω'_∞ – matriz coluna representativa dos seis elementos da cónica absoluta;

Abreviaturas

AOI	– <i>Area Of Interest</i>
C/A	– <i>Coarse Acquisition</i>
CCD	– <i>Charge Coupled Device</i>
CIC	– <i>Centro de Instrumentação Científica</i>
CMOS	– <i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
DAM	– <i>Desvio Absoluto Médio</i>
DGPS	– <i>Differential Global Positioning System</i>
DIAC	– <i>Dual Image of the Absolute Conic</i>
DLT	– <i>Direct Linear Transform</i>
DMA	– <i>Direct Memory Access</i>
DP	– <i>Desvio Padrão</i>
EERC	– <i>Earthquake Engineering Research Centre</i>
EKF	– <i>Extended Kalman Filter</i>
EO	– <i>Exterior Orientation</i>
FASCOD	– <i>Fast Atmospheric Signature CODE</i>
FSO	– <i>Free Space Optics</i>
GPS	– <i>Global Positioning System</i>
HLS	– <i>Hydrostatic Leveling System</i>
IAC	– <i>Image of the Absolute Conic</i>
IBIS	– <i>Image By Interferometric Survey</i>
IEEE	– <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEKF	– <i>Iterated Extended Kalman Filter</i>
iLUT	– <i>Input LookUp Tables</i>
INMG	– <i>Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica</i>
IR	– <i>Infrared</i>
ISIS	– <i>Intelligent Sensing for Innovative Structures</i>
KF	– <i>Kalman Filter</i>

LCAM	– Laboratório Central de Apoio Metrológico
LED	– <i>Light Emitting Diode</i>
LM	– <i>Levenberg-Marquardt</i>
LNEC	– Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MLE	– <i>Maximum Likelihood Estimation</i>
MODTRAN	– <i>MODerate resolution atmospheric TRANsmission</i>
NSE	– Núcleo de Sistemas Electrotécnicos
NSM	– Núcleo de Sistemas Mecânicos
P	– <i>Precise</i>
P25A	– Ponte 25 de Abril, sobre o rio Tejo, Lisboa
PCMCIA	– <i>Personal Computer Memory Card International Association</i>
PWM	– <i>Pulse Width Modulation</i>
ROI	– <i>Region Of Interest</i>
RTK-GPS	– <i>Real Time Kinematic – Global Positioning System</i>
SF-CW	– <i>Stepped-Frequency Continuous Wave</i>
SfM	– <i>Structural from Motion</i>
SHM	– <i>Structural Health Monitoring</i>
SVD	– <i>Single Value Decomposition</i>
UART	– <i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>
WGS-84	– <i>World Geodetic System (criado em 1984 e revisto em 2004)</i>

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do Tema

A concretização de uma obra de Engenharia Civil acarreta, invariavelmente, tal como noutros ramos da Engenharia, riscos associados com a segurança das pessoas e da própria obra. Estes riscos advêm, fundamentalmente, do facto do projecto ser elaborado tendo por base pressupostos que não reflectem devidamente a realidade. A caracterização geológica do local onde se insere a estrutura, a caracterização dos materiais usados e a eficiência das técnicas de construção empregues constituem alguns exemplos em que o grau de incerteza associada não pode ser ignorado. Também a aplicação de novos materiais em projectos inovadores e a sua deterioração ao longo do tempo de utilização da estrutura, assim como uma eventual alteração brusca das condições de utilização (ex. sismo, carga excessiva), podem conduzir a estrutura a um estado anormal de segurança, com os subsequentes e indesejáveis riscos económicos e sociais. Neste contexto, o projecto de uma infra-estrutura com um grau de segurança confortável e ao menor custo constitui um grande desafio.

A observação do comportamento estrutural (*SHM – Structural Health Monitoring*) é uma ferramenta de diagnóstico que tem como principal objectivo o acompanhamento, *in situ*, do comportamento da infra-estrutura de forma a avaliar a sua eficiência, a detectar eventuais danos ou deteriorações e a quantificar o seu estado de segurança, de modo a atestar a *segurança estrutural* da obra. Especificamente, a SHM pode ser usada na identificação e na prevenção de ocorrência de falhas nos vários componentes que compõem a infra-estrutura e, em resultado disso, evitar eventuais danos que possam colocar em risco a sua segurança. Em resultado desta actividade gera-se nos utilizadores confiança e incentivo a usufruírem das funcionalidades da infra-estrutura sem receios.

O conceito associado à SHM traduz-se numa valorização da prática corrente, não apenas do uso de tecnologia de ponta nas áreas da instrumentação, da comunicação e da modelação numérica, mas também através de uma integração efectiva destas tecnologias num sistema inteligente (ISIS Canada, 2001).

A actividade de SHM nas grandes obras é imprescindível para detectar eventuais anomalias que possam vir a ocorrer durante a fase de construção e ao longo do tempo de utilização da

infra-estrutura. O conhecimento atempado de um comportamento anómalo da estrutura permitirá desencadear um conjunto de medidas correctivas de forma a eliminar a fonte de anomalia ou, em última instância, a minimizar os seus efeitos.

Atendendo à importância que as obras desta natureza representam para a sociedade civil, é também importante minimizar as interrupções de serviço necessárias para a execução de tarefas de manutenção preventiva ou correctiva. A avaliação da integridade da estrutura sem provocar a interrupção de serviço constitui uma mais-valia da actividade de observação realizada de modo sistemático. A informação recolhida desta actividade pode ser incorporada nos planos de manutenção e de gestão da obra permitindo planear, de forma atempada, a realização das tarefas de manutenção em períodos de menor solicitação.

Para além dos aspectos relacionados com a segurança, a informação recolhida no processo de observação de uma obra pode, igualmente, ser usada para calibrar e verificar a fiabilidade do modelo matemático que modela o seu comportamento estrutural. Deste modo, não só o modelo matemático é aperfeiçoado, como também são adquiridos novos conhecimentos incorporáveis na criação de modelos matemáticos, mais ajustados à realidade, e utilizáveis na melhoria das linhas orientadoras de novos projectos.

A actividade de observação pode dividir-se: i) num conjunto de acções de curto prazo que visam aferir a conformidade da obra com as hipóteses de projecto e a qualidade da construção, realizadas, normalmente, antes da entrada em serviço da obra (ex., ensaios de carga de pontes, monitorização do primeiro enchimento de barragens, etc); e ii) num conjunto de acções de médio-longo prazo que visam assegurar o acompanhamento da evolução da obra ao longo do tempo de modo a detectar, atempadamente, o aparecimento de anomalias estruturais e, como mencionado, garantir o seu estado de segurança. É uma actividade intrinsecamente multidisciplinar que envolve a colaboração de várias áreas do conhecimento, uma das quais é, naturalmente, a que se refere à instrumentação.

O tipo e o número de grandezas que é necessário medir depende, obviamente, do tipo de estrutura que se pretende observar e dos objectivos que se pretendem alcançar com a observação. Neste sentido, a observação de uma obra de grande dimensão requer a medição de um vasto conjunto de grandezas: umas que caracterizam as acções de factores externos sobre a estrutura (temperatura, direcção e velocidade do vento, circulação de cargas, etc.) e outras que reflectem a resposta da estrutura a essas acções (estados de tensão nos elementos estruturais, deslocamentos, rotações, etc.). A definição do número e do tipo de grandezas a medir, e sua localização, encontra-se normalmente descrita no plano de observação da obra, elaborado na fase final do projecto,

e nele constam, para cada grandeza, o campo de medição, a exactidão pretendida e a frequência de amostragem, deduzidas a partir de modelos matemáticos de suporte ao projecto.

No caso particular de uma ponte, o plano de observação contempla a medição de um extenso conjunto de grandezas onde se incluem, obviamente, os deslocamentos verticais e transversais do tabuleiro da ponte, nomeadamente no meio vão onde estes, habitualmente, são mais significativos, podendo alcançar uma amplitude superior a um metro. No entanto, a medição destas grandezas em pontes suspensas coloca dificuldades específicas de concretização. A instrumentação corrente assim como as técnicas de medição normalmente empregues, regra geral, não são adequadas a este tipo de aplicação. Isto porque, por um lado, os deslocamentos podem ter grande amplitude e, por outro lado, porque o acesso a algumas partes da estrutura é dificultado por constrangimentos diversos, normalmente relacionados com as dimensões da própria infraestrutura e com o relevo da zona envolvente da obra. Além disso, há a acrescentar o facto dos transdutores de deslocamento tradicionais necessitarem de um ponto fixo que, regra geral, não existe nas proximidades da zona da estrutura que se pretende observar.

Uma solução, a que é usual recorrer, consiste em medir a aceleração ou a velocidade e estimar o deslocamento por meio de integração das medições no domínio do tempo. Embora, em princípio, esta técnica permita recuperar a sequência histórica do movimento de deslocamento do tabuleiro, a verdade é que a mesma apresenta vários inconvenientes, resultantes, principalmente, da operação de integração (Wahbeh, 2003).

No caso específico das pontes de grande dimensão, e tendo em conta o tipo de restrições que é usual encontrar neste tipo de estruturas, uma solução alternativa, e com melhor desempenho, passa por usar um sistema de medição sem contacto, com resposta dinâmica, exactidão e gama de medição ajustadas ao fenómeno físico que se pretende observar (deslocamento do tabuleiro).

A observação de grandes obras, designadamente de pontes, é uma actividade que, desde há décadas, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tem vindo a desenvolver. Recentemente, o LNEC foi incumbido de desenvolver e implementar um novo sistema SHM da Ponte 25 de Abril (P25A), em Lisboa, o qual se pretende inclua a medição dos deslocamentos verticais e transversais do tabuleiro. Para além disso, pretende-se também que o sistema de medição dos deslocamentos do tabuleiro seja capaz de responder às novas exigências dinâmicas da P25A, decorrentes da introdução da travessia ferroviária, e às necessidades que decorrem dos modernos métodos de cálculo¹.

¹ O aumento da pressão axial dos veículos juntamente com o aumento da velocidade destes e a tendência de redução da quantidade de material utilizado na construção das estruturas, tornando-as mais leves e flexíveis, faz com que

Refira-se que o primeiro sistema de observação da P25A foi desenvolvido pelo LNEC, por volta do ano de 1969, tendo estado em funcionamento durante cerca de uma década (Marécos, 1969). À data, o sistema de observação já contemplava a medição dos deslocamentos verticais e transversais do tabuleiro, com resultados considerados satisfatórios face às necessidades da época. O sistema de medição dos deslocamentos foi construído com recurso a dispositivos ópticos servo-controlados e, tanto quanto se sabe, foi o primeiro sistema de medição do género. Devido a circunstâncias diversas, este sistema de medição não se encontra operacional e a sua reprodução na actualidade não é economicamente viável, tal a complexidade e o rigor de execução das peças mecânicas. Para além disso, sendo composto por partes móveis, a capacidade de resposta dinâmica deste sistema de medição fica aquém das actuais necessidades e requer acções de manutenção frequentes (ex. desgaste do material, lubrificação de rolamentos).

Ao longo dos últimos anos, com maior incidência na última década, foram desenvolvidos sistemas de medição baseados em dispositivos ópticos mas, ao contrário do primeiro sistema atrás referido, estes novos sistemas de medição deixaram de ter partes móveis. Em vez disso, passaram a incorporar tecnologia de vídeo digital, que entretanto emergiu e se tornou economicamente acessível, juntamente com técnicas de processamento digital de imagem. O facto do sistema de medição estar fixo (ausência de partes móveis) contribuiu, por um lado, para o aumento da frequência de aquisição e, por outro lado, para a redução, drástica, das acções de manutenção.

Para além deste tipo de sistemas de medição, de base óptica, surgiram outros orientados para o mesmo objectivo, mas com princípio de funcionamento distinto. Entre estes, nomeiam-se os sistemas de medição baseados em: i) sistema de posicionamento global (*GPS – Global Positioning System*); ii) tecnologia de radar; e iii) laser. No entanto, decorrente do princípio de funcionamento, cada um destes sistemas apresenta limitações próprias que comprometem a sua aplicabilidade em SHM, quando usados na observação de pontes suspensas.

Os sistemas baseados em GPS têm sido utilizados, desde há vários anos, na observação de grandes obras (Behr, 1998; Çelebi, 1999; 2000; 2002; Wong, 2001; Nakamura, 2000; Manetti, 2002; 2003; Ogaja, 2002; Meng, 2004; Roberts, 2006). Todavia, no caso específico da observação de pontes suspensas, a estrutura que se desenvolve acima do tabuleiro constitui uma obstrução ao campo de visão das antenas de GPS, originando reflexões do sinal emitido pelos satélites (efeito multi-percurso) e, conseqüentemente, erros de medição intoleráveis (Wieser, 2002; Tsakiri, 2003; Wahbeh, 2003).

as infra-estruturas fiquem mais susceptíveis aos efeitos de acção dinâmica. Por este motivo, é importante que o sistema de medição disponha de capacidade de resposta adequada ao regime dinâmico da estrutura em observação.

No caso dos sistemas de medição baseados na tecnologia de radar, as suas limitações advêm, principalmente, do facto destes imporem restrições quanto à distância mínima entre as fontes de reflexão do sinal de radar (Bernardini, 2007-a; 2007-b; 2007-c; 2007-d; Gentile, 2008). Na generalidade das pontes suspensas, o tabuleiro é formado por travessas e longarinas dispostas sob a forma de grelha. Nestes casos, os pontos de descontinuidade característicos da estrutura (potenciais fontes de reflexão do sinal de radar), formados pelas zonas de união e de cruzamento desses elementos estruturais², não satisfazem o requisito de distância mínima.

Relativamente aos sistemas de medição baseados em laser, a principal limitação reside no seu campo de medição, o qual fica muito aquém dos valores característicos de amplitude de deslocamento deste tipo de estruturas (Habel, 2002).

Os sistemas de medição baseados em visão constituem uma solução alternativa aos sistemas descritos anteriormente, não apresentando nenhuma das limitações descritas. Todavia, como em qualquer outro sistema de medição, independentemente do seu princípio de funcionamento, este também possui limitações que condicionam a sua operacionalidade. Na realidade, a principal desvantagem deste tipo de sistema de medição reside na necessidade de garantir uma linha de vista entre a câmara e a zona em observação. Apesar desta limitação, estes reúnem um conjunto de características que se coadunam com as necessidades de SHM na monitorização de grandes estruturas. Especificamente, estes possibilitam a realização de medições a longa distância, com frequência de aquisição, exactidão e gama de medição, adequadas à actividade de SHM.

O surgimento da actividade de SHM despoletou o desenvolvimento de um conjunto de sistemas de medição e de soluções baseadas em visão, com aplicação nas mais diversas áreas da Engenharia Civil, nomeadamente na observação dos deslocamentos do tabuleiro de pontes e de viadutos (Stephen 1991; 1993; Macdonald, 1997; 1998; Olaszek, 1999; Albert, 2002; Wahbeh, 2003; Jiang, 2005; 2006; 2008; Lee, 2006-a; 2006-b; 2006-c; Maas, 2006; Morlier, 2007; Faku-da, 2009), na detecção e identificação de danos em estruturas (Patsias, S., 2002), na medição da componente de vibração dos cabos de sustentação de pontes suspensas (Caetano, 2007; Silva, 2007-a; 2007-b; Ji, 2008), na observação da deformação de barragens (Maas, 1998; 2006) e na observação de encostas (Ono, 2002; 2004).

Como referido, são conhecidos alguns sistemas de medição baseados em visão³, que foram desenvolvidos especificamente para a medição dos deslocamentos verticais e transversais de tabuleiro de pontes suspensas. Todavia, estes apresentam limitações que comprometem a sua

² O material utilizado no fabrico dos elementos que compõem o tabuleiro é, maioritariamente, o aço, caracterizado por apresentar um elevado índice de reflexão.

³ Na generalidade dos casos, estes sistemas de medição destinam-se à observação de curta duração, em oposição à observação em modo contínuo, como requerido por SHM.

aplicabilidade e operacionalidade no âmbito da actividade de SHM, as quais passaremos a descrever. Mas antes, e para se ter uma melhor percepção das suas implicações no desempenho do sistema, importa ter presente que: i) a informação da posição do tabuleiro é transferida para o sensor da câmara através de um feixe de radiação, que se propaga através da atmosfera, desde o ponto de emissão (zona em observação) até ao sensor; e ii) a actividade de SHM requer que o sistema de medição opere de forma contínua e com eficiência, independentemente da hora do dia e da época do ano, disponibilizando medições em tempo real e com elevado grau de exactidão.

Neste contexto, depois de estudadas e avaliadas as características dos sistemas de visão, que são presentemente conhecidos, foram identificados alguns aspectos que julgámos poderem ser melhorados e, com isso, responder às necessidades de SHM, apontadas anteriormente. De entre estes, destacam-se: i) a fonte de radiação; ii) a metodologia de calibração do sistema de visão; e iii) a modulação da trajectória de movimento do tabuleiro.

Relativamente à fonte de radiação, a que passaremos a denominar de alvo, a necessidade do sistema de medição operar de forma contínua obrigava que esta dispusesse de capacidade de geração de radiação própria, para o sistema de medição não ficar dependente das condições de luminosidade ambiente. Paralelamente, é reconhecido que um feixe óptico que se propaga através da atmosfera é sujeito a fenómenos físicos de interferência que alteram as suas propriedades (Duffie, 1991; Ribeiro, 2000; Kim, 2001; Pierce, 2001; Bloom, 2001; 2003; Korevaar, 2002; 2003; Ghuman, 2006; Kazaura, 2006;). De entre estes, destacam-se os efeitos de atenuação e de desvio da trajectória do sinal óptico, sendo que o grau de interferência varia com o comprimento de onda do feixe de radiação.

Neste contexto, interessava saber de que forma o meio de propagação interfere com o feixe óptico e identificar os fenómenos físicos envolvidos, tendo em vista a selecção do comprimento de onda da fonte de radiação que é menos susceptível a estes efeitos de interferência. Todavia, a selecção deveria de ter em conta a compatibilidade com as características do sensor da câmara, em termos da gama do espectro de sensibilidade (Santos, 2006; 2007). Com este estudo pretendeu-se adquirir um conjunto de saberes que permitirão, na prática, maximizar a taxa de operacionalidade do sistema de medição.

Importa ainda referir que, pelo facto do alvo dispor de capacidade para gerar radiação própria, abriu-se a possibilidade de, no futuro, se implementarem funcionalidades adicionais, através do controlo da intensidade de radiação, como por exemplo o reconhecimento e a identificação de alvos e a modulação da radiação no domínio do tempo e em amplitude, em função das condições de propagação da atmosfera.

No que diz respeito à calibração do sistema de visão, a generalidade das soluções desenvolvidas especificamente para a observação de estruturas na área da Engenharia Civil (Stephen, 1991; 1993; Macdonald, 1997; 1998; Olaszek, 1999; Wahbeh, 2003; Lee, 2006-a; 2006-b; 2006-c; Fakuda, 2009) implementa metodologias de calibração⁴ assentes num modelo do sistema de visão demasiado simplificado, face ao elevado grau de exactidão que se pretende alcançar. A adopção de tal modelo constitui uma fonte indutora de incerteza do sistema e compromete, inevitavelmente, o grau de exactidão das medições. Na realidade, considerando que a observação de grandes estruturas se realiza, geralmente, a grande distância e fazendo uso de ópticas com grande distância focal, poder-se-ia pensar em adoptar o modelo de projecção ortogonal para modelar o sistema de visão. Como se verá, o modelo de projecção ortogonal, é um modelo aproximado do modelo de projecção da perspectiva central e bastante mais simples (menor número de graus de liberdade) do que este último (Quan, 1996; Hartley, 2003; Shapiro, 2005). No entanto, a obtenção de medições com elevado grau de exactidão requer a implementação de uma metodologia de calibração que leve em linha de conta as especificidades típicas de um sistema sem contacto, baseado em dispositivos ópticos, às quais os métodos de calibração implementados pela generalidade destes sistemas de visão não conseguem dar resposta de forma adequada.

Na área da visão por computador são inúmeras as referências ao tema da calibração do sistema de visão (Tsai, 1987; Tomasi, 1992; Hartley, 1992; 2003; Stein, 1993; Sturm, 1995; 2001; 2005; Quan, 1996; Heikkilä, 1997; Poelman, 1997; Kahl, 1998; Wilczkowiak, 2001; 2003; Malis 2001; 2004; Wu, 2005; Zhang, 1999; 2000; 2001; 2002; Seedahmed, 2002; Svoboda, 2005). Todavia, o alvo preferencial de estudo têm sido as aplicações de curta ou muito curta distância entre o objecto a observar e a câmara, não tendo havido grande dedicação aplicada a cenários de observação a longa distância, mormente para o caso específico de aplicações de SHM. São igualmente conhecidos na área da fotogrametria trabalhos relacionados com o tema da calibração do sistema óptico (Slama, 1980; Fraser, 1995-a; 1995-b; 1998; 2005-b; Ono, 2004). Contudo, pese embora a grande proximidade da fotogrametria com a actividade de SHM, também neste caso não houve uma transferência do conhecimento e subsequente adaptação às especificidades da actividade de SHM.

Nos sistemas de medição baseados em informação visual, quando aplicados na observação a grande distância de grandes estruturas, é frequente o recurso a câmaras equipadas com lentes telescópicas de modo a manter uma elevada resolução óptica. Por um lado, a observação a gran-

⁴ Na generalidade dos casos, a calibração consiste em determinar um factor (ou dois) de conversão, obtido da relação entre uma distância medida no espaço do tabuleiro, entre dois pontos, e a correspondente distância medida na imagem.

de distância com ópticas de grande distância focal coloca problemas que habitualmente não se encontram no caso da observação realizada a curta distância, sendo, uma das mais importantes, a dificuldade de percepção de movimento na direcção longitudinal (dificuldade em distinguir movimentos de rotação de pequena amplitude do movimento de translação na direcção longitudinal). Por outro lado, nestas condições, o modelo do sistema óptico pode ser aproximado pelo modelo de projecção afim. Este modelo de projecção, como se verá, reúne um conjunto de propriedades que se revelaram muito úteis, tanto no desenvolvimento da metodologia de calibração, como na modelação da trajectória de movimento do tabuleiro. A utilização dessas propriedades permitiram o desenvolvimento de metodologias de calibração dos sistemas de visão e de estimação do movimento do tabuleiro, as quais mostraram serem exequíveis *in situ*, eficientes e robustas a efeitos de perturbação.

Do ponto de vista da actividade de SHM, o principal objectivo da implementação do sistema de visão é a estimação do movimento do tabuleiro, nomeadamente de translação. O sucesso deste objectivo depende da eficácia, não só do método de calibração do sistema de visão, como também do modelo adoptado para modelar a trajectória de movimento do tabuleiro.

À semelhança do verificado com o método de calibração, na generalidade dos sistemas de visão desenvolvidos para a observação dos deslocamentos de tabuleiros de pontes, a estimação do movimento do tabuleiro restringe-se, apenas, às componentes de deslocamento segundo as direcções vertical e transversal.

Como mencionado, nas pontes com tabuleiro suspenso, de uma maneira em geral, as maiores amplitudes do movimento de translação do tabuleiro ocorrem nas direcções vertical e transversal. Habitualmente, a amplitude do deslocamento na direcção longitudinal é pouco significativa, comparativamente à verificada nas outras duas direcções. Neste contexto, ainda que se pudesse dispensar a monitorização da componente de movimento na direcção longitudinal, na generalidade dos casos, a sua medição, como se verá, é imprescindível para alcançar o grau de exactidão pretendido para as duas restantes componentes de translação. Esta constatação resulta da pose assumida pelos sistemas de visão, mais concretamente quando a direcção do plano da imagem (sensor da câmara) não é ortogonal à direcção longitudinal do tabuleiro. Na solução concretizada por Wahbeh (2003), a câmara de vídeo foi instalada na torre de suporte do tabuleiro, ao nível do tabuleiro e alinhada na direcção deste. Posteriormente, constataram a existência de uma componente de vibração, atribuída à vibração da torre onde se encontrava instalada a câmara, o que mostra que a zona escolhida para a fixação da câmara não era a adequada.

A solução que foi adoptada por nós para a modelação da trajectória de movimento do tabuleiro permitiu estimar, não só o deslocamento 3D do tabuleiro, como também a rotação deste

(entenda-se secção em observação)⁵. O algoritmo, do tipo recursivo, estima o movimento do tabuleiro ao longo do tempo, com base numa sequência de imagens (observações), adquiridas pelas várias câmaras, e nos respectivos modelos de projecção, obtidos da realização da calibração dos sistemas de visão. Isto é, o movimento do tabuleiro é estimado, directamente, a partir das coordenadas de projecção nas várias imagens do conjunto de alvos.

Na formulação do estimador de movimento foi tido em conta o facto da observação SHM dever ser realizada de forma contínua no tempo (Young, 1988; 1990; Broida, 1990; 1991; Yi, 1995). Neste contexto, a adopção dum estimador recursivo, mais concretamente do filtro de Kalman estendido, versão iterativa (Bar-Shalom, 1993; Maybeck, 1994), mostrou ser a opção adequada ao fim em vista, uma vez que as suas propriedades se enquadram nas especificidades de SHM. Atendendo a que as observações (imagens) são processadas pelo estimador recursivo à medida que estas ficam disponíveis e descartadas logo de seguida, este pode manter-se a funcionar ininterruptamente, sem correr o risco de esgotar os recursos disponíveis (ex. memória)

Outra particularidade do filtro de Kalman é que este implementa, em simultâneo, as funções de filtragem (da trajectória do movimento do tabuleiro) e de preditor (previsão das coordenadas de projecção do conjunto de alvos na imagem de cada uma das câmaras). A segunda função é particularmente interessante, uma vez que permite antever as coordenadas de posição do(s) alvo(s) na imagem de cada uma das câmaras para um dado instante futuro. Assim, usando esta informação e as funções de segmentação da imagem, que se encontram disponíveis na generalidade das câmaras digitais modernas, é possível importar apenas as regiões de interesse da imagem (secção delimitadora da marca do alvo projectada na imagem). Se desejado, com a diminuição da quantidade de informação a transferir da câmara para o computador, é possível aumentar a frequência de amostragem e libertar recursos para outros fins (ex. memória).

Apesar da diversidade de soluções disponíveis, estas apresentam uma série de limitações, identificadas anteriormente, as quais comprometem a sua aplicabilidade e operacionalidade na medição dos deslocamentos do tabuleiro de pontes suspensas ou atirantadas, e que a presente tese contribui, como se verá, para solucionar. Neste contexto, e dada a importância de que se reveste a medição dos deslocamentos (e dos ângulos de rotação) do tabuleiro na observação deste tipo de estruturas, considerou-se oportuno realizar um estudo com o objectivo de encontrar soluções que permitissem ultrapassar as limitações características dos sistemas de medição exis-

⁵ Na formulação do modelo optou-se por uma abordagem mais alargada considerando a possibilidade do centro de rotação poder estar posicionado algures que não necessariamente na zona do tabuleiro em observação (ex. interior da viga de rigidez).

tentes e, desta forma, possibilitar a realização da observação de estruturas de grande dimensão e a grande distância, em modo contínuo e com capacidade de resposta dinâmica, gama de medição, resolução e grau de exactidão das medições, compatíveis com as actuais exigências da actividade de SHM.

Pretendeu-se com este estudo estabelecer um conjunto de metodologias que contribuam para o posterior desenvolvimento de um sistema de medição de deslocamentos, sem contacto directo e com aplicabilidade, fundamentalmente, na área das grandes obras, nomeadamente em pontes de grande vão onde estas grandezas podem atingir valores da ordem de vários metros. A presente dissertação debruça-se sobre os fundamentos e os resultados do estudo realizado.

Dada a natureza do problema, e pelas razões apontadas anteriormente, foi decidido estudar uma solução baseada em tecnologia de vídeo juntamente com técnicas de processamento digital de imagem, capaz de estimar, em tempo real, a trajectória de movimento, em translação e em rotação (seis graus de liberdade) de uma secção da estrutura em observação. O princípio de funcionamento da solução estudada baseia-se na observação (seguimento) de um ou mais alvos por dois ou mais subsistemas de visão, cada um composto por uma lente telescópica e por uma câmara de vídeo, de elevadas resolução e frequência de aquisição (Figura 1.1). Os alvos são fixos à estrutura do tabuleiro, nas zonas em observação, normalmente no meio vão e nos quartos de vão do tabuleiro, e os subsistemas de visão são fixos em pontos considerados imóveis relativamente à estrutura do tabuleiro (ex. base dos pilares, margem do rio, etc.).

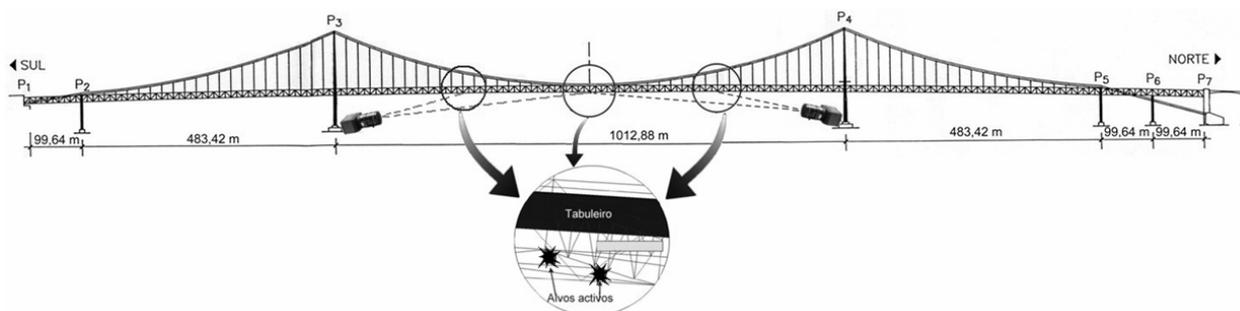


Figura 1.1 – Princípio de funcionamento do sistema de medição de deslocamentos do tabuleiro de pontes suspensas ou atirantadas (vista em corte da Ponte 25 de Abril, sobre o rio Tejo, em Lisboa).

1.2 Objectivos

O tema que constituiu a principal motivação do presente estudo surgiu, como se referiu, da necessidade de encontrar uma solução capaz de medir, com elevado grau de exactidão, os deslocamentos verticais e transversais do tabuleiro de pontes com dimensões e características estruturais estáticas e dinâmicas similares às da P25A.

Deste modo, pretendia-se com este estudo, como também se referiu, estabelecer um conjunto de metodologias tendo em vista contribuir para o posterior desenvolvimento de um sistema de medição com capacidade para seguir a evolução dinâmica do tabuleiro de pontes suspensas ou atirantadas. Para isso, tomando como referência as propriedades físicas conhecidas da P25A, este sistema deveria ser capaz de medir os deslocamentos verticais e transversais, pelo menos, com amplitude da ordem de alguns metros, exactidão superior a 10 mm, resolução superior a 1 mm e assegurar uma frequência de aquisição superior a 20 Hz.

Do conjunto das actividades que foram alvo de estudo e que contribuíram para a concretização desse objectivo, destacam-se, pela sua importância para o domínio científico em estudo, as seguintes:

i) O estabelecimento de uma metodologia para a calibração de sistemas de visão, equipados com lentes telescópicas e aplicados em cenários de longa distância, tendo em vista a satisfação dos requisitos apresentados anteriormente. Desde o início ficou claro que o método a desenvolver deveria ser simples, fiável, resistente a perturbações externas e plenamente executável *in situ*, utilizando um número reduzido de câmaras e de alvos e requerendo o mínimo de informação para a sua concretização. Pretendia-se ainda que a calibração do sistema de visão pudesse ser realizada em qualquer momento e sem quaisquer restrições, de preferência de forma autónoma.

ii) O desenvolvimento de uma metodologia para a estimação da trajectória de movimento do tabuleiro, nomeadamente do deslocamento e da rotação deste. Tratando-se de uma actividade que dá continuidade ao objectivo descrito anteriormente, era indispensável que este pudesse ser concretizável nas mesmas condições e sem necessitar de requisitos adicionais. Para além disso, a estimação do deslocamento devia satisfazer o grau de exactidão pretendido em toda a gama de medição e na presença de condições adversas de perturbação. Adicionalmente, e tendo em conta as especificidades de SHM em que se insere esta actividade, o estimador de movimento deveria disponibilizar medições em tempo real (à frequência de aquisição anunciada) e por tempo indeterminado.

Do ponto de vista da implementação do sistema de medição, que se espera vir a concretizar no futuro, foi efectuado um estudo de pesquisa com vista à selecção do comprimento de onda da fonte de radiação que é menos susceptível aos fenómenos de interferência quando o feixe óptico se propaga através da atmosfera. Importa realçar que, do ponto de vista prático, o estudo deste tema é fundamental, uma vez que a fiabilidade do sistema de medição depende, em primeiro lugar, do grau de perturbação a que o feixe óptico é exposto. Neste sentido, pretendeu-se identi-

ficar e estudar os fenómenos físicos envolvidos na propagação do feixe óptico e a sua relação de dependência com o comprimento de onda da radiação.

O comprimento de onda seleccionado – infravermelho próximo (*near infrared*) – permitiu a incorporação de um filtro óptico, do tipo passa-alto, para reduzir a radiação ambiente que chega ao sensor da câmara. Com esta solução, a intensidade de radiação que chega ao sensor da câmara é, praticamente, independente das condições de luminosidade ambiente⁶. Adicionalmente, se desejado, a intensidade de radiação emitida pelo alvo pode ser controlada de acordo com as necessidades, nomeadamente em função das condições de atenuação do meio de propagação (ex. presença de nevoeiro).

1.3 Organização da Dissertação

A organização da dissertação reflecte, na generalidade, a ordem sequencial segundo a qual os temas foram abordados, sendo composta por sete capítulos e quatro anexos, cuja descrição se apresenta a seguir, de forma breve.

No presente capítulo foram apresentados os aspectos que motivaram a realização do estudo e a sua importância no contexto da Engenharia Civil, mais concretamente na actividade de observação de pontes com tabuleiro suspenso ou atirantado. Foram ainda apresentados os objectivos que se pretendem alcançar com este estudo e, por último, a organização da dissertação, segundo os diversos temas tratados e a forma como eles se relacionam entre si.

O Capítulo 2 tem como tema introdutório a actividade de observação do comportamento estrutural de obras (SHM), nomeadamente em pontes com grande vão entre pilares. Neste contexto são apresentados alguns estudos conhecidos que, de alguma forma, visam a medição dos deslocamentos verticais e transversais do tabuleiro de pontes suspensas. Para cada um destes estudos é efectuada uma análise crítica das soluções adoptadas na sua concretização.

O Capítulo 3 é dedicado ao tema da calibração de sistemas de visão, crucial face ao objectivo de exactidão que se pretende atingir. Neste capítulo são abordados vários algoritmos e metodologias de calibração difundidos pela comunidade científica, com o intuito de avaliar a sua aplicabilidade ao caso presente.

O Capítulo 4 (juntamente com o Capítulo 5) constitui, em grande medida, o cerne do estudo realizado. Neste capítulo são apresentados os métodos de cálculo aplicados à calibração de sistemas de visão equipados com lentes telescópicas, tendo em conta as particularidades ineren-

⁶ Parte da radiação ambiente que chega ao sensor da câmara provém, por um lado das componentes de radiação ambiente com comprimento de onda na zona de interesse do espectro e, por outro lado, da radiação emitida pela estrutura do tabuleiro, sob a forma de calor (comprimento de onda de infravermelho), devido ao aumento da temperatura ambiente.

tes ao tipo de aplicação em vista, como por exemplo o facto do tabuleiro da ponte se encontrar permanentemente em movimento.

No Capítulo 5 apresenta-se um modelo cinemático do movimento do tabuleiro juntamente com a formulação de um filtro recursivo, mais especificamente a versão iterativa do filtro de *Kalman* estendido (*IEKF – Iterated Extended Kalman Filter*), que estiveram na génese do estimador da trajectória de movimento do tabuleiro, a partir de uma sequência de imagens adquiridas ao longo do tempo pelas câmaras.

O Capítulo 6 é dedicado à apresentação dos resultados, obtidos por meio de simulação numérica e por simulação física (a que poderemos chamar via experimental). No estudo realizado por meio de simulação numérica foram estudadas diversas configurações para as câmaras, em número e em disposição, e apresentados os respectivos resultados obtidos, quer dos parâmetros característicos do subsistema de visão, quer os relativos à medição do movimento de translação e de rotação do objecto em observação (tabuleiro da ponte). São também descritos dois ensaios realizados por via experimental, em modelo reduzido e com apenas duas câmaras, e apresentados os respectivos resultados obtidos.

No Capítulo 7 apresenta-se um resumo do estudo realizado, as conclusões e, por último, traçam-se linhas para desenvolvimentos futuros.

Por se considerar útil referir alguns aspectos intimamente relacionados com o tema da tese, decidiu-se pela inclusão de quatro anexos.

Assim, no Anexo I são descritos os fenómenos físicos que intervêm na propagação de um feixe de radiação luminosa através da atmosfera terrestre. A análise efectuada permitiu seleccionar o comprimento de onda mais adequado para a fonte de radiação (alvo) e conduziu à adopção de técnicas de modulação da intensidade do feixe emitido com vista a reduzir os efeitos perturbadores que resultam de fenómenos físicos como a chuva, a neblina ou o nevoeiro.

No Anexo II é apresentada a caracterização da zona envolvente da P25A tendo em vista a estimação do tempo de não operacionalidade do sistema de medição devido à presença de nevoeiro. Apresenta-se uma estimativa do número médio de dias por ano de ocorrência de nevoeiro e indicados os períodos do dia e do ano em que a presença deste fenómeno é mais frequente.

No Anexo III é introduzido, de forma específica, o tema relacionado com o desenvolvimento do alvo. Nele são apresentadas as diversas soluções conhecidas e, para cada uma, é feita uma análise crítica. Termina com a apresentação da solução adoptada, as suas principais características e os resultados obtidos da realização de um ensaio experimental na P25A.

Por último, o Anexo IV é dedicado à descrição do equipamento que compõe o protótipo que serviu de base à realização do estudo (câmara de vídeo, óptica, filtro óptico e placa de aquisição de imagens – *frame grabber*). Nele são abordados, entre outros, os aspectos que condicionaram a selecção dos diversos componentes e que advêm, fundamentalmente, dos objectivos que se pretendiam atingir. A compatibilidade entre componentes também é abordada.

CAPÍTULO 2

MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DO TABULEIRO DE PONTES SUSPENSAS OU ATIRANTADAS

2.1 Observação do Comportamento Estrutural

A actividade de observação de estruturas é conhecida na literatura da especialidade pela designação *Structural Health Monitoring* (SHM), cuja tradução para português poderá tomar a forma “observação (ou monitorização) do comportamento estrutural”. A sua importância no contexto da Engenharia Civil fica claramente expressa na seguinte citação¹:

“A segurança estrutural (...) das grandes obras, como pontes, barragens, túneis, infra-estruturas de transporte, pode ser definida como a sua capacidade para satisfazer os requisitos de comportamento estrutural necessários para evitar a ocorrência de incidentes (anomalias susceptíveis de afectar, a curto ou longo prazo, a funcionalidade da obra) ou acidentes (ocorrências excepcionais cuja evolução pode conduzir a uma rotura estrutural).

O controlo de segurança corresponde ao conjunto de medidas a tomar nas várias fases da vida de uma obra de forma a que exista um conhecimento adequado e continuado do seu estado e seja possível uma detecção oportuna de eventuais anomalias que permita uma intervenção eficaz sempre que se revele necessária. O controlo da segurança desenvolve-se em todas as fases da vida das obras desde o projecto à demolição, passando naturalmente pela fase de exploração”.

A emergência da actividade de SHM deve-se, principalmente, ao número crescente de projectos inovadores com incorporação de novos materiais, os quais necessitam de ser vigiados ao longo do tempo de utilização da obra (ISIS Canada, 2001) para garantir que o seu comportamento se mantém estável e satisfaz os critérios de segurança.

O aumento do poder de cálculo proporcionado pelos computadores modernos tem contribuído para o desenvolvimento e refinamento de novos modelos numéricos, os quais necessitam de ser calibrados para poderem ser considerados fiáveis. Durante a fase de projecto, os dados para a calibração do modelo numérico são obtidos do conhecimento científico acumulado ao

¹ Investigador Eng. Carlos Pina, em sessão pública subordinada ao tema “A segurança estrutural de grandes obras e as novas tecnologias”, que decorreu no Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

longo dos anos de actividade sendo, posteriormente, refinados com base na informação recolhida da observação da estrutura que, regra geral, começa logo na fase de construção e se prolonga pelo tempo de exploração. A informação resultante desta observação é incorporada nos planos de manutenção e de gestão da obra e na melhoria das linhas orientadoras do projecto de obras novas similares.

A importância da actividade de SHM deriva do reconhecimento das limitações das inspecções visuais convencionais e das avaliações do comportamento estrutural suportadas por códigos de prática convencional. No caso de obras construídas há mais tempo e que se encontram em zonas de risco sísmico é vulgarmente admitido que os meios convencionais não são suficientes para avaliar a segurança estrutural. Para além disso, por vezes, algumas obras são sujeitas a condições de utilização, ainda que temporariamente, para as quais não foram projectadas (ex. o galgamento de uma barragem de aterro, alterações das condições de consolidação dos terrenos em torno das fundações, aumento da carga de circulação, ocorrência de sismos) sendo necessário, nestes casos, reforçar os meios de observação.

Apesar do conceito associado à actividade de SHM ser relativamente recente na área da Engenharia Civil², a verdade é que há mais de um século que se realizam ensaios de pontes fazendo uso dos mais variados instrumentos de medição (ISIS Canada, 2001). De facto, os objectivos preconizados pela actividade de SHM são consistentes com os objectivos de muitas das práticas aplicadas desde há vários anos.

Na actualidade, a actividade de observação de pontes envolve a medição de um número elevado de grandezas, consideradas indispensáveis para a caracterização do seu comportamento dinâmico. Do conjunto das grandezas medidas, umas dizem respeito às acções dos fenómenos externos sobre a estrutura (entradas) e outras reflectem a resposta da estrutura a essas perturbações (saídas) (Caetano, 2000; Los Álamos, 2003). Do primeiro grupo fazem parte: i) a temperatura; ii) a humidade; iii) a direcção e a velocidade do vento; e iv) as cargas concentradas. No segundo grupo temos: i) as componentes de deslocamento, de velocidade e de aceleração; ii) as componentes de rotação; iii) os estados de tensão; e iv) as forças de tracção e de compressão. A medição destas grandezas é realizada por sensores de vários tipos, alguns dos quais vocacionados para a medição do mesmo tipo de grandeza, mas com princípio de transdução distinto. Este facto faz com que uns sejam mais adequados do que outros para atingir um determinado objectivo (ex. resposta em frequência versus gama de medição), razão pela qual os sensores são, nor-

² A primeira referência à avaliação do desempenho de estruturas de Engenharia Civil, através da aplicação de tecnologia de ensaios não destrutivos, surgiu em 1987 (Wahbeh, 2003).

malmente, seleccionados em função da sua capacidade de captação da informação representativa do comportamento da estrutura que se deseja conhecer.

2.2 A Ponte 25 de Abril

A Ponte 25 de Abril (P25A) é uma infra-estrutura que se desenvolve sobre o rio Tejo, junto à foz, estabelecendo a ligação rodoviária e ferroviária entre as margens das cidades de Lisboa e de Almada (Figura 2.1).

A P25A tem um comprimento total, entre ancoragens, de 2278,64 m, distribuído pelo vão central (entre as duas torres) com 1012,88 m, dois vãos laterais com 483,42 m cada um e por três vãos de acesso com 99,64 m cada um (Figura 1.1). As duas torres, em aço carbono, atingem uma altura de 190,5 m acima do nível da água e estão situadas a cerca de 500 m de cada uma das margens. Os tabuleiros rodoviário e ferroviário assentam numa viga de rigidez, contínua em toda a sua extensão, com 21 m de largura e 10,65 m de altura.

À data da inauguração (1966), a P25A dispunha apenas de quatro vias de circulação rodoviária. Em resultado da intervenção de reforço da viga de rigidez e dos cabos de suspensão (1998), a P25A passou a estar dotada com seis vias para circulação rodoviária, na parte superior, e com duas linhas para comboios de mercadorias e de passageiros, no interior da viga de rigidez.



Figura 2.1 – Duas vistas da Ponte 25 de Abril, sobre o rio Tejo, em Lisboa.

2.3 Medição dos Deslocamentos do Tabuleiro de Pontes

Como referido, a medição dos deslocamentos verticais e transversais do tabuleiro de pontes suspensas é fundamental para a caracterização do seu estado estrutural. No entanto, a medição destas grandezas requer um tipo específico de transdutor de deslocamento que não é habitual empregar-se em aplicações correntes. De facto, atendendo a que nas proximidades da zona da estrutura que se pretende observar, regra geral, não existe um ponto fixo, a sua concretização é, fundamentalmente, realizada por meio de sistemas de medição sem contacto.

Uma solução indirecta, usualmente empregue, consiste em medir a aceleração, ou a velocidade, e estimar o deslocamento por meio de integração ao longo do tempo. No entanto, é sabido que este método apresenta inúmeras desvantagens, uma vez que o grau de exactidão depende de vários factores, nomeadamente da frequência de amostragem, da dimensão do bloco de dados, da presença de ruído no sinal, da deriva (*drift*) e do desvio (*offset*) do sinal eléctrico, entre outros (Stephen, 1991; 1993; Wahbeh, 2003). Importa ter presente que as perturbações presentes no sinal de aceleração ou de velocidade são igualmente integradas. Por este motivo, e na sequência dos danos provocados pelos sismos que aconteceram em Northridge, Califórnia, EUA (1994) e em Kobe, Japão (1995), presentemente a comunidade científica está particularmente interessada em medir directamente os deslocamentos (Ogaja, 2002).

Considerando as especificidades das pontes suspensas, o número e o tipo de sistemas de medição com capacidade para medir os deslocamentos dessas estruturas é muito reduzido e, na maior parte dos casos, não satisfaz a globalidade dos requisitos. De acordo com o princípio de funcionamento, este conjunto de sistemas de medição pode-se dividir, basicamente, em quatro grupos³: i) os sistemas baseados no sistema de posicionamento global (*GPS – Global Positioning System*); ii) os sistemas baseados em tecnologia de radar; iii) os sistemas baseados em laser; e iv) os sistemas baseados em visão (visão metrológica).

2.3.1 Sistema de Posicionamento Global (GPS)

O sistema GPS, desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA, é composto por 24 satélites, distribuídos por 6 órbitas a uma altitude aproximada de 20.200 km acima da superfície terrestre, sendo visíveis pelo menos 4 satélites em qualquer instante e em qualquer parte do mundo acima da linha de horizonte. O sistema possui ainda um conjunto de infra-estruturas terrestres de gestão e controlo que seguem os satélites, determinam a sua trajectória e supervisionam todo o sistema de forma a mantê-lo em funcionamento (Ogaja, 2002).

³ Os sistemas de medição baseados em níveis líquidos (*HLS – Hydrostatic Levelling System*) são usados desde há muitos anos na medição do deslocamento vertical do tabuleiro de pontes e de viadutos (Marécos, 1969; Castanheira), sendo também conhecidas aplicações noutras áreas, nomeadamente na monitorização da estabilidade do solo de centrais nucleares (Dumon), no *European Synchrotron Radiation* (Martin, 2002) e no *Lawrence Radiation Laboratory* (Pellissier, 1965). Embora na literatura sejam relatados valores de deslocamento com exactidão entre 1 μm e 3 μm (Martin, 2002), a verdade é que este tipo de sistema de medição não reúne os requisitos necessários para a observação de pontes suspensas, isto porque, por um lado, a grandeza mensurável é sensível ao diferencial de temperatura e de pressão atmosférica existente entre o ponto de referência e o ponto de observação e, por outro lado, atendendo a que o deslocamento da estrutura se traduz numa transferência da massa de fluído, a medição terá de ser precedida por um intervalo de tempo de estabilização da grandeza, inviabilizando, desta forma, a sua aplicação em regime dinâmico. Acresce ainda o facto de que este tipo de sistema não é adequado para a medição do deslocamento transversal.

Cada um dos satélites transmite um sinal de navegação, composto por três componentes: i) a portadora de fase, centrada em duas bandas de frequência $L_1 - 1575,42$ MHz e $L_2 - 1227,60$ MHz; ii) o código binário C/A (*Coarse Acquisition*), com a frequência de 1,023 MHz, modulado pela portadora L_1 ; e iii) o código binário P (*Precise*), com a frequência de 10,23 MHz, modulado pelas portadoras L_1 e L_2 (Figura 2.2). Pelo facto da frequência do código P ser superior à do código C/A, a resolução do primeiro é superior e, por esse facto, é mais preciso.

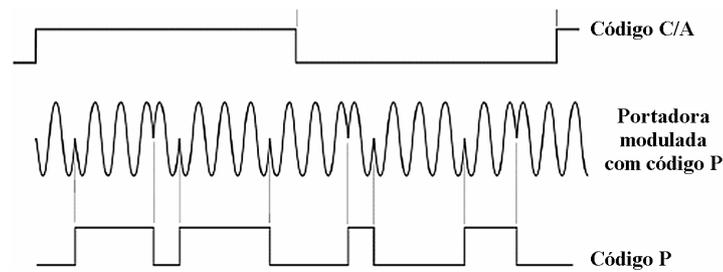


Figura 2.2 – Código C/A, código P e modulação da portadora de fase (adaptado de fib Task Group 5.1, 2002).

O posicionamento cinemático em tempo real (RTK-GPS – *Real Time Kinematic GPS*) faz uso de uma estação de referência e de uma ou mais estações móveis (Figura 2.3). A estação de referência deve estar posicionada num local com boa visibilidade para o céu, de forma a minimizar os erros induzidos por obstruções e reflexões do sinal (Figura 2.4). Os erros correlacionados, tais como os erros de órbita, de relógio dos satélites e os erros devidos a atrasos de propagação nas camadas ionosfera e troposfera, são reduzidos, de forma significativa, através da combinação dos dados registados pelas duas estações, desde que a distância entre elas seja inferior a 10 km (aproximadamente).

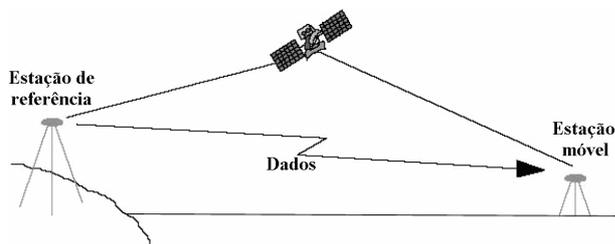


Figura 2.3 – Conceito associado à técnica de RTK-GPS (adaptado de Ogaja, 2002).



Figura 2.4 – Antena de GPS de referência, instalada na cobertura do edifício (Nakamura, 2000).

Os sistemas de medição de deslocamentos baseados em GPS têm sido usados na observação de grandes obras desde há alguns anos, sendo conhecidas várias aplicações nas mais diversas áreas, designadamente na observação de: i) barragens (Behr, 1998); ii) portos marítimos (Manet-

ti, 2003); iii) edifícios (Çelebi, 1999; 2000; 2002); iv) encostas instáveis (Manetti, 2002); e v) pontes (Nakamura, 2000; Wong, 2001; Meng, 2004; Roberts, 2006).

Um caso célebre da aplicação do sistema de GPS é o da medição dos deslocamentos das três pontes suspensas localizadas na baía de Hong Kong. No conjunto das três pontes foram instaladas 29 antenas de GPS, das quais duas são de referência. Só na ponte rodoviária e ferroviária *Tsing Ma* (1377 m de vão central e 2159,5 m de comprimento total) foram instaladas 10 antenas de GPS ao nível do tabuleiro, no meio vão e no quarto de vão, e 4 antenas nas duas torres (Figuras 2.5 – 2.6). As duas antenas de referência foram instaladas na cobertura de armazéns situados nas proximidades.

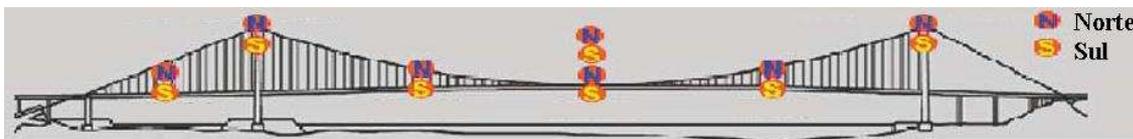


Figura 2.5 – Localização das antenas de GPS na ponte *Tsing Ma* (adaptado de Wong, 2001).



Figura 2.6 – Ponte *Tsing Ma*: antenas de GPS instaladas na torre (esq.), no cabo de suspensão e no tabuleiro (dir.) (adaptado de Wong, 2001).

A utilização dos sistemas de medição baseados em GPS na observação de grandes obras deve-se, em grande parte, ao facto deste tipo de sistema possuir características peculiares que se coadunam bem com a especificidade das grandes obras, nomeadamente o facto de: i) não necessitarem de linha de vista entre as zonas da estrutura a observar; ii) as medições poderem ser realizadas em modo permanente, durante o dia e a noite e em quaisquer condições atmosféricas; iii) as medições serem em valores absolutos de posição 3D (referenciados a WGS-84), permitindo uma análise de tendência em tempo real; iv) poder ser aplicado em qualquer parte do mundo; e v) não apresentar deriva ao longo do tempo.

No entanto, como qualquer outro sistema de medição, também este possui limitações que podem inviabilizar a sua aplicação quando não estão reunidos certos requisitos. Por exemplo, na linha de visão entre os receptores de GPS e os satélites não podem existir obstáculos que contri-

buam para a obstrução do sinal emitido pelo satélite. No caso da antena de referência, é desejável que os obstáculos que possam existir na zona em redor da antena estejam confinados a uma altura máxima de 15° do plano da antena (Kijewski-Correa, 2003). Por este motivo, a sua utilização deve-se restringir a aplicações em áreas abertas, tais como campos planos, coberturas de edifícios altos e paredões de barragens. Para além disso, para que o sistema de medição possa funcionar de forma adequada é desejável que a antena de GPS disponha de boa visibilidade para pelo menos quatro satélites (fib Task Group 5.1, 2002; Nickitopoulou, 2006), e que estes se encontrem uniformemente distribuídos no espaço; quando os satélites observados se encontram muito próximos uns dos outros o erro de posição aumenta (Kijewski-Correa, 2003).

No caso de posicionamento relativo, o grau de exactidão depende da distribuição geométrica dos satélites observados no espaço, das técnicas e algoritmos empregues no processamento dos dados e da modelação das várias fontes de erro. As principais fontes de erro são: i) erros de órbita e do relógio do satélite; ii) erro de relógio do receptor de GPS; iii) ruído gerado no receptor de GPS; iv) desvio do centro de fase da antena; v) erros de propagação nas camadas da ionosfera e da troposfera; e vi) erros de múltiplo percurso, resultantes de reflexões do sinal.

Muitos dos erros mencionados, nomeadamente os erros de órbita do satélite e dos relógios do satélite e do receptor de GPS, são eliminados, ou pelo menos reduzidos de forma significativa, através da aplicação de técnicas de posicionamento diferencial, uma vez que o sinal de relógio é comum aos receptores que observam o mesmo satélite no mesmo instante. De forma similar, se a distância entre dois receptores de GPS for suficientemente pequena para que se possa admitir que o percurso dos sinais de satélite recebidos pelos dois receptores é o mesmo, então a mesma técnica também contribui para a redução do erro associado ao efeito de propagação do sinal.

No caso do erro devido ao efeito de múltiplo percurso do sinal de satélite, dado o seu carácter aleatório, este não é eliminado pelo método de diferença de fase, constituindo a principal fonte de erro dos sistemas de medição de deslocamentos baseados em GPS. O ambiente que rodeia uma antena de GPS pode afectar de forma significativa a propagação do sinal e desta forma induzir erro nas medições. A reflexão do sinal por superfícies reflectoras (árvores, edifícios, superfície terrestre, superfície aquática, veículos em movimento, etc.) localizadas nas proximidades da antena dá origem ao chamado efeito de múltiplo percurso (Figura 2.7).

O efeito de múltiplo percurso não é facilmente caracterizável através de modelos matemáticos visto que a fase e a amplitude variam com a posição dos satélites. Este efeito provoca distorção na medição de fase devido à interferência do sinal directo com o sinal reflectido. De forma genérica, este efeito pode ser classificado segundo duas categorias: múltiplo percurso de

modo comum e múltiplo percurso diferencial, sendo que o primeiro ocorre quando as antenas de GPS se encontram muito próximas (de alguns centímetros a alguns metros), enquanto que o segundo ocorre quando as antenas estão mais afastadas e, neste caso, o efeito nas diversas antenas apresenta fraca correlação. No caso da antena se encontrar ela própria em movimento o efeito é aleatório, causando o que normalmente se designa por efeito de múltiplo percurso de alta frequência (*high-frequency multipath effect*), com período que pode ir desde alguns segundos até 2 a 3 minutos. Se a antena se encontrar estacionária o efeito produzirá uma flutuação de muito baixa frequência, sendo o período dependente das superfícies reflectoras existentes na vizinhança (período de 5 a 10 minutos para superfícies reflectoras na vizinhança da antena e de 50 a 60 minutos para superfícies aquáticas).

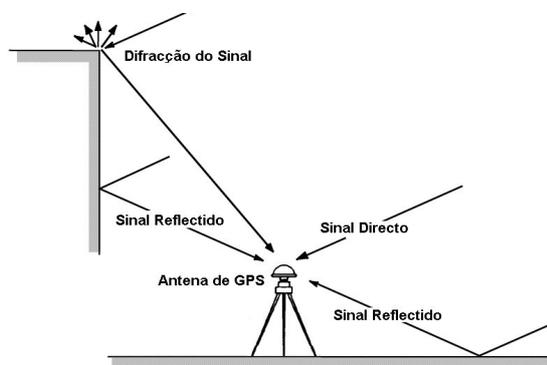


Figura 2.7 – Efeito de múltiplo percurso, gerado pela reflexão do sinal (adaptado de Ogaja, 2002).

A filtragem do sinal não elimina a perturbação em virtude das principais componentes do espectro do sinal e da perturbação se sobreporem (Wieser, 2002). Apesar das investigações levadas a cabo na mitigação deste efeito, nenhuma das técnicas encontradas pode ser considerada ideal para todos os ambientes e cenários (Ogaja, 2002). Ainda assim, para reduzir o efeito de múltiplo percurso é conveniente que: i) no local de instalação da antena não existam objectos reflectores; ii) as antenas sejam de boa qualidade e resistentes ao fenómeno de múltiplo percurso, como por exemplo as antenas com blindagem de anéis concêntricos (*choke ring*) (Figura 2.8); iii) as antenas rejeitem os sinais provenientes de satélites com baixa elevação, os quais são mais susceptíveis de produzir este efeito; e iv) o receptor de GPS disponha de filtros que permitam atenuar o distúrbio de múltiplo percurso.

Segundo alguns autores, os sistemas de medição baseados em GPS conseguem medir os deslocamentos do tabuleiro de pontes com exactidão da ordem de 20 mm, no plano vertical, e de 10 mm, no plano horizontal⁴, desde que a distância entre a estação de referência e cada uma das

⁴ Nickitopoulou (2006) anuncia valores de exactidão da ordem de 15 mm e de 35 mm, segundo as componentes horizontal e vertical, respectivamente, obtidos em regiões com latitude inferior a 50°, dois receptores de GPS e uma aplicação comercial de processamento de dados.

estações móveis seja inferior a 10 km (Nakamura, 2000; Wong, 2001; fib Task Group 5.1, 2002). Stürze (2004) descreve algumas experiências realizadas na cobertura de um edifício com um equipamento de GPS (www.javad.com), tendo efectuado medições com frequência de aquisição de 50 amostras por segundo. As diferenças entre os valores registados pelo sistema de GPS e por um outro equipamento de medição, *Leica520*, foram da ordem do milímetro, não tendo sido possível avaliar o grau de exactidão anunciado pelo fabricante, que é de 0,1 mm.



Figura 2.8 – Antena com blindagem de anéis concêntricos (*choke ring*) e respectivo invólucro de protecção (Kijewski-Correa, 2003).

Embora alguns autores (Wong, 2001; Roberts, 2006) tenham anunciado a obtenção de resultados fidedignos com a aplicação do sistema de medição de GPS na observação do tabuleiro de pontes suspensas, outros estudos indicam que este tipo de sistema, instalado ao nível do tabuleiro da ponte suspensa, não é adequado para este fim, em virtude dos cabos de suspensão gerarem efeitos severos de múltiplo percurso, de obstrução e de difracção do sinal de GPS (Wieser, 2002; Tsakiri, 2003; Nickitopoulou, 2006). A aplicação de técnicas de filtragem também não é viável em virtude das principais componentes do espectro do sinal e do ruído se sobreporem (Wieser, 2002). Por exemplo, na observação do tabuleiro de uma ponte suspensa com vão de 430 m foi detectada a presença de ruído de baixa frequência, inferior a 0,15 Hz (Nickitopoulou, 2006).

Adicionalmente, apesar dos sistemas de medição baseados em GPS serem anunciados como sendo insensíveis às condições atmosféricas, a verdade é que a presença de chuva, de neve e de gelo podem gerar erros com amplitude bastante significativa (Solheim, 1999) (Figura 2.9). Especificamente, um sinal de satélite que se propague com um ângulo de elevação de 15° ao longo de uma camada com 1 km, pode sofrer um atraso de até: i) 500 mm, induzido pela presença de vapor de água; ii) 30 mm, induzido pela presença de nuvens líquidas (*cloud liquid*); iii) 60 mm, induzido pela presença de chuva intensa; iv) 30 mm, induzido pela presença de granizo; e v) 3 mm, induzido pela presença de neve (Solheim, 1999).

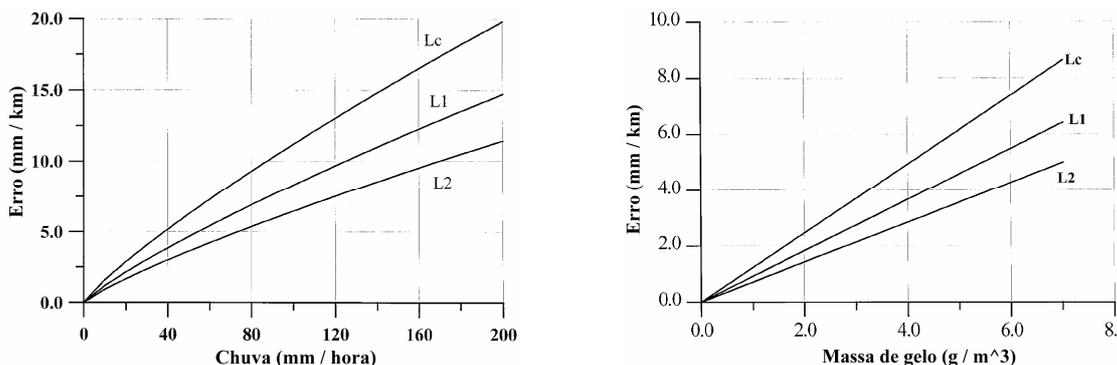


Figura 2.9 – Atraso para as portadoras L_1 e L_2 e resultante L_C , induzido pela presença de chuva (esq.) e de gelo (dir.) (adaptado de Solheim, 1999).

Em face do exposto, apesar das vantagens dos sistemas de medição de deslocamento baseados em GPS, constata-se que este tipo de sistema apresenta algumas limitações quando aplicados na medição dos deslocamentos em pontes suspensas, nomeadamente ao nível do tabuleiro. No caso das pontes suspensas há que sublinhar que estas são, regra geral, construídas à base de materiais metálicos (ex. aço), os quais potenciam a geração do efeito de múltiplo percurso, dando origem a erros intoleráveis. Na verdade, as torres e os cabos de suspensão que se elevam acima da estrutura do tabuleiro constituem obstáculos ao campo de visão das antenas, originando reflexões do sinal emitido pelos satélites, a que acrescem as reflexões originadas pela própria estrutura do tabuleiro. Há ainda que contar com a eventual existência de edifícios ou de colinas nas proximidades da estruturas, os quais podem contribuir para a diminuição do campo de visão das antenas e subsequente diminuição da exactidão das medições.

Para além das razões apontadas, recentemente surgiu uma notícia que põe em causa a fiabilidade dos actuais sistemas de medição baseados em GPS. A notícia dá conta de que existem no mercado dispositivos electrónicos (GPS *jammer*) (facilmente acessíveis por cerca de \$30) que emitem um sinal (ruído) na mesma banda de frequências do sinal de GPS capaz de adulterar o sinal de GPS num raio de vários quilómetros (Hambling, 2011). A principal razão prende-se com o facto do sinal de GPS que chega aos receptores ser muito fraco e, por isso, facilmente adulterado por estas fontes de ruído. Quer isto dizer que, um sistema de medição baseado em GPS, que se pretende ser fiável, fica facilmente vulnerável a actos mal-intencionados, podendo desencadear acções com consequências imprevisíveis.

2.3.2 Sistema de Radar

Recentemente, inspirado na tecnologia de radar⁵, surgiu um sistema de medição de deslocamentos denominado de *IBIS-S (Image By Interferometric Survey)* (Figura 2.10) (Bernardini,

⁵ A palavra radar deriva do acrónimo **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging.

2007-a; 2007-b; 2007-c; 2007-d; Pieraccini, 2008; Gentile, 2010; Pasquale, 2010). O princípio de funcionamento deste sistema de medição apresenta algumas semelhanças com o dos tradicionais sistemas de radar, na medida em que este emite um sinal com frequência da gama das micro-ondas, passando de seguida à condição de receptor (durante um intervalo de tempo predefinido) do sinal reflectido pelos obstáculos (alvos) que se encontrem no trajecto do sinal emitido. O tempo de propagação do sinal, desde a fonte emissora (sistema de medição) até ao alvo e o correspondente tempo de propagação do sinal reflectido, está directamente relacionado com a distância que separa o sistema de medição desse alvo, medida na direcção de propagação do sinal.

Este sistema de medição tem a particularidade de poder observar vários alvos em simultâneo. No caso da estrutura apresentar descontinuidades de forma geométrica e com capacidade de reflexão (ex. cantos) não é necessário instalar quaisquer alvos na estrutura, o que facilita os trabalhos de instalação do equipamento em obra. Todavia, caso a estrutura da obra não satisfaça estes requisitos ou se pretenda observar uma zona específica da estrutura, cuja superfície é mais ou menos uniforme, existe sempre a possibilidade de instalar alvos passivos⁶ (Figura 2.11).

O sistema de medição *IBIS-S* é capaz de medir o deslocamento de uma zona da estrutura até 500 m de distância, com exactidão entre 10 μm e 100 μm e com frequência de amostragem de até 40 Hz. Se a distância ao alvo mais distante diminuir, a frequência de amostragem pode aumentar até ao valor máximo de 100 Hz (Bernardini, 2007-b). A relação inversa entre a frequência de amostragem e a distância ao alvo está relacionada com a duração do intervalo de tempo de escuta que, naturalmente, aumenta com a distância.

A elevada exactidão das medições de deslocamento efectuadas pelo sistema *IBIS-S* é conseguida através da aplicação de duas técnicas (Bernardini, 2007-b; 2007-c):

- Onda contínua com incremento de frequência (*SF-CW – Stepped-Frequency Continuous Wave*), usada para fazer o reconhecimento de potenciais alvos na estrutura, naturais ou instalados, através da medição da distância a que se encontram, na direcção de propagação do sinal (Figura 2.12).
- Interferometria, usada para medir o deslocamento de cada um dos alvos, detectados anteriormente, através da medição do desvio de fase dos respectivos sinais reflectidos em instantes distintos.

⁶ Entende-se por alvo passivo um alvo que apenas reflecte a radiação que nele incide e não tem capacidade própria para emitir radiação electromagnética.



Figura 2.10 – Sistema de medição de deslocamentos IBIS-S, baseado na tecnologia de radar (www.idsgeoradar.com).



Figura 2.11 – Instalação de alvos passivos no tabuleiro da ponte Capriate, Itália (Bernardini, 2007-c).

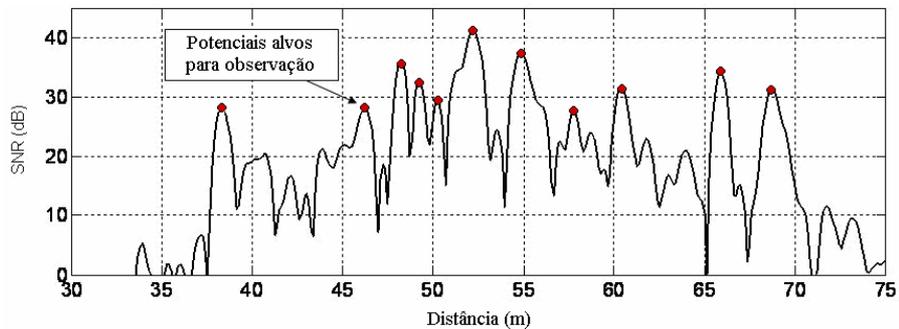


Figura 2.12 – Identificação dos potenciais alvos na estrutura do tabuleiro da ponte, através da medição da distância na direcção de propagação do sinal (adaptado de Bernardini, 2007-b).

Um dos requisitos deste sistema de medição tem a ver com a distância mínima entre os alvos, naturais ou instalados. Assim, para que dois ou mais alvos possam ser detectados de forma distinta, é necessário que estes elementos estejam afastados de uma distância mínima de 0,5 m, segundo a direcção radial de propagação do sinal (Figura 2.13). Este parâmetro estabelece a resolução do sistema de medição.

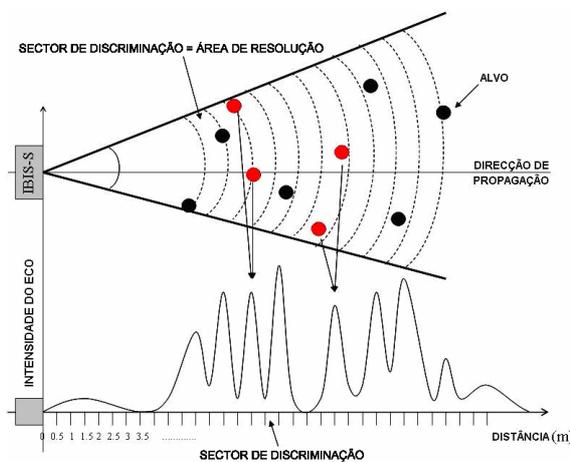


Figura 2.13 – Discriminação de alvos; conceito de máxima resolução e de sector de discriminação (adaptado de Bernardini, 2007-c).

O valor da resolução do sistema de medição (Δr) está relacionado com a duração do sinal emitido (τ), através da equação $\Delta r = \frac{c \cdot \tau}{2}$, em que c representa a velocidade da luz. Deste modo, a distância entre os alvos deve ser ajustada, de forma proporcional, ao tempo de duração do sinal emitido – o aumento do alcance implica aumento da duração do sinal emitido e, por consequência, o aumento da distância entre os alvos.

Como mencionado, o sistema de medição consegue detectar cada um dos alvos, desde que em cada sector de discriminação exista um único alvo. Quando esta condição não é satisfeita podem ocorrer erros de medição, resultantes da multiplicidade de contributos recebidos no mesmo sector, enviados pelos alvos posicionados à mesma distância da fonte de sinal, ainda que em posições distintas e sobre eixos diferentes de propagação do sinal (Gentile, 2010).

No caso das pontes suspensas, tal como mencionado anteriormente, o material usado na sua construção é, maioritariamente, o aço, o qual apresenta um elevado índice de reflexão. Para além disso, a estrutura do tabuleiro sendo formada por longarinas e travessas, dispostas sob a forma de grelha ordenada, proporciona múltiplos alvos naturais, correspondentes ao cruzamento e união destes elementos. Contudo, o espaçamento entre estes alvos não respeita a distância mínima de 0,5 m (Figura 2.14), como requerido, não sendo, por isso, possível discriminar cada um deles.



Figura 2.14 – Estrutura do tabuleiro da P25A, vista da base do pilar P3.

Na medição do deslocamento vertical do tabuleiro é suposto conhecer-se a distância do sistema de medição ao alvo (R) e a respectiva projecção no plano vertical (h) (Figura 2.15). No caso específico das pontes suspensas, é usual o tabuleiro apresentar-se ligeiramente curvado no plano horizontal, fazendo com que os alvos deixem de estar posicionados à mesma cota. Neste caso, ter-se-ia que medir, recorrendo a outros métodos, a altura a que cada um dos alvos se encontra para, desta forma, se poder determinar o respectivo deslocamento vertical.

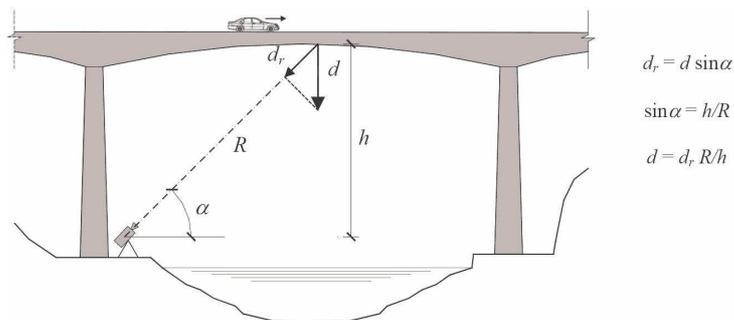


Figura 2.15 – Representação geométrica do método de cálculo do deslocamento vertical (Gentile, 2008).

O sistema *IBIS-S* fornece informação (medições) da variação da posição do alvo ao longo da direcção de propagação do sinal (deslocamento radial). Assim, para a obtenção do valor de deslocamento registado num dado momento é necessário conhecer previamente a direcção do movimento do alvo (Gentile, 2010); quer isto dizer que não é possível quantificar cada uma das componentes do movimento. No caso de se pretenderem medir os deslocamentos vertical e transversal do tabuleiro da ponte será necessário usar, pelo menos, dois sistemas de medição em configuração estereoscópica. Na realidade, existe uma variante do sistema de medição, denominada de *IBIS-L* (Figura 2.16), vocacionada para a medição de deformações 2D em grandes obras, designadamente em barragens, pontes, edifícios, entre outras (Bernardini, 2007-d). Todavia, nesta variante o período de aquisição é de 5 minutos, sendo apenas adequado para a observação de fenómenos quasi-estáticos ou de longo período.



Figura 2.16 – Sistema *IBIS-L*, vocacionado para a medição de deformações (www.idsgeoradar.com).

Adicionalmente, em virtude da velocidade de propagação do sinal ser inversamente proporcional ao índice de refração do meio de propagação. Por este motivo, a variação do índice de

refracção da atmosfera, em resultado da variação da temperatura, da pressão do ar e da humidade (Varshney, 2002), repercute-se em erros de medição.

Em suma, e apesar das diversas vantagens associadas aos sistemas de medição *IBIS-S*, a sua aplicação em obras com características como as que geralmente se encontram nas pontes suspensas fica comprometida em virtude de ser necessário respeitar uma distância mínima entre alvos e a grandeza medida ser unidimensional, 1D, não permitindo discriminar cada uma das componentes de deslocamento nas direcções vertical e transversal.

2.3.3 Sistema Laser

Outra das categorias de sistemas de medição, usualmente empregues na medição de deslocamentos de estruturas de grandes dimensões, é baseada em tecnologia de laser (Caetano, 2000; Habel, 2002). Este sistema é composto, genericamente, por um laser de emissão de radiação visível, de Classe 2, e por um receptor óptico. Este último, normalmente constituído por uma matriz de fotodíodos, dispostos de modo a formarem um plano com secção rectangular ou cilíndrica (Figuras 2.17 e 2.18), detecta e determina as respectivas coordenadas do ponto de impacto do feixe de laser.



Figura 2.17 – Receptor óptico fixo na estrutura de um pórtico metálico (www.engineering.co.kr).



Figura 2.18 – Sistema PSM-200, constituído por emissor laser e respectivo receptor óptico (www.noptel.fi/eng/nms/index.php?doc=3_products/psmrm).

O feixe de laser (transmissor) forma uma linha de referência desde o ponto emissor até ao alvo (receptor). Quando a estrutura é sujeita a movimento, o alvo move-se solidário com esta e, por conseguinte, as coordenadas do ponto de impacto do feixe de laser no receptor alteram-se relativamente à sua posição inicial, em consonância com o movimento da estrutura.

De um modo em geral, este tipo de sistemas de medição pode funcionar até algumas centenas de metros de distância entre o emissor e o receptor, proporcionando medições com frequência de aquisição de algumas centenas de Hz. No caso específico do sistema de medição com a referência PSM-200 (http://www.noptel.fi/eng/nms/index.php?doc=3_products/psm200), desenvolvido pela empresa *Noptel*, dependendo das condições atmosféricas, este pode funcionar entre

1 m e 400 m de distância, com uma frequência de aquisição de até 500 Hz. O bom desempenho deste sistema de medição em aplicações de exterior deve-se à incorporação de técnicas de modulação do feixe óptico emitido pelo laser e da tecnologia envolvida ao nível da recepção do sinal óptico, tornando o sistema imune a fenómenos atmosféricos tais como a radiação ambiente (*sun-light*), a variação da temperatura, o nevoeiro, a chuva ou a neve.

Todavia, na presença de efeitos de turbulência atmosférica (*air movement*) o feixe óptico pode ser desviado do seu trajecto normal (*beam oscillation*) devendo, neste caso, encurtar-se a distância máxima de operacionalidade indicada anteriormente.

Um outro sistema de medição, com a referência IDM-2400, produzido por *Engineering Korea – Test and measurement* (<http://www.engineering.co.kr/>), permite registar o deslocamento do alvo a uma distância entre 1 m e 2000 m e com uma frequência de aquisição entre 0,01 Hz e 50 Hz. Para este efeito, o sistema de medição dispõe de um receptor em que a secção activa (sensível à radiação emitida pelo laser) apresenta a forma circular, com 200 mm de diâmetro.

No entanto, o feixe de radiação emitido pelo laser apresenta muito baixa abertura (feixe muito concentrado) e, em resultado disso, a gama de medição de deslocamento é limitada pelas dimensões da área de exposição do receptor. Para que este tipo de sistema de medição pudesse ser aplicado na observação do movimento do tabuleiro de uma ponte suspensa seria necessário dispor de alvos (receptores) com dimensões da ordem de grandeza da amplitude do movimento que se espera medir o que, naturalmente, se torna inviável se atendermos que se pretende medir deslocamentos com amplitude de alguns metros. Uma solução para este problema poderia passar por acoplar o laser a um sistema mecânico servo-controlado, com dois graus de liberdade em rotação, de forma a que a projecção do feixe se mantivesse dentro dos limites da área activa do receptor. Todavia, tratando-se de um sistema mecânico composto por partes móveis, a capacidade de resposta de um sistema de medição deste género ficaria seriamente comprometida e requeria acções de manutenção frequentes. Como se verá, este tipo de solução foi experimentada num dos sistemas de medição sem contacto, baseado em dispositivos ópticos, tendo sido utilizado na observação do tabuleiro da P25A.

2.3.4 Fotogrametria

A palavra fotogrametria deriva das palavras gregas *photos*, que significa luz, *gramma*, que significa algo desenhado ou escrito, e *metron*, que significa medir, podendo-se interpretar como a actividade de medição gráfica por meio de luz (Slama, 1980).

No âmbito da fotogrametria, consoante a distância a que se encontre o objecto do sistema de aquisição de imagem, é usual encontrar na literatura a designação de fotogrametria de proxi-

midade (*Close-range photogrammetry*) e fotogrametria de longa distância (*Long-range photogrammetry*)⁷.

Na fotogrametria, a reconstrução tridimensional do objecto é realizada a partir de várias imagens do objecto, adquiridas a partir de diferentes posições e orientações, e seleccionadas de modo a assegurar uma geometria adequada de intercepção dos vários raios que partem de cada um dos pontos de observação do objecto (Figura 2.19) (Gayde, 1997). Os parâmetros de orientação e de posição de cada uma das câmaras envolvidas (parâmetros intrínsecos e extrínsecos) e as coordenadas dos pontos observados do objecto são estimados em simultâneo, através da aplicação de um algoritmo de cálculo denominado de ajuste de feixes (*bundle adjustment*). Neste caso, para se obterem resultados fidedignos é necessário que a geometria das câmaras apresente elevada convergência (Figura 2.20).

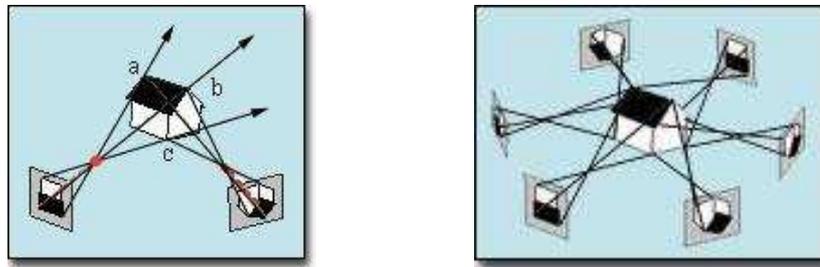


Figura 2.19 – Aquisição de imagens do objecto para reconstrução tridimensional. O aumento do número de vistas (imagens) proporciona uma reconstrução com maior exactidão⁸.

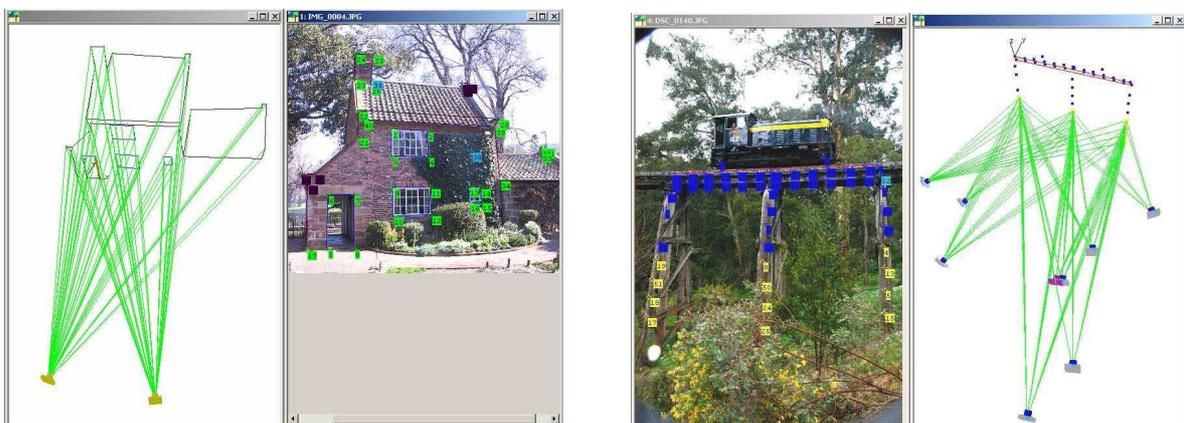


Figura 2.20 – Geometria estéreo de fraca convergência (esq.) e geometria multi-câmara de elevada convergência (dir.) (adaptado de Fraser, 2005-b).

A fotogrametria tem sido utilizada nas mais diversas áreas de aplicação, nomeadamente, em telecomunicações (Fraser, 2005-d), na indústria da aviação (Fraser, 1995-b; 2000), na indústria automóvel (Fraser, 2000; 2005-a), na reconstrução de acidentes de viação (Fraser, 2005-c) e,

⁷ É também usual encontrar-se a designação *Far-range photogrammetry*.

⁸ <http://www.google.pt/search?q=%22Close+Range+Digital+Photogrammetry%0B%22+marco+jesse+guerra&ie=utf8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:en-US:official&client=firefox-a>

naturalmente, em Engenharia Civil. Uma das características que distingue a fotogrametria de outros métodos de medição é, sem dúvida, o elevado grau de exactidão das medições. Na literatura são relatados casos de exactidão alcançada da ordem de 1/100.000 da dimensão do objecto (Cooper, 1994; Fraser, 1995-a; 1995-b; Maas, 1998). Numa aplicação de medição da deformação dos painéis que compõem o prato de uma antena parabólica, através do recurso a uma técnica denominada de hiper-redundância de imagens, foram registados valores de exactidão entre 1/550.000 e 1/670.000 do diâmetro da parábola (26 m) (Fraser, 2005-d).

A fotogrametria enquadra-se bem em muitas das aplicações do âmbito da Engenharia Civil, na medida em que possibilita a medição de grandezas com elevada exactidão sem ser necessário estabelecer contacto com o objecto⁹. Fazendo uso de uma elevada densidade de pontos de controlo (alvos) é possível reproduzir com grande detalhe (resolução) o fenómeno físico em observação (Figura 2.21) (Fraser, 2002; 2003; Jiang, 2006; 2008; Maas, 1998; Valença, 2007; Whiteman, 2002; Woodhouse, 1999; Xu, 2002).

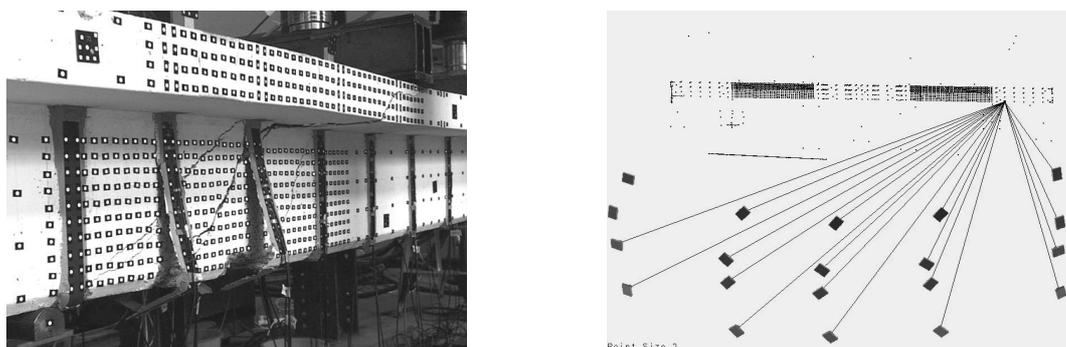


Figura 2.21 – Alvos fixos numa viga de betão armado, para ensaio até à ruptura. Geometria da rede de câmaras usadas para a aquisição das imagens (Fraser, 2002).

Grande parte das aplicações da fotogrametria que se encontram descritas na literatura são realizadas em ambiente laboratorial (*indoor*). No entanto, embora em menor número, também são conhecidas algumas aplicações de exterior, de que são exemplo, a observação de barragens (Maas, 1998), de deslizamento de encostas (Ono, 2002; 2004) (Figura 2.22) e de pontes (Albert, 2002; Jiang, 2006; 2008; Maas, 2006) (Figura 2.23).

Um dos parâmetros que influencia a exactidão do sistema de medição é a resolução do equipamento de aquisição das imagens. Por este motivo, em fotogrametria, normalmente, são empregues câmaras fotográficas de elevada resolução ao invés de câmaras de vídeo, que disponibilizam menor resolução. Por outro lado, o ritmo de aquisição de imagens proporcionado pelas câmaras fotográficas é bastante inferior ao das câmaras de vídeo. A conjugação destes dois facto-

⁹ A utilização de sistemas de medição sem contacto é muito útil na realização de ensaios de estruturas até à ruptura, uma vez que, entre outras vantagens, não existe o risco de danificar o transdutor de deslocamento aquando da ruptura da estrutura.

res limitam o emprego da fotogrametria, maioritariamente, a aplicações estáticas ou de muito baixa dinâmica (quasi-estática). A necessidade de adquirir várias imagens do mesmo objecto e o tempo necessário para processar o conjunto de imagens impossibilitam a observação de fenómenos dinâmicos, nomeadamente em tempo real¹⁰.



Figura 2.22 – Observação do deslizamento de uma encosta, situada a cerca de 100 m de distância do sistema de visão, fazendo uso de 28 alvos (adaptado de Ono, 2004).



Figura 2.23 – Ensaio de carga de uma ponte. Sistema de visão usado para a aquisição das imagens (Albert, 2002).

Num ensaio de carga de uma ponte com 27 m de arco e 12,5 m de largura (Figura 2.23), foi utilizada uma única câmara de vídeo, com a resolução de 1300 x 1030 píxeis para medir os deslocamentos vertical e horizontal do tabuleiro, à frequência de 1 Hz, tendo sido posicionada a cerca de 32 m de distância (Albert, 2002). Na sequência do ensaio realizado é mencionado que a qualidade do processamento das imagens foi deteriorada em virtude da sobre-exposição dos alvos e de variações da iluminação ambiente, apesar do céu nublado. Para além do sistema de visão, foram também utilizados transdutores de deslocamento, do tipo indutivo, para comparação de resultados (Figura 2.24). Como se constata, embora a forma do sinal registado pelo sistema de visão aparente uma tendência idêntica à registada pelo transdutor de deslocamento (IWT 9), a

¹⁰ Atendendo ao custo do equipamento de aquisição de imagens, geralmente, a mesma câmara fotográfica é empregue na aquisição de várias imagens do objecto, obtidas de diferentes posições e orientações. Neste caso é assumido que o objecto se mantém estático enquanto decorre o processo de aquisição das imagens.

verdade é que o sinal do primeiro está afectado de ruído com amplitude que chega a ser da ordem de grandeza do sinal de deslocamento medido.

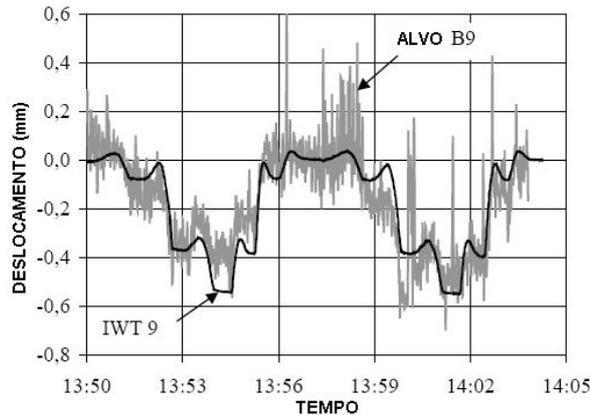


Figura 2.24– Deslocamento do tabuleiro da ponte, registado pelo sistema de visão e por um transdutor de deslocamento, do tipo indutivo (adaptado de Albert, 2002).

Do conjunto de alvos empregues, uns destinam-se à observação do fenómeno físico e outros, em minoria, à estimação dos parâmetros das câmaras, a partir do conhecimento das respectivas coordenadas 3D, ou à estimação de um factor de escala, através do conhecimento da distância entre eles – alvos de referência (Figura 2.25).

Numa aplicação com elevado número de alvos, como a representada na Figura 2.21, a identificação e a respectiva correspondência dos alvos entre as várias imagens torna-se penosa para o operador e é propícia à ocorrência de erros (embora estes possam, em princípio, ser identificados). Neste sentido, em 1991, a empresa AICON introduziu, pela primeira vez, os denominados alvos codificados (Bösemann, 2005). Nestes, o código pode ser representado por um conjunto de anéis ou por um padrão geométrico (Figura 2.25). A criação de alvos codificados constituiu, porventura, a etapa mais importante e decisiva na concretização da automação na fotogrametria (Bösemann, 2005), reduzindo, desta forma, a intervenção do operador (Fraser, 1998, 2005-a, 2005-b) ¹¹.

Existem também os denominados dispositivos de orientação exterior (*EO – Exterior Orientation*), introduzidos em meados da década de 90 (Fraser, 2005-b) (Figura 2.26). Normalmente constituídos por vários alvos, estes definem uma geometria singular. Como o nome indica, estes dispositivos são, geralmente, utilizados na estimação da pose das câmaras (valores iniciais), a partir do conhecimento das coordenadas de posição relativa de cada um dos alvos que compõem o dispositivo *EO*.

¹¹ Existem aplicações comerciais de *software* que implementam o processamento das imagens (detecção, identificação e determinação das coordenadas dos alvos nas imagens) de forma autónoma, requerendo muito pouca intervenção do operador. Para além disso, realizam a calibração das câmaras, a reconstrução e o movimento do objecto no espaço. Como exemplos, referem-se as aplicações *Australis*, *PhotoModeler* e *ImageModeler*.



Figura 2.25 – Alvos de referência e de observação (Niederöst, 1997).

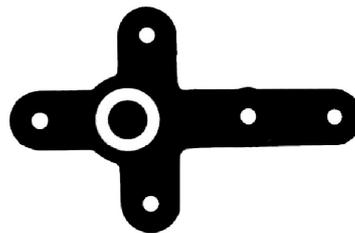


Figura 2.26 – Dispositivo de orientação exterior, com forma geométrica singular (Fraser, 1998).

Embora a fotogrametria partilhe com a visão computacional grande parte dos conceitos associados à visão metrológica, tendo sido esta a principal razão da sua inclusão no presente estudo, a verdade é que esta, face ao exposto, não reúne os requisitos necessários para a observação de fenómenos dinâmicos, em virtude do processamento das imagens ser lento e incompatível com a dinâmica que se pretende observar.

2.3.5 Sistema de Visão

Nos finais da década de sessenta, o LNEC desenvolveu um sistema para a medição dos deslocamentos verticais e transversais da P25A, sobre o rio Tejo, em Lisboa, que esteve em funcionamento durante cerca de uma década (Marécos, 1969). Tanto quanto se sabe, este foi o primeiro sistema de medição de pontes, sem contacto, baseado em dispositivos ópticos. A observação do tabuleiro da P25A era realizada por quatro sistemas ópticos, dos quais dois mediam os deslocamentos do meio vão e os outros dois, os deslocamentos do quarto de vão (Figura 2.27).



Figura 2.27 – Sistema de medição, sem contacto, desenvolvido pelo LNEC na década de sessenta.

Basicamente, cada um dos sistemas de medição era composto por um alvo, fixo ao tabuleiro na zona a observar, e pelo sistema de observação, instalado na base do pilar P3, torre Sul. O alvo, do tipo activo, era composto por um dispositivo de iluminação que emitia um feixe concentrado de radiação, maioritariamente, com comprimento de onda da zona do infravermelho.

Genericamente, o sistema de medição era composto por dois subsistemas: o subsistema óptico e o subsistema mecânico (Figuras 2.28 e 2.29), estando o primeiro subsistema acoplado ao segundo. O subsistema mecânico, servo-controlado, era composto por uma parte móvel com dois graus de liberdade em rotação (azimute e inclinação), destinado a manter o subsistema óptico alinhado na direção do alvo. O sinal de comando do sistema servo era gerado pelo sensor óptico (elemento constituinte do subsistema óptico).

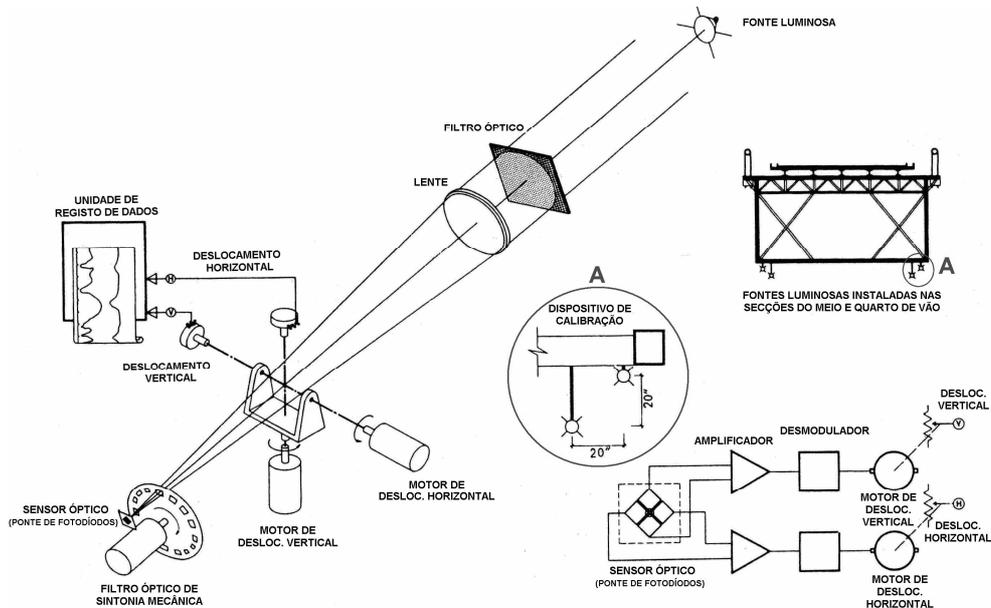


Figura 2.28 – Esquema representativo dos elementos que compõem o sistema de medição baseado em dispositivos ópticos (adaptado de Marécos, 1969).



Figura 2.29 – Sistema de observação (subsistema óptico e subsistema mecânico).

Quanto ao subsistema óptico, este compreendia uma óptica, com a distância focal de 640 mm, um filtro óptico e um sensor óptico, formado por quatro fotodíodos de infravermelho, ligados em ponte completa (ponte de *Wheatstone*). O filtro óptico, do tipo passa-alto, destinava-se a eliminar a radiação ambiente com comprimento de onda inferior ao comprimento de infravermelho. Para além deste, existia ainda um filtro mecânico (*mechanical chopper*), posicionado entre o sensor óptico e a óptica, que era operado por meio de um motor de indução e que, pelo facto da velocidade de rotação estar sincronizada com a frequência da tensão de alimentação do

alvo, mantinha-se sintonizado com este. Deste modo, o sensor óptico só recebia radiação durante um curto intervalo de tempo, centrado no instante correspondente ao pico de emissão do alvo.

Para a calibração do sistema de medição existia um segundo dispositivo de iluminação, idêntico ao primeiro mas afastado deste de uma distância de 20 polegadas, segundo a direcção vertical e igual distância segundo a direcção horizontal (Figura 2.28). Estando o sistema óptico alinhado com um dos dispositivos de iluminação, desligava-se a alimentação deste, ligava-se a alimentação do outro e registava-se a resposta do sistema de medição, em termos de ângulos de rotação. Desta forma, obtinham-se dois coeficientes de conversão, relativos a cada um dos eixos de rotação.

O segundo dispositivo de iluminação tinha uma função adicional, na medida em que funcionava como reserva, pronto a entrar em funcionamento no caso do primeiro avariar. Quando esta situação ocorria, no registo de dados aparecia uma variação brusca do sinal de deslocamento que era facilmente identificada.

Os dados registados pelo sistema de medição foram considerados satisfatórios face, às necessidades da época, tendo-se revelado muito úteis no estudo do comportamento dinâmico da P25A. Todavia, sendo este sistema composto por partes móveis, a sua capacidade de resposta dinâmica fica aquém das necessidades de medição actuais, para além de requer acções de manutenção frequentes (desgaste do material, lubrificação dos rolamentos, etc.). Acresce que actualmente, a reprodução deste sistema de medição deixou de ser viável, em virtude dos elevados custos decorrentes da complexidade e do rigor de execução do subsistema mecânico.

Assim, na década de noventa, com o surgimento das câmaras de vídeo de uso corrente (*off-the-shelf*), o *Bristol University Earthquake Engineering Research Centre (EERC)* eliminou a componente móvel do sistema de observação, tal como tinha sido apresentado anteriormente, com a incorporação de uma câmara de vídeo (Stephen, 1991; 1993).

Este sistema de medição foi aplicado, no ano de 1990, na observação dos deslocamentos verticais e horizontais do meio vão da *Humber Bridge* (Figura 2.30), a qual possui um vão central com 1410 m e a zona do meio vão do tabuleiro encontra-se a cerca de 36 m acima do nível da base dos pilares.

O princípio de funcionamento do sistema de medição consistia na observação de um ou mais alvos, fixos à estrutura do tabuleiro da ponte, por meio de uma câmara de vídeo que se encontrava posicionada numa zona considerada imóvel¹². O alvo usado era do tipo passivo, for-

¹² Embora inicialmente estivesse previsto usar três alvos para realizar a observação do tabuleiro da ponte, tal não veio a acontecer, tendo sido usado apenas um.

mado por dois anéis concêntricos de material reflector, montados numa placa de fundo preto, com secção quadrada e 400 mm de lado (Figura 2.31).



Figura 2.30 – Humber Bridge, com vão central de 1410 m¹³.

A aquisição das imagens foi efectuada por uma câmara de vídeo analógico, acoplada a uma óptica com a distância focal de 800 mm x 2. O sinal de vídeo era digitalizado em 256 níveis de cinzento (8 bits) por uma placa de aquisição de imagens (*frame grabber*), à frequência de 25 Hz e com uma resolução equivalente de 256 x 256 píxeis. O processamento das imagens foi realizado por meio de uma rede de *transputers*, um por cada alvo a observar, interligados de forma a executarem o processamento das imagens em paralelo e em tempo real. A determinação das coordenadas do alvo nas imagens foi realizada por meio de correlação de padrões (12 x 12 píxeis), circunscrita a uma região da imagem, delimitada por uma janela centrada nas coordenadas da última posição conhecida do alvo na imagem (Stephen, 1993).

A calibração do sistema de medição foi efectuada tendo por base o conhecimento do comprimento da diagonal do alvo e o correspondente comprimento medido na imagem, em píxeis.

Embora estivesse previsto o funcionamento do sistema de medição em tempo real, tal não veio a acontecer, tendo as imagens adquiridas sido gravadas e processadas em modo diferido. Do conjunto de imagens recolhidas foi constatado que algumas apresentavam baixo contraste e ruído excessivo, devido à presença de neblina ou outros efeitos atmosféricos (Stephen, 1993).

Os resultados obtidos da observação do tabuleiro da ponte revelaram a presença de uma componente oscilatória sobreposta a uma componente de baixa frequência, esta última associada a movimento ou a deriva do tabuleiro. Para além disso, os dados registados pelo sistema de medição também permitiram observar uma forte correlação entre a expansão térmica da estrutura ao longo do dia e o aumento da temperatura da ponte.

¹³ <http://www.hull.ac.uk/mri/bridge/humberbridge4.jpg>

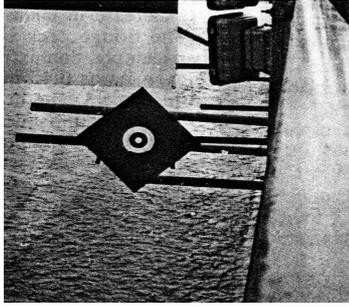


Figura 2.31 – Alvo passivo montado no meio vão da Humber Bridge (Stephen, 1991).

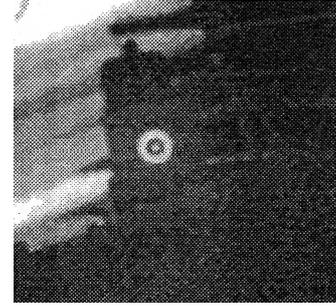


Figura 2.32 – Imagem do alvo adquirida pela câmara de vídeo (Stephen, 1991).

No final da década de noventa, o sistema de medição descrito anteriormente foi sujeito a alterações tendo em vista o aumento do seu desempenho. De entre as várias mencionadas, destacam-se: i) a iluminação dos alvos por fontes de iluminação artificial, de modo a viabilizar o seu funcionamento em modo permanente (dia e noite) e a diminuir os efeitos adversos resultantes da variação do brilho e do contraste da imagem (Figura 2.33); ii) a possibilidade de seguir vários alvos numa mesma imagem; iii) a possibilidade de multiplexagem das imagens adquiridas por três câmaras num mesmo canal de vídeo; iv) a interpolação da posição do alvo ao nível do sub-píxel; e v) a sincronização da aquisição das imagens pelas câmaras de vídeo com a aquisição da restante instrumentação instalada na observação da ponte (Macdonald, 1997; 1998).

Este sistema de medição foi utilizado na observação dos deslocamentos do tabuleiro da ponte *Second Severn Crossing* (Figura 2.34), a qual estabelece a ligação entre a Inglaterra e o País de Gales, com um vão central de 456 m. O sistema de medição usado era composto por três câmaras de vídeo, duas das quais eram usadas no seguimento de dois alvos, colocados no meio vão do tabuleiro (a cerca de 200 m de distância), um de cada lado, e a terceira câmara era usada para seguir um terceiro alvo colocado no topo de uma das torres, a cerca de 190 m de altura. As imagens adquiridas pelas três câmaras de vídeo foram gravadas a um ritmo de 12,5 imagens por segundo. Apesar da disposição estéreo das câmaras, foi decidido efectuar o seguimento dos alvos a nível individual, em detrimento da medição da terceira componente do deslocamento.



Figura 2.33 – Iluminação do alvo passivo por uma fonte de iluminação artificial (adaptado de Macdonald, 1997).



Figura 2.34 – Ponte Second Severn Crossing¹⁴.

A avaliação do desempenho do sistema de medição foi efectuada através da realização de ensaios em ambiente de laboratório e *in situ*. No primeiro caso, foi usada uma óptica com 6 mm de distância focal, a cerca de 4,7 m de distância do alvo, tendo sido registado um erro máximo de 5,5 mm na direcção horizontal e de 3,7 mm na direcção vertical. Para além disso, os resultados mostraram boa concordância na medição de efeitos dinâmicos com frequência até 7 Hz. A realização de ensaios *in situ* decorreu na ponte *Second Severn Crossing*, tendo os resultados sido comparados com acelerómetros montados nas proximidades dos alvos. Fazendo uso de uma óptica com a distância focal de 800 mm (Figura 2.35), constataram que para intervalos de tempo até 10 segundos havia boa concordância entre os dois sistemas de medição, sendo a diferença inferior a 0,5mm (Macdonald, 1997). Para intervalos de tempo maiores verificaram uma divergência nos valores das medições, que foi atribuída à deriva do sinal dos acelerómetros e a erros de integração.

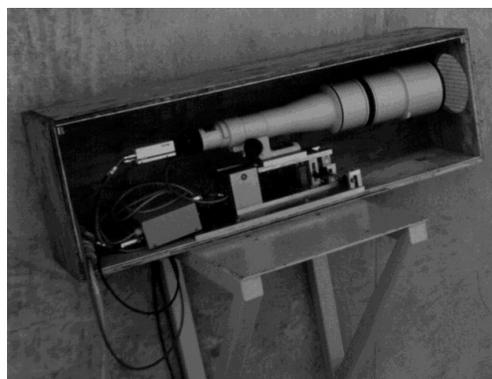


Figura 2.35 – Sistema de medição instalado na base de um dos pilares da ponte *Second Severn Crossing* (óptica, com a distância focal de 800 mm) (Macdonald, 1997).

Num outro sistema de medição, destinado, fundamentalmente, à monitorização de estruturas de pequena e média dimensão (distância ao alvo inferior a 100 m), uma única câmara de vídeo analógico foi usada para realizar o seguimento de um ou de dois alvos, consoante a configuração adoptada (Olaszek, 1999).

No modo de um canal, o sistema de medição utilizava uma óptica, com a distância focal de 1000 mm, para seguir um alvo que se encontrava fixo na estrutura, à semelhança do verificado

¹⁴ http://images.stanzapub.com/readers/2009/07/22/secondseverncrossingjan2006_1.jpg

com os sistemas de medição descritos anteriormente. No modo de configuração alternativo, de dois canais, o sistema de medição utilizava uma única câmara de vídeo, duas ópticas com a distância focal de 500 mm, cada uma delas focada num dos alvos, e um sistema de espelhos, posicionados de forma a fazer incidir no sensor da câmara de vídeo a projecção dos dois alvos (Figura 2.36). Este modo obrigava a posicionar o alvo de referência de forma a que a sua projecção na imagem não interferisse, em momento algum, com a projecção do alvo de observação (Figura 2.37).

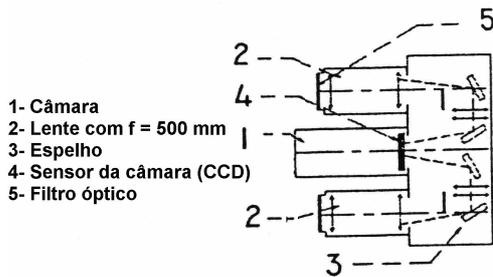


Figura 2.36 – Sistema óptico de projecção dos dois alvos no único sensor da câmara de vídeo (adaptado de Olaszek, 1999).

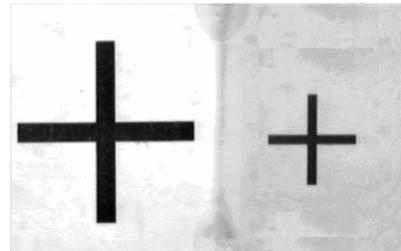


Figura 2.37 – No primeiro plano encontra-se o alvo de observação e no segundo plano o alvo de referência (Olaszek, 1999).

Dos dois alvos, idênticos, um era posicionado numa zona considerada fixa (alvo de referência) e o outro na zona da estrutura que se pretendia observar (alvo de observação). O alvo de referência destinava-se a eliminar eventuais fontes de perturbação, como por exemplo a componente de vibração induzida na câmara de vídeo pelo vento. O valor da distância focal foi seleccionado de forma a que o sistema de medição pudesse ser usado na medição de deslocamentos verticais com amplitude entre 50 mm e 500 mm a uma distância do alvo entre 10 m e 100 m.

O tipo de alvo usado, à semelhança do verificado nos últimos dois sistemas de medição descritos, era igualmente passivo, mas, no caso presente, formado por dois traços dispostos ortogonalmente (forma de cruz).

As imagens adquiridas, digitalizadas em 256 níveis de cinzento (8 bits) e com uma resolução equivalente de 512 x 512 píxeis, eram processadas em tempo real, compreendendo duas etapas com vista à detecção das coordenadas do alvo (Figura 2.38). A primeira etapa compreendia a detecção das coordenadas dos contornos dos dois traços, com exactidão de um píxel, por meio de varrimento sequencial vertical e horizontal (*cross edge detect*) – algoritmo de Prewitt – conforme representado pela Equação 2.1 para o caso do varrimento vertical,

$$f(u, v) = [g(u-1, v-1) - g(u-1, v+1)] + [g(u, v-1) - g(u, v+1)] + [g(u+1, v-1) - g(u+1, v+1)] \quad (2.1)$$

em que $g(u, v)$ representa o nível de cinzento (intensidade) do píxel de coordenadas (u, v) . A segunda etapa contemplava a refinação das coordenadas do contorno, com exactidão de subpíxel,

tendo em conta o nível de cinzento dos píxeis adjacentes ao contorno, conforme representado pela Equação 2.2,

$$v_{\text{coord}} = \frac{\sum_{i=a}^b i \cdot f(u, i)}{\sum_{i=a}^b f(u, i)} \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} a = v_{\text{maxf}} - \frac{w_{\text{zone}} + 1}{2} + 1 \\ b = v_{\text{maxf}} + \frac{w_{\text{zone}} + 1}{2} - 1 \end{cases}$$

em que v_{maxf} representa a coordenada vertical, na imagem, correspondente ao valor máximo de $f(u, v)$ e w_{zone} a dimensão da janela, em píxeis, considerada para a avaliação (procedimento idêntico para o cálculo da coordenada horizontal). As coordenadas 2D do alvo foram determinadas a partir da média aritmética das coordenadas do varrimento de cada linha/coluna.

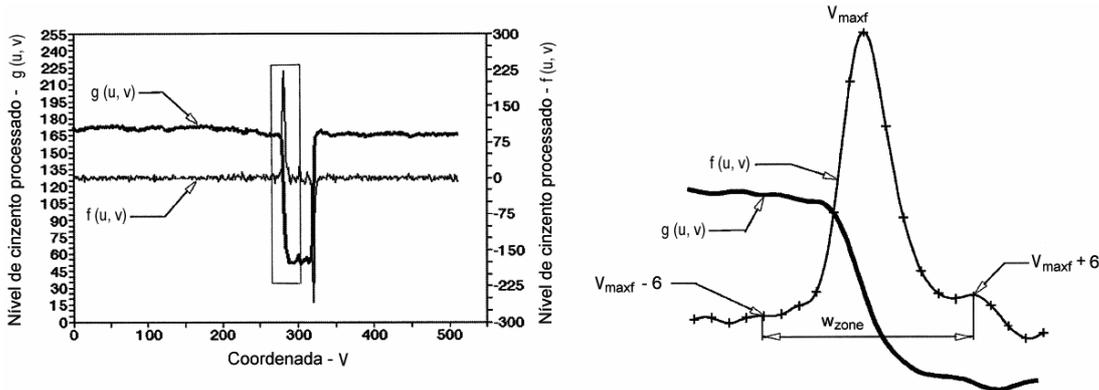


Figura 2.38 – Representação gráfica das funções $g(u, v)$ e $f(u, v)$, com w_{zone} igual a treze (adaptado de Olaszek, 1999).

A calibração do sistema de medição, à semelhança do verificado com os sistemas de medição descritos anteriormente, foi realizada com base no conhecimento do comprimento de cada um dos traços do alvo e o respectivo comprimento na imagem, em píxeis, tendo sido estimado um erro de 0,0002 mm/píxel a 10 m de distância do alvo e de 0,002 mm/píxel a 100 m de distância do alvo.

Com este sistema de medição foram estimados valores de exactidão da ordem de 0,07 mm a 10 m de distância, em ensaios estáticos, e de 0,11 mm a 10 m de distância e de 1,15 mm a 100 m, em ensaios de regime dinâmico com frequência de 5 Hz (Olaszek, 1999).

Num outro trabalho, um sistema de medição foi desenvolvido e aplicado na medição dos deslocamentos do meio vão da ponte *Vincent Thomas, Califórnia* (Figura 2.39), cujo vão central mede cerca de 457 m (Wahbeh, 2003). Basicamente, este sistema de medição difere dos demais

pelo tipo de alvo empregue. O alvo, do tipo activo, é composto por dois LEDs (*LED – Light Emitting Diode*), com emissão de radiação no comprimento de onda da zona do vermelho, montados numa placa de aço de fundo preto com 28 polegadas de altura e 32 polegadas de largura e distanciados entre si de 10 polegadas (Figura 2.40).



Figura 2.39 – Ponte Vincent Thomas, Califórnia¹⁵.

Dos dois LEDs que compõem o alvo, apenas um foi usado na observação dos deslocamentos do tabuleiro da ponte e, por isso, foi mantido em funcionamento de forma permanente. O segundo LED foi usado somente na fase de calibração do sistema de medição. A calibração do sistema foi efectuada, no início de cada série de ensaios, tendo por base o conhecimento da distância entre os dois LEDs e a respectiva distância medida na imagem.

O processamento das imagens, realizado em modo diferido (*off-line*), decorreu ao longo de várias etapas, tendo-se obtido, no final, uma imagem de elevado brilho e contraste com as dimensões de 25 x 25 píxeis (Figura 2.41). A partir desta imagem foram determinadas as coordenadas do alvo na imagem, correspondentes ao centro da mancha, por meio de ajuste à curva de regressão não linear de Gauss.

A câmara de vídeo foi instalada no centro da estrutura da torre, do lado Oeste, e o alvo foi posicionado de forma a que a radiação ambiente não afectasse o sistema de medição (Figura 2.42). No entanto, como veio a ser constatado posteriormente, após a análise dos resultados, esta opção revelou-se inadequada uma vez que a vibração de alta frequência da torre, devida à passagem do tráfego rodoviário, induziu vibrações no sistema de medição que comprometeram o grau de exactidão das medições efectuadas. Para além disso, é ainda mencionado que as condições atmosféricas existentes na vizinhança da ponte, nomeadamente a presença de chuva, de poeira ou de radiação ambiente, poderão ditar uma configuração diferente para o alvo, tendo sido sugerida a realização de experiências com LEDs de emissão com radiação noutros comprimentos de onda e com outras intensidades de corrente (Wahbeh, 2003).

¹⁵ <http://www.flickr.com/photos/nzdave/392690889/in/set-72157600286659363>.

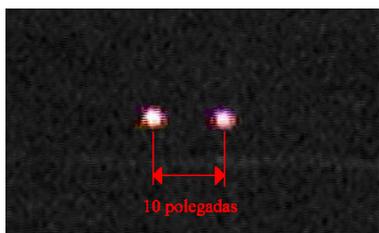


Figura 2.40 – Imagem do alvo adquirida pela câmara de vídeo, com indicação da distância entre os LEDs (Wahbeh, 2003).



Figura 2.41 – Imagem do alvo, usado na observação do movimento do tabuleiro, após filtragem e processamento (Wahbeh, 2003)



Figura 2.42 – Posicionamento do alvo, formado por dois LEDs, um dos quais usado, exclusivamente, para a realização da calibração do sistema de medição (Wahbeh, 2003).

Recentemente, surgiu indicação de um outro sistema de medição, cujas novidades assentam, basicamente, na forma geométrica do alvo usado para a realização da calibração do sistema de medição e no método de calibração empregue (Lee, 2006-a; 2006-b; 2006-c; Fakuda, 2009). O sistema utiliza uma câmara de vídeo digital com interface de comunicação de dados de alta velocidade, do tipo IEEE 1394 (*FireWire*), para realizar a transferência das imagens adquiridas para um computador portátil, onde são processadas. As imagens, com a resolução de 720 x 480 píxeis, são adquiridas à frequência de 30 imagens por segundo.

O alvo, do tipo passivo¹⁶, é composto por quatro marcas, com secção circular, de cor branca sob fundo preto, dispostas segundo uma geometria conhecida de modo a formarem dois segmentos de recta, aproximadamente ortogonais entre si (Figura 2.43). Das quatro marcas que formam o alvo, apenas uma é usada para efectuar a medição do deslocamento da estrutura, estando as restantes reservadas para a realização da calibração do sistema de medição.

A calibração do sistema de medição compreende duas etapas: i) a determinação da matriz de rotação, R_{ψ} , do plano da imagem relativamente à orientação definida pelas quatro marcas do alvo; e ii) a determinação de dois factores de conversão, correspondente às duas direcções vertical e horizontal.

¹⁶ É mencionado que o alvo pode ser iluminado por uma fonte de iluminação artificial.

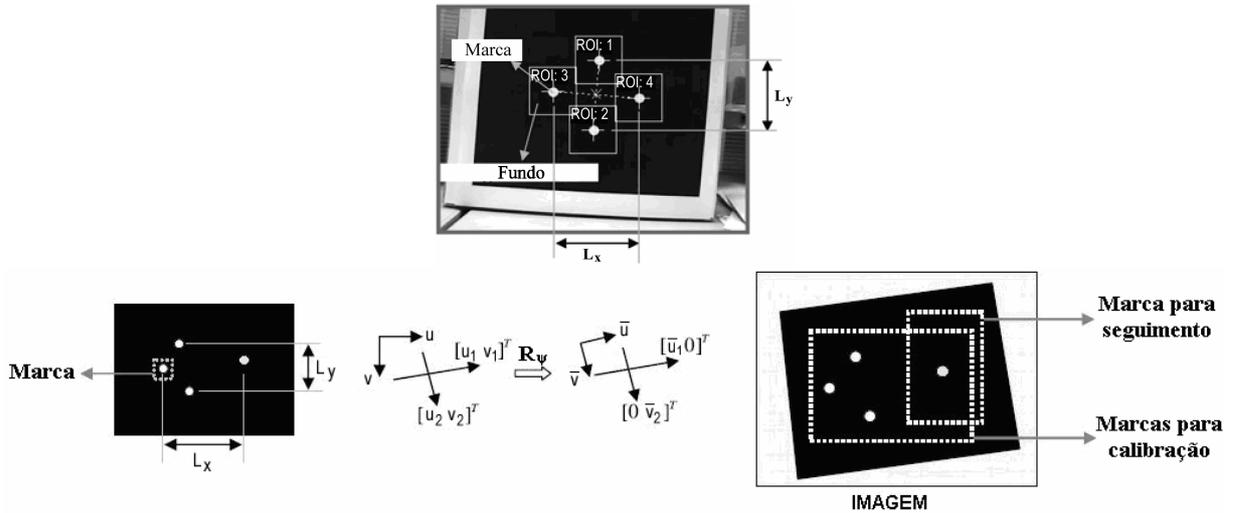


Figura 2.43 – Alvo passivo, formado por quatro marcas de secção circular, de cor branca sob fundo preto (adaptado de Lee, 2006-a).

Relativamente à determinação da matriz de rotação, a posição relativa das quatro marcas do alvo definem, no plano, a orientação do sistema de eixos de referência. Deste modo, a determinação da matriz de rotação é obtida através da Equação 2.3, em que $[u'_1, v'_1]^T$ e $[u'_2, v'_2]^T$ representam os vectores unitários, no plano da imagem, segundo as direcções horizontal e vertical, respectivamente.

$$R_\psi = \begin{bmatrix} u'_1 & u'_2 \\ v'_1 & v'_2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.3)$$

$$[u'_i, v'_i]^T = [u_i, v_i]^T / \sqrt{u_i^2 + v_i^2}, \quad i = 1, 2$$

Quanto à determinação dos factores de escala (λ_x e λ_y), o método usado é idêntico ao aplicado em outros sistemas de medição, já descritos anteriormente, e baseia-se no conhecimento da distância entre cada par de marcas e a respectiva distância das suas projecções, medida na imagem (Figura 2.43), como indicado pela Equação 2.4, em que L_x e L_y representam a distância entre cada par de marcas do alvo, segundo as direcções horizontal e vertical, respectivamente.

$$[\lambda_x, \lambda_y]^T = \left[\frac{L_x}{\sqrt{u_1^2 + v_1^2}}, \frac{L_y}{\sqrt{u_2^2 + v_2^2}} \right]^T \quad (2.4)$$

Para minimizar o efeito do ruído resultante do processo de aquisição das imagens, assim como o erro decorrente do processamento das mesmas, a calibração foi efectuada sobre cerca de 30 imagens adquiridas e o valor final corresponde à média dos valores individuais. Para o reconhecimento das marcas e a determinação das respectivas coordenadas, a imagem foi convertida em dois níveis de brilho (*binarization*) através da aplicação de um valor de limiar (*Th - thre-*

shold), calculado com base no nível de brilho das marcas e do fundo, como indicado pela Equação 2.5,

$$Th = \text{mediana} [\mu_M + 3 \cdot \sigma_M, \mu_B + 3 \cdot \sigma_B] \quad (2.5)$$

em que $\mu_{M/B}$ representa o valor médio de brilho nas regiões da marca e do fundo, respectivamente, e $\sigma_{M/B}$ representa o correspondente desvio padrão.

A avaliação da eficiência deste sistema foi efectuada em aplicações de curta e de média distância, nomeadamente em ensaios de carga de viadutos, em regime dinâmico, e de uma ponte pedonal em que, neste último caso, a distância do sistema de medição ao alvo era cerca de 70 m (Figura 2.44). Nos ensaios realizados em viaduto, os resultados de deslocamento obtidos com este sistema de medição foram comparados com os obtidos por um transdutor de deslocamento com contacto e por um sistema de medição de vibrações por laser (*laser vibrometer*).

Em regime dinâmico de baixa frequência (velocidade de circulação de 3 km/hora), os resultados revelaram grande concordância com os deslocamentos registados pelo sistema de medição de laser. Para o regime dinâmico de maior frequência (velocidade de circulação de 50 km/h) verificaram-se diferenças de deslocamento da ordem de 10% do valor registado. Relativamente ao transdutor de deslocamento com contacto, a diferença de valores foi significativa, mesmo em regime de baixa frequência.



Figura 2.44 – Observação dos deslocamentos de um viaduto (esq.) e de uma ponte pedonal (dir.) (adaptado de Lee, 2006-a).

Ainda no âmbito da observação de pontes, embora num contexto ligeiramente diferente, os sistemas de visão têm sido utilizados para registar a vibração de estruturas suspensas, nomeadamente dos cabos de suspensão do tabuleiro de pontes (Caetano, 2007; Silva, 2007-a; 2007-b; Ji, 2008).

O princípio de medição baseia-se, basicamente, na análise do fluxo óptico de uma sequência de imagens e respectiva correspondência com o movimento dos pontos de interesse. Deste modo, assumindo que a intensidade da imagem, na zona de interesse, se mantém constante ao longo do tempo, o algoritmo efectua a análise de duas imagens consecutivas, através da aplicação da Equação 2.6, em que I_u , I_v e I_t representam as derivadas parciais em ordem a u , v e t , respectivamente, e u e v representam as coordenadas do ponto na imagem (Figura 2.45).

$$I_u \cdot du + I_v \cdot dv + I_t \cdot dt = 0 \quad (2.6)$$

Dividindo a Equação 2.6 por dt obtém-se a Equação 2.7, em que \dot{u} e \dot{v} representam as componentes de velocidade do ponto de interesse e o vector $[\dot{u}, \dot{v}]^T$ é denominado de vector de fluxo óptico (Ji, 2008).

$$I_u \cdot \dot{u} + I_v \cdot \dot{v} = -I_t \quad (2.7)$$

A implementação do sistema de medição dispensa a utilização de alvos, requerendo, apenas, a selecção dos pontos de interesse e a indicação de um factor de escala, usado para converter os valores de velocidade dos pontos das imagens, de píxeis/segundo para m/s. O factor de escala pode ser obtido a partir de medidas reais das estruturas observadas¹⁷, que incluam também o ângulo de observação para correcção dos erros de perspectiva (Caetano, 2007; Silva, 2007-a).

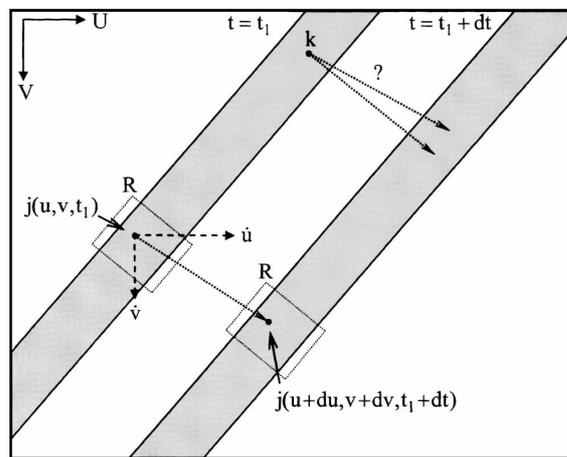


Figura 2.45 – Representação ilustrativa do método do fluxo óptico, com a indicação do movimento do ponto j entre os instantes t_1 e $t_1 + dt$ (Ji, 2008).

O sistema desenvolvido por Silva (2007-a; 2007-b), composto por uma câmara de vídeo, com a resolução de 800 x 600 píxeis e a capacidade de aquisição de 30 imagens por segundo, e por uma óptica varifocal a 50 mm, foi utilizado na observação da ponte sobre o rio Guadiana (Figura 2.46). Posicionado a cerca de 850 m de distância, a imagem adquirida pela câmara abrangia uma área de 112 x 150 metros, tendo sido registados cinco modos de vibração, com frequências entre 0,9 Hz e 4,6 Hz. Os valores de frequência registados são ligeiramente superiores aos registados por acelerómetros (diferença inferior a 0,1 Hz). Para além desta aplicação, são ainda relatados ensaios realizados em duas pontes pedonais, onde é visível o aumento da amplitude de vibração dos tirantes com a entrada dos peões no tabuleiro e as frequências dos modos de vibração diferem a menos de 0,1 Hz dos valores registados pelo acelerómetro montado no cabo de suspensão.

¹⁷ Não é feita qualquer menção ao procedimento utilizado na determinação do factor de escala.



Figura 2.46 – Sistema de visão na posição de observação dos cabos de suspensão da Ponte do Guadiana (esq.) e imagem adquirida com indicação dos pontos analisados (dir.) (Silva, 2007-a).

Entre as limitações mais significativas do sistema de medição são apontadas as condições de iluminação e as condições climáticas adversas (nevoeiro intenso e chuva forte), as quais podem levar à interrupção do funcionamento do sistema de medição.

2.3.5.1 Análise Crítica

Neste momento, atendendo às características e funcionalidades dos sistemas de visão descritos, justificam-se, pelo menos, três observações acerca dos mesmos. Estas estão relacionadas com o tipo de alvo utilizado e com os métodos de calibração e de estimação do movimento do tabuleiro implementados.

Relativamente ao primeiro aspecto, o alvo utilizado pela generalidade dos sistemas de visão é do tipo passivo, isto é, não tem capacidade de gerar radiação própria. Este facto restringe a utilização dos sistemas de medição ao período diurno e a condições de boa visibilidade, limitando, de forma significativa, a sua eficiência e operacionalidade. Para além disso, a relação sinal/ruído da imagem é afectada, em virtude do contraste e do brilho entre as zonas escuras e as zonas claras do alvo dependerem das condições de iluminação existente num dado momento. Isto faz com que o processamento das imagens se torne mais difícil e, conseqüentemente, diminui o grau de exactidão na determinação das coordenadas do alvo na imagem. A iluminação do alvo por meio de fontes de iluminação artificial também não é uma solução adequada, uma vez que a radiação atinge o sensor da câmara de vídeo após sofrer reflexão pela superfície do alvo, fazendo com que as perdas por atenuação e por dispersão sejam muito elevadas. Para além disso, esta solução não permite ajustar o contraste entre as zonas escuras e as zonas claras do alvo às condições de visibilidade, de forma a adequar as características da imagem ao algoritmo de processamento da mesma.

Atendendo a que a monitorização da estrutura é realizada em modo contínuo, propomos que o alvo seja do tipo activo, construído, por exemplo, com recurso a fontes de radiação do tipo LED. Este tipo de componente proporciona elevada fiabilidade e tempo de operacionalidade, é eficiente em termos de consumo de energia e a intensidade de radiação é facilmente modulada, através do controlo da intensidade de corrente de excitação dos LEDs. Para além disso, tratando-se de componentes de pequena dimensão física, este tipo de componente presta-se à construção de alvos com forma geométrica singular (ex. alvos codificados).

O segundo aspecto tem a ver com o método de calibração implementado. Considera-se que este não é adequado uma vez que o modelo adoptado é pouco representativo do sistema de visão, uma vez que não toma em consideração, nem os parâmetros característicos da câmara e do sistema óptico, nem a pose do sistema de visão (cf. Capítulo 3). Na generalidade dos casos, o modelo resume-se a um factor de escala¹⁸, obtido da relação de distância medida entre dois pontos (alvos), no espaço e na imagem. Ignorando a existência de outras fontes de erro, para que este método pudesse ser considerado válido (considerando que a distância focal da óptica e a distância entre o sistema de visão e a zona em observação são elevadas – modelo de projecção ortogonal, cf. Capítulo 3), o movimento do alvo teria de acontecer, exclusivamente, no plano paralelo ao plano da imagem (perpendicular ao eixo óptico); se esta condição não for satisfeita, como é o caso geral, as medições de deslocamento virão afectadas por uma componente de erro.

Os valores de deslocamento registados pelo sistema de visão estão referenciados no sistema de eixos estabelecido no sensor da câmara de vídeo. No entanto, o objectivo é que estes valores estejam referenciados no sistema de eixos estabelecido no tabuleiro. Por este motivo, é necessário que o modelo do sistema de visão incorpore uma componente de transformação de coordenadas que permita transitar do sistema de coordenadas da câmara para o sistema de coordenadas do tabuleiro. Apesar do método de calibração proposto por Lee (2006-a) indiciar alguma dedicação a este tema, ainda assim este não cumpre plenamente todos os requisitos, uma vez que só toma em consideração o efeito de rotação da câmara em torno do eixo óptico.

Relativamente à estimação da trajectória do tabuleiro, na generalidade dos casos, é assumido que o tabuleiro não é sujeito a deslocamento segundo a direcção longitudinal. Isto deve-se ao facto do sistema de medição registar apenas o deslocamento no plano e não no espaço. De facto, nas pontes suspensas, o deslocamento do tabuleiro segundo a direcção longitudinal, normalmen-

¹⁸ Se os píxeis do sensor da câmara de vídeo (ou o equivalente após a digitalização do sinal analógico de vídeo) não possuírem secção quadrada, os factores de escala, segundo cada uma das direcções, serão, naturalmente, diferentes – algo que nem todos os sistemas de medição tomam em consideração.

te, apresenta fraca amplitude. Todavia, como se verá, para garantir o grau de exactidão desejado não se pode menosprezar esta componente do movimento, devendo, por isso, ser medida.

Na Figura 2.47 apresenta-se, de forma simplificada, o efeito induzido no sistema de medição pelo deslocamento do tabuleiro segundo a direcção longitudinal.

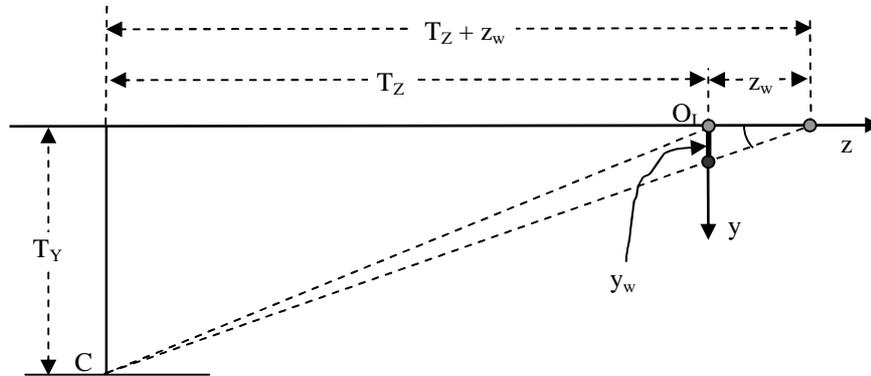


Figura 2.47 – Diagrama representativo do deslocamento vertical aparente induzido no sistema de medição, pelo deslocamento longitudinal do tabuleiro.

Assim, considere-se que o sistema de visão (C) está posicionado nas coordenadas $[0, T_Y, -T_Z]^T$, relativamente ao sistema de coordenadas de referência (O_I), estabelecido no espaço do tabuleiro. Assuma-se que o alvo (tabuleiro), que inicialmente se encontrava nas coordenadas $[0, 0, 0]^T$, se desloca, segundo a direcção longitudinal, para as coordenadas $[0, 0, z_w]^T$, em que $z_w \ll T_Z$.

Da semelhança de triângulos obtém-se a Equação 2.8:

$$y_w = z_w \cdot \frac{T_Y}{T_Z + z_w} \quad (2.8)$$

Como $T_Z + z_w \cong T_Z$, a Equação 2.8 pode-se simplificar de forma a obter-se a Equação 2.9.

$$y_w \cong z_w \cdot \frac{T_Y}{T_Z} \quad (2.9)$$

Como se constata, o deslocamento do tabuleiro segundo a direcção longitudinal induz um deslocamento aparente segundo a direcção vertical, cujo valor é tanto maior quanto maior for esse deslocamento e maior for a relação (em valor absoluto) entre as coordenadas vertical (T_Y) e longitudinal (T_Z) de posição do sistema de visão (C). Embora o tabuleiro se tenha movido apenas na direcção longitudinal, o sistema de visão regista um deslocamento segundo a direcção vertical, o qual, na realidade, não chegou a existir.

No caso particular da P25A, verifica-se que $y_w \cong 0,14 \cdot z_w$, fazendo com que, na ausência de outras fontes de erro e para garantir o valor de exactidão pretendido (± 10 mm), o deslocamento longitudinal deva ser inferior a 71,4 mm. Na figura 2.48 apresentam-se os valores máxi-

mos de deslocamento do tabuleiro da P25A, segundo a direcção longitudinal, registados nos apoios junto dos pilares P1, P2, P5 e P7, do lado Este e do lado Oeste, desde Junho de 2008 até 24 de Setembro de 2009. Embora estes valores tenham sido registados em pilares que se encontram fora da influência directa do vão central, a verdade é que a amplitude destes deslocamentos chega a ser ligeiramente superior a 250 mm. Se tomarmos este valor como referência, verifica-se que não é possível satisfazer o grau de exactidão pretendido fazendo uso de um único sistema de visão.

Ainda neste contexto, o gráfico da Figura 2.49 mostra um caso típico do deslocamento longitudinal do tabuleiro, registado nos apoios dos mesmos pilares (lado Este), em função do tempo, devido à passagem de um comboio. Como se observa, o valor máximo de deslocamento registado é cerca de 70 mm, o que corresponderia ao valor limite, calculado anteriormente, para garantir o grau de exactidão requerido (ignorando outras fontes de erro).

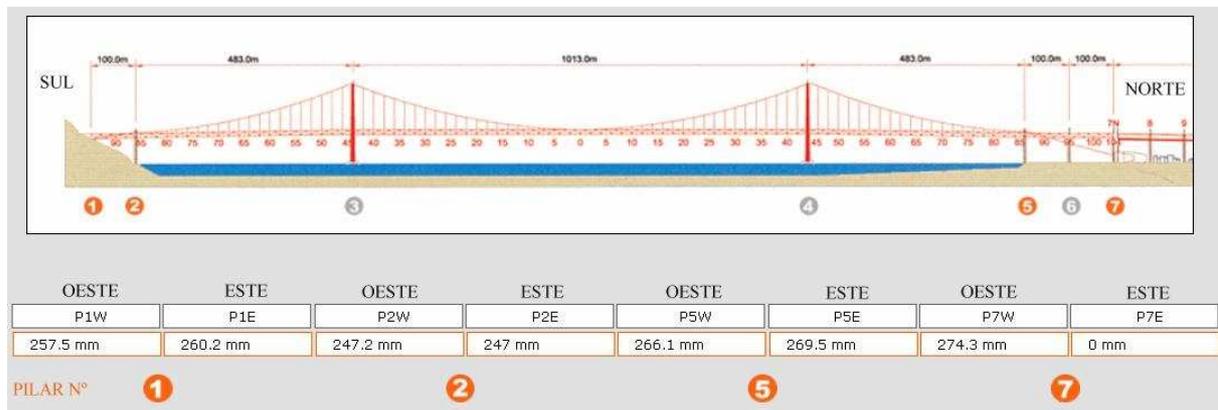


Figura 2.48 – Máximo deslocamento longitudinal do tabuleiro da P25A, registado desde Junho/Julho de 2008 até ao dia 24 de Setembro de 2009, nos apoios dos pilares P1, P2, P5 e P7.

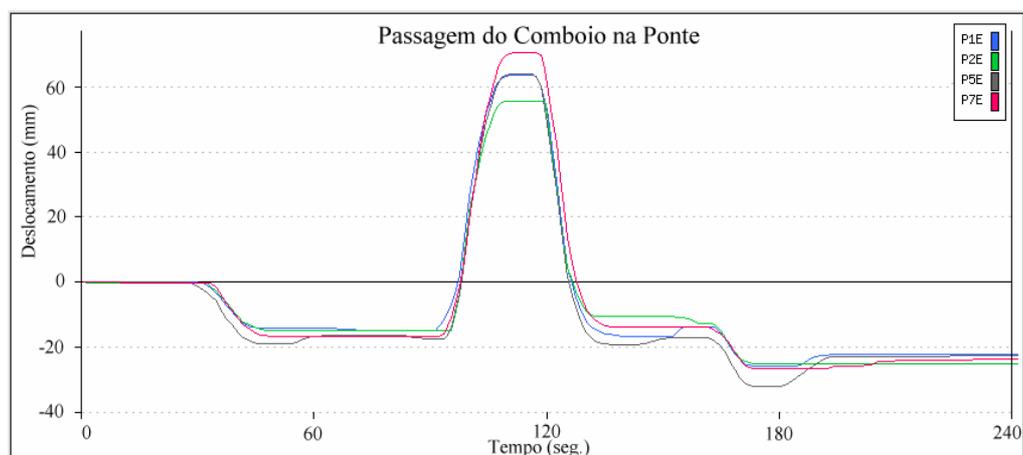


Figura 2.49 – Deslocamento longitudinal do tabuleiro da P25A, registado nos apoios dos pilares P1, P2, P5 e P7 (lado Este), devido à passagem do comboio.

2.4 Conclusões

No presente capítulo, dedicado à temática da observação de grandes obras e, em particular, de pontes suspensas, procurou descrever-se a importância da actividade de observação no âmbito da segurança das obras, dos seus utilizadores e da aquisição de novos conhecimentos científicos para aplicação em projectos futuros.

No âmbito da observação de pontes foram descritos alguns sistemas de medição que satisfazem, ainda que parcialmente, um conjunto de requisitos necessários para a medição dos deslocamentos do tabuleiro. Para cada tipo de sistema de medição foram apresentadas as principais virtudes e limitações, tendo-se concluído que, para o caso específico da medição dos deslocamentos do tabuleiro de pontes suspensas, apesar de algumas limitações, o tipo de sistema mais adequado é o sistema baseado em visão. Esta conclusão advém, principalmente, do princípio de funcionamento dos sistemas de medição alternativos, o qual não se enquadra nas características típicas de uma ponte suspensa, nomeadamente pelo facto do material usado na construção deste tipo de estrutura ser, maioritariamente, o aço, característico por apresentar elevado índice de reflexão electromagnética, e pelo facto destas estruturas apresentarem deslocamentos de grande amplitude (superior a um metro). Como exemplo, salienta-se o facto dos sistemas de medição baseados em visão não serem sensíveis aos efeitos de multi-percurso do sinal, gerado pela reflexão de superfícies reflectoras, como se verifica no caso dos sistemas de medição baseados em GPS. Para além disso, permitem efectuar medições de deslocamento com amplitude de alguns metros e com exactidão e frequência de aquisição elevadas. Em contrapartida, os sistemas de medição baseados em visão necessitam do estabelecimento de uma linha de vista entre o sistema de visão e o alvo, a sua fiabilidade pode ser afectada pelas condições de propagação da atmosfera (ex. nevoeiro, turbulência atmosférica), para poderem operar continuamente é necessário fixar na estrutura alvos de emissão de radiação (alvos activos) e o método de calibração é mais complexo, envolvendo a determinação de vários parâmetros.

A terminar, foi feita uma análise crítica aos sistemas de visão presentemente conhecidos, orientados para a actividade de SHM de pontes, os quais, dadas as suas características, não permitem alcançar os objectivos pretendidos, nomeadamente em termos de exactidão e de observação dinâmica em regime permanente. Os principais aspectos que contribuem para este facto estão relacionados com a concepção do alvo e com as metodologias empregues, tanto no processo de calibração do sistema de medição, como na estimação do movimento da trajectória do tabuleiro.

CAPÍTULO 3

CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE VISÃO

3.1 Introdução

A visão por computador, à semelhança do que acontece à visão humana, tem evoluído no sentido de extrair informação a partir de imagens. Existem muitas aplicações que se enquadram no âmbito da actividade de visão por computador, uma vez que muita da experiência do ser humano está associada a imagens e ao processamento de informação visual (Hartley, 1993).

O estudo da visão por computador surgiu da necessidade de encontrar algoritmos mais simples e mais rápidos de executar do que os utilizados em fotogrametria¹, tendo sido adoptados modelos matemáticos simplificados com sacrifício do elevado grau de exactidão que, habitualmente, caracteriza os processos fotogramétricos de medição. Para este facto contribuíram, essencialmente dois factores (Stein, 1993): i) os equipamentos empregues na área da visão por computador, nomeadamente as câmaras de vídeo e as ópticas, geralmente caracterizam-se por ter baixa resolução, baixa qualidade e serem menos estáveis que os correspondentes equipamentos usados na área de fotogrametria, sendo, por isso, necessário efectuar a sua calibração com maior frequência; ii) o pessoal ligado à visão por computador, geralmente não está familiarizado com as especificidades da fotogrametria e não tem sensibilidade nem está interessado em trabalhar com métodos de calibração laboriosos, como é o caso da fotogrametria.

A calibração² de um sistema de visão consiste em determinar os parâmetros do modelo matemático que relacionam as coordenadas de projecção de um ponto no plano da imagem (2D) com as respectivas coordenadas do ponto que lhe deu origem, posicionado algures no espaço (3D). Mais concretamente, determinar os parâmetros ópticos e geométricos e os parâmetros de posição e de orientação do sistema de visão, baseados num sistema de coordenadas de referência e estabelecido algures no espaço (também, usualmente, denominado de *mundo*) (Sood, 1990). A calibração de um sistema de visão constitui assim a ferramenta base a partir da qual é realizada a

¹ “*Making a computer see was something that leading experts in the field of Artificial Intelligence thought to be at the level of difficulty of a summer’s student’s project back in the sixties. Forty years later the task is still unsolved and seems formidable*” (Olivier Faugeras in Foreword of Hartley, 2003).

² Na verdade, a designação *calibração* presta-se a interpretações dúbias, na medida em que este termo pressupõe um procedimento de comparação das medições obtidas com o sistema em teste com as obtidas por um elemento padrão, detentor de um grau de exactidão superior em pelo menos uma ordem de grandeza. Atendendo à natureza do procedimento, o mais indicado seria adoptar a designação *parametrização*, uma vez que se trata de parametrizar a matriz de projecção do sistema de visão (determinação implícita dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos). Para além disso, na literatura, é prática corrente a adopção da terminologia *câmara calibrada* para referir uma câmara em que são conhecidos os respectivos parâmetros intrínsecos.

reconstrução tridimensional de um objecto, a navegação em ambientes desconhecidos ou, simplesmente, é extraída informação relacionada com o meio que rodeia o sistema de visão como, por exemplo, saber se existem ou não obstáculos no seu campo de vista (Sturm, 1995).

É de referir que a grande maioria dos trabalhos desenvolvidos na área da calibração de sistemas de visão visa aplicações de curta ou muito curta distância entre o objecto e o sistema de visão. Esta particularidade deve-se, em parte, ao facto da comunidade científica que mais se tem dedicado à investigação deste tema ser aquela que está ligada à área da robótica e à visão por computador.

Nos sistemas de medição por meio de visão presentemente conhecidos (cf. Capítulo 2) a calibração do sistema de visão é realizada pressupondo a existência de condições específicas que são difíceis de satisfazer em circunstâncias normais de funcionamento, como por exemplo o restringimento do movimento da estrutura a um plano paralelo ao plano da imagem da câmara. Sendo a calibração do sistema de visão uma componente essencial na observação de estruturas que se encontram a algumas centenas de metros de distância, foi efectuada uma pesquisa de algoritmos e de metodologias de calibração com o intuito de avaliar a sua aplicabilidade à calibração de sistemas de visão dotados com ópticas de grande distância focal. Deste modo, numa primeira fase procurou-se identificar eventuais trabalhos realizados na área de interesse e com potencial para o objectivo que se pretendia alcançar. Não tendo sido alcançado este objectivo, de forma plena, passou-se à fase de avaliação dos algoritmos conhecidos tendo em vista a sua aplicação como plataforma de desenvolvimento de uma metodologia destinada à calibração de sistemas de visão dotados com ópticas de grande distância focal, geralmente utilizados no seguimento de objectos posicionados a longa distância.

Neste capítulo far-se-á a apresentação de alguns dos algoritmos mais representativos, relacionados com a actividade de calibração de sistemas de visão, e explicitar-se-ão alguns resultados das avaliações da sua aplicabilidade ao fim em vista: medição de deslocamentos de estruturas posicionadas a algumas centenas de metros de distância com recurso a ópticas com grande distância focal. No Capítulo 4 dar-se-á continuidade a este tema, através de uma abordagem mais específica, mais direccionada para o problema da calibração de sistemas de visão com grande distância focal, fazendo uso do menor número possível de câmaras e de pontos de controlo.

3.2 Parâmetros Intrínsecos e Extrínsecos

A calibração do sistema de visão, genericamente, envolve a determinação de um conjunto de parâmetros, a partir dos quais é estabelecida uma relação de transformação de coordenadas

entre o espaço (3D) e o plano da imagem (2D). Usualmente, este conjunto de parâmetros é dividido em dois grupos: parâmetros intrínsecos e parâmetros extrínsecos. Do primeiro grupo fazem parte, a distância focal do sistema óptico, as coordenadas do centro óptico (2D), o factor de relação de aspecto (*aspect ratio*) e o factor de ortogonalidade (*skew*)³. Do grupo dos parâmetros extrínsecos constam três ângulos de rotação e três coordenadas de posição. Os parâmetros extrínsecos definem a transformação de corpo rígido entre o sistema de coordenadas associado à câmara e o sistema de coordenadas de referência localizado no espaço Euclidiano 3D.

Os parâmetros intrínsecos, tal como a designação sugere, são característicos do sistema de visão e não variam, nem com a posição, nem com a orientação deste. Por este motivo, uma vez conhecidos os parâmetros intrínsecos do sistema de visão, desde que as características mecânicas e físicas do sistema de visão se mantenham inalteráveis ao longo do tempo, não é necessário efectuar a sua re-calibração.

Contrariamente, os parâmetros extrínsecos, porque incorporam em si a informação de pose do sistema de visão, tomam valores distintos em resultado da mudança de pose do sistema de visão, devendo ser calibrados sempre que se verifique qualquer alteração.

Em aplicações de curta distância são frequentemente utilizadas ópticas com pequena distância focal e grande campo de vista, apresentando, geralmente, distorção radial e tangencial com amplitude não desprezável. Por este motivo, é corrente incluir no procedimento de calibração o cálculo dos coeficientes de primeira e de segunda ordem de distorção radial e, por vezes, também de distorção tangencial. Deste modo, na ausência de distorção do sistema óptico, o procedimento de calibração de um sistema de visão compreende a determinação de onze parâmetros; considerando a existência dos dois tipos de distorção, este número aumenta para quinze.

No entanto, actualmente, com o emergir das câmaras de vídeo digital, nomeadamente do tipo industrial, é usual encontrar câmaras de vídeo em que o píxel do sensor possui secção quadrada, isto é, o factor de relação de aspecto é igual a um. Para além disso, também é usual considerar-se que o parâmetro de ortogonalidade é zero⁴ (Kahl, 1998; Hartley, 2003, Lepetit, 2005). Assim, nestas condições, o número de parâmetros a determinar reduz-se para treze ou nove, consoante inclua ou não os parâmetros de distorção do sistema óptico.

Por vezes, consoante os objectivos que se pretendam alcançar, dispensa-se a determinação dos parâmetros de calibração de forma explícita, bastando a determinação dos parâmetros inter-

³ O factor de relação de aspecto representa a relação entre os factores de escala segundo as direcções horizontal e vertical, enquanto que o factor de ortogonalidade está relacionado com o ângulo formado pelos eixos do sistema de coordenadas estabelecido no sensor da câmara, mais concretamente, o cosseno do ângulo.

⁴ Segundo Lepetit (2005), é *extremamente raro* encontrar câmaras modernas em que o parâmetro de ortogonalidade seja diferente de zero.

médios que resultam da combinação de vários parâmetros do sistema de visão (Stein, 1993). Por exemplo, para determinar a posição de um objecto numa configuração estéreo basta conhecer as matrizes de projecção de cada uma das câmaras (para além da sua projecção nas imagens); já no caso de se pretender determinar a posição das câmaras, no sistema de coordenadas de referência ou relativamente à posição de um objecto, será necessário determinar os seus parâmetros extrínsecos.

3.3 Modelos de Projecção

3.3.1 Formação da Imagem

Normalmente, a câmara é modelada segundo o modelo pontual (*pinhole*) (Figura 3.1). A imagem é formada num plano, denominado de plano da imagem, o qual dista do ponto c_o , denominado de centro óptico ou centro da câmara, de uma distância f , denominada de distância focal do sistema óptico. A linha que passa pelo centro óptico e é perpendicular ao plano da imagem é denominada de eixo óptico, eixo principal ou raio principal, e o ponto de intercepção desta linha com o plano da imagem define o centro da imagem⁵ (ou ponto principal). O plano que passa pelo centro óptico e é paralelo ao plano da imagem é denominado de *plano focal*.

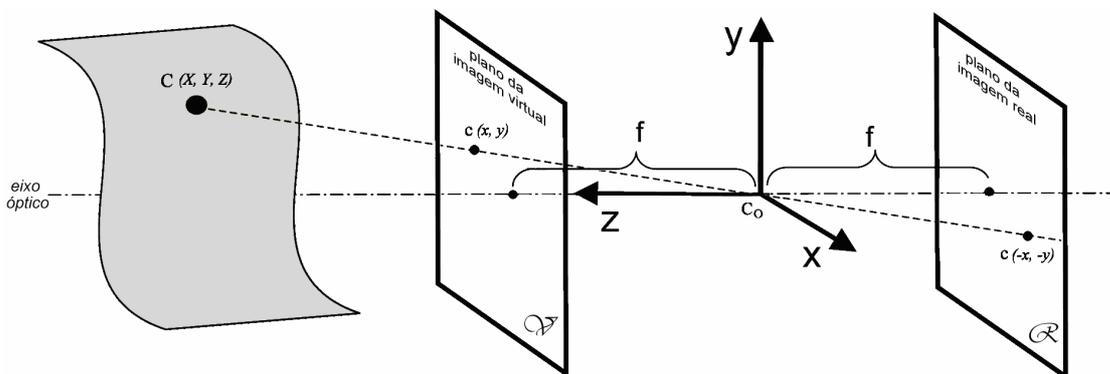


Figura 3.1 – Projecção do ponto C nos planos real e virtual da imagem.

Os pontos situados no plano focal não possuem qualquer imagem no plano da imagem uma vez que qualquer um destes pontos forma com o centro óptico uma linha que é paralela ao plano da imagem e como tal a sua intercepção com este plano só acontece no infinito.

Em teoria, a imagem de um objecto forma-se no plano da imagem, situado por trás do plano focal, aparecendo numa posição invertida relativamente à posição em que é projectado. No entanto, por razões de conveniência, na modelação do sistema óptico é usual recorrer-se à imagem virtual, formada num plano também virtual, situado em frente do plano focal e a uma dis-

⁵ De acordo com Willson (1994), existem outras formas de definir o centro da imagem.

tância f deste (Figura 3.1). O recurso a este último plano torna mais fácil a dedução das equações que relacionam as coordenadas de um ponto no espaço com as respectivas coordenadas de projecção na imagem. Assim, por uma questão de comodidade, daqui por diante designaremos por plano da imagem o plano da imagem virtual.

3.3.2 Perspectiva Central

De entre os vários modelos de projecção existentes, o modelo da perspectiva central é, certamente, o mais utilizado pela comunidade científica da área da visão por computador para caracterizar o sistema de visão⁶. De acordo com o modelo da perspectiva central, um ponto no espaço (3D), com coordenadas homogéneas $C_i = [X_i, Y_i, Z_i, 1]^T_{i=1, \dots, n}$, é projectado no plano da imagem (2D) no ponto de coordenadas homogéneas $c_i = [u_i, v_i, 1]^T_{i=1, \dots, n}$, de acordo com a Equação 3.1, em que λ_i representa um factor de escala, diferente de zero, K representa a matriz dos parâmetros intrínsecos e R/T a matriz dos parâmetros extrínsecos. A matriz dos parâmetros intrínsecos é composta pelos parâmetros de distância focal⁷, f , de ortogonalidade, s , (*skew*), de relação de aspecto (*aspect ratio*), γ , e pelas coordenadas do ponto principal, $[u_0, v_0]^T$ ($\hat{0}$ representa um vector nulo).

$$\lambda_i \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix}}_{c_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} f & s & u_0 \\ 0 & \gamma \cdot f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_K \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & X_0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & Y_0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{R/T} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}}_{C_i} \quad (3.1)$$

$$\lambda_i \cdot c_i = K_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ \hat{0}^T & 1 \end{bmatrix} \cdot C_i$$

A matriz R/T traduz uma transformação de corpo rígido (transformação Euclidiana), com seis graus de liberdade, do sistema de coordenadas do mundo para o sistema de coordenadas da câmara, em que R representa a matriz de rotação e $T = [X_0, Y_0, Z_0]^T$ o vector de posição do sistema de coordenadas do mundo, relativamente ao sistema de coordenadas estabelecido na câmara.

⁶ Por vezes, é usual encontrar na literatura a terminologia *câmara* para designar o sistema composto pela câmara de vídeo e pelo sistema óptico (óptica). Quando esta designação se prestar a interpretação dúbia, em vez desta referir-se-á a *sistema de visão*, no caso de se tratar de configuração monocular (uma unidade), e a *subsistema de visão*, no caso de se tratar de uma configuração multi-sistema de visão (duas ou mais unidades).

⁷ A distância focal, f , é expressa em píxeis e representa a relação entre a distância focal, em unidades métricas, e a dimensão do píxel do sensor da câmara (componente horizontal), também em unidades métricas.

Da combinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos, presentes na Equação 3.1, obtém-se a Equação 3.2, em que P representa a matriz de projecção da câmara de perspectiva central. Como se constata, a matriz de projecção P caracteriza-se por ter 12 graus de liberdade.

$$\lambda_i \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix}}_{c_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix}}_P \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}}_{C_i} \quad (3.2)$$

$$\lambda_i \cdot c_i = P \cdot C_i$$

Importa referir que a Equação 3.2 não contempla a existência de qualquer tipo de distorção do sistema óptico, seja radial ou tangencial.

Dependendo dos objectivos que se pretendam alcançar, a determinação da matriz P pode ser suficiente para o fim em vista. Neste caso, é usual denominar-se o processo de *calibração implícita*, em oposição ao caso em que são determinados os parâmetros intrínsecos e extrínsecos, de forma discriminada – *calibração explícita*. Já a operação de estimação dos parâmetros extrínsecos, quando os parâmetros intrínsecos são conhecidos, é usualmente conhecida como um problema de estimação de pose.

Em termos de propriedades, consideradas as mais importantes, a câmara de perspectiva caracteriza-se por: i) preservar a colinearidade dos pontos; ii) preservar a relação cruzada de comprimentos (*cross ratio*); iii) não garantir que vectores com o mesmo comprimento na imagem tenham necessariamente o mesmo comprimento no mundo, e vice-versa (i.e. a dimensão aparente dos objectos depende da distância a que estão da câmara); e iv) a projecção de duas rectas paralelas no mundo convergirem num ponto da imagem, denominado de ponto de fuga.

3.3.3 Câmara Afim

O modelo de projecção da câmara de perspectiva central é um modelo não linear. Por este motivo, por vezes, quando estão reunidas determinadas condições, este é preterido em favor de modelos lineares de projecção, mais simples, como, por exemplo, o modelo de projecção afim.

O modelo de projecção da câmara afim é um modelo aproximado do modelo de projecção de perspectiva central, o qual, como se verá, representa uma classe generalista de projecções, entre as quais: i) a projecção ortográfica; ii) a projecção de perspectiva fraca; e iii) a projecção de para-perspectiva. Como se mostrará a seguir, no caso dos sistemas de visão dotados de ópticas com grande distância focal, geralmente, é possível adoptar para modelo de projecção o modelo característico da câmara afim. Este modelo de projecção possui propriedades que o tornam atrac-

tivo, indo de encontro às especificidades características da actividade de observação de estruturas, nomeadamente a grande distância entre a câmara e a zona em observação (cf. Capítulo 4).

De acordo com Hartley (2003), o modelo de projecção da câmara de perspectiva central (Equação 3.2) pode ser aproximado pelo modelo de projecção da câmara afim, com ligeira perda de exactidão, se forem satisfeitas as seguintes condições: i) a dimensão do objecto na direcção longitudinal (profundidade) é pequena, comparada com a distância média entre o sistema de visão e o objecto⁸; e ii) a distância de qualquer dos pontos do objecto ao eixo óptico é pequena (ver Capítulo 4).

Estas duas condições são, na generalidade dos casos, satisfeitas quando a distância entre o sistema de visão e o objecto é considerável. Nestes casos, normalmente, a distância focal do sistema óptico é significativa e, conseqüentemente, o campo de vista assim como o campo de profundidade apresentam valores baixos⁹.

O modelo da câmara afim aproxima-se tanto mais do modelo da câmara de perspectiva central quanto maior for a distância do sistema de visão ao objecto, acompanhada pelo aumento da distância focal de forma a cancelar o efeito de aumento da distância, mantendo, aproximadamente, o mesmo campo de vista (Figura 3.2).

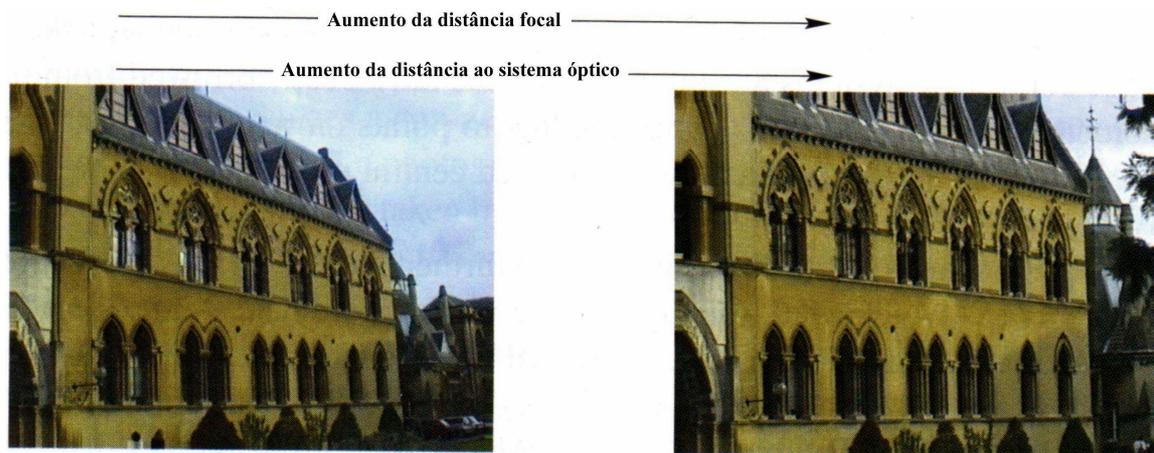


Figura 3.2 – Diminuição do efeito de perspectiva, resultante do aumento da distância focal da óptica e da distância entre a câmara e o objecto, mantendo o mesmo campo de vista (adaptado de Hartley, 2003).

Nestas condições, o erro decorrente da aplicação do modelo aproximado da câmara (modelo afim), em unidades de píxel, é dado pela Equação 3.3 (Figura 3.3) (Hartley, 2003),

$$c_a - c_p = \frac{d}{D} \cdot (c_p - \tilde{x}_0) \quad (3.3)$$

⁸ Tipicamente, uma relação de distâncias superior a 1:10 é suficiente (Shapiro, 2005).

⁹ A título de exemplo, no caso da P25A, a relação entre a distância e o campo de profundidade é superior a 100 e entre a distância e o campo de vista é superior a 80 (considerando uma óptica com distância focal de 600 mm, o sensor da câmara de vídeo com a resolução de 1920 x 1080 píxeis e a dimensão do píxel com 7,4 µm).

em que c_a e c_p representam, respectivamente, as coordenadas de projecção no plano da imagem de uma câmara afim e de uma câmara de perspectiva central, D representa a distância entre o sistema de visão e a origem do sistema de coordenadas do mundo, \tilde{x}_0 as coordenadas do ponto principal, e d a distância de profundidade do objecto, medida a partir da origem do sistema de coordenadas do mundo, na direcção do eixo óptico. O efeito gerado pela adopção do modelo afim corresponde a mover o ponto projectado na imagem, radialmente, afastando-o ou aproximando-o do centro óptico de um factor correspondente a $\left(1 + \frac{d}{D}\right)$ (Hartley, 2003).

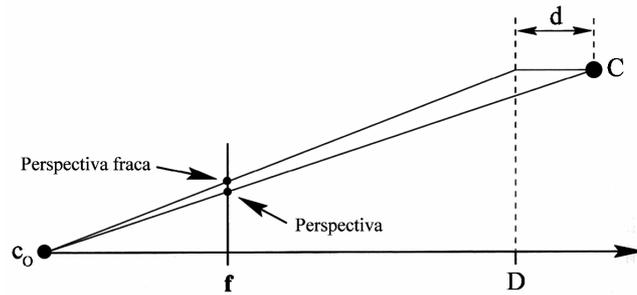


Figura 3.3 – Erro de projecção devido à adopção de um modelo de projecção aproximado (o modelo de perspectiva fraca é um caso particular do modelo da câmara afim).

O modelo da câmara afim, representado através da Equação 3.4, deriva do modelo de projecção da perspectiva central com a inclusão das restrições $p_{31} = p_{32} = p_{33} = 0$.

$$\lambda \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix}}_{c_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{m}_{11} & \tilde{m}_{12} & \tilde{m}_{13} & \tilde{m}_{14} \\ \tilde{m}_{21} & \tilde{m}_{22} & \tilde{m}_{23} & \tilde{m}_{24} \\ 0 & 0 & 0 & \tilde{m}_{34} \end{bmatrix}}_{\tilde{M}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}}_{C_i} \quad (3.4)$$

Contrariamente ao verificado com o modelo da perspectiva central, no caso do modelo da câmara afim, o factor de escala λ é igual para todos os pontos do objecto. Este facto permite que a matriz \tilde{M} possa ser transformada de modo a obter-se $\lambda = 1$, o mesmo é dizer $\tilde{m}_{34} = 1$. Deste modo, fazendo $m_{ij} = \tilde{m}_{ij} / \tilde{m}_{34}$ obtém-se uma forma mais simples de representação da matriz de projecção (Equação 3.5), a qual é caracterizada por ter apenas oito graus de liberdade, em vez dos 12 graus de liberdade da matriz P .

$$\underbrace{\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix}}_{c_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \end{bmatrix}}_M \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}}_{C_i} \quad (3.5)$$

Outra forma de representar o modelo da câmara afim, frequente na literatura, é através da Equação 3.6, a qual traduz o mapeamento linear, em coordenadas não homogêneas, entre o sistema de coordenadas estabelecido no espaço e o sistema de coordenadas estabelecido na câmara. O vector $T = [m_{14}, m_{24}]^T$ representa as coordenadas de projecção da origem do sistema de coordenadas do mundo no plano da imagem (em píxeis)¹⁰.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix}}_{c_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{bmatrix}}_M \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}}_{C_i} + \underbrace{\begin{bmatrix} m_{14} \\ m_{24} \end{bmatrix}}_T \quad (3.6)$$

Considerando que a posição da origem do sistema de coordenadas do mundo, no sistema de coordenadas da câmara, é dada pelo vector $C_0 = [X_0, Y_0, Z_0]^T$, verifica-se que $[u_0, v_0]^T = M \cdot C_0 + [m_{14}, m_{24}]^T$. Fazendo uso deste resultado, a Equação 3.6 pode ser transformada de modo a tomar a forma expressa pela Equação 3.7, em que Δc_i e ΔC_i representam, as coordenadas do ponto i na imagem e no mundo, referenciadas a $[u_0, v_0]^T$ e a $[X_0, Y_0, Z_0]^T$, respectivamente.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} u_i - u_0 \\ v_i - v_0 \end{bmatrix}}_{\Delta c_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{bmatrix}}_M \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix}}_{\Delta C_i} \quad (3.7)$$

$$\Delta c_i = M \cdot \Delta C_i$$

A Equação 3.7 mostra que o posicionamento da origem do sistema de coordenadas do mundo em C_0 tem como consequência o estabelecimento automático da origem do sistema de coordenadas da câmara em c_0 , e vice-versa. À semelhança do modelo da perspectiva central, a matriz de projecção afim, M , também pode ser decomposta em parâmetros intrínsecos e extrínsecos (Equação 3.8), embora nem todos os parâmetros tenham, necessariamente, correspondência directa com os parâmetros característicos da câmara de perspectiva central, como se mostrará adiante.

$$M = \begin{bmatrix} K_{2 \times 2} & \hat{o} \end{bmatrix} \cdot R_{3 \times 3} \quad (3.8)$$

$$K = k_a \cdot \begin{bmatrix} \gamma_a & s_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

¹⁰ Fazendo $c_i = [0,0,0]^T$ obtêm-se as coordenadas de projecção, no plano da imagem, da origem do sistema de coordenadas estabelecido no espaço.

No caso do modelo da câmara afim, o número de parâmetros intrínsecos reduz-se a apenas três, em que k_a representa um factor de escala não nulo, γ_a o factor de relação de aspecto e s_a o factor de não ortogonalidade. Na realidade, o factor de escala k_a congrega em si dois parâmetros, que são a distância focal do sistema óptico, f , e a distância entre a câmara (centro óptico da câmara) e a origem do sistema de coordenadas estabelecido no mundo, Z ¹¹. Neste modelo, o parâmetro relativo ao ponto principal não se encontra definido, uma vez que, como mencionado, as coordenadas deste ponto dependem da escolha particular da posição do sistema de coordenadas do mundo e, como tal, não constitui uma propriedade intrínseca da câmara afim (Hartley, 2003).

O modelo da câmara afim representa o modelo da câmara de perspectiva central com o plano da imagem localizado no infinito (Kahl, 1998). Resulta daqui que a imagem do centro geométrico (centroide) de um conjunto de pontos posicionados no espaço é projectado no centroide das respectivas projecções no plano da imagem. Esta propriedade, que denominamos de *preservação do centroide* (cf. Capítulo 4), constitui um elemento fulcral no desenvolvimento das metodologias de calibração e de seguimento de trajectória, que se descrevem nos Capítulos 4 e 5, respectivamente.

Para além desta propriedade, o modelo de projecção afim possui ainda as seguintes propriedades (Hartley, 2003): i) preserva o paralelismo de rectas e de planos; ii) preserva a relação de áreas e de volumes; iii) preserva a relação de comprimento entre segmentos paralelos ou colineares; iv) preserva a combinação linear de vectores; e v) o plano no infinito no espaço é mapeado na imagem em pontos no infinito¹².

Como mencionado, o modelo da câmara afim representa uma classe generalista de projecções que inclui a projecção ortográfica, a projecção de perspectiva fraca e a projecção de paraperspectiva (Figura 3.4) (Quan, 1996).

3.3.3.1 Projecção Ortográfica

O modelo de projecção ortográfica representa o modelo mais simples. Neste caso, o conjunto de parâmetros intrínsecos resume-se ao parâmetro de relação de aspecto (Equação 3.9).

$$K_{ortho} = \begin{bmatrix} \gamma_a & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

¹¹ $k_a = \frac{f}{Z}$, em que f é expresso em píxeis e Z é expresso em unidades métricas.

¹² Esta propriedade é a justificação para a primeira, uma vez que rectas paralelas no mundo interceptam-se num ponto do plano no infinito e este ponto é mapeado na imagem num ponto no infinito, o que significa que as rectas na imagem terão que ser paralelas.

O parâmetro de relação de aspecto tem correspondência com o respectivo parâmetro do modelo de projecção da perspectiva central (Equação 3.1), i.e. $\gamma = \gamma_a$.

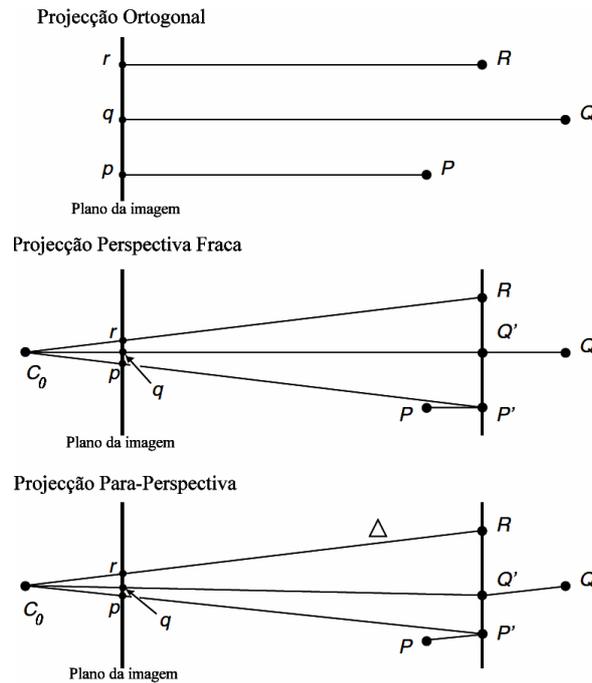


Figura 3.4 – Modelos de projecção no plano da imagem¹³.

3.3.3.2 Projecção de Perspectiva Fraca

No modelo de projecção de perspectiva fraca, numa primeira fase os pontos são projectados ortogonalmente no plano médio e, posteriormente, são projectados no plano da imagem segundo o modelo da perspectiva central. Este modelo de projecção é similar ao modelo de projecção de perspectiva central (Equação 3.1) com a coordenada Z_i , específica de cada um dos pontos, substituída por um valor constante, correspondente à distância média ao conjunto dos pontos.

Neste caso, o conjunto dos parâmetros intrínsecos (Equação 3.10) é representado pelo parâmetro de relação de aspecto, em que $\gamma = \gamma_a$, e pelo factor de escala, k_a , que não tem correspondência directa com o factor de escala do modelo da perspectiva central.

$$K_{weak} = k_a \cdot \begin{bmatrix} \gamma_a & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

O modelo de projecção de perspectiva fraca é também conhecido pela designação de projecção ortográfica escalada (*scaled orthographic projection*).

¹³ <http://decsai.ugr.es/mia/complementario/t1/book3draft/affsfm.pdf>

3.3.3.3 Projecção de Para-Perspectiva

No modelo de projecção de para-perspectiva os pontos são projectados no plano médio, mas segundo a direcção de projecção definida pela linha que une o centro óptico a um ponto de referência¹⁴. Neste caso, assumindo que a direcção de projecção é definida pelos ângulos θ_x e θ_y , a matriz dos parâmetros intrínsecos é dada pela Equação 3.11, em que os parâmetros γ_a e s_a são obtidos por meio das Equações 3.12 e 3.13, respectivamente.

$$K_{para} = k_a \cdot \begin{bmatrix} \gamma_a & s_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\gamma_a = \frac{1 + \cot \theta_x^2}{\sqrt{1 + \cot \theta_x^2 + \cot \theta_y^2}} \cdot \gamma \quad (3.12)$$

$$s_a = \frac{\cot \theta_x \cdot \cot \theta_y}{\sqrt{1 + \cot \theta_x^2 + \cot \theta_y^2}} \quad (3.13)$$

3.4 Algoritmos para Calibração de Sistemas Ópticos

Na literatura encontram-se inúmeras referências relacionadas com o tema da calibração de sistemas de visão, como por exemplo: Tsai, 1987; Huang, 1989; Tomasi, 1992; Hartley, 1992; Sturm, 1995; Quan, 1996; Heihhilä, 1997; Poelman, 1997; Kahl, 1998; Zhang, 1999; Borghese, 2000; Liebowitz, 2001; Wilczkowiak, 2003; Shapiro, 2005; Svoboda, 2005; Wu, 2005.

Atendendo a que o estudo desenvolvido se insere no âmbito da medição de deslocamentos a longa distância, interessava, para este efeito, pesquisar e avaliar a eficiência de algoritmos que se enquadrassem nas características típicas desta área de aplicação. No entanto, os estudos conhecidos nesta área são escassos e, os que existem, normalmente são conduzidos tendo em vista outros objectivos, como por exemplo encontrar uma estimativa da solução que é posteriormente refinada através da aplicação de métodos de cálculo iterativo (Hartley, 2003; Kahl, 1998).

Tendo em vista a aplicação dos conhecimentos desenvolvidos em condições reais, interessava que o algoritmo de calibração fosse eficiente, exequível e requerer o mínimo de informação para a sua concretização. Deste modo, deu-se preferência a algoritmos que permitissem realizar a calibração com o menor número possível de sistemas de visão (um ou dois) e de pontos de controlo.

Na realidade, são conhecidos algoritmos que permitem determinar a globalidade dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos, desde que o número de câmaras seja igual ou superior a três

¹⁴ Poelman (1997) escolheu para ponto de referência o ponto correspondente ao centroide do conjunto de pontos de controlo.

(Quan, 1996; Malis, 2001; 2004; Wilczkowiak, 2003). Em determinados casos é possível realizar a calibração com um número inferior de câmaras, desde que se conheça a estimativa de alguns dos parâmetros intrínsecos – auto-calibração – ou algumas das características do objecto no espaço (ex. ângulos, relação de comprimentos), os quais são usados para formular um conjunto de restrições adicionais (Wilczkowiak, 2001; 2003; Liebowitz, 2001).

3.4.1 Configuração Monocular

Nesta secção descrevem-se, de forma breve, alguns dos algoritmos mais representativos na área da calibração de sistemas ópticos. A variedade de trabalhos publicados nesta área é de tal modo extensa que fazer uma abordagem exhaustiva de todos os algoritmos e suas variantes seria uma tarefa muito difícil de concretizar. Para além disso, em muitos destes casos o princípio subjacente à implementação do algoritmo está, de alguma forma, relacionado com os algoritmos que se apresentam a seguir, constituindo uma extensão do algoritmo original, como é o caso dos algoritmos descritos por Zhang (2001) e por Wu (2005).

3.4.1.1 Algoritmo DLT

O algoritmo DLT (*Direct Linear Transform*) foi primeiramente desenvolvido por fotogrametristas e só posteriormente foi introduzido na área da visão por computador (Lepetit, 2005). A sua formulação matemática baseia-se na denominada condição de colinearidade, traduzida pelo facto dos pontos C , c e c_0 serem colineares (Figura 3.5), a qual permite estabelecer uma relação de colinearidade entre os vectores \overrightarrow{Cc} e $\overrightarrow{cc_0}$ (Abdel-Aziz, 1971).

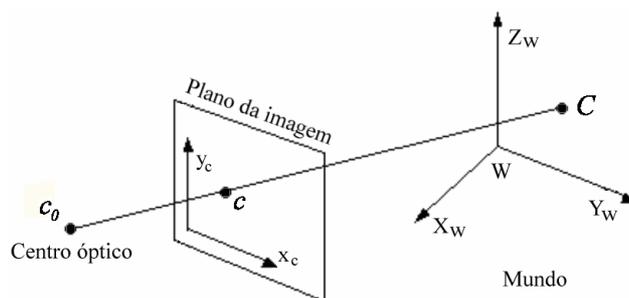


Figura 3.5 – Projecção do ponto C no plano da imagem – colinearidade.

Deste modo, assumindo que as coordenadas do ponto c_0 , no sistema de coordenadas do mundo, são $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ e que as coordenadas do ponto principal são $c = [u_0, v_0]^T$, a partir da condição de colinearidade obtém-se a Equação 3.14, em que f representa a distância focal do sistema óptico, R a matriz de transformação (rotação) de coordenadas, do sistema de coordenadas do mundo para o sistema de coordenadas da câmara e λ_i um factor de escala não nulo.

$$\lambda_i \cdot \begin{bmatrix} u_i - u_0 \\ v_i - v_0 \\ -f \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}}_R \cdot \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Esta equação pode-se simplificar para a forma expressa pela Equação 3.15, em que a P representa a matriz de transformação linear, que relaciona as coordenadas dos pontos de controlo no mundo, C_i , com as respectivas coordenadas de projecção na imagem, c_i .

$$\lambda_i \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix}}_{c_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix}}_P \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}}_{C_i} \quad (3.15)$$

Quanto ao procedimento de calibração, este divide-se, basicamente, em duas fases¹⁵: i) determinação da matriz P ¹⁶; e ii) determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmara, de forma explícita. Assim, eliminando o factor de escala λ_i na Equação 3.15 e expandindo para o caso de b pontos de controlo, obtém-se a Equação 3.16, forma simplificada, em que W representa a matriz das observações, com dimensão $b \times 12$, e p o vector das incógnitas ($p_{11}, p_{12}, \dots, p_{34}$).

$$W \cdot p = 0 \quad (3.17)$$

A solução da Equação 3.16 pode ser obtida através de decomposição de valores próprios (*SVD – Singular Value Decomposition*) da matriz W – vector próprio correspondente ao menor valor próprio. No entanto, a solução trivial ($p_{11} = \dots = p_{34} = 0$), naturalmente não interessa, de modo que Abdel-Aziz propôs a inclusão da restrição adicional $p_{34} = 1$. Contudo, no caso do verdadeiro valor de p_{34} ser próximo de zero, esta restrição introduz uma singularidade na Equação 3.16, sendo preferível, em alternativa, a inclusão da restrição $p_{31}^2 + p_{32}^2 + p_{33}^2 = 1$ (Heikkilä, 1997).

Para a determinação do vector p são necessários, no mínimo, seis pontos de controlo, correspondentes aos onze parâmetros de calibração. Atendendo a que dos onze parâmetros envolvidos apenas nove são independentes, é provável que ocorram dificuldades com algumas configurações de câmaras e de pontos de controlo, mormente quando os pontos de controlo no mundo estão posicionados num mesmo plano (pontos coplanares) ou muito próximo dessa condição

¹⁵ A execução do método DLT pressupõe a existência de um conjunto de pontos de controlo 3D, com coordenadas conhecidas num sistema de referência situado algures no mundo.

¹⁶ Atendendo a que os elementos p_{ij} não têm qualquer significado físico, pode-se considerar que a primeira fase compreende a calibração implícita do sistema de visão (Heikkilä, 1997).

(Fraser, 2005-b); no caso de pontos coplanares, a matriz P torna-se singular. Neste caso, é utilizada a primeira sub-matriz 3×3 , e a estimação é limitada a apenas um subconjunto de parâmetros da câmara (Zollner, 2004). Para além disso, em virtude do algoritmo DLT ignorar duas restrições não lineares na sua formulação, este tem tendência para ser numericamente instável, designadamente em situações de baixa redundância de observações, quando o número de pontos de controlo disponíveis é inferior a cerca de dez (Fraser, 2005-b).

Na prática, a capacidade do algoritmo estimar, em simultâneo, os parâmetros intrínsecos e extrínsecos irá depender, fortemente, da geometria de câmaras e do número de pontos de controlo; enquanto que nos casos mais favoráveis, entre quinze a vinte pontos de controlo poderão ser suficientes para calibrar o sistema de visão, no caso oposto, centenas de pontos poderão não ser suficientes (Lepetit, 2005). Nestes casos, é preferível estimar os parâmetros intrínsecos separadamente.

A segunda fase contempla, como mencionado, a determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmara, de forma explícita, podendo ser executada de forma sequencial, tal como proposto por Abdel-Aziz, ou em simultâneo, segundo proposta de Seedahmed (2002). No segundo caso, o princípio subjacente ao método baseia-se na ligação entre o modelo de projecção da câmara de perspectiva central e o modelo implementado pelo DLT. Para o efeito, segundo o modelo de projecção da câmara de perspectiva, o ponto C_i é projectado no plano da imagem no ponto de coordenadas c_i , de acordo com a Equação 3.17, em que K representa a matriz dos parâmetros intrínsecos, R a matriz de rotação, I_3 a matriz identidade e c_0 as coordenadas do centro óptico da câmara (Hartley, 2003).

$$\lambda_i \cdot c_i = K \cdot R \cdot [I_3 \mid -c_0] \cdot C_i \quad (3.17)$$

Estabelecendo a relação entre as Equações 3.15 e 3.17, obtém-se a Equação 3.18.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}}_D = K \cdot R \quad (3.18)$$

A partir desta, tirando partido do facto da matriz R ser ortonormal, deduz-se a Equação 3.19.

$$D \cdot D^T = K \cdot K^T \quad (3.19)$$

Nesta fase, a factorização de Cholesky aplicada directamente à matriz $D \cdot D^T$ não produz os resultados esperados em virtude de se estar na presença de uma matriz com uma estrutura do tipo superior-inferior ao invés de inferior-superior (Seedahmed, 2002). A solução proposta consiste em inverter a matriz $D \cdot D^T$, aplicar a decomposição de Cholesky à matriz resultante, segui-

da da inversão da matriz obtida da decomposição. Finalmente, após a normalização de modo a obter-se $k_{33} = 1$, obtém-se a matriz dos parâmetros intrínsecos, K .

O algoritmo DLT original não incluía a calibração dos parâmetros de distorção do sistema óptico; só mais tarde, este passou a incluir os referidos parâmetros de distorção radial e tangencial, os quais são determinados por meio de cálculo iterativo (Kwon3D). Neste caso, o número mínimo de pontos de controlo deverá aumentar para sete ou oito, consoante o número de parâmetros de distorção que se pretenda determinar.

3.4.1.2 Algoritmo de Heikkilä

O algoritmo desenvolvido por Heikkilä (1997) é, genericamente, uma extensão do algoritmo DLT, desenvolvendo-se em quatro etapas: as duas etapas típicas do DLT e duas etapas adicionais.

A projecção de uma superfície circular, que não é paralelo ao plano da imagem, utilizando para o efeito o modelo de projecção da perspectiva central, é sujeita a deformação, variando o grau de deformação com a distância e com o ângulo de projecção (Figura 3.6). Assim, uma das etapas incluídas neste algoritmo tem como objectivo efectuar a correcção da distorção gerada pela projecção de superfícies circulares no plano da imagem.

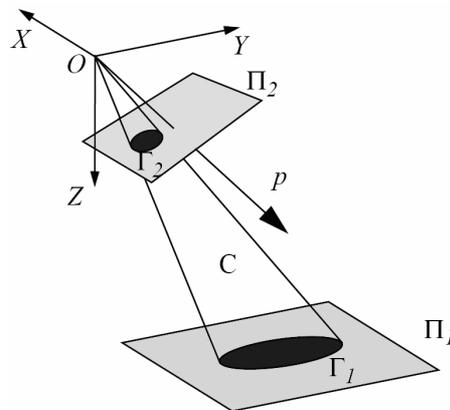


Figura 3.6 – Projecção de uma superfície circular no plano, segundo o modelo da perspectiva central (adaptado de Heikkilä, 1997)

A outra etapa acrescentada visa modelar a distorção do sistema óptico e a determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos por meio de métodos de cálculo iterativo, do tipo Levenberg-Marquardt (LM). Neste caso, os valores iniciais usados no processo de cálculo iterativo são os obtidos da aplicação do algoritmo DLT.

Refira-se que a realização destas duas etapas adicionais só se justifica no caso de sistemas de visão dotados de ópticas com grande angular, pequena distância focal, dispensando-se no caso de câmaras de projecção ortogonal, uma vez que o efeito de distorção, tanto da superfície esféri-

ca, gerado pelo modelo de projecção de perspectiva central, como do sistema óptico (grande distância focal) são desprezáveis.

3.4.1.3 Algoritmo de Tsai

O algoritmo desenvolvido por Tsai surgiu da necessidade de encontrar um método que permitisse realizar a calibração de câmaras de uso corrente (*off-the-shelf*) de forma autónoma, expedita, versátil, e que, simultaneamente, pudesse ser executada por pessoal não necessariamente qualificado (Tsai, 1987). Assim, para efectuar a calibração do sistema de visão, na sua forma mais simples, basta dispor de um conjunto de pontos de controlo dispostos num plano (pontos coplanares), denominado de painel de calibração. Neste caso, uma vez que os pontos de controlo não fornecem informação de profundidade, não será possível determinar o factor de escala horizontal (s_x)¹⁷ (Tsai, 1987; Horn, 2000). De forma a evitar a criação de dependência linear entre a distância focal (f) e a posição da câmara segundo a direcção longitudinal (Z_C), o painel de calibração não pode ser posicionado de modo a este ficar paralelo ao plano da imagem (Horn, 2000). A exactidão melhora quando os vários pontos de controlo estão posicionados a diferentes profundidades, devendo rodar-se o painel de calibração em torno do eixo vertical, relativamente ao plano da imagem, para alcançar este objectivo (Horn, 2000). Para além disso, é necessário que a projecção da origem do sistema de coordenadas estabelecido no mundo (painel de calibração) se encontre afastada da origem e do eixo vertical do sistema de coordenadas da câmara, de modo a que a componente de posição Y_C seja diferente de zero; no caso de Y_C ser zero é necessário modificar o algoritmo (Tsai, 1987).

No caso de se pretender calibrar o parâmetro s_x é necessário dispor de um painel tridimensional de calibração (Figura 3.7), ou então usar o painel de calibração, mas posicionado a diferentes profundidades. Neste último caso, o processo de calibração torna-se mais complexo, em virtude da variação dos parâmetros extrínsecos da câmara.

O princípio subjacente ao presente algoritmo baseia-se no conceito de alinhamento radial, em que a direcção do vector $\overrightarrow{C_z C}$ permanece invariável e alinhada radialmente com os vectores $\overrightarrow{O c_d}$ e $\overrightarrow{O c_u}$, independentemente do valor de distorção radial (Figura 3.8), em que c_d e c_u representam as coordenadas de projecção no plano da imagem do ponto C , com e na ausência de distorção radial, respectivamente. Na aplicação deste algoritmo é assumido não existir distorção tangencial.

¹⁷ A existência deste factor de escala deve-se ao facto da frequência de amostragem da placa de aquisição do sinal de vídeo (*frame grabber*) na direcção horizontal ser, habitualmente, diferente do espaçamento entre os píxeis do sensor da câmara e, adicionalmente, não ser conhecida com elevado grau de exactidão Horn (2000).

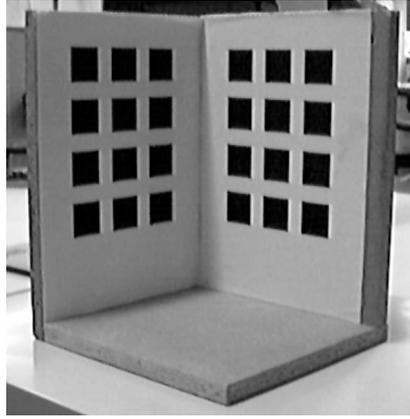


Figura 3.7 – Painel tridimensional de calibração (Tapper, 2002).

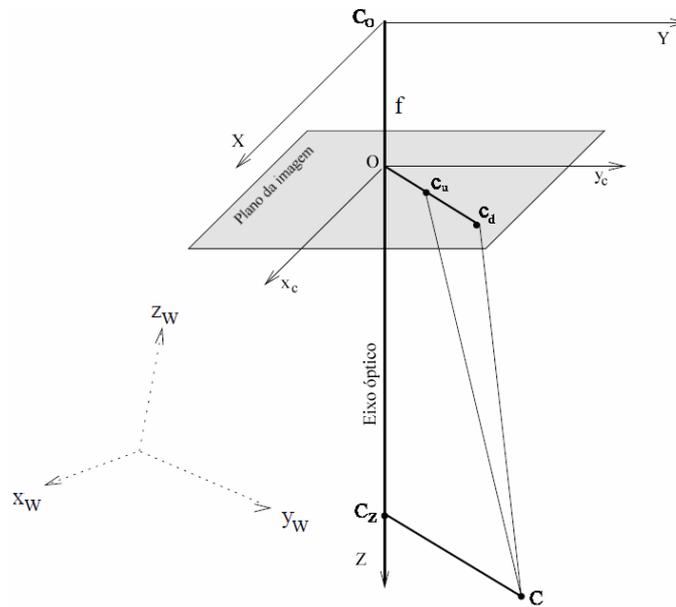


Figura 3.8 – Alinhamento radial entre os vectores $\overrightarrow{Oc_d}$, $\overrightarrow{Oc_u}$ e $\overrightarrow{C_zC}$, na presença de distorção radial (adaptado de Zollner, 2004).

O algoritmo desenvolve-se em duas fases, sendo a primeira relativamente rápida a executar, uma vez que se trata da resolução de um sistema de equações lineares cujas entradas (observações) são as coordenadas dos pontos de controlo no painel (espaço) e as respectivas coordenadas de projecção na imagem (Tapper, 2002). Para a resolução do sistema de equações são necessários pelo menos cinco pontos de controlo¹⁸, não sendo, contudo, necessário conhecer os valores iniciais dos parâmetros de calibração. Assim, na primeira fase, através da aplicação da restrição de paralelismo e ignorando o efeito de distorção do sistema óptico, é determinada a matriz de rotação R e duas das componentes do vector de translação¹⁹, X_C e Y_C . A segunda fase contempla,

¹⁸ No caso de se pretender calibrar o parâmetro s_x é necessário dispor de pelo menos sete pontos de controlo, não coplanares.

¹⁹ Tapper (2002) inclui na primeira fase de cálculo do algoritmo a determinação, grosseira, da distância focal f e da componente Z_C .

numa primeira etapa, a determinação dos parâmetros f e Z_C , através da resolução de um conjunto de equações lineares e, finalmente, a avaliação de todos os parâmetros, através de um processo de cálculo de optimização²⁰, em que os valores iniciais são as estimativas obtidas anteriormente (o valor inicial do coeficiente de distorção radial, k_1 , é zero).

Como mencionado, o presente algoritmo possibilitou que câmaras de uso corrente pudessem ser calibradas por utilizadores pouco qualificados nesta área e sem recorrer a meios dispendiosos. Uma das particularidades das câmaras de uso comum (inclui a óptica), em parte, decorrente do facto de serem económicas, apresentam distorção significativa, principalmente radial, a que o presente algoritmo procurou dar resposta. Todavia, este algoritmo não permite determinar as coordenadas do ponto principal, assumindo-se que este se encontra posicionado no centro da imagem. Para além disso, na versão planar (um único plano de calibração), o algoritmo também não permite determinar o factor de escala horizontal (s_x)²¹.

Na sequência de testes efectuados com imagens reais, Zollner (2004) reporta que o algoritmo de Tsai apresenta pior desempenho do que o DLT; no final do processo de calibração o erro final global foi de 0,8974 píxeis, no caso do algoritmo de Tsai, contra 0,0985 píxeis, no caso do DLT.

3.4.1.4 Algoritmo de Zhang

O algoritmo de Zhang, na sua forma mais simples, requer um conjunto de pontos de controlo, dispostos num painel de calibração, os quais devem ser observados pela câmara de diferentes orientações (mínimo de três) não paralelas entre si ou ao plano da imagem. Imagens do painel de calibração em posições paralelas entre si ou ao plano da imagem resultam em redundância, uma vez que estas originam dependência linear entre os vectores da matriz de rotação. Tanto a câmara como o painel de calibração são livres de se movimentarem no espaço, não sendo necessário conhecer o respectivo movimento de translação e de rotação (Zhang, 1999; 2000; 2002).

O algoritmo desenvolve-se, genericamente, em duas fases. Na primeira fase é determinada uma solução analítica com base no conhecimento da posição dos pontos de controlo (no plano) e das respectivas projecções na imagem. A segunda fase contempla o refinamento da solução encontrada anteriormente e a determinação dos dois coeficientes de distorção radial, através da aplicação de métodos de cálculo de optimização não linear, baseados no critério de máxima verosimilhança.

²⁰ Nesta fase, Zollner (2004) aplicou um método de cálculo de optimização não linear, tendo usado um modelo reduzido da câmara para que o processo de cálculo fosse mais rápido.

²¹ Lenz (1987), apresenta um método, autónomo, para a calibração do parâmetro s_x e das coordenadas do ponto principal.

A partir do conhecimento das coordenadas dos pontos de controlo, no sistema de coordenadas estabelecido no painel de calibração, e das respectivas projecções na imagem, é estimada a matriz de transformação homográfica (H). Dado que os pontos de controlo são coplanares, é convencionalmente que a componente de profundidade (Z) é nula e, deste modo, é formulada a Equação 3.20, em que λ representa um factor de escala não nulo, h_i a coluna i da matriz homográfica, r_i a coluna i da matriz de rotação, T o vector de posição e K a matriz dos parâmetros intrínsecos.

$$[h_1 \ h_2 \ h_3] = \lambda \cdot K \cdot [r_1 \ r_2 \ T] \quad (3.20)$$

Fazendo uso da propriedade de ortogonalidade da matriz de rotação, é formulado o sistema de equações descrito por:

$$\begin{cases} r_1^T \cdot r_2 = 0 \Leftrightarrow (K^{-1} \cdot h_1)^T \cdot (K^{-1} \cdot h_2) = 0 \\ r_1^T \cdot r_1 = r_2^T \cdot r_2 \Leftrightarrow (K^{-1} \cdot h_1)^T \cdot (K^{-1} \cdot h_1) = (K^{-1} \cdot h_2)^T \cdot (K^{-1} \cdot h_2) \end{cases} \quad (3.21)$$

o qual, após simplificação, toma a seguinte forma expressa pela Equação 3.22, e em que $\omega = (K \cdot K^T)^{-1}$ representa a imagem da cónica absoluta (*IAC – Image of the Absolute Conic*)²².

$$\begin{cases} h_1^T \cdot K^{-T} \cdot K^{-1} \cdot h_2 = 0 \\ h_1^T \cdot K^{-T} \cdot K^{-1} \cdot h_1 - h_2^T \cdot K^{-T} \cdot K^{-1} \cdot h_2 = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} h_1^T \cdot \omega \cdot h_2 = 0 \\ h_1^T \cdot \omega \cdot h_1 - h_2^T \cdot \omega \cdot h_2 = 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

Atendendo a que a matriz representada por ω é simétrica, o vector-solução tem dimensão seis. Uma vez que cada imagem contribui com duas equações, para a determinação da solução, a menos de um factor de escala, são necessárias, no mínimo, três imagens. Com apenas duas imagens ainda é possível determinar a solução, desde que se imponha uma restrição adicional – normalmente considera-se que o parâmetro de ortogonalidade (s) é nulo. A determinação da matriz K é determinada por meio de factorização de Cholesky.

Encontrados os parâmetros intrínsecos, e uma vez que a matriz homográfica correspondente a cada uma das imagens é conhecida, determinam-se os respectivos parâmetros extrínsecos, para cada pose do plano de calibração, através da aplicação da Equação 3.20.

A segunda fase contempla o refinamento de todos os parâmetros encontrados e a determinação dos dois coeficientes de distorção radial, por meio de cálculo de optimização não linear, aplicado ao conjunto das imagens adquiridas.

²² A cónica absoluta é uma curva de segundo grau, definida pelas seguintes condições $X^2 + Y^2 + Z^2 = 0 \wedge T = 0$, posicionada no plano no infinito e composta unicamente por pontos complexos. A imagem da cónica absoluta é uma cónica composta, igualmente, por pontos complexos, a qual depende, apenas, dos parâmetros intrínsecos da câmara (não depende da pose da câmara).

Seguidamente, apresentam-se alguns resultados obtidos de testes, realizados por meio de simulação numérica e em modelo físico, os quais foram executados tendo em vista a avaliação da eficiência do algoritmo de Zhang em condições de curta (< 3 m) e de longa distância (≈ 400 m). Os ensaios foram conduzidos no sentido de avaliar, fundamentalmente, a eficiência do algoritmo na determinação dos parâmetros intrínsecos do sistema de visão.

Uma forma de observar o comportamento instável do algoritmo, quando aplicado a condições de longa distância, consiste em fazer variar, apenas, a resolução das coordenadas de projecção dos pontos de controlo na imagem²³. Assim, considerando os parâmetros de referência descritos na Tabela 3.1 ($s = 0$ e $\gamma = 1$), foram geradas as coordenadas de projecção dos pontos de controlo na imagem, com base no modelo de projecção da câmara de perspectiva (por meio de simulação numérica). Seguidamente, utilizando estes dados como entrada do algoritmo, para cada caso foram determinados os parâmetros intrínsecos e o respectivo vector de translação²⁴, os quais constam nas Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.1 – Parâmetros intrínsecos e extrínsecos, de referência, empregues em dois casos de estudo.

	T_x (m)	T_y (m)	T_z (m)	f (píxeis)	Quadrado (mm)	Resolução horizontal (píxeis)	Resolução vertical (píxeis)	Píxel (μ m)	θ ($^\circ$)	ϕ ($^\circ$)	ψ ($^\circ$)	u_0 (píxeis)	v_0 (píxeis)
1º Caso	0	0	1	590,9	80	720	576	11	-45, ..., 45	-45, ..., 45	0	360	288
2º Caso			500	58181,8	200								

Tabela 3.2 – Parâmetros intrínsecos e extrínsecos obtidos da calibração efectuada a 1 m de distância da câmara, em função da resolução das coordenadas de projecção dos pontos de controlo²⁵.

Resolução (píxeis)	T_x (mm)	T_y (mm)	T_z (mm)	f_u (píxeis)	f_v (píxeis)	s	u_0 (píxeis)	v_0 (píxeis)
0,00001	0,00	0,00	1000,0	590,9	590,9	0,0000	360,0	288,0
0,0001	0,00	0,00	1000,0	590,9	590,9	0,0000	360,0	288,0
0,001	0,00	0,00	1000,0	590,9	590,9	0,0000	360,0	288,0
0,01	0,00	0,00	1000,0	590,9	590,9	0,0000	360,0	288,0
0,1	-0,01	0,00	999,8	590,8	590,8	0,0000	360,0	288,0

Como se constata, a um metro de distância, a redução de cinco ordens de grandeza na resolução das coordenadas de projecção dos pontos de controlo na imagem não produziu efeito signi-

²³ O efeito de truncagem no valor das coordenadas de projecção na imagem dos pontos de controlo é modulado sob a forma de ruído.

²⁴ Na determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos foi usada a aplicação informática desenvolvida por Zhang, descarregada a partir de: <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/zhang/calib/>.

²⁵ De acordo com a simbologia que tem vindo a ser usada, se considerarmos que f_u representa o parâmetro f (Equação 3.1), então o parâmetro $(\gamma \cdot f_u)$ é representado por f_v .

ficativo. No entanto, no caso de longa distância este efeito começou logo a fazer-se sentir com uma resolução da ordem de 10^{-5} píxeis, tornando-se evidente quando a resolução decresceu para valores da ordem de 10^{-3} píxeis.

Tabela 3.3 – Parâmetros intrínsecos e extrínsecos obtidos da calibração efectuada a 500 m de distância da câmara, em função da resolução das coordenadas de projecção dos pontos de controlo.

Resolução (píxeis)	T_x (mm)	T_y (mm)	T_z (mm)	f_u (píxeis)	f_v (píxeis)	s	u_0 (píxeis)	v_0 (píxeis)
0,00001	0,00	-0,17	500004	58182,3	58182,3	-0,0003	360,0	288,0
0,0001	0,00	-1,33	500031	58185,4	58185,4	0,0000	360,0	288,2
0,001	-0,02	-0,83	499891	58169,2	58169,1	-0,0264	360,0	288,1
0,01	7,65	-0,78	503966	58642,7	58644,1	0,0046	359,1	288,1
0,1	197,88	-36,92	489579	56979,2	56965,3	-0,1460	337,0	292,3

Para a realização dos ensaios em modelo físico utilizou-se uma câmara de vídeo analógico com a resolução de 720 x 576 píxeis. Na primeira fase, os testes foram realizados a curta distância, com o painel de calibração posicionado a uma distância da câmara entre 0,75 m e 3 m (valores aproximados); seguiu-se um teste de calibração realizado no exterior, em ambiente aberto, com o painel de calibração posicionado a cerca de 400 m de distância da câmara de vídeo.

Para os testes de curta distância usou-se um painel de calibração composto por 10 x 8 quadrados com 60 mm de lado, correspondentes a 63 pontos de controlo (Figura 3.9), enquanto que no teste de longa distância foi usado um painel de calibração formado por 8 x 6 quadrados, com 150 mm de lado (Figura 3.10). No ensaio de curta distância, foi utilizada uma óptica com 6,5 mm de distância focal, enquanto que no caso de longa distância esta foi substituída por uma outra óptica com a distância focal de 640 mm²⁶.

Na Tabela 3.4 apresentam-se alguns dos resultados obtidos para os parâmetros intrínsecos, em função da distância (aproximada) entre o painel de calibração e a câmara. Da análise dos resultados conclui-se que estes tendem a degenerar com o aumento de distância.

Tabela 3.4 – Parâmetros intrínsecos obtidos da calibração efectuada com modelo físico, a diferentes distâncias da câmara.

Distância	f_u (píxeis)	f_v (píxeis)	s	u_0 (píxeis)	v_0 (píxeis)	k_1	k_2
0,75 m	592,78	622,05	- 0,3485	369,79	291,67	- 0,2216	0,0650
2 m	612,64	643,06	0,1844	373,60	299,55	0,0867	2,3908
3 m	619,05	649,65	0,2550	375,24	305,84	-0,2404	0,8084
400 m	5857,30	6206,30	-59,104	3315,56	2183,59	---	---

²⁶ Atendendo a que a dimensão do píxel do sensor da câmara é 11 μ m (especificação do fabricante), daqui resulta que a distância focal da óptica de 6,5 mm é 590,9 píxeis e da óptica de 640 mm é 58181,8 píxeis.

No modelo de projecção de perspectiva central, quando os movimentos da câmara (ou do objecto) são pequenos comparativamente à distância entre a câmara e o objecto, os efeitos decorrente do movimento de rotação podem ser confundidos com os gerados pelo movimento de translação, e vice-versa. Uma rotação de pequena amplitude em torno do eixo vertical e um pequeno movimento de translação ao longo do eixo horizontal podem gerar na imagem alterações similares (Tomasi, 1992). Embora, em termos de cálculo seja possível diferenciar e reconstruir os dois tipos de movimento, na prática constata-se que esta operação é, naturalmente, sensível à presença de ruído, como se constatou dos testes realizados.

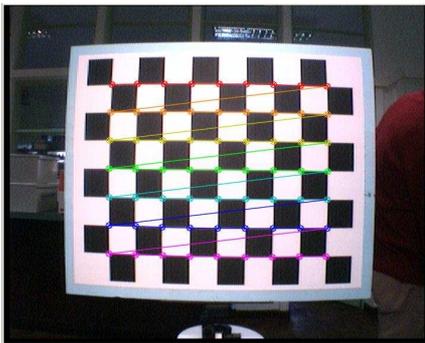


Figura 3.9 – Imagem do painel de calibração (10x8 quadrados com 60 mm de lado), adquirida à distância aproximada de 0,75 m.



Figura 3.10 – Imagem do painel de calibração (8x6 quadrados com 150 mm de lado), adquirida à distância aproximada de 400 m.

Como mencionado, imagens do plano de calibração em poses paralelas entre si geram apenas redundância. Na presença de um modelo de projecção ortogonal, como é habitualmente o caso em longa distância, a rotação do plano de calibração dá origem a imagens redundantes, sem informação de profundidade como é requerido pelo algoritmo. Na Figura 3.11 apresentam-se algumas imagens adquiridas de um plano de calibração, posicionado a cerca de 58 m de distância da câmara, para diferentes poses. Como se observa, a rotação do plano de calibração em torno dos eixos vertical e horizontal tem como efeito a contracção do plano de calibração na direcção perpendicular à do eixo de rotação, preservando, contudo, o paralelismo das rectas na imagem (aproximadamente), característica do modelo de projecção afim.

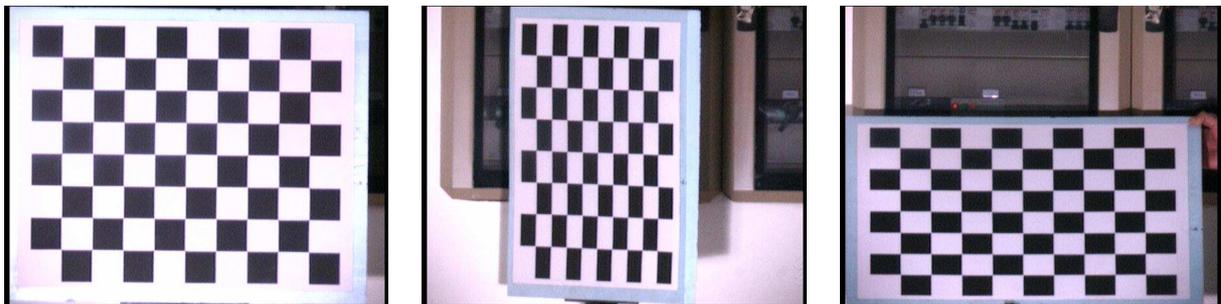


Figura 3.11 – Imagens do painel de calibração (10x8 quadrados com 60 mm de lado), adquiridas à distância aproximada de 58 m: (esq.) pose frontal; (centro) rotação em torno do eixo vertical; (dir.) rotação em torno do eixo horizontal.

3.4.2 Configuração Multi-Câmara

Uma particularidade comum aos métodos de calibração descritos anteriormente é o facto de todos eles necessitarem de um conjunto de pontos de controlo com coordenadas conhecidas. Em alguns casos este requisito é simplificado, uma vez que basta conhecer as coordenadas dos pontos de controlo no plano. Todavia, ainda assim, este requisito torna os métodos de calibração de sistemas monoculares desadequados quando se pretende realizar a calibração dos sistemas de visão de forma autónoma, ou quando as condições existentes não permitem conhecer as coordenadas dos pontos de controlo (ex. objecto em movimento permanente).

A possibilidade de se poder calibrar o sistema de visão utilizando apenas a informação disponibilizada pelas imagens adquiridas, não se conhecendo nada acerca do mundo (objecto) nem acerca da pose das câmaras, ganha uma importância acrescida. Tipicamente, o problema que se coloca é o de encontrar as matrizes de projecção de cada uma das câmaras e a estrutura do objecto (coordenadas dos pontos de controlo que compõem o objecto) – parâmetros de saída – a partir do conhecimento da projecção do objecto nas várias imagens, ou numa sequência de imagens – parâmetros de entrada.

Nos sistemas multi-câmara, o processo de calibração, habitualmente, desenvolve-se ao longo de uma sequência de estágios, cada um dos quais visa reduzir o número de ambiguidades da solução até se alcançar o estágio final, que é o estágio de reconstrução Euclidiana. Este procedimento, conhecido genericamente por estratificação (*stratification*), normalmente, começa com uma reconstrução projectiva, é rectificadora para afim e termina no estágio de reconstrução Euclidiana. No caso particular de câmaras afim, o procedimento de calibração é mais simples, uma vez que o primeiro estágio de reconstrução já é afim.

A passagem de um estágio de reconstrução para o seguinte (rectificação) é conseguida, habitualmente, através da incorporação de informação conhecida relativa a parâmetros característicos das câmaras e ou do objecto (ex. ângulos e relação de comprimentos dos objectos), isto é, o conhecimento de alguns dos parâmetros das câmaras e ou do objecto permite formular um conjunto de restrições com vista à determinação dos restantes parâmetros.

Independentemente do tipo de câmara presente, a obtenção da solução inicial, relativa ao primeiro estágio de reconstrução, geralmente é obtida com base na aplicação da restrição epipolar (*epipolar constraint*) (Hartley, 1992; Cerveri, 1998; Borghese, 2000; Hartley, 2003) ou do método de factorização (Tomasi, 1992; Quan, 1996; Kahl, 1998; Svoboda, 2005), aplicado à matriz das observações, a qual incorpora em si a informação de correspondência das projecções de um dado ponto entre as várias imagens.

3.4.2.1 Restrição Epipolar

A restrição epipolar está relacionada com o facto de um ponto no mundo (C), a sua projecção em duas imagens (c_L e c_R) e os centros ópticos das duas câmaras (c_{OL} e c_{OR}) estarem no mesmo plano, denominado de plano epipolar (Figura 3.12). Assim, conhecidas as coordenadas de projecção de um conjunto de pontos de controlo em duas imagens e a respectiva correspondência entre as imagens é possível determinar, a menos de um factor de escala, a orientação e a posição de uma das câmaras relativamente ao sistema de coordenadas estabelecido na outra (sistema de referência), (Hartley, 1992; Cerveri, 1998; Borghese, 2000). As imagens podem ser obtidas com uma única câmara, a partir de duas poses distintas, ou utilizando duas câmaras, geralmente fixas²⁷. No entanto, dadas duas imagens de um objecto, a sua estrutura é recuperada, somente, a menos de uma transformação projectiva, no caso de câmaras de perspectiva, ou a menos de uma transformação afim, na presença de câmaras afim.

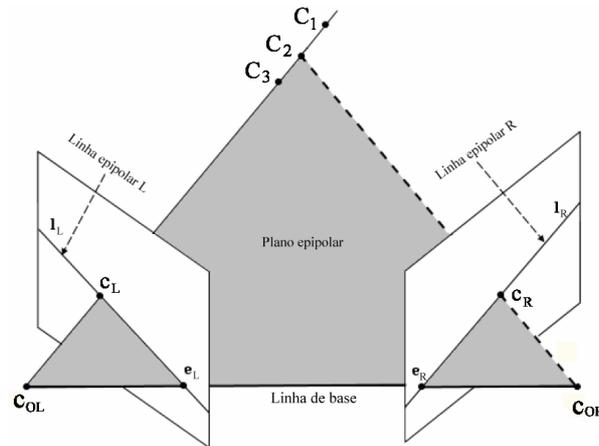


Figura 3.12 – Geometria e restrição epipolar.

A restrição epipolar é traduzida pela Equação 3.23, em que F representa a matriz fundamental, com oito graus de liberdade, e c_L e c_R representam as coordenadas homogêneas de projecção do ponto de controlo C nas câmaras L e R

$$c_L^T \cdot F \cdot c_R = 0 \quad (3.23)$$

Assim, conhecidas as coordenadas de projecção de um conjunto de pontos de controlo nas duas imagens L e R é possível construir um sistema de equações lineares, traduzido pela Equação 3.24, em que W representa a matriz das observações e g o vector das incógnitas (entradas da matriz $F_{3 \times 3}$).

$$W \cdot g = 0 \quad (3.24)$$

²⁷ O algoritmo pode ser aplicado a qualquer número de câmaras, através do emparelhamento de uma das câmaras, seleccionada para câmara de referência, com todas as restantes. No caso de três ou mais câmaras, o algoritmo é executado sobre cada par de câmaras, composto pela câmara de referência e cada uma das restantes.

Atendendo a que o *rank* da matriz F é no máximo oito, a determinação da solução é conseguida a menos de um factor de escala, sendo, por isso, necessário impor uma condição adicional para evitar a solução trivial; especificamente $\|g\|=1$, em que $\|g\|=g^T \cdot g$ representa a norma de g . Por este motivo, a determinação da matriz F pressupõe a existência de pelo menos oito pontos de controlo (Hartley, 1997-a; Zezhi, 2000; Gracias, 2007; Noury, 2007). Contudo, atendendo a que existe a possibilidade das observações estarem afectadas com ruído, de modo a reduzir o seu efeito é conveniente utilizar um número superior de pontos²⁸.

A adopção do sistema de coordenadas de uma das câmaras para sistema de coordenadas de referência (e do mundo) permite formular a Equação 3.25 a qual relaciona a matriz fundamental com as matrizes dos parâmetros intrínsecos de ambas as câmaras e de pose de uma delas relativamente à pose da câmara de referência, em que a matriz S é dada pela Equação 3.26.

$$F = K_2^{-T} \cdot R \cdot S \cdot K_1^{-1} \quad (3.25)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -T_z & T_y \\ T_z & 0 & -T_x \\ -T_y & T_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Assim, partindo do princípio de que os parâmetros intrínsecos das duas câmaras (K_1 e K_2) são conhecidos, através de uma transformação de coordenadas, a matriz fundamental converte-se na denominada matriz essencial (E) e a Equação 3.25 toma a seguinte forma:

$$E = R \cdot S \quad (3.27)$$

Da decomposição da matriz E em valores próprios (*SVD – Single Value Decomposition*) obtêm-se quatro soluções, representadas pela Equação 3.28, em que U e V representam as duas matrizes ortogonais resultantes da decomposição SVD e Q é a matriz representada pela Equação 3.29. Das quatro soluções obtidas, somente uma é a verdadeira (Hartley, 1992).

$$\begin{cases} [R|T]_1 = [U \cdot Q \cdot V^T & | & U \cdot (0, 0, 1)^T] \\ [R|T]_2 = [U \cdot Q^T \cdot V^T & | & U \cdot (0, 0, 1)^T] \\ [R|T]_3 = [U \cdot Q \cdot V^T & | & -U \cdot (0, 0, 1)^T] \\ [R|T]_4 = [U \cdot Q^T \cdot V^T & | & -U \cdot (0, 0, 1)^T] \end{cases} \quad (3.28)$$

²⁸ Na imposição da condição de singularidade da matriz F , todas as entradas (elementos) desta matriz são tratadas de forma igual, independentemente do seu valor (amplitude). Deste modo, será natural assumir que os elementos de menor valor absoluto sejam sujeitos a uma maior perturbação relativa (comparativamente ao seu valor absoluto) do que os elementos de maior valor. Assim, para contrariar este efeito, é desejável efectuar a normalização das observações (c_L e c_R), em translação e em escalonamento, seguido da determinação da matriz fundamental, F , correspondente às observações depois de realizada a transformação e, por fim, da respectiva desnormalização de modo a obter a matriz F correspondente às observações originais (Hartley, 1997-a).

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

A matriz de pose da câmara de referência é a matriz identidade $[I | 0^T]$, isto é, o sistema de coordenadas de referência é estabelecido na câmara de referência e adquire a orientação desta. Relativamente à matriz de pose da segunda câmara, a selecção da solução verdadeira, de entre as quatro possíveis, é efectuada tendo por base o facto dos pontos de controlo (para o teste basta um) deverem estar localizados à frente das duas câmaras. Este critério é satisfeito apenas por uma das soluções (Hartley, 1992).

A solução é determinada a menos de um factor de escala, uma vez que é assumido, para este efeito, que a norma do vector de translação (*baseline*) é unitária ($\|T\|=1$), isto é, que a distância entre as câmaras é unitária. Para se eliminar esta ambiguidade é necessário fornecer informação métrica acerca do mundo (ex. distância entre as câmaras ou a distância entre dois pontos).

Quando o efeito de perspectiva é pequeno, como geralmente acontece com sistemas de visão dotados de ópticas com grande distância focal, a localização das linhas epipolares torna-se instável com o modelo de perspectiva; nestes casos, é preferível adoptar o modelo de projecção ortogonal da câmara afim, o qual modela, de forma explicita, as ambiguidades (Banerjee, 2001). Neste caso, a restrição epipolar é representada pela Equação 3.30, em que a matriz F_A representa a matriz fundamental da câmara afim.

$$c_L^T \cdot F_A \cdot c_R = 0 \quad (3.30)$$

Embora a equação representativa da restrição epipolar seja idêntica para os dois tipos de câmara, a matriz fundamental da câmara afim, representada pela Equação 3.31, é mais simples do que a correspondente da câmara de perspectiva, caracterizando-se por ter apenas quatro graus de liberdade (a solução de F_A é, igualmente, determinada a menos de um factor de escala). Por este motivo, para a sua determinação basta a correspondência de quatro pontos entre duas imagens.

$$F_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a_{13} \\ 0 & 0 & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Encontrada a matriz fundamental F_A , as matrizes de projecção afim M_1 e M_2 de cada uma das câmaras são obtidas tal como indicado pela Equação 3.32,

$$M_1 = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & -a_{23} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & a_{13} & a_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \wedge M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

em que $m_{i=1,2; j=1,2,3} = -\frac{a_{i3} \cdot a_{3j}}{a_{13}^2 + a_{23}^2}$ (Zhang, 1998).

A matriz fundamental incorpora em si informação que pode ser usada na determinação de alguns dos parâmetros das câmaras. No caso de câmaras de perspectiva, atendendo a que a matriz fundamental possui sete graus de liberdade, o número total de parâmetros que se pode extrair desta são, no máximo, sete. Deste modo, considerando que o sistema de coordenadas de referência é estabelecido numa das câmaras, podem-se extrair os três ângulos de rotação e duas das componentes do vector de translação, relativos à pose da segunda câmara, e a distância focal das duas câmaras. No entanto, como se constata, ainda resta a determinação das coordenadas do ponto principal das duas câmaras, as quais terão de ser obtidas recorrendo a outros métodos.

Assim, assumindo que se conhecem as coordenadas do ponto principal das duas câmaras, as matrizes de projecção tomam a forma a seguir apresentada:

$$P_1 = (K_1 | 0) \quad P_2 = (K_2 \cdot R | -K_2 \cdot R \cdot T) \quad (3.33)$$

Através da decomposição da matriz fundamental em valores próprios, Hartley (1992) formulou um algoritmo que permite determinar a distância focal das duas câmaras. No entanto, a aplicação do método na determinação da distância focal das duas câmaras revelou ser extremamente sensível à presença de ruído, ainda que de baixa intensidade, quando aplicado em cenários de longa distância.

Outro dos métodos, usualmente empregue na determinação da distância focal das duas câmaras, é através das equações de *Kruppa* (Hartley, 1997-b; Sturm, 1998). Cada par de câmaras, contribui com duas equações, tal como indicado na Equação 3.34, as quais permitem determinar dois dos parâmetros intrínsecos²⁹,

$$\frac{\hat{v}_2^T \cdot C \cdot \hat{v}_2}{\hat{r}_2 \cdot \hat{u}_1^T \cdot C \cdot \hat{u}_1} = \frac{-\hat{v}_2^T \cdot C \cdot \hat{v}_1}{\hat{r} \cdot \hat{s} \cdot \hat{u}_1^T \cdot C \cdot \hat{u}_2} = \frac{\hat{v}_1^T \cdot C \cdot \hat{v}_1}{\hat{s}^2 \cdot \hat{u}_2^T \cdot C \cdot \hat{u}_2} \quad (3.34)$$

em que \hat{u}_i e \hat{v}_i representam, respectivamente, a coluna i das matrizes U e V , resultantes da decomposição SVD da matriz fundamental, \hat{r} e \hat{s} são os valores próprios de F e $C = K \cdot K^T$ representa o inverso da imagem da cónica absoluta (*DIAC – Dual of the Image of the Absolute Conic*). No entanto, os métodos baseados nas equações de *Kruppa* não são recomendados para uso geral, em virtude destas acrescentarem uma singularidade às já existentes: se um ponto qual-

²⁹ Com três imagens, obtidas com a mesma câmara, é possível formular seis equações, a partir das quais é possível determinar os cinco parâmetros intrínsecos da câmara (Hartley, 1997-b).

quer 3D é projectado no mesmo píxel e é visto à mesma distância por cada uma das câmaras, o parâmetro de zoom não pode ser determinado (Quan, 2000). Para além disso, experiências realizadas sugerem que a auto-calibração baseada nas equações de *Kruppa* se comporta de forma instável, mesmo em condições muito distintas da condição de singularidade mencionada (Quan, 2000).

Para além da determinação da distância focal, há ainda que determinar as coordenadas do ponto principal (não contando com os parâmetros de relação de aspecto e de ortogonalidade). Nestes casos, por vezes, é assumido que as coordenadas do ponto principal coincidem com as coordenadas do centro da imagem³⁰ (Hartley, 1992).

Quanto às coordenadas do ponto principal, estas podem ser determinadas com base no conhecimento das coordenadas na imagem de três pontos de fuga, tal como indicado pela Equação 3.35, em que $(u_i, v_i)_{i=1, \dots, 3}$ representa as coordenadas do ponto de fuga i . Estes pontos de fuga podem ser gerados, por exemplo, a partir da projecção dos vértices de um paralelepípedo (Wilson, 1994) (Figura 3.13). No entanto, uma eventual inexactidão, ainda que pequena, na localização das rectas na imagem, paralelas no mundo, pode resultar em erros muito significativos de localização dos pontos de fuga (Haber, 2010). No caso das câmaras afim, a determinação dos pontos de fuga revela-se ineficaz, na medida em que o modelo de projecção afim preserva o paralelismo das rectas e, como tal, as rectas na imagem interceptam-se no infinito.

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_3 - u_1 & v_3 - v_1 \\ u_3 - u_2 & v_3 - v_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u_2 \cdot (u_3 - u_1) + v_2 \cdot (v_3 - v_1) \\ u_1 \cdot (u_3 - u_2) + v_1 \cdot (v_3 - v_2) \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

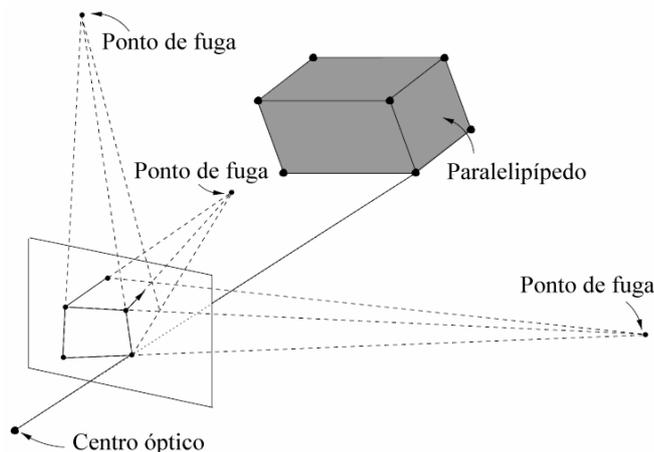


Figura 3.13 – Pontos de fuga obtidos a partir da projecção dos vértices de um paralelepípedo (adaptado de Wilczkowiak, 2001).

³⁰ Num dos trabalhos, as coordenadas do ponto principal das duas câmaras foram determinadas através de um processo de cálculo iterativo, denominado de optimização evolucionária (*Evolutionary optimization*) (Cerveri, 1998).

3.4.2.2 Algoritmo de Wilczkowiak

Este algoritmo explora a dualidade existente entre os parâmetros intrínsecos da câmara e a forma do paralelepípedo, estendida a um conjunto de câmaras e a um conjunto de paralelepípedos (Wilczkowiak, 2001; 2003). Técnicas baseadas em algoritmos de factorização são aplicadas a várias imagens de um ou mais paralelepípedos, de forma a realizar, em simultâneo, a calibração das câmaras, a reconstrução da forma dos paralelepípedos e a estimação da pose relativa de todas estas entidades.

O paralelepípedo (Figura 3.14) é definido por doze parâmetros, dos quais seis descrevem a posição e a orientação deste (parâmetros extrínsecos) e os restantes seis, três comprimentos e três ângulos, descrevem a sua forma Euclideana (parâmetros intrínsecos). O paralelepípedo pode ser representado sob a forma matricial, como indicado pela Equação 3.36, em que S representa a matriz de rotação, v o vector de posição do paralelepípedo e L a forma do paralelepípedo. A matriz L é determinada a partir da Equação 3.37, em que $l_{i=1,\dots,3}$ representa o comprimento da aresta i do paralelepípedo e $\theta_{i=1,\dots,3; j=1,\dots,3}$ representa o ângulo formado pelas faces i e j (Wilczkowiak, 2003).

$$N = \begin{bmatrix} S & v \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \cdot L \quad (3.36)$$

$$L = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 \cdot \cos \theta_{1,2} & l_3 \cdot \cos \theta_{1,3} & 0 \\ 0 & l_2 \cdot \sin \theta_{1,2} & l_3 \cdot \frac{\cos \theta_{2,3} - \cos \theta_{1,2} \cdot \cos \theta_{1,3}}{\sin \theta_{1,2}} & 0 \\ 0 & 0 & l_3 \cdot \frac{\sin^2 \theta_{1,2} - \cos^2 \theta_{1,2} \cdot \sin^2 \theta_{1,2} - (\cos \theta_{2,3} - \cos \theta_{1,2} \cdot \cos \theta_{1,3})^2}{\sin^2 \theta_{1,2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

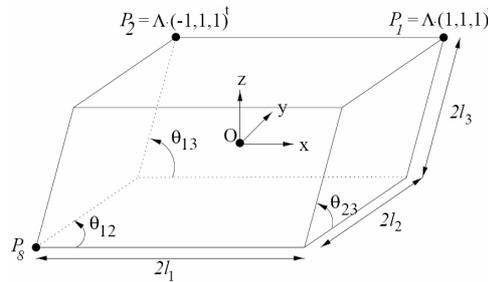


Figura 3.14 – Parâmetros intrínsecos de um paralelepípedo (Wilczkowiak, 2001).

A matriz de projecção canónica, definida pela Equação 3.38, em que K é a matriz dos parâmetros intrínsecos da câmara, R a matriz de rotação e T o vector de posição desta, representa

a matriz de projecção de perspectiva que mapeia os vértices do cubo canónico nos pontos da imagem correspondentes aos vértices do paralelepípedo (Figura 3.15).

$$\lambda \cdot \tilde{X} = K \cdot [R \quad T] \cdot \begin{bmatrix} S & v \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \cdot L \quad (3.38)$$

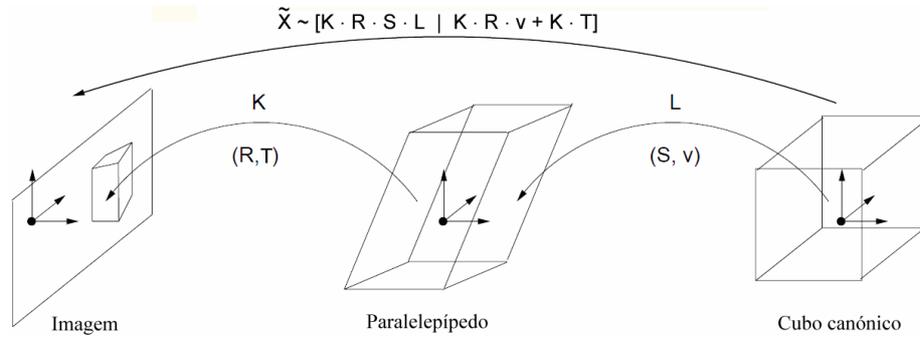


Figura 3.15 – Projecção do cubo canónico no plano da imagem (adaptado de Wilczkowiak, 2003).

Definindo a matriz X , construída a partir das primeiras três linhas e primeiras três colunas da matriz \tilde{X} , e fazendo uso da propriedade de ortogonalidade das matrizes de rotação R e S chega-se à formulação da Equação 3.39, em que $\omega = (K \cdot K^T)^{-1}$ representa a imagem da cónica absoluta e μ uma entidade análoga no paralelepípedo, dada pela Equação 3.40 (Wilczkowiak, 2001).

$$X^T \cdot K^{-T} \cdot K^{-1} \cdot X \cong \Lambda^T \cdot \Lambda \quad (3.39)$$

$$X^T \cdot \omega \cdot X \cong \mu$$

$$\mu = \Lambda^T \cdot \Lambda = \begin{bmatrix} l_1^2 & l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \theta_{12} & l_1 \cdot l_3 \cdot \cos \theta_{13} \\ l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \theta_{12} & l_2^2 & l_2 \cdot l_3 \cdot \cos \theta_{23} \\ l_1 \cdot l_3 \cdot \cos \theta_{13} & l_2 \cdot l_3 \cdot \cos \theta_{23} & l_3^2 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

A equação 3.39 representa a dualidade existente entre os parâmetros intrínsecos da câmara e os parâmetros intrínsecos do paralelepípedo. Deste modo, o conhecimento de alguns dos parâmetros intrínsecos da câmara e ou do paralelepípedo podem ser usados, em simultâneo, para a formulação de restrições com vista à determinação da globalidade dos parâmetros intrínsecos da câmara. Cada uma das dimensões conhecidas (ou relação de comprimento) e cada um dos ângulos conhecidos do paralelepípedo contribui com uma equação, o mesmo acontecendo com cada um dos parâmetros intrínsecos, conhecidos, da câmara.

A Equação 3.41 representa a expansão da Equação 3.38 para o caso de m paralelepípedos e N câmaras.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \lambda_{11} \cdot \tilde{X}_{11} & \cdots & \lambda_{1m} \cdot \tilde{X}_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{N1} \cdot \tilde{X}_{N1} & \cdots & \lambda_{Nm} \cdot \tilde{X}_{Nm} \end{bmatrix}}_{\tilde{X}_{3N \times 4m}} = \underbrace{\begin{bmatrix} K_1 \cdot [R_1 & T_1] \\ \vdots \\ K_N \cdot [R_N & T_N] \end{bmatrix}}_{M_{3N \times 4}} \cdot \underbrace{\left[\begin{bmatrix} S_1 & v_1 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \cdot L_1 \cdots \begin{bmatrix} S_m & v_m \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \cdot L_m \right]}_{S_{4 \times 4m}} \quad (3.41)$$

Na ausência de ruído, o *rank* da matriz \tilde{X} é no máximo quatro. Deste modo, através da aplicação do método de factorização obtém-se uma solução (estimativa) para os parâmetros de calibração das câmaras e, simultaneamente, para a reconstrução da forma dos objectos (paralelepípedos) e para a estimação da pose relativa das câmaras e dos objectos.

A aplicação do algoritmo desenvolve-se em duas fases. Assim, na primeira fase são determinados os parâmetros intrínsecos e as matrizes de orientação das câmaras e dos paralelepípedos, sendo usado, para este efeito, uma matriz reduzida das observações (X), composta pelas submatrizes 3×3 de \tilde{X} , tal como representado na Equação 3.42; neste caso, o *rank* da matriz X é no máximo três.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \lambda_{11} \cdot X_{11} & \cdots & \lambda_{1m} \cdot X_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{N1} \cdot X_{N1} & \cdots & \lambda_{Nm} \cdot X_{Nm} \end{bmatrix}}_{X_{3N \times 3m}} = \underbrace{\begin{bmatrix} K_1 \cdot R_1 \\ \vdots \\ K_N \cdot R_N \end{bmatrix}}_{M'_{3N \times 3}} \cdot \underbrace{\left[S_1 \cdot L'_1 \cdots S_m \cdot L'_m \right]}_{S'_{3 \times 3m}} \quad (3.42)$$

Atendendo a que a reconstrução alcançada neste estágio é obtida a menos de uma transformação afim (H), é necessário formular um conjunto de restrições tendo em vista a eliminação desta ambiguidade. Para a concretização deste objectivo, o algoritmo permite combinar a informação conhecida de um ou mais parâmetros intrínsecos das câmaras com a informação métrica disponível, nomeadamente a relação de comprimento dos lados dos paralelepípedos e os respectivos ângulos.

A segunda fase da aplicação do algoritmo contempla a estimação da posição relativa das câmaras, assim como dos paralelepípedos e da respectiva dimensão (relativa).

3.4.2.3 Algoritmo de Fraser

O modelo matemático de base que está subjacente ao desenvolvimento deste algoritmo³¹ é o indicado pela Equação 3.43, em que o vector $[u, v]$ representa as coordenadas de projecção do ponto (no espaço) na imagem, o vector $[u_0, v_0]$ as coordenadas do ponto principal, (d_u, d_v) o erro de coordenadas devido ao efeito de distorção da imagem, f a distância focal do sistema ópti-

³¹ Este algoritmo foi aplicado no desenvolvimento da aplicação *Australis*, para utilização no âmbito da fotogrametria digital de proximidade (Fraser, 2000-a).

co, R a matriz de rotação, o vector $[X_c, Y_c, Z_c]$ a posição da câmara relativamente ao sistema de coordenadas do mundo e λ um factor de escala não nulo (Fraser, 2005-b).

$$\begin{bmatrix} u - u_0 + d_u \\ v - v_0 + d_v \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \cdot R \cdot \begin{bmatrix} X - X_c \\ Y - Y_c \\ Z - Z_c \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Dividindo a primeira e segunda linhas da Equação 3.43 pela terceira linha obtém-se a Equação 3.44, a qual representa as denominadas equações de colinearidade.

$$\begin{bmatrix} u - u_0 + d_u + f \cdot \frac{X - X_c}{Z - Z_c} \\ v - v_0 + d_v + f \cdot \frac{Y - Y_c}{Z - Z_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

A solução da Equação 3.44 traduz a intercepção de um conjunto de raios gerados a partir de múltiplas imagens, sendo determinada, por aproximação, pelo método dos mínimos quadrados. Tratando-se de uma equação não linear, para que o método de cálculo possa ser empregue é necessário proceder à sua linearização para a forma geral de aplicação da técnica de ajuste de feixes (*bundle adjustment*), representada pela Equação 3.45, em que v representa o vector dos resíduos respeitantes às observações (nas unidades das coordenadas dos pontos nas imagens), A_1 e A_2 representam as matrizes das derivadas parciais, δ_1 e δ_2 representam as correcções a efectuar aos valores iniciais dos seis parâmetros extrínsecos (α , ϵ , κ , X_c , Y_c , Z_c) e das coordenadas de posição de cada um dos pontos de controlo no mundo (X , Y , Z), respectivamente, e w é um vector de discrepância (Fraser, 1998; Fraser, 2005-b)³².

$$-v + A_1 \cdot \delta_1 + A_2 \cdot \delta_2 + w = 0 \quad (3.45)$$

A determinação de δ_1 e δ_2 pressupõe o conhecimento dos valores iniciais dos respectivos parâmetros, descritos na Equação 3.44, em que b representa o número de pontos de controlo e N o número de imagens (câmaras).

$$\underline{Q} = (\alpha_1^0, \epsilon_1^0, \kappa_1^0, X_1^{c0}, Y_1^{c0}, Z_1^{c0}, \dots, X_N^{c0}, Y_N^{c0}, Z_N^{c0})^T \quad (3.46)$$

$$\underline{X} = (X_1^0, Y_1^0, Z_1^0, \dots, X_b^0, Y_b^0, Z_b^0)^T$$

Na determinação dos valores iniciais é usual dividir-se o processo em duas fases. Assim, numa primeira fase são determinados os parâmetros de orientação \underline{Q} e posteriormente as coordenadas dos pontos de controlo \underline{X} .

³² Na Equação 3.44 é suposto conhecer uma estimativa dos parâmetros intrínsecos.

Partindo do princípio de que se conhecem as coordenadas 3D de alguns dos pontos de controlo, δ_2 pode ser removido da Equação 3.46 e δ_1 é determinado para cada uma das imagens, através de um processo de cálculo usualmente designado por ressecção espacial (*spatial resection*). Tendo-se estimado o valor de δ_1 , isto é, os parâmetros extrínsecos, este é removido da Equação 3.45 e procede-se ao cálculo de δ_2 , para os restantes pontos de controlo (cujas coordenadas 3D são desconhecidas) através do método de cálculo conhecido por intercepção espacial (*spatial intersection*).

Depois de executada a ressecção das imagens e a intercepção dos pontos de controlo, a solução encontrada é otimizada, através de *bundle adjustment*, para afinamento dos parâmetros de orientação das câmaras, δ_1 , de posição dos pontos de controlo, δ_2 e os parâmetros intrínsecos das câmaras, incluindo os coeficientes de distorção do sistema óptico de cada uma das câmaras. A informação relativa ao factor de escala é fornecida sob a forma de uma ou mais distâncias entre pontos de controlo devidamente identificados.

Atendendo ao princípio de funcionamento subjacente à fotogrametria, para se alcançar o grau de exactidão típico em aplicações de fotogrametria, é desejável dispor de um elevado número de pontos de controlo e de uma configuração com elevado número de câmaras, distribuídas por um grande volume em torno da zona em observação, de forma a alcançar-se uma geometria convergente de raios que partem de cada um dos pontos de controlo em direcção a cada uma das câmaras. Para além disso, a aplicação deste algoritmo pressupõe conhecer uma estimativa das coordenadas de um conjunto mínimo de pontos de controlo, assim como dos parâmetros intrínsecos das câmaras.

3.4.2.4 Algoritmo de Tomasi

O algoritmo desenvolvido por Tomasi constituiu o ponto de partida para o estabelecimento do procedimento de calibração de sistemas de visão dotados de ópticas com grande distância focal, que se apresenta no Capítulo 4. Por esse motivo, os conceitos relacionados com este algoritmo serão aqui abordados de uma forma menos detalhada.

O presente algoritmo, baseado no método de factorização, permite reconstruir a forma do objecto e o movimento da câmara – no caso de se tratar de uma câmara móvel – ou a geometria das câmaras – no caso de se tratar de múltiplas câmaras fixas – a partir de uma sequência de imagens e assumindo que o modelo de projecção é ortogonal. Trata-se de um exemplo típico de calibração por meio de estratificação. Neste caso, dado que é suposto estar-se na presença de câmaras ortográficas, o primeiro nível de reconstrução é afim.

A informação contida na sequência de imagens adquiridas é agrupada numa matriz W , denominada de matriz das observações registadas, com a dimensão $2 \cdot N \times b$, em que N representa o número de imagens adquiridas, por uma só câmara, em poses distintas, ou por várias câmaras, e b representa o número de pontos de controlo. De acordo com o modelo da câmara afim, descrito pela Equação 3.7, a matriz W é o resultado do produto de duas matrizes, como representado pela Equação 3.47, em que a matriz S , denominada de forma do objecto (*shape*), tem a dimensão $3 \times b$, e a matriz R , denominada de movimento (*motion*), tem a dimensão de $2 \cdot N \times 3$.

$$W_{2N \times 3} = R_{2N \times 3} \cdot S_{3 \times b} \quad (3.47)$$

Sendo a matriz W o resultado do produto de duas matrizes em que o *rank* de qualquer uma delas é no máximo três, o mesmo princípio se aplica ao *rank* da matriz W . Deste modo, fazendo a decomposição da matriz W em valores próprios, por meio de SVD (Equação 3.48), obtém-se uma solução possível para as matrizes R e S , representada pela Equação 3.49, em que \ddot{U} e \ddot{V} representam as três primeiras colunas das matrizes ortogonais U e V , respectivamente, e \ddot{D} representa a matriz diagonal com os três primeiros valores próprios de D . A Equação 3.49 representa a solução do estágio de reconstrução afim.

$$W = U \cdot D \cdot V^T \quad (3.48)$$

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_N \end{bmatrix} = \ddot{U}_{2N \times 3} \cdot \sqrt{\ddot{D}_{3 \times 3}} \quad [S_1 \quad \cdots \quad S_b] = \sqrt{\ddot{D}_{3 \times 3}} \cdot \ddot{V}_{b \times 3}^T \quad (3.49)$$

No entanto, esta solução não é única, uma vez que a solução encontrada desta forma é determinada a menos de uma transformação afim. De facto, qualquer matriz H , não singular, também satisfaz a condição expressa pela Equação 3.47, uma vez que:

$$W = (R \cdot H) \cdot (H^{-1} \cdot S) = \ddot{R} \cdot \ddot{S} \quad (3.50)$$

Deste modo, para resolver a ambiguidade existente, Tomasi formulou um conjunto de restrições baseadas no facto da matriz de rotação $\ddot{R} = R \cdot H$ ser ortonormal. No entanto, como se verá no Capítulo 4, para a determinação da matriz de transformação afim, H , são necessárias pelo menos três imagens (três câmaras, no caso destas estarem fixas).

Como mencionado, no desenvolvimento do método de factorização é assumido que o modelo de projecção é ortogonal. Este facto faz com que o movimento de translação da câmara ao longo do eixo óptico não produza qualquer efeito e, em consequência disso, não seja possível reconstruir a componente longitudinal do movimento (Tomasi, 1992). Por este motivo, na aplicação deste método é suposto a componente de deslocamento longitudinal ser pequena, compara-

tivamente com a distância entre o objecto e a câmara, caso contrário, o objecto surge deformado em resposta à forma como o método interpreta as diferenças de dimensão na sequência de imagens.

Poelman (1997) desenvolveu uma extensão do método de factorização, aplicando-o ao modelo de projecção de para-perspectiva. Este método destina-se a aplicações em que a sequência de imagens apresenta movimento significativo de translação em profundidade, quando o objecto se encontra próximo da câmara ou quando é necessário reconstruir a componente de profundidade, como por exemplo em navegação.

Os resultados reportados indicam que, a curta distância, o modelo de para-perspectiva tem melhor desempenho do que o correspondente modelo ortográfico, enquanto que a longa distância os dois métodos geram valores idênticos de desvio (Poelman, 1997).

No método desenvolvido por Poelman é assumido que a distância focal da câmara (ou das câmaras) é unitária, o parâmetro de relação de aspecto é unitário e as coordenadas do ponto principal são $(0, 0)$. Quer isto dizer que a aplicação deste método pressupõe conhecer os parâmetros intrínsecos da câmara (ou das câmaras).

3.4.2.5 Algoritmo de Kahl

O algoritmo desenvolvido por Kahl (1998) constitui, em parte, uma extensão do algoritmo de Tomasi aplicado a câmaras de perspectiva. Ele desenvolve-se, basicamente, em três fases: i) modelação da(s) câmara(s) pelo modelo de projecção afim – reconstrução afim; ii) rectificação da solução para o espaço Euclidiano; e iii) melhoria da solução encontrada, por meio de *bundle adjustment*, com modelação da(s) câmara(s) segundo o modelo de projecção da perspectiva central.

A principal diferença entre o presente algoritmo e o de Tomasi reside no tipo de restrições formuladas com vista à determinação da matriz de transformação afim H . No caso presente, este objectivo é conseguido com base no conhecimento da estimativa de um ou mais parâmetros intrínsecos das câmaras, normalmente γ_a e ou s_a (ver Capítulo 4). Assim, no caso de ser conhecido apenas um dos parâmetros por câmara, o número mínimo de imagens necessárias são cinco, reduzindo para três no caso de serem conhecidos dois parâmetros por câmara.

O método proposto para rectificar a solução do espaço afim para o espaço Euclidiano, tanto o preconizado por Kahl, como o por Tomasi, ambos requerem um mínimo de três câmaras. Para além disso, ambos os métodos propostos são baseados na imagem da cónica absoluta, isto é, as restrições são formuladas no espaço da imagem. No Capítulo 4 será apresentada uma outra

via, formulada no domínio do objecto (espaço), a qual é baseada na relação de comprimento entre dois ou mais segmentos, não paralelos, do objecto e ou na amplitude do ângulo formado por dois ou mais segmentos. Para a concretização desta solução alternativa, como se verá, o número mínimo de câmaras pode ser reduzido para dois, desde que a informação conhecida do objecto (relação de comprimento e amplitude de ângulos) permita formular pelo menos cinco restrições. Estes conceitos associados à formulação das restrições para a determinação da matriz H serão abordados de uma forma mais detalhada ao longo do Capítulo 4.

3.5 Conclusões

O presente capítulo foi dedicado ao tema da calibração de sistemas ópticos, dividindo-se, genericamente, em duas partes. A primeira parte foi dedicada à apresentação dos modelos de projecção usualmente empregues na área da visão por computador, nomeadamente o modelo da câmara de perspectiva central e o modelo da câmara afim, e a correspondência dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos entre os dois modelos de projecção. A segunda parte foi dedicada à apresentação de alguns dos algoritmos e métodos desenvolvidos pela comunidade científica para a calibração de sistemas de visão. Neste campo foram apresentados algoritmos para a calibração de sistemas monocâmara e de sistemas multi-câmara. Pretendeu-se com este estudo avaliar as potencialidades desses algoritmos, tendo em vista uma eventual aplicação ao caso de aplicações de longa distância, ou utilizá-los como plataforma para o desenvolvimento de metodologias adaptadas às exigências características da actividade de observação de grandes estruturas, tendo-se privilegiado algoritmos e métodos de calibração capazes de executar a calibração com uma configuração mínima de câmaras (uma ou duas).

Outro factor que condicionou a forma como foi conduzida a pesquisa teve a ver com o facto do objecto (estrutura em observação) poder estar em movimento, inviabilizando o levantamento topográfico da posição dos pontos de controlo. Deste modo, foi dada especial atenção aos algoritmos capazes de realizar a calibração do sistema de visão sem ser necessário conhecer, nem as coordenadas dos pontos de controlo, nem a posição das câmaras.

Na presença de condições como as que se verificam quando se usam ópticas com grande distância focal, os algoritmos baseados no modelo de projecção de perspectiva central tornam-se muito instáveis (*ill-conditioned*) na presença de ruído, mesmo nos casos em que é possível estimar a posição dos pontos de controlo (valores iniciais), devido à deterioração da independência linear existente entre os parâmetros de orientação (Ono, 2002). Nestas condições, o modelo de

projectão da câmara é aproximadamente ortogonal – câmara afim. Enquanto que no modelo da câmara afim o número de graus de liberdade é de apenas oito, no modelo de perspectiva central o número de graus de liberdade aumenta para onze, criando condições para que o modelo, no segundo caso, se torne mais vulnerável a condições de instabilidade.

O comportamento instável na presença de ruído está relacionado com a quase ausência do efeito de perspectiva gerado por um objecto observado a longa distância. Por exemplo, nestas condições, os pontos de fuga, que permitem determinar as coordenadas do ponto principal, localizam-se, aproximadamente, no infinito – intercepção de linhas paralelas. Na presença de eventuais perturbações que ocorram ao nível das coordenadas dos pontos projectados nas imagens, ainda que de fraca intensidade, a localização destes pontos é severamente afectada, conduzindo a resultados inesperados.

Como observado por Tomasi (1992), com o modelo de projectão de perspectiva central, verifica-se que movimentos de baixa rotação da câmara podem ser confundidos com movimentos reduzidos de translação, e vice-versa. Por exemplo, uma pequena rotação em torno do eixo vertical e uma pequena translação ao longo do eixo horizontal podem gerar na imagem efeitos similares. Estes efeitos são particularmente amplificados quando a distância entre o objecto e a câmara é grande, comparativamente com as dimensões do objecto (Tomasi, 1992).

Este tema foi igualmente abordado por Kahl (1998) ao referir que os algoritmos de calibração que utilizam directamente o modelo de projectão de perspectiva central são inerentemente instáveis nas situações em que a dimensão de profundidade do objecto (zona em observação) é pequena comparativamente com a distância que o separa da câmara. Nestas condições, é mesmo aconselhável não usar o modelo de perspectiva central, uma vez que se evita, de forma explícita, o cálculo de parâmetros com comportamento instável (Kahl, 1998).

No modelo da câmara afim a distância entre o objecto e a câmara não é determinada de forma explícita; para além disso, as coordenadas do ponto principal não se encontram definidas, dependendo, apenas, da posição escolhida para o sistema de coordenadas de referência.

Em suma, atendendo ao tipo de projectão característica de aplicações de longa distância, o modelo de projectão da câmara afim afigura-se ser o mais adequado para estes casos.

CAPÍTULO 4

CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE VISÃO COM GRANDE DISTÂNCIA FOCAL

4.1 Introdução

O tema abordado no presente capítulo tem como motivação o problema da calibração, realizada *in situ*, de sistemas de visão¹ com ópticas de grande distância focal, quando aplicados na observação de estruturas de grande dimensão, efectuada a longa distância. A abordagem seguida ao longo deste capítulo tem como objectivo principal a estimação da matriz de projecção de cada um dos subsistemas de visão envolvidos e, a partir destas, a estimação dos respectivos parâmetros intrínsecos e extrínsecos.

Dadas as dificuldades e obstáculos que habitualmente surgem em ambiente de campo, é importante que o procedimento de calibração possa ser exequível em qualquer momento, de preferência, de forma autónoma e requerendo informação facilmente acessível. Para além disso, e pelas mesmas razões, é desejável que a calibração seja realizável e eficaz usando o menor número possível de subsistemas de visão e de pontos de controlo, para que a metodologia possa ser exequível em condições reais.

Como mencionado no Capítulo 3, na realização da calibração dos sistemas de visão é habitual seguir uma de duas vias: i) fornecer informação do mundo, sob a forma de coordenadas 2D ou 3D de um conjunto de pontos de controlo; ou ii) usar uma configuração composta por várias câmaras, das quais se conhecem as estimativas de alguns dos seus parâmetros característicos. Neste último caso, é suposto não conhecer as coordenadas dos pontos de controlo.

No caso específico do tabuleiro de pontes suspensas, em resultado da circulação de cargas e da acção do vento exercida sobre o tabuleiro, este encontra-se permanentemente em movimento (vibração). Por este motivo, não é possível efectuar o levantamento topográfico dos pontos de controlo (usando, por exemplo, uma estação total), uma vez que a posição destes não se mantém estacionária ao longo do tempo.

¹ À semelhança da terminologia adoptada no Capítulo 3, num contexto de configuração monocular (uma unidade), no que se segue, referir-se-á a *câmara* e a *sistema de visão*, como sinónimos, para designar o sistema composto pela câmara de vídeo e pelo sistema óptico; num contexto de multi-sistema de visão (duas ou mais unidades) referir-se-á a *subsistema de visão*.

Como alternativa, propõe-se usar um conjunto de pontos de controlo, estabelecidos na zona em observação e de coordenadas desconhecidas, e um conjunto de câmaras em que são conhecidas as estimativas de alguns dos parâmetros intrínsecos, nomeadamente dos parâmetros de relação de tamanho (γ_a) e de ortogonalidade (s_a). No caso de configurações compostas por apenas duas câmaras, como se verá, esta informação por si só não basta, sendo necessário dispor de informação adicional, como por exemplo a relação de comprimentos de segmentos não paralelos do objecto ou o ângulo formado por duas faces do mesmo.

Assim, conhecidas as coordenadas de projecção dos pontos de controlo em duas ou mais câmaras, o problema que se coloca é o de encontrar uma estimativa das matrizes de projecção das câmaras e da posição 3D dos pontos de controlo (reconstrução Euclidiana).

Em aplicações de observação realizada a longa distância, em que se pretenda alcançar elevada resolução e exactidão, é corrente utilizar ópticas com grande distância focal juntamente com câmaras de vídeo de elevada resolução. Nestas condições, o modelo de projecção característico do sistema de visão pode ser aproximado pelo modelo da câmara afim (cf. Capítulo 3). Comparativamente com o modelo de projecção de perspectiva, usualmente adoptado em aplicações de curta distância (pequena distância focal), o modelo de projecção afim é mais simples (menor número de graus de liberdade), é linear e, por isso, mais estável e mais eficiente (Faugeras, 2001).

O método de factorização introduzido por Tomasi (1992), tendo em vista a reconstrução de um objecto observado a partir do movimento da câmara (*SfM* – *Structure from Motion*) e do conhecimento das coordenadas de projecção de um conjunto de pontos de controlo nas várias imagens, constituiu o ponto de partida para o estudo que se apresenta a seguir, à semelhança do verificado noutros trabalhos conhecidos (Poelman, 1997; Kahl, 1998; Wilczkowiak, 2003; Svoboda, 2005). Todavia, importa realçar algumas diferenças existentes entre o estudo realizado por Tomasi e o caso presente. No caso do estudo levado a cabo por Tomasi: i) o modelo de projecção da câmara era ortogonal ($\gamma_a = 1$ e $s_a = 0$); ii) os pontos de controlo encontravam-se fixos no espaço e o sistema de visão (único) movia-se em torno do objecto; e iii) a reconstrução do objecto (*structure*) era obtida a menos de uma transformação de similaridade e o movimento da câmara (*motion*) era estabelecido relativamente a uma pose de referência, normalmente associada à pose da primeira imagem adquirida.

No caso da observação de pontes suspensas, ou de outras estruturas, geralmente de grande dimensão: i) é o objecto que se move, de forma não controlada, enquanto os subsistemas de visão estão fixos; ii) os subsistemas de visão podem ter parâmetros intrínsecos distintos; iii) as câmaras (quando dotadas de ópticas com grande distância focal), normalmente são do tipo afim;

e iv) é necessário alcançar a fase de reconstrução métrica, para se poder estimar, de forma plena, o vector de deslocamento da estrutura (na fase de seguimento de trajectória).

Relativamente ao primeiro aspecto, este não levanta quaisquer dificuldades, uma vez que é indiferente se é o objecto que se move e os subsistemas de visão estão fixos ou vice-versa. Já o facto de se usarem subsistemas de visão com parâmetros distintos tem como efeito o aumento do número de graus de liberdade do sistema de equações (oito graus de liberdade por cada subsistema de visão – considerando o modelo de projecção afim). Quanto ao último aspecto, na ausência de informação adicional a reconstrução do objecto só será possível a menos de uma transformação de corpo rígido e de um factor de escala global – transformação de similaridade. Deste modo, para a sua plena concretização é necessário dispor de informação do mundo que permita eliminar a ambiguidade (ex. orientação do sistema de coordenadas de referência definida por um número mínimo de três pontos, não colineares – para estabelecer a orientação desejada –, e o conhecimento da distância entre dois pontos de controlo – factor de escala global).

Ao longo do presente capítulo começar-se-á por abordar uma das propriedades mais importantes do modelo de projecção afim, a qual poderá contribuir para a redução de eventuais perturbações (ruído) que possam afectar as observações. No caso da perturbação obedecer a uma distribuição com média nula o seu efeito pode ser reduzido, de forma muito significativa, através da determinação de uma imagem média, como se verá adiante. Segue-se a apresentação dos métodos de cálculo destinados à calibração de câmaras, considerando o caso genérico de N câmaras e m pontos de controlo, e o caso particular de configurações com apenas duas câmaras. É, igualmente, apresentado o procedimento usado na determinação dos respectivos parâmetros intrínsecos e extrínsecos dos subsistemas de visão e, por último, a apresentação de alguns resultados, mais significativos, obtidos por meio de simulação numérica com configurações de duas câmaras e para diferentes condições de conhecimento de informação. Estes resultados estão na base da formulação da metodologia de calibração que se propõe para a área da observação de grandes estruturas.

4.2 Modelo de Projecção Afim

De entre as várias propriedades do modelo de projecção afim que foram apresentadas no Capítulo 3, ao longo da presente secção será abordada com maior detalhe uma das propriedades que permite relacionar a origem dos sistemas de coordenadas estabelecidos em cada uma das câmaras com a origem do sistema de coordenadas de referência (mundo). Para além disso, a determinação da imagem média, a qual, como já mencionado e se verá adiante, visa reduzir o

efeito do ruído sobre as observações, é realizada com base na aplicação desta mesma propriedade.

4.2.1 Preservação do centro geométrico (centroide)

De modo a facilitar a compreensão do que se segue, apresenta-se, novamente, o modelo da câmara afim, representado pela Equação 4.1, em que M representa a matriz de projecção da câmara afim, C_i e c_i as coordenadas do ponto i no mundo e no plano da imagem, respectivamente, e T o vector de translação, em unidades de píxel.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix}}_{c_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{bmatrix}}_M \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}}_{C_i} + \underbrace{\begin{bmatrix} m_{14} \\ m_{24} \end{bmatrix}}_T \quad (4.1)$$

Considerando a existência de b pontos de controlo, da aplicação da Equação 4.1 obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} (u_1 - m_{14}) & \cdots & (u_b - m_{14}) \\ (v_1 - m_{24}) & \cdots & (v_b - m_{24}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 & \cdots & X_b \\ Y_1 & \cdots & Y_b \\ Z_1 & \cdots & Z_b \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

a partir da qual se determinam as coordenadas correspondentes ao centro geométrico (centroide), no plano da imagem e no espaço, correspondente aos b pontos de controlo – Equação 4.3.

$$\frac{1}{b} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^b u_i \\ \sum_{i=1}^b v_i \end{bmatrix} - T = M \cdot \frac{1}{b} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^b X_i \\ \sum_{i=1}^b Y_i \\ \sum_{i=1}^b Z_i \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Considerando que os vectores $\bar{c} = [\bar{u}, \bar{v}]^T$ e $\bar{C} = [\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}]^T$ representam as coordenadas do centroide no plano da imagem e no espaço, respectivamente, a equação anterior toma a forma indicada pela Equação 4.4.

$$\begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \end{bmatrix} - T = M \cdot \begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$T = \bar{c} - M \cdot \bar{C}$$

Da observação da Equação 4.4 constata-se que o centroide de um conjunto de pontos no espaço é projectado no ponto da imagem de coordenadas correspondente ao centroide das respectivas projecções (a menos de uma translação T , no plano da imagem), a qual, como se verá a

seguir, pode ser eliminada da Equação 4.1. Passaremos a denominar esta propriedade de *preservação do centroide*.

Atendendo a que as coordenadas dos pontos de controlo são desconhecidas, o sistema de coordenadas do mundo pode ser estabelecido em qualquer ponto do espaço. Em particular, a origem deste pode coincidir com a posição do centroide do objecto, fazendo com que as coordenadas do ponto \bar{C} seja o vector nulo e, por consequência, o vector $T = \bar{c}$. Isto é, o vector T representa as coordenadas de projecção do centroide do objecto (conjunto de pontos C_i) na imagem.

De modo idêntico, se o sistema de coordenadas da imagem for posicionado no ponto correspondente ao centroide \bar{c} , através de uma transformação de coordenadas (translação T), o vector T transforma-se no vector nulo e a Equação 4.1 converte-se na forma simplificada representada pela Equação 4.5, em que as coordenadas de \tilde{c}_i e de \tilde{C}_i passam a estar referenciadas a \bar{c} e a \bar{C} , respectivamente. A Equação 4.5 traduz uma transformação linear de coordenadas entre o espaço Euclidiano (3D) e o plano da imagem (2D).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \end{bmatrix}}_{\tilde{c}_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{bmatrix}}_M \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{X}_i \\ \tilde{Y}_i \\ \tilde{Z}_i \end{bmatrix}}_{\tilde{C}_i} \quad (4.5)$$

Como se viu, a propriedade de preservação do centroide, característica do modelo de projecção afim, permite estabelecer o sistema de coordenadas no espaço e relacioná-lo, de uma forma simples e directa, com o sistema de coordenadas estabelecido na imagem, através dos respectivos centroides do objecto no mundo e na imagem (projecção).

4.2.2 Erro Gerado pelo Modelo Afim

Como mencionado, o modelo de projecção afim é um modelo aproximado, mais simples, do modelo de projecção de perspectiva. Assim, dependendo da posição do ponto C no espaço, a modelação da projecção deste ponto na imagem através do modelo afim pode estar embebida de erro de projecção.

No caso particular do ponto 3D se encontrar posicionado no plano que passa pela origem do sistema de coordenadas do mundo e é perpendicular ao eixo óptico (d direcção definida pelo vector linha r_3 da matriz de rotação R), o erro cometido na adopção do modelo afim é nulo, isto é, não existem diferenças entre os dois modelos de projecção. Relativamente aos pontos posicionados fora deste plano, os dois modelos de projecção geram coordenadas de projecção distintas, sendo a diferença variável em função de vários parâmetros, como se verá a seguir.

Para o que se segue, considere-se a Figura 4.1, em que d representa a distância do ponto C ao plano Π , que passa pelo centroide do conjunto de pontos no espaço (origem do sistema de coordenadas do mundo) e é paralelo ao plano da imagem, f é a distância focal (em unidades de píxel) e D a distância do plano Π ao centro óptico da câmara (c_o).

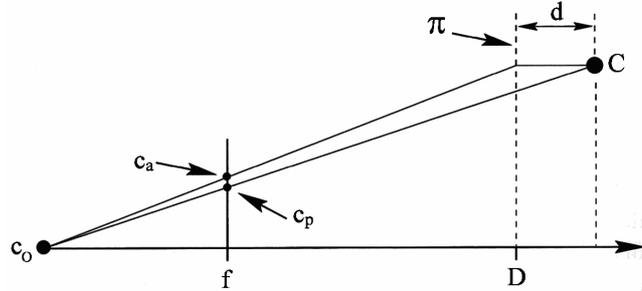


Figura 4.1 – Erro de projecção devido à adopção de um modelo de projecção aproximado (o modelo de perspectiva fraca é um caso particular do modelo da câmara afim).

Geometricamente, da Figura 4.1 obtém-se a formulação matemática representada pela Equação 4.6, em que $C = [X_C, Y_C, Z_C]^T$, com $Z_C = D + d$, e c_p e c_a representam a projecção do ponto C no plano da imagem, obtida com os modelos de projecção de perspectiva central e afim, respectivamente.

$$\begin{cases} c_p = \frac{f}{D+d} \cdot \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \end{bmatrix} \\ c_a = \frac{f}{D} \cdot \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4.6)$$

Desta equação tira-se que a relação entre c_p e c_a é dada pela Equação 4.7.

$$\frac{c_a}{c_p} = 1 + \frac{d}{D} \quad (4.7)$$

O erro de projecção, ε_a , gerado pelo modelo afim traduz-se no afastamento ou aproximação do ponto c_a do eixo óptico, consoante o sinal de d , segundo a direcção radial, de um valor dado pela Equação 4.8, em unidades de píxel.

$$\varepsilon_a = c_a - c_p = c_p \cdot \frac{d}{D} \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_a = \frac{d}{D} \cdot \frac{f}{D+d} \cdot \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \end{bmatrix} \cong \frac{d \cdot f}{D^2} \cdot \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \end{bmatrix}$$

Daqui se conclui que o erro: i) é directamente proporcional à distância focal; ii) é directamente proporcional à distância entre o ponto C e o plano Π (profundidade do objecto); iii) é

directamente proporcional à distância entre o ponto C e o eixo óptico (campo de vista); e iv) varia inversamente (função quadrática) com a distância entre a câmara e o plano Π (zona em observação).

Ainda a propósito deste tema, Hartley (2003) apresentou uma formulação analítica, que se descreve a seguir, desenvolvida a partir do modelo de projecção de perspectiva central.

A Equação 4.9 reproduz uma outra forma de representar o modelo de projecção da câmara de perspectiva, em que K representa a matriz dos parâmetros intrínsecos, \tilde{C}_o as coordenadas da câmara no sistema de coordenadas do mundo e R a matriz de rotação, representando a orientação do sistema de coordenadas estabelecido na câmara relativamente ao referencial do mundo (r_i representa o vector linha i da matriz R).

$$P = K \cdot R \cdot [I \mid -\tilde{C}_o] = K \cdot \begin{bmatrix} r_1^T & -r_1^T \cdot \tilde{C}_o \\ r_2^T & -r_2^T \cdot \tilde{C}_o \\ r_3^T & -r_3^T \cdot \tilde{C}_o \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Relativamente ao modelo de projecção afim, dado que a componente de profundidade (Z) é igual para todos os pontos de controlo, este é representado pela Equação 4.10, em que $\hat{0}^T$ representa o vector nulo.

$$P_M = K \cdot \begin{bmatrix} r_1^T & -r_1^T \cdot \tilde{C}_o \\ r_2^T & -r_2^T \cdot \tilde{C}_o \\ \hat{0}^T & D \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Um ponto C que se encontre a uma distância d do plano Π (paralelo ao plano da imagem) pode ser representado pela Equação 4.11, em que α e β representam constantes não nulas.

$$C = \begin{bmatrix} \alpha \cdot r_1 \\ \beta \cdot r_2 \\ d \cdot r_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Da projecção do ponto C no plano da imagem, segundo cada um dos modelos de projecção, obtém-se a Equação 4.12, em que $D = -r_3^T \cdot \tilde{C}_o$ representa a distância entre a origem do sistema de coordenadas do mundo e o centro da câmara, medido na direcção do eixo óptico.

$$c_p = K \cdot \begin{bmatrix} \alpha - r_1^T \cdot \tilde{C}_o \\ \beta - r_2^T \cdot \tilde{C}_o \\ D + d \end{bmatrix}, \quad c_a = K \cdot \begin{bmatrix} \alpha - r_1^T \cdot \tilde{C}_o \\ \beta - r_2^T \cdot \tilde{C}_o \\ D \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Fazendo $\tilde{x} = \begin{bmatrix} \alpha - r_1^T \cdot \tilde{C}_o \\ \beta - r_2^T \cdot \tilde{C}_o \end{bmatrix}$ e atendendo a que $K = \begin{bmatrix} \tilde{K}_{2 \times 2} & \tilde{x}_0 \\ \hat{0}^T & 1 \end{bmatrix}$, em que \tilde{x}_0 representa as

coordenadas do ponto principal, obtém-se:

$$c_p = \begin{pmatrix} \tilde{K}_{2 \times 2} \cdot \tilde{x} + (D+d) \cdot \tilde{x}_0 \\ D+d \end{pmatrix}, \quad c_a = \begin{pmatrix} \tilde{K}_{2 \times 2} \cdot \tilde{x} + D \cdot \tilde{x}_0 \\ D \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

a qual se simplifica para a forma representada pela Equação 4.14 (coordenadas homogéneas).

$$c_p = \begin{pmatrix} \tilde{x}_0 + \frac{\tilde{K}_{2 \times 2}}{D+d} \cdot \tilde{x} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad c_a = \begin{pmatrix} \tilde{x}_0 + \frac{\tilde{K}_{2 \times 2}}{D} \cdot \tilde{x} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

Calculando a diferença entre c_a e c_p obtém-se:

$$c_a - c_p = \frac{d}{D} \cdot (c_p - \tilde{x}_0) \quad (4.15)$$

Se considerarmos que as coordenadas do ponto principal \tilde{x}_0 é o vector nulo, verifica-se que este resultado é idêntico ao obtido anteriormente, por via geométrica (Equação 4.8).

Em resumo, para que o modelo de projecção afim possa ser adoptado sem penalização considerável têm que estar reunidas as seguintes condições:

- A distância de qualquer dos pontos do objecto ao eixo óptico – campo de vista – deve ser pequena (para que c_p seja pequeno);
- A dimensão de profundidade do objecto (d), na direcção longitudinal, deve ser pequena comparada com a distância entre a câmara e o objecto (D)².

Estas duas condições, na generalidade dos casos, são satisfeitas quando a distância entre a câmara e o objecto é significativa e, simultaneamente, é usada uma óptica com grande distância focal. Nestas condições, tanto o campo de vista como o campo de profundidade apresentam, normalmente, valores baixos. O modelo de projecção afim não é adequado para os casos em que existem pontos posicionados a diferentes profundidades, podendo-se, contudo, segmentar o objecto em função da profundidade e aplicar o modelo a cada secção (Hartley, 2003).

Como mencionado, o modelo da câmara afim aproxima-se tanto mais do modelo da câmara de perspectiva quanto maior for a distância entre a câmara e o objecto, acompanhado do aumento da distância focal de forma a manter o campo de vista aproximadamente constante (Figura 3.2).

² Tipicamente, uma relação superior a 10:1 (Shapiro, 2005).

4.3 Calibração de Câmaras do Tipo Afim

No processo de calibração de câmaras e de reconstrução de cenas é habitual enveredar por uma abordagem designada, genericamente, por *estratificação*. A ideia consiste em começar com uma reconstrução projectiva e actualizá-la progressivamente para afim e, finalmente, para Euclidiana, se possível (Hartley, 2003). Naturalmente, a reconstrução afim e métrica não serão possíveis na ausência de informação relacionada com a cena (ex. espaço, objecto), com o movimento da(s) câmara(s) ou com os parâmetros de calibração (intrínsecos) desta(s).

Para transitar do estado de reconstrução projectiva para o de reconstrução afim é necessário localizar o plano no infinito, ao passo que de afim para Euclidiano é necessário identificar a cónica absoluta. No caso presente, dado estar-se na presença de câmaras do tipo afim, o primeiro estágio de reconstrução é afim; por este motivo, nesta secção será abordado apenas o processo de rectificação relativo à segunda etapa. Assim, ao longo da presente secção serão abordados os seguintes tópicos:

- Estabelecimento dos sistemas de coordenadas no espaço e nas câmaras e relação entre si;
- Reconstrução afim;
- Reconstrução Euclidiana;
- Reconstrução métrica;
- Optimização da solução;
- Orientação do sistema de coordenadas de referência.

Os dois últimos tópicos constituem etapas adicionais ao processo de calibração dos subsistemas de visão. Assim, o primeiro, tal como o nome sugere, diz respeito à optimização da solução encontrada no final do processo de rectificação métrica (através de métodos de cálculo de optimização não linear) e visa diminuir o erro de reconstrução, gerado, fundamentalmente, pela presença de ruído nas observações. O segundo tópico, tal como se verá, destina-se a estabelecer a orientação pretendida para o sistema de coordenadas de referência, uma vez que a orientação do sistema de coordenadas reconstruído é arbitrária.

4.3.1 Formulação do Problema

Dado um conjunto de pontos de controlo de coordenadas 3D desconhecidas, estabelecidos num objecto com regime cinemático desconhecido, e um conjunto de câmaras fixas, pretende-se estimar, em primeiro lugar, as matrizes de projecção de cada um dos subsistemas de visão – matriz afim – e, em segundo lugar, reconstruir a posição 3D dos pontos de controlo – reconstru-

ção Euclidiana –, usando para o efeito o menor número possível de pontos de controlo e de subsistemas de visão.

Para este efeito considere-se, por agora, as seguintes condições:

- Estão disponíveis b pontos de controlo e N subsistemas de visão, com $b \geq 4$ e $N \geq 2$.
- São conhecidas as coordenadas de projecção dos b pontos de controlo em cada uma das imagens adquiridas.
- Não existe qualquer conhecimento acerca do movimento da estrutura, da posição 3D dos pontos, dos parâmetros extrínsecos e da distância focal dos vários subsistemas de visão.
- Os N sistemas ópticos não possuem qualquer tipo de distorção.

4.3.2 Estabelecimento dos Sistemas de Coordenadas na Imagem e no Espaço

Não sendo conhecidas as coordenadas dos pontos de controlo, o mesmo acontece com a posição e com a orientação do sistema de coordenadas de referência. Por este motivo, é necessário estabelecer um sistema de coordenadas de referência, algures no espaço, de preferência posicionado na zona de observação. Este objectivo é conseguido recorrendo à propriedade da preservação do centroide da câmara afim.

Como já referido, uma vez que podemos escolher onde fixar a origem do sistema de coordenadas de referência, por conveniência, pode-se escolher para este efeito o ponto correspondente ao centroide dos pontos de controlo que compõem o objecto, o qual passaremos a denominar de O_I (Equação 4.16)³. Em resultado desta opção, e em resultado da propriedade de preservação do centroide, o ponto O_I é projectado no plano da imagem de cada uma das câmaras no ponto correspondente ao centroide das respectivas projecções, o qual passaremos a denominar de O_C (Equação 4.17). Desta forma, fica estabelecida a relação entre o sistema de coordenadas de referência e o sistema de coordenadas de cada uma das câmaras (Figura 4.2).

$$O_I = \frac{1}{b} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^b X_i \\ \sum_{i=1}^b Y_i \\ \sum_{i=1}^b Z_i \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

³ Embora as coordenadas 3D do ponto O_I sejam desconhecidas, o objectivo da Equação 4.16 é estabelecer uma relação entre os sistemas de coordenadas de cada uma das câmaras e o sistema de coordenadas de referência.

$$\begin{bmatrix} O_{C1} \\ \vdots \\ O_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{v}_1 \\ \vdots \\ \bar{u}_N \\ \bar{v}_N \end{bmatrix} = \frac{1}{b} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^b u_{1i} \\ \sum_{i=1}^b v_{1i} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^b u_{Ni} \\ \sum_{i=1}^b v_{Ni} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

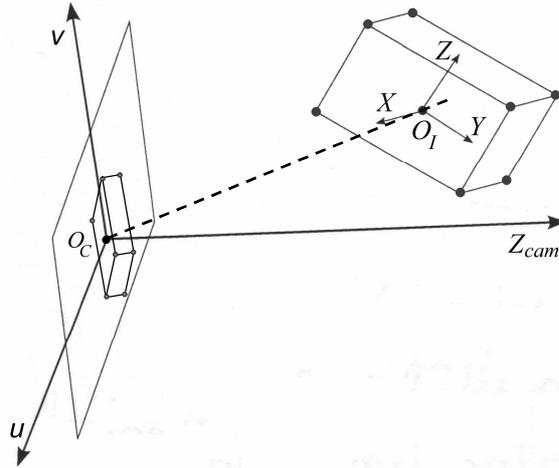


Figura 4.2 – Estabelecimento dos sistemas de coordenadas no espaço e na câmara e sua interligação.

4.3.3 Reconstrução Afim

Recordando a equação característica do modelo de projecção da câmara afim, que foi introduzida no Capítulo 3 (Equação 3.7), de forma a tornar mais claro o texto que se segue, apresenta-se, novamente, a referida equação (Equação 4.18), em que os vectores $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ e $[u_0, v_0]^T$ representam a posição da origem do sistema de coordenadas no espaço e na câmara, respectivamente.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} u_i - u_0 \\ v_i - v_0 \end{bmatrix}}_{\Delta c_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{bmatrix}}_M \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix}}_{\Delta C_i} \quad (4.18)$$

$$\Delta c_i = M \cdot \Delta C_i$$

Com as coordenadas dos pontos de controlo no mundo referenciadas a O_I (centroide), o vector $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ é o vector nulo e o vector $[u_0, v_0]^T = [\bar{u}, \bar{v}]^T$ (obtido da Equação 4.17). Deste modo, expandindo a Equação 4.18 de forma a incorporar os b pontos de controlo e as N câmaras, obtém-se a Equação 4.19, em que M e C representam, respectivamente, as matrizes

de projecção das N câmaras e a posição 3D (reconstrução) dos b pontos de controlo no espaço. A informação contida na matriz W , denominada de matriz das medições ou observações, resulta, apenas, das observações efectuadas (imagens adquiridas).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} u_{11} - \bar{u}_1 & \cdots & u_{1b} - \bar{u}_1 \\ v_{11} - \bar{v}_1 & \cdots & v_{1b} - \bar{v}_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{N1} - \bar{u}_N & \cdots & u_{Nb} - \bar{u}_N \\ v_{N1} - \bar{v}_N & \cdots & v_{Nb} - \bar{v}_N \end{bmatrix}}_W = \underbrace{\begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_N \end{bmatrix}}_M \cdot \underbrace{[C_1 \cdots C_b]}_C \quad (4.19)$$

$$W_{2N \times b} = M_{2N \times 3} \cdot C_{3 \times b}$$

O método de factorização da matriz das observações foi introduzido por Tomasi (1992), tendo sido usado e citado em diversos estudos realizados (Poelman, 1997; Kahl, 1998; Liebowitz, 2001; Wilczkowiak, 2003; Svoboda, 2005). O método possui a seguinte propriedade: *assumindo a existência de uma perturbação isotrópica, Gaussiana de média nula, independente e igual para cada ponto observado, a factorização proporciona uma reconstrução afim (estimação) em termos de máxima verosimilhança (Maximum Likelihood Estimation – MLE)* (Hartley, 2003). Contudo, para que o método possa ser aplicado é necessário que cada um dos pontos de controlo seja observado por todas as câmaras.

O membro direito da Equação 4.19 representa o produto de duas matrizes M e C , denominadas, respectivamente, de matriz de movimento (*motion*) e de matriz do objecto (*structure*). O *rank* de cada uma destas matrizes é inferior ou igual a três e, conseqüentemente, o mesmo sucede com o *rank* da matriz W . Deste modo, pode-se decompor – factorizar – a matriz W por meio de decomposição de valores próprios (*SVD – Single Value Decomposition*), tal como indicado na Equação 4.20, em que U , com a dimensão $2 \cdot N \times q$, representa os q primeiros vectores próprios ortogonais da matriz simétrica $W \cdot W^T$, V , com a dimensão $q \times b$, representa os q primeiros vectores próprios ortogonais da matriz simétrica $W^T \cdot W$ e D , uma matriz diagonal com a dimensão $q \times q$, contém os valores próprios de W , ordenados de modo que $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \cdots \geq \lambda_q$ e em que $q = \min(2 \cdot N, b)$.

$$W = U \cdot D \cdot V^T \quad (4.20)$$

Dado que o *rank* (W) ≤ 3 , apenas os três primeiros valores próprios (λ_1 , λ_2 e λ_3) deverão ser diferentes de zero. Na prática, devido à presença de perturbações nas observações, é possível, e muito provável, que o *rank* da matriz W seja superior a três, com os três primeiros valores próprios significativamente superiores aos restantes. Ainda assim, o método de factorização pode

ser aplicado, desde que a relação entre o terceiro (λ_3) e o quarto (λ_4) valores próprios de W seja suficientemente grande (Tomasi, 1992). No caso desta condição se verificar, pretende-se encontrar uma matriz W_F que satisfaça a condição de $rank = 3$ e que corresponda à melhor aproximação de W , segundo a norma de Frobenius.

Através da imposição de $\lambda_4 = \lambda_5 = \dots \lambda_q = 0$ obtém-se uma matriz $W_F = \ddot{U} \cdot \ddot{D} \cdot \ddot{V}^T$, tal que $W - W_F$ satisfaz o objectivo pretendido, isto é, W_F é a matriz que minimiza o erro de reprojecção, dado pela Equação 4.21, em que M_{F_i} e C_{F_j} representam, respectivamente, a matriz de projecção da câmara i e as coordenadas 3D do ponto de controlo j no espaço (correspondente às observações representadas por W_F), e as matrizes \ddot{U} , \ddot{D} e \ddot{V} são obtidas da Equação 4.22.

$$\mathcal{E} = \|W - W_F\|_F^2 = \sum_{\substack{i=1, \dots, N \\ j=1, \dots, b}} \|c_{i,j} - M_{F_i} \cdot C_{F_j}\|^2 \quad (4.21)$$

$$\begin{cases} \ddot{U} = U_{2N \times 3} \\ \ddot{D} = D_{3 \times 3} \\ \ddot{V} = V_{b \times 3} \end{cases} \quad (4.22)$$

Atendendo a que $W_{F(2N \times b)} = \ddot{U} \cdot \ddot{D} \cdot \ddot{V}^T = M_{2N \times 3} \cdot C_{3 \times b}$, uma possível solução para as matrizes de movimento M_A e de forma do objecto C_A pode ser a representada pela Equação 4.23 (o índice A representa reconstrução afim)⁴.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} M_{A_1} \\ \vdots \\ M_{A_N} \end{bmatrix}}_{M_A} = \ddot{U}_{2N \times 3} \cdot \sqrt{\ddot{D}_{3 \times 3}} \quad \underbrace{\begin{bmatrix} C_{A_1} & \dots & C_{A_b} \end{bmatrix}}_{C_A} = \sqrt{\ddot{D}_{3 \times 3}} \cdot \ddot{V}_{b \times 3}^T \quad (4.23)$$

A matriz C_A representa a reconstrução do objecto no espaço afim, caracterizado por, entre outras propriedades, preservar o paralelismo de rectas e a relação de comprimento entre segmentos de recta paralelos (e em particular colineares). Por vezes, estas duas propriedades são suficientes para os fins em vista, o que não é o caso presente, para a actividade de observação de estruturas.

A Equação 4.23 representa apenas uma de entre um número infinito de possíveis soluções, uma vez que a solução é determinada a menos de uma transformação afim. Na realidade, qualquer matriz H , não singular, também satisfaz a condição expressa pela Equação 4.23, como indi-

⁴ A igualdade deve ser entendida no sentido em que W_F é a melhor estimativa de W .

cado pela Equação 4.24. Quer isto dizer que as matrizes M_A e C_A são obtidas a menos de uma transformação afim (o índice E representa reconstrução Euclidiana).

$$W_F = (M_A \cdot H) \cdot (H^{-1} \cdot C_A) = M_E \cdot C_E \quad (4.24)$$

4.3.4 Rectificação de Afim para Euclidiana

A passagem do estado de reconstrução afim para o estado de reconstrução Euclidiana implica encontrar a matriz H que satisfaça a igualdade representada pela Equação 4.24. Neste contexto, considerando coordenadas homogêneas, um ponto i no espaço Euclidiano, C_{E_i} , relaciona-se com o respectivo ponto no espaço afim, C_{A_i} , através de uma transformação 3D, realizada por meio da matriz $H_{3 \times 3}$, tal como representado pela Equação 4.25,

$$C_{E_i} = \begin{bmatrix} H^{-1} & 0 \\ \hat{0}^T & 1 \end{bmatrix} \cdot C_{A_i} \quad (4.25)$$

em que a matriz H é obtida por meio de factorização de Cholesky aplicada à matriz $H \cdot H^T = (M_A^T \cdot \omega \cdot M_A)^{-1}$, sendo que ω representa a imagem da cónica absoluta numa das câmaras.

De um modo genérico, existem duas formas de realizar a rectificação do objecto, do espaço afim para o espaço Euclidiano : através da determinação da imagem da cónica absoluta (a mais utilizada) ou através da determinação da própria cónica absoluta. Assim, no primeiro caso, as restrições são formuladas no domínio da imagem enquanto que no segundo caso as mesmas são formuladas no domínio do objecto (espaço). Seguidamente, apresentam-se três métodos destinados à rectificação do objecto, com os dois primeiros métodos baseados na imagem da cónica absoluta e o último na cónica absoluta.

4.3.4.1 Rectificação com Câmaras Ortográficas

Um dos métodos de cálculo, proposto por Tomasi (1992), baseia-se nas propriedades de ortogonalidade da matriz de rotação. Assim, assumindo que o modelo de projecção da câmara é ortogonal, o mesmo é dizer que $\gamma_a = 1$ e que $s_a = 0$, verifica-se que a matriz ($R = M_A \cdot H$) é ortonormal, isto é, a norma de cada uma das linhas da matriz é unitária e o produto interno entre as duas linhas é nulo. Deste modo, cada câmara i contribui com duas restrições, tal como indicado pelo sistema de Equações 4.26, em que \ddot{m}_{ij} representa a linha j da matriz M_{A_i} e as incógnitas são os seis elementos da matriz simétrica $H \cdot H^T$. A solução de $H \cdot H^T$ pode ser determinada por meio de SVD.

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{m}_{11} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{11}^T = 1 \\ \ddot{m}_{12} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{12}^T = 1 \\ \ddot{m}_{11} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{12}^T = 0 \\ \vdots \\ \ddot{m}_{N1} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{N1}^T = 1 \\ \ddot{m}_{N2} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{N2}^T = 1 \\ \ddot{m}_{N1} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{N2}^T = 0 \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \ddot{m}_{11} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{11}^T - \ddot{m}_{12} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{12}^T = 0 \\ \ddot{m}_{11} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{12}^T = 0 \\ \vdots \\ \ddot{m}_{N1} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{N1}^T - \ddot{m}_{N2} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{N2}^T = 0 \\ \ddot{m}_{N1} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{N2}^T = 0 \end{array} \right. \quad (4.26)$$

A solução de $H \cdot H^T$ é obtida a menos de um factor de escala, o que significa que o número de graus de liberdade se resume a cinco. Deste modo, e uma vez que cada câmara contribui com apenas duas equações, constata-se que são necessárias pelo menos três câmaras para se poder determinar a solução de $H \cdot H^T$. Para além disso, este método só é aplicável nos casos em que a câmara é do tipo ortogonal (ou aproximadamente).

4.3.4.2 Rectificação Baseada em Parâmetros Intrínsecos

Outro método, alternativo, para o cálculo da matriz H , proposto por Kahl (1998), baseia-se no facto da matriz de projecção M , presente na Equação 4.16, poder ser decomposta no produto de duas matrizes – a matriz dos parâmetros intrínsecos (K) e a matriz de rotação (R) (Equação 4.27) – tal como mencionado no Capítulo 3.

$$M = K_{2 \times 2} \cdot R_{2 \times 3} \quad (4.27)$$

Assim, considerando a relação $M_E = M_A \cdot H$ e o facto da matriz R ser ortogonal, da substituição desta na Equação 4.27, obtém-se a Equação 4.28, em que r_i representa o vector coluna i da matriz R ($\omega^{-1} = K \cdot K^T$).

$$M_A \cdot H \cdot H^T \cdot M_A^T = K \cdot \begin{bmatrix} r_1^T \\ r_2^T \end{bmatrix} \cdot [r_1 \quad r_2] \cdot K^T = K \cdot K^T \quad (4.28)$$

$$M_A \cdot H \cdot H^T \cdot M_A^T = k_a \cdot \begin{bmatrix} \gamma_a & s_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot k_a \cdot \begin{bmatrix} \gamma_a & s_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = k_a^2 \cdot \begin{bmatrix} \gamma_a^2 & s_a^2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

O conhecimento (estimativa) de alguns dos parâmetros intrínsecos das câmaras⁵, nomeadamente os parâmetro s_a e γ_a , permitem formular um conjunto de restrições com vista à determinação da matriz $H \cdot H^T$.

⁵ Embora o modelo de projecção da câmara usada por Kahl fosse do tipo de perspectiva, este começou por considerar a aproximação ao modelo afim para obter uma estimativa inicial da matriz de projecção (calibração explícita) que, posteriormente, incorporou no processo de optimização não linear para obter a matriz de projecção da câmara de perspectiva.

Uma vez que os parâmetros k_a das N câmaras são determinados a menos de um factor de escala global, assumindo que o parâmetro s_a das N câmaras é igual a zero, o número de incógnitas resume-se a $5 + 2 \cdot N$ (cinco elementos da matriz $H \cdot H^T$ e os dois elementos $(k_a^2 \cdot \gamma_a^2)$ e k_a^2 , de cada uma das câmaras). Relativamente ao número de equações, cada uma das câmaras contribui com três ($3 \cdot N$). Deste modo, para a determinação da solução de $H \cdot H^T$ são necessárias um mínimo de cinco câmaras. Se para além dos parâmetros s_a forem também conhecidos os parâmetros γ_a , neste caso o número mínimo de câmaras reduz-se a três (número de incógnitas é $5 + N$).

4.3.4.3 Rectificação Baseada em Características do Objecto

Como se constata, no caso de configurações com apenas duas câmaras, não é possível determinar, de forma inequívoca, a matriz $H \cdot H^T$. Nestas condições, independentemente do número de pontos de controlo utilizados, existe uma infinidade de soluções (Ullman, 1982; Huang, 1989) que satisfazem o sistema de equações representado pelas Equações 4.26 e 4.28. Nos dois métodos descritos anteriormente, a determinação da matriz H é conseguida, exclusivamente, através de restrições impostas à matriz de movimento M_A , não sendo usada qualquer informação do objecto (C_A). Quer isto dizer que a reconstrução é conseguida, exclusivamente, à custa da matriz de movimento.

A formulação que se segue faz uso do conhecimento das características do objecto no espaço e foi aplicada por Liebowitz (2001) na reconstrução do movimento executado por um atleta ao longo do tempo. Também (Wilczkowiak, 2001; 2003) explorou o conceito associado com a relação de comprimento e com a amplitude dos ângulos formados pelas faces de um paralelepípedo para estabelecer a dualidade entre os parâmetros intrínsecos da câmara e do paralelepípedo (cf. Capítulo 3).

O modelo de projecção afim não preserva nem a amplitude dos ângulos nem a relação de comprimentos entre segmentos não paralelos. Deste modo, o conhecimento da amplitude de ângulos do objecto no espaço e/ou da relação de comprimentos entre segmentos não paralelos pode ser usado para a determinação da matriz de rectificação. Assim, dados dois pontos i e j no espaço afim, representados por C_{A_i} e C_{A_j} , fazendo uso da Equação 4.25, é possível determinar um vector D_E , no espaço Euclidiano, cuja direcção é a da recta que passa pelos pontos C_i e C_j , conforme indicado pela Equação 4.29.

$$\begin{aligned}
D_E &= (H^{-1} \cdot C_{A_i}) - (H^{-1} \cdot C_{A_j}) \\
\Leftrightarrow D_E &= H^{-1} \cdot (C_{A_i} - C_{A_j}) \\
\Leftrightarrow D_E &= H^{-1} \cdot D_A
\end{aligned} \tag{4.29}$$

Como se constata, um vector no espaço Euclidiano, D_E , relaciona-se com o correspondente vector no espaço afim, D_A , através da matriz de transformação afim, H . A amplitude do vector D_E , representado por L , corresponde à distância métrica entre os pontos C_i e C_j , sendo o seu valor quadrático determinado através da Equação 4.30, com $\Omega_\infty = (H \cdot H^T)^{-1}$.

$$\begin{aligned}
L^2 &= (H^{-1} \cdot D_A)^T \cdot (H^{-1} \cdot D_A) \\
\Leftrightarrow L^2 &= D_A^T \cdot (H \cdot H^T)^{-1} \cdot D_A \\
\Leftrightarrow L^2 &= D_A^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_A
\end{aligned} \tag{4.30}$$

Considerando a relação de comprimento entre dois segmentos dada por $L_1 = \kappa \cdot L_2$, em que κ representa um escalar não nulo, obtém-se a igualdade $L_1^2 = \kappa^2 \cdot L_2^2$. Fazendo uso da Equação 4.30, constrói-se a restrição de relação de comprimento entre dois segmentos, em que as incógnitas são os seis elementos da matriz simétrica Ω_∞ , tal como indicado pela Equação 4.31.

$$D_{A_1}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_1} - \kappa^2 \cdot D_{A_2}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_2} = 0 \tag{4.31}$$

No mesmo contexto, o conhecimento da amplitude do ângulo formado por dois segmentos do objecto, representado por θ , permite formular outro tipo de restrição, tal como indicado pela Equação 4.32.

$$(D_{A_1}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_2})^2 - \cos^2 \theta \cdot (D_{A_1}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_1}) \cdot (D_{A_2}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_2}) = 0 \tag{4.32}$$

No caso particular de θ ser um ângulo recto, a Equação 4.32 simplifica-se para a forma indicada pela Equação 4.33, a qual tem a vantagem de ser uma equação linear.

$$D_{A_1}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_2} = 0 \tag{4.33}$$

Dado o carácter linear das Equações 4.31 e 4.33, estas podem ser re-escritas sob a forma vectorial, tal como indicado na Equação 4.34, em que D representa a matriz dos coeficientes e Ω'_∞ o vector das incógnitas (seis graus de liberdade). Atendendo a que a solução é determinada a menos de um factor de escala global, é necessário formular pelo menos cinco restrições linearmente independentes para se poder determinar a solução de Ω'_∞ .

$$\begin{cases}
D_{A_1}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_1} - \kappa^2 \cdot D_{A_2}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_2} = 0 \\
\vdots \\
D_{A_i}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_i} - \kappa^2 \cdot D_{A_j}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_j} = 0 \\
D_{A_1}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_2} = 0 \\
\vdots \\
D_{A_q}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_k} = 0
\end{cases} \quad (4.34)$$

$$D \cdot \Omega'_\infty = 0$$

A solução de Ω'_∞ , o mesmo é dizer de $(H \cdot H^T)^{-1}$, pode ser obtida por meio de SVD aplicada à matriz D . O vector próprio associado ao menor valor próprio, isto é, o que minimiza a expressão $\|D^T \cdot \Omega'_\infty\|$, fornece a solução de Ω_∞ . Sob condições de ruído e usando seis ou mais restrições, é provável que o *rank* da matriz D seja seis (Liebowitz, 2001).

No caso dos ângulos não serem rectos, o sistema de equações deixa de ser linear e a determinação da solução de Ω_∞ terá de ser realizada por meio de métodos de cálculo iterativo. Neste caso, é necessário fornecer a estimativa inicial do vector Ω'_∞ .

A restrição de relação de comprimento, quando verificadas determinadas condições, torna-se particularmente interessante na medida em que possibilita a rectificação da reconstrução do objecto sem ser necessário conhecer as características do objecto.

Considerando o caso particular de um objecto que se move no espaço, traduzido numa sequência de imagens adquiridas pelas câmaras ao longo do tempo, pode-se usar o princípio descrito pela Equação 4.31, para formular um conjunto de restrições com base na invariabilidade do comprimento de um dado segmento entre imagens. Neste caso, duas imagens de um mesmo segmento, adquiridas em instantes distintos t_1 e t_2 , permitem formular uma restrição, tal como indicado pela Equação 4.35, com a particularidade de não ser necessário conhecer qualquer relação de comprimento entre segmentos, uma vez que $\kappa = 1$. A formulação deste tipo de restrição, como se verá a seguir, requer a existência de condições específicas, nomeadamente de rotação do objecto.

$$D_{A(t=t_1)}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A(t=t_1)} - D_{A(t=t_2)}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A(t=t_2)} = 0 \quad (4.35)$$

Como mencionado, para a determinação da matriz H é necessário formular pelo menos cinco equações. Na eventualidade da informação conhecida, quer ao nível das câmaras quer respeitante ao objecto, não ser suficiente para satisfazer este objectivo, pode-se combinar os dois tipos de restrição. Assim, por exemplo, na presença de câmaras ortográficas bastará uma restrição adi-

cional, isto é, o conhecimento de um ângulo ou de uma relação de comprimento entre dois segmentos do objecto para, em princípio, se poder determinar a matriz H (Equação 4.36). No entanto, atendendo ao carácter não linear do sistema de equações – o vector das incógnitas passa a representar as entidades $H \cdot H^T$ e $(H \cdot H^T)^{-1}$ – a solução deverá ser calculada por meio de métodos de cálculo iterativo. A necessidade de conhecer uma estimativa inicial dos elementos da matriz H pode dificultar e comprometer a aplicabilidade desta solução.

$$\begin{cases} \ddot{m}_{11} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{11}^T - \ddot{m}_{12} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{12}^T = 0 \\ \ddot{m}_{11} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{12}^T = 0 \\ \ddot{m}_{21} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{21}^T - \ddot{m}_{22} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{22}^T = 0 \\ \ddot{m}_{21} \cdot H \cdot H^T \cdot \ddot{m}_{22}^T = 0 \\ D_{A_1}^T \cdot (H \cdot H^T)^{-1} \cdot D_{A_1}^T - \kappa_1^2 \cdot D_{A_2}^T \cdot (H \cdot H^T)^{-1} \cdot D_{A_2}^T = 0 \\ \text{ou} \\ D_{A_1}^T \cdot (H \cdot H^T)^{-1} \cdot D_{A_2}^T = 0 \end{cases} \quad (4.36)$$

Tendo sido encontrada a solução de $H \cdot H^T$, por qualquer um dos métodos apresentados, a solução de H pode ser obtida por meio de factorização de Cholesky. Contudo, para que se possa executar a factorização de Cholesky é necessário que a matriz $H \cdot H^T$ seja definida positiva. No caso da matriz $H \cdot H^T$ não ser definida positiva, o cálculo da matriz H pode ser realizado através de optimização não linear (Tomasi, 1992; Kahl, 1998), impondo esta restrição adicional (Quan, 1996).

Conhecida a matriz H , calculam-se as novas matrizes de movimento e de forma do objecto, a menos de um factor de escala global, tal como indicado a seguir

$$\begin{cases} M_E = M_A \cdot H \\ C_E = H^{-1} \cdot C_A \end{cases} \quad (4.37)$$

Casos de Degenerescência

Os casos de degenerescência ocorrem quando uma dada restrição não fornece informação útil com vista à determinação da matriz H ou quando duas ou mais restrições são linearmente dependentes (Liebowitz, 2001). Os casos de degenerescência derivam, fundamentalmente, do facto da reconstrução afim preservar o paralelismo de segmentos e de relação de comprimento entre segmentos paralelos, e em particular colineares.

1º Caso – Segmentos paralelos (e colineares)

Dois segmentos paralelos não proporcionam qualquer restrição, pelas razões apontadas (preservação de paralelismo e de relação de comprimento entre segmentos paralelos). Considere-se dois segmentos paralelos, em que se verifica a igualdade $D_{A_1} = \kappa \cdot D_{A_2}$. Substituindo D_{A_1} na Equação 4.31, obtém-se a igualdade representada pela Equação 4.38.

$$\kappa^2 \cdot D_{A_2}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_2} - \kappa^2 \cdot D_{A_2}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_2} = 0 \quad (0 = 0) \quad (4.38)$$

2º Caso – Pares de segmentos paralelos

Dois pares de segmentos paralelos proporcionam uma única restrição de relação de comprimento e uma única restrição de ângulo. Considerem-se os vectores D_{A_1} , D_{A_2} , D_{A_3} e D_{A_4} , em que D_{A_1} é paralelo a D_{A_3} e D_{A_2} é paralelo a D_{A_4} (Figura 4.3), e que satisfazem as seguintes relações:

$$D_{A_1} = \kappa_1 \cdot D_{A_2} \quad \text{e} \quad D_{A_3} = \kappa_2 \cdot D_{A_4} \quad (4.39\text{-a})$$

$$D_{A_1} = \kappa_3 \cdot D_{A_3} \quad \text{e} \quad D_{A_2} = \kappa_4 \cdot D_{A_4} \quad (4.39\text{-b})$$

Da aplicação da Equação 4.31 obtém-se as duas restrições:

$$D_{A_1}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_1} - \kappa_1^2 \cdot D_{A_2}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_2} = 0 \quad (4.40\text{-a})$$

$$D_{A_3}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_3} - \kappa_2^2 \cdot D_{A_4}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_4} = 0 \quad (4.40\text{-b})$$

Substituindo as relações de comprimentos descritas pela Equação 4.39-b na Equação 4.40-a, obtém-se a Equação 4.41

$$\kappa_3^2 \cdot D_{A_3}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_3} - \kappa_1^2 \cdot \kappa_4^2 \cdot D_{A_4}^T \cdot \Omega_\infty \cdot D_{A_4} = 0 \quad (4.41)$$

Da comparação desta equação com a Equação 4.40-b deduz que $\frac{\kappa_2}{\kappa_4} = \frac{\kappa_1}{\kappa_3}$, isto é, a Equação 4.39-b não gera qualquer restrição adicional em Ω_∞ .

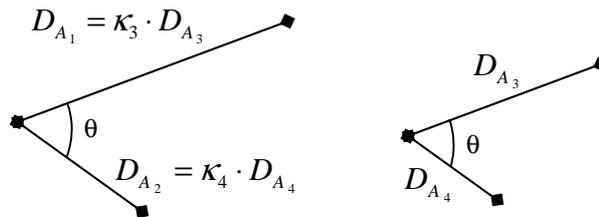


Figura 4.3 – Segmentos paralelos geram uma única restrição de relação de comprimento e uma única restrição de ângulo.

3º Caso – Segmentos em planos coplanares ou paralelos

Qualquer número de segmentos pertencentes a um plano ou a um conjunto de planos paralelos proporcionam no máximo duas restrições linearmente independentes em Ω_∞ . Em termos geométricos, o conjunto de restrições define completamente a estrutura Euclidiana no plano e no feixe (*pencil*) de planos paralelos, não proporcionando, contudo, qualquer informação para outras direcções que não as definidas pelo plano (Liebowitz, 2001).

Em face do exposto, a aplicabilidade da restrição formulada com base na invariabilidade do comprimento de um segmento ao longo do tempo (Equação 4.35) deixa de fazer sentido no caso do objecto ser sujeito a movimento de translação pura e/ou a movimento de rotação de baixa amplitude. Na presença de movimento de rotação de baixa amplitude, dada a proximidade da condição de degenerescência, assim como na presença de ruído, é possível que se obtenham resultados com grande variabilidade. Pelas mesmas razões, no caso de translação pura – degenerescência completa – a presença de ruído pode induzir o sistema de equações a uma condição válida, mas com resultados imprevisíveis.

Na secção 4.4 apresentam-se alguns resultados, obtidos por simulação numérica, onde se procura pôr em evidência a eficiência deste tipo de restrição.

4.3.5 Reconstrução Métrica

Por vezes, com a realização da calibração do sistema de visão pretende-se, fundamentalmente, reconstruir a estrutura do objecto, por forma a efectuar a medição de ângulos e de relação de comprimentos ou de áreas do objecto. Nestes casos, dispensa-se a determinação do factor de escala global e a orientação do sistema de coordenadas associado ao objecto também é irrelevante para estes fins. No entanto, no caso concreto da observação de uma estrutura – medição de deslocamentos –, esta informação só por si não chega, sendo imperativo determinar o factor de escala global (λ) – reconstrução métrica.

Para o cálculo do factor de escala é imprescindível dispor de algum tipo de informação métrica acerca do objecto no espaço ou, em alternativa, conhecer o parâmetro intrínseco k_a de pelo menos um dos subsistemas de visão envolvidos no processo de calibração (Equação 3.8). Não sendo satisfeita esta última condição, a solução, considerada a mais viável, consiste em fornecer a distância entre dois pontos de controlo. Deste modo, o factor de escala é determinado com base na relação entre a distância real entre dois pontos k e q , medida no espaço, e a distância entre os respectivos pontos, medida no espaço reconstruído ($\overline{C}_{E_{kq}}$).

Para a determinação do factor de escala o conhecimento de uma única distância no espaço é suficiente. Contudo, se forem conhecidas várias distâncias, entre diferentes pontos de controlo, pode-se usar toda essa informação para a determinação de um factor de escala ($\bar{\lambda}$), correspondente ao valor médio dos vários factores de escala determinados (Equação 4.42), em que \bar{C}_{kq} e $\bar{C}_{E_{kq}}$ representam, respectivamente, a distância real e a distância reconstruída entre os pontos de controlo k e q , e n representa o número de distâncias conhecidas.

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{k,q} \frac{\bar{C}_{kq}}{\bar{C}_{E_{kq}}}}{n} \quad (4.42)$$

Tendo-se determinado o factor de escala médio, actualizam-se as matrizes de movimento e de forma do objecto, de acordo com a Equação 4.43.

$$\begin{cases} M_M = M_E \cdot \bar{\lambda}^{-1} \\ C_M = \bar{\lambda} \cdot C_E \end{cases} \quad (4.43)$$

4.3.6 Refinamento da Solução

A Equação 4.43 representa a reconstrução métrica, aproximada, do objecto. De facto, a reconstrução é aproximada, apesar da solução obtida ser a que minimiza o erro de projecção do conjunto de pontos de controlo nas imagens, tendo em conta as observações disponíveis, relativas às imagens adquiridas. No entanto, tal como mencionado, partindo do princípio que as observações usadas no processo de calibração estão contaminadas por ruído, este efeito faz-se sentir nas matrizes de movimento e de forma do objecto. Neste contexto, a solução encontrada pode ser melhorada através da aplicação de métodos de cálculo de optimização não linear, como por exemplo o algoritmo de *Levenberg-Marquardt* – LM), fazendo uso de toda a informação conhecida, tanto no espaço da imagem como no espaço do objecto.

Neste contexto, a função de erro a minimizar pelo algoritmo LM compreende duas componentes: i) o erro de projecção do objecto reconstruído (definido pelo conjunto de pontos C_M) em cada uma das imagens, usando o respectivo modelo estimado de projecção da câmara (M_{M_i}); e ii) o erro de distância (conhecida) entre dois pontos reconstruídos.

A função de erro (ϵ), que se pretende minimizar, é a descrita pela Equação 4.44, em que c_{ij} representa as coordenadas do ponto j observadas na imagem da câmara i , c'_{ij} representa as coordenadas de projecção na imagem da câmara i do ponto reconstruído C'_j , segundo o modelo de

projecção M'_i , w é o peso atribuído às observações de distância e \bar{C}_{kq} e \bar{C}'_{kq} representam a distância entre os pontos de controlo k e q , medida no espaço do objecto e no espaço reconstruído, respectivamente.

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^b \underbrace{\|c_{ij} - c'_{ij}(M'_i, C'_j)\|^2}_{\text{erro de coordenadas}} \right) + w \cdot \sum_{k,q} \underbrace{\|\bar{C}_{kq} - \bar{C}'_{kq}\|^2}_{\text{erro de distância}} \quad (4.44)$$

Os parâmetros a otimizar pelo algoritmo LM são as coordenadas 3D dos pontos no espaço (objecto) e as matrizes de projecção dos vários subsistemas de visão, sendo que os valores iniciais destes parâmetros são os obtidos até ao momento, mais concretamente, $M'^0 = M_M$ e $C'^0 = C_M$ (da Equação 4.43).

Sendo as distâncias entre os pontos de controlo obtidas por meio de medição⁶ e as coordenadas dos pontos nas imagens extraídas do processamento das mesmas, as quais estarão, certamente, afectadas por ruído, será natural assumir que as primeiras apresentem maior grau de confiança. O parâmetro w representa o efeito de incerteza associado a cada tipo de observação, através da atribuição de pesos distintos consoante o grau de confiança atribuído a cada tipo de observação.

4.3.7 Orientação do Sistema de Coordenadas de Referência

A matriz de transformação afim H , determinada anteriormente, foi obtida a menos de uma transformação de rotação do sistema de coordenadas de referência (O_I), uma vez que a orientação deste é arbitrária. Outra forma de confirmar este facto é através da decomposição QR da matriz H , isto é, fazendo $H = Q \cdot R$. Sendo a matriz R ortonormal verifica-se a igualdade representada pela Equação 4.45.

$$H \cdot H^T = Q \cdot R \cdot R^T \cdot Q^T = Q \cdot Q^T \quad (4.45)$$

Para fins de reconstrução de objectos é usual adoptar-se a pose de uma das câmaras (ex. a primeira da lista) para pose de referência, de modo que a matriz de rotação desta câmara é a matriz identidade, como representado pela Equação 4.46 (Hartley, 1992; Tomasi, 1992; Cerveri, 1998; Borghese, 2000), em que B representa uma matriz de rotação.

$$R_I \cdot B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

⁶ Embora as distâncias entre os pontos de controlo possam estar afectadas por erro de medição, este pode ser estimado e incorporado no processo de cálculo.

No caso específico da observação de estruturas, torna-se desejável conhecer a orientação do sistema de coordenadas (não tanto a sua posição no espaço) e associá-la a pontos ou a características de referência existentes na própria estrutura ou no espaço circundante. Por exemplo, no caso concreto de uma ponte suspensa importa que o deslocamento vertical seja medido, tanto quanto possível, na direcção da aceleração da gravidade.

Svoboda (2005) sugere a localização e a utilização de objectos com dimensões e posições conhecidas para a realização do alinhamento do sistema de coordenadas de referência. No entanto, reconhecendo a dificuldade em satisfazer este requisito na prática, opta por uma outra via baseada na estimação da posição 3D de cada uma das câmaras.

Para o caso específico da observação de pontes suspensas, propõe-se uma solução alternativa, que passa por posicionar na estrutura três ou mais alvos, não colineares, usando como referência para o seu posicionamento a orientação definida pelas travessas e vigas que formam a estrutura do tabuleiro. A orientação do sistema de coordenadas de referência passa a ser estabelecida pela orientação do plano definido por estes três (ou mais) pontos coplanares. Neste contexto, o problema que se coloca é o de encontrar uma matriz de rotação $B_{3 \times 3}$ que faça rodar o actual sistema de coordenadas de referência, O_I , de modo a este assumir a orientação desejada.

Assim, considere-se que os pontos de controlo C_1 , C_2 e C_3 foram posicionados na estrutura de forma a definirem um sistema ortonormado com a orientação pretendida (plano), sendo os vectores unitários e_1 , e_2 e e_3 obtidos de acordo com a Equação 4.47 (o símbolo \times representa o produto externo de dois vectores).

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{(C_2 - C_1)}{\|C_2 - C_1\|} \\ e_3 &= \frac{e_1 \times (C_3 - C_1)}{\|e_1 \times (C_3 - C_1)\|} \\ e_2 &= e_3 \times e_1 \end{aligned} \quad (4.47)$$

De forma idêntica, a orientação do actual sistema de coordenadas O_I , relativamente à posição dos três pontos usados como referência, é dada pelos vectores unitários e'_1 , e'_2 e e'_3 , obtidos da aplicação da Equação 4.48 aos respectivos pontos reconstruídos C'_1 , C'_2 e C'_3 (resultantes da Equação 4.44).

$$\begin{aligned} e'_1 &= \frac{(C'_2 - C'_1)}{\|C'_2 - C'_1\|} \\ e'_3 &= \frac{e'_1 \times (C'_3 - C'_1)}{\|e'_1 \times (C'_3 - C'_1)\|} \\ e'_2 &= e'_3 \times e'_1 \end{aligned} \quad (4.48)$$

O objectivo é encontrar a matriz de rotação B que faça rodar o actual sistema de coordenadas, com a orientação definida por $A_1 = [e'_1, e'_2, e'_3]$, para a orientação definida por $A_0 = [e_1, e_2, e_3]$. Para este efeito, pode-se aplicar o método de cálculo proposto por Goryn (1995), o qual permite determinar a matriz de rotação que relaciona as observações de pose de um corpo rígido adquiridas em dois instantes distintos⁷.

Assim, conhecidas as poses actual (A_1) e pretendida (A_0), a matriz B é obtida do produto das matrizes ortogonais U e V – Equação 4.50 –, resultantes da decomposição SVD aplicada à matriz produto ($A_1^T \cdot A_0$) – Equação 4.49.

$$A_1^T \cdot A_0 = U \cdot D \cdot V^T \quad (4.49)$$

$$B = U \cdot V^T \quad (4.50)$$

Uma vez encontrada a matriz B , determinam-se as novas matrizes de movimento e de forma do objecto, conforme indicado na Equação 4.51.

$$\begin{cases} M = M' \cdot B \\ C = B^{-1} \cdot C' \end{cases} \quad (4.51)$$

A matriz M , com a dimensão $2N \times 3$, representa o conjunto das matrizes de projecção dos subsistemas de visão envolvidos na calibração, enquanto que a matriz C , com a dimensão $3 \times b$, representa as coordenadas 3D dos pontos de controlo referenciadas no sistema de coordenadas estabelecido no espaço do tabuleiro.

4.3.8 Imagem Média

Umás vezes pela própria essência do fenómeno, outras vezes devido à complexidade de modelação, é habitual modular muitos dos fenómenos físicos da natureza como tendo média nula. Para além disso, de acordo com o teorema do limite central, a média de um conjunto de N variáveis aleatórias independentes e com a mesma distribuição de probabilidade, média μ e desvio padrão σ , converge para o valor μ à medida que N aumenta; independentemente da forma da distribuição original de cada variável, a média resultante obedece a uma distribuição normal.

Assumindo-se que o sinal de interesse é exposto a N fontes de ruído, independentes e com média nula, deduz-se que o ruído resultante obedece a uma distribuição normal de média nula. Razão pela qual, na modelação de sistemas por meio de simulação numérica, é prática corrente perturbar o modelo matemático através da injeção de ruído, caracterizado por obedecer a uma distribuição normal de média nula.

⁷ No caso dos pontos de controlo se encontrarem distribuídos por dois ou mais planos ortogonais, a matriz de rotação pode ser determinada por meio de optimização não linear, impondo restrições de ortogonalidade à matriz de rotação B .

Nestas condições, o modelo de projecção afim pode proporcionar uma elevada fiabilidade e robustez à presença de ruído, através da aplicação da propriedade de preservação do centroide. A ideia de base consiste em adquirir F imagens do objecto, transformá-las numa única imagem – denominada de *imagem média* – e, a partir desta, encontrar a matriz de projecção de cada um dos subsistemas de visão.

Considerem-se b pontos de controlo e F imagens, adquiridas por cada uma das câmaras, de forma sincronizada, enquanto o objecto se move no espaço ao longo do tempo (ex. tabuleiro de uma ponte suspensa). Em resultado do movimento do objecto, que se verifica durante o intervalo de tempo de aquisição das imagens, cada um dos pontos de controlo gera uma nuvem de pontos no espaço e na imagem resultante da sobreposição das F imagens⁸ (Figura 4.4).

No caso do movimento do objecto não contemplar rotação (translação pura), ou se esta apresentar baixa amplitude, a propriedade de preservação do centroide permite transformar a nuvem criada por cada um dos pontos (C_i^f e c_i^f) num único ponto – centroide – no espaço (C_i) e o correspondente na imagem (c_i).

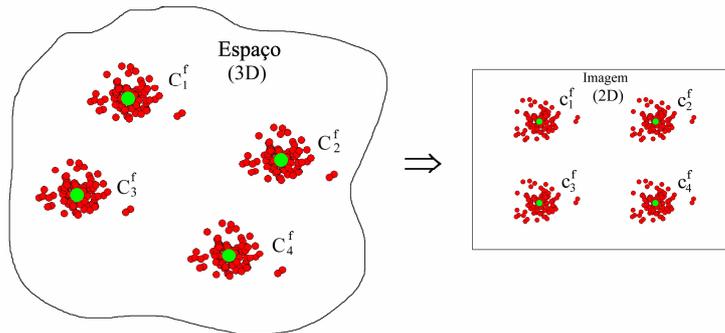


Figura 4.4 – Nuvem de pontos (a vermelho) gerada por cada um dos b pontos de controlo, no espaço e no plano da imagem. Indicação do centroide (a verde) da nuvem de pontos no espaço e na imagem.

A determinação da imagem média, correspondente às F imagens adquiridas, é efectuada por meio da Equação 4.52.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1b} \\ v_{11} & \cdots & v_{1b} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{N1} & \cdots & u_{Nb} \\ v_{N1} & \cdots & v_{Nb} \end{bmatrix}}_{c_m} = \frac{1}{F} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^F \hat{u}_{i11} & \cdots & \sum_{i=1}^F \hat{u}_{i1b} \\ \sum_{i=1}^F \hat{v}_{i11} & \cdots & \sum_{i=1}^F \hat{v}_{i1b} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^F \hat{u}_{iN1} & \cdots & \sum_{i=1}^F \hat{u}_{iNb} \\ \sum_{i=1}^F \hat{v}_{iN1} & \cdots & \sum_{i=1}^F \hat{v}_{iNb} \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

⁸ No caso do objecto se encontrar estacionário, as coordenadas de posição no espaço de cada um dos pontos de controlo mantêm-se inalteráveis, o que significa que a posição do centroide da nuvem de pontos coincide com a posição do ponto de controlo, podendo não acontecer o mesmo com as coordenadas de projecção nas imagens, em virtude da presença de perturbações.

Por seu lado, as coordenadas do ponto de controlo C_i , correspondente ao centroide de cada uma das nuvens de pontos no espaço, embora desconhecidas, são obtidas a partir da Equação 4.53.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} X_1 & \cdots & X_b \\ Y_1 & \cdots & Y_b \\ Z_1 & \cdots & Z_b \end{bmatrix}}_{C_m} = \frac{1}{F} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^F \hat{X}_{i1} & \cdots & \sum_{i=1}^F \hat{X}_{ib} \\ \sum_{i=1}^F \hat{Y}_{i1} & \cdots & \sum_{i=1}^F \hat{Y}_{ib} \\ \sum_{i=1}^F \hat{Z}_{i1} & \cdots & \sum_{i=1}^F \hat{Z}_{ib} \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

A partir deste momento, para o processo de calibração apenas interessa a informação contida na imagem média do conjunto das câmaras, representada pela matriz c_m , e o conjunto de pontos de controlo representado pela matriz C_m , correspondente às coordenadas dos centroides das várias nuvens. A transformação das F imagens numa única imagem permite usar um número elevado de imagens sem, contudo, implicar aumento significativo de recursos ou de tempo de processamento dos dados.

A operação de determinação da imagem média traduz-se numa redução muito significativa de eventuais perturbações que possam afectar as coordenadas dos pontos nas F imagens – efeito de filtragem passa-baixo ao nível das coordenadas da imagem.

Como mencionado, se o objecto for sujeito a movimento de translação pura (ausência da componente de rotação), a Equação 4.53 é válida e, por consequência, o mesmo acontece com o método de cálculo associado à determinação da imagem média; isto é, a imagem média preserva em si as características físicas (dimensões e ângulos) do objecto original. Se o objecto for sujeito a movimento de rotação, a Equação 4.53 deixa de ser válida e, neste caso, não existem garantias de preservação das características do objecto original, sendo o erro, geralmente, tanto maior quanto maior a amplitude da rotação a que o objecto é sujeito.

No entanto, no caso das grandes obras, habitualmente, a amplitude da rotação é pequena e o regime dinâmico é lento (mesmo que a amplitude seja significativa a frequência é baixa, devido ao facto da energia ser finita). Em virtude da observação ser realizada a longa distância, o efeito da rotação tende a diminuir à medida que a distância entre a câmara e o objecto aumenta; adicionalmente, sendo o ritmo de aquisição (de imagens) muito superior à dinâmica do objecto, é razoável assumir que a componente de rotação do objecto é desprezável, mantendo-se válida a aproximação adoptada. Conceito idêntico foi igualmente adoptado por Liebowitz (2001), ao desprezar a rotação da câmara, imposta para seguir a trajectória de um atleta observado a longa distância, e assumir que a câmara se mantinha estacionária.

4.3.9 Determinação dos Parâmetros Intrínsecos e Extrínsecos

A determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos do subsistema de visão – calibração explícita – é realizada a partir da respectiva matriz de projecção, M_i , obtida do processo de calibração.

A decomposição QR de uma matriz gera duas matrizes, uma triangular superior, com a dimensão dessa matriz, e uma outra matriz que é ortogonal. Neste sentido, pode-se afirmar que a decomposição QR da matriz de projecção M_i satisfaz a Equação 3.8. Assim, da decomposição QR da matriz M_i , obtém-se a matriz Q_i , com a dimensão 2×3 , e a matriz R_i (Equação 4.54). Em concordância com a Equação 3.8, a matriz dos parâmetros intrínsecos do subsistema de visão i corresponde à primeira submatriz 2×2 de Q_i .

$$\begin{cases} [Q_i \ R_i] = \text{QR} (M_i) \\ K_i = Q_{2 \times 2}^i \end{cases} \quad (4.54)$$

A decomposição QR não é única, podendo os ângulos de rotação aparecer rodados de $\pm 180^\circ$. A sua identificação e correcção pode ser realizada recorrendo às características singulares dos parâmetros intrínsecos, os quais devem ser todos positivos, e ao facto do determinante da matriz de rotação dever ser também positivo e unitário.

A imposição da restrição $K_i(2, 2) = 1$ permite determinar o factor de escala k_a do subsistema de visão i , o qual representa a relação entre a distância focal, em píxeis, e a distância entre o sistema de coordenadas O_{C_i} e o sistema de coordenadas de referência O_I , isto é, $k_a = \frac{f}{Z_0}$. Deste

modo, para se poder determinar a distância focal, em píxeis, é necessário conhecer a distância entre os dois sistemas de coordenadas (Z_0) e vice-versa⁹; isto acontece porque no modelo de projecção afim a coordenada longitudinal do vector T não é determinada de forma explícita. Neste caso, como já mencionado, o vector de translação representa as coordenadas de projecção da origem do sistema de coordenadas do mundo, O_I , na imagem, sendo determinadas a partir da Equação 4.17.

$$T_i = [\bar{u}_i, \bar{v}_i]^T \quad (4.55)$$

4.4 Resultados de Reconstrução Métrica com Duas Câmaras

Na presente secção serão apresentados alguns dos resultados mais significativos de calibração dos sistemas ópticos, obtidos de testes realizados por meio de simulação numérica. Pretendeu-se, fundamentalmente, pôr em evidência e comparar a eficiência do procedimento de

⁹ A determinação da distância focal em unidades métricas pressupõe o conhecimento da dimensão do píxel do sensor da câmara de vídeo.

reconstrução Euclidiana a partir de restrições formuladas com base nas características do objecto (secção §4.3.4.3) e em função de diferentes condições de ensaio.

Como mencionado no início do capítulo, um dos objectivos que se pretendia alcançar com o presente estudo era o de poder realizar o processo de calibração fazendo uso do menor número de câmaras (duas) e de pontos de controlo (quatro). Razão pela qual, nesta fase, os testes efectuados abordam, exclusivamente, duas configurações compostas por duas câmaras. Para cada uma das configurações, serão apresentados os resultados de calibração obtidos, considerando diferentes condições de ensaio, em termos de: i) número de pontos de controlo; ii) número de imagens adquiridas por cada uma das câmaras; e iii) amplitude da componente de rotação da trajectória de movimento do objecto.

Genericamente, os testes realizados contemplam: i) a aplicação da Equação 4.31 – relação de comprimento entre segmentos distintos; ii) a combinação da Equação 4.31 com a Equação 4.33 – ângulo recto entre dois segmentos; e iii) a aplicação da Equação 4.35 – conservação do comprimento de um dado segmento do objecto entre imagens adquiridas em instantes distintos. No primeiro caso, o conjunto de restrições é formulado a partir de uma única imagem, enquanto que nos dois restantes será utilizada uma sequência de imagens do mesmo objecto, adquiridas segundo uma sequência temporal e considerando que o objecto se move no espaço ao longo do tempo.

Configuração das Câmaras

Foram estudados dois casos de configuração de câmaras (Figura 4.5), inspirados nas características físicas da Ponte 25 de Abril, em Lisboa, com o posicionamento das câmaras a ser condicionado pela disponibilidade de espaço existente ao nível da base dos pilares. Foram assumidos parâmetros intrínsecos idênticos para todas as câmaras, tal como indicado na Tabela 4.1, enquanto que os parâmetros extrínsecos (posição e orientação) das câmaras são os indicados na Tabela 4.2. O vector $[X_c, Y_c, Z_c]^T$ representa a posição da respectiva câmara, no sistema de coordenadas de referência, O_I , estabelecido no tabuleiro, enquanto que ϕ , θ e ψ representam os ângulos de rotação, da mesma, em torno dos eixos transversal (X), vertical (Y) e longitudinal (Z), respectivamente. O parâmetro Z_0 representa a distância entre a origem do sistema de coordenadas da câmara e a origem do sistema de coordenadas de referência.

Tabela 4.1 – Parâmetros intrínsecos das câmaras.

f (mm)	f (píxeis)	γ_a	s_a
600	81081,08	1	0

Tabela 4.2 – Parâmetros extrínsecos das câmaras.

	X_C (m)	Y_C (m)	Z_C (m)	Z_0 (m)	ϕ (°)	θ (°)	ψ (°)
S	0	100	-500	509,90	11,31	0,00	0,00
N	0	100	500	509,90	11,31	180,00	0,00
SE	-20	100	-500	510,29	11,30	2,29	0,00
SW	-20	100	-500	510,29	11,30	2,29	0,00

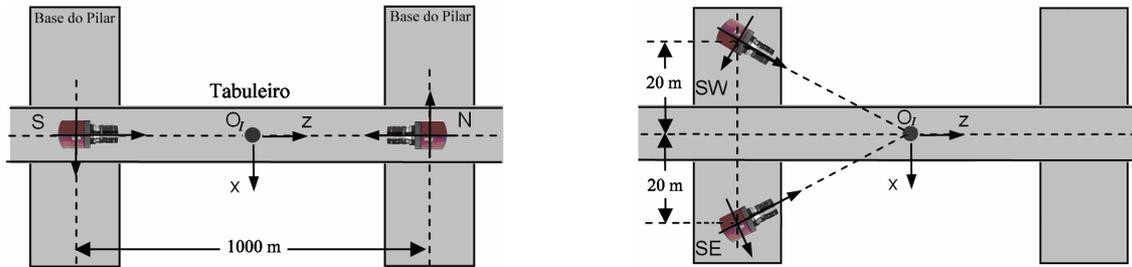


Figura 4.5 – Duas configurações de câmaras: S – N e SE – SW.

Pontos de Controlo

Em termos de pontos de controlo foram considerados três casos:

- Objecto formado por quatro pontos de controlo, dispostos como indicado na Figura 4.6, lado esquerdo, em que $L_1 = 5 m$, $L_2 = 0,8 m$ e $L_3 = 1 m$.
- Objecto formado por oito pontos de controlo, dispostos como indicado na Figura 4.6, lado direito, em que $L_1 = 4 m$ e $L_2 = L_3 = 1 m$.
- Objecto formado por dois pontos de controlo, com uma distância de 2 m entre si, tipo pêndulo.

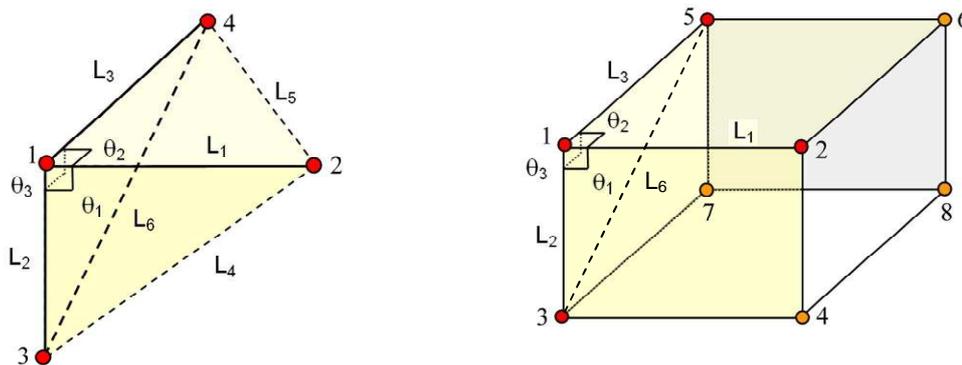


Figura 4.6 – Dois objectos formados por quatro e oito pontos de controlo, com a indicação de segmentos e de ângulos usados na formulação de restrições de ângulo e de relação de comprimento.

Caracterização dos Testes Efectuados

Os testes realizados com cada uma das configurações de câmaras e com cada tipo de objecto podem-se dividir, genericamente, em quatro grupos. No primeiro grupo, identificado a seguir

pelo carácter A , é utilizada uma única imagem do objecto, adquirida por cada uma das câmaras. Neste caso, a partir das características do objecto são formuladas um mínimo de cinco restrições¹⁰ – Equações 4.31, 4.33 e 4.34.

No segundo grupo, identificado a seguir pelo carácter B , são utilizadas F imagens de um mesmo objecto, adquiridas por cada uma das câmaras ao longo do tempo, enquanto o objecto era submetido a movimento aleatório de translação e de rotação¹¹. Considerando que as câmaras estão estacionárias, as F imagens do objecto são tratadas como se tratasse de uma única imagem de F objectos, idênticos, mas ocupando posições e orientações, eventualmente, distintas no espaço – sobreposição das F imagens numa única imagem. Neste caso, cada objecto da imagem proporciona um subconjunto de restrições – Equações 4.31, 4.33 e 4.34 aplicadas a cada um dos F objectos.

O terceiro grupo contempla dois testes, identificados com o carácter C , e são baseados na determinação da imagem média (secção §4.3.8). Deste modo, as F imagens são transformadas numa única imagem e o algoritmo aplicado é o descrito para o primeiro grupo – Equações 4.31, 4.33 e 4.34 aplicadas ao objecto resultante da imagem média. Para o efeito, assumiu-se que a componente de rotação do objecto era desprezável (em face da grande distância entre a câmara e o objecto e da amplitude de rotação ser baixa), tendo-se determinado uma imagem média a partir das F imagens adquiridas. As condições de movimento do objecto são idênticas às apresentadas no caso anterior.

Por último, o conjunto de testes do quarto grupo, identificados com o carácter D , faz uso de F imagens de um mesmo objecto que se move no espaço, à semelhança do descrito anteriormente, mas em que é assumido conhecer apenas o comprimento de um único segmento do objecto (segmento L_6 – pontos 3 e 4 na Figura 4.6, lado esquerdo, e pontos 3 e 5 do paralelepípedo). Neste caso, é aplicada a restrição de invariabilidade do comprimento de um ou mais segmentos do objecto ao longo do tempo, isto é, entre as F imagens (ou entre os F objectos) – Equação 4.35. Relativamente à trajectória de movimento foi assumido que o objecto era sujeito a movimento aleatório em translação¹² e em rotação, mas com amplitude variável, de acordo com o teste em causa (D_1 a D_5).

¹⁰ Para a formulação das restrições de relação de comprimento não é necessário conhecer o comprimento absoluto de cada um dos segmentos, apenas a relação entre eles. No entanto, a reconstrução métrica do objecto pressupõe o conhecimento de pelo menos uma distância entre dois pontos, o mesmo é dizer do comprimento absoluto do(s) segmento(s).

¹¹ Assumiu-se que o movimento do objecto era aleatório, obedecendo a uma distribuição uniforme com média nula e desvio padrão de 1 m nas componentes de translação vertical e horizontal, de 0,25 m na componente longitudinal e de $\pm 5^\circ$ nas três componentes de rotação.

¹² Para a componente de translação, ver nota de rodapé 11.

1º Caso – Objecto formado por quatro pontos de controlo

Considerando o caso do objecto composto por quatro pontos de controlo, Figura 4.6, e de acordo com a descrição genérica apresentada anteriormente, foram assumidas as seguintes condições indicadas para cada um dos testes:

- A1 – Conhecido o comprimento de três segmentos do objecto (L_1 , L_2 e L_3) – duas relações de comprimento – e três ângulos rectos (θ_1 , θ_2 e θ_3).
- A2 – Conhecido o comprimento de seis segmentos do objecto (L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , L_5 e L_6) – cinco relações de comprimento.
- A3 – Conhecido o comprimento de seis segmentos do objecto (L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , L_5 e L_6) – cinco relações de comprimento – e três ângulos rectos (θ_1 , θ_2 e θ_3).
- B1 – Idêntico a A1, mas aplicado a 1000 imagens.
- B2 – Idêntico a A2, mas aplicado a 1000 imagens.
- B3 – Idêntico a A3, mas aplicado a 1000 imagens.
- C1 – Idêntico a A1 com a imagem média determinada a partir de 1000 imagens.
- C2 – Idêntico a A2 com a imagem média determinada a partir de 1000 imagens.
- D1 – Conhecido o comprimento de L_6 em 1000 imagens e com o objecto sujeito a movimento de rotação em ϕ , θ e ψ com amplitude de $\pm 5^\circ$.
- D2 – Idêntico a D1, com amplitude de rotação em ϕ , θ e ψ de $\pm 10^\circ$.
- D3 – Idêntico a D1, com amplitude de rotação em ϕ , θ e ψ de $\pm 20^\circ$.
- D4 – Idêntico a D1, com amplitude de rotação em ϕ , θ e ψ de $\pm 40^\circ$.
- D5 – Idêntico a D1, com amplitude de rotação em ϕ , θ e ψ de $\pm 60^\circ$.

Os dados de entrada, correspondentes às coordenadas de projecção dos pontos de controlo no plano da imagem de cada uma das câmaras, foram gerados a partir do modelo de projecção de perspectiva central, que é mais realista do que o modelo de projecção afim. A perturbação das observações é realizada através da adição de ruído às coordenadas de projecção dos pontos de controlo em cada uma das imagens, assumindo que o ruído obedece a uma distribuição normal com média nula e desvio padrão de dois píxeis, e independente de imagem para imagem e de câmara para câmara.

O procedimento de calibração foi realizado de acordo com o exposto na secção §4.3, tendo sido realizadas as seguintes etapas¹³:

- Reconstrução afim.

¹³ Atendendo a que o objectivo do estudo era avaliar a eficiência deste tipo de restrição em função de diferentes condições de ensaio, optou-se por não executar a etapa de optimização não linear.

- Reconstrução Euclidiana.
- Reconstrução métrica, fazendo uso da informação conhecida em termos de distância entre dois ou mais pontos de controlo.
- Orientação do sistema de coordenadas de referência, tendo-se optado por orientar o sistema de coordenadas de referência de acordo com a orientação de uma das câmaras (S ou SE , consoante a configuração de câmaras) – Equação 4.46.
- Determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmaras – Equação 4.54.

Cada um dos testes foi realizado 100 vezes, com perturbações de ruído distintas, embora obedecendo à distribuição anunciada anteriormente. Na Tabela 4.3 e Figuras 4.7 e 4.8 apresenta-se o desvio absoluto médio (DAM) e o respectivo desvio padrão (DP) (entre parêntesis) obtidos em cada um dos testes para os parâmetros intrínsecos e extrínsecos de cada uma das câmaras, relativos às 100 realizações. No caso das câmaras S e SE apenas constam os parâmetros intrínsecos uma vez que o sistema de coordenadas de referência se encontra alinhado com o sistema de coordenadas da respectiva câmara.

Da análise dos resultados constata-se que:

- Com a configuração $S - N$, os DAM são, genericamente, menores do que com a configuração $SE - SW$.
- Os menores valores de DAM são obtidos quando são utilizadas várias imagens do objecto (testes B e C), alcançando-se valores de desvio significativamente baixos, principalmente com a configuração $S - N$.
- No caso de uma só imagem (testes A), não existem diferenças significativas entre a formulação das restrições baseadas exclusivamente na relação de comprimento dos segmentos ou a partir da combinação dos dois tipos, embora se note uma ligeira diminuição de A_1 para A_3 do DAM na generalidade dos parâmetros.
- No caso da configuração $SE - SW$ verifica-se que a inclusão de restrições de ângulo é mais benéfica do que a de relação de comprimento, uma vez que quando esta última se torna predominante, em número de equações, os valores de DAM aumentam, nomeadamente da distância focal. A razão prende-se com o facto da estimação da componente de profundidade do objecto ser muito sensível à presença de ruído, principalmente com esta configuração de câmaras, fazendo com que o erro na estimação da componente longitudinal se repercuta com especial incidência nos ângulos θ_2 e θ_3 . O facto das câmaras se encontrarem muito próximas (*baseline*) dificulta ainda mais a estimação da compo-

nente de profundidade, sendo desejável, se possível, afastar as câmaras de forma a criar um verdadeiro efeito estereoscópico.

Tabela 4.3 – Desvio absoluto médio e desvio padrão (entre parêntesis) nos parâmetros intrínsecos das câmaras, obtidos com os vários testes, considerando um objecto composto por quatro pontos.

Objecto com 4 Pontos				Ruído = 2 píxeis					
Parâmetro	Câmara SE			Câmara SW					
Teste	f (mm)	γ_a	s_a	f (mm)	γ_a	s_a	ϕ (°)	θ (°)	ψ (°)
A1	11,66 (8,65)	2E-2 (1E-2)	2E-2 (1E-2)	11,41 (8,58)	2E-2 (1E-2)	2E-2 (1E-2)	1,02 (0,77)	1,07 (0,78)	0,22 (0,17)
A2	11,38 (8,61)	2E-2 (1E-2)	2E-2 (1E-2)	11,23 (8,55)	2E-2 (1E-2)	2E-2 (1E-2)	1,00 (0,77)	1,03 (0,75)	0,22 (0,17)
A3	11,14 (8,36)	2E-2 (1E-2)	2E-2 (1E-2)	11,19 (8,46)	2E-2 (1E-2)	2E-2 (1E-2)	1,04 (0,76)	1,02 (0,75)	0,21 (0,16)
B1	3,28 (3,07)	7E-2 (6E-2)	1E-1 (6E-2)	4,03 (3,71)	1E-1 (8E-2)	1E-1 (6E-2)	0,19 (0,21)	0,34 (0,25)	0,13 (0,12)
B2	6,17 (2,47)	5E-2 (5E-3)	3E-2 (2E-2)	6,47 (2,55)	4E-2 (7E-3)	3E-2 (2E-2)	0,17 (0,20)	0,12 (0,05)	0,05 (0,03)
B3	6,73 (2,47)	6E-2 (4E-3)	3E-2 (2E-2)	7,00 (2,56)	5E-2 (6E-3)	3E-2 (2E-2)	0,18 (0,20)	0,13 (0,05)	0,05 (0,02)
C1	1,36 (0,96)	1E-3 (1E-3)	7E-4 (8E-4)	1,27 (0,92)	1E-3 (1E-3)	7E-4 (6E-4)	0,23 (0,27)	0,06 (0,09)	0,02 (0,02)
C2	1,44 (1,08)	2E-3 (2E-3)	8E-4 (9E-4)	1,37 (1,07)	2E-3 (2E-3)	7E-4 (8E-4)	0,26 (0,31)	0,06 (0,13)	0,02 (0,02)
D1	102,53 (95,70)	1E-1 (2E-1)	3E-2 (3E-2)	102,64 (95,87)	1E-1 (2E-1)	2E-2 (3E-2)	0,18 (0,22)	0,71 (1,33)	0,12 (0,14)
D2	46,30 (29,56)	8E-2 (7E-2)	2E-2 (1E-2)	46,36 (29,63)	8E-2 (7E-2)	9E-3 (9E-3)	0,15 (0,17)	0,27 (0,24)	0,07 (0,06)
D3	23,29 (11,84)	3E-2 (2E-2)	5E-3 (4E-3)	23,35 (11,86)	3E-2 (2E-2)	3E-3 (2E-3)	0,11 (0,13)	0,09 (0,08)	0,03 (0,02)
D4	15,81 (5,50)	1E-2 (8E-3)	2E-3 (2E-3)	15,91 (5,51)	1E-2 (8E-3)	2E-3 (1E-3)	0,06 (0,06)	0,04 (0,03)	0,01 (0,01)
D5	7,28 (3,86)	6E-3 (4E-3)	2E-3 (1E-3)	7,38 (3,87)	6E-3 (5E-3)	2E-3 (1E-3)	0,04 (0,04)	0,02 (0,02)	0,01 (0,01)
	Câmara S			Câmara N					
A1	11,23 (8,39)	2E-2 (1E-2)	2E-2 (2E-2)	9,86 (7,33)	2E-2 (1E-2)	2E-2 (1E-2)	1,17 (0,85)	1,27 (0,99)	0,48 (0,35)
A2	11,26 (8,53)	2E-2 (1E-2)	2E-2 (1E-2)	9,82 (7,03)	2E-2 (1E-2)	2E-2 (1E-2)	1,16 (0,86)	1,21 (0,92)	0,44 (0,34)
A3	11,09 (8,31)	2E-2 (1E-2)	2E-2 (1E-2)	9,63 (7,40)	2E-2 (1E-2)	2E-2 (1E-2)	1,22 (0,91)	1,25 (0,93)	0,45 (0,35)
B1	1,86 (1,19)	6E-3 (2E-3)	8E-3 (5E-3)	1,49 (1,01)	2E-3 (2E-3)	9E-3 (6E-3)	0,10 (0,05)	0,15 (0,11)	0,20 (0,15)
B2	0,97 (0,47)	3E-3 (8E-4)	6E-3 (4E-3)	0,35 (0,26)	2E-3 (7E-4)	5E-3 (3E-3)	0,12 (0,05)	0,11 (0,08)	0,10 (0,08)
B3	0,95 (0,46)	3E-3 (8E-4)	5E-3 (3E-3)	0,35 (0,27)	2E-3 (7E-4)	4E-3 (3E-3)	0,12 (0,05)	0,12 (0,09)	0,09 (0,07)
C1	1,11 (0,44)	6E-4 (5E-4)	8E-4 (7E-4)	1,60 (0,40)	6E-4 (5E-4)	6E-4 (5E-4)	0,05 (0,03)	0,29 (0,11)	0,06 (0,03)
C2	1,11 (0,43)	6E-4 (5E-4)	7E-4 (6E-4)	1,62 (0,38)	6E-4 (4E-4)	6E-4 (5E-4)	0,05 (0,03)	0,30 (0,10)	0,06 (0,03)
D1	50,12 (30,78)	9E-2 (7E-2)	2E-2 (1E-2)	30,77 (22,64)	6E-2 (5E-2)	1E-2 (8E-3)	1,34 (1,40)	0,49 (0,33)	0,48 (0,37)
D2	15,71 (11,99)	5E-2 (3E-2)	7E-3 (5E-3)	10,02 (8,25)	4E-2 (3E-2)	4E-3 (3E-3)	0,37 (0,38)	0,19 (0,14)	0,16 (0,14)
D3	3,01 (2,43)	2E-2 (1E-2)	2E-3 (2E-3)	2,18 (1,70)	1E-2 (1E-2)	1E-3 (1E-3)	0,08 (0,07)	0,16 (0,08)	0,06 (0,05)
D4	1,00 (0,75)	5E-3 (4E-3)	2E-3 (9E-4)	0,96 (0,69)	4E-3 (3E-3)	2E-3 (7E-4)	0,03 (0,03)	0,30 (0,03)	0,06 (0,03)
D5	0,76 (0,56)	3E-3 (2E-3)	4E-3 (8E-4)	0,80 (0,60)	3E-3 (2E-3)	4E-3 (8E-4)	0,02 (0,01)	0,21 (0,03)	0,04 (0,03)

- A calibração através da determinação da imagem média tem um efeito benéfico no caso da configuração SE – SW; já no caso da configuração S – N verifica-se o contrário, embora a deterioração seja muito ligeira. Por um lado, a determinação da imagem média tem como efeito a redução do nível de ruído, resultando numa melhor estimativa do objecto, nomeadamente da componente de profundidade; por outro lado, reduz o número de restrições – objecto único. No caso da configuração SE – SW, o efeito do ruído é dominante face ao segundo, enquanto que no caso da configuração S – N a presença de ruído é mais tolerável, sendo, por isso, preferível dispor de um sistema de equações

sobredimensionado (Equação 4.34) para a determinação da matriz H , ainda que afectadas por ruído.

- Os resultados correspondentes aos testes do tipo D mostram que os DAM diminuem, genericamente, com o aumento da amplitude de rotação do objecto. Ainda assim, no caso da configuração $SE - SW$ estes são significativamente elevados, comparativamente com os obtidos com os restantes testes. De qualquer modo, e para o caso da configuração $S - N$, constata-se que os DAM são aceitáveis a partir de amplitudes de rotação do objecto, segundo os três eixos, da ordem dos 20° .

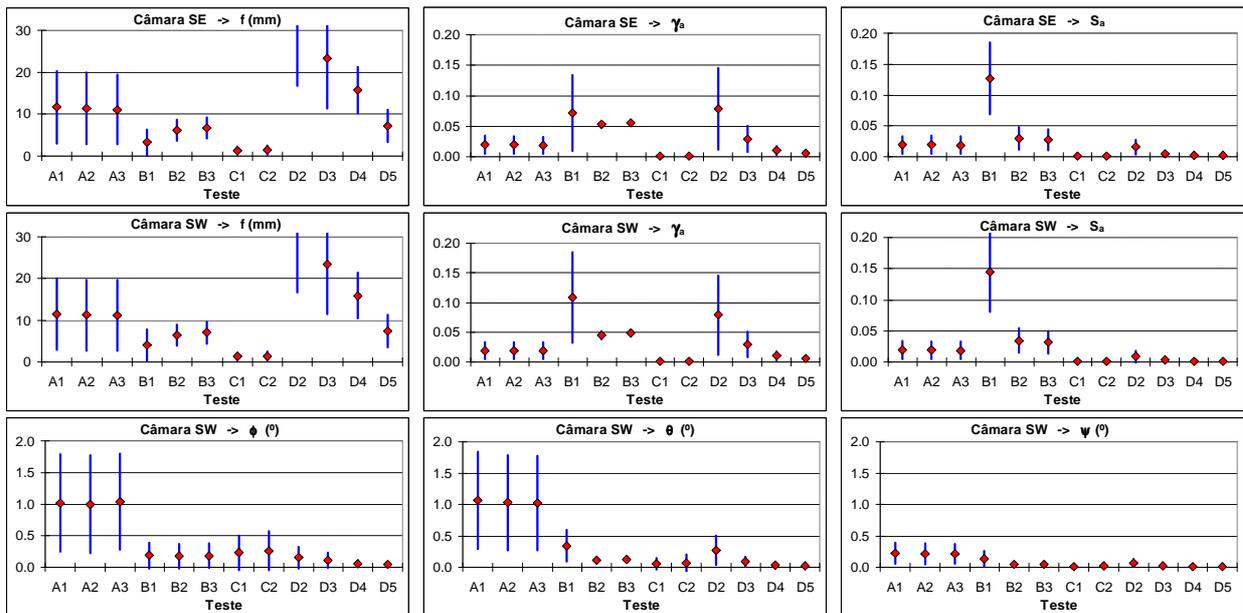


Figura 4.7 – Desvio absoluto médio (♦) e respectivo desvio padrão (|) dos parâmetros das câmaras, obtido com a configuração $SE - SW$ e com um objecto composto por quatro pontos de controlo.

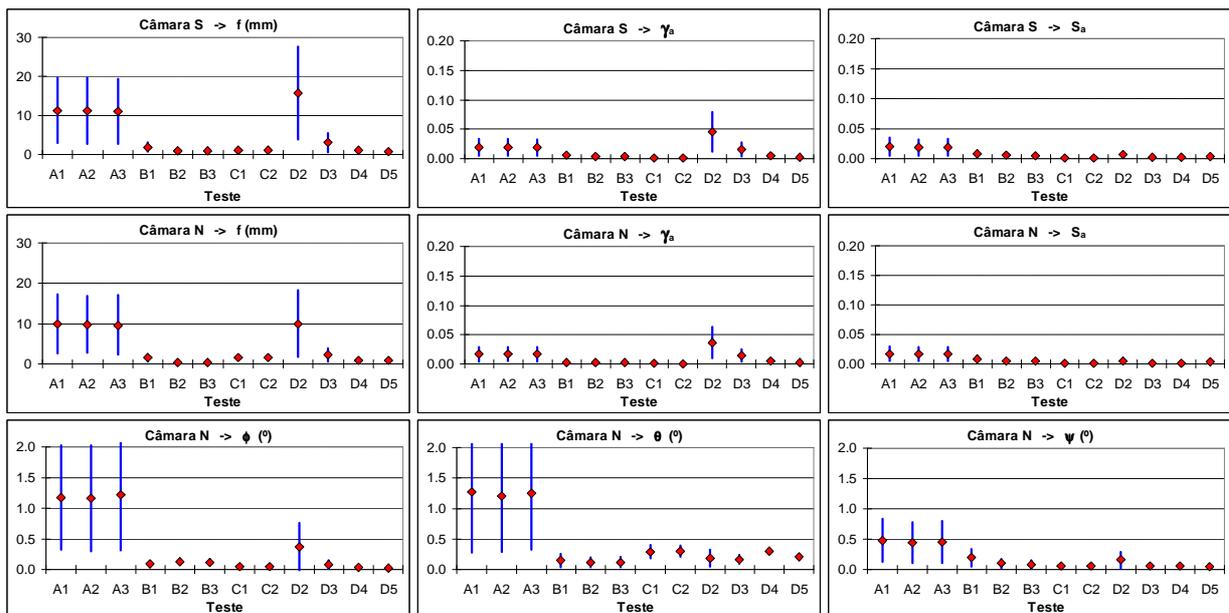


Figura 4.8 – Desvio absoluto médio (♦) e respectivo desvio padrão (|) dos parâmetros das câmaras, obtido com a configuração $S - N$ e com um objecto composto por quatro pontos de controlo.

2º Caso – Objecto formado por oito pontos de controlo

Seguindo o procedimento descrito anteriormente, foram realizados testes assumindo a existência de um objecto composto por oito pontos de controlo (Figura 4.6). Neste caso foram assumidas as seguintes condições indicadas para cada um dos testes:

- A2 – Conhecido o comprimento de todos os segmentos possíveis do objecto, formados a partir de qualquer par de pontos de controlo (vinte e oito segmentos).
- B2 – Idêntico a A2, mas aplicado a 250 imagens.
- C2 – Idêntico a A2 com a imagem média determinada a partir de 250 imagens.
- D1 – Conhecido o comprimento de L_6 (pontos 3 e 5 da Figura 4.6) em 250 imagens e com o objecto sujeito a movimento de rotação em ϕ , θ e ψ com amplitude de $\pm 5^\circ$.
- D2 – Idêntico a D1, com amplitude de rotação em ϕ , θ e ψ de $\pm 10^\circ$.
- D3 – Idêntico a D1, com amplitude de rotação em ϕ , θ e ψ de $\pm 20^\circ$.
- D4 – Idêntico a D1, com amplitude de rotação em ϕ , θ e ψ de $\pm 40^\circ$.
- D5 – Idêntico a D1, com amplitude de rotação em ϕ , θ e ψ de $\pm 60^\circ$.

De acordo com os casos de degenerescência anunciados anteriormente, um objecto com a forma paralelepípedica – faces paralelas – acrescenta apenas uma restrição adicional comparativamente ao caso de quatro pontos. Todavia, nos ensaios realizados foram incluídas todas as possíveis restrições de relação de comprimento (vinte e sete), uma vez que na presença de ruído a solução encontrada é a que minimiza a condição $\|D^T \cdot \Omega'_\infty\|$ (Equação 4.34).

À semelhança do caso anterior, cada teste foi executado 100 vezes, com a injeção de ruído gerado de forma aleatória e obedecendo a uma distribuição normal com média nula e desvio padrão de dois píxeis. Os resultados obtidos de DAM e respectivo DP (entre parêntesis) correspondentes às 100 realizações, encontram-se representados na Tabela 4.4 e nos gráficos das Figuras 4.9 e 4.10.

De forma idêntica, o procedimento de calibração seguiu os passos indicados no caso anterior. No caso dos testes *A* e *B*, o conhecimento do comprimento de vários dos segmentos do objecto foi empregue na determinação do valor médio do factor de escala (Equação 4.42).

Da observação e análise dos resultados constata-se que:

- O aumento do número de pontos de controlo proporcionou uma diminuição do valor do DAM e do respectivo DP da generalidade dos parâmetros. O caso em que a redução foi

menos significativa aconteceu com a configuração $SE - SW$, na versão de imagem única (teste A_2).

- Comparando os resultados do conjunto de testes verifica-se um comportamento com uma tendência idêntica à observada com o objecto de quatro pontos.
- Com a configuração $S - N$ e assumindo conhecer apenas uma distância (testes D), o DAM dos parâmetros torna-se aceitável com rotações do objecto a partir de $\pm 10^\circ$. Já no caso da configuração $SE - SW$ a redução dos valores de DAM é menos significativa que a verificada com $S - N$.

Tabela 4.4 – Desvio absoluto médio e desvio padrão (entre parêntesis) nos parâmetros intrínsecos das câmaras, obtidos com os vários testes, considerando um objecto composto por oito pontos.

Objecto com 8 Pontos				Ruído = 2 píxeis					
Parâmetro	Câmara SE			Câmara SW					
Teste	f (mm)	γ_a	s_a	f (mm)	γ_a	s_a	ϕ (°)	θ (°)	ψ (°)
A2	11,16 (12,96)	3E-2 (3E-2)	2E-2 (1E-2)	11,03 (13,29)	3E-2 (3E-2)	2E-2 (1E-2)	0,61 (0,46)	0,57 (0,44)	0,15 (0,11)
B2	2,69 (1,16)	4E-2 (2E-3)	6E-3 (5E-3)	2,69 (1,17)	3E-2 (2E-3)	6E-3 (5E-3)	0,08 (0,08)	0,19 (0,05)	0,03 (0,01)
C2	1,69 (0,40)	8E-4 (6E-4)	1E-3 (7E-4)	1,68 (0,41)	8E-4 (5E-4)	1E-3 (7E-4)	0,08 (0,08)	0,04 (0,03)	0,01 (0,01)
D1	39,65 (35,39)	3E-2 (3E-2)	1E-2 (9E-3)	39,64 (35,41)	3E-2 (3E-2)	1E-2 (9E-3)	0,08 (0,08)	0,32 (0,28)	0,03 (0,02)
D2	21,23 (17,11)	3E-2 (2E-2)	6E-3 (5E-3)	21,24 (17,12)	3E-2 (2E-2)	5E-3 (4E-3)	0,08 (0,08)	0,14 (0,11)	0,02 (0,02)
D3	13,99 (9,18)	2E-2 (1E-2)	3E-3 (2E-3)	13,98 (9,17)	2E-2 (1E-2)	3E-3 (2E-3)	0,06 (0,06)	0,08 (0,06)	0,02 (0,01)
D4	10,59 (6,82)	1E-2 (8E-3)	3E-3 (2E-3)	10,57 (6,82)	1E-2 (8E-3)	3E-3 (2E-3)	0,04 (0,03)	0,04 (0,03)	0,01 (0,01)
D5	6,60 (4,92)	8E-3 (6E-3)	4E-3 (3E-3)	6,59 (4,92)	8E-3 (6E-3)	4E-3 (3E-3)	0,03 (0,02)	0,03 (0,02)	0,01 (0,01)
	Câmara S			Câmara N					
A2	4,40 (3,23)	8E-3 (6E-3)	8E-3 (6E-3)	4,47 (3,47)	8E-3 (6E-3)	8E-3 (6E-3)	0,56 (0,43)	0,61 (0,45)	0,25 (0,20)
B2	0,36 (0,25)	1E-3 (6E-4)	1E-3 (1E-3)	0,36 (0,25)	1E-3 (6E-4)	1E-3 (1E-3)	0,08 (0,04)	0,05 (0,04)	0,05 (0,03)
C2	1,38 (0,34)	5E-4 (4E-4)	6E-4 (4E-4)	1,38 (0,34)	5E-4 (4E-4)	6E-4 (4E-4)	0,04 (0,03)	0,04 (0,03)	0,02 (0,01)
D1	12,02 (10,63)	1E-2 (1E-2)	3E-3 (3E-3)	8,34 (7,24)	1E-2 (1E-2)	3E-3 (3E-3)	0,59 (0,53)	0,09 (0,07)	0,20 (0,17)
D2	3,94 (3,39)	1E-2 (8E-3)	2E-3 (1E-3)	2,80 (2,26)	1E-2 (8E-3)	2E-3 (1E-3)	0,18 (0,14)	0,05 (0,04)	0,07 (0,06)
D3	1,65 (1,32)	7E-3 (6E-3)	9E-4 (7E-4)	1,27 (0,98)	7E-3 (6E-3)	1E-3 (7E-4)	0,06 (0,04)	0,04 (0,03)	0,03 (0,03)
D4	1,18 (0,90)	4E-3 (3E-3)	1E-3 (7E-4)	1,05 (0,79)	3E-3 (3E-3)	1E-3 (8E-4)	0,03 (0,03)	0,03 (0,02)	0,03 (0,03)
D5	0,99 (0,75)	2E-3 (2E-3)	1E-3 (1E-3)	0,94 (0,71)	2E-3 (2E-3)	1E-3 (9E-4)	0,03 (0,02)	0,03 (0,03)	0,04 (0,03)

3º Caso – Objecto formado por dois pontos de controlo (pêndulo 3D)

A possibilidade de se alcançar o estágio de reconstrução Euclidiana sem conhecer as características do objecto nem das câmaras constitui, sem dúvida alguma, uma enorme relevância no âmbito da calibração de sistemas ópticos. No entanto, como se verificou, para que o princípio da invariabilidade de comprimento de um ou mais segmentos possa ser empregue de forma efectiva é necessário que o objecto se apresente perante as câmaras com poses distintas, isto é, que o objecto seja sujeito a movimento de rotação com amplitude significativa.

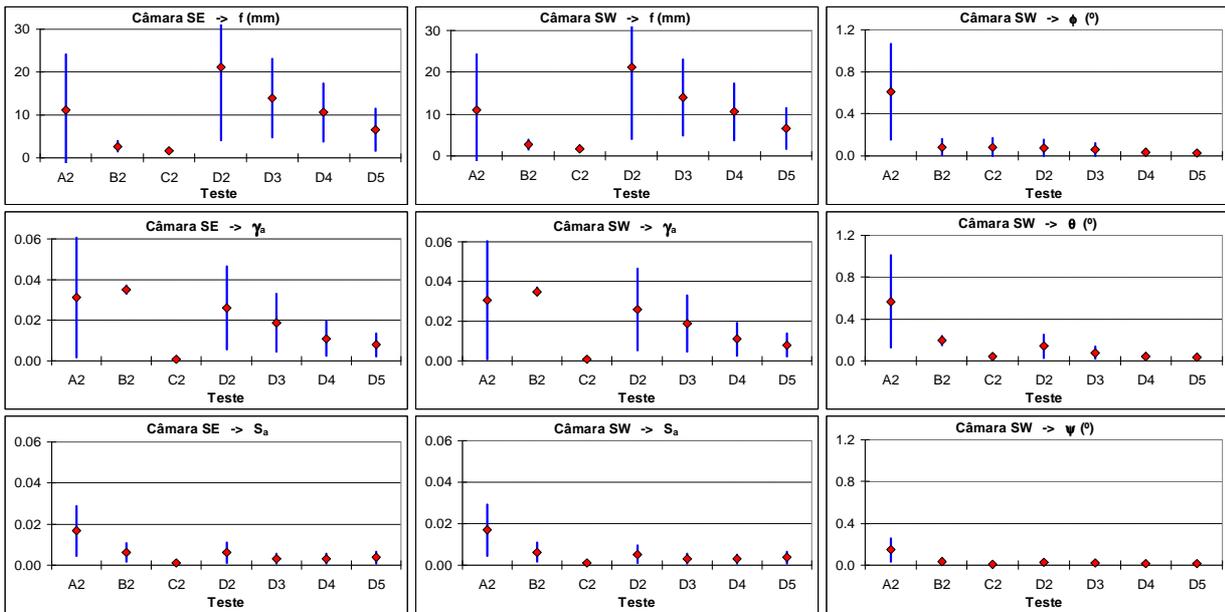


Figura 4.9 – Desvio absoluto médio (\blacklozenge) e respectivo desvio padrão ($|$) dos parâmetros das câmaras, obtido com a configuração SE – SW e com um objecto composto por oito pontos de controlo.

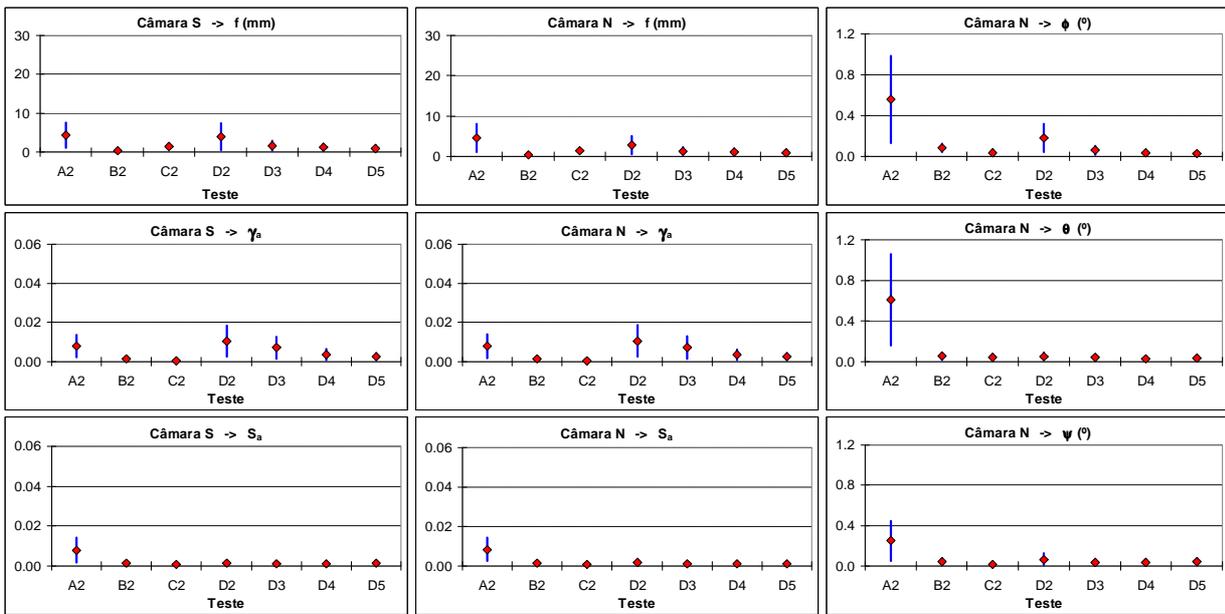


Figura 4.10 – Desvio absoluto médio (\blacklozenge) e respectivo desvio padrão ($|$) dos parâmetros das câmaras, obtido com a configuração S – N e com um objecto composto por oito pontos de controlo.

No caso particular de uma estrutura de grande dimensão, normalmente fixa ao solo, esta condição é difícil, senão impossível, de satisfazer. Neste sentido, uma alternativa poderia passar pela instalação na estrutura de um dispositivo, composto por dois pontos de controlo e interligados entre si por uma ligação rígida. Um dos pontos de controlo é fixo à estrutura (estacionário) e o outro é livre de se movimentar no espaço correspondente à superfície esférica de raio dado pela distância entre os dois pontos de controlo – efeito pendular 3D. O movimento do pêndulo pode-

ria ser gerado de forma natural, aproveitando a força do vento e de outras acções externas, ou através de imposição controlada.

Com uma solução do tipo pêndulo seriam necessários apenas dois pontos de controlo, capazes de gerar tantos pontos de controlo quantos os necessários. Soluções semelhantes foram empregues por Borghese (2000) e Svoboda (2005) na calibração de câmaras estacionárias. O primeiro empregou uma barra móvel com duas marcas (alvos) nas extremidades para gerar uma nuvem de pontos 3D, enquanto que o segundo utilizou uma fonte luminosa móvel para gerar uma quantidade enorme de pontos de controlo.

Neste contexto, foram realizados testes de simulação numérica, com as duas configurações de câmaras, tendo-se assumido que a distância entre os dois pontos de controlo era de 2 m. Para além disso, considerou-se que o movimento de rotação¹⁴ do pêndulo era aleatório, com amplitude da rotação a obedecer a uma distribuição uniforme com média nula e desvio padrão variável de acordo com o teste realizado.

Neste grupo de testes foram assumidas as seguintes condições:

E1 – Conhecido o comprimento do segmento (pêndulo), sujeito a movimento aleatório de rotação em ϕ e em ψ com amplitude de $\pm 10^\circ$ nas duas componentes.

E2 – Idêntico a E1, com amplitude de rotação de $\pm 20^\circ$.

E3 – Idêntico a E1, com amplitude de rotação de $\pm 30^\circ$.

E4 – Idêntico a E1, com amplitude de rotação de $\pm 40^\circ$.

E5 – Idêntico a E1, com amplitude de rotação de $\pm 50^\circ$.

E6 – Idêntico a E1, com amplitude de rotação de $\pm 60^\circ$.

No procedimento de calibração foram utilizadas 5000 imagens do objecto (10.000 pontos de controlo), e cada um dos testes foi executado 100 vezes. Na Tabela 4.5 e nas Figuras 4.11 e 4.12 encontram-se representados os valores de DAM e de DP (entre parêntesis), relativos às 100 realizações, obtidos para os vários parâmetros das câmaras em cada um dos testes realizados.

Da análise dos resultados constata-se que:

- À semelhança do verificado nos outros dois ensaios, para condições idênticas, os menores valores de DAM e de DP são obtidos com a configuração $S - N$.
- Com excepção da distância focal, todos os restantes parâmetros experimentam uma diminuição do DAM e do DP com o aumento da amplitude de rotação do objecto. No caso da distância focal, os valores de DAM e de DP não evoluem de forma consistente

¹⁴ Dado o tipo de objecto (2D), a rotação em torno do eixo vertical (θ) deixa de ter qualquer significado.

com a amplitude da rotação. Tendo em conta o comportamento verificado nos dois casos apresentados anteriormente, e que vai de encontro ao exposto na secção §4.3.4.3 (casos de degenerescência), era suposto o valor de DAM diminuir com o aumento da amplitude de rotação, o que não se verifica no caso presente. Maior amplitude de rotação em torno do eixo horizontal (ϕ) significa maior deslocamento do ponto de controlo móvel segundo a componente longitudinal. No entanto, sabendo-se que a componente longitudinal é a mais difícil de estimar, a mais propícia a erro de estimação, o aumento da amplitude de rotação gera maior erro na estimação do factor de escala (Equação 4.42).

Tabela 4.5 – Desvio absoluto médio e desvio padrão (entre parêntesis) nos parâmetros intrínsecos das câmaras, obtidos com os vários testes, considerando um objecto composto por dois pontos.

Pêndulo 3D				Ruído = 2 píxeis					
Parâmetro	Câmara SE			Câmara SW					
Teste	f (mm)	γ_a	s_a	f (mm)	γ_a	s_a	ϕ (°)	θ (°)	ψ (°)
E1	--,---	--,---	--,---	--,---	--,---	--,---	--,---	--,---	--,---
E2	18,86 (42,28)	1E+0 (1E+0)	2E-2 (4E-2)	18,88 (42,32)	1E+0 (1E+0)	7E-2 (2E-1)	0,05 (0,04)	2,40 (0,81)	0,90 (1,16)
E3	13,59 (19,19)	2E-1 (1E-1)	4E-3 (3E-3)	13,56 (19,19)	2E-1 (1E-1)	7E-3 (5E-3)	0,04 (0,03)	0,88 (0,24)	0,16 (0,10)
E4	8,37 (7,62)	7E-2 (4E-2)	3E-3 (2E-3)	8,35 (7,62)	7E-2 (4E-2)	4E-3 (3E-3)	0,04 (0,03)	0,31 (0,09)	0,07 (0,04)
E5	11,88 (13,29)	5E-2 (4E-2)	3E-3 (2E-3)	11,86 (13,29)	5E-2 (4E-2)	3E-3 (2E-3)	0,03 (0,03)	0,13 (0,08)	0,05 (0,04)
E6	12,08 (10,99)	4E-2 (3E-2)	2E-3 (2E-3)	12,08 (10,99)	4E-2 (3E-2)	3E-3 (2E-3)	0,03 (0,03)	0,06 (0,05)	0,04 (0,03)
	Câmara S			Câmara N					
E1	2,50 (4,37)	2E-1 (3E-1)	5E-3 (1E-2)	2,29 (4,49)	2E-1 (3E-1)	6E-3 (1E-2)	4,04 (3,68)	0,16 (0,28)	0,38 (0,82)
E2	1,24 (0,93)	5E-2 (5E-2)	8E-4 (7E-4)	1,23 (0,94)	5E-2 (5E-2)	8E-4 (7E-4)	1,08 (0,78)	0,05 (0,04)	0,08 (0,06)
E3	1,73 (1,42)	2E-2 (2E-2)	6E-4 (5E-4)	1,75 (1,42)	2E-2 (2E-2)	6E-4 (5E-4)	0,52 (0,42)	0,03 (0,03)	0,05 (0,03)
E4	1,99 (1,59)	1E-2 (1E-2)	5E-4 (4E-4)	2,00 (1,60)	1E-2 (1E-2)	5E-4 (4E-4)	0,33 (0,26)	0,02 (0,02)	0,03 (0,03)
E5	2,21 (1,72)	9E-3 (7E-3)	5E-4 (4E-4)	2,21 (1,74)	9E-3 (7E-3)	5E-4 (4E-4)	0,25 (0,19)	0,02 (0,02)	0,02 (0,02)
E6	2,22 (1,78)	7E-3 (6E-3)	4E-4 (4E-4)	2,22 (1,78)	7E-3 (6E-3)	5E-4 (3E-4)	0,20 (0,16)	0,02 (0,02)	0,02 (0,02)

Em forma de conclusão geral, os testes efectuados permitiram concluir que para se obterem valores baixos de desvio nos parâmetros das câmaras, fazendo uso de informação mínima do objecto – uma distância –, é necessário que este experimente movimento de rotação com amplitude significativa. No entanto, na prática, esta condição poderá revelar-se difícil de satisfazer, mesmo no caso do pêndulo 3D, devido à falta de espaço para o objecto executar o movimento (ex. face lateral de um edifício ou torre). Nestas condições, a solução proposta passa por utilizar várias imagens do objecto, juntamente com o máximo de informação característica do objecto, nomeadamente em termos de comprimento dos vários segmentos que o compõem.

Importa realçar que os resultados apresentados foram obtidos considerando um processo de calibração reduzido, o qual não contemplou a fase de optimização não linear (Equação 4.44).

Como mencionado, no estudo realizado pretendia-se avaliar, fundamentalmente, a eficiência de cada um dos tipos de restrição para os diferentes cenários de teste. No Capítulo 6 apresentam-se alguns resultados, obtidos por meio de simulação numérica e com imagens reais, gerados por uma aplicação de *software* a qual implementa as várias fases de calibração descritas anteriormente, incluindo a fase de otimização não linear. Como se verá, o conhecimento do comprimento dos vários segmentos que compõem o objecto aplicado na fase de otimização não linear contribui, de forma significativa, para a melhoria da eficiência do algoritmo de calibração.

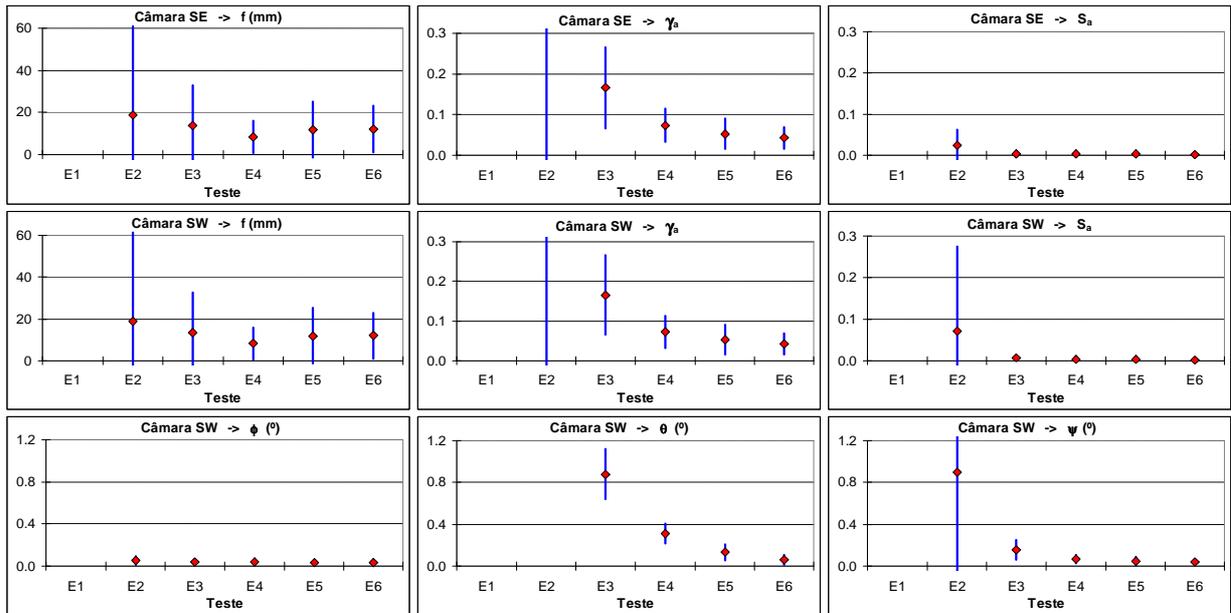


Figura 4.11 – Desvio absoluto médio (♦) e respectivo desvio padrão (|) dos parâmetros intrínsecos das câmaras, obtidos com a configuração *SE – SW* e com um objecto composto por dois pontos de controlo em movimento pendular 3D.

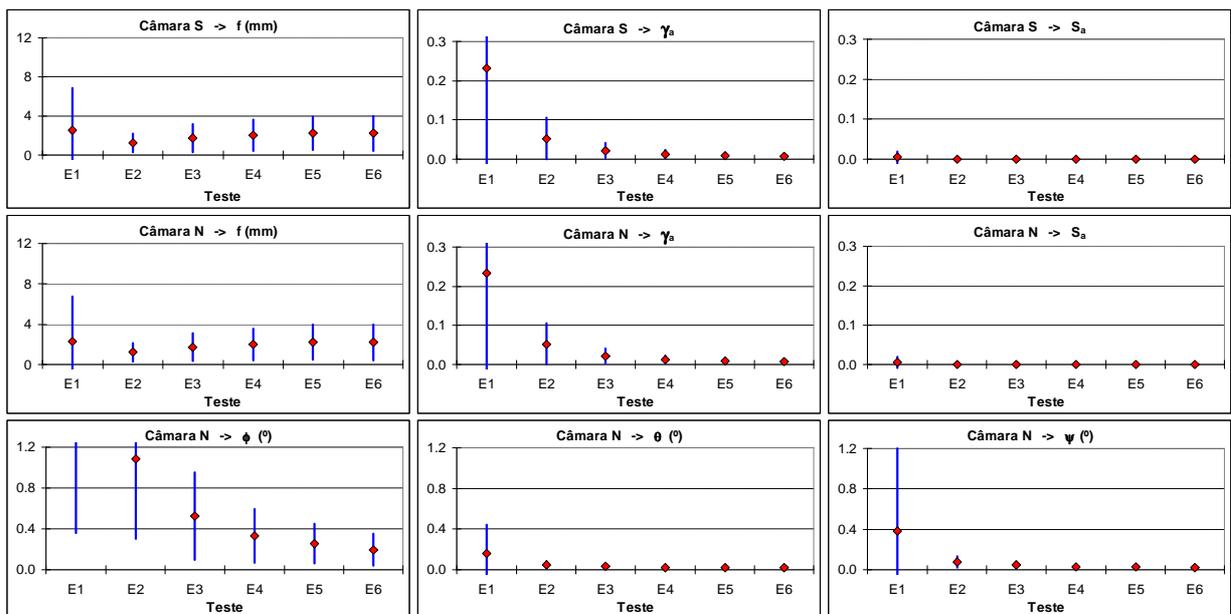


Figura 4.12 – Desvio absoluto médio (♦) e respectivo desvio padrão (|) dos parâmetros intrínsecos das câmaras, obtidos com a configuração *S – N* e com um objecto composto por dois pontos de controlo em movimento pendular 3D.

4.5 Conclusões

O presente capítulo foi dedicado ao tema da calibração *in situ* de sistemas de visão dotados com ópticas de grande distância focal – câmara afim –, quando aplicados na observação de estruturas de grande dimensão e a grande distância.

O processo de calibração apresentado segue a abordagem típica, designada usualmente por estratificação. O método de factorização, aplicado à matriz das observações, construída, apenas, com as coordenadas de projecção dos pontos de controlo nas várias imagens, é usado para se obter uma primeira solução (estimativa) das matrizes de projecção das câmaras (matriz de movimento) e da posição 3D dos pontos de controlo (matriz de estrutura) – reconstrução afim. Posteriormente, esta solução é rectificada – reconstrução Euclidiana –, através da incorporação de informação conhecida proveniente das características das câmaras e/ou do objecto e, por último, a determinação do factor de escala – reconstrução métrica. O processo de calibração contempla ainda duas etapas adicionais, uma de optimização não linear, destinada a melhorar a solução encontrada, e outra para a fixação da orientação do sistema de coordenadas de referência.

No caso de configurações com três ou mais câmaras, a reconstrução métrica pode ser alcançada desde que sejam conhecidos os parâmetros γ_a e s_a de cada uma das câmaras, quatro pontos de controlo e uma distância entre dois dos pontos de controlo. Dispondo de apenas duas câmaras, o conhecimento de γ_a e s_a não é suficiente para se alcançar a reconstrução Euclidiana, sendo necessário dispor de informação adicional, obtida, por exemplo, a partir das características do objecto (espaço), nomeadamente a existência de ângulos (rectos) entre as faces do objecto e/ou o conhecimento do comprimento de segmentos não colineares do objecto.

Na sua formulação final, a aplicação sequencial do procedimento de calibração permite efectuar a calibração de uma configuração com dois ou mais subsistemas de visão e reconstruir a posição dos pontos de controlo (objecto), superando, de forma muito satisfatória, condições significativas de ruído. A fiabilidade do procedimento de calibração é conseguida através da utilização de um número elevado de imagens do objecto e do conhecimento do comprimento de vários segmentos do objecto, ao invés de outros métodos que realizam este mesmo objectivo à custa de um número elevado de pontos de controlo.

Foi também apresentado um método para a determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos dos subsistemas de visão, a partir das respectivas matrizes de projecção afim, obtidas no final do processo de calibração. A finalizar, foram apresentados alguns resultados obtidos por meio de simulação numérica para duas configurações típicas de câmaras, compostas por duas câmaras, tendo os mesmos revelado boa eficiência e robustez do procedimento de calibração.

CAPÍTULO 5

ESTIMAÇÃO DA TRAJECTÓRIA DE MOVIMENTO POR MEIO DE UM FILTRO RECURSIVO

5.1 Introdução

Um dos problemas, considerado clássico na área da visão por computador, usualmente conhecido pela designação *Shape from Motion (SfM)*, consiste em deduzir o movimento (*motion*) e/ou a estrutura (*shape*) de um objecto que se move no espaço, a partir da sua projecção no plano da imagem de uma ou mais câmaras¹. O seguimento de um objecto ao longo de uma sequência de imagens significa identificar a sua localização num referencial de referência, quando o objecto ou a câmara se movem (Lepetit, 2005).

De um modo genérico, existe uma interligação entre a estimação da forma do objecto e a estimação do movimento imposto a este. Em princípio, conhecida a trajectória de movimento pode-se reconstruir facilmente a estrutura do objecto observado, e vice-versa, uma vez que o problema se resume a uma tarefa de estimação linear; quando nenhuma das duas é conhecida – a estrutura do objecto ou a trajectória de movimento –, o problema de estimação de ambas a partir da informação obtida das imagens torna-se uma tarefa difícil de concretizar com sucesso (Soatto, 1996). A solução, *crucial* para ultrapassar esta dificuldade, consiste em desacoplar a estimação da estrutura do objecto da estimação da trajectória de movimento (Soatto, 1996).

Dependendo do tipo de objecto, do número de graus de liberdade do objecto e da câmara e dos objectivos que se pretendem alcançar para a aplicação em causa, existem diferentes formas de abordar o problema de estimação do movimento.

A estimação do movimento no domínio do espaço tem sido tratado pela comunidade científica de uma forma extensiva, sendo diversificado o método e a abordagem adoptada em cada caso. Isto porque, por um lado existe uma grande diversidade de aplicações em que a visão por computador se adequa perfeitamente (ex. observação não invasiva) e, por outro lado, porque o mesmo problema pode ser abordado através da adopção de métodos distintos.

¹ Em algumas aplicações, como por exemplo na área da robótica, o objectivo passa por estimar a posição e a pose do robot (câmara) a partir de pontos de controlo (posição desconhecida) inseridos no meio em que este se move (ex. fontes de iluminação ambiente) de forma a que este se possa deslocar de forma autónoma.

O seguimento realizado no domínio da imagem, 2D, de um genérico, visa seguir a projecção na imagem de objectos ou parte de objectos cujo deslocamento no espaço se traduz num movimento que pode ser modelado como uma transformação no plano; já o seguimento realizado no domínio do espaço visa a determinação, em contínuo, dos seis graus de liberdade que definem a posição e a pose da câmara relativamente a um sistema de coordenadas de referência (cena) ou, de forma equivalente, do movimento do objecto relativamente à câmara (Lepetit, 2005).

O tema SfM tem sido abordado, tipicamente, seguindo uma de duas vertentes: i) o modo diferencial, para movimentos de pequena amplitude; e ii) o modo discreto, para movimentos de amplitude significativa (Aloimonos, 1986; Gonçalves, 2003). No primeiro caso, a estimação do movimento é realizada, usualmente, com base na determinação do fluxo óptico ao longo de uma sequencia de imagens (Lucas, 1981), enquanto que no segundo caso este objectivo é conseguido através do seguimento de pontos de controlo do objecto (ex. alvos, características particulares do objecto).

De um ponto de vista prático pode-se dizer que o método baseado na determinação do fluxo óptico é um estimador de movimento do tipo discreto, mas de muito baixa amplitude (inferior a um píxel). O fluxo óptico pode ser entendido como o movimento aparente da projecção de um ponto de controlo numa sequência de imagens, sendo o movimento do objecto entre imagens determinado através da integração, no domínio do tempo, do vector de fluxo óptico (a direcção e a amplitude do vector de movimento é determinado com base na direcção e na amplitude do vector de fluxo óptico).

No caso particular da observação de estruturas, são conhecidos estudos em que o fluxo óptico foi usado para estimar a vibração dos cabos de suspensão do tabuleiro (Silva, 2007-a; 2007-b; Ji, 2008) e dos deslocamentos horizontais e verticais de uma ponte (Morlier, 2007).

Uma vantagem dos métodos de observação baseados no fluxo óptico é que para a sua implementação não é necessário, em princípio, instalar qualquer tipo de alvo na estrutura – são sistemas não intrusivos –, uma vez que estes recorrem às características particulares da própria estrutura para efectuar a estimação do movimento. Outra vantagem reside no facto de não ser necessário conhecer, à partida, o modelo de movimento da estrutura, como é o caso do filtro de *Kalman*. No entanto, os métodos de seguimento baseados no fluxo óptico geram informação com menos conteúdo do que os correspondentes métodos discretos, na medida em que os primeiros não conseguem reconstruir a estrutura do objecto. Este facto resulta de existir um número infini-

to de objectos com estruturas distintas, os quais, quando sujeitos a determinadas trajectórias de movimento, induzem na imagem o mesmo vector de fluxo óptico² (Aloimonos, 1986).

O vector de fluxo óptico é determinado com base na assunção de três pressupostos: i) a intensidade de brilho do ponto da imagem em observação (píxel) mantém-se constante ao longo do tempo (entre imagens); ii) os pontos (píxeis) da imagem vizinhos ao ponto em observação apresentam o mesmo comportamento de movimento; e iii) a amplitude do deslocamento da informação contida na imagem (circunscrita à janela de observação) entre duas imagens é pequena (da ordem do píxel)³.

Considerando o caso específico da observação de estruturas, realizada a longa distância e de forma continuada, constata-se que a estimação da trajectória da estrutura baseada no fluxo óptico não é adequada para o fim em vista, uma vez que: i) os métodos baseados no cálculo do gradiente, como é o caso do fluxo óptico, são muito sensíveis à presença de ruído (Lepetit, 2005); e ii) a variação da luminosidade da estrutura ao longo do tempo, nomeadamente entre o período do dia e da noite e na presença de condições atmosféricas adversas, invalida uma das condições necessárias para a determinação do fluxo óptico.

O presente capítulo é dedicado à apresentação de um estimador de movimento, baseado no filtro recursivo de *Kalman* (*KF – Kalman Filter*), versão IEKF (*Iterated Extended Kalman Filter*), vocacionado para a estimação da trajectória de uma estrutura com baixa dinâmica. Este modelo foi desenvolvido tendo como principal objectivo a estimação do movimento de translação e de rotação (seis graus de liberdade) da estrutura, a partir de uma sequência de imagens adquiridas ao longo do tempo. Para este efeito são necessárias pelo menos duas câmaras e pelo menos três pontos de controlo não colineares (alvos fixos à estrutura).

O estimador de movimento desenvolvido permite estimar, em simultâneo, de forma recursiva, a estrutura do objecto, definido pelo conjunto de pontos de controlo, e a trajectória de movimento. A solução encontrada, como se verá, assenta no conhecimento das matrizes de projecção das câmaras (obtidas do processo de calibração) e da aplicação da propriedade de preservação do centroide (Capítulo 4).

5.2 Filtro de *Kalman*

Num sistema de medição, independentemente do seu princípio de funcionamento, a presença de factores de perturbação não controláveis são uma realidade incontornável, a que os sis-

² Com câmaras de projecção ortogonal não é possível reconstruir a orientação do objecto através do fluxo óptico (Aloimonos, 1986).

³ No caso do deslocamento apresentar amplitude elevada entre imagens, o erro na estimação, decorrente da linearização (derivadas parciais em ordem a u , v e t) por meio da série de Taylor, pode-se tornar significativo.

temas de medição por meio de visão não são imunes. Por este motivo, a fim de mitigar os efeitos adversos produzidos pelas diversas fontes de ruído, o recurso a filtros – digitais, no caso concreto – constitui uma *quase* inevitabilidade. No caso particular dos sistemas de visão, o contributo cumulativo das várias fontes de ruído pode ser modulado como um único agente de perturbação que altera as verdadeiras coordenadas de projecção de um dado ponto na imagem, gerando erro de posição desse ponto.

Dos sistemas de visão que são conhecidos actualmente, e que foram desenvolvidos especificamente para a actividade de observação de pontes (cf. Capítulo 2), somente num deles foi relatada a implementação de um algoritmo de interpolação de trajectória, com o objectivo de reduzir o erro de reconstrução da trajectória que se manifestava de forma mais acentuada para frequências do sinal de deslocamento superiores a 3 Hz (Olaszek, 1999). Embora a inclusão deste algoritmo tenha permitido reduzir o erro dinâmico de um factor aproximadamente de dez, a verdade é que este algoritmo, que pode ser entendido como tratando-se de um filtro digital, não actuava sobre a generalidade das fontes de ruído envolvidas, restringindo a sua acção a uma fonte de ruído em particular – erro de reconstrução da trajectória.

Outro aspecto igualmente importante, com repercussão na capacidade de resposta do sistema de visão, diz respeito às tarefas associadas ao processamento das imagens. Estas são, particularmente, consumidoras de tempo e de recursos (ex. memória, largura de banda de transmissão, unidade de processamento central), podendo criar sérias limitações à eficiência do sistema de medição, nomeadamente em termos de frequência de aquisição e de resolução da imagem. De facto, o tempo necessário para processar uma imagem depende da capacidade de cálculo do computador, mas também da resolução da imagem e da quantidade de informação a extrair desta (ex. detecção e identificação de alvos).

À semelhança da operação de filtragem do sinal, a predição de trajectória do objecto (estrutura) desempenha um papel muito importante nos sistemas de visão, uma vez que esta capacidade pode contribuir, de forma muito significativa, para a redução do tempo de processamento das imagens. Todavia, também a função de predição de trajectória está ausente na maioria dos sistemas de visão mencionados. De facto, esta capacidade de predição é reportada em apenas um dos sistemas (Stephen, 1993), tendo sido implementado um algoritmo de auto-regressão, com o objectivo de prever a posição do alvo na imagem seguinte, com base no histórico passado.

Pretendendo-se que o sistema de visão seja capaz de efectuar medições com uma frequência de aquisição superior a 20 Hz, a integração de um algoritmo eficiente de predição de trajectória contribuirá, certamente, para se atingir esse objectivo. Na actualidade, a função de predição assume uma importância acrescida uma vez que as câmaras de vídeo mais recentes permitem

segmentar a imagem adquirida em regiões (*ROI – Region Of Interest*) ou em áreas (*AOI – Area Of Interest*), de forma que, se assim se quiser, apenas uma parte da imagem original é transferida da câmara de vídeo para a memória do computador, descartando as outras partes consideradas inúteis para o fim pretendido. Com a diminuição da quantidade de informação a transferir por imagem, e tirando partido da largura de banda do canal de transmissão, é possível aumentar o ritmo de aquisição de imagens ou libertar recursos para outros fins. Neste caso em concreto, a estimação da posição futura dos alvos na imagem servirá para configurar, antecipadamente e de forma dinâmica, a câmara de vídeo de forma a transferir para a unidade de processamento apenas as áreas de interesse da imagem.

Sendo o KF um filtro digital adaptativo, este distingue-se da generalidade dos filtros digitais pelo facto de ser, simultaneamente, filtro e predictor. Por este motivo, o modelo de estimação do movimento incorpora as duas funções mencionadas anteriormente, nomeadamente a etapa de filtragem do sinal de movimento e a etapa de predição das coordenadas de projecção de cada um dos pontos de controlo na imagem de cada uma das câmaras utilizadas. Para além disso, atendendo a que o KF possui uma estrutura recursiva, não é necessário armazenar as observações registadas no passado, sendo estas processadas à medida que ficam disponíveis e descartadas logo de seguida. Esta propriedade é extremamente útil para a actividade de observação ininterrupta, uma vez que permite sintetizar, de maneira apropriada, a informação característica do estado passado do sistema sem com isso implicar aumento do volume de informação. A informação relevante, processada desde o primeiro instante até ao momento actual (estado actual do sistema), encontra-se resumida na matriz de covariância, a qual, juntamente com o vector de estado, é utilizada para estimar o instante futuro, sendo actualizada sempre que novas medições ficam disponíveis.

A execução do KF desenvolve-se, genericamente, em duas fases sequenciais: a predição e a actualização (filtragem). Assim, na primeira fase o KF estima o estado de um conjunto de variáveis de interesse e de observações para um dado instante futuro, com base no conhecimento do comportamento histórico do sistema até ao instante actual. Na segunda fase, realizada pós a medição das grandezas que são passíveis de serem medidas, a diferença entre o valor estimado de cada uma destas grandezas e o respectivo valor medido é usada, através de um processo de ponderação, para actualizar a estimativa obtida anteriormente.

Para a estimação do vector de estado, o qual incorpora as variáveis de interesse, o KF aceita todo o tipo de informação que se encontre disponível e processa todas as observações registadas, independentemente da sua natureza e exactidão, fazendo uso: i) do conhecimento da dinâmica do sistema e da dinâmica dos sistemas de medição, que fornecem as observações; ii) do

estado inicial das variáveis de interesse; e iii) da caracterização estatística do ruído do sistema, do erro de medição e da incerteza associada a cada um dos modelos dinâmicos.

Os vários modelos matemáticos de movimento e de projecção, que descrevem a dinâmica do sistema e do sistema de medição e que são integrados na implementação do KF, serão descritos na secção dedicada à formulação do estimador de movimento. Importa ainda fazer uma breve referência ao facto do estimador de movimento ter sido construído com base na versão estendida do KF (*EKF – Extended Kalman Filter*), uma vez que, como se mostrará adiante, tanto o modelo dinâmico do sistema como o modelo dinâmico de medição são não lineares. Para além disso, a inclusão da componente iterativa no estimador deve-se ao facto desta produzir melhores resultados do que a versão simples EKF, quando na presença de fortes perturbações (ruído).

5.3 Formulação do Estimador de Movimento

O modelo dinâmico do sistema, característico do movimento da estrutura, foi inspirado no modelo desenvolvido por Young (1988; 1990), no qual era assumido conhecer as coordenadas de posição de um conjunto de pontos de controlo, no espaço e ao longo do tempo. Este modelo de movimento também foi adoptado por Broida (1990; 1991) num estudo onde era pretendido estimar o movimento 3D de um objecto e a sua estrutura a partir de uma sequência monocular de imagens. No caso presente, como mencionado, o objectivo principal é a estimação do movimento de translação e de rotação do tabuleiro no espaço a partir de uma sequência de imagens adquiridas ao longo do tempo, por um conjunto de câmaras, satisfazendo os critérios de exactidão enunciados no Capítulo 1. Deste modo, as observações ou entradas do estimador de movimento são as coordenadas de projecção dos diversos pontos de controlo em cada uma das imagens, obtidas após o processamento das mesmas, e as saídas são as variáveis de interesse que constam do vector de estado e a partir das quais são obtidos os vectores de translação e de rotação do movimento do objecto, entre outras grandezas (ex. velocidade angular, posição do centro de rotação).

O movimento de uma estrutura, e em particular do tabuleiro de uma ponte suspensa, pode ser caracterizado, genericamente, por um movimento oscilatório, composto por uma componente de baixa frequência e de grande amplitude (gerada pela circulação de cargas pesadas – ex. comboio – e pelas variações sazonais de temperatura) e por varias componentes de frequência mais elevada e de menor amplitude, de natureza aleatória, geradas por fenómenos naturais (ex. vento) e pela circulação de cargas ligeiras. O modelo de estado cinemático que será apresentado a seguir é formulado considerando que a derivada de ordem n do modelo característico do movi-

mento se anula, o qual, na ausência de entradas aleatórias, passa a ser descrito por uma função polinomial de ordem n , variável no tempo (Bar-Shalom, 1993). As componentes aleatórias do movimento, assim como possíveis perturbações no sistema, são modeladas sob a forma de ruído branco.

O movimento de um objecto no espaço pode ser definido como uma transformação de corpo rígido entre duas posições, correspondentes a imagens adquiridas em dois instantes distintos. Esta transformação pode ser representada por uma translação seguida, ou precedida, de uma rotação em torno de um eixo. Atendendo a que o tempo decorrido entre a aquisição das imagens pode ser medido, uma aproximação baseada nas velocidades ou acelerações de translação e de rotação pode ser adoptada para modelar o movimento do objecto.

Neste contexto, o modelo característico do movimento da estrutura que foi desenvolvido e implementado tem por base as seguintes condições:

- A estrutura move-se de forma suave e com baixa velocidade, ao ponto de se poder considerar que a sua aceleração se mantém constante ao longo do tempo (Young, 1988; 1990; Broida, 1990). Embora esta suposição não seja totalmente verdadeira, atendendo à natureza oscilatória do movimento, pode-se considerar que a aproximação é válida para poder ser adoptada. Assim sendo, o movimento de translação é modelado por meio da equação de movimento rectilíneo acelerado e as componentes de movimento de ordem superior, nomeadamente as de natureza oscilatória, são modeladas sob a forma de ruído.
- O movimento de rotação da estrutura acontece segundo os três eixos de rotação e, à semelhança do verificado para o movimento de translação, é de tal modo suave, em frequência e em amplitude, que a precessão se mantém constante ao longo do tempo. Também neste caso, as componentes de natureza oscilatória são modeladas sob a forma de ruído no modelo dinâmico.
- A posição do centro de rotação, segundo o qual ocorre o movimento de rotação da estrutura, está localizada num ponto que não necessariamente o centroide do objecto. No caso específico do tabuleiro de uma ponte, a hipótese deste rodar em torno de um ponto situado algures no interior da viga de rigidez parece, à partida, plausível. Para além disso, esta condição torna o modelo generalista, uma vez que não restringe o posicionamento do centro de rotação a uma posição específica, podendo este ocupar uma qualquer posição no espaço, inclusive o ponto correspondente ao centroide do objecto (localizado na zona inferior da viga de rigidez).

5.3.1 Considerações Gerais

No processo de estimação do vector de estado é suposto conhecer: i) o modelo dinâmico do movimento da estrutura; ii) o modelo de projecção, o qual estabelece a relação entre o vector

de estado e o vector das observações (medições); e iii) a caracterização, em termos estatísticos, das fontes de ruído envolvidas no processo. Para além disso, será também necessário conhecer o estado inicial das variáveis de interesse (ou variáveis de estado). No entanto, atendendo a que nenhum destes modelos matemáticos representa de forma plena a realidade e o estado inicial das variáveis de estado também não é perfeitamente conhecido, será necessário estimar as incertezas associadas a cada um dos modelos e ao estado inicial do vector de estado.

O conhecimento do estado inicial do vector de estado influencia a rapidez de convergência do filtro recursivo, sendo, normalmente, tanto mais rápida quanto menor for a incerteza associada. Para além disso, o não conhecimento do estado inicial do vector de estado ou a elevada incerteza associada pode conduzir à não convergência do algoritmo. Para assegurar a convergência do algoritmo de estimação, Broida (1990; 1991) implementou um algoritmo executável em modo *off-line* sobre um conjunto de imagens do início da sequência temporal, para determinar, com baixa incerteza, o estado inicial do vector de estado. Na generalidade dos casos conhecidos, o estado inicial das variáveis de interesse é determinado à posteriori, a partir de uma sequência de imagens adquiridas previamente, como é o caso dos algoritmos desenvolvidos por Halvorsen (1999) e Cao (2007) para a determinação da posição do centro de rotação.

No caso da monitorização do estado estrutural de uma estrutura, atendendo a que esta acção se desenrola ao longo do tempo, e de forma continuada, a rapidez de convergência não é um critério primordial (desde que limitado a alguns minutos)⁴. Como se verá no Capítulo 6, apesar do vector de estado ser inicializado com parâmetros em que o grau de exactidão é baixo (reflectido na matriz de covariância), o estimador converge rapidamente para a solução. Neste sentido, as condições necessárias à implementação do IEKF que se apresenta a seguir são idênticas às requeridas para a realização da calibração do sistema de medição (cf. Capítulo 4). A principal diferença reside no número mínimo de pontos de controlo que, no caso presente, passa de quatro para três. Deste modo, é assumido que: i) são usados dois ou mais subsistemas de visão; ii) são usados pelo menos três pontos de controlo, dispostos de forma não colinear, e todos eles em linha de vista para todos os subsistemas de visão; iii) a zona da estrutura onde se encontram posicionados os pontos de controlo se comporta como um corpo rígido; iv) se conhece a matriz de projecção de cada um dos subsistemas de visão, obtida após a realização da calibração (cf. Capítulo 4); v) se conhecem as coordenadas de projecção dos pontos de controlo em cada uma das imagens, assim como a sua correspondência entre imagens de câmaras distintas e entre

⁴ De acordo com os resultados obtidos por meio de simulação numérica (cf. Capítulo 6) verifica-se que o tempo necessário para a plena convergência é bastante inferior a um minuto (considerando uma frequência de aquisição de 20 imagens por segundo).

imagens adquiridas em instantes distintos; vi) o movimento da estrutura numa dada direcção é independente do movimento ocorrido nas restantes direcções; e vii) não existe correlação entre o ruído presente nas coordenadas dos pontos de controlo de cada uma das imagens, podendo tomar diferentes valores de variância em função da direcção considerada.

5.3.2 Sistemas de Coordenadas

A modelação do movimento da estrutura assenta na assunção de um conjunto de sistemas de coordenadas, como representado na Figura 5.1. Para o efeito, considera-se:

- Sistema de coordenadas de referência (O_I), estático, estabelecido no espaço do objecto (ex. tabuleiro da ponte), na sequência do processo de calibração do sistema de medição.
- Sistema de coordenadas (O_{Ci}), estático, estabelecido em cada uma das câmaras (subsistemas de visão). A matriz de projecção de cada uma das câmaras, M_i , estabelece a relação de transformação de coordenadas entre cada um destes sistemas de coordenadas e o sistema de coordenadas de referência (O_I).
- Sistema de coordenadas (O_B), móvel, posicionado no centro geométrico do objecto (definido pelo conjunto de pontos de controlo), move-se solidário com este (em translação e em rotação). A orientação deste sistema de coordenadas é definido pela posição de três dos pontos de controlo do objecto, dispostos de forma não colinear.
- Sistema de coordenadas (O_R), móvel, posicionado no centro de rotação, move-se solidário com o objecto (em translação e em rotação). Este sistema de coordenadas possui a mesma orientação do sistema de coordenadas O_B e está solidário com este. Quer isto dizer que as coordenadas de um ponto no espaço, visto pelos dois sistemas de coordenadas, diferem entre si a menos de uma transformação de translação. A razão para usar os dois sistemas de coordenadas tem a ver com o facto do centro de rotação sobre o qual o objecto roda poder estar posicionado num ponto que não necessariamente o centro geométrico do objecto. De qualquer modo, se por acaso o centro de rotação coincidir com o centro geométrico do objecto este modelo geométrico continua a ser válido.

5.3.3 Formulação dos Modelos Matemáticos

5.3.3.1 Modelo de Projecção

O denominado modelo de projecção tem como base de suporte alguns dos conceitos desenvolvidos e apresentados no Capítulo 4. Assim, considerando a existência de N subsistemas de

visão⁵ e de b pontos de controlo, o modelo de projecção é dado pela Equação 5.1, em que o vector $[\ddot{u}_{ij}, \ddot{v}_{ij}]^T = [u_{ij} - \bar{u}_i, v_{ij} - \bar{v}_i]^T$ representa a transformação de coordenadas dos pontos na imagem da câmara i para o novo sistema de coordenadas O_{C_i} (criado aquando do processo de calibração) e a matriz M_i representa a matriz de projecção da câmara i . O vector $\hat{T}_i = [\bar{u}_i, \bar{v}_i]^T$, obtido através da Equação 4.17, representa a posição do sistema de coordenadas O_{C_i} no plano da imagem da câmara i .

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{u}_{11} & \cdots & \ddot{u}_{1b} \\ \ddot{v}_{11} & \cdots & \ddot{v}_{1b} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{u}_{N1} & \cdots & \ddot{u}_{Nb} \\ \ddot{v}_{N1} & \cdots & \ddot{v}_{Nb} \end{bmatrix}}_{\ddot{W}_{2N \times b}} = \underbrace{\begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_N \end{bmatrix}}_{M_{2N \times 3}} \cdot \underbrace{[C_1 \ \cdots \ C_b]}_{C_{3 \times b}} \quad (5.1)$$

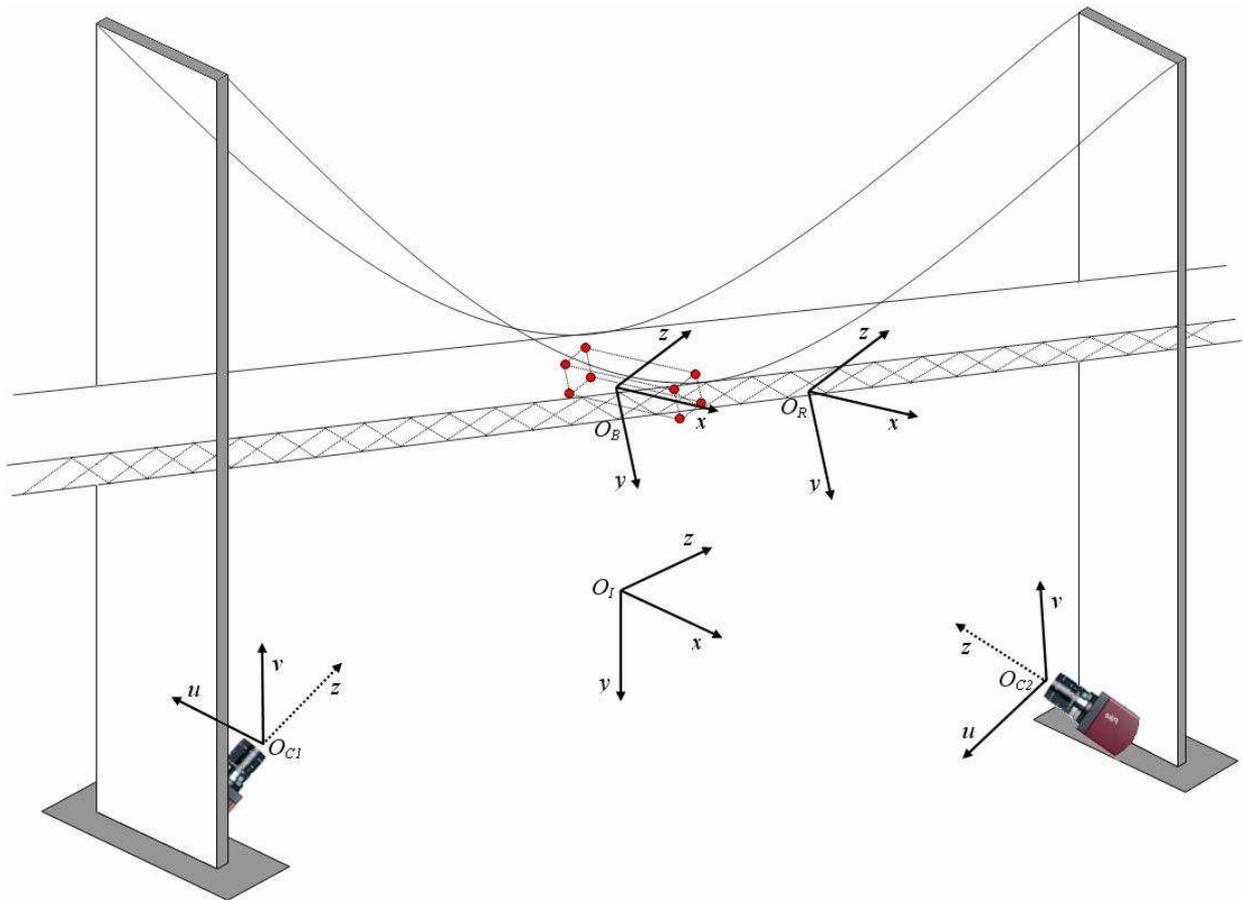


Figura 5.1 – Sistemas de coordenadas empregues na modelação do movimento da estrutura (tabuleiro), para uma configuração composta por dois subsistemas de visão.

Sendo conhecidas as matrizes M e \ddot{W} , e dispondo de pelo menos duas câmaras ($N \geq 2$), facilmente se determina a posição dos alvos $C_{j=1, \dots, b}$. No entanto, atendendo a que o modelo da

⁵ Por razões de simplicidade, no que se segue usar-se-á a designação *câmara* para designar o subsistema de visão composto pela câmara de vídeo digital, óptica e demais componentes.

câmara afim é um modelo aproximado do modelo da perspectiva central, a reconstrução da posição dos pontos de controlo não será exacta, isto é, o próprio modelo pode ser visto como uma fonte de ruído. Para além disso, será natural que as coordenadas dos pontos nas imagens possam estar afectadas por outras fontes de ruído. A Equação 5.2 incorpora esta particularidade, em que as coordenadas de projecção do ponto de controlo j na câmara i estão afectadas por ruído, representado pelo vector $n_{ij} = [n_{ij}^u, n_{ij}^v]^T$, o qual é assumido obedecer a uma distribuição Gaussiana de média nula.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{u}_{11} + n_{11}^u & \cdots & \ddot{u}_{1b} + n_{1b}^u \\ \ddot{v}_{11} + n_{11}^v & \cdots & \ddot{v}_{1b} + n_{1b}^v \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{u}_{N1} + n_{N1}^u & \cdots & \ddot{u}_{Nb} + n_{Nb}^u \\ \ddot{v}_{N1} + n_{N1}^v & \cdots & \ddot{v}_{Nb} + n_{Nb}^v \end{bmatrix}}_{\tilde{W}_{2N \times b}} = \underbrace{\begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_N \end{bmatrix}}_{M_{2N \times 3}} \cdot \underbrace{[C_1 \cdots C_b]}_{C_{3 \times b}} \quad (5.2)$$

Considerando um ponto de controlo em particular, j , a equação anterior toma a forma representada pela Equação⁶ 5.3, em que o vector \ddot{c}_j representa as coordenadas verdadeiras de projecção do ponto de controlo j nas N câmaras, enquanto que C_j representa as coordenadas 3D de reconstrução desse mesmo ponto de controlo, no sistema de coordenadas de referência O_I .

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{u}_{1j} \\ \ddot{v}_{1j} \\ \vdots \\ \ddot{u}_{Nj} \\ \ddot{v}_{Nj} \end{bmatrix}}_{\ddot{c}_j} + \underbrace{\begin{bmatrix} n_{1j}^u \\ n_{1j}^v \\ \vdots \\ n_{Nj}^u \\ n_{Nj}^v \end{bmatrix}}_{n_j} = M \cdot C_j \quad \Leftrightarrow \quad C_j = M^\nabla \cdot (\ddot{c}_j + n_j) \quad (5.3)$$

Fazendo $\tilde{c}_j = \ddot{c}_j + n_j$ obtém-se a Equação 5.4, a qual representa o modelo de projecção, que será incorporado no modelo do KF, e que traduz a relação entre a observação \tilde{c}_j (no conjunto das várias câmaras) e a posição do ponto de controlo j (C_j) no espaço de O_I .

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{u}_{1j} \\ \tilde{v}_{1j} \\ \vdots \\ \tilde{u}_{Nj} \\ \tilde{v}_{Nj} \end{bmatrix}}_{\tilde{c}_j} = M \cdot C_j \quad \Leftrightarrow \quad \tilde{c}_j = M \cdot C_j \quad \Leftrightarrow \quad C_j = M^\nabla \cdot \tilde{c}_j \quad (5.4)$$

⁶ M^∇ representa a função pseudo-inversa da matriz M .

5.3.3.2 Modelo do Espaço

De acordo com a Figura 5.2, a posição do ponto de controlo j no sistema de coordenadas de referência O_I , no instante t , é dado pelo vector $s_j(t) = [x_j(t), y_j(t), z_j(t)]^T$. No entanto, atendendo a que as coordenadas dos pontos nas imagens estão afectadas por ruído, de acordo com o modelo de projecção apresentado anteriormente, o vector de posição do ponto de controlo j toma a forma $\tilde{s}_j(t) = [\tilde{x}_j(t), \tilde{y}_j(t), \tilde{z}_j(t)]^T$, de modo a incorporar o erro de posição, resultante da sua reconstrução no espaço.

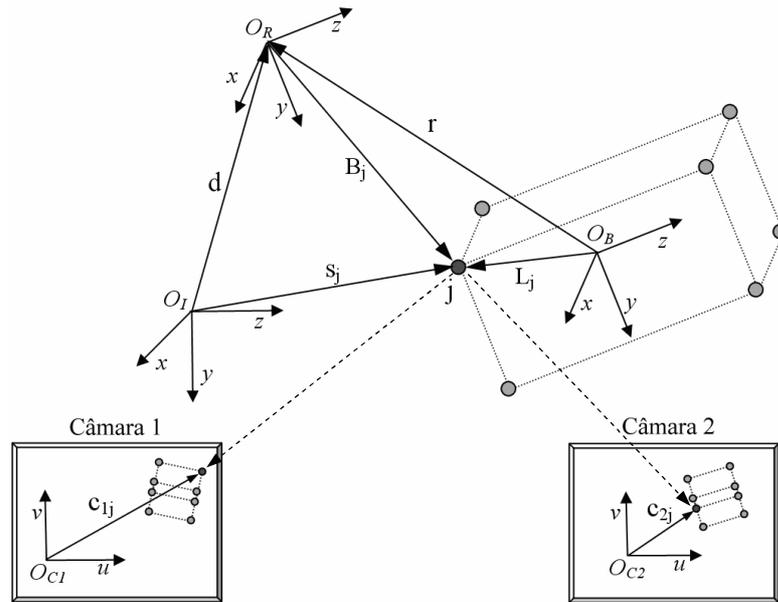


Figura 5.2 – Posição do ponto de controlo j vista por cada um dos sistemas de coordenadas.

Dado que os sistemas de coordenadas O_B e O_R possuem a mesma orientação, diferindo apenas do vector de translação r , verifica-se que as coordenadas do ponto de controlo j no sistema de coordenadas O_R são dadas pela Equação 5.5, em que L_j e o vector $r = [r_x, r_y, r_z]^T$ representam, respectivamente, as coordenadas do ponto de controlo j e do centro de rotação O_R , no sistema de coordenadas O_B .

$$B_j = L_j - r \quad (5.5)$$

Atendendo a que o sistema de coordenadas O_R se encontra ligado rigidamente a O_B (quer isto dizer que o vector r não varia ao longo do tempo) e que é assumido o objecto ter comportamento de corpo rígido, significa que a Equação 5.5 não apresenta dependência em relação ao tempo, isto é, B_j mantêm-se inalterável ao longo do tempo. Por outro lado, é possível estabelecer uma relação entre os vectores $s_j(t)$ e B_j , dada pela Equação 5.6, em que o vector $d(t)$ representa as

coordenadas de O_R no sistema de coordenadas de referência O_I e a matriz $R(t)$ representa a rotação de O_B (ou de O_R) relativamente a O_I .

$$s_j(t) = d(t) + R(t) \cdot B_j \quad (5.6)$$

Substituindo a expressão de B_j nesta equação obtém-se a Equação 5.7, a qual representa o movimento do ponto de controlo j , em translação e em rotação, no sistema de coordenadas de referência O_I .

$$s_j(t) = d(t) + R(t) \cdot (L_j - r) \quad (5.7)$$

5.3.3.3 Modelo do Objecto

No instante de tempo t_i , coincidente com o instante da aquisição das imagens realizada pelo conjunto de câmaras, os vectores $s_j(t = t_i)$ e C_j (Equações 5.4 e 5.7) representam a mesma entidade, isto é, a posição do ponto de controlo j no sistema de coordenadas O_I . Todavia, uma vez que é suposto não conhecer a estrutura do objecto ($L_{j=1,\dots,b}$), o mesmo acontecendo com a posição e com a orientação do sistema de coordenadas O_B , antes de se poder usar a Equação 5.7 é necessário encontrar um modelo que relacione o vector L_j com as coordenadas de projecção do ponto de controlo j nas imagens das várias câmaras.

Tal como realçado no Capítulo 4, o modelo da câmara afim projecta o ponto correspondente ao centroide de um conjunto de pontos no ponto correspondente ao centroide das respectivas projecções (secção 4.2.1). Deste modo, pode-se deduzir que a origem do sistema de coordenadas O_B é projectada no ponto da imagem correspondente ao centroide das projecções do conjunto de pontos de controlo, sendo as coordenadas desse ponto obtidas através da Equação 5.8. O vector $[\hat{u}_i, \hat{v}_i]^T$ representa as coordenadas da projecção do ponto O_B na imagem da câmara i .

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{v}_1 \\ \vdots \\ \hat{u}_N \\ \hat{v}_N \end{bmatrix} = \frac{1}{b} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^b \tilde{u}_{1i} \\ \sum_{i=1}^b \tilde{v}_{1i} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^b \tilde{u}_{Ni} \\ \sum_{i=1}^b \tilde{v}_{Ni} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Aplicando a transformação de coordenadas representada pela Equação 5.9 obtém-se a matriz de observações \tilde{T} , a qual permitirá, como se verá, estabelecer a relação entre as coordenadas de projecção dos pontos de controlo nas várias imagens com a respectiva posição no sistema de coordenadas O_B .

$$\tilde{l} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{11} - \hat{u}_1 & \cdots & \tilde{u}_{1b} - \hat{u}_1 \\ \tilde{v}_{11} - \hat{v}_1 & \cdots & \tilde{v}_{1b} - \hat{v}_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{u}_{N1} - \hat{u}_N & \cdots & \tilde{u}_{Nb} - \hat{u}_N \\ \tilde{v}_{N1} - \hat{v}_N & \cdots & \tilde{v}_{Nb} - \hat{v}_N \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Na ausência de ruído bastaria usar um qualquer grupo de imagens para reconstruir a estrutura do objecto, a qual é assumido ser desconhecida. No entanto, dado que as coordenadas dos pontos nas imagens estão provavelmente afectadas por ruído, a reconstrução da estrutura do objecto virá afectada por erro. Atendendo a que a forma do objecto é preservada ao longo da sequência de imagens, pode-se reconstruir, de forma recursiva, a forma do objecto a partir das várias reconstruções realizadas ao longo do tempo. O objectivo é reduzir a influência do ruído no processo de reconstrução do objecto.

Assim, após a aquisição da imagem no instante de tempo t_i , procede-se à actualização da imagem média \tilde{l} , de acordo com a Equação 5.10, em que i representa o número de imagens adquiridas até ao momento (a começar em zero) Como se constata, a imagem média apresenta dependência temporal em virtude desta estar dependente do instante de aquisição da última imagem e do ruído presente em cada imagem adquirida.

$$\tilde{l}(t_i) = \frac{i}{1+i} \cdot \tilde{l}(t_{i-1}) + \frac{1}{1+i} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{u}_{11} - \hat{u}_1 & \cdots & \tilde{u}_{1b} - \hat{u}_1 \\ \tilde{v}_{11} - \hat{v}_1 & \cdots & \tilde{v}_{1b} - \hat{v}_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{u}_{N1} - \hat{u}_N & \cdots & \tilde{u}_{Nb} - \hat{u}_N \\ \tilde{v}_{N1} - \hat{v}_N & \cdots & \tilde{v}_{Nb} - \hat{v}_N \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

A posição do ponto de controlo j no sistema de coordenadas O_B é determinada através da Equação 5.11, em que o vector $\tilde{l}_j(t_i) = [\tilde{l}_{1j}^u \quad \tilde{l}_{1j}^v \quad \cdots \quad \tilde{l}_{Nj}^u \quad \tilde{l}_{Nj}^v]^T$ representa as coordenadas de projecção do ponto de controlo j nas N imagens, obtido após i iterações (valor médio).

$$L_j(t_i) = M^\nabla \cdot \tilde{l}_j(t_i) \quad (5.11)$$

Após algumas iterações, dependente do nível de ruído presente, a estrutura do objecto reconstruído (L), obtida através da Equação 5.11, convergirá para um estado similar ao de ausência de ruído. Substituindo na Equação 5.7 o parâmetro L_j pela Equação 5.11, obtém-se a Equação 5.12 que relaciona o movimento do ponto de controlo j , no sistema de coordenadas O_t , com a sua projecção em cada uma das câmaras (sistema de coordenadas O_{Ci}).

$$s_j(t_i) = d(t_i) + R(t_i) \cdot (M^\nabla \cdot \tilde{l}_j(t_i) - r) \quad (5.12)$$

Na Equação 5.12, o vector $d(t_i)$ e a matriz $R(t_i)$ descrevem, respectivamente, as componentes do movimento de translação e de rotação do objecto. Como mencionado anteriormente, no

instante de tempo $t = t_i$, s_j e C_j representam o mesmo ponto no espaço de O_I . Deste modo, substituindo na Equação 5.4 C_j por s_j , obtém-se a Equação 5.13, a qual relaciona as coordenadas de projecção do ponto de controlo j , no conjunto das câmaras, com a posição e pose do objecto no instante $t = t_i$.

$$\tilde{c}_j(t_i) = M \cdot [d(t_i) - R(t_i) \cdot r] + M \cdot R(t_i) \cdot M^\nabla \cdot \tilde{l}_j(t_i) \quad (5.13)$$

5.3.3.4 Modelo Cinemático

A assumpção de que o movimento do objecto, isto é da estrutura, é suave, ao ponto de se poder considerar que a aceleração se mantém praticamente constante ao longo do tempo, permite-nos formular a equação de estado para o movimento de translação, (Equação 5.14), em que os vectores $a = [a_x, a_y, a_z]^T$, $v(t) = [v_x(t), v_y(t), v_z(t)]^T$ e $d(t) = [d_x(t), d_y(t), d_z(t)]^T$ representam, respectivamente, as componentes de aceleração, de velocidade e de deslocamento de O_R relativamente a O_I , ao longo do tempo.

$$\begin{cases} \dot{d}(t) = v(t) \\ \dot{v}(t) = a(t) \\ \dot{a}(t) = 0 \end{cases} \quad (5.14)$$

A Equação 5.15, obtida após a integração da Equação 5.14 no domínio do tempo, representa a solução analítica para a componente do movimento de translação, em que $\tau = t_2 - t_1$ representa o intervalo de tempo decorrido entre os instantes t_1 e t_2 ; no caso presente, o intervalo de tempo decorrido entre a aquisição de duas imagens, o qual não tem de ser necessariamente constante.

$$\begin{cases} d(t_2) = d(t_1) + v(t_1) \cdot \tau + 0,5 \cdot a(t_1) \cdot \tau^2 \\ v(t_2) = v(t_1) + a(t_1) \cdot \tau \\ a(t_2) = a(t_1) \end{cases} \quad (5.15)$$

A formulação do movimento de rotação é mais complexa, quer em termos analíticos quer em termos computacionais. O modelo do movimento de rotação é formulado assumindo que a precessão se mantém praticamente constante ao longo do tempo (Young, 1988; 1990). Assim, considere-se que o vector $w(t) = [w_x(t), w_y(t), w_z(t)]^T$ representa a velocidade angular instantânea do objecto relativamente a O_R e com componentes em O_I , que o vector $p = [p_x, p_y, p_z]^T$ representa a velocidade angular de $w(t)$ (precessão) relativamente a O_R e também com componentes em O_I , e que as matrizes $\Omega[w(t)]$ e $P(p)$ são representadas pelas Equações 5.16 e 5.17, respectivamente (Young, 1988; 1990).

$$\Omega[w(t)] = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -w_z(t) & w_y(t) & -w_x(t) \\ w_z(t) & 0 & -w_x(t) & -w_y(t) \\ -w_y(t) & w_x(t) & 0 & -w_z(t) \\ w_x(t) & w_y(t) & w_z(t) & 0 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

$$P(p) = \begin{bmatrix} 0 & -p_z & p_y \\ p_z & 0 & -p_x \\ -p_y & p_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Representando a orientação do objecto, relativamente a O_I , através do quaternião $q(t) = [q_1(t), q_2(t), q_3(t), q_4(t)]^T$, obtém-se a Equação 5.18, a qual descreve a variação da orientação do objecto em função da velocidade angular $w(t)$ e do tempo (Young, 1988; 1990).

$$\dot{q}(t) = \Omega[w(t)] \cdot q(t) \quad (5.18)$$

Tendo-se assumido que a precessão não varia ao longo do tempo, verifica-se que o vector de velocidade angular $w(t)$ roda com velocidade constante, sendo descrita pelo vector p . A relação entre a velocidade angular e a precessão é dada pela Equação 5.19 (Young, 1988; 1990).

$$\dot{w}(t) = P(p) \cdot w(t) \quad (5.19)$$

Juntando as três componentes obtém-se a equação de estado representativa do movimento de rotação em função do tempo (Equação 5.20).

$$\begin{cases} \dot{q}(t) = \Omega[w(t)] \cdot q(t) \\ \dot{w}(t) = P(p) \cdot w(t) \\ \dot{p}(t) = 0 \end{cases} \quad (5.20)$$

A solução da Equação 5.19 é a representada pela Equação 5.21, obtida por meio de integração no domínio do tempo.

$$w(t_2) = \exp[P(p) \cdot \tau] \cdot w(t_1) \quad (5.21-a)$$

$$w(t_2) = \phi_1[p; \tau] \cdot w(t_1) \quad (5.21-b)$$

Na Equação 5.21-b, a função $\phi_1[p; \tau]$ é descrita pela Equação 5.22, em que o vector

$[a_1, a_2, a_3]^T = \left[\frac{p_x}{\|p\|}, \frac{p_y}{\|p\|}, \frac{p_z}{\|p\|} \right]^T$, $c_p = \cos(\|p\| \cdot \tau)$, $s_p = \sin(\|p\| \cdot \tau)$ e I_3 representa a matriz identidade, de dimensão 3×3 (Young, 1988; 1990).

$$\phi[p; \tau] = \begin{cases} I_3 & \text{se } \|p\| = 0; \\ \text{caso contrário:} & \\ \begin{bmatrix} a_1^2 + (1-a_1^2) \cdot c_p & a_1 \cdot a_2 \cdot (1-c_p) - a_3 \cdot s_p & a_1 \cdot a_3 \cdot (1-c_p) + a_2 \cdot s_p \\ a_1 \cdot a_2 \cdot (1-c_p) + a_3 \cdot s_p & a_2^2 + (1-a_2^2) \cdot c & a_2 \cdot a_3 \cdot (1-c_p) - a_1 \cdot s_p \\ a_1 \cdot a_3 \cdot (1-c_p) - a_2 \cdot s_p & a_2 \cdot a_3 \cdot (1-c_p) + a_1 \cdot s_p & a_3^2 + (1-a_3^2) \cdot c_p \end{bmatrix} & \end{cases} \quad (5.22)$$

A solução para a Equação 5.18, após integração no domínio do tempo, é descrita pela Equação 5.23

$$q(t_2) = \exp\{\Omega[w(t)] \cdot \tau\} \cdot q(t_1) \quad (5.23-a)$$

$$q(t_2) = \underbrace{\{\phi[p; \tau] \cdot \phi[w(t_1) - p; \tau]\}}_{\phi[p; w(t_1) - p; \tau]} \cdot q(t_1) \quad (5.23-b)$$

em que a função $\phi[\eta; \tau]_{\eta=p; \eta=w(t_1)-p}$ é descrita pela Equação 5.24, em que I_4 representa a matriz identidade de dimensão 4×4 e o parâmetro η toma o valor do vector p ou da diferença dos vectores $w(t_1)$ e p .

$$\phi[\eta; \tau] = \begin{cases} I_4 & \text{se } \|\eta\| = 0; \\ \text{caso contrário:} & \\ I_4 \cdot \cos\left(\frac{\|\eta\| \cdot \tau}{2}\right) + \frac{2}{\|\eta\|} \cdot \sin\left(\frac{\|\eta\| \cdot \tau}{2}\right) \cdot \Omega[\eta] & \end{cases} \quad (5.24)$$

A relação entre a matriz de rotação $R(t)$ (presente na Equação 5.13) e o quaternião q é descrita pela Equação 5.25 onde, por razões de simplificação da expressão, foi omitida a dependência dos elementos do quaternião em relação ao tempo.

$$R[q(t)] = \begin{bmatrix} q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2 \cdot (q_1 \cdot q_2 + q_3 \cdot q_4) & 2 \cdot (q_1 \cdot q_3 - q_2 \cdot q_4) \\ 2 \cdot (q_1 \cdot q_2 - q_3 \cdot q_4) & -q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2 \cdot (q_2 \cdot q_3 + q_1 \cdot q_4) \\ 2 \cdot (q_1 \cdot q_3 + q_2 \cdot q_4) & 2 \cdot (q_2 \cdot q_3 - q_1 \cdot q_4) & -q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

A equação de estado do sistema, denominada de equação de base e que inclui as componentes de translação e de rotação, é obtida por anexação das Equações 5.14 e 5.20, resultando na Equação 5.26, em que O_3 e O representam matrizes nulas de dimensão 3×3 e 3×4 , respectivamente. Para além destas, há ainda que incluir a equação de estado relativa ao vector r , o qual, como mencionado, é suposto não variar ao longo do tempo. Deste modo, o vector de estado $x(t)$ é composto por 22 variáveis de estado.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{d}(t) \\ \dot{v}(t) \\ \dot{a} \\ \dot{r} \\ \dot{q}(t) \\ \dot{w}(t) \\ \dot{p} \end{bmatrix}}_{\dot{x}(t)} = \begin{bmatrix} O_3 & I_3 & O_3 & O_3 & O & O_3 & O_3 \\ O_3 & O_3 & I_3 & O_3 & O & O_3 & O_3 \\ O_3 & O_3 & O_3 & O_3 & O & O_3 & O_3 \\ O_3 & O_3 & O_3 & O_3 & O & O_3 & O_3 \\ O^T & O^T & O^T & O^T & \Omega[w(t)] & O^T & O^T \\ O_3 & O_3 & O_3 & O_3 & O & P[p] & O_3 \\ O_3 & O_3 & O_3 & O_3 & O & O_3 & O_3 \end{bmatrix} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} d(t) \\ v(t) \\ a \\ r \\ q(t) \\ w(t) \\ p \end{bmatrix}}_{x(t)} \quad (5.26)$$

De igual modo, combinando as Equações 5.15, 5.21 e 5.23, obtém-se a Equação 5.27, denominada de equação de transição de estado, utilizada para propagar o vector de estado do instante de tempo $t = t_i$ para o instante de tempo $t = t_{i+1}$ (predição), em que $\tau = t_{i+1} - t_i$.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} d(t_{i+1}^-) \\ v(t_{i+1}^-) \\ a(t_{i+1}^-) \\ r(t_{i+1}^-) \\ q(t_{i+1}^-) \\ w(t_{i+1}^-) \\ p(t_{i+1}^-) \end{bmatrix}}_{x(t_{i+1}^-)} = \underbrace{\begin{bmatrix} I_3 & I_3 \cdot \tau & 0,5 \cdot I_3 \cdot \tau^2 & O_3 & O & O_3 & O_3 \\ O_3 & I_3 & I_3 \cdot \tau & O_3 & O & O_3 & O_3 \\ O_3 & O_3 & I_3 & O_3 & O & O_3 & O_3 \\ O_3 & O_3 & O_3 & I_3 & O & O_3 & O_3 \\ O^T & O^T & O^T & O^T & \phi_2[p; w(t_i^+) - p; \tau] & O^T & O^T \\ O_3 & O_3 & O_3 & O_3 & O & \phi_1[p; \tau] & O_3 \\ O_3 & O_3 & O_3 & O_3 & O & O_3 & I_3 \end{bmatrix}}_{\phi_x[x(t_i^+); \tau]} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} d(t_i^+) \\ v(t_i^+) \\ a(t_i^+) \\ r(t_i^+) \\ q(t_i^+) \\ w(t_i^+) \\ p(t_i^+) \end{bmatrix}}_{x(t_i^+)} \quad (5.27)$$

$f[x(t_i^+); t_i^+]$

Por último, a Equação 5.28, denominada de equação de observação, representa a estimação das observações, isto é, das coordenadas de projecção dos b pontos de controlo nas N câmaras, no instante de tempo $t = t_i$, tendo por base o estado corrente do vector de estado. Na realidade, a Equação 5.28 é obtida a partir da expansão da Equação 5.13, aplicada a b alvos e a N câmaras. O vector \tilde{l} , representado pelas Equações 5.9 e 5.10, contém as coordenadas de projecção dos b pontos de controlo nas N câmaras (perturbadas com ruído).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} c_{11}(t_i) \\ \vdots \\ c_{N1}(t_i) \\ \vdots \\ c_{1b}(t_i) \\ \vdots \\ c_{Nb}(t_i) \end{bmatrix}}_{z(t_i)} = \underbrace{\begin{bmatrix} M \\ \vdots \\ M \end{bmatrix}} \cdot \left\{ \underbrace{\begin{bmatrix} d(t_i) \\ \vdots \\ d(t_i) \end{bmatrix}} - \underbrace{\begin{bmatrix} R[q(t_i)] \\ \vdots \\ R[q(t_i)] \end{bmatrix}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} r \\ \vdots \\ r \end{bmatrix}} \right\} + \underbrace{\begin{bmatrix} M \\ \vdots \\ M \end{bmatrix}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} R[q(t_i)] \\ \vdots \\ R[q(t_i)] \end{bmatrix}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} M^\nabla \\ \vdots \\ M^\nabla \end{bmatrix}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{l}_{11}(t_i) \\ \vdots \\ \tilde{l}_{N1}(t_i) \\ \vdots \\ \tilde{l}_{1b}(t_i) \\ \vdots \\ \tilde{l}_{Nb}(t_i) \end{bmatrix}} \quad (5.28)$$

$h[x(t_i); t_i]$

5.3.4 Estimação do Movimento Cinemático

5.3.4.1 Filtro de *Kalman* Estendido

A aplicação do KF pressupõe que os modelos de transição de estado e de observação são modelos lineares e que os desvios da trajectória nominal são de tal modo pequenos que a aplicação das técnicas de perturbação linear produzem resultados adequados (Maybeck, 1994). No entanto, quando estas condições não são satisfeitas, a versão linear do KF não consegue responder de forma satisfatória, em termos de descrição do fenómeno físico que se pretende observar, uma vez que o desvio entre a trajectória estimada pelo KF e a trajectória nominal torna-se significativo. Nestas condições, é usual recorrer à versão estendida do filtro de *Kalman* (*EKF*).

No caso presente, como se constata, tanto o modelo de transição de estado, representado pela Equação 5.27, como o modelo de observação, representado pela Equação 5.28, são modelos não lineares e variáveis no tempo.

A ideia de base subjacente à implementação do EKF consiste em linearizar a trajectória do modelo do sistema em torno do valor estimado $\hat{x}(t_i)$, correspondente à melhor estimativa conhecida nesse instante, e actualizar as estimativas baseado num KF aplicado a esse sistema linearizado. Deste modo, sempre que o sistema alcança um novo estágio é determinada uma nova trajectória e incorporada no processo de estimação, de forma a que o desvio relativamente à trajectória de referência seja suficientemente pequeno para que as técnicas de perturbação linear se mantenham válidas e possam ser aplicadas. Também a propagação da matriz de covariância é realizada por meio de linearização em torno do valor estimado.

Assim, para a formulação do EKF, considera-se que o estado do sistema é modelado por uma função genérica⁷, f , representada pela Equação 5.29, que se sabe ser não linear e dependente de $x(t)$ e de t . O processo $j(t)$ representa ruído branco⁸, distribuição Gaussiana de média nula, e satisfaz as condições indicadas pela Equação 5.30 (Bar-Shalom, 1993).

$$x(t_{i+1}) = f[x(t_i); t_i] + j(t_i) \quad (5.29)$$

$$E[j(t_i)] = 0; \quad E[j(t_i) \cdot j^T(t_j)] = Q(t_i) \cdot \delta_{ij} \quad (5.30)$$

De modo similar, considera-se que o modelo de observação é descrito pela função não linear, representada pela Equação 5.31, em que h representa um vector de funções conhecidas, dependentes do vector de estado $x(t)$ e de t , e $g(t)$ representa ruído branco Gaussiano com média nula e covariância satisfazendo a condição expressa pela Equação 5.32 (Bar-Shalom, 1993). Para além disso, é assumido que não existe qualquer correlação entre as fontes de ruído $j(t)$ e $g(t)$.

⁷ Para simplificar a expressão omitiu-se a componente relativa a entradas de controlo do sistema.

⁸ Assume-se que o ruído entra no sistema de forma aditiva.

$$z(t_i) = h[x(t_i); t_i] + g(t_i) \quad (5.31)$$

$$E[g(t_i)] = 0; \quad E[g(t_i) \cdot g^T(t_j)] = R(t_i) \cdot \delta_{ij} \quad (5.32)$$

Uma vez que nem o modelo de transição de estado nem o modelo de observação são lineares, o EKF é implementado através da expansão em série de Taylor dos respectivos modelos não lineares. No caso presente, a linearização dos modelos inclui apenas os termos de primeira ordem da série de Taylor, sendo os termos de ordem superior descartados e modelados sob a forma de ruído e incorporados nos processos $j(t)$ e $g(t)$, respectivamente. Esta aproximação é tanto mais válida quanto menores forem os desvios relativamente à trajectória de referência, de modo a que o peso dos termos de ordem superior a dois possa ser desprezado. Por este motivo, o EKF não apresenta garantias teóricas de convergência nem de optimalidade (Sousa, 2003).

Deste modo, para a implementação do EKF, de primeira ordem, é necessário determinar os Jacobianos das equações de propagação de estado e de observação. Para o efeito, considera-se que F e H representam, respectivamente, as derivadas parciais de f e de h , em ordem ao vector de estado, e avaliadas ao longo da trajectória definida pelo vector $\hat{x}(t_i)$, tal como representado pelas Equações 5.33 e 5.34. As funções $f[x(t_i); t_i]$ e $h[x(t_i); t_i]$ são descritas, respectivamente, pelas Equações 5.27 e 5.28.

$$F[\hat{x}(t_i); t_i] = \left. \frac{\partial f[x; t_i]}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}(t_i)} \quad (5.33)$$

$$H[\hat{x}(t_i); t_i] = \left. \frac{\partial h[x; t_i]}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}(t_i)} \quad (5.34)$$

Estes conceitos, e outros a descrever a seguir, serão incorporados no algoritmo de estimação da trajectória que se apresenta mais adiante.

5.3.4.2 Filtro de *Kalman* Estendido Iterativo

Por vezes, em determinadas situações, a aproximação da equação de observação à trajectória de referência, através da linearização da equação de observação, não é realizada de forma satisfatória, dando origem a erros significativos que não são contabilizados de forma plena na equação de propagação de covariância (Bar-Shalom, 1993). Também a presença de ruído intenso no modelo das observações pode produzir desvios na estimação da trajectória do sistema. Nestes casos, a implementação da versão iterativa do filtro de *Kalman* estendido—*IEKF* (Young, 1990; Bar-Shalom, 1993), normalmente, produz melhores resultados.

Uma forma de reduzir os efeitos associados aos erros resultantes da linearização implementada pela versão EKF é linearizar a equação de observação em torno do estado actualizado

em vez de o fazer apenas em torno do estado predito (Bar-Shalom, 1993). Desta forma, o erro de estimação da trajectória do sistema relativamente à trajectória de referência é reduzido de forma significativa.

Assim, a principal diferença entre o EKF e o IEKF reside na forma como é estimado o vector de estado $x(t_{i+1}^+)$, correspondente ao instante t_{i+1}^+ . Enquanto que no primeiro caso esta operação é realizada numa só iteração, no segundo caso esta é realizada ao longo de N iterações; o estado inicial em cada nova iteração é o correspondente ao vector de estado obtido na iteração anterior⁹.

Em seguida descreve-se a formulação do IEKF, a qual é baseada na formulação, de carácter genérico, apresentada por (Bar-Shalom, 1993) – EKF – e por (Maybeck, 1994) – parte iterativa do filtro. De acordo com o exposto anteriormente, os parâmetros a estimar pelo EKF são as variáveis de estado, descritas pelo vector de estado $x(t) = [d(t), v(t), a, r, q(t), w(t), p]^T$. Para o efeito é necessário conhecer o estado inicial do vector de estado e a respectiva matriz de covariância, referentes ao instante t_0 . Assim, considere-se que a estimativa inicial do vector de estado apresenta uma distribuição Gaussiana com média \hat{x}_0 e covariância definida pela matriz P_0 , não havendo correlação com as fontes de ruído $j(t)$ e $g(t)$.

Depois de conhecida a estimativa, actualizada, do vector de estado no instante t_i , $\hat{x}(t_i^+)$, este é propagado para o instante t_{i+1}^- , através da aplicação da equação de propagação de estado, Equação 5.27 – fase de predição.

No caso da matriz de covariância, $P(t_i)$, esta é propagada do instante t_i para o instante t_{i+1} de acordo com a Equação 5.35, sendo que a matriz $F[\hat{x}(t_i^+); t_i; t_{i+1}]$ é avaliada para o vector de estado actualizado¹⁰ $\hat{x}(t_i^+)$, obtido no instante de tempo t_i .

$$P(t_{i+1}^-) = F[\hat{x}(t_i^+); t_i; \tau] \cdot P(t_i^+) \cdot F^T[\hat{x}(t_i^+); t_i; \tau] + Q(t_i) \quad (5.35)$$

Após a realização da medição no instante de tempo t_{i+1} , denominada de $z(t_{i+1})$, procede-se à actualização da estimativa predita do vector de estado. Para o efeito, é necessário estimar o vector das observações preditas para o instante de tempo t_{i+1} , em função do vector de estado actual conhecido. É nesta fase que é introduzida a componente iterativa do filtro, a qual abrange a predição do vector das observações (Equação 5.28), a determinação da matriz de ganho (Equação 5.36) e a actualização do vector de estado (Equação 5.37) (Maybeck, 1994).

⁹ No caso particular de $N = 1$, a versão IEKF é idêntica à versão EKF.

¹⁰ Na primeira iteração do filtro faz-se $\hat{x}(t_0^+) = \hat{x}_0$ e $P(t_0^+) = P_0$.

A matriz de ganho, relativa ao instante de tempo t_{i+1} é dada em função do vector de estado actual e da matriz H , os quais são actualizados a cada iteração realizada¹¹, representada pelo índice k .

$$K_k(t_{i+1}) = P(t_{i+1}^-) \cdot H^T[\tilde{x}_k; t_{i+1}] \cdot \{ H[\tilde{x}_k; t_{i+1}] \cdot P(t_{i+1}^-) \cdot H^T[\tilde{x}_k; t_{i+1}] + R(t_{i+1}) \}^{-1} \quad (5.36)$$

A cada iteração executada, o vector de estado é actualizado de acordo com a Equação 5.37, em que $z(t_{i+1})$ representa o vector das medições relativas ao instante de tempo t_{i+1} e \hat{z}_k representa o vector das observações estimadas, calculado através da Equação 5.28 e tendo em conta o vector de estado actual \tilde{x}_k .

$$\tilde{x}_{k+1} = \hat{x}(t_{i+1}^-) + K_k(t_{i+1}) \cdot \{ z(t_{i+1}) - \hat{z}_k - H[\tilde{x}_k; t_{i+1}] \cdot [\hat{x}(t_{i+1}^-) - \tilde{x}_k] \} \quad (5.37)$$

No caso da primeira iteração ($k = 0$), o último termo da Equação 5.37 anula-se e esta toma a forma característica do EKF.

Concluída a componente iterativa do filtro procede-se à actualização da matriz de covariância $P(t_{i+1}^+)$, relativa ao instante t_{i+1} , de acordo com a Equação 5.38 (Maybeck, 1994), em que I representa a matriz identidade e $\hat{x}(t_{i+1}^+) = \tilde{x}_N$, sendo N o número de iterações realizadas¹².

$$P(t_{i+1}^+) = \{ I - K_N(t_{i+1}) \cdot H[\hat{x}(t_{i+1}^+); t_{i+1}] \} \cdot P(t_{i+1}^-) \cdot \{ I - K_N(t_{i+1}) \cdot H[\hat{x}(t_{i+1}^+); t_{i+1}] \}^T + K_N(t_{i+1}) \cdot R(t_{i+1}) \cdot K_N^T(t_{i+1}) \quad (5.38)$$

5.3.5 Algumas Observações

Depois de concluída a formulação do KF, tecem-se alguns comentários acerca da mesma:

- Na formulação do filtro foi assumido que a terceira derivada do modelo de movimento rectilíneo (aceleração) assim como a terceira derivada do movimento de rotação (precessão) se anulavam. No entanto, se o movimento do objecto for muito suave poder-se-á assumir que a segunda derivada de uma ou de ambas as componentes também se anula (velocidade constante) (Young, 1988; Broida, 1990; 1991) ou, no caso extremo, considerar que a velocidade do objecto é nula (Yi, 1995). Adicionalmente, pode-se modelar apenas o movimento de translação e desprezar o movimento de rotação, ou vice-versa. De qualquer modo, o modelo que foi descrito, de ordem superior, pode ser usado em qualquer destes casos, uma vez que este generaliza todos os casos mais simples.

¹¹ Na primeira iteração ($k = 0$) $\tilde{x}_k = \hat{x}(t_{i+1}^-)$.

¹² De acordo com os testes efectuados (cf. Capítulo 6) o valor de N deverá situar-se entre 5 e 9.

- A actualização da matriz de covariância pode ser realizada através da Equação 5.39, que é mais simples do que a Equação 5.38. No entanto, apesar da maior complexidade, a Equação 5.38 é válida para qualquer valor de ganho, enquanto que com a versão mais simples um erro, ainda que muito pequeno, na determinação do valor do ganho (ex. arredondamento) é suficiente para que o erro resultante assuma proporções muito grandes.

$$P(t_{i+1}^+) = P(t_{i+1}^-) - K_N(t_{i+1}) \cdot H[\tilde{x}_N; t_{i+1}] \cdot P(t_{i+1}^-) \quad (5.39)$$

- A solução implementada para a linearização do modelo de propagação de estado, e que foi descrita, segue o método preconizado por Bar-Shalom (1993). Todavia, atendendo ao elevado número de variáveis do vector de estado e principalmente à complexidade das expressões associadas ao modelo do movimento de rotação, verifica-se que a expressão geral de $F[\hat{x}(t_i^+); t_i; t_{i+1}]$ apresenta um número elevado de termos que dificultam a realização do cálculo em tempo útil. Talvez devido a este facto, e atendendo ao menor poder de cálculo dos computadores da época, Young (1988; 1990) tenha optado por implementar o método proposto por Maybeck (1994), que é mais simples. Neste caso, em vez de linearizar o modelo de propagação de estado, é a própria equação de estado (Equação 5.26) que é linearizada, sendo a expressão de propagação da matriz de covariância integrada, numericamente, no tempo. Este método, embora mais simples de executar é menos exacto, tendo sido, por este facto, preterido em favor do primeiro.

- No denominado modelo do espaço assumiu-se que a posição do centro de rotação da estrutura se situava num ponto que não necessariamente a posição do centro geométrico do objecto, uma vez que esta condição parece reflectir de forma mais adequada o comportamento das estruturas. Todavia, o modelo apresentado continua a ser válido para o caso em que a posição do centro de rotação coincide com a posição do centroide do objecto, isto é, em que o vector r é o vector nulo.

- As coordenadas da posição do centro de rotação são inferidas a partir do vector de estado e das observações realizadas. No entanto, para que tal seja possível é necessário que a direcção do eixo de rotação do objecto varie ao longo do tempo; caso contrário, qualquer ponto sobre o eixo de rotação pode ser escolhido para centro de rotação (Young; 1988). Neste último caso, o estimador fica com um grau de liberdade extra, de modo que não é possível determinar, em simultâneo, o vector r e o vector d . No entanto, atendendo a que os dois sistemas de coordenadas O_R e O_B partilham a mesma orientação, relativamente a O_I , traduzida pela matriz $R(t)$, a Equação 5.12 mantêm-se válida, uma vez que o vector r é compensado pelo vector d , e vice-versa, qualquer que seja o ponto do eixo de rotação seleccionado para centro de rotação. No caso particular do tabuleiro de uma ponte verifica-se que a principal componente de rotação acontece segundo o

eixo longitudinal, não se prevendo rotação segundo o eixo vertical, pelo menos ao nível da secção do tabuleiro em observação. Há ainda a acrescentar que, quer a amplitude, quer a frequência do movimento de rotação são relativamente baixos. Como se verá adiante (cf. Capítulo 6), o IEKF permite estimar o movimento de translação e de rotação do tabuleiro com valores de desvio que satisfazem o objectivo de exactidão pretendido.

5.4 Conclusões

O presente capítulo foi dedicado à formulação de um filtro de *Kalman* para estimação do movimento cinemático (translação e rotação) de uma estrutura, nomeadamente do tabuleiro de uma ponte suspensa. Este tema surge, naturalmente, na sequência da calibração do sistema de visão, apresentado no Capítulo 4, tendo por objectivo final a realização da monitorização permanente da trajectória de uma estrutura de grandes dimensões, observada a longa distância. Procurou-se que a realização do filtro não obrigasse a condições adicionais para além das necessárias à execução da calibração do próprio sistema de medição. Deste modo, com a solução encontrada, tornou-se possível realizar as duas tarefas de forma sequencial, podendo ser executadas em qualquer momento e de forma autónoma. Todavia, se necessário, é possível abdicar de parte dos pontos de controlo usados na fase de calibração, uma vez que neste caso o número mínimo de pontos de controlo é de apenas três, embora à custa de um ligeiro aumento do erro de trajectória do objecto (cf. Capítulo 6).

Atendendo a que os modelos de propagação de estado e de observação são não lineares foi necessário recorrer à versão iterativa estendida do filtro de *Kalman* (IEKF), de modo a reduzir o erro de aproximação à trajectória de referência. Com a implementação deste filtro é possível obter uma estimativa das coordenadas de projecção dos pontos de controlo nas várias imagens (predição) assim como uma estimativa filtrada do movimento da estrutura. Esta solução permite diminuir a quantidade de informação a transferir da câmara para o computador, assim como o tempo de processamento de cada uma das imagens, e atenua o efeito de perturbações (ruído) que possam afectar as coordenadas dos pontos nas imagens. Para além disso, o filtro implementado permite ainda estimar a posição do centro de rotação da estrutura (por via indirecta – vector de estado).

Como se verá no Capítulo 6, a implementação do IEKF apresentado contribui de forma significativa para a melhoria das estimativas produzidas pelo sistema de medição.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 Introdução

Tendo por objectivo a avaliação da eficiência e da robustez dos procedimentos de calibração dos subsistemas de visão e de seguimento de trajectória do tabuleiro, apresentadas nos Capítulos 4 e 5, foram realizados testes, por meio de simulação numérica e por meio de simulação física, cuja descrição e respectivos resultados se apresentam ao longo do presente capítulo.

No âmbito dos testes de simulação numérica foram reproduzidos vários cenários, em termos de configuração de câmaras, do número de câmaras e de alvos empregues e do nível de ruído, entre outros, de forma a obter-se um conjunto de dados que permitissem avaliar a eficiência do sistema de medição em função do respectivo cenário recriado.

A validação pela via experimental, sob condições reais de utilização, mais concretamente na Ponte 25 de Abril (P25A), não foi executada em virtude de não ter sido possível reunir as condições necessárias para a sua concretização, nomeadamente a existência de pelo menos um transdutor de deslocamento, calibrado e com maior exactidão do que a que se pretende satisfazer com o sistema de visão, de forma a permitir a comparação de resultados entre os dois sistemas de medição. Na realidade, tanto quanto se sabe, não existe nenhum transdutor que satisfaça os requisitos pretendidos. De facto, a solução para este problema poderia, eventualmente, passar pela utilização de um sistema de medição do tipo *GPS* diferencial (RTK-GPS) mas, como mencionado no Capítulo 2, este sistema de medição implica a existência de uma estação terrestre, é dispendioso e, principalmente, não é adequado para a monitorização de estruturas metálicas e o grau de exactidão é idêntico ao valor que se pretende atingir com o sistema de visão¹.

Por este motivo, a validação, pela via experimental, foi realizada por meio de dois ensaios executados em ambiente laboratorial, um no exterior (exposição às condições atmosféricas típicas de um dia de Verão muito quente) e o outro no interior de um edifício, tendo sido usados para o efeito duas câmaras e um conjunto de 16 alvos. Os ensaios foram realizados com base

¹ Na verdade, o grau de exactidão característico do sistema de medição por RTK-GPS é menor que o valor que se pretende alcançar. No caso do sistema de RTK-GPS a exactidão típica é ± 10 mm no plano horizontal e ± 20 mm no plano vertical.

num modelo físico reduzido, à escala aproximada de 1:7 (tendo como referência a P25A), usado para fixar os alvos e impor o movimento de translação.

Os resultados obtidos, como se verá ao longo do presente capítulo, mostram que os métodos desenvolvidos para a calibração e para o seguimento são eficientes e robustos, superando bem a presença de ruído, indo de encontro aos objectivos traçados no início do estudo, nomeadamente em termos do valor de exactidão das medições. Ao longo do presente capítulo serão apresentados os resultados considerados mais representativos do estudo realizado.

6.2 Simulação Numérica

Com o conjunto de testes realizados pretendeu-se, fundamentalmente, avaliar a exequibilidade, a eficiência e a robustez dos métodos de calibração e de seguimento apresentados nos Capítulos 4 e 5. Em particular, pretendeu-se avaliar: i) de que forma o número de alvos e de câmaras e o posicionamento destas contribui para a eficiência do sistema de visão; ii) qual a robustez do sistema de medição à presença de ruído (perturbações); e iii) qual o número mínimo de câmaras e de alvos necessários para garantir o grau de exactidão pretendido.

A avaliação foi efectuada através da comparação dos resultados obtidos com os valores usados na criação dos cenários de teste, ao nível da estimativa dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos dos diversos subsistemas de visão – fase de calibração – e dos desvios de deslocamento e de rotação na estimação da trajectória de movimento do objecto realizada com o estimador de movimento baseado no IEKF – fase de seguimento.

O estudo realizado por meio de simulação numérica foi executado em ambiente de programação *Matlab*.

6.2.1 Configurações

Para a recriação dos cenários de configuração foi usado, como modelo de referência, a P25A².

Nas Figuras 6.1 e 6.2 encontra-se esquematizada a posição de várias câmaras, a partir das quais são formadas as configurações de câmaras para avaliação, assim como a orientação do sistema de coordenadas de referência, estabelecido no espaço do tabuleiro e denominado de O_I , e de cada uma das respectivas câmaras. Neste aspecto, pretendeu-se saber se existem configurações de câmaras que devam ser evitadas, devido a comportamento instável ou a resultados incompatíveis face ao objectivo pretendido.

² Na realidade, em alguns dos parâmetros os valores empregues são aproximados dos valores reais (Figura 1.1).

A disposição de algumas das câmaras foi condicionada, em primeiro lugar, pela disponibilidade de espaços adequados à instalação do equipamento e, em segundo lugar, pelas dimensões destes espaços. Na prática, este aspecto constitui uma das limitações deste tipo de sistema de medição (cf. Capítulo 2), na medida em que a instalação do equipamento de medição fica condicionada à existência de espaços, considerados fixos, com linha de vista para a zona dos alvos. Neste contexto, as bases dos pilares das torres, habitualmente são os espaços seleccionados por serem os mais adequados para este fim.

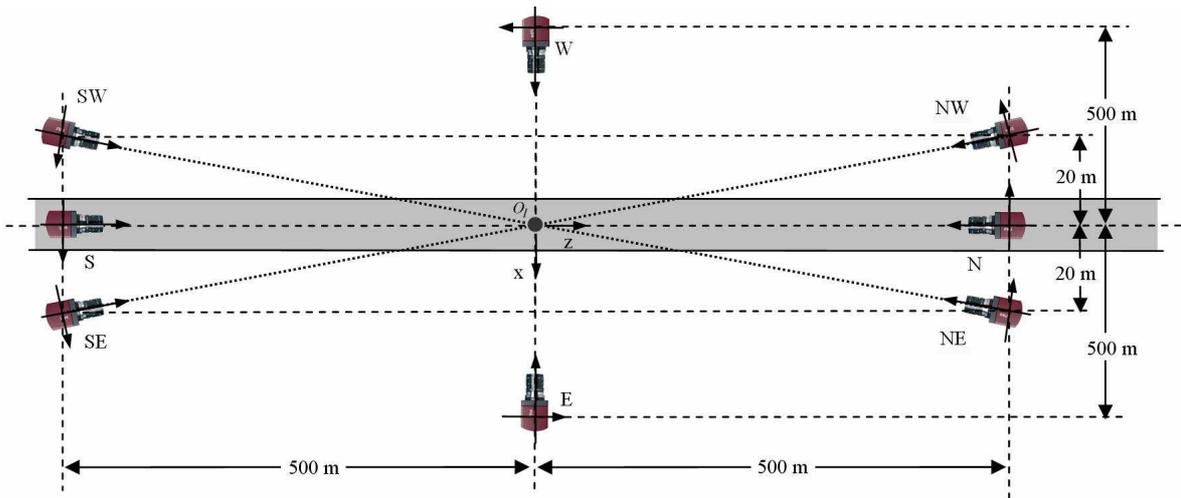


Figura 6.1 – Esquema representando a posição das várias câmaras, no sistema de coordenadas de referência O_i , e respectiva orientação do sistema de coordenadas (vista em planta).

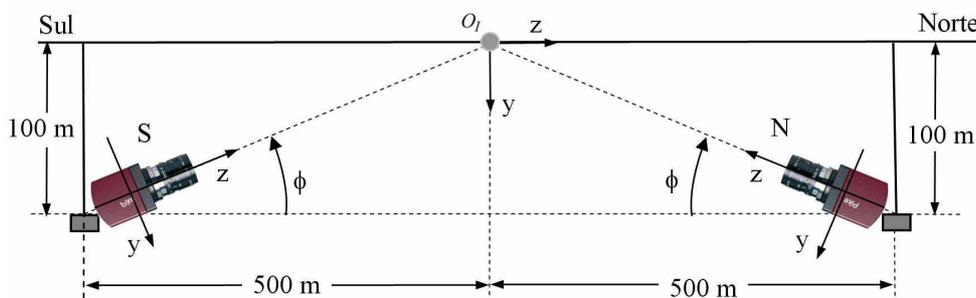


Figura 6.2 – Esquema representando a orientação das câmaras posicionadas nas bases dos pilares (vista em corte).

As câmaras denominadas de S, SE e SW encontram-se posicionadas na base do pilar da torre do lado Sul, enquanto que as denominadas de N, NE e NW encontram-se posicionadas na base do pilar da torre do lado Norte. A utilização das câmaras denominadas de E e W tem como finalidade o estudo comparativo entre configurações possíveis de realizar e outras meramente hipotéticas, pensando no caso específico da P25A. Isto é, pretendeu-se avaliar de que forma os constrangimentos impostos pela estrutura da ponte e a sua envolvência poderiam limitar e/ou condicionar a eficiência do sistema de medição. Todavia, na prática existirá, certamente, outro tipo de aplicações em que seja possível posicionar as câmaras sem constrangimentos.

De entre as possíveis configurações de câmaras, foram estudadas seis, diferindo entre si no número e na posição relativa destas; mais concretamente, foram estudadas as configurações descritas na Tabela 6.1, formadas por duas, por três e por quatro câmaras. Em termos de número de câmaras, este foi circunscrito entre duas e quatro, porque, duas é o número mínimo necessário para realizar as tarefas de calibração e de seguimento (como se verá) e quatro porque permite dispor as câmaras em torno da zona de observação da estrutura (360°).

O modelo que serviu de referência à geração dos dados de simulação caracteriza-se por: i) o comprimento do meio vão do tabuleiro da ponte mede 500 m; ii) a altura medida desde a base de cada um dos pilares até ao tabuleiro é 100 m; e iii) a largura da base dos pilares é 40 m (Figuras 6.1 e 6.2).

Tabela 6.1 – Identificação das câmaras que constituem cada uma das configurações.

Configuração (Cf)	1	2	3	4	5	6
Câmaras	S-N	SE-SW	SE-SW-N	S-E-N	SE-SW-NE-NW	S-E-N-W

6.2.2 Calibração

Os testes de calibração tiveram como finalidade a avaliação do desempenho e da robustez do procedimento de calibração, em função do número de câmaras e do número de alvos empregues no processo de calibração, do nível de ruído e da disposição das câmaras. A avaliação foi efectuada por comparação dos valores dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos dos vários subsistemas de visão, obtidos no final do processo de calibração, com os valores de referência usados no processo de recriação dos cenários de teste.

Para a realização da calibração dos subsistemas de visão assumiu-se a existência de oito alvos, fixos na zona de observação do tabuleiro da ponte, identificados e distribuídos de acordo com a disposição indicada na Figura 6.3, todos eles em linha de vista por todas as câmaras.

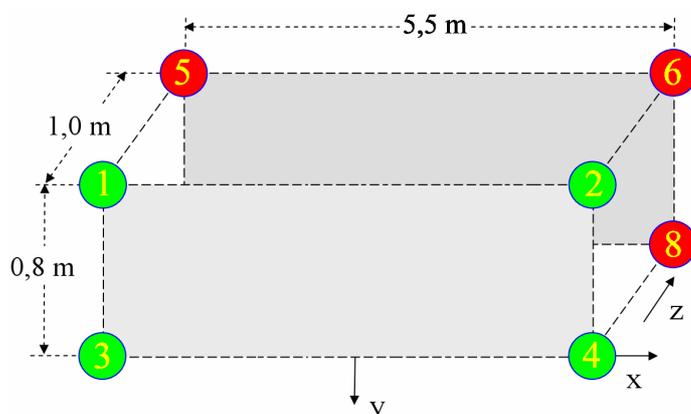


Figura 6.3 – Disposição relativa dos alvos, usados no processo de calibração, formando uma malha com a forma geométrica de um paralelepípedo.

A distribuição dos alvos foi realizada tendo em consideração a geometria da estrutura do tabuleiro da P25A (distância entre as vigas e travessas principais) e de forma a evitar a sobreposição da projecção dos vários alvos nas imagens das câmaras. Por outro lado, procurou reduzir-se o número de alvos a um valor aceitável e exequível, sem prejudicar o processo de calibração³. Basicamente, os alvos foram distribuídos de modo a formarem os contornos de um paralelepípedo (objecto), com os lados paralelos aos eixos do sistema de coordenadas de referência e o centroide posicionado na origem do sistema de coordenadas. A condição de paralelismo é necessária para alinhar o sistema de coordenadas de referência, criado durante o processo de calibração, com o sistema de coordenadas agora estabelecido para a geração dos dados de simulação – determinação da matriz B (cf. Capítulo 4) – de forma a possibilitar a comparação dos resultados obtidos no final do processo de calibração com os dados de referência. Quanto à posição do centroide do objecto a escolha foi meramente por razões de conveniência.

A geração dos dados de simulação, assim como a implementação da metodologia de calibração, foi realizada em ambiente *Matlab* (Figura 6.4), para cada uma das configurações de câmaras apresentadas⁴. Para o efeito foi assumido que o tabuleiro, juntamente com o objecto, descrevia uma trajectória em deslocamento e em rotação enquanto decorria a aquisição das imagens (ver adiante). Para além disso, foi ainda simulado o efeito de eventuais perturbações sobre as observações, através da adição de ruído às mesmas (isto é, às coordenadas dos pontos nas imagens), tendo-se considerado que este obedecia a uma distribuição normal com média nula e desvio padrão (DP) variável, de acordo com o teste em estudo⁵.

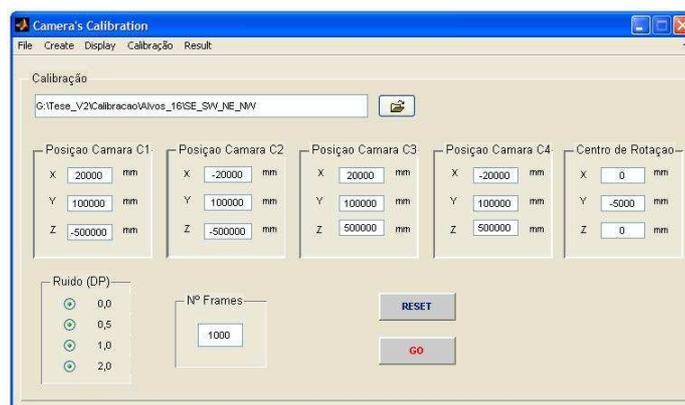


Figura 6.4 – Interface disponibilizada pela aplicação, desenvolvida em ambiente *Matlab*, para uma configuração composta por 4 câmaras.

³ Esta é a configuração de alvos usada na generalidade dos testes. No entanto, como se verá, serão também apresentados resultados obtidos com quatro alvos.

⁴ A geração dos dados respeitantes às coordenadas de projecção dos alvos nas imagens de cada uma das câmaras (dados de simulação usados para a avaliação das metodologias) foi realizada aplicando o modelo da câmara de perspectiva central por ser mais exacto (mais representativo da realidade) do que o modelo da câmara afim.

⁵ Por razões de simplicidade de escrita, a referência a “ m píxeis de ruído” significa uma distribuição *Gaussiana* com média nula e desvio padrão de m píxeis.

Dependendo do teste realizado, foi assumido que se conhecia uma ou mais distâncias entre os alvos, desconhecendo-se, contudo, o movimento do tabuleiro ocorrido durante o tempo de aquisição das imagens. Assim, no caso geral de duas ou mais câmaras, será assumido conhecer um mínimo de seis distâncias entre alvos – reconstrução Euclidiana baseada na relação de comprimentos; no caso específico de configurações com três ou quatro câmaras serão apresentados resultados adicionais em que é assumido conhecer apenas uma distância entre dois alvos (para a determinação do factor de escala global) – reconstrução Euclidiana baseada na ortogonalidade da matriz de rotação.

6.2.2.1 Avaliação dos Parâmetros Intrínsecos e Extrínsecos

6.2.2.1.1 Configurações

O primeiro teste incidiu sobre a avaliação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos, obtidos com as seis configurações e para diferentes níveis de ruído. Para o efeito, no presente teste consideraram-se subsistemas de visão com parâmetros intrínsecos idênticos, como consta na Tabela 6.2, e com os parâmetros extrínsecos indicados na Tabela 6.3, correspondente à posição ocupada pela respectiva câmara. Os parâmetros intrínsecos apresentados na Tabela 6.2 correspondem a ter uma óptica com a distância focal de 600 mm e uma câmara de vídeo com a resolução de 1920 x 1080 píxeis, sendo que os píxeis apresentam secção quadrada ($\gamma_a = 1$) e 7,4 μm de lado. Para além disso, considerou-se ainda que o parâmetro de ortogonalidade (s_a) do sensor da câmara de vídeo era zero e que o sistema óptico não apresentava qualquer tipo de distorção.

Tabela 6.2 – Parâmetros intrínsecos dos subsistemas de visão.

f (mm)	f (píxeis)	u_0 (píxeis)	v_0 (píxeis)
600	81081,1	959,5	539,5

Tabela 6.3 – Parâmetros extrínsecos dos subsistemas de visão (Figuras 6.1 e 6.2).

Subsistema de visão	X_C (m)	Y_C (m)	Z_C (m)	ϕ (°)	θ (°)	ψ (°)
S	0	100	-500	11,31	0,00	0,00
SE	20	100	-500	11,10	-2,29	0,00
SW	-20	100	-500	11,10	2,29	0,00
N	0	100	500	11,31	0,00	0,00
NE	20	100	500	11,10	-177,71	0,00
NW	-20	100	500	11,10	-182,29	0,00
E	500	100	0	11,31	-90,00	0,00
W	-500	100	0	11,31	90,00	0,00

As coordenadas de posição de cada uma das câmaras (X_C , Y_C e Z_C), que constam na Tabela 6.3, estão referenciadas no sistema de coordenadas do tabuleiro (O_I). Os ângulos de rotação ϕ e θ representam a rotação da câmara em torno dos eixos xx (transversal) e yy (vertical), respectivamente, de modo a alinhar o eixo óptico desta com a origem do sistema de coordenadas de referência⁶, enquanto que o ângulo ψ representa a rotação da câmara em torno do seu eixo óptico.

Considerando o posicionamento dos alvos, na parte inferior da viga de rigidez do tabuleiro, é natural que o centro de rotação deste não coincida com a posição do centroide do conjunto de alvos e que o mesmo se situe algures no interior na viga de rigidez. Deste modo, dado que a viga de rigidez possui cerca de 10,6 m de altura considerou-se que o centro de rotação do tabuleiro se encontrava posicionado nas coordenadas indicadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Coordenadas do centro de rotação do tabuleiro.

X_R (m)	Y_R (m)	Z_R (m)
0,0	- 5,0	0,0

O processo de calibração foi executado através da aplicação sequencial dos métodos descritos no Capítulo 4: i) estabelecimento do sistema de coordenadas no espaço do objecto e em cada uma das câmaras; ii) reconstrução afim; iii) reconstrução Euclidiana; iv) reconstrução métrica; e v) fixação da orientação do sistema de coordenadas de referência.

Em cada uma das realizações de calibração foi assumido a aquisição de 250 imagens por cada uma das câmaras, de forma sincronizada, enquanto o tabuleiro da ponte descrevia uma trajectória em translação e em rotação (Figura 6.5). Esta, gerada por meio de simulação numérica, é composta, fundamentalmente, por duas componentes: i) movimento de translação de baixa frequência e grande amplitude, similar ao movimento gerado pela circulação de cargas pesadas (ex. comboio); e ii) movimento de vibração, de menor amplitude e maior frequência, similar ao movimento gerado pela acção do vento e pela circulação de cargas ligeiras (ex. carros). Neste caso, considerou-se que o deslocamento⁷ com maior amplitude ocorria na direcção vertical (Y) e o de menor amplitude na direcção longitudinal (Z). Relativamente à rotação do tabuleiro considerou-se que a componente predominante (em termos de amplitude e de frequência) acontecia em torno do eixo de rotação longitudinal – ângulo ψ – devido ao efeito de cargas assimétricas e à

⁶ O alinhamento dos eixos ópticos na direcção da origem do sistema de coordenadas de referência não constitui uma condição obrigatória, uma vez que foram realizados testes com poses geradas aleatoriamente, tendo-se obtido resultados idênticos. Trata-se, tão somente, de uma pose de referência para efeitos de comparação de eficiência entre as diversas configurações de câmaras.

⁷ Por razões de simplicidade, nos casos em que não exista o risco de ambiguidade, usaremos a designação *deslocamento* em vez de movimento de translação.

acção do vento sobre o tabuleiro, e que era praticamente inexistente em torno do eixo vertical – ângulo θ . Relativamente à rotação em torno do eixo transversal – ângulo ϕ – considerou-se que esta era de baixa amplitude e de baixa frequência (Figura 6.5 – dir.).

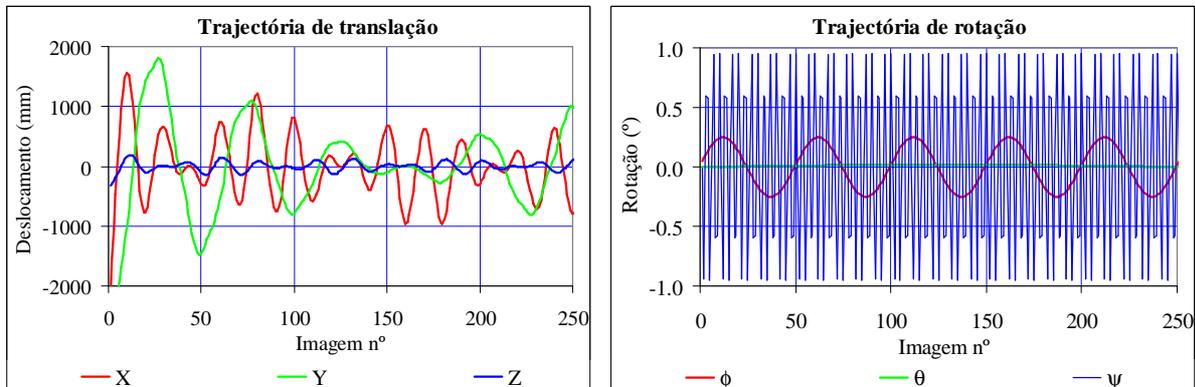


Figura 6.5 – Componentes do movimento de translação e de rotação da trajetória do tabuleiro, criada por meio de simulação numérica, para a realização da calibração dos subsistemas de visão.

As Figuras 6.6 e 6.7 representam a projecção do conjunto de oito alvos no plano da imagem das câmaras *S* e *N*, da configuração 1, e das câmaras *SE* e *NW*, da configuração 5, considerando ausência de ruído. Os gráficos do topo representam a primeira imagem adquirida, enquanto que os da base representam a sobreposição das 250 imagens, adquiridas durante o movimento do tabuleiro da ponte – nuvem de pontos.

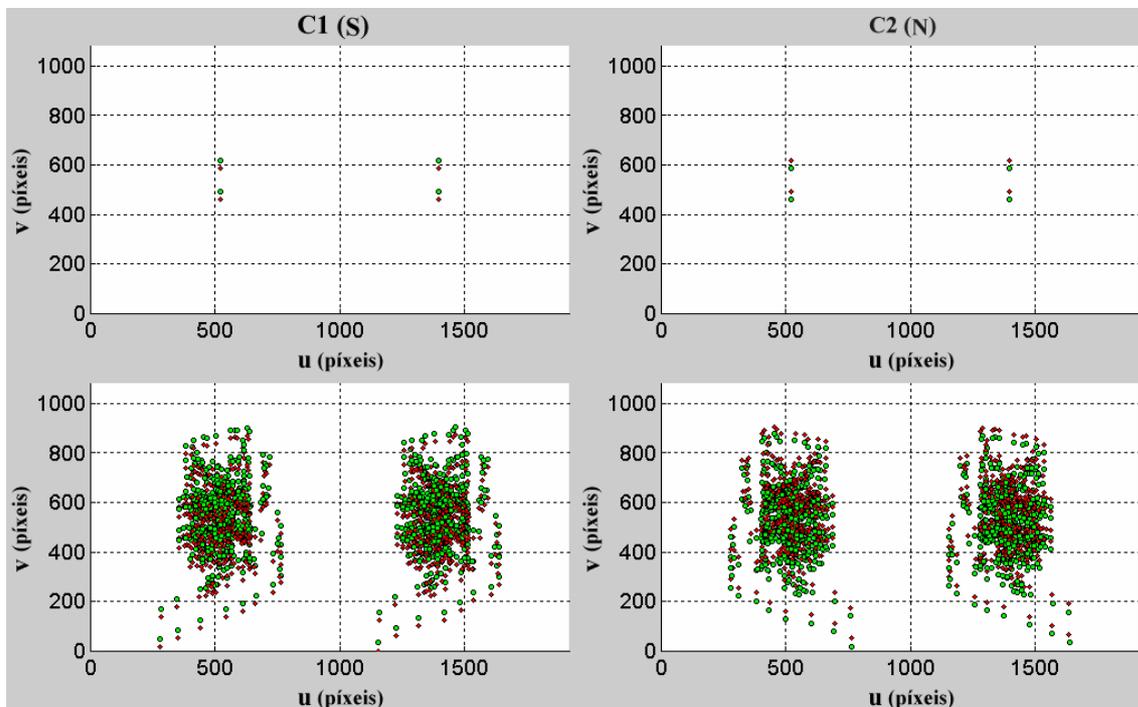


Figura 6.6 – Projecção dos oito alvos no plano da imagem das câmaras *S* e *N* da configuração 1. (Sup.) a primeira imagem adquirida; (Inf.) as 250 imagens sobrepostas⁸.

⁸ As cores verde e vermelho identificam cada um dos dois subconjuntos de 4 alvos (cf. Figura 6.3).

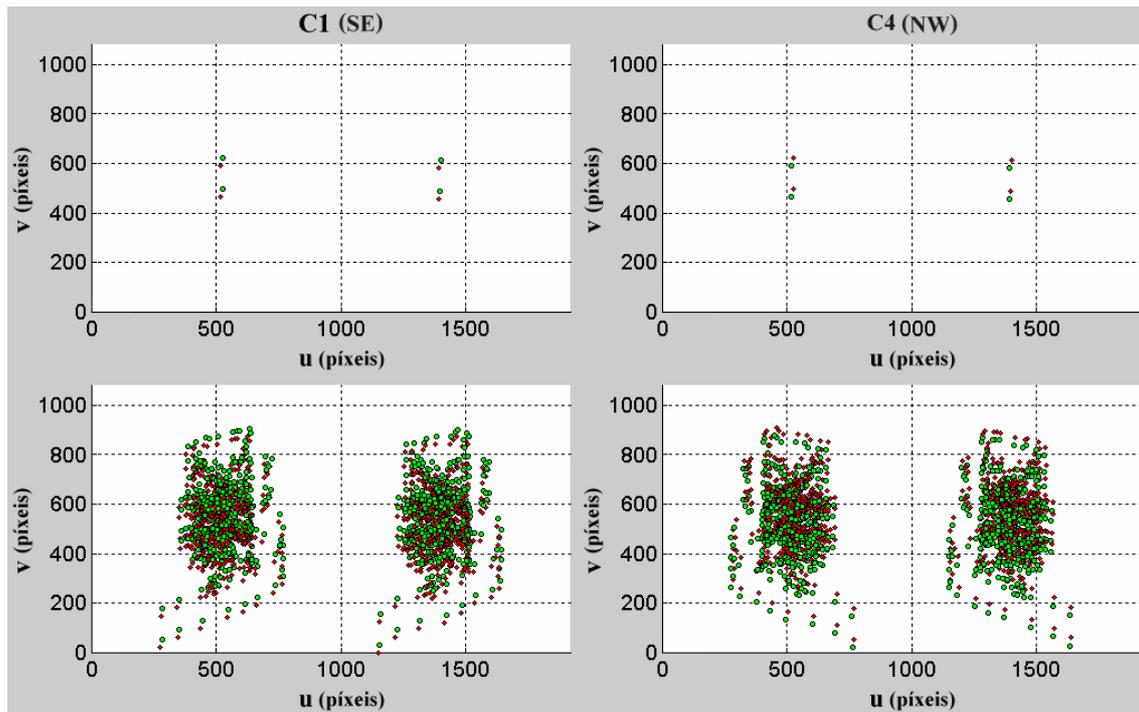


Figura 6.7 – Projecção dos oito alvos no plano da imagem das câmaras SE e NW da configuração 5. (Sup.) a primeira imagem adquirida; (Inf.) as 250 imagens sobrepostas.

Para cada nível de ruído, cada uma das configurações de câmaras foi submetida a cem realizações de calibração (*trial runs*), executados com diferentes estados de ruído. No final de cada realização procedeu-se à determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos, a partir da matriz de projecção de cada um dos subsistemas de visão, segundo o método descrito no Capítulo 4 (Equação 4.54), seguido da determinação do desvio, em valor absoluto, relativamente ao respectivo valor de referência.

6.2.2.1.2 Objecto composto por oito alvos

Os gráficos das Figuras 6.8 e 6.9 representam o valor médio dos desvios obtidos nas cem realizações, para os parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmaras, tendo sido obtidos com oito alvos. A reconstrução Euclidiana do objecto foi realizada com base na aplicação da restrição de relação de comprimento, para a qual foi assumido conhecer a distância entre os vários pares de alvos. A fixação da orientação do sistema de coordenadas O_I foi realizada com base na orientação do objecto reconstruído, correspondente à primeira imagem adquirida.

O valor da distância focal foi determinado com base no pressuposto de que se conhece a distância entre a respectiva câmara e a origem do sistema de coordenadas O_I , assim como a dimensão do píxel do sensor da câmara⁹.

⁹ Estes requisitos são necessários, apenas, para a avaliação da eficiência do procedimento de calibração.

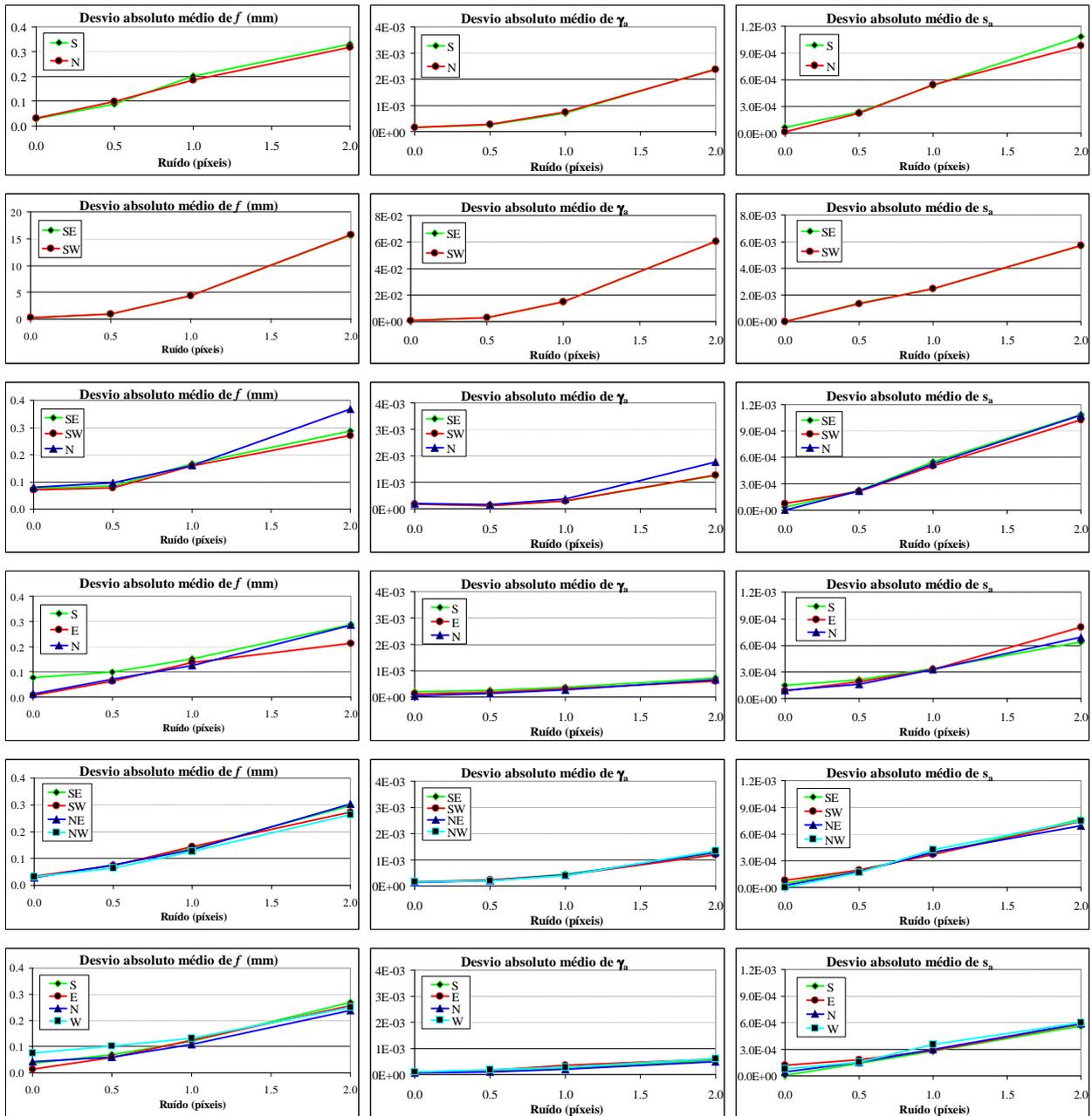


Figura 6.8 – Desvio absoluto médio da estimativa dos parâmetros intrínsecos, obtidos com as seis configurações e oito alvos, em função do nível de ruído.

Da análise dos resultados obtidos deduzem-se as seguintes observações:

- Genericamente, os desvios na estimação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos são muito baixos e, com excepção da configuração 2, diferem muito pouco entre as várias configurações.
- O desvio da estimativa dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos aumenta, ligeiramente, com o nível de ruído, tanto em termos do DAM como em termos do respectivo DP. Todavia, apesar do aumento, natural, em termos absolutos verifica-se que os desvios são muito baixos, o que mostra que o método é robusto à presença de ruído.

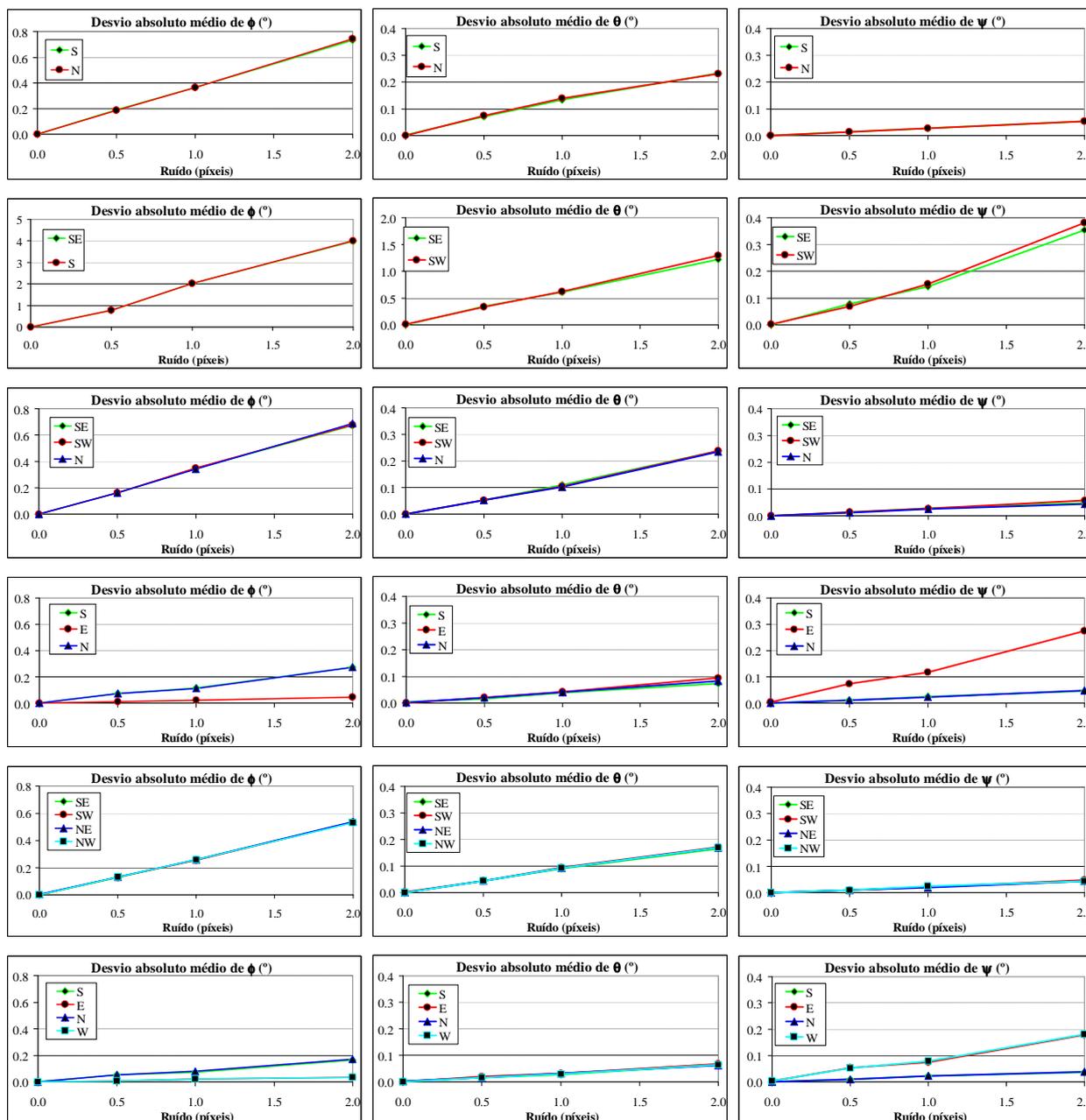


Figura 6.9 – Desvio absoluto médio da estimativa do parâmetros extrínsecos (pose), obtidos com as seis configurações e oito alvos, em função do nível de ruído.

- Os valores de desvio tendem a ser menores com o aumento do número de câmaras, embora a diferença, seja pouco significativa. Nestas condições, e no caso concreto da calibração, o aumento do número de câmaras traduz-se num aumento de redundância.
- As configurações que incorporam câmaras nas posições *E* e ou *W* apresentam valores de desvio ligeiramente menores para a generalidade dos parâmetros, com excepção do ângulo de rotação ψ , em que os valores de desvio tendem a ser maiores nestas câmaras. Refira-se que a rotação ψ ocorre em torno do eixo longitudinal de O_I , que no caso destas câmaras, é aproximadamente paralelo ao plano da imagem, razão pela qual o valor do

desvio tende a aumentar nestes câmaras. Em contrapartida, e pela mesma razão, o desvio do ângulo ϕ é menor nestas câmaras.

- No conjunto das cinco configurações, considerando um nível de ruído de dois píxeis, o DAM obtido para a distância focal foi inferior a 0,4 mm (0,07%) e para os ângulos de rotação das câmaras foi inferior a $0,75^\circ$. Relativamente aos parâmetros de relação de aspecto e de ortogonalidade, os respectivos DAM obtidos são inferiores a $3 \cdot 10^{-3}$.
- Relativamente à configuração 2, comparativamente às restantes configurações, os valores de desvio são muito díspares, nomeadamente na presença de ruído. Adiante apresentam-se resultados adicionais que procuram esclarecer este comportamento.

Nas Figuras 6.10 e 6.11 reproduzem-se os quatro estados da reconstrução do objecto (posição dos alvos, em mm), obtidos com as configurações 2 e 5, respectivamente. Como se observa, no final do processo de calibração, as faces que definem o paralelepípedo encontram-se paralelas entre si e aos respectivos eixos do sistema de coordenadas, tendo sido esta a condição empregue na formulação das restrições que permitiram fixar a orientação final do sistema de coordenadas de referência (O_I).

Na Figura 6.10 é visível, de forma mais pronunciada, a deformação do objecto em termos de relação de tamanho e de ângulos – reconstrução afim. Já no caso da configuração 5 (Figura 6.11), a deformação de ângulo é pouco perceptível, registando-se a deformação de tamanho.

Como mencionado no Capítulo 4, no caso de configurações com três ou mais câmaras, a reconstrução Euclidiana pode ser conseguida, em alternativa ao método da relação de comprimento, através das propriedades de ortogonalidade da matriz de rotação. Neste contexto, para efeitos de comparação da eficiência dos dois tipos de restrição, foram realizados testes em condições similares às descritas anteriormente. Os resultados obtidos são os apresentados nas Figuras 6.12 e 6.13.

Como se constata, as diferenças, embora pouco significativas em termos de valor absoluto, verificam-se, genericamente, ao nível dos parâmetros intrínsecos. No caso presente, o desvio da distância focal apresenta valores superiores; já no caso dos parâmetros de relação de aspecto e de ortogonalidade verifica-se o oposto. Esta evidência vai de encontro ao tipo de restrição aplicada em cada caso. Importa referir que no caso presente, a formulação das restrições para a reconstrução Euclidiana foram baseadas na assunção de que as câmaras eram ortogonais.

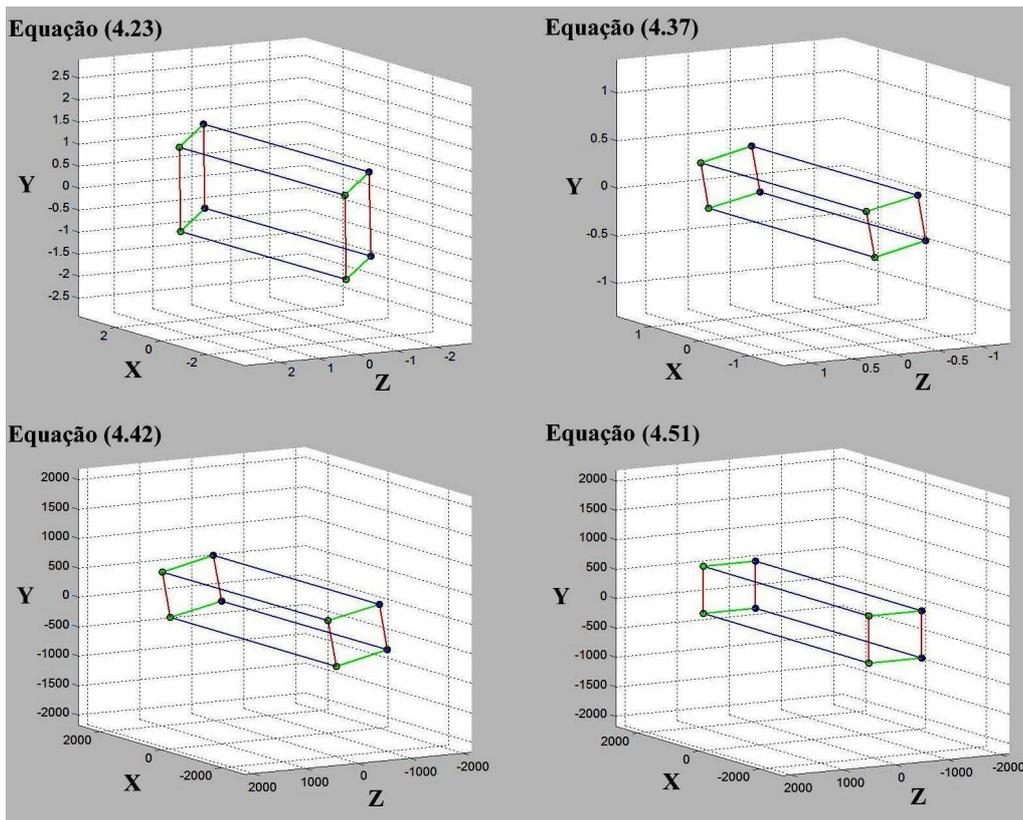


Figura 6.10 – Reconstrução do objecto, após a aplicação das equações indicadas, ao longo do processo de calibração com a configuração 2 (sistema de eixos em mm).

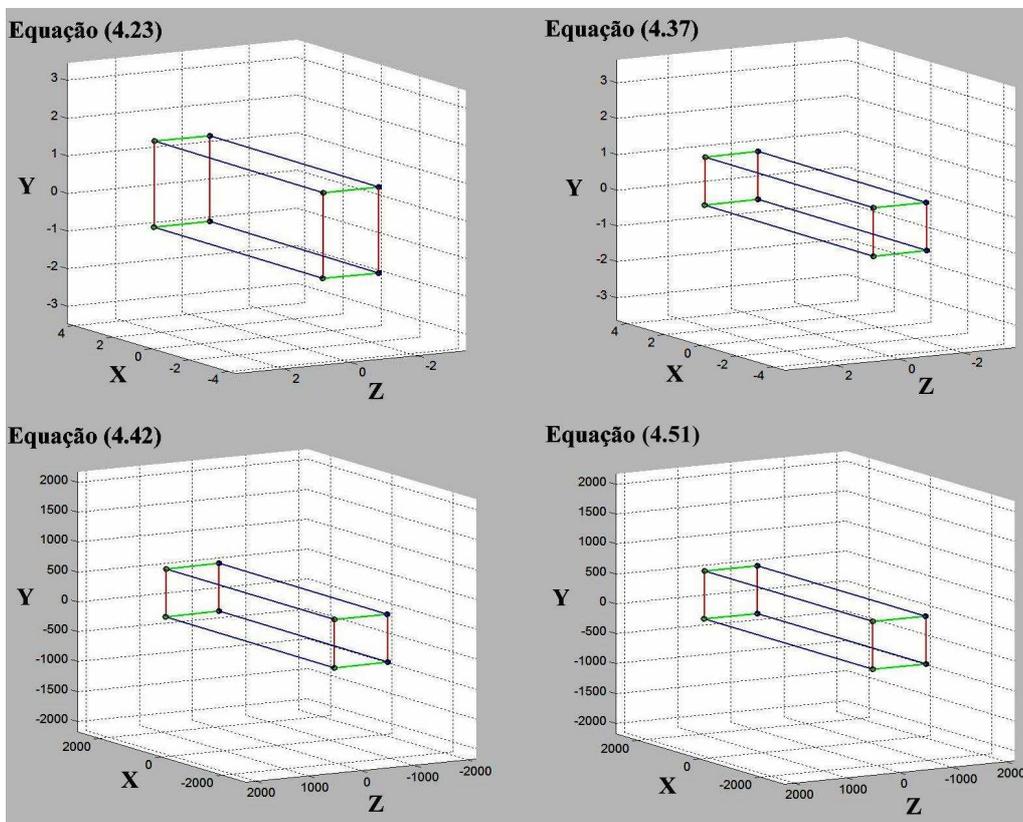


Figura 6.11 – Reconstrução do objecto, após a aplicação das equações indicadas, ao longo do processo de calibração com a configuração 5 (sistema de eixos em mm).

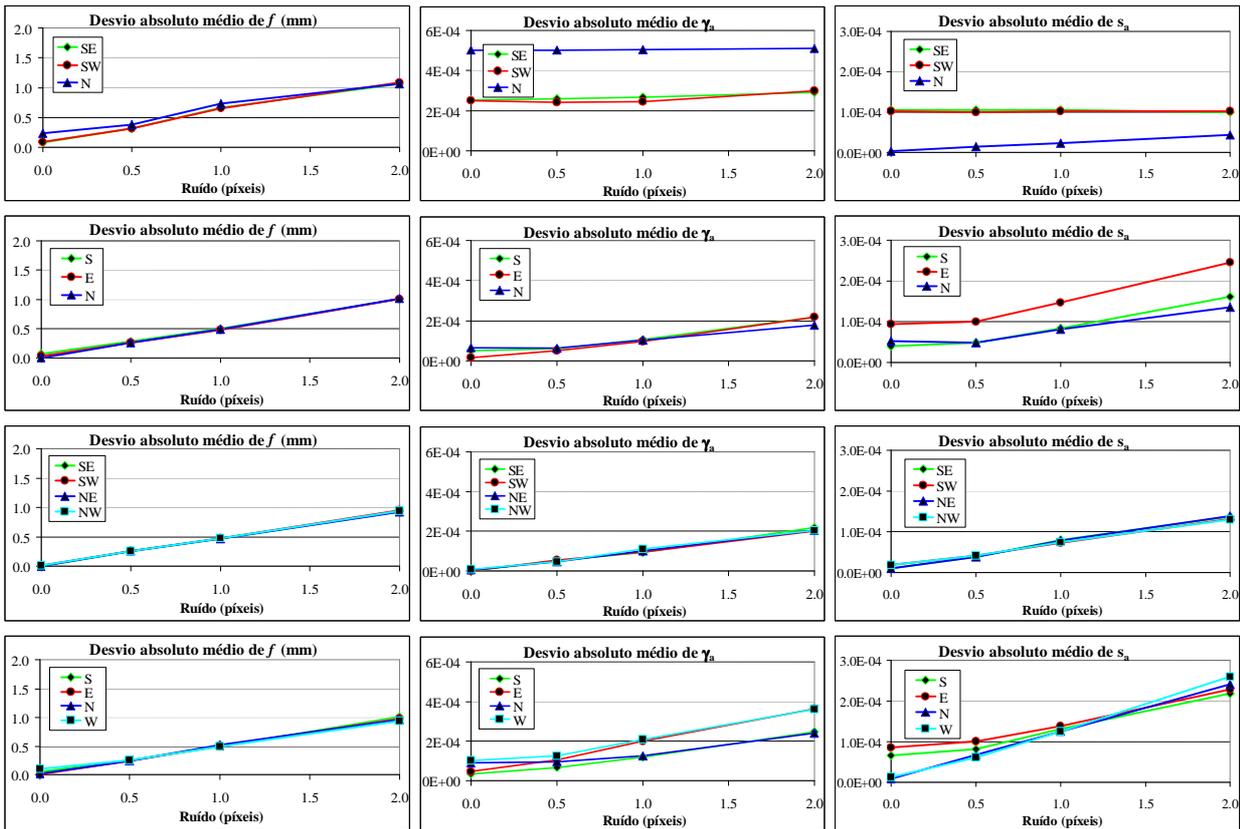


Figura 6.12 – Desvio absoluto médio da estimativa dos parâmetros intrínsecos, obtidos com as quatro configurações e oito alvos, em função do nível de ruído.

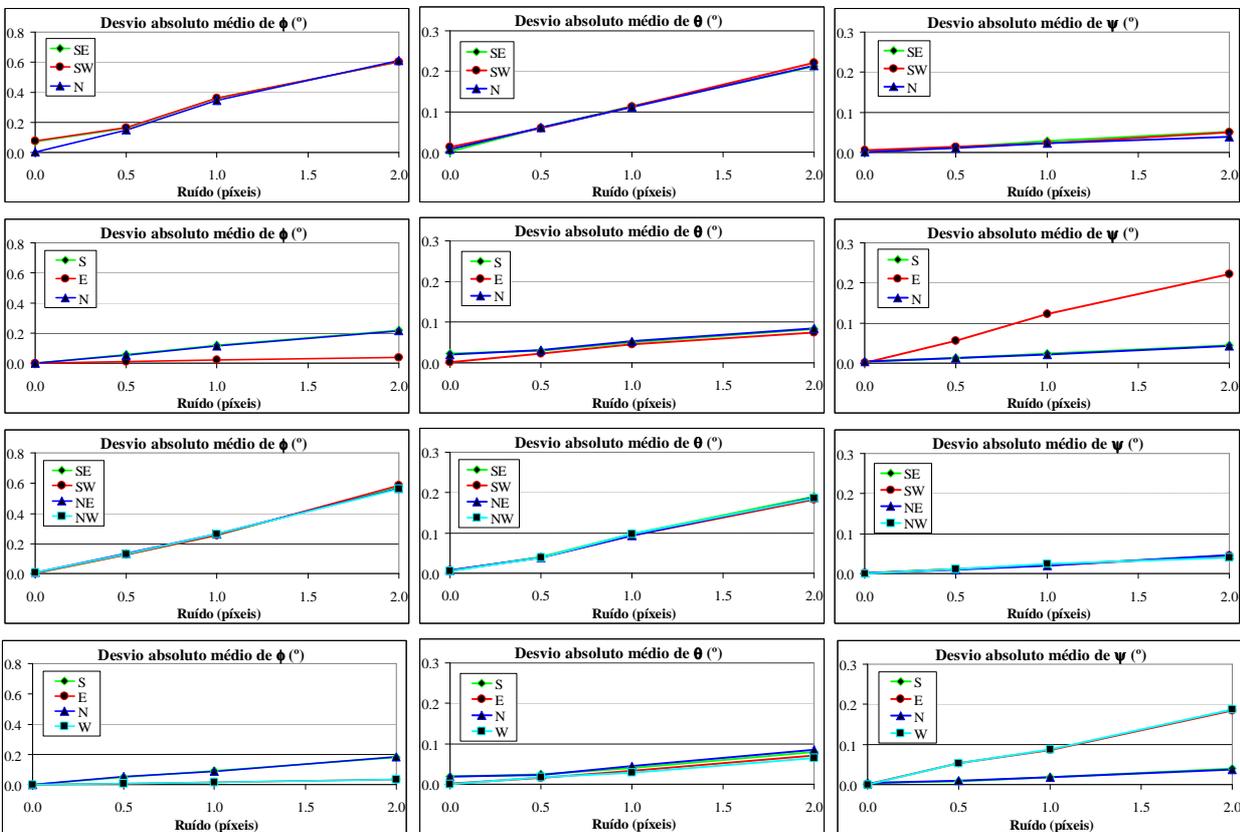


Figura 6.13 – Desvio absoluto médio da estimativa dos parâmetros extrínsecos (pose), obtidos com as quatro configurações e oito alvos, em função do nível de ruído.

Os resultados de calibração obtidos com a configuração 2 (*SE – SW*) diferenciam-se, em muito, das restantes configurações. A explicação para esse comportamento deve-se ao facto das câmaras se encontrarem muito próximas, comparativamente com a distância entre a câmara e o objecto; isto é, a distância entre as duas câmaras (*baseline*) é demasiado curta, fazendo com que o efeito estéreo típico se comporte de forma instável na presença de ruído. Na prática, é como se a projecção do objecto fosse idêntica nas duas câmaras, anulando o efeito estéreo.

Neste sentido, foi realizado um teste com esta configuração, nas condições indicadas anteriormente, de forma a estudar o efeito da distância entre as câmaras. Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 6.14, tendo-se considerado, neste caso, uma perturbação de dois píxeis.

Como se constata, quando se aumenta a distância entre as câmaras o valor do desvio dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos diminui, tomando valores da mesma ordem de grandeza da das restantes configurações para uma distância entre as câmaras da ordem dos 100 m.

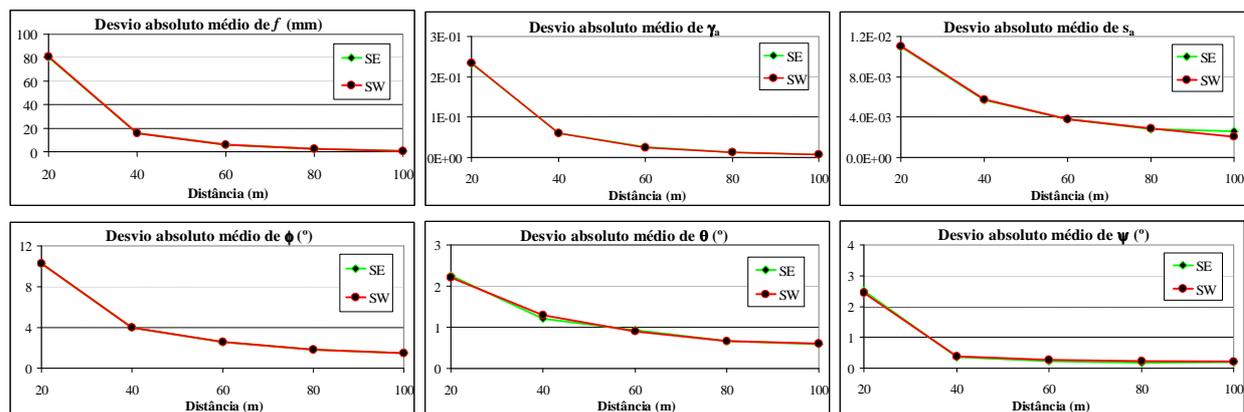


Figura 6.14 – Desvio absoluto médio da estimativa dos parâmetros obtidos com a configuração *SE – SW* e oito alvos, em função da distância entre as câmaras e considerando uma perturbação de dois píxeis.

6.2.2.1.3 Objecto composto por quatro alvos

Com a realização do presente teste pretendia-se avaliar a eficiência e a robustez do método para uma configuração mínima de alvos – quatro. Naturalmente, que na prática será vantajoso poder usar o menor número possível de alvos sem sacrificar em demasia a eficiência do sistema de medição ou, pelo menos, encontrar um compromisso entre eficiência e complexidade.

As condições de realização do segundo teste foram, genericamente, idênticas às dos testes descritos anteriormente, diferindo, apenas, no número de alvos usados durante o processo de calibração. Deste modo, para cada uma das configurações foi efectuada a respectiva calibração, mas agora considerando apenas os alvos 1 – 2 – 3 – 6 (Figura 6.3). Para além disso, foi assumido conhecer as distâncias (seis) entre os alvos. Nas Figuras 6.15 e 6.16 encontram-se representados

os DAM das estimativas dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos obtidos com cinco configurações.

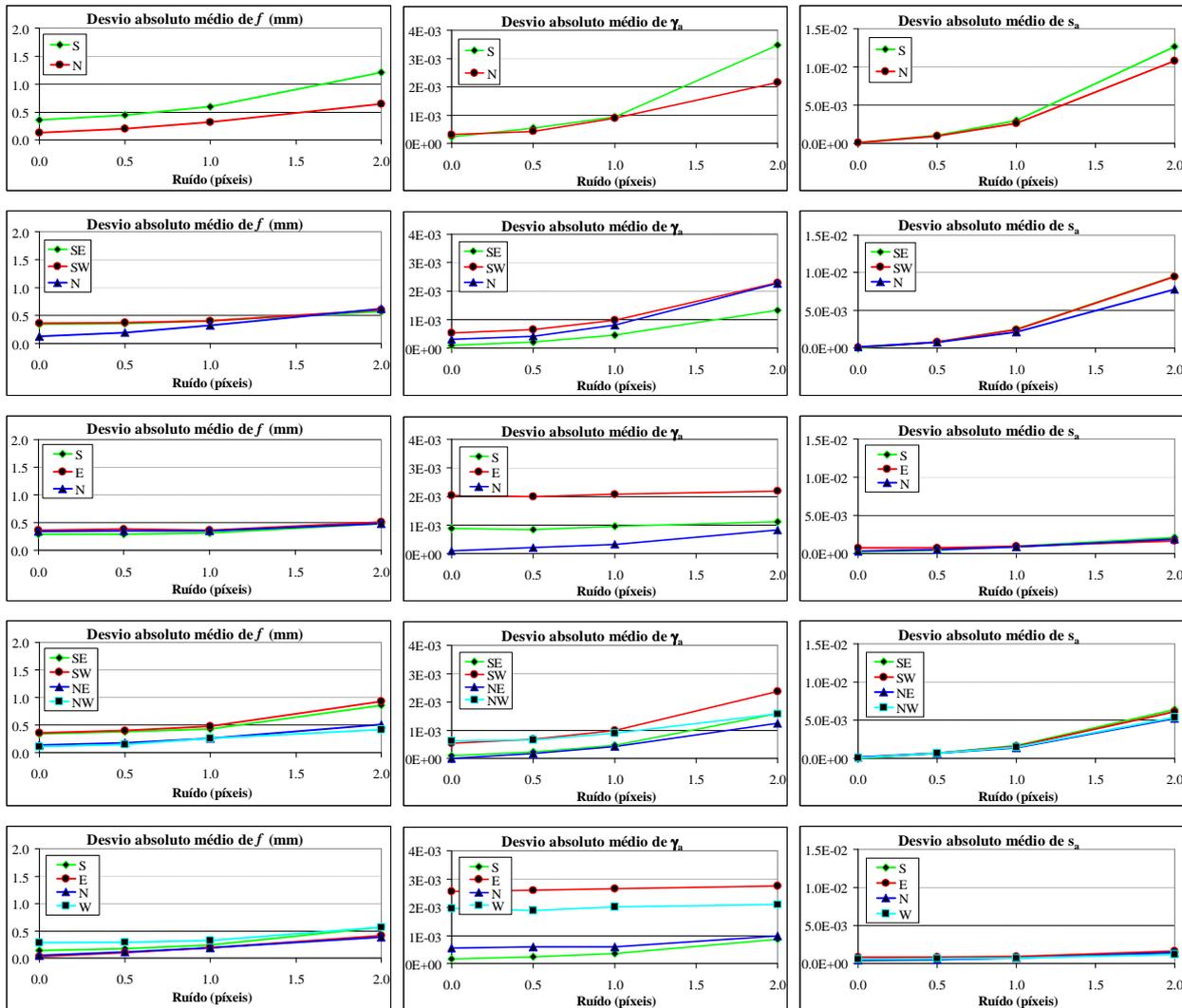


Figura 6.15 – Desvio absoluto médio da estimativa dos parâmetros intrínsecos, obtidos com as cinco configurações e com quatro alvos, em função do nível de ruído.

Comparando os resultados agora obtidos com os correspondentes ao caso de oito alvos, constata-se que o valor dos desvios, de um modo genérico, são superiores. É de realçar o valor do desvio para níveis de baixo ruído, nomeadamente na ausência de ruído, sendo superior ao obtido no caso de oito alvos, em resultado do menor número de restrições utilizadas na determinação da matriz de reconstrução afim. Todavia, os resultados obtidos mostram que é possível realizar a calibração do sistema de visão com elevada eficiência fazendo uso de uma configuração mínima de câmaras e de alvos.

Em forma de conclusão, face aos resultados obtidos para as estimativas dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos nas diferentes configurações, pode-se dizer que existe uma concordância substancial entre os valores de referência e os obtidos através da aplicação do processo de

calibração, confirmando, deste modo, o bom desempenho dos métodos de cálculo aplicados no procedimento de calibração, tanto em termos de eficiência, como de robustez ao efeito de ruído.

Dispondo de apenas duas câmaras é desejável que estas sejam posicionadas de forma a satisfazer uma distância considerável entre elas. No caso específico da observação do tabuleiro de pontes é preferível instalar as câmaras numa configuração do tipo frente-a-frente.

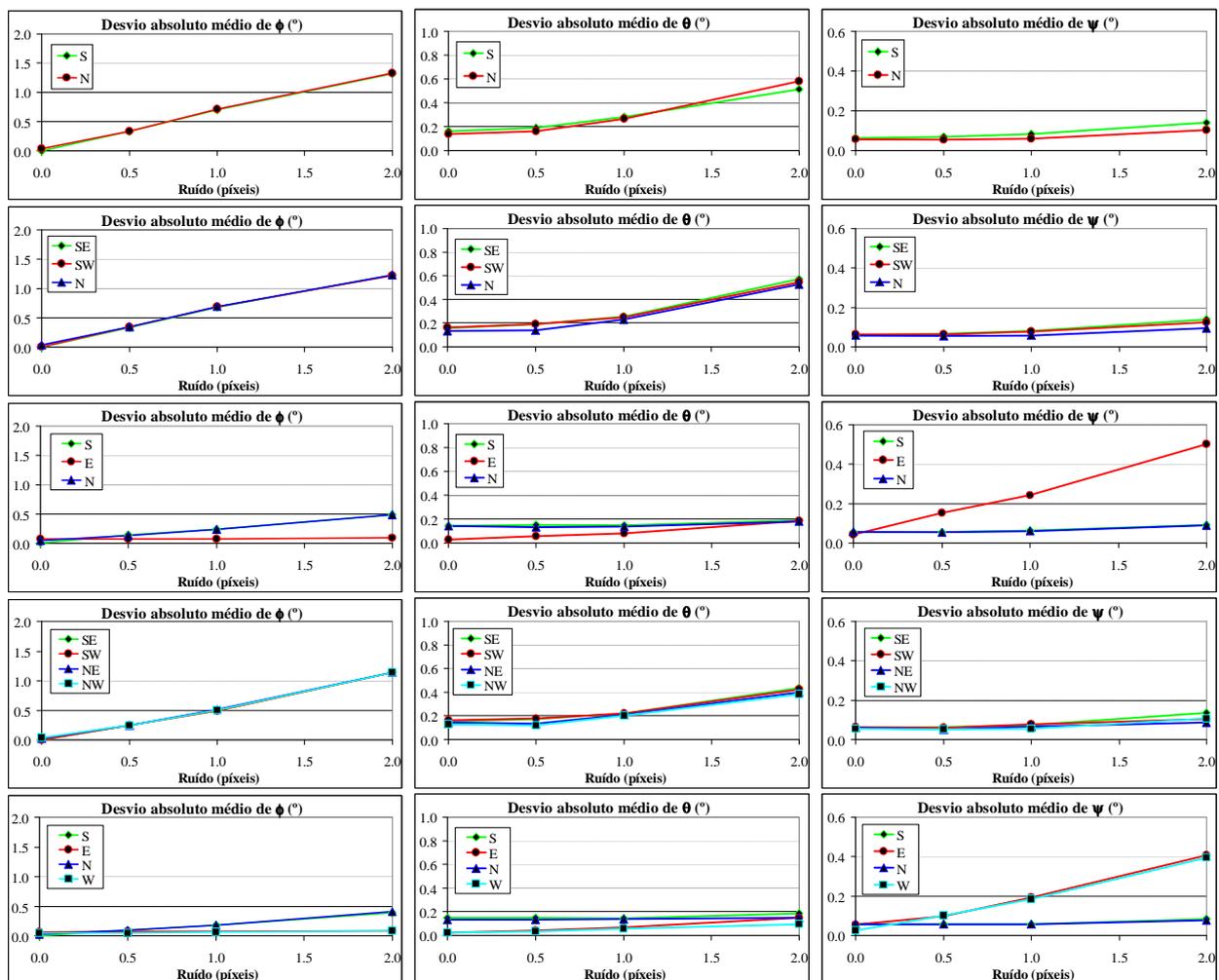


Figura 6.16 – Desvio absoluto médio da estimativa dos parâmetros extrínsecos (pose), obtidos com as cinco configurações e com quatro alvos, em função do nível de ruído.

6.2.3 Seguimento

Concluída a calibração dos subsistemas de visão, a fase seguinte contemplou a realização de testes de seguimento (observação), tendo como objectivo a avaliação do desempenho combinado dos procedimentos de calibração e de seguimento, no âmbito da medição do deslocamento e da rotação do tabuleiro. Para além disso, pretendeu-se ainda avaliar a eficiência de cada uma das configurações em face do número de alvos usados na fase de seguimento e das condições de

ruído (perturbação). Neste contexto, foram realizados testes com as seis configurações, descritas na Tabela 6.1, cujos resultados obtidos se apresentam ao longo da presente secção.

De modo a permitir o estudo comparativo entre as várias configurações, os testes de seguimento foram realizados considerando câmaras com parâmetros intrínsecos idênticos, descritos na Tabela 6.2, e os respectivos parâmetros extrínsecos descritos na Tabela 6.3. As matrizes de projecção utilizadas por cada um dos subsistemas de visão são as obtidas do processo de calibração descrito anteriormente.

A implementação do estimador da trajectória de movimento do tabuleiro foi executada em ambiente *Matlab* (Figuras 6.17 e 6.18), de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 5. À semelhança de outros casos já descritos, foi assumido que se conheciam as coordenadas de projecção dos vários alvos nas imagens e a respectiva correspondência entre as sucessivas imagens, adquiridas por cada uma das câmaras, e entre as várias câmaras.

A aplicação desenvolvida (Figura 6.18) permite visualizar: i) o movimento de uma secção do tabuleiro (com comportamento de corpo rígido), assim como do conjunto de alvos que se encontra fixo à base do mesmo (gráfico *a*); ii) a projecção dos alvos na imagem de cada um dos subsistemas de visão (gráfico *b*); iii) a trajectória do movimento de translação e de rotação imposta ao tabuleiro (gráfico *c*); e iv) parâmetros de saída calculados pelo estimador de movimento, assim como os respectivos desvios relativamente aos valores de referência (gráfico *d*).

6.2.3.1 Parametrização do Estado Inicial do Vector de Estado

De acordo com a formulação do estimador de movimento, apresentada no Capítulo 5, o vector de estado é composto por 22 variáveis de estado, as quais permitem estimar, entre outras grandezas, o movimento de translação e de rotação do tabuleiro, assim como a posição do centro de rotação no sistema de coordenadas de referência. Todavia, para que se possa executar o algoritmo é necessário conhecer o estado inicial do vector de estado (\hat{x}_0) e a respectiva matriz de covariância (P_0), referentes ao instante inicial $t_0 = 0$. No caso presente seguiu-se uma abordagem mais abrangente, tendo-se assumido desconhecer o valor inicial de todas as variáveis envolvidas e partir do princípio que, para a generalidade das variáveis, o correspondente valor era zero¹⁰. Neste contexto, atendendo ao elevado grau de incerteza associado, optou-se por parametrizar a matriz de covariância com valores consideravelmente grandes. O valor inicial e a respectiva covariância adoptados para cada uma das variáveis do vector de estado encontram-se descritos na Tabela 6.5.

¹⁰ Atendendo a que o tabuleiro está em vibração permanente, assumiu-se que a velocidade angular assim como a percepção possuíam valores diferentes de zero, embora muito baixos.

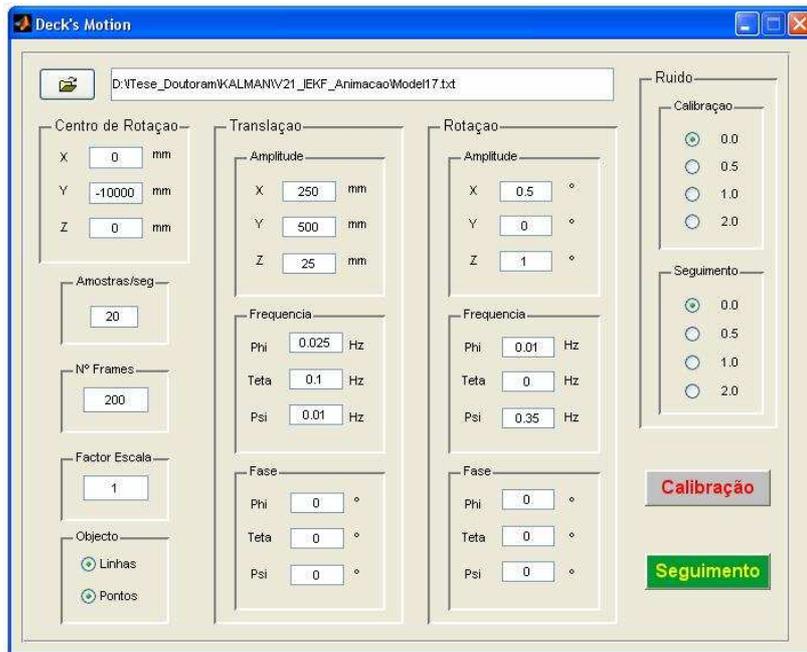


Figura 6.17 – Interface disponibilizada pela aplicação, desenvolvida em ambiente Matlab, para configuração dos parâmetros da trajetória do tabuleiro, entre outros parâmetros.

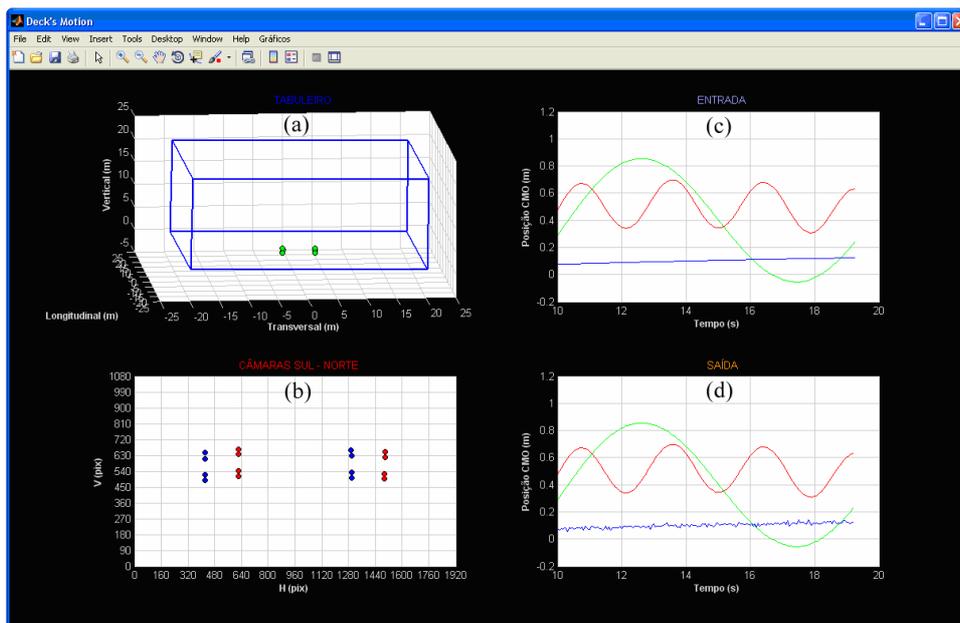


Figura 6.18 – Interface gráfica disponibilizada pela aplicação de estimação do movimento do tabuleiro, com possibilidade de visualização de vários parâmetros característicos.

6.2.3.2 Configuração

O principal objectivo deste teste era avaliar e quantificar a eficiência e a robustez do sistema de medição em função do número de câmaras empregues e/ou da sua localização. Para o efeito considerou-se que os oito alvos usados na fase de calibração eram igualmente usados na fase de seguimento da trajetória do tabuleiro, respeitando-se assim a disposição dos alvos e as distâncias indicadas na Figura 6.3.

Tabela 6.5 – Parametrização do estado inicial do vector de estado.

Variável		Valor Inicial (\hat{x}_0)	Covariância (P_0)
Posição de O_R em O_I (vector d) (mm)	d_x	0	1E4
	d_y	0	5E5
	d_z	0	1E4
Velocidade do movimento (mm/seg)	v_x	0	2E3
	v_y	0	5E6
	v_z	0	2E3
Aceleração do movimento (mm/seg ²)	a_x	0	5E3
	a_y	0	5E9
	a_z	0	5E3
Posição de O_R em O_B (vector r) (mm)	r_x	0	1E4
	r_y	0	5E5
	r_z	0	1E4
Quaternião	q_1	0	1E-6
	q_2	0	1E-6
	q_3	0	1E-6
	q_4	1	1E-6
Velocidade angular (rad/seg)	w_x	1E-3	2E-1
	w_y	1E-3	2E-1
	w_z	1E-3	2E-1
Precessão (rad/seg ²)	p_x	1E-6	1
	p_y	1E-6	1
	p_z	1E-6	1

Assim, numa primeira fase, foi gerada a trajectória do tabuleiro, em deslocamento e em rotação, correspondente a 20 minutos (Figura 6.19)¹¹, a qual serviu de entrada de teste em todos os casos estudados. Tal como descrito anteriormente, procurou-se que a trajectória do tabuleiro incluísse componentes de diferentes gamas de frequência e de amplitude, de modo a simular fenómenos de longa e de curta duração. Relativamente à trajectória de deslocamento considerou-se que a componente vertical era a que apresentava maior amplitude, em virtude da passagem de cargas pesadas sobre o tabuleiro. Quanto à trajectória de rotação, a componente em torno do eixo longitudinal (ψ) é a mais representativa e aquela cuja frequência de rotação é mais elevada (no caso da P25A, de acordo com resultados obtidos de testes efectuados em túnel de vento, o primeiro modo de vibração situa-se, aproximadamente, em 0,335 Hz). No caso presente, considerou-se que as três componentes de rotação apresentavam amplitude similar (5°), embora com frequências distintas.

¹¹ A frequência de aquisição é 20 Hz.

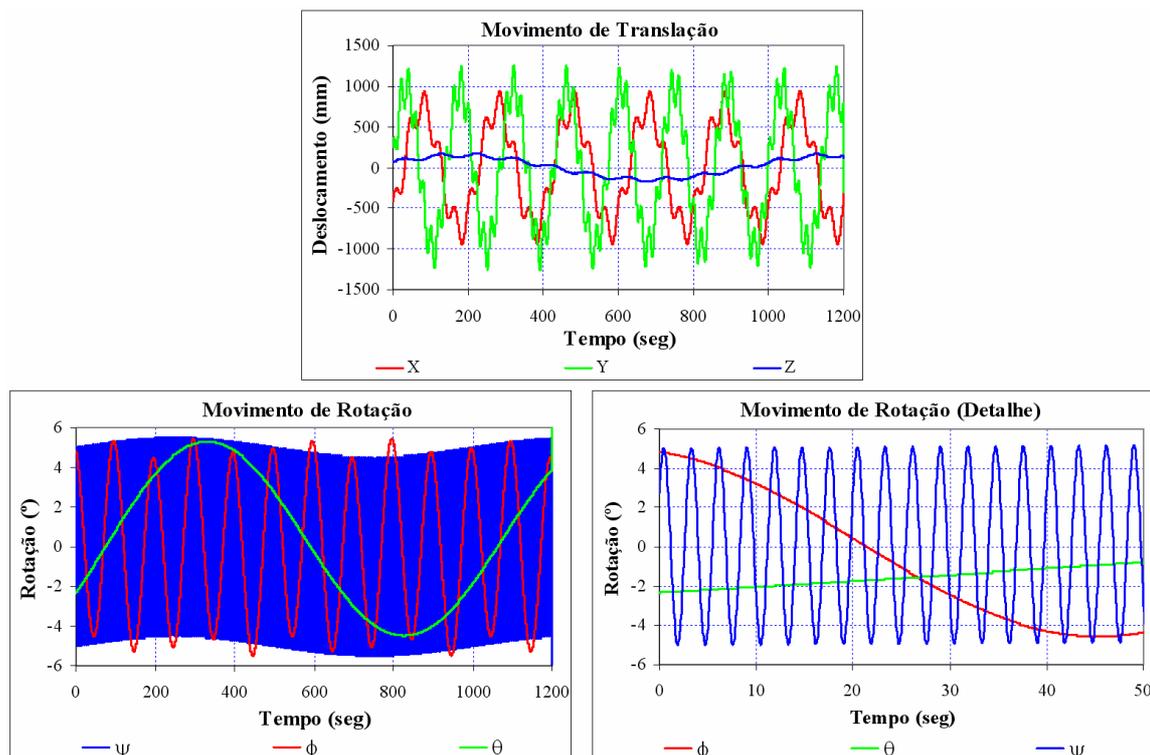


Figura 6.19 – Componentes do movimento de translação e de rotação da trajetória do tabuleiro, gerada por meio de simulação numérica, correspondente a 20 minutos de observação.

As condições empregues na simulação são muito mais exigentes do que as que se verificam no caso real, uma vez que, neste último caso os deslocamentos e as rotações verificadas entre dois instantes sucessivos apresentam menor amplitude, isto é, a curva de movimento é mais suave. Todavia, embora os parâmetros usados para gerar a trajetória possam ser considerados irrealistas, nomeadamente em termos da amplitude do movimento de rotação, o principal objetivo foi, simplesmente, recriar um cenário mais exigente do que o caso real, para pôr à prova a eficiência dos procedimentos estabelecidos.

Na implementação do filtro recursivo (estimador de movimento) considerou-se uma frequência de amostragem de 20 Hz e que as observações (medições) se encontravam afectadas por ruído Gaussiano com média nula e DP de dois píxeis (matriz R presente na Equação 5.32). Na implementação da parte iterativa do filtro verificou-se que a partir de cinco iterações não se obtinham melhorias significativas nos resultados, tendo sido este o valor estabelecido ($N = 5$).

Nas Figuras 6.20 e 6.21 encontram-se representados o DAM das estimativas de deslocamento¹² e de rotação do tabuleiro, respectivamente, em função do nível de ruído presente na fase de seguimento e para dois níveis de ruído na fase de calibração (ausência de ruído e dois píxeis).

¹² O desvio medido no plano XY e no espaço XYZ corresponde à distância Euclidiana medida no plano e no espaço, respectivamente, entre a posição de referência do tabuleiro e a posição estimada pelo estimador de movimento.

Os dados relativos à configuração SE – SW encontram-se representados à parte (ver adiante), em virtude da diferença significativa dos valores de desvio obtidos.

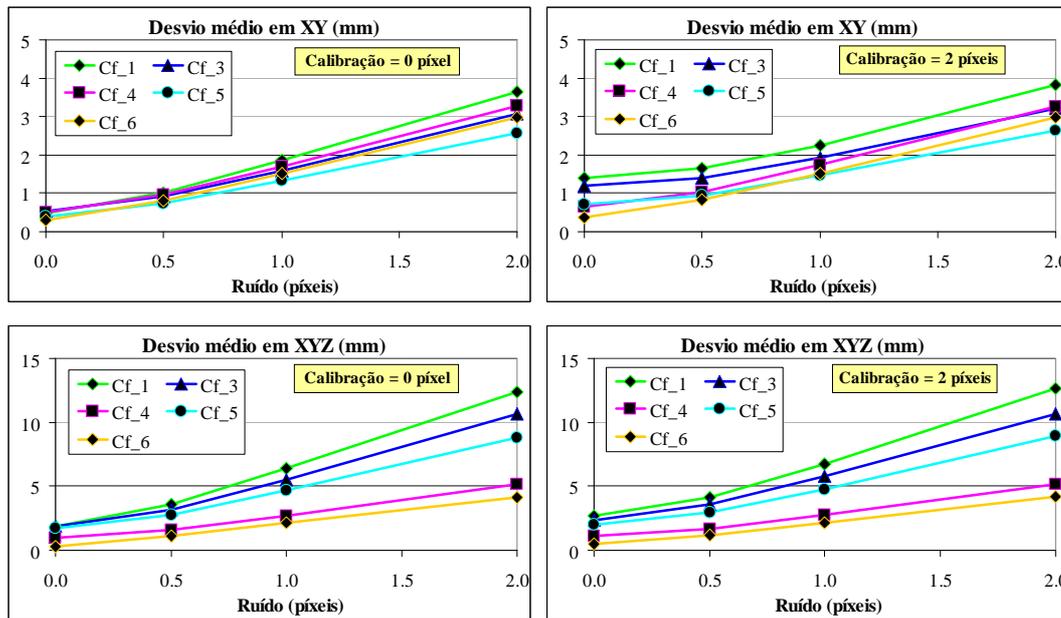


Figura 6.20 – Desvio médio da estimativa do deslocamento, medido em XY e em XYZ, obtido com cinco configurações de câmaras e oito alvos, em função do nível de ruído presente na fase de seguimento e para dois níveis de ruído na fase de calibração.

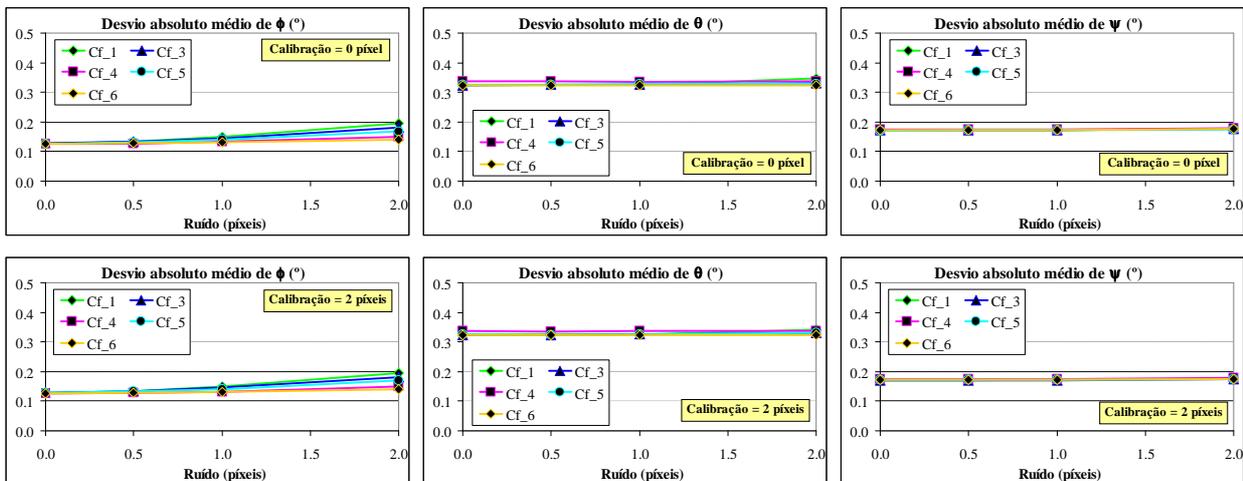


Figura 6.21 – Desvio absoluto médio da estimativa dos ângulos de rotação obtido com cinco configurações de câmaras e oito alvos, em função do nível de ruído presente na fase de seguimento e para dois níveis de ruído na fase de calibração.

Atendendo a que o KF requer algum tempo (amostras) para atingir o estado de convergência, na determinação dos valores de desvio apenas foram consideradas as últimas 20000 amostras, do total de 24000. No caso particular do ângulo θ apenas foram consideradas as últimas 4000 amostras, uma vez que a convergência é atingida muito mais tarde, devido à baixa frequência desta componente de rotação. Na realidade, como se verá mais adiante, este parâmetro não chega a atingir o estado de convergência plena, tal como acontece com os restantes parâmetros,

facto, também, evidenciado pela maior variabilidade do respectivo DP relativamente aos restantes ângulos.

Da análise dos gráficos, obtidos com as cinco configurações, constata-se que:

- O ruído presente na fase de calibração tem muito pouca influência no valor dos desvios obtidos durante a fase de seguimento, o que se afigura revelador da robustez do método de calibração. Neste aspecto, o nível de ruído presente na fase de seguimento assume peso preponderante no valor do desvio obtido.
- A amplitude dos desvios das estimativas de deslocamento e do ângulo de rotação ϕ , globalmente, decresce com o aumento do número de câmaras. Contudo, como se verá a seguir, a diferença de desempenho entre as configurações $S - N$ e $SE - SW$ (mesmo número de câmaras) é bastante significativa.
- As configurações que contemplam câmaras posicionadas na direcção perpendicular à direcção longitudinal do tabuleiro (configurações 4 e 6) são as que apresentam menores desvios em XYZ ; em contrapartida, o desvio em XY tende a ser ligeiramente inferior com as configurações $SE - SW - N$ e $SE - SW - NE - NW$, comparativamente às configurações com igual número de câmaras. No caso das configurações com câmaras E e W , por um lado, verifica-se que os deslocamentos de maior amplitude (X e Y) ocorrem num plano aproximadamente paralelo ao eixo óptico destas câmaras, tornando a sua estimação mais difícil de realizar, isto é, o contributo destas câmaras para a estimação do movimento do tabuleiro segundo estas duas direcções é menor. Por outro lado, o seu posicionamento é favorável à medição da componente de deslocamento segundo a direcção longitudinal (Z), fazendo com que o desvio das medições em XYZ seja menor nestas configurações.
- Comparando as cinco configurações, as diferenças mais significativas verificam-se na medição do deslocamento em XYZ e na medição do ângulo de rotação ϕ , tornando-se mais pronunciadas as diferenças com o aumento do nível de ruído. Relativamente às restantes grandezas, as diferenças são pouco relevantes, principalmente no que diz respeito aos ângulos de rotação θ e ψ .
- O ângulo θ é dos três aquele que apresenta o maior DAM e o maior DP sendo, em termos globais, inferior a $0,4^\circ$ e $0,2^\circ$, respectivamente. Como mencionado, para o cálculo do valor do desvio deste parâmetro foram consideradas apenas as últimas 4000 amostras, ao contrário do verificado com os restantes parâmetros em que foram tidas em conta as últimas 20000 amostras. A adopção desta medida prende-se com o facto do algo-

ritmo não ter alcançado o estado pleno de convergência, em virtude da menor frequência desta componente de rotação (Figura 6.25).

- Com apenas duas câmaras (configuração 1) e assumindo um cenário de ruído de dois píxeis, o valor do DAM do deslocamento em XY é inferior a 4 mm – o objectivo era 10 mm – e em XYZ é inferior a 13 mm. Para o mesmo nível de ruído é possível obter um desvio inferior a 10 mm em XYZ , com quatro câmaras.

Dispondo de apenas duas câmaras, do ponto de vista de implementação em condições reais, a configuração $SE - SW$ possui características que a tornam bastante atractiva comparativamente à configuração $S - N$, na medida em que os trabalhos de instalação e de manutenção do equipamento são mais fáceis de realizar e, pormenor importante, o projecto do alvo torna-se mais simples. No caso da configuração $SE - SW$, a utilização de alvos com emissão de radiação numa única direcção será suficiente para estes serem visíveis por ambas as câmaras. Já no caso das restantes configurações, é necessário usar alvos que emitam radiação em duas ou mais direcções. No entanto, comparando os resultados obtidos com a configuração $SE - SW$ com os das restantes, verifica-se que, para as mesmas condições de ruído, estes se destacam de forma patente. Neste sentido, por forma a avaliar a influência da distância entre as câmaras, foram realizados testes para diferentes distâncias entre as mesmas (*baseline*) e diferentes níveis de ruído na fase de seguimento. Os resultados obtidos, considerando um nível de ruído de dois píxeis na fase de calibração e o seguimento de oito alvos, encontram-se representados na Figura 6.22.

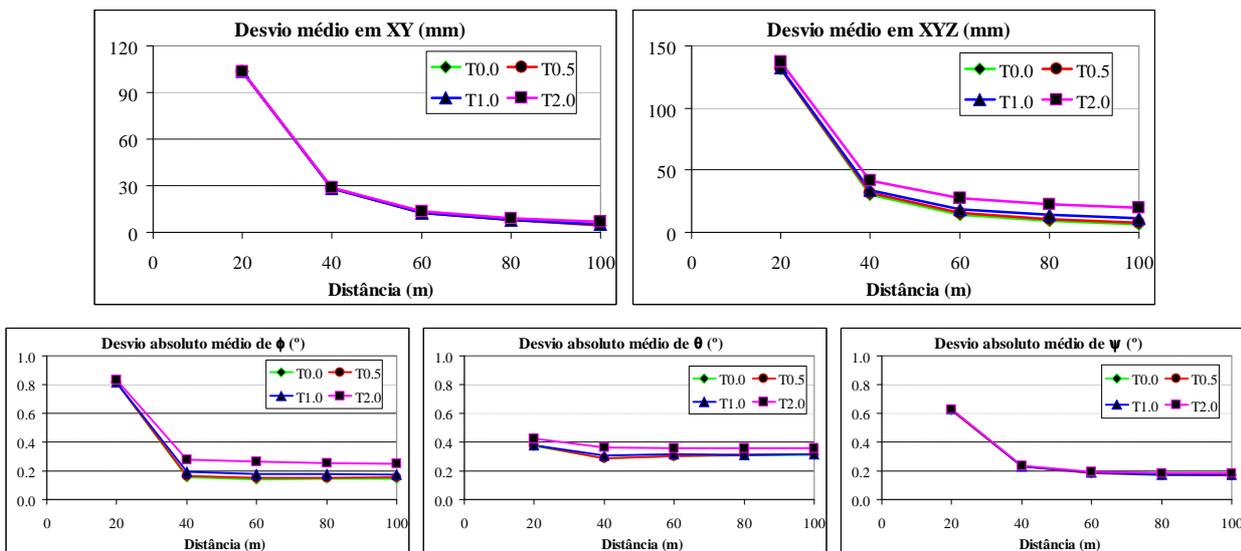


Figura 6.22 – Desvio médio da estimativa do movimento de deslocamento e de rotação do tabuleiro, obtido com a configuração $SE - SW$ e oito alvos, em função da distância entre as câmaras e para diferentes níveis de ruído na fase de seguimento (T_n significa n píxeis de ruído na fase de seguimento).

Como se constata, à medida que aumenta a distância entre as duas câmaras, diminui o valor do desvio dos parâmetros de movimento; este comportamento segue na mesma linha do verificado aquando da calibração. Neste sentido, dispondo de apenas duas câmaras, e limitação de espaço que impeça o afastamento das mesmas, é preferível adoptar a configuração $S - N$, que produz melhores resultados.

Nas Figuras 6.23 e 6.24 apresenta-se o desvio absoluto, registado no plano XY e no espaço XYZ , em função do tempo, resultante da estimação do movimento do tabuleiro com as configurações 1, 3, 4, 5 e 6 no seguimento de oito alvos e para dois casos de nível de ruído: um e dois píxeis de ruído nas fases de calibração e de seguimento.

Apesar de se ter assumido desconhecer o estado inicial do vector de estado, a Figura 6.25 mostra que o filtro converge, globalmente, de forma rápida para a solução. Como se constata, na estimação das componentes de rotação a convergência é mais rápida para o ângulo ψ e mais lenta no caso do ângulo θ . De modo idêntico, verifica-se que na determinação da posição do centro de rotação do tabuleiro a convergência é mais rápida para a componente transversal (X) e mais lenta para a componente longitudinal (Z). As diferenças no modo como o estimador converge em cada uma das componentes está relacionado com a frequência característica de cada uma das componentes do movimento de rotação do tabuleiro. Assim, quanto maior for a frequência da componente de rotação mais rápida é a convergência do estimador (desde que se mantenha válida a condição de *movimento suave*).

6.2.3.3 Predição da Trajectória

Na Figura 6.26 apresenta-se o desvio absoluto de predição (distância em píxeis) das coordenadas de projecção do alvo nº 8 (Figura 6.3) numa das câmaras das configurações 1, 3, 4, 5 e 6, considerando dois cenários de ruído nas fases de calibração e de seguimento: um píxel (coluna do lado esquerdo) e dois píxeis (coluna do lado direito).

Os valores de DAM de predição não diferem muito entre as configurações e varia muito pouco com o nível de ruído considerado no teste. No entanto, importa relembrar que na parametrização do estimador de movimento foi assumido, para todos os casos testados, um nível de ruído de dois píxeis nas observações (matriz R presente na Equação 5.32). Ainda assim, os resultados obtidos mostram grande conformidade, fiabilidade e convergência rápida na predição da trajectória projectada na imagem, sendo o DAM de predição inferior a três píxeis (o maior contributo para o valor do desvio provém da predição da coordenada horizontal).

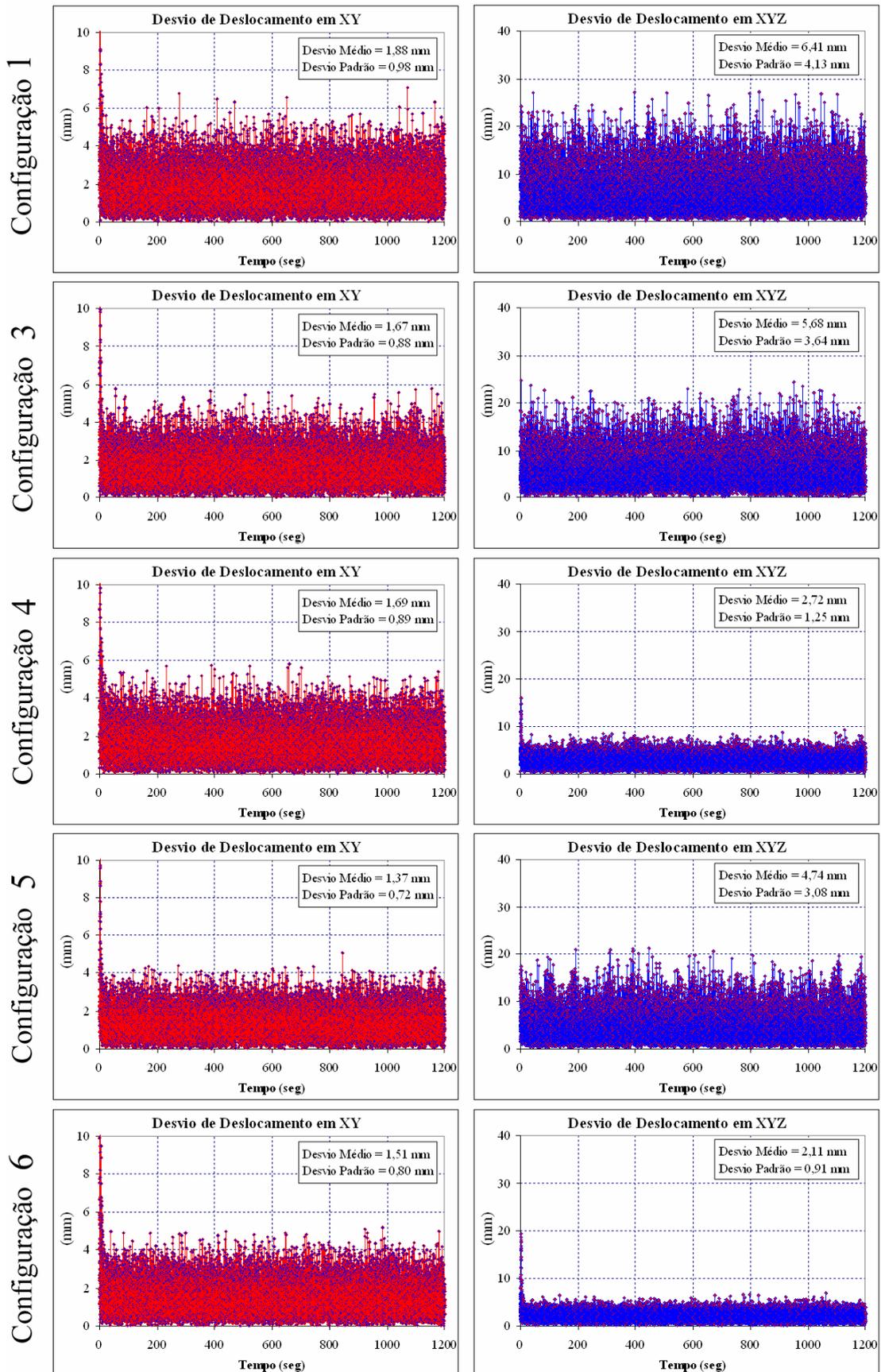


Figura 6.23 – Desvio da estimativa do movimento de deslocamento, em XY (esq.) e em XYZ (dir.), assumindo um pixel de ruído nas fases de calibração e de seguimento.

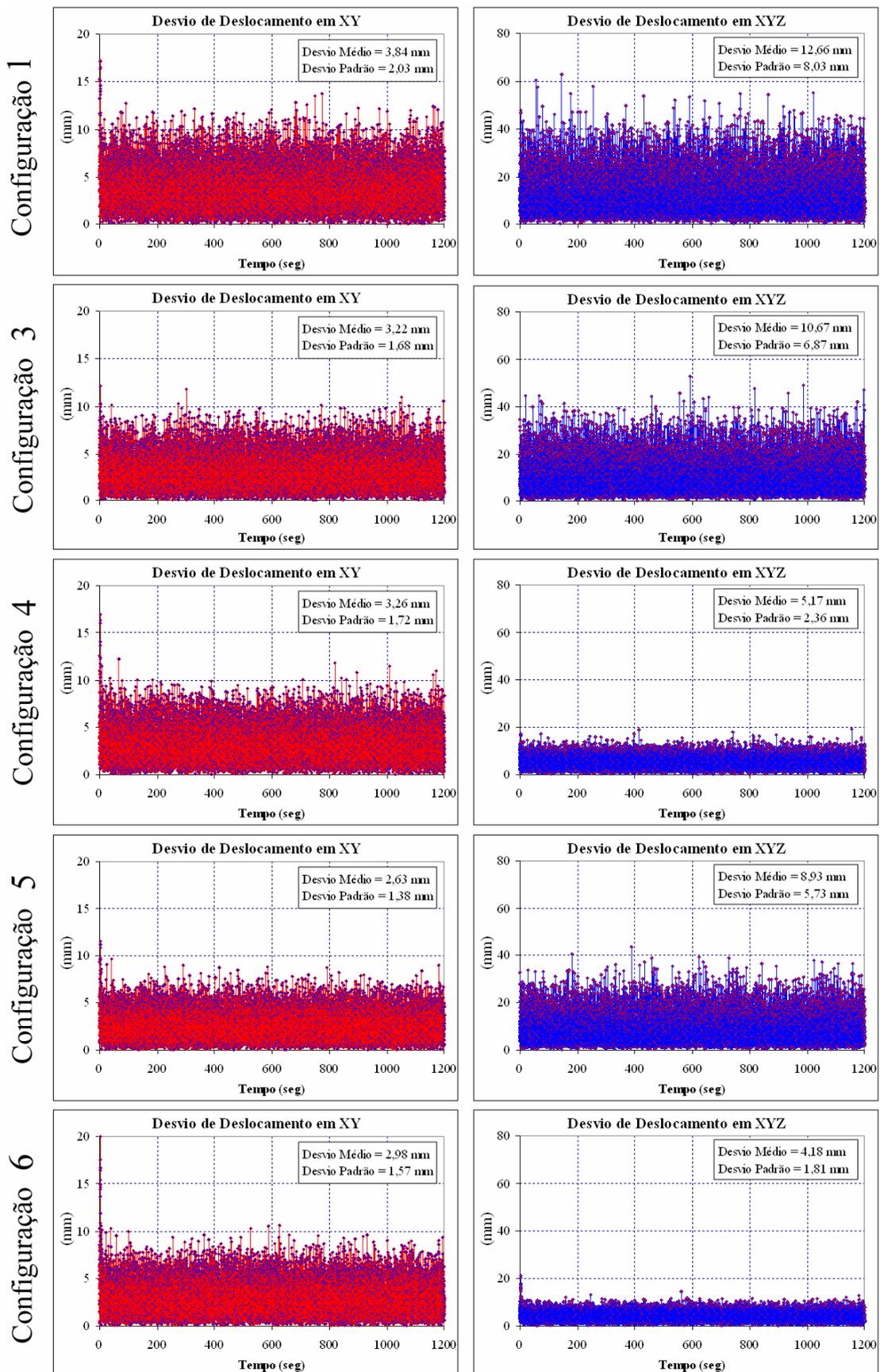


Figura 6.24 – Desvio da estimativa do movimento de deslocamento, em XY (esq.) e em XYZ (dir.), assumindo dois píxeis de ruído nas fases de calibração e de seguimento.

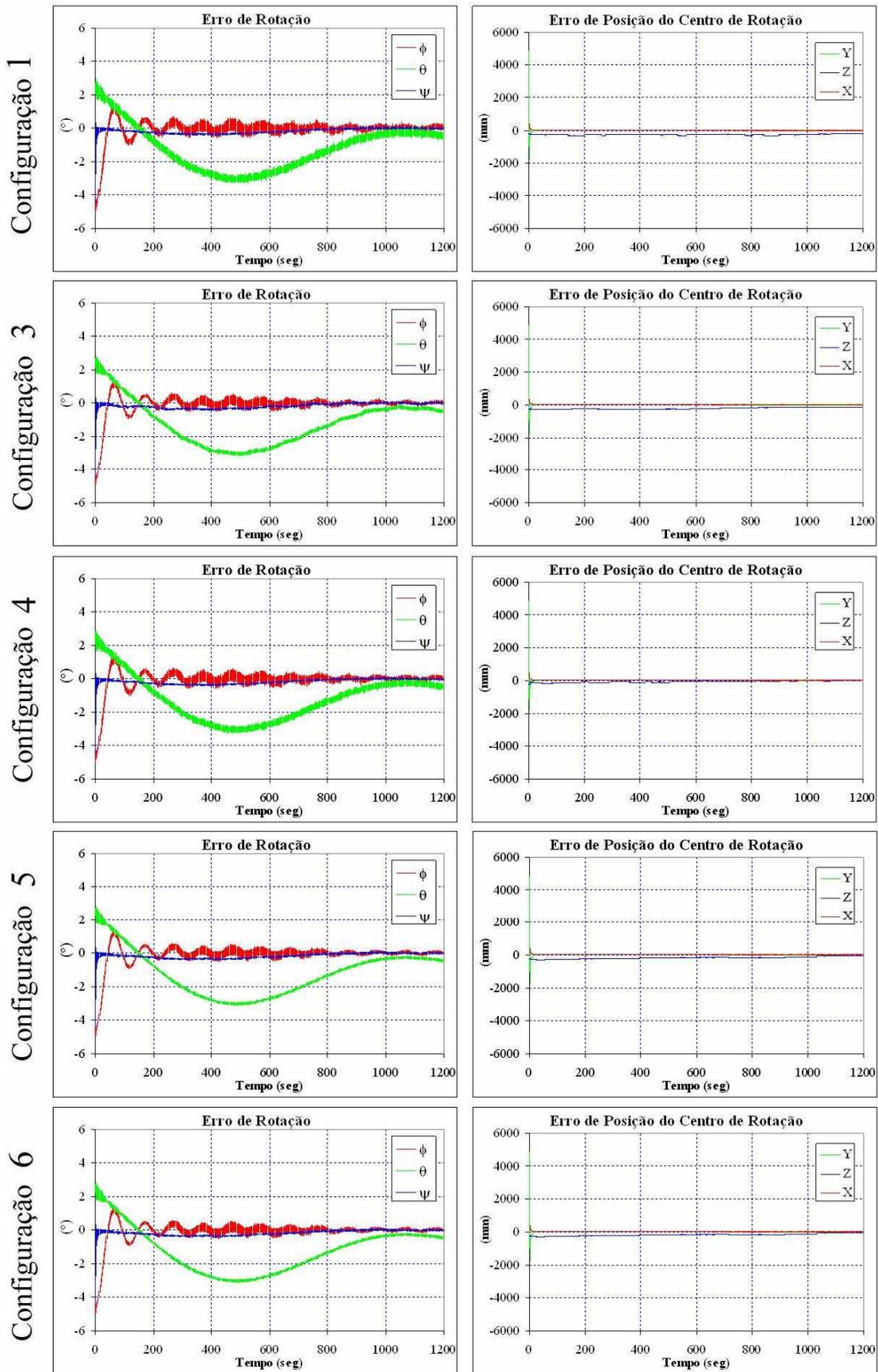


Figura 6.25 – Erro de estimação dos ângulos de rotação (esq.) e erro de posição do centro de rotação do tabuleiro (dir.), obtidos com oito alvos e assumindo um píxel de ruído nas fases de calibração e de seguimento.

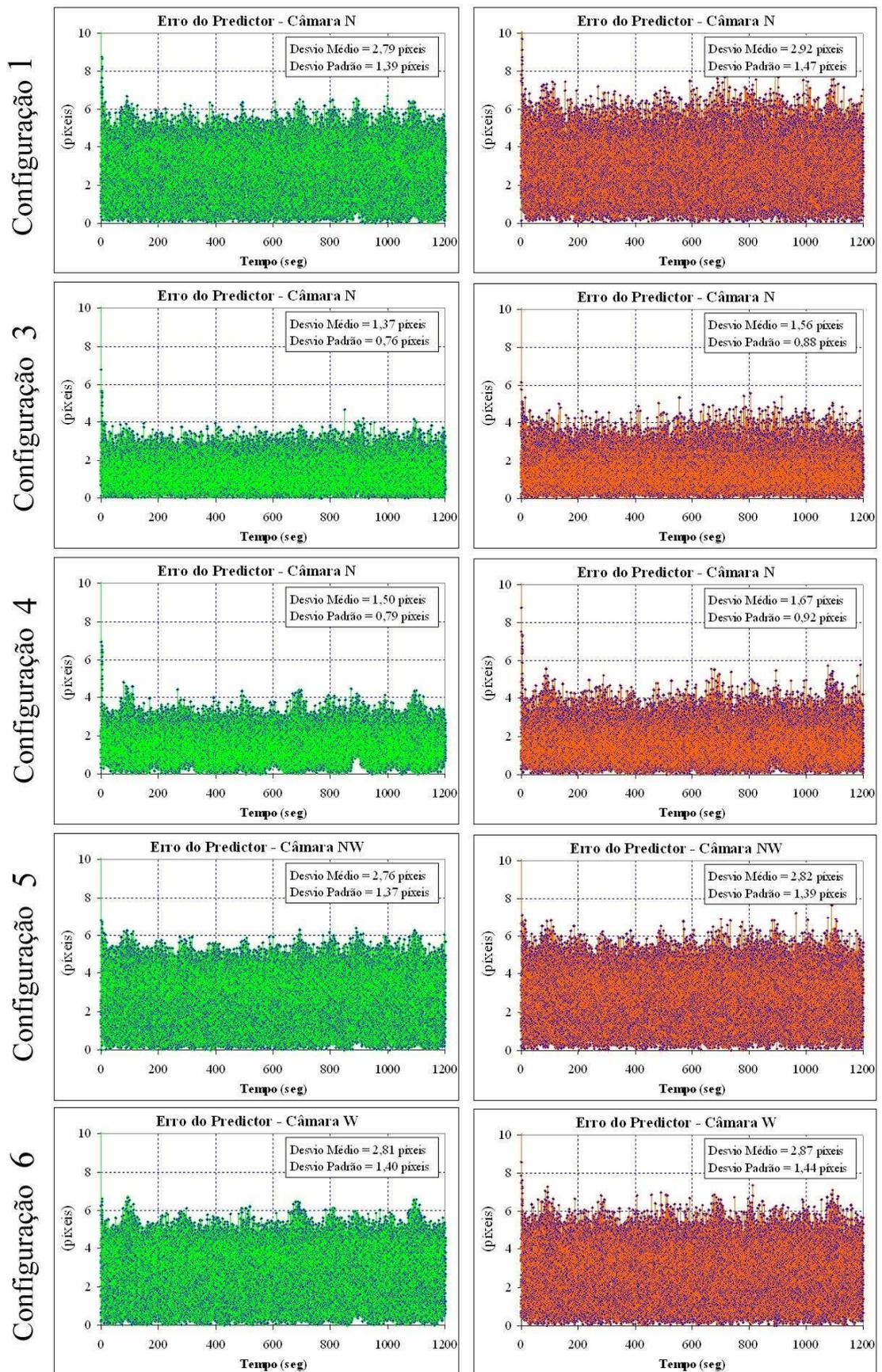


Figura 6.26 – Desvio absoluto de predição das coordenadas de projecção do alvo nº 8 numa das câmaras, considerando um píxel (esq.) e dois píxeis (dir.) de ruído nas fases de calibração e de seguimento.

6.2.3.4 Número de Alvos

Para a realização do seguimento da trajectória do tabuleiro, em deslocamento e em rotação, são necessários um mínimo de três alvos. No entanto, dependendo do nível de ruído presente, o grau de exactidão é, genericamente, tanto maior quanto maior o número de alvos empregues. EM contrapartida, quanto maior é o número de alvos maior é a quantidade de informação a transferir da câmara para o computador e, principalmente, maior é o tempo necessário para processar as imagens podendo, eventualmente, condicionar o valor da frequência de aquisição (20 Hz).

Com a realização do teste que se apresenta a seguir, pretendeu-se avaliar a eficiência do sistema de medição em função do número de alvos usados na fase de seguimento e verificar até que ponto é justificável aumentar o número de alvos empregues. Importa referir que a utilização de vários alvos dispersos pela zona de observação do tabuleiro constitui uma das formas de reduzir o efeito de turbulência e de cintilação que podem surgir devido à formação de correntes térmicas (cf. Anexo I).

Na realização deste teste foi assumido que a calibração das câmaras tinha sido executada previamente, fazendo uso de oito alvos, tal como nos casos descritos anteriormente. Na Figura 6.27 apresenta-se o DAM do deslocamento, em *XY* e em *XYZ*, e dos ângulos de rotação, obtidos com as configurações 1, 3 e 5 em função do número de alvos empregues na fase de seguimento e do nível de ruído presente na fase de seguimento. Os resultados obtidos com as configurações 4 e 6 apresentam uma tendência similar e os valores de desvio estão em consonância com os obtidos nos testes descritos anteriormente.

Da observação dos gráficos verifica-se que, genericamente, o valor do desvio de deslocamento e de rotação diminui com o aumento do número de alvos empregues na fase de seguimento. No entanto, para as mesmas condições de ruído esta relação não é linear, evidenciando um comportamento assintótico. Por outro lado, como já era esperado, verifica-se que a influência do número de alvos assume maior importância à medida que o nível de ruído aumenta. Quer isto dizer que, em condições adversas de ruído o aumento do número de alvos usados na observação contribui de forma decisiva para o aumento da eficiência e da fiabilidade do sistema de medição.

Em forma de síntese, a conclusão que se tira é a de que com a configuração mínima de quatro alvos e de duas câmaras é possível satisfazer o nível de exactidão pretendido (em *XY*), mesmo com condições de ruído adversas. Na presença de dois píxeis de ruído, a duplicação do número de câmaras (conversão da configuração 1 para a configuração 5), ou do número de alvos, passando de quatro para oito, conduz a um aumento de exactidão da ordem de 30% (tanto em *XY* como em *XYZ*).

Relativamente à estimação dos ângulos de rotação, as diferenças mais significativas verificam-se com o desvio na estimação dos ângulos de rotação ϕ (valor médio) e θ (desvio padrão). Já no caso do ângulo de rotação ψ , os resultados mostram que o número de alvos empregues não influencia o valor do desvio. A explicação para este comportamento reside no valor da frequência da respectiva componente de rotação. Como mencionado, a componente de rotação θ é a que apresenta menor frequência e, pelo facto de não ter alcançado a plena convergência, apresenta o desvio padrão mais elevado.

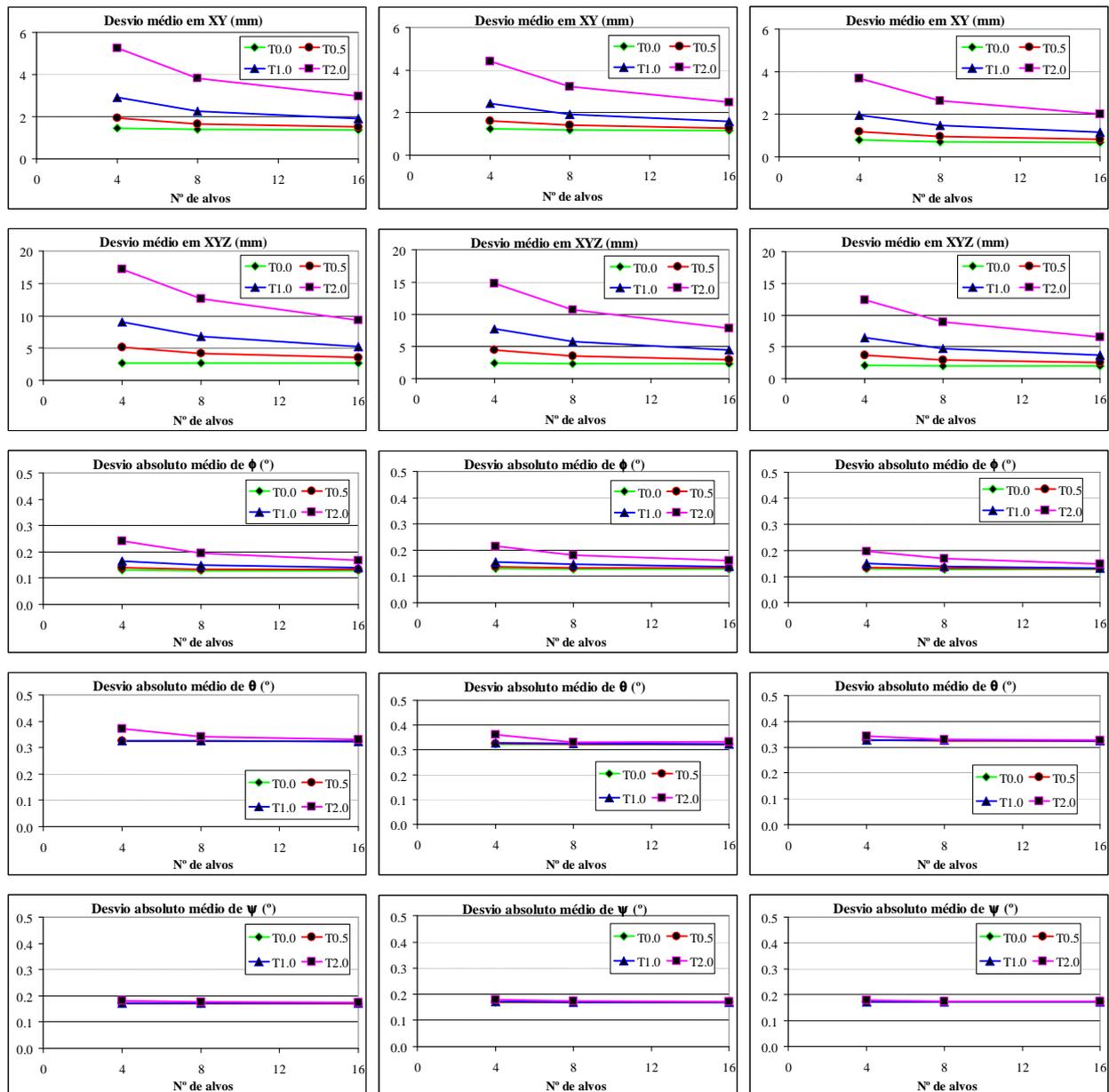


Figura 6.27 – Desvio da estimativa do movimento de deslocamento e de rotação do tabuleiro, obtido com as configurações S – N (esq.), SE – SW – N (centro) e SE – SE – NE – NW (dir.), em função do número de alvos usados na fase de seguimento e do nível de ruído presente na fase de seguimento (Tn significa n píxeis de ruído na fase de seguimento).

Na Tabela 6.6 encontram-se os valores de desvio médio e do respectivo desvio padrão (entre parêntesis) dos vários parâmetros de seguimento de trajectória, em função do nível de ruído presente na fase de seguimento, obtidos com quatro alvos, tanto na fase de calibração, como na fase de seguimento. No teste foi assumida uma perturbação de dois píxeis de ruído durante a fase de calibração.

Como se constata, com a configuração mínima de alvos e de câmaras (para as fases de calibração e de seguimento), é possível satisfazer o grau de exactidão pretendido em XY , mesmo sob condições de forte perturbação (dois píxeis de ruído).

Tabela 6.6 – Desvio da estimativa do movimento de deslocamento e de rotação do tabuleiro (desvio padrão entre parêntesis), obtido com as cinco configurações e com quatro alvos, em função do nível de ruído presente na fase de seguimento. Calibração efectuada com quatro alvos e assumindo um nível de ruído de dois píxeis.

Configuração de Câmaras	Ruído Seguimento (píxel)	XY (mm)	XYZ (mm)	ϕ (°)	θ (°)	ψ (°)
S – N	0,0	7,27 (4,04)	8,18 (4,33)	0,13 (0,11)	0,32 (0,07)	0,17 (0,14)
	0,5	7,41 (4,04)	9,66 (4,47)	0,14 (0,11)	0,32 (0,10)	0,17 (0,14)
	1,0	7,78 (4,11)	12,48 (5,89)	0,17 (0,13)	0,33 (0,16)	0,17 (0,14)
	2,0	8,97 (4,65)	19,83 (10,88)	0,24 (0,18)	0,38 (0,26)	0,18 (0,14)
SE – SW – N	0,0	5,47 (3,08)	6,21 (3,31)	0,13 (0,11)	0,32 (0,06)	0,17 (0,14)
	0,5	5,60 (3,09)	7,55 (3,50)	0,14 (0,11)	0,32 (0,09)	0,17 (0,14)
	1,0	5,93 (3,17)	10,14 (4,96)	0,16 (0,12)	0,33 (0,15)	0,17 (0,14)
	2,0	7,07 (3,63)	16,50 (9,38)	0,22 (0,17)	0,36 (0,24)	0,18 (0,14)
S – E – N	0,0	0,97 (0,42)	1,48 (0,62)	0,13 (0,11)	0,33 (0,06)	0,17 (0,14)
	0,5	1,49 (0,77)	2,33 (1,06)	0,13 (0,11)	0,33 (0,07)	0,18 (0,14)
	1,0	2,49 (1,30)	3,89 (1,77)	0,14 (0,11)	0,33 (0,09)	0,18 (0,14)
	2,0	4,66 (2,44)	7,34 (3,35)	0,17 (0,13)	0,33 (0,14)	0,18 (0,14)
SE – SW – NE – NW	0,0	3,49 (1,80)	4,26 (2,15)	0,13 (0,11)	0,32 (0,06)	0,17 (0,14)
	0,5	3,62 (1,85)	5,46 (2,55)	0,13 (0,11)	0,32 (0,08)	0,17 (0,14)
	1,0	3,94 (2,01)	7,72 (4,04)	0,15 (0,12)	0,32 (0,13)	0,17 (0,14)
	2,0	5,03 (2,61)	13,20 (7,78)	0,20 (0,15)	0,34 (0,21)	0,18 (0,14)
S – E – N – W	0,0	0,64 (0,39)	0,87 (0,33)	0,13 (0,11)	0,32 (0,06)	0,17 (0,14)
	0,5	1,26 (0,65)	1,72 (0,73)	0,13 (0,11)	0,32 (0,06)	0,17 (0,14)
	1,0	2,23 (1,18)	3,09 (1,34)	0,14 (0,12)	0,32 (0,07)	0,17 (0,14)
	2,0	4,28 (2,27)	5,98 (2,59)	0,16 (0,12)	0,32 (0,10)	0,18 (0,14)

6.3 Simulação Física

Concluídos os testes de simulação numérica, a validação das metodologias estabelecidas por meio de realização de ensaios em condições reais seria o procedimento natural. No entanto, a avaliação do desempenho de qualquer sistema envolve a comparação dos resultados obtidos com esse sistema com os obtidos por um outro sistema, devidamente calibrado e com um grau de

exactidão superior em pelo menos uma ordem de grandeza ao valor pretendido, que no caso presente corresponderia a ± 1 mm.

Pelas razões já apontadas, a P25A é a estrutura que reúne as melhores condições para a realização do ensaio de validação deste tipo de sistema de medição. Na realidade, foi a necessidade de observação do movimento do tabuleiro desta ponte que despoletou a primeira acção que viria a culminar na realização deste estudo. Todavia, presentemente, não se encontram reunidas as condições mínimas necessárias para a realização do referido ensaio de validação em virtude de não existir qualquer tipo de transdutor de deslocamento instalado na referida estrutura. De facto, tal como referido no Capítulo 2, o sistema de medição que poderia, eventualmente, ser usado como transdutor padrão é o sistema de medição baseado em *RTK-GPS*. No entanto, como mencionado, para além desse tipo de sistema de medição não ser adequado à medição de deslocamentos em estruturas metálicas, a exactidão disponibilizada é da ordem de grandeza do valor que se pretende alcançar com o sistema de visão. Acresce que, nesta fase de avaliação era desejável realizar o teste sob condições controláveis, tanto quanto possível, nomeadamente através do controlo da trajectória de movimento a impor à estrutura e, se possível, eliminar ou reduzir substancialmente o efeito de eventuais perturbações sobre o sistema de medição.

Face a esta situação, optou-se por executar o teste em ambiente laboratorial, tendo-se usado um modelo reduzido para o efeito, quer ao nível da estrutura de suporte dos alvos, como também dos próprios alvos. Neste contexto, foram realizados dois ensaios, o primeiro executado em ambiente de exterior, em plena luz do dia, tipo ensaio de campo, e o segundo no interior de um pavilhão de ensaios marítimos.

6.3.1 Descrição do Sistema de Medição

6.3.1.1 Subsistema de Visão

Para a realização dos ensaios, em modelo físico, foram usados dois subsistemas de visão, idênticos, dispostos numa configuração do tipo *SE – NE* (Figura 6.1). Cada um dos subsistemas de visão era composto, genericamente, por uma câmara de vídeo digital, acoplada a um multiplicador óptico e, este por sua vez, acoplado a uma óptica (Figura 6.28) (cf. Anexo IV).

A câmara de vídeo, do tipo industrial, é identificada pela referência *IPX-2M30H-L*, fabricada pela empresa *Imperx*, e está equipada com um sensor do tipo CCD (*Charge Couple Device*), monocromático (12 bits) e com a resolução de 1920 x 1080 píxeis. Esta câmara de vídeo permite a aquisição entre 2 e 33 imagens por segundo, à máxima resolução, podendo a frequência de aquisição aumentar até 60 imagens por segundo através da delimitação do número de

linhas da imagem por meio de *AOI (Area of Interest)*. A transferência das imagens é realizada através de uma interface de comunicação do tipo *CameraLink*, modo *Base*. Entre outras funcionalidades, esta câmara de vídeo permite efectuar a aquisição das imagens de forma sincronizada, dispondo de um porto de entrada (*hardware*) dedicado a este fim.



Figura 6.28 – Subsistema de visão empregue na realização dos ensaios com modelo físico.

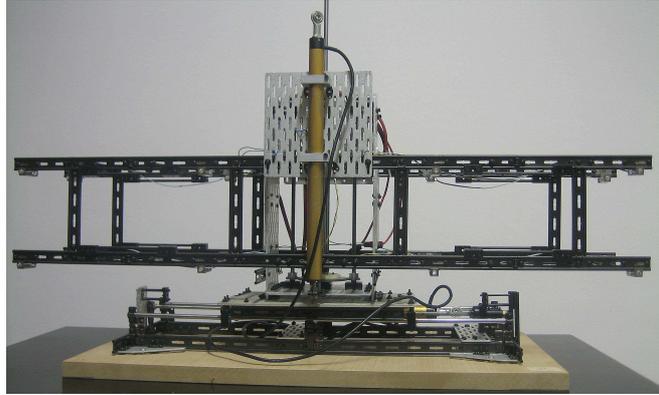


Figura 6.29 – Estrutura de suporte dos alvos com liberdade de movimento segundo as direcções horizontal e vertical.

A óptica, com a referência *Sigma 300mm/2,8 APO EX DG*, fabricada pela empresa *Sigma*, caracteriza-se por ter uma distância focal nominal de 300 mm e abertura F2.8. No entanto, atendendo a que era desejável dispor de uma óptica com a distância focal de aproximadamente 600 mm (cf. Anexo IV), usou-se um multiplicador óptico, com factor de multiplicação 2x, para se obter a distância focal pretendida, sendo este fabricado pela empresa *Sigma*, com a referência *Sigma Tele Converter APO2,0xEX DG*.

Como será referido adiante, o alvo activo emite radiação, predominantemente, com comprimento de onda de 875 nm (cf. Anexos I e III). Assim, a fim de reduzir a radiação ambiente que atinge o sensor da câmara de vídeo (comprimento de onda situado na zona do visível), recorreu-se a um filtro óptico com a referência *B+W Infrared Filter 092*, fabricado pela empresa *Jos. Schneider Optische Werke GmbH*, montado na parte posterior da óptica. Este filtro, do tipo passa-banda, elimina a quase totalidade da radiação visível com comprimento de onda inferior a 650 nm, deixando passar a radiação com comprimento de onda superior a 730 nm (cf. Anexo IV).

6.3.1.2 Estrutura de Suporte dos Alvos

Para a realização dos ensaios em ambiente laboratorial foi necessário desenvolver uma estrutura, em modelo reduzido, para a fixação dos alvos e imposição de movimento (Figura 6.29). Esta estrutura, desenvolvida pelo Núcleo de Sistemas Mecânicos do LNEC, é composta,

basicamente, por uma grelha formada por longarinas e travessas, suportada por um mecanismo constituído por guias, fusos e rolamentos, que lhe confere dois graus de liberdade para movimento segundo as direcções horizontal e vertical, com amplitude até 200 mm.

A grelha, onde são fixados os alvos, tem cerca de 800 mm de comprimento, 125 mm de altura e 140 mm de largura (profundidade). Comparando as dimensões da estrutura de suporte com as respectivas dimensões do objecto delimitado pelos alvos no caso simulado (Figura 6.1), verifica-se que o factor de escala é cerca de 5,7 na direcção vertical, 6,9 na direcção transversal e 7,1 na direcção longitudinal (profundidade).

A imposição de movimento à estrutura de suporte dos alvos foi realizada por intermédio de um motor eléctrico que impôs ao sistema de alvos uma velocidade de 2,25 mm/segundo (valor aproximado). A monitorização do movimento da estrutura de suporte dos alvos, nas direcções horizontal e vertical, foi realizada por meio de dois transdutores de deslocamento, com gama de medição de 200 mm, montados nas proximidades dos respectivos eixos de movimento. Os deslocamentos registados por estes transdutores foram usados na avaliação da eficiência do sistema de medição.

Embora fosse desejável dispor de uma estrutura que permitisse impor os seis graus de liberdade de movimento, tal não foi possível atendendo à complexidade e aos custos associados ao desenvolvimento de uma estrutura com essas características. Por outro lado, apesar do desenvolvimento da estrutura de suporte ter sido conduzido de forma a que a mesma tivesse um comportamento de corpo rígido e ausência de rotação, estes objectivos não foram atingidos de forma plena, nomeadamente no que diz respeito ao movimento de rotação da estrutura.

6.3.1.3 Alvo

Para a realização dos ensaios em modelo reduzido, atendendo ao factor de escala envolvido, foi necessário usar um alvo de dimensões reduzidas, inviabilizando a possibilidade de empregar um alvo como o apresentado no Anexo III. Neste sentido, cada um dos alvos é formado por um LED de emissão de radiação de infravermelho próximo (875 nm), com a referência *HSDL-4260*, fabricado pela empresa *Avago Technologies*. Este LED caracteriza-se por emitir um feixe de radiação com grande intensidade (cerca de 200 mW/Sr, para o valor máximo recomendado de intensidade de corrente) e numa abertura do feixe de radiação de apenas $\pm 7,5^\circ$ (cf. Anexo IV).

De acordo com os resultados obtidos do estudo realizado de simulação numérica, a configuração 1 ($S - N$) é mais eficiente do que a configuração 2 ($SE - SW$). Todavia, com a configuração 1 é necessário que cada um dos alvos emita radiação em duas direcções opostas, o que colo-

ca sérias dificuldades de implementação, uma vez que o mesmo alvo (ponto de controlo) deve ser visto por ambas as câmaras. A solução adoptada consistiu em realizar cada um dos alvos por meio de dois LEDs, posicionados de forma a que cada um deles emita radiação na direcção da respectiva câmara (Figura 6.30). Cada par de LEDs foi fixado à estrutura por meio de um dispositivo desenvolvido para o efeito, o qual estabelecia uma distância entre os dois LEDs de cerca de 30 mm. Para além disso, este dispositivo foi desenvolvido de forma a favorecer a projecção de máxima radiação na direcção de cada uma das câmaras, através da imposição de um ângulo de rotação de cerca de 6° relativamente ao plano vertical (Figura 6.30).

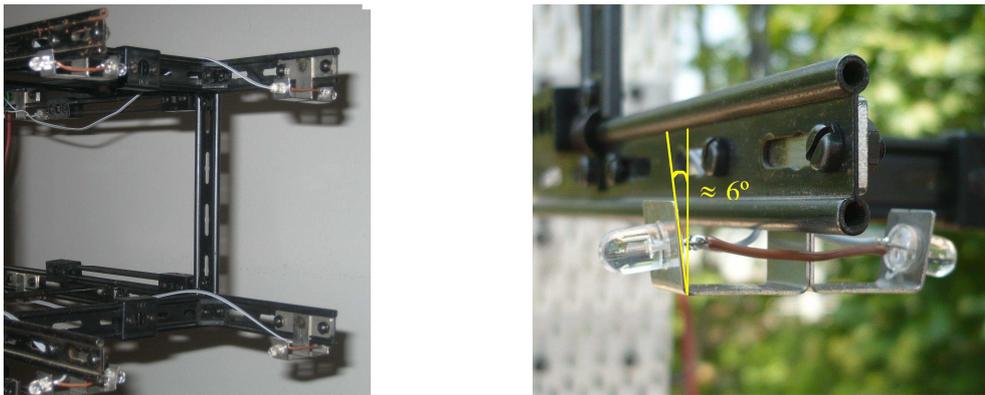


Figura 6.30 – Fixação dos LEDs à estrutura de suporte. Cada par de LEDs representa um alvo.

Atendendo à solução adoptada, pode-se considerar que o alvo visto pelas duas câmaras é representado por um ponto virtual, posicionado no espaço entre os dois LEDs, correspondente à intercepção dos dois feixes de radiação (Figura 6.31).

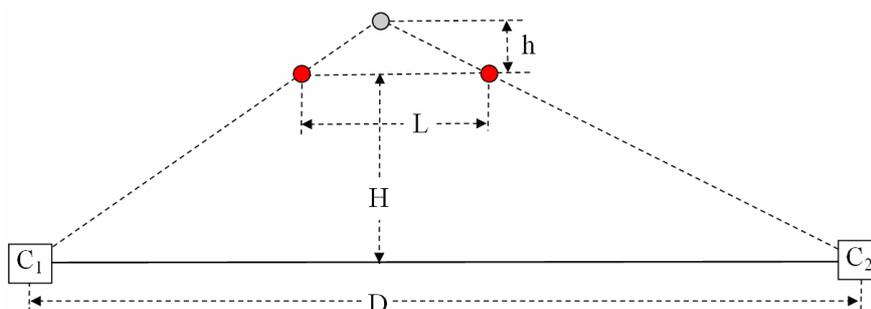


Figura 6.31 – Representação do ponto virtual, visto pelas duas câmaras.

Considerando uma disposição das câmaras idêntica à da configuração 1, verifica-se que a coordenada da componente vertical do ponto virtual (h), relativamente ao plano horizontal formado pelos dois alvos, é dada pela Equação 6.1, em que H representa o desnível entre o alvo e a câmara, L a distância entre os dois LEDs (30 mm) e D a distância entre as duas câmaras¹³. No

¹³ Para o caso da configuração 1, a posição transversal do ponto virtual não varia com o movimento vertical do alvo. Com a configuração testada, a posição do ponto virtual varia, quer na componente vertical, quer na componente transversal. No entanto, também neste caso se pode considerar desprezável a variação da posição do ponto virtual segundo a direcção transversal.

caso mais desfavorável, correspondente ao ensaio realizado no interior do pavilhão, atendendo a que o valor de H se situa entre 2000 mm e 2500 mm, o desvio do ponto virtual relativamente à posição dos LEDs é inferior a $\pm 30 \mu\text{m}$. Assim sendo, face à presença inevitável de outras fontes de ruído, pode-se considerar que esta fonte de erro é desprezável e, por conseguinte, que a solução adoptada é adequada ao fim em vista.

$$h = \frac{H \cdot L}{D - L} \quad (6.1)$$

Na sequência do estudo de avaliação da eficiência do sistema, realizado por meio de simulação numérica, e em consequência dos resultados então obtidos, foi decidido instalar 16 alvos na estrutura de suporte, identificados de acordo com o indicado na Figura 6.32.

Como mencionado no Capítulo 4, para se poder realizar a calibração do sistema de visão, composto por duas câmaras, era necessário conhecer, pelo menos, seis distâncias entre pares de alvos. Para além disso, era igualmente necessário encontrar um conjunto de restrições que permitissem determinar a matriz B (Equação 4.51), de forma a fixar a orientação do sistema de coordenadas de referência (O_I). No caso em concreto, importava que a orientação deste sistema de coordenadas fosse idêntica à estabelecida pelos dois transdutores de deslocamento, de forma a permitir a comparação de resultados. Neste contexto, depois de fixados os alvos à estrutura de suporte, o *Laboratório Central de Apoio Metrológico* (LCAM) do LNEC, procedeu ao levantamento da posição de cada um dos LEDs, num sistema de coordenadas criado para este efeito, tendo sido usada uma máquina de medição de coordenadas 3D, marca DEA (MMC3D), modelo Gamma 22.03, rastreada aos padrões primários da grandeza comprimento (Figura 6.33).

Atendendo a que cada um dos alvos é representado por dois LEDs e que, como se veio a constatar, as distâncias entre os LEDs orientados na direcção de uma das câmaras e entre os LEDs correspondentes orientados no sentido oposto eram distintas, optou-se por escolher o valor médio das duas distâncias para representar a distância entre os dois alvos. O desvio médio entre os valores adoptados para a representação da distância entre os alvos e as respectivas distâncias medidas entre os LEDs foi cerca de 0,27 mm e o desvio máximo foi de 1,05 mm.

Para a determinação da matriz B (Equação 4.50) assumiu-se que os alvos 1 – 4 – 5 – 8 se encontravam posicionados num mesmo plano, o mesmo acontecendo com os alvos 5 – 8 – 13 – 16, e que estes dois planos estabeleciam um sistema ortonormado. Para além disso, decorrente do processo de construção da estrutura, foi assumido que estes dois planos eram paralelos aos planos de medição dos transdutores de deslocamento (sistema de medição de referência).

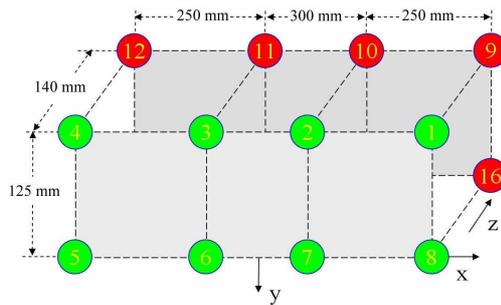


Figura 6.32 – Identificação e distância (aproximada) entre os alvos, usados no ensaio experimental.



Figura 6.33 – Levantamento da posição 3D de cada um dos LEDs e calibração da cadeia de medição do sistema de referência, usando uma máquina de medição de coordenadas 3D, marca DEA (MMC3D) e modelo Gamma 22.03.

De acordo com o estudo realizado pelo LCAM, verificou-se que o ângulo de ortogonalidade, entre o plano horizontal, formado pelos alvos 5 – 8 – 13 – 16, e o plano vertical, formado pelos alvos 1 – 4 – 5 – 8, era de $89,24^\circ$.

Atendendo a que cada um dos alvos é representado por dois LEDs, significa isto que os LEDs que formam os alvos 1 – 4 – 5 – 8 estão dispostos em dois planos verticais – plano formado pelos LEDs orientados num sentido e plano formado pelos respectivos LEDs orientados no sentido oposto –, o mesmo acontecendo com os alvos 9 – 12 – 13 – 16. Para este caso, o valor máximo de desvio de paralelismo entre os quatro planos foi de $2,41^\circ$. Não foi efectuado qualquer estudo acerca do paralelismo entre os planos formados pelos alvos e os respectivos planos de medição dos transdutores de deslocamento.

No caso de desvio de paralelismo e de ortogonalidade entre os planos, este manifesta-se sob a forma de erro sistemático nas medições, uma vez que a determinação da matriz de rotação, a partir da qual é imposta a orientação desejada ao sistema de coordenadas de referência, é conseguida partindo do pressuposto de que a condição de paralelismo e de ortogonalidade é satisfeita. Deste modo, os desvios existentes são transferidos para as medições.

6.3.1.4 Sistema de Medição de Referência

O sistema de medição de referência é constituído por dois transdutores de deslocamento, modelo *50L*, fabricado pela empresa *Vishay*, com gama de medição de 200 mm (Figura 6.29), uma unidade de controlo e comando *e-gate-IP*, fabricada pela empresa *Gantner*, quatro unidades de aquisição (conversão do sinal analógico para digital) com a referência *e.bloxx A3-1*, também fabricadas pela *Gantner*, e um computador portátil, para armazenamento e visualização dos dados adquiridos (Figura 6.34).



Figura 6.34 – Sistema de aquisição de dados, do sistema de medição de referência.

A calibração da cadeia de medição do sistema de referência (transdutores e sistema de aquisição) foi realizada pelo LCAM, tendo-se constatado que o erro de não linearidade era inferior a $\pm 0,1$ mm, no caso do transdutor de deslocamento vertical, e inferior a $\pm 0,25$ mm, no caso do transdutor de deslocamento horizontal. De qualquer modo, a calibração efectuada no LCAM permitiu apenas aferir a cadeia de medição em termos da grandeza registada por cada um dos transdutores de deslocamento ao longo do respectivo eixo de movimento, não tendo sido determinada a correlação entre o valor medido pelo sistema de referência e o movimento imposto à estrutura (ex. a observação, simultânea, de vários pontos da estrutura teria fornecido informação acerca do movimento de rotação da estrutura).

6.3.1.5 Sincronismo das Câmaras

O sincronismo das câmaras foi realizado por intermédio da entrada de sinal de disparo (entrada de *trigger*) presente em cada uma das câmaras e destinada, precisamente, à função de sincronismo da aquisição das imagens. Para este efeito, foi desenvolvido um sistema electrónico, baseado num microcontrolador, o qual gerava um sinal de relógio, com frequência ajustável entre 0,5 Hz e 20 Hz, que era distribuído pelos dois subsistemas de visão e pelo sistema de medição de referência através de cabos de fio de cobre com blindagem.

6.3.2 Ensaio em Ambiente de Exterior

O primeiro ensaio com modelo físico foi realizado em ambiente de exterior, tendo-se procurado para o efeito um local que permitisse estabelecer uma linha de vista entre os dois subsistemas de visão e o sistema de alvos e, simultaneamente, que permitisse posicionar o sistema de alvos (estrutura de suporte e LEDs) numa cota superior àquela a que se encontravam os subsistemas de visão. A solução adoptada consistiu em posicionar o sistema de alvos na cobertura de um edifício e os subsistemas de visão ao nível do solo (Figura 6.35). O local encontrado permitiu estabelecer uma distância superior a 85 m, entre cada um dos subsistemas de visão e o sistema de alvos, e com um desnível de cota de cerca de 10 m. Todavia, dadas as grandes dimensões do edifício, foi necessário adoptar uma configuração do tipo *SE – NE* (Figura 6.1) para os subsistemas de visão e elevar o sistema de alvos acima da cota da cobertura do edifício, de forma a garantir uma linha de vista entre os alvos e as câmaras (Figuras 6.36 e 6.37).

Como mencionado anteriormente, os LEDs utilizados concentram a maior parte da radiação emitida num feixe de abertura estreita ($\pm 7,5^\circ$), atingindo assim um maior alcance. No entanto, esta característica tem associado o inconveniente de quaisquer desvios no posicionamento das câmaras relativamente ao eixo de emissão do LED se traduzir numa perda de potência do sistema. Devido a dificuldades práticas locais¹⁴ os subsistemas de visão foram posicionados de tal forma que o feixe recebido nas câmaras correspondia, muito aproximadamente, ao limite exterior do feixe de radiação, fazendo com que cada uma das câmaras recebesse uma intensidade de radiação muito fraca, deteriorando assim, de forma muito significativa, a relação sinal/ruído das imagens.

Uma solução possível para compensar a baixa intensidade de radiação recebida pela câmara seria aumentar o tempo de exposição do sensor. No entanto, também esta solução se revelou parcialmente desadequada, uma vez que a luminosidade ambiente era de tal modo elevada que, embora filtrada pelo filtro óptico, afectava seriamente o contraste entre a marca dos alvos e o fundo da imagem. Na realidade, na câmara C_1 , que se encontrava posicionada de frente para o Sol, foi necessário reduzir o tempo de exposição para 300 μs , enquanto que na câmara C_2 o tempo de exposição foi fixado em 750 μs . Na Figura 6.38 apresenta-se um par de imagens adquiridas pelas duas câmaras. Como se constata, em resultado do maior tempo de exposição, as marcas geradas pelos LEDs na imagem da câmara C_2 (direita) apresentam maior dimensão e brilho que as correspondentes na câmara C_1 (esquerda).

¹⁴ A alternativa, passaria por conceber o dispositivo de fixação do LED à estrutura de suporte de tal forma que a orientação de radiação fosse na direcção do eixo óptico do subsistema de visão. Todavia, esta solução não foi adoptada por ser muito difícil de concretizar (rotação do dispositivo de fixação segundo dois eixos).

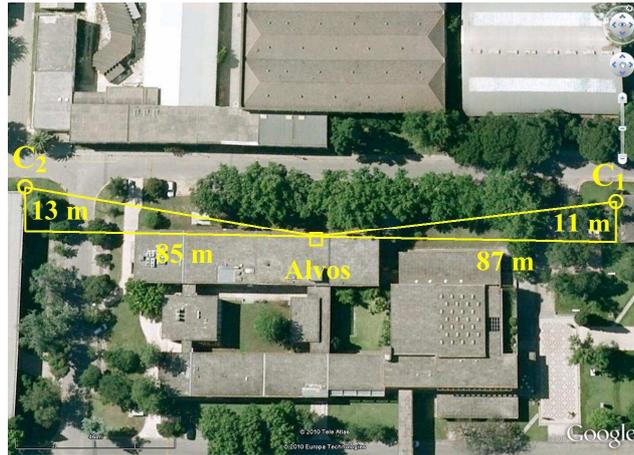


Figura 6.35 – Posicionamento dos subsistemas de visão relativamente à posição do sistema de alvos (distâncias aproximadas) (fonte: Google Earth).



Figura 6.36 – Posicionamento do sistema de alvos na cobertura do edifício.



Figura 6.37 – Linha de vista do sistema de alvos para as câmaras C_1 (esq.) e C_2 (dir.).

6.3.2.1 Processamento das Imagens

Na execução do ensaio optou-se por adquirir e gravar as imagens em disco rígido e proceder ao seu processamento numa fase posterior ao ensaio. Desta forma pretendia-se garantir a monitorização do algoritmo de processamento de imagem e, eventualmente, afinar os parâmetros do mesmo em função das características das imagens. Contudo, atendendo à elevada resolução das imagens, foi decidido limitar a frequência de aquisição a 5 imagens/segundo, de forma a tornar comportável o espaço necessário para o armazenamento das mesmas.

O algoritmo de processamento para a determinação das coordenadas dos alvos nas imagens foi desenvolvido em ambiente *Matlab* e, basicamente, envolvia a determinação das coordenadas do centro de massa de cada uma das marcas. Para o efeito, era fornecida ao algoritmo uma estimativa das coordenadas de posição de cada um dos alvos, na primeira imagem de cada uma das câmaras, e a dimensão da janela para o cálculo do centro de massa da marca, com base na intensidade dos píxeis (níveis de cinzento) abrangidos pela janela.

Apesar dos esforços desencadeados, não foi possível evitar que alguns dos LEDs, nomeadamente os correspondentes aos alvos 1 e 5 ficassem temporariamente obstruídos pela cobertura do edifício e os correspondentes aos alvos 9 e 13 fossem obstruídos, esporadicamente, pelo movimento das folhas de uma das árvores que se encontrava nas proximidades da linha de vista com o subsistema de visão C_1 . Houve ainda situações pontuais, em que devido à fraca qualidade das imagens adquiridas não foi possível recuperar a posição da totalidade dos alvos que se encontravam em linha de vista. Nestes casos, os alvos obstruídos foram simplesmente excluídos do processo de cálculo.

6.3.2.2 Resultados Obtidos

6.3.2.2.1 Calibração do Sistema de Visão

A calibração do sistema de visão foi realizada de acordo com o procedimento descrito no Capítulo 4, nomeadamente através da aplicação sequencial das etapas: i) estabelecimento do sistema de coordenadas nas câmaras; ii) reconstrução afim; iii) reconstrução Euclidiana, com base na restrição de relação de comprimento de segmentos; iv) reconstrução métrica; e v) fixação da orientação do sistema de coordenadas de referência.

Assim, para este efeito foram adquiridas cerca de 250 imagens, por cada uma das câmaras, com o sistema de alvos posicionado na zona central de movimento vertical e horizontal (≈ 100 mm). A aquisição das imagens decorreu durante o período da tarde, num dia de grande luminosidade ambiente, em que a temperatura ambiente, à sombra, foi superior a 30 °C. Na Figura 6.39 mostra-se uma panorâmica do equipamento, em pleno funcionamento, composto pelos

dois subsistemas de visão, computadores e respectivos acessórios (cabos de interligação, fontes de alimentação, etc.).

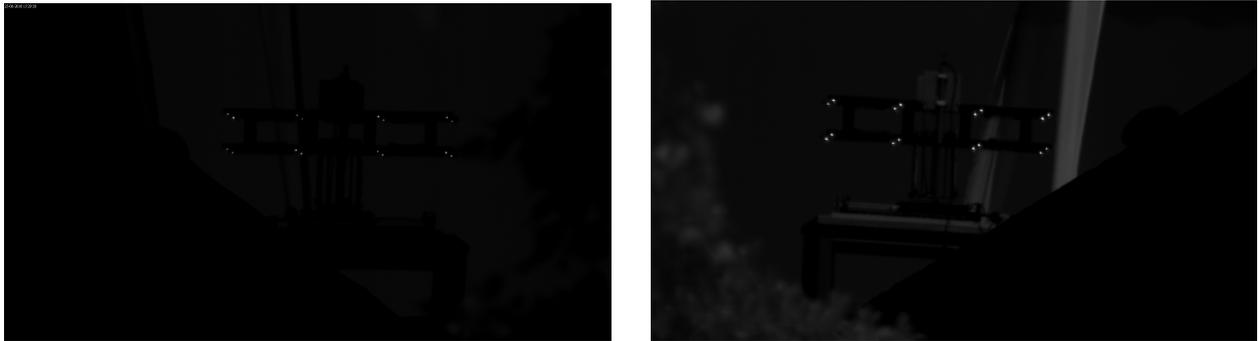


Figura 6.38 – Imagens com a resolução de 1920×1080 píxeis, adquiridas pelas câmaras C_1 (esq.) e C_2 (dir.).



Figura 6.39 – Equipamento de ensaio, composto pelos subsistemas de visão C_1 (esq.) e C_2 (dir.).

Como referido anteriormente, os alvos 1 e 9 não foram incluídos no procedimento de calibração do sistema de visão em virtude da obstrução provocada pelo movimento das folhas da árvore. Por este motivo, o número máximo de alvos utilizados no processo de calibração ficou reduzido a 14 alvos.

Seguidamente apresentam-se os resultados de calibração obtidos para diferentes situações, de acordo com o procedimento adoptado:

A1) Utilização de 14 alvos em cerca de 250 imagens adquiridas. O conjunto de restrições para a determinação da matriz H (reconstrução Euclidiana) foi formulado a partir do conhecimento da distância entre os alvos 2 – 3 – 6 – 7 e 10 – 11 – 14 – 15, em cada uma das imagens adquiridas¹⁵, tal como descrito no Capítulo 4.

A2) Utilização de 14 alvos em cerca de 250 imagens adquiridas, com determinação da imagem média. Neste caso, o conjunto de restrições foi formulado usando os mesmos alvos indicados para o caso anterior, mas aplicado à imagem média.

¹⁵ Em teoria bastaria uma única imagem, uma vez que é suposto não existir rotação do objecto entre imagens. No entanto, a formulação das restrições a partir de várias imagens torna-se útil na presença de ruído.

B1) Utilização de 4 alvos – configuração mínima – em cerca de 250 imagens (procedimento idêntico a A1).

B2) Utilização de 4 alvos – configuração mínima – em cerca de 250 imagens com determinação da imagem média (procedimento idêntico a A2).

Na Tabela 6.8 apresentam-se os parâmetros intrínsecos e extrínsecos estimados¹⁶ e calculados para os dois subsistemas de visão, considerando as distâncias e posicionamento indicadas na Figura 6.35 e Tabela 6.7. Os valores de distância indicados são valores aproximados, principalmente o valor respeitante à componente vertical (Y_C), o qual foi obtido por estimação. A primeira conclusão a tirar é a de que não existem diferenças significativas entre os resultados obtidos com 4 alvos e com 14 alvos, embora no primeiro caso se note uma muito ligeira degradação dos resultados. Do mesmo modo, no caso presente, também não se vislumbram diferenças significativas entre o método de determinação da imagem média e o método alternativo. No entanto, importa realçar que o método baseado na determinação da imagem média é mais rápido a executar e requer menos recursos, nomeadamente de capacidade de memória.

Tabela 6.7 – Parâmetros extrínsecos (estimativa) dos subsistemas de visão – ensaio de exterior.

Coordenadas	Câmara C_1				Câmara C_2			
	X_C (m)	Y_C (m)	Z_C (m)	Z_0 (m)	X_C (m)	Y_C (m)	Z_C (m)	Z_0 (m)
	11,0	9,5	- 87,0	88,2	13,0	10,0	85,0	86,6

Tabela 6.8 – Parâmetros intrínsecos e extrínsecos obtidos após a realização da calibração dos subsistemas de visão – ensaio de exterior.

Parâmetro	Câmara C_1					Câmara C_2				
	Estimado	Obtido				Estimado	Obtido			
		A1	A2	B1	B2		A1	A2	B1	B2
k_a	0,8657	0,8861	0,8841	0,8887	0,8875	0,8817	0,8691	0,8679	0,8675	0,8667
f (mm)	565	578	576	579	579	565	557	556	556	555
s_a	0	-0,0016	-0,0041	-0,0013	-0,0022	0	-0,0022	0,0010	-0,0010	0,0024
γ_a	1	0,9963	0,9981	0,9929	0,9946	1	1,0039	1,0021	1,0090	1,0052
ϕ (°)	6,2	5,0	5,5	5,8	5,8	6,6	6,3	6,1	5,6	6,2
θ (°)	- 7,2	- 7,9	-7,9	-8,1	-8,2	188,7	188,5	188,5	188,0	188,6
ψ (°)		- 1,5	-1,5	-1,8	-1,7		-3,0	-3,1	-3,2	-3,2

¹⁶ Como mencionado, as ópticas utilizadas possuem uma distância focal de 300 mm e encontravam-se acopladas a multiplicadores ópticos com factor multiplicador de 2x. Quer isto dizer que a distância focal do sistema óptico deveria ser, aproximadamente, 600 mm. No entanto, testes realizados permitiram estimar a distância focal de cada um dos sistemas ópticos como sendo, aproximadamente, 565 mm.

Relativamente aos parâmetros extrínsecos obtidos, não é possível fazer uma avaliação rigorosa uma vez que para tal seria necessário proceder ao levantamento topográfico da posição de cada um dos subsistemas de visão. Todavia, ainda assim é possível verificar que os valores obtidos são consistentes com os valores esperados e as diferenças não são significativas. Quanto aos parâmetros intrínsecos γ_a e s_a , considerando as especificações fornecidas pelo fabricante da câmara de vídeo, verifica-se uma grande concordância entre os valores obtidos e os esperados. Por último, relativamente à distância focal, verifica-se uma ligeira diferença entre os valores esperado e obtido, que no caso mais desfavorável (câmara C_1) é inferior a 2,5%. Importa ter presente que na determinação da distância focal foi assumido que a distância entre o sistema de coordenadas da câmara e o sistema de coordenadas de referência (Z_0) era a indicada na Tabela 6.7, a qual estará, certamente, afectada de erro e poderá justificar a diferença obtida.

Face ao grau de incerteza associado aos valores de referência considera-se que, em termos globais, os valores obtidos dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos apresentam uma boa concordância relativamente aos valores de referência.

6.3.2.2.2 Seguimento do Movimento do Sistema de Alvos

O algoritmo de estimação do movimento do sistema de alvos foi implementado de acordo com o método descrito no Capítulo 5. Atendendo a que no caso presente foi assumido que o movimento da estrutura de suporte de alvos acontecia, apenas, segundo as componentes vertical (Y) e transversal (X) e com ausência de rotação em torno dos três eixos, poder-se-ia ter optado por implementar a versão reduzida do estimador de movimento. No entanto, o estimador que foi implementado, e cujos resultados se apresentam a seguir, contempla as 22 variáveis de estado descritas no Capítulo 5. Para a generalidade das variáveis de estado, a parametrização adoptada para o estado inicial, assim como para a matriz de covariância, é a apresentada na Tabela 6.5. Todavia, sendo suposto não haver rotação, assumiu-se, para efeitos de parametrização do estimador, que o centro de rotação se encontrava posicionado na vizinhança do centroide do sistema de suporte dos alvos. Neste sentido, optou-se por atribuir igual valor à covariância das três variáveis de estado que compõem o vector de deslocamento, d , o mesmo acontecendo com as variáveis de estado que compõem os vectores de velocidade e de aceleração.

Para a avaliação da eficiência do sistema de medição foram impostos vários tipos de movimento ao sistema de alvos: i) estacionário; ii) horizontal; iii) vertical; iv) diagonal (horizontal e vertical em simultâneo); e v) diagonal em degrau (movimento horizontal alternado com movimento vertical). À semelhança do descrito anteriormente, as imagens foram adquiridas à frequência de 5 imagens/segundo e processadas à posteriori. Também neste caso não foi possível

usar a totalidade dos alvos, devido à obstrução da linha de vista e, em alguns casos, devido à diminuição da relação sinal/ruído, inviabilizando a determinação das coordenadas de projecção na imagem; na pior situação, o número de alvos empregues na estimação foi onze.

Na Figura 6.40 apresentam-se as curvas de deslocamento registados pelo sistema de referência e pelo sistema de visão para os vários movimentos impostos. Da observação dos gráficos verifica-se que o deslocamento registado pelo sistema de visão apresenta grande concordância com o registado pelo sistema de referência. Esta observação é complementada pelas Figuras 6.41 e 6.42, as quais mostram o erro de deslocamento segundo as componentes horizontal e vertical, assim como o movimento de rotação do sistema de alvos registado pelo sistema de visão.

Da análise dos gráficos referentes à rotação (Figura 6.41 (dir.)) é observável, nos casos de imposição de movimento segundo a componente horizontal, uma tendência consistente na componente de rotação em torno do eixo longitudinal (ψ). No entanto, na presença de movimento vertical da estrutura este efeito não se faz notar. Refira-se que a estrutura de suporte dos alvos se encontra ligada ao sistema de imposição de movimento pela zona central (zona de apoio).

Relativamente ao sinal de erro de deslocamento observa-se que este apresenta oscilação com amplitude considerável, tanto na componente transversal como na componente vertical, o mesmo acontecendo com as respectivas componentes de rotação. No caso da componente de rotação ψ , embora o efeito de vibração se verifique igualmente, a amplitude da oscilação é muito inferior, comparativamente à das restantes componentes. Para além disso, e assumindo que o sistema de alvos não foi sujeito a deslocamento longitudinal, observa-se que o erro de deslocamento segundo esta componente é predominante face às duas restantes, tal como tinha sido observado nos testes efectuados por meio de simulação numérica. A vibração que se observa no sinal de erro de deslocamento, assim como do sinal de rotação, pode, eventualmente, dever-se à existência de turbulência atmosférica¹⁷, à vibração da própria estrutura de suporte dos LEDs e à acção do vento, que se fazia sentir no dia do ensaio, sobre o sistema de alvos e, principalmente, sobre os subsistemas de visão.

De entre as várias fontes de perturbação, destacam-se: i) a intensa luminosidade ambiente e o posicionamento da câmara C_1 na direcção de radiação do Sol; ii) a grande área da cobertura do edifício exposta ao Sol, combinada com a hora de realização do ensaio, proporcionaram condições favoráveis à formação de turbulência atmosférica, que era visível à vista; iii) a acção do vento, sobre o sistema de alvos, mesa de suporte e ópticas (convém ter presente que as ópticas possuem uma área de exposição considerável); iv) a vibração e a rotação, não medidas, do siste-

¹⁷ Dia muito quente com formação de correntes térmicas ascendentes, perceptíveis a olho nu.

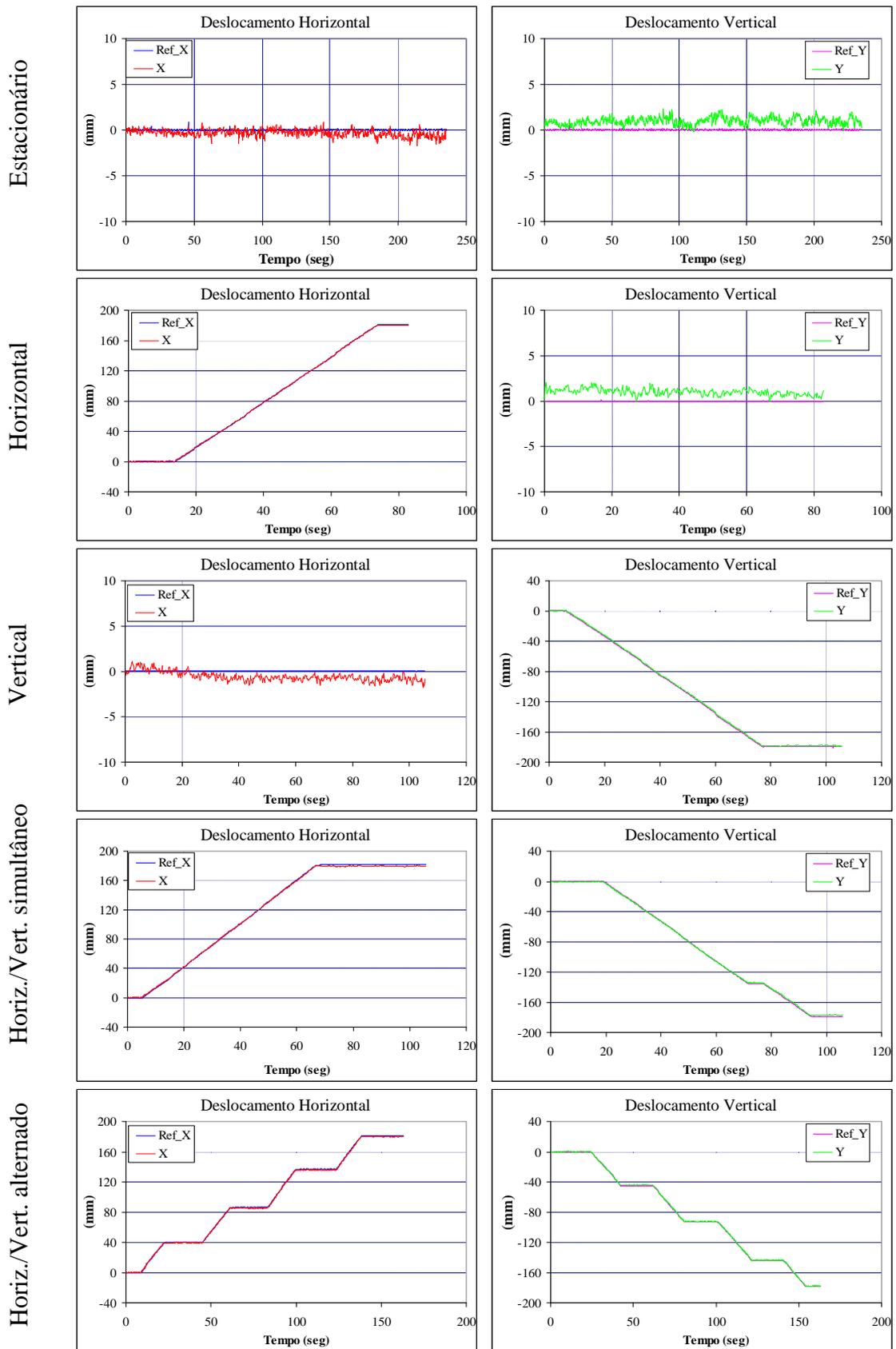


Figura 6.40 – Deslocamento registrado pelo sistema de medição de referência e estimado pelo sistema de visão (componentes horizontal e vertical), para vários movimentos impostos ao sistema de alvos – ensaio de exterior.

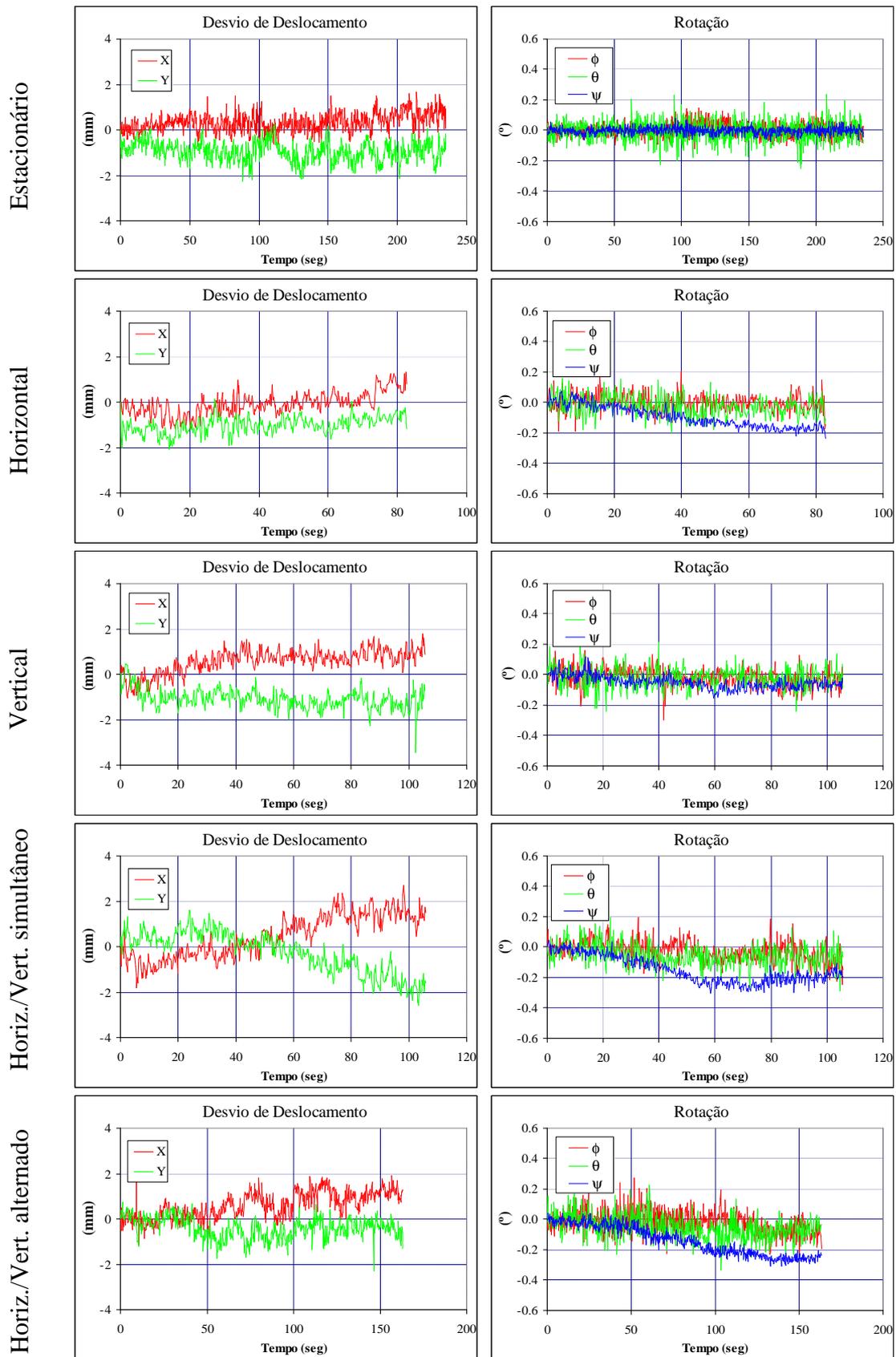


Figura 6.41 – Desvio de deslocamento, segundo as componentes horizontal e vertical (esq.), e rotação do sistema de alvos registada pelo sistema de visão (dir.) – ensaio de exterior.

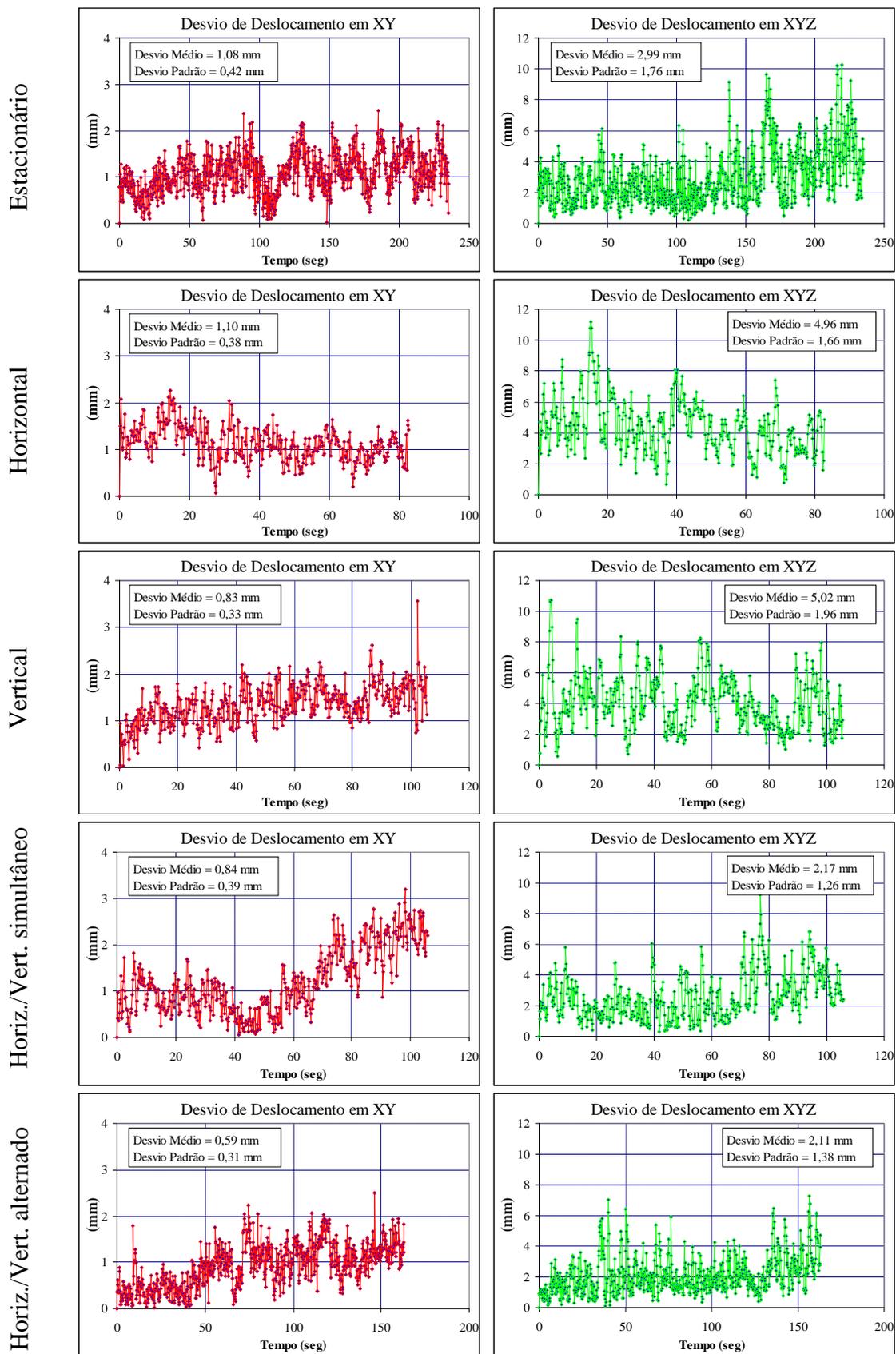


Figura 6.42 – Desvio de deslocamento registado no plano horizontal/vertical XY e no espaço XYZ, em função do tempo – ensaio de exterior.

ma de alvos quando em movimento; v) o desalinhamento dos subsistemas de visão face ao eixo de máxima radiação dos LEDs; e vi) a ausência de paralelismo/ortogonalidade dos planos formados pelos LEDs assim como o erro de distância entre os alvos, assumido no processo de calibração. Todavia, e apesar da influência de todas estas fontes de perturbação, pode-se afirmar que os resultados superaram, em muito, as expectativas iniciais, tendo-se obtido um DAM em XY da ordem de 1 mm e em XYZ inferior a 5 mm. De salientar também a forma como o estimador de movimento convergiu, em todos os casos, de forma rápida para a solução.

Tendo como objectivo a comparação dos resultados obtidos com e sem estimador de movimento IEKF, procedeu-se à estimação do movimento do sistema de alvos, fazendo uso dos mesmos dados, obtidos do processamento das imagens adquiridas. Na estimação do movimento do objecto sem estimador IEKF assumiu-se que a rotação do objecto acontecia em torno do seu centro geométrico, uma vez que era suposto, à partida, não existir rotação.

Nas Figuras 6.43 e 6.44 apresentam-se as curvas de rotação e de erro de deslocamento obtidas para as mesmas condições apresentadas anteriormente. Da comparação dos resultados obtidos com e sem estimador IEKF, é notório o bom desempenho do estimador de movimento, com uma forte intervenção na diminuição dos desvios de deslocamento segundo a componente longitudinal (Z) e da rotação segundo o eixo transversal (ϕ).

Tomando em consideração o factor de escala existente entre o caso real da P25A e o caso presente, pode-se concluir que o DAM de deslocamento em XY (plano vertical/horizontal) (inferior a 1,1 mm) é melhor que o valor que se fixara como objectivo a alcançar, confirmando assim a superação de um dos objectivos pretendidos.

6.3.3 Ensaio em Ambiente de Interior

Atendendo às condições existentes aquando da realização do ensaio de exterior, nomeadamente atmosféricas, foi decidido realizar um ensaio em ambiente de interior (interior de um pavilhão de grandes dimensões), na tentativa de reduzir o efeito adverso das fontes de perturbação, atrás mencionadas, sobre o sistema de visão. No entanto, como se veio a constatar posteriormente, este objectivo foi satisfeito apenas parcialmente, uma vez que o efeito de turbulência atmosférica¹⁸ ressurgiu novamente e de forma ainda mais intensa. Todavia, neste caso foi possí-

¹⁸ O pavilhão onde se realizou o ensaio é utilizado, geralmente, para a realização de ensaios em modelo físico de estruturas marítimas (ex. portos marítimos e barragens). Não sendo habitual a formação de turbulência atmosférica no interior de edifícios, neste caso, a coexistência de vários factores contribuíram para a formação deste efeito, nomeadamente: i) a temperatura ambiente superior a 40°C; ii) as grandes dimensões interiores do pavilhão; iii) a altura de cerca de 10 m entre o chão e a cobertura; iv) a maior parte do volume interior livre, principalmente a partir de 1 m de altura do solo; v) a existência de cobertura ventilada, juntamente com aberturas de grandes dimensões para o exterior; e vi) a existência de tanques com água, proporcionando a formação de vapor de água.

vel fazer uso dos 16 alvos, uma vez que não se verificaram quaisquer tipo de obstruções da linha de vista entre os LEDs e as câmaras.

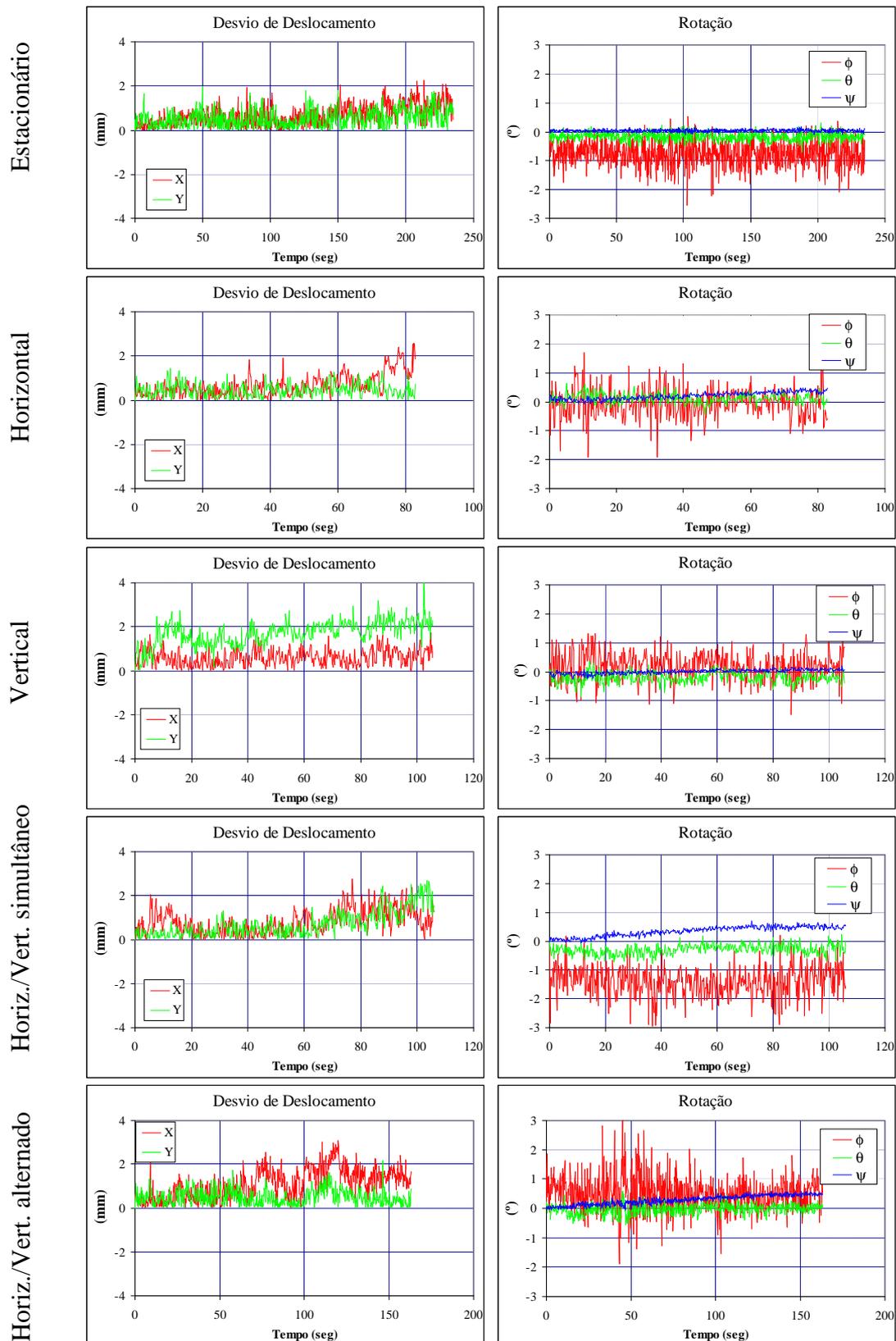


Figura 6.43 – Desvio de deslocamento, segundo as componentes horizontal e vertical (esq.), e rotação do sistema de alvos registada pelo sistema de visão (dir.) – ensaio de exterior – sem utilização do IEKF.

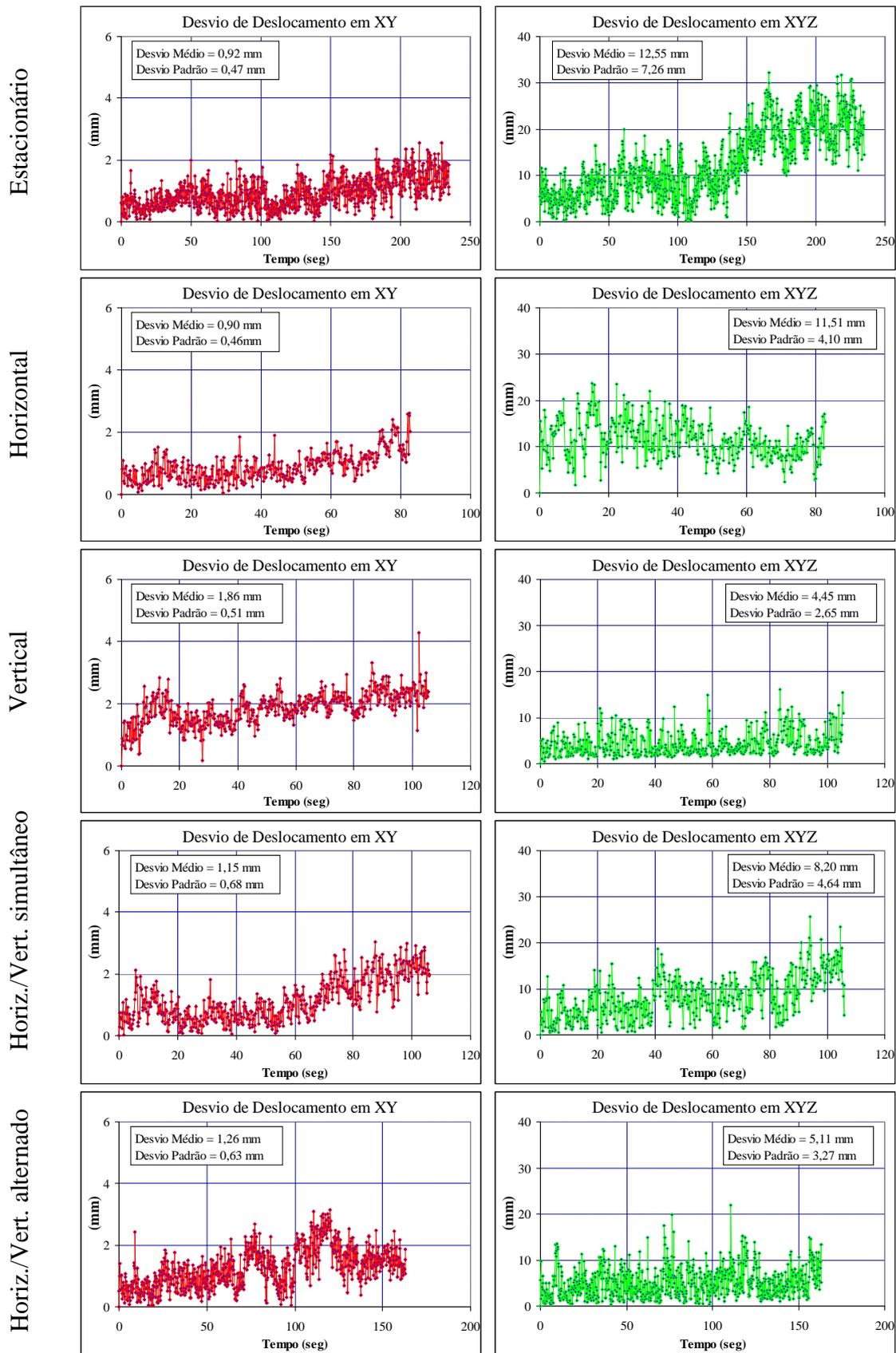


Figura 6.44 – Desvio de deslocamento registado no plano horizontal/vertical XY e no espaço XYZ, em função do tempo – ensaio de exterior – sem utilização do estimador IEKF de movimento.

A configuração adoptada para o posicionamento dos subsistemas de visão foi idêntica à usada no ensaio de exterior, tipo $SE - NE$ ¹⁹. Todavia, neste caso, devido à limitação do espaço houve necessidade de reduzir a distância entre as câmaras, assim como o desnível entre estas e o sistema de alvos (Figura 6.45).

O posicionamento das câmaras, segundo a componente transversal, resultou do compromisso entre a maximização da radiação (emitida pelos LEDs) recebida pelo sensor da câmara e a não sobreposição das marcas de projecção dos LEDs. Na Figura 6.46 mostra-se uma panorâmica geral do local de realização do ensaio e na Tabela 6.9 apresentam-se as coordenadas de posição estimadas para cada uma das câmaras.

Tabela 6.9 – Parâmetros extrínsecos (estimativa) dos subsistemas de visão – ensaio de interior.

Coordenadas	Câmara C_1				Câmara C_2			
	X_C (m)	Y_C (m)	Z_C (m)	Z_0 (m)	X_C (m)	Y_C (m)	Z_C (m)	Z_0 (m)
	7,4	2,0	- 55,1	55,6	7,5	2,5	50,6	51,2

Em termos genéricos, o procedimento de ensaio foi idêntico ao apresentado para o caso do ensaio exterior. Contudo, neste caso, a presença de um ambiente com muito menos luminosidade permitiu aumentar, de forma significativa, o tempo de exposição para 7,5 ms, obtendo-se um forte contraste entre a marca de projecção do LED e o fundo da imagem (Figura 6.47).

6.3.3.1 Resultados Obtidos

6.3.3.1.1 Calibração do Sistema de Visão

Para a calibração do sistema de medição foram adquiridas cerca de 250 imagens, com o sistema de alvos posicionado na zona central de movimento vertical e horizontal. No caso presente, os alvos utilizados na formulação das restrições, tendo em vista a reconstrução Euclidiana, foram 1 – 4 – 5 – 8 e 9 – 12 – 13 – 16. Na Tabela 6.10 apresentam-se os parâmetros intrínsecos e extrínsecos estimados e obtidos após a realização da calibração. Relativamente aos parâmetros γ_a e s_a verifica-se grande concordância entre os valores esperados e os valores obtidos. No caso da distância focal, o desvio entre o valor esperado e o valor obtido é cerca de 1,2% para uma das câmaras e cerca de 3,9% para a outra. Importa ter presente que o erro na estimação da posição das câmaras, ainda que pequeno, é suficiente para justificar as diferenças obtidas, o mesmo acontecendo com a diferença no valor do ângulo de rotação θ da câmara C_1 .

¹⁹ Foi adoptada esta configuração ao invés da configuração $S - N$, em virtude do desnível entre a posição do sistema de alvos e as câmaras não ser suficiente, para evitar a sobreposição das marcas dos alvos nas imagens.

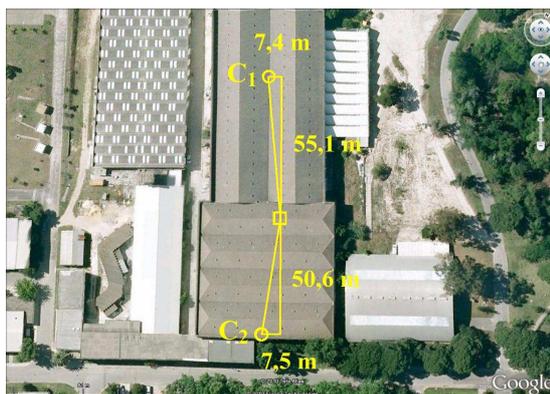


Figura 6.45 – Posicionamento dos subsistemas de visão relativamente à posição do sistema de alvos, no interior do pavilhão (distâncias aproximadas) (fonte: Google Earth).



Figura 6.46 – Linha de vista da câmara C_2 para o sistema de alvos (esq.). Imposição de movimento no sistema de alvos e linha de vista para a câmara C_1 (dir.).

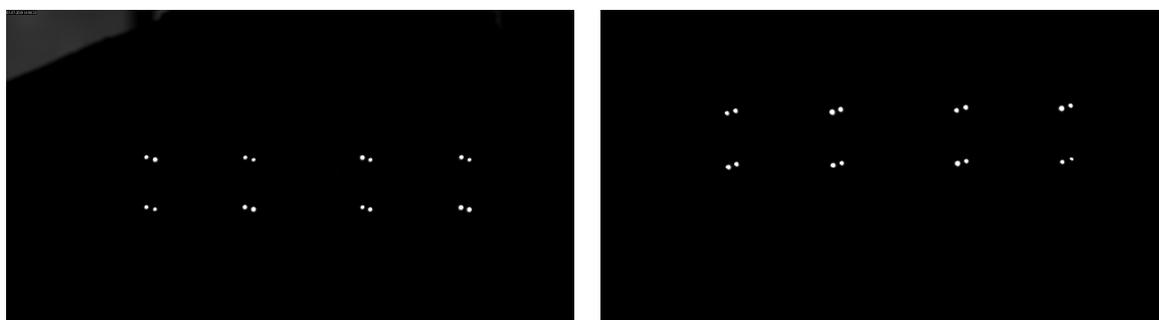


Figura 6.47 – Imagens adquiridas pela câmara C_1 (esq.) e pela câmara C_2 (dir.).

Em termos globais, à semelhança do verificado no ensaio de exterior, pode-se afirmar que a diferença de valores está concordante com a margem de erro das estimativas.

Importa realçar que, neste caso, os resultados obtidos são muito idênticos no conjunto dos quatro testes realizados; isto é, não se verificam diferenças significativas entre utilizar 4 ou 8 alvos e entre determinar a imagem média ou construir o conjunto de restrições de relação de comprimento para a totalidade das 250 imagens. A explicação tem a ver com a elevada relação sinal/ruído das imagens, a partir das quais foram determinadas as coordenadas de projecção dos alvos e, em resultado disso, foi possível obter observações com baixo ruído.

Tabela 6.10 – Parâmetros intrínsecos e extrínsecos obtidos após a realização da calibração dos subsistemas de visão – ensaio de interior.

Parâmetro	Câmara C_1					Câmara C_2				
	Estimado	Obtido				Estimado	Obtido			
		A1	A2	B1	B2		A1	A2	B1	B2
k_a	1,3732	1,3565	1,3553	1,3613	1,3600	1,4912	1,4369	1,4370	1,4334	1,4339
f (mm)	565	558	558	560	560	565	544	545	543	543
s_a	0	0,0000	-0,0002	0,0044	0,0044	0	0,0028	0,0027	-0,0020	-0,0020
γ_a	1	1,0018	1,0028	1,0006	1,0016	1	1,0075	1,0074	1,0101	1,0098
ϕ (°)	2,1	2,8	2,8	2,9	2,9	2,8	2,3	2,3	2,3	2,3
θ (°)	-7,6	-9,0	-9,0	-9,1	-9,1	188,4	189,2	189,2	189,2	189,2
ψ (°)		-0,4	-0,4	-0,5	-0,5		1,2	1,2	1,2	1,2

6.3.3.1.2 Seguimento do Movimento do Sistema de Alvos

À semelhança do verificado no processo de calibração, também neste caso o procedimento empregue no seguimento do movimento do sistema de alvos foi idêntico ao aplicado no caso do ensaio de exterior. Na Figura 6.48 apresentam-se alguns gráficos referentes a movimentos impostos ao sistema de alvos, onde consta o deslocamento registado pelo sistema de visão e pelo sistema de referência. Os movimentos impostos ao sistema de alvos contemplam movimento: i) estacionário; ii) horizontal; iii) vertical; iv) em diagonal, horizontal e vertical em simultâneo; e v) em diagonal por passos, horizontal e vertical em movimento alternado.

Da observação da Figura 6.48 constata-se que o sinal registado pelo sistema de visão segue com grande fidelidade o sinal registado pelo sistema de referência, ao longo de toda a gama de medição dos transdutores de deslocamento. As Figuras 6.49 e 6.50, nas quais está representado o erro de deslocamento, por componente e combinado (em XY e em XYZ), complementam esta observação.

Da análise dos gráficos da Figura 6.49 é possível verificar que o sinal de erro apresenta oscilação de baixa amplitude e, ocasionalmente, variações bruscas de comportamento (ressaltos), para além de alguma deriva. Na realidade, este efeito de deriva também é visível nos gráficos das Figuras 6.43 e 6.44 (ensaio de exterior), embora dissimulado pela presença da oscilação de alta frequência. No caso presente, esta tendência de deriva é mais clarividente e acontece, sobretudo, com o movimento da estrutura de alvos na direcção horizontal. A explicação para este comportamento pode dever-se a um eventual desalinhamento entre os planos de medição dos transdutores de deslocamento (referência) e a orientação do sistema de coordenadas do sistema de visão, a

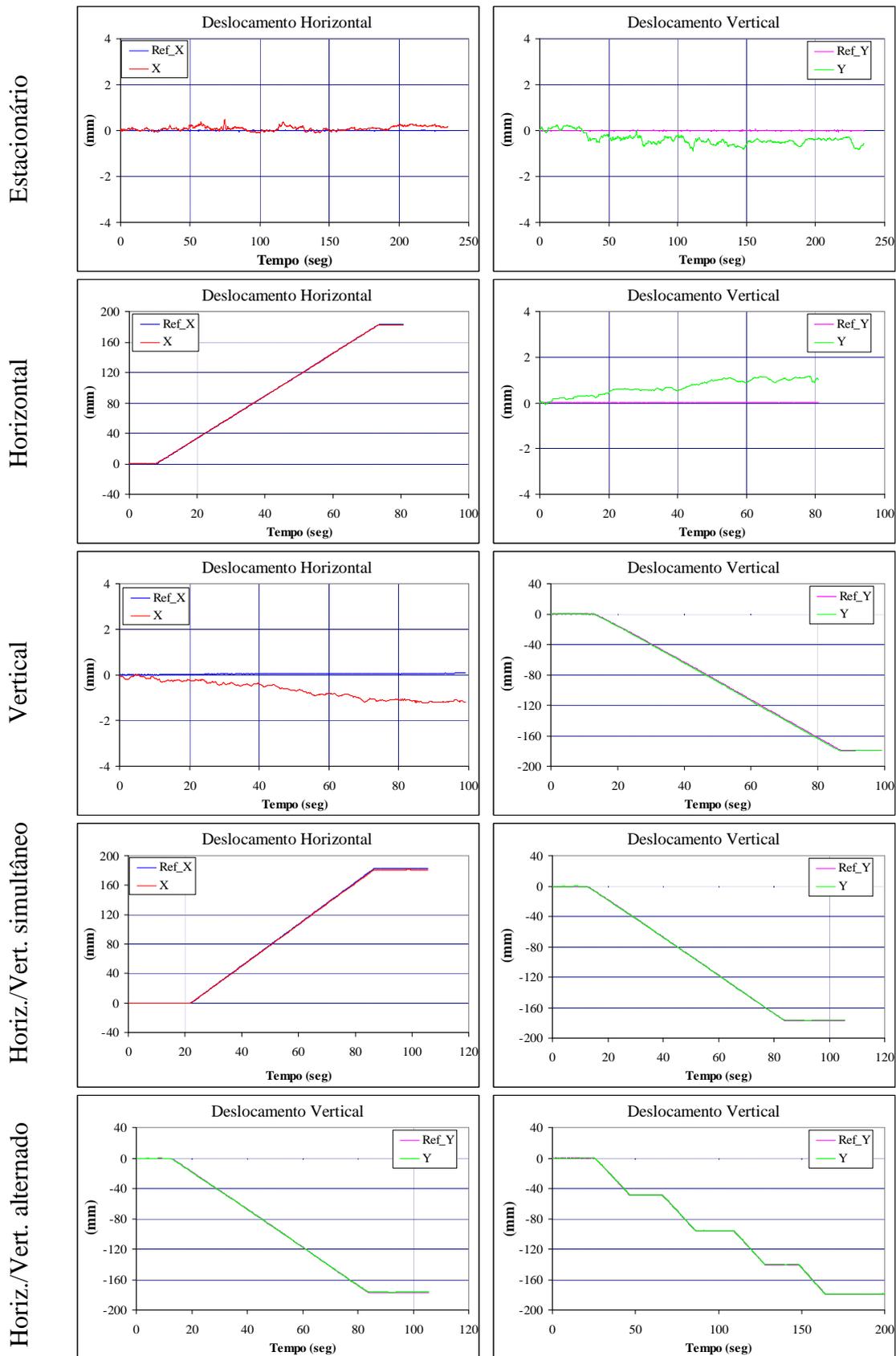


Figura 6.48 – Deslocamento registrado pelo sistema de medição de referência e estimado pelo sistema de visão (componentes horizontal e vertical), para vários movimentos impostos ao sistema de alvos – ensaio de interior.

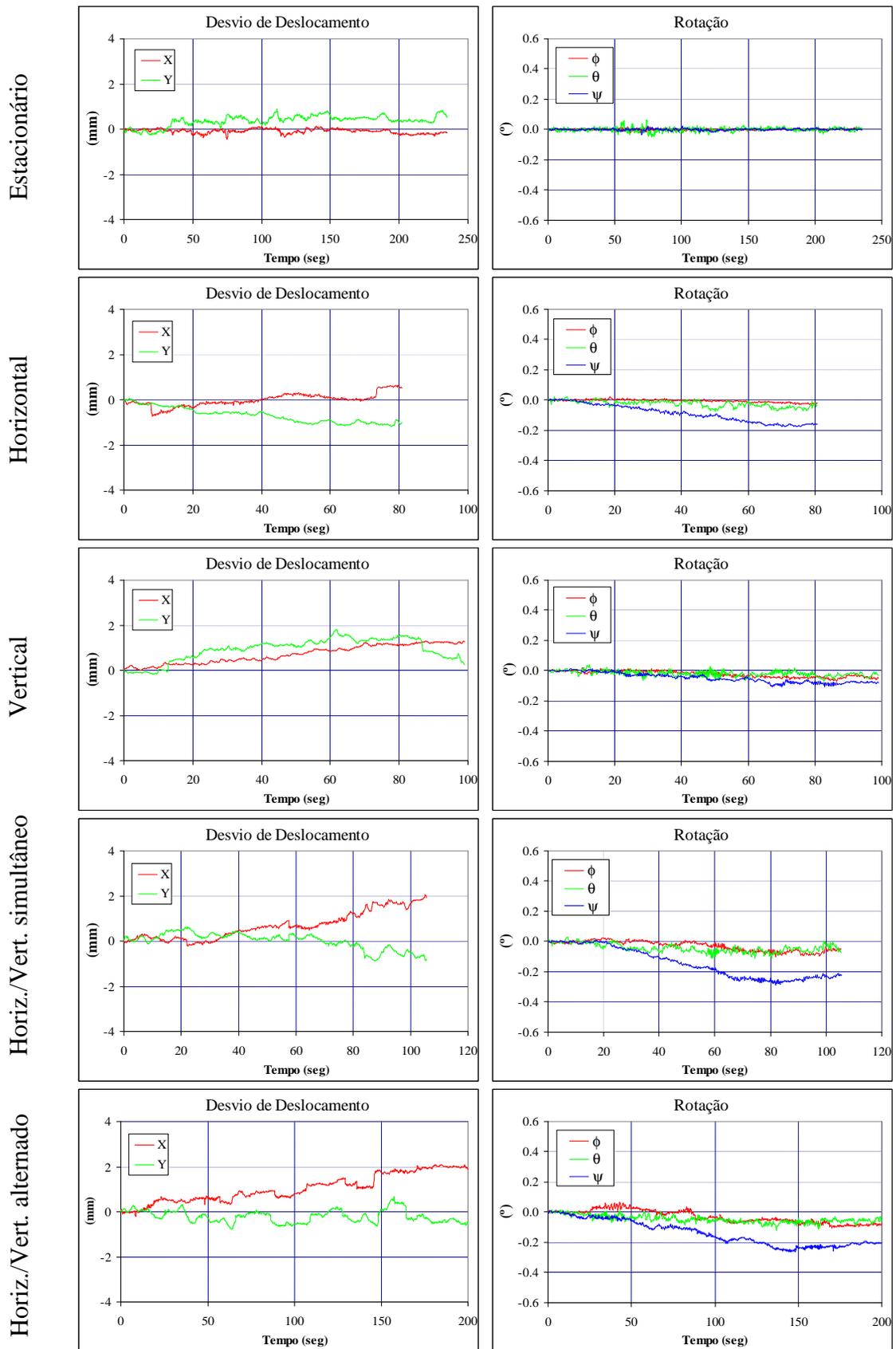


Figura 6.49 – Desvio de deslocamento, segundo as componentes horizontal e vertical (esq.), e rotação do sistema de alvos registada pelo sistema de visão (dir.) – ensaio de interior.

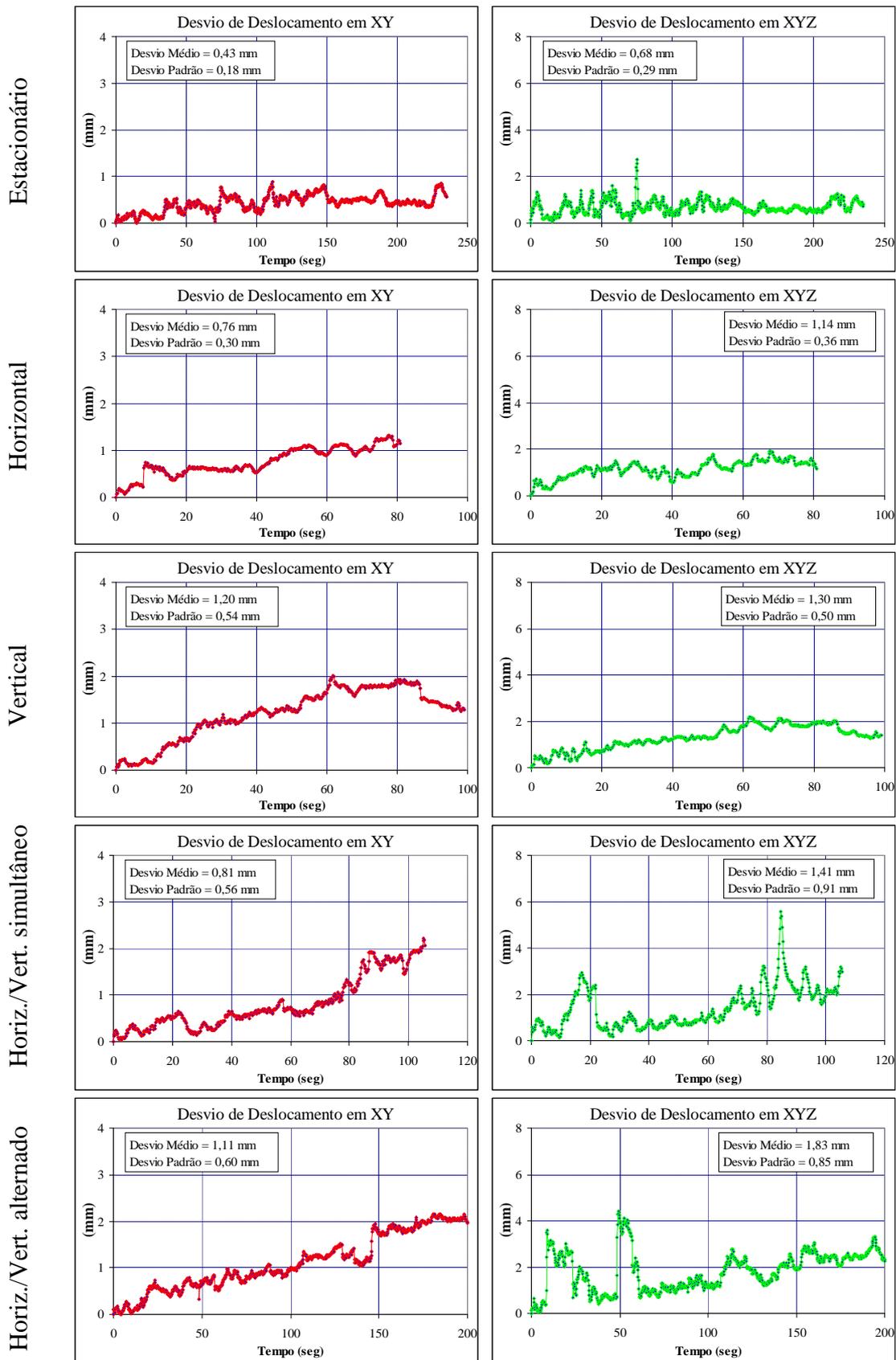


Figura 6.50 – Desvio de deslocamento registado no plano horizontal/vertical XY e no espaço XYZ, em função do tempo – ensaio de interior.

qual foi estabelecida com base no pressuposto de que a posição dos LEDs definem um sistema ortonormado (ver secção 6.3.3.1.3, adiante). Acresce o facto do sistema de visão ter registado movimento de rotação do sistema de alvos, nomeadamente em torno do eixo longitudinal (ψ), o qual era suposto não existir.

Relativamente ao efeito de variação brusca (ressaltos) do sinal de desvio, a causa pode dever-se a atrito do sistema de imposição de movimento e ou a efeitos de turbulência atmosférica que se fazia sentir no interior do pavilhão. Na realidade, a elevada temperatura ambiente existente no interior do pavilhão, aquando da realização da aquisição das imagens (estimativa de temperatura superior a 40 °C), juntamente com o enorme espaço vazio e a altura entre o piso e a cobertura contribuíram, certamente, para a formação do fenómeno de turbulência atmosférica.

Em forma de conclusão, é importante ressaltar o aumento, francamente notório, do desempenho do sistema de medição na generalidade dos parâmetros medidos e em particular, do desvio de deslocamento medido em XYZ, comparativamente ao registado no ensaio de exterior, fruto das condições mais favoráveis para a realização do ensaio, nomeadamente da luminosidade ambiente e da acção do vento. Considerando os resultados mais penalizadores, ainda assim o DAM em XY foi inferior a 1,20 mm e a 1,8 mm em XYZ.

De forma a avaliar a influência do número de alvos empregues na calibração e na estimação do movimento do sistema de alvos e a obter informações adicionais que permitissem esclarecer o comportamento de deriva do sinal de erro de deslocamento, foi executado um teste adicional que consistiu em usar os mesmos dados utilizados no teste anterior, mas de apenas quatro alvos, mais concretamente os alvos nº 1 – 4 – 5 – 12 (Figura 6.32), tendo-se ignorado os dados referentes aos restantes alvos. Nas Figuras 6.51 e 6.52 apresentam-se os gráficos de erro de deslocamento e a rotação registada pelo sistema de visão, correspondentes às novas condições de cálculo.

Comparando os gráficos das Figuras 6.49 e 6.50, obtidos com os 16 alvos, com os correspondentes das Figuras 6.51 e 6.52, obtidos com apenas 4 alvos, verifica-se que o desvio de deslocamento apresenta, globalmente, uma tendência muito semelhante em ambos os casos, o mesmo acontecendo com os valores do DAM em XY e em XYZ; igualmente semelhante são as curvas das componentes de rotação.

Contrariamente ao verificado nos testes de simulação numérica, neste caso, o aumento do número de alvos não se reflectiu numa diminuição significativa do valor do desvio de deslocamento, como seria expectável. Este efeito pode ser explicado pela presença de uma perturbação muito forte, predominante face às restantes fontes de ruído e abrangendo todos os alvos de uma

forma mais ou menos uniforme, como por exemplo a turbulência atmosférica. Nestas condições, com todos os alvos expostos à influência da mesma fonte de perturbação, o factor número de alvos empregues na estimação do movimento deixa de ter relevância, como se verificou com o teste realizado. Importa realçar que no caso presente os alvos têm pequena dimensão e, principalmente, estão concentrados num volume muito reduzido, criando condições favoráveis para a existência de uma perturbação generalizada²⁰. Outra hipótese, já referida anteriormente, pode residir no desalinhamento entre os dois sistemas de eixos, dos transdutores de deslocamento e do sistema de visão (algo para investigar futuramente).

Em suma, considerando o factor de escala existente entre o caso real da P25A e o caso presente, afigura-se que no modo de configuração mínima, quatro alvos e duas câmaras são suficientes para alcançar o objectivo pretendido em termos de grau de exactidão.

6.3.3.1.3 Recriação das Condições de Ensaio por Meio de Simulação Numérica

Tendo-se concluído a execução dos ensaios com modelo físico, o procedimento natural seria comparar os resultados obtidos neste caso com os obtidos por meio de simulação numérica. Todavia, as condições consideradas na recriação dos cenários de teste são distintas das condições de realização dos ensaios com modelo físico, nomeadamente em termos de parâmetros extrínsecos e das características do alvo. Perante este facto, e considerando apenas o factor de escala, poder-se-ia correr o risco de comparar resultados que não são comparáveis. Por este motivo, procurou-se recriar, tanto quanto possível, as condições de realização do ensaio de interior por meio de simulação numérica, tendo-se considerado para este efeito os parâmetros intrínsecos e extrínsecos apresentados nas Tabelas 6.2 e 6.9, respectivamente. Para além disso, foi também reproduzido, por meio de simulação numérica, o movimento imposto ao sistema de alvos. Outro aspecto importante para o estudo comparativo foi a reprodução do sistema de alvos, em termos de posição de cada um dos LEDs, tendo-se simulado a posição do alvo pela posição do respectivo par de LEDs (valor verdadeiro, registado pela máquina 3D).

Os gráficos da Figura 6.53 mostram o deslocamento de referência imposto ao sistema de alvos e o obtido por meio de simulação numérica, considerando uma perturbação de dois píxeis de ruído nas fases de calibração e de seguimento. Na Figura 6.54 mostra-se o respectivo desvio de deslocamento medido em XY e em XYZ .

²⁰ Numa estrutura de grandes dimensões, como a P25A, haverá a possibilidade de utilizar alvos formados por vários LEDs (cf. Anexo IV), distribuídos por um volume mais alargado e, desta forma, diminuir a probabilidade do efeito perturbante em simultâneo sobre todos os alvos.

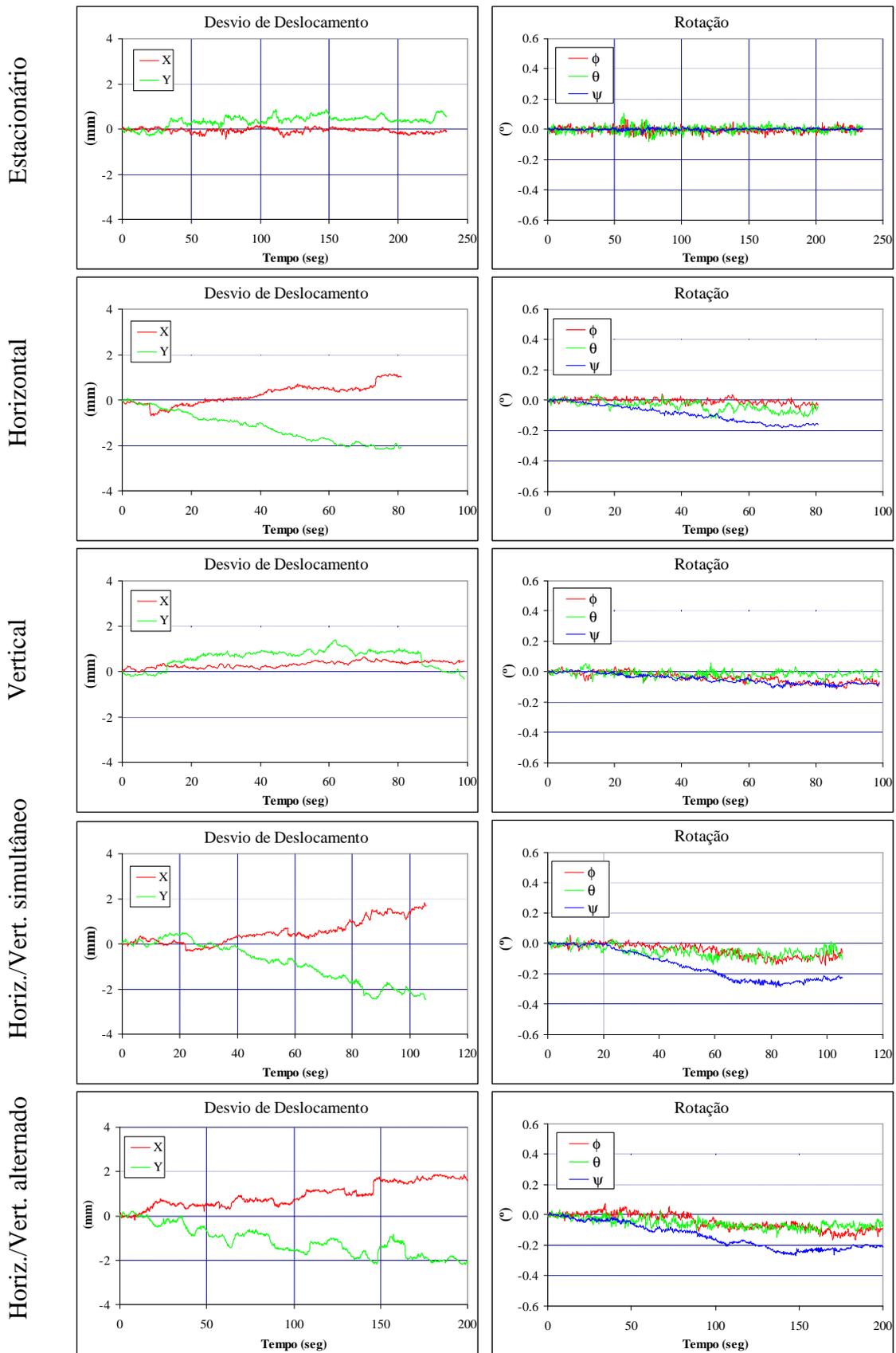


Figura 6.51 – Desvio de deslocamento, segundo as componentes horizontal e vertical (esq.), e rotação do sistema de alvos registada pelo sistema de visão (dir.), obtidos com apenas quatro alvos (nº 1, 4, 5 e 12) – ensaio de interior.

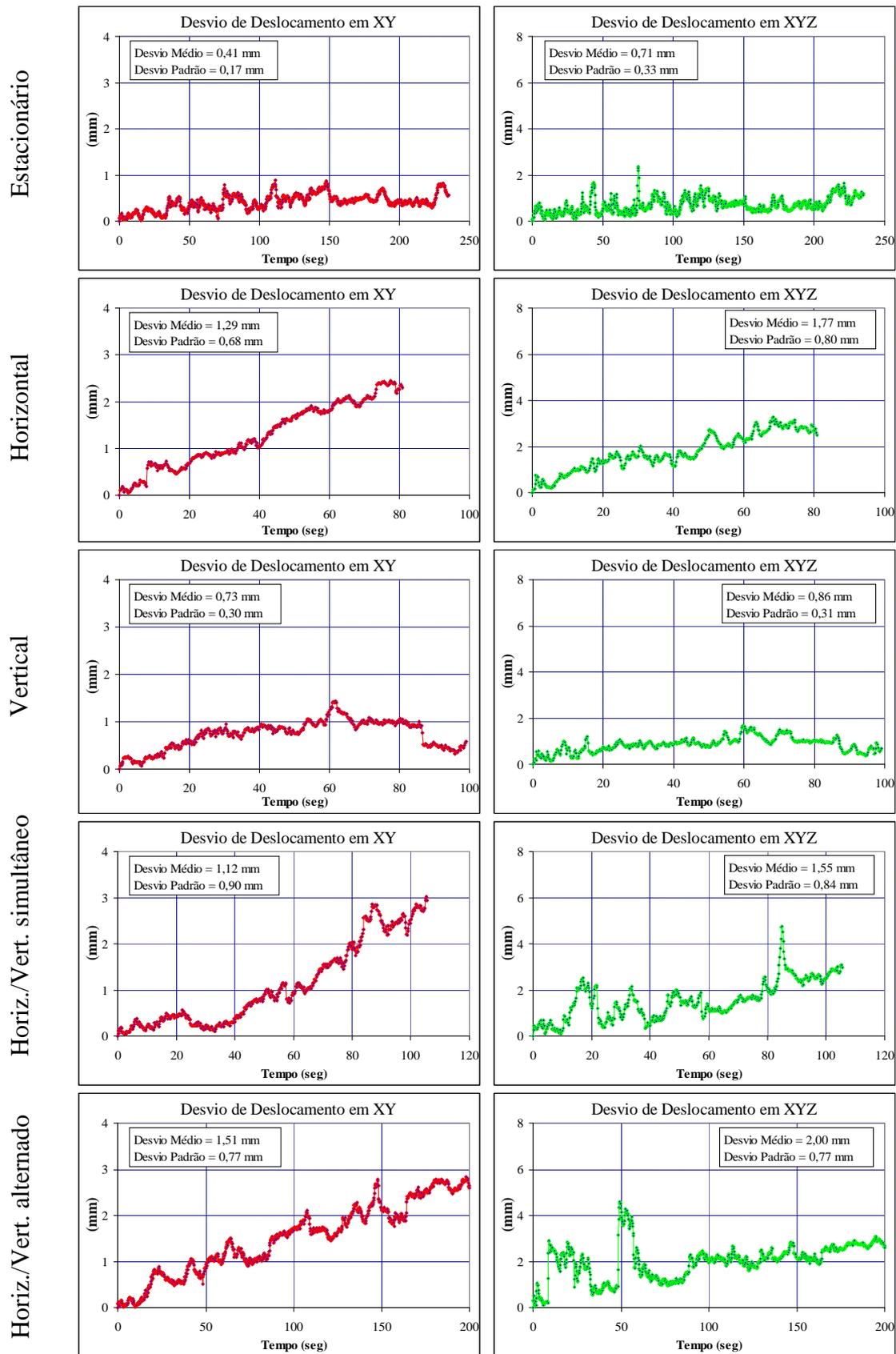


Figura 6.52 – Desvio de deslocamento registado no plano horizontal/vertical XY e no espaço XYZ, em função do tempo, obtidos com apenas quatro alvos (nº 1, 4, 5 e 12) – ensaio de interior.

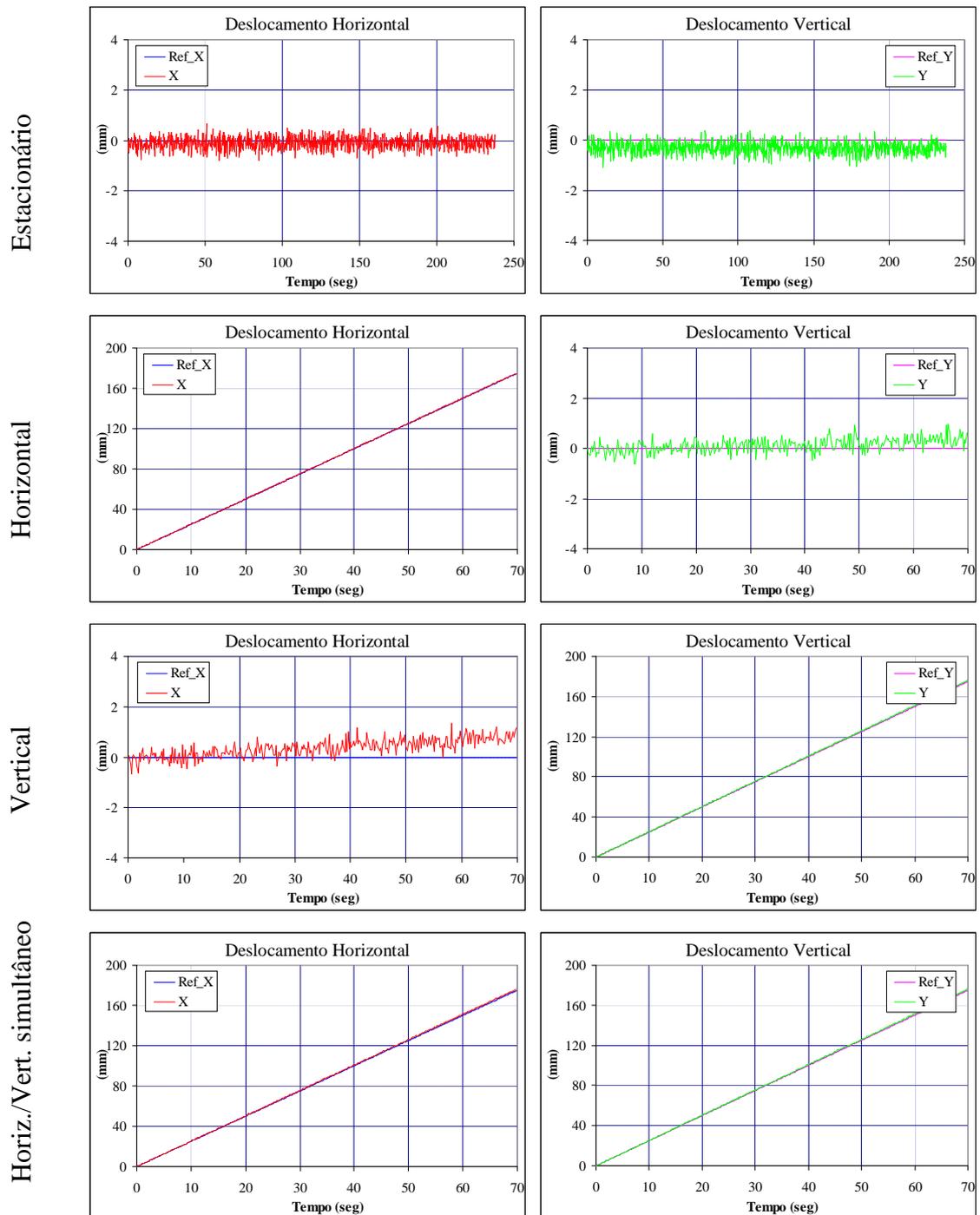


Figura 6.53 – Deslocamento de referência e deslocamento obtido por meio de simulação numérica, considerando uma perturbação de dois píxeis de ruído nas fases de calibração e de seguimento.

À semelhança do verificado nos dois ensaios reais, também neste caso é observável uma deriva do sinal de desvio em XY e em XYZ, quando o movimento imposto contempla a componente na direcção vertical. A explicação para este fenómeno reside na orientação do sistema de coordenadas estabelecido durante o processo de calibração. A orientação deste sistema de coordenadas foi estabelecida partindo do princípio de que os planos formados pelos LEDs correspondentes eram ortonormais entre si e paralelos aos planos de medição dos transdutores de desloca-

mento. Testes realizados por meio de simulação numérica, considerando uma disposição de LEDs similar à utilizada no modelo físico, mas satisfazendo, rigorosamente, os critérios de paralelismo e de ortogonalidade de planos, mostraram ausência de deriva.

Em face destes resultados, para esclarecer devidamente a origem da deriva do sinal, será necessário recolher informação que permita quantificar o paralelismo entre os planos de medição dos dois transdutores de deslocamento e dos respectivos planos definidos pela posição dos LEDs correspondentes (usados na determinação da matriz de rotação B).

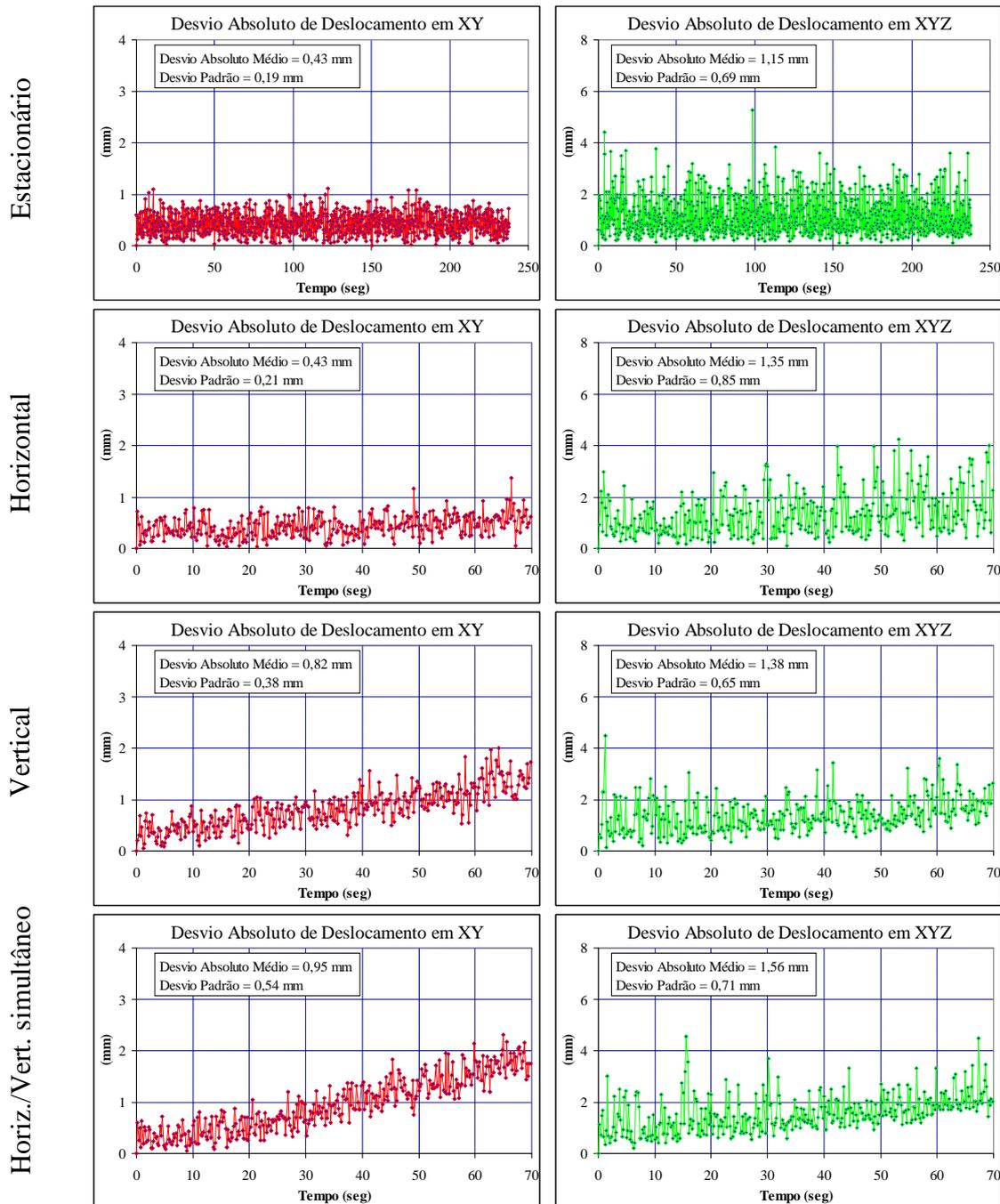


Figura 6.54 – Desvio de deslocamento registado no plano horizontal/vertical XY e no espaço XYZ, em função do tempo, considerando dois píxeis de ruído nas fases de calibração e de seguimento.

Comparando os resultados obtidos por meio de simulação numérica com os obtidos com modelo físico verifica-se não existirem diferenças significativas entre os valores de DAM obtidos nos dois casos. De um modo geral, os valores de DAM em XY são menores no modelo simulado, enquanto que em XYZ os menores valores de DAM foram obtidos com o modelo físico. Para além disso, com exceção das variações bruscas que se observam nos gráficos, globalmente, pode-se dizer que o comportamento do sinal de desvio apresenta uma tendência com muitas semelhanças com o obtido durante o ensaio realizado com modelo físico. Esta constatação, reforça a validade dos resultados obtidos por simulação numérica aplicada a cenários de longa distância.

6.4 Conclusões

Ao longo do presente capítulo foram descritos os ensaios realizados, por meio de simulação numérica e com modelo reduzido (via experimental), e apresentados os respectivos resultados obtidos. Com este estudo pretendeu-se avaliar a eficiência e a robustez das metodologias de calibração e de estimação de movimento do tabuleiro, em função de vários cenários de perturbação do sistema de medição (ruído), de configuração de câmaras e de número de alvos empregues. Os testes foram conduzidos no sentido de permitirem avaliar os parâmetros de calibração (intrínsecos e extrínsecos) dos subsistemas de visão e o desvio verificado no seguimento do movimento de translação e de rotação do tabuleiro.

Os resultados obtidos, quer em termos de estimação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos, quer em termos de estimação do movimento de translação e de rotação do tabuleiro, permitem concluir que os procedimentos de calibração e de seguimento são realizáveis, eficientes e robustos à presença de perturbações.

Assim, no caso mais desfavorável (perturbação de dois píxeis), considerando uma configuração composta por duas câmaras e quatro alvos, o valor do desvio da distância focal foi da ordem de 1 mm. Com a duplicação do número de alvos, para oito, o valor do desvio diminuiu para cerca de 0,3 mm. Para o caso de configurações compostas por três ou mais câmaras, bastou conhecer uma distância entre dois alvos para calibrar o sistema de visão, tendo-se obtido um desvio médio da distância focal de aproximadamente 1 mm, com um nível de ruído de dois píxeis.

Também a aplicação do IEKF na estimação do movimento do tabuleiro (e do sistema de alvos – ensaio com modelo físico) mostrou ser eficaz e eficiente, convergindo rapidamente para a solução, apesar de se ter assumido desconhecer os valores iniciais do vector de estado. Com

apenas duas câmaras e quatro alvos, tanto na calibração como no seguimento, e para um nível de ruído de dois píxeis nas observações, o valor do desvio foi inferior a 9 mm em XY e inferior a 20 mm em XYZ .

O estudo realizado por meio de simulação numérica permitiu ainda concluir que numa configuração em que se utilizem apenas duas câmaras e em que não seja possível posicionar as câmaras de forma a garantir uma distância significativa entre estas, é preferível adoptar uma configuração do tipo frente-a-frente, em alternativa à habitual configuração estéreo, lado-a-lado, conseguindo-se melhor eficiência no primeiro caso. No caso específico da P25A, de acordo com os resultados obtidos, com esta configuração e com as câmaras afastadas entre si de uma distância de 40 m, não é possível satisfazer o grau de exactidão pretendido; para satisfazer a exactidão pretendida seria necessário afastar as câmaras de forma a garantir uma distância superior a cerca de 80 m entre elas.

No caso dos ensaios realizados com modelo físico, à escala aproximada de 1:7, o sistema de visão registou o movimento do sistema de alvos com um desvio absoluto médio em XY inferior a 1,3 mm e inferior a 5 mm em XYZ (caso mais desfavorável). Para além disso, tornou-se evidente que a turbulência atmosférica e a acção do vento constituem sérios obstáculos à operacionalidade e à fiabilidade do sistema de visão sendo, por isso, conveniente investigar formas de reduzir o seu efeito perturbador para melhorar o desempenho do sistema.

De forma a avaliar o contributo do algoritmo de estimação de movimento na redução dos valores de desvio de deslocamento e de rotação foram realizados testes de estimação do movimento do tabuleiro com e sem aplicação do IEKF, tendo sido usados, em ambos os casos, os dados obtidos do ensaio realizado com modelo físico no exterior. Os resultados obtidos permitiram concluir que o DAM de translação, assim como o de rotação, é significativamente inferior quando se incorpora o estimador IEKF, sendo a componente longitudinal de deslocamento aquela que mais beneficia. Este facto mostra a importância da aplicação do IEKF, não só na predição da posição dos alvos nas imagens futuras, como também na redução do valor do desvio de deslocamento e de rotação – efeito de filtragem.

Como principal conclusão, regista-se o facto de que com uma configuração mínima de apenas duas câmaras e quatro alvos ser possível realizar a calibração do sistema de visão e a estimação da trajectória de movimento do tabuleiro, em translação e em rotação, satisfazendo o grau de exactidão pretendido, de uma forma muito satisfatória, mesmo em condições de forte perturbação, como aconteceu durante a realização dos dois ensaios com modelo físico.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

7.1 Considerações Gerais

Com a presente dissertação, foi possível, em primeiro lugar, estabelecer uma metodologia para a parametrização (ou calibração) do modelo matemático que estabelece a relação dinâmica entrada-saída de sistemas de visão dedicados à medição de deslocamentos a grande distância e com uma dinâmica não desprezável, tendo como ponto de partida os conhecimentos produzidos por Tomasi (1992), a propósito da reconstrução tridimensional de objectos e, em simultâneo, da determinação do movimento relativo da câmara. Em segundo lugar, foi também estabelecida uma metodologia para a estimação do movimento da estrutura, tendo em conta as especificidades do comportamento dinâmico do tabuleiro de pontes suspensas.

A dissertação teve como motivação primordial a produção de conhecimentos para posterior aplicação ao desenvolvimento de sistemas capazes de medir, a grandes distâncias e com a exactidão requerida, os deslocamentos sofridos por estruturas de grande porte – designadamente de pontes metálicas suspensas, como é o caso da Ponte 25 de Abril (P25A), sobre o rio Tejo, em Lisboa¹.

7.2 Acerca do Estudo Realizado

Com a presente tese, procurou-se contribuir para a resolução das limitações detectadas nos sistemas de observação de grandes estruturas por meio de visão. Assim, o estudo realizado foi conduzido no sentido de estabelecer um conjunto de metodologias, tendo em vista contribuir para o posterior desenvolvimento de um sistema de medição com capacidade para satisfazer os objectivos traçados anteriormente. Neste contexto, destacam-se, pela sua contribuição para a concretização desse objectivo geral, os seguintes temas:

- Pesquisa e estudo de modelos matemáticos, de algoritmos e de métodos de calibração de sistemas ópticos. Neste ponto foram estudados alguns dos algoritmos de calibração mais conhecidos, desenvolvidos e amplamente divulgados entre as comunidades da visão computacional e

¹ Por conseguinte, pode-se dizer que o estudo realizado se insere no âmbito da investigação aplicada (OCDE, 2002 – Manual de Frascati).

da fotogrametria, com o intuito de avaliar a sua eficiência e robustez quando aplicados na calibração de sistemas de visão equipados com ópticas de grande distância focal.

- Estabelecimento de uma metodologia para a calibração de sistemas de visão acoplados a ópticas com grande distância focal, a qual pode ser realizada *in situ* e com a estrutura em movimento permanente. Para a sua concretização é necessário dispor, apenas, de um mínimo de duas câmaras e de quatro alvos, e conhecer a distância entre os alvos, não sendo necessário conhecer-se a pose das câmaras bem como as coordenadas de posição dos alvos.

- Estabelecimento de uma metodologia de cálculo para estimação do movimento da estrutura, tendo em conta as especificidades do seu comportamento dinâmico (fase de seguimento ou observação). Esta metodologia, implementa um filtro de *Kalman* iterativo versão estendida (*IEKF*), o qual permite estimar, entre outros parâmetros, as seis componentes de translação e de rotação, podendo o centro de rotação estar posicionado noutra posição que não, necessariamente, no centro geométrico do objecto (centroide). Para este efeito é necessário um mínimo de duas câmaras e de quatro alvos. Para além disso, este filtro prediz a posição de projecção dos alvos nas imagens a adquirir nos instantes seguintes, permitindo, desta forma, reduzir o tempo de processamento das mesmas e a quantidade de informação transferida entre as câmaras de vídeo e a unidade central de processamento.

- Realização de testes, por meio de simulação numérica, com vista à avaliação da fiabilidade e da robustez das metodologias de calibração e de seguimento, em função do nível de perturbação presente (ruído), do número e da disposição das câmaras e do número de alvos empregues nas fases de calibração e de observação. Os testes realizados envolveram a avaliação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos dos subsistemas de visão, assim como a avaliação dos desvios nas componentes de translação e de rotação, entre outros parâmetros.

- Realização de testes em modelo físico (via experimental), à escala 1:7, aproximadamente. Foram efectuados ensaios em ambiente laboratorial, tendo-se usado para este efeito duas câmaras equipadas com ópticas de 565 mm de distância focal (valor nominal). Com a realização destes ensaios pretendeu-se avaliar a eficiência do sistema de visão no seu todo (equipamento e metodologias de calibração e de seguimento) em condições de utilização próximas das reais e, simultaneamente, comparar os resultados com os obtidos por meio de simulação numérica. Presentemente, não foi possível utilizar o sistema de visão na ponte 25 de Abril, no sentido de se aferir, em ambiente não laboratorial, as potencialidades da contribuição.

Tendo em vista o posterior desenvolvimento do sistema de visão, já atrás referido, foram desencadeadas outras acções, complementares ao tema da tese. Neste contexto foi efectuado: i) a identificação dos fenómenos físicos que podem interferir com o sinal óptico, quando este se propaga através da atmosfera desde o alvo até à câmara de vídeo, e a respectiva contribuição em função do comprimento de onda da radiação²; ii) a caracterização da zona envolvente da P25A, em termos de estimação do número médio de dias em que se verifica a presença de nevoeiro, assim como o período do ano e o período do dia em que este fenómeno ocorre com maior frequência, de forma a estimar o tempo de inoperacionalidade do sistema de medição; iii) o estudo e a selecção da forma geométrica do alvo que resiste melhor a eventuais interferências e possibilita a determinação das coordenadas na imagem com a resolução de sub-píxel; iv) a realização de testes na P25A com o objectivo de avaliar a compatibilidade das características do alvo com as do sistema de visão, assim como avaliar a margem de ganho do sistema, em termos de potência óptica, que permitirá manter o sistema operacional durante o máximo de tempo possível, quando submetido a condições de fraca visibilidade (ex. nevoeiro).

7.3 Acerca dos Resultados Obtidos

A avaliação da fiabilidade e da robustez das metodologias de calibração e de seguimento de movimento foram realizadas com base em testes executados por meio de simulação numérica e de simulação física. No primeiro caso, foram assumidas condições de ensaio mais exigentes que as encontradas em aplicações reais, nomeadamente em termos de amplitude do movimento da estrutura. No segundo caso, os ensaios foram realizados em ambiente laboratorial, tendo sido desenvolvido um modelo físico para fixação dos alvos e imposição de movimento de translação segundo as direcções vertical e transversal.

O objectivo destes testes consistiu em avaliar: i) os parâmetros intrínsecos e extrínsecos dos subsistemas de visão, obtidos a partir das respectivas matrizes de projecção; e ii) os desvios de movimento de translação e de rotação, obtidos durante a fase de seguimento.

7.3.1 Testes de Calibração

Em termos de calibração dos subsistemas de visão, dos resultados obtidos por meio de simulação numérica foi possível deduzir as seguintes conclusões gerais:

- A determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos foi possível em todas as configurações de câmaras com o número mínimo de alvos (quatro), tendo-se obtido valores de desvio

² Este estudo de pesquisa permitiu seleccionar o comprimento de onda da fonte de radiação do alvo.

muito baixos na generalidade das configurações de câmaras. Tendo presente a designação utilizada no Capítulo 6 (Tabela 6.1 e Figura 6.1), os resultados de desvio obtidos com a configuração de câmaras $SE - SW$ demarcam-se, pela negativa, dos obtidos com as restantes configurações, em resultado da proximidade entre as câmaras. Os resultados obtidos mostram que a eficiência desta configuração melhora com o aumento da distância entre as câmaras, obtendo-se valores de eficiência próximos dos obtidos com a configuração $S - N$ para uma distância entre as câmaras superior a cerca de 100 m.

- No caso mais desfavorável, considerando uma perturbação de dois píxeis, duas câmaras (configuração $S - N$) e quatro alvos, o desvio no parâmetro de distância focal (k_d) foi inferior a 0,2%. Em termos dos parâmetros de pose das câmaras, o valor do desvio em ϕ foi inferior a 1,5°, em θ foi inferior a 0,6° e em ψ foi inferior a 0,2°. Para condições similares, mas utilizando oito alvos, o valor do desvio dos parâmetros decresceu, tendo-se obtido para a distância focal um desvio inferior a cerca de 0,053%.

- Nas configurações com três e com quatro câmaras foi possível realizar a calibração assumindo conhecer apenas uma distância entre dois alvos. Fazendo uso de oito alvos, no caso mais desfavorável, com a configuração $SE - SW - N$ e dois píxeis de ruído, o valor de desvio obtido para a distância focal foi inferior a 0,2%.

- Relativamente aos restantes parâmetros, γ_a e s_a , os valores de desvio obtido foram igualmente baixos, seguindo uma tendência similar à dos restantes parâmetros. No caso mais desfavorável, da configuração $S - N$, quatro alvos e dois píxeis de ruído, o desvio foi inferior a 0,004 e 0,015, respectivamente.

Da calibração realizada com modelo físico, em ambiente de exterior e em ambiente de interior, as principais conclusões são:

- O desvio da distância focal face ao valor estimado, no caso mais desfavorável, foi inferior a 2,5%, no caso do ensaio de exterior e inferior a 3,9% no ensaio de interior. No entanto, importa referir que o valor estimado (referência), em ambos os casos, foi determinado com base numa estimativa grosseira de distância entre a câmara e o sistema de alvos.

- Relativamente aos restantes parâmetros intrínsecos, os valores de desvio de γ_a e s_a foram inferiores a 0,0037 e 0,0022, respectivamente (obtidos no ensaio de exterior).

- Quanto aos ângulos de pose das câmaras, o maior valor de desvio no ângulo ϕ foi obtido no ensaio de exterior (1,2°) e o de θ foi obtido no ensaio de interior (1,4°).

7.3.2 Testes de Seguimento

Quanto aos resultados obtidos dos testes de seguimento, realizados por meio de simulação numérica, estes permitiram chegar às seguintes conclusões:

- O valor do desvio absoluto médio do movimento de translação e de rotação é muito pouco sensível à presença de ruído durante o processo de calibração do sistema de medição, manifestando-se ligeiramente no caso de ausência de ruído na fase de seguimento. A amplitude dos desvios é determinada, quase exclusivamente, pelo nível de ruído presente na fase de observação (seguimento).

- Com exceção da configuração $SE - SW$, o valor do desvio absoluto médio do movimento de translação registado no plano vertical/transversal (XY) difere pouco entre as várias configurações de câmaras, tornando-se mais significativa a diferença com o aumento do nível de ruído presente na fase de seguimento. De entre estas, a configuração $SE - SW - NE - NW$ é a que apresenta o menor valor de desvio e a configuração $S - N$ o maior. No caso do desvio do movimento de translação registado no espaço (XYZ), as diferenças começam a assumir alguma relevância à medida que o nível de ruído aumenta, sendo a configuração $S - E - N - W$ a que apresenta o menor valor e a configuração $S - N$ o maior.

- A configuração $SE - SW$, à semelhança do verificado no processo de calibração, e em consequência dos resultados então obtidos, é a que apresenta o maior desvio absoluto médio de entre todas as configurações, quer em XY , quer em XYZ . A proximidade dos sistemas de visão, comparativamente com a distância entre estes e a zona dos alvos, contribui para que o efeito de perspectiva fraca seja facilmente perturbado na presença de ruído – convergência muito fraca, tal como é sugerido por Fraser (2005-b). O aumento da distância entre as câmaras contribui, de forma muito significativa, para a diminuição do valor do desvio de todos os parâmetros de movimento.

- Relativamente ao movimento de rotação, o comportamento é muito idêntico entre as várias configurações diferindo ligeiramente no caso da configuração $SE - SW$, quando a distância entre as câmaras é pequena.

- O aumento do número de alvos na fase de seguimento contribui para a diminuição do valor do desvio de rotação e, principalmente, de deslocamento. Esta diminuição é mais significativa no caso da configuração $S - N$, e para o caso do desvio do movimento estimado no espaço (XYZ). Considerando uma perturbação de dois píxeis, a duplicação do número de alvos (de quatro para oito), ou do número de câmaras (conversão da configuração $S - N$ para $SE - SW - NE - NW$) conduz a uma diminuição do valor do desvio, em XY e em XYZ , de cerca de 30%.

- Relativamente aos ângulos de rotação, o aumento do número de alvos produz melhorias pouco significativas, sendo o desvio do ângulo ϕ aquele que decresce mais com o aumento do número de alvos.

- Com a configuração mínima – duas câmaras (S – N) e quatro alvos – e em condições de ruído consideradas anómalas (dois píxeis), é possível satisfazer o grau de exactidão pretendido, obtendo-se um valor de desvio em *XY* inferior a 9 mm e em *XYZ* inferior a 20 mm. Com a mesma configuração de câmaras e incrementando o número de alvos para oito obtém-se um desvio absoluto médio em *XYZ* que é inferior a 10 mm.

- Em todos os casos estudados, o filtro recursivo mostrou rapidez de convergência e estabilidade, apesar de se ter assumido desconhecer o estado inicial do vector de estado.

- No caso mais desfavorável (alvo periférico), o desvio absoluto médio de coordenadas de projecção predito pelo filtro recursivo, em termos de distância Euclidiana medida no plano da imagem entre a posição predita e a posição observada, foi inferior a 3 píxeis.

No caso dos ensaios realizados em modelo físico verificou-se grande concordância entre os valores registados pelo sistema de medição e pelo sistema de referência. De facto, embora não tenha sido possível controlar as várias fontes de perturbação do sistema, nomeadamente as relacionadas com as condições atmosféricas, ainda assim foi possível verificar que o sistema de visão é capaz de seguir o movimento imposto ao conjunto de LEDs (alvos) com elevado grau de exactidão. Em termos específicos pode-se dizer que:

- No caso do ensaio realizado no exterior e sob fortes condições de perturbação (radiação ambiente e turbulência atmosférica), o desvio absoluto médio medido no plano *XY* foi inferior a 1,1 mm, enquanto que o desvio medido em *XYZ* foi inferior a 5 mm.

- Já no caso do ensaio realizado em ambiente interior, o desvio absoluto médio foi inferior a cerca de 1,2 mm em *XY* e a 1,8 mm em *XYZ*.

- O filtro recursivo, à semelhança do verificado nos testes de simulação numérica, convergiu de forma rápida e manteve-se estável ao longo da sequência de imagens adquiridas.

- Para o caso do ensaio de exterior (caso analisado) verificou-se que a incorporação do estimador de movimento reduziu o valor do desvio, tanto em *XY*, como em *XYZ*, sendo de realçar a redução em *XYZ*, assim como nas componentes de rotação.

- No caso do ensaio de interior, foi considerado apenas um subconjunto de quatro alvos, tendo-se obtido valores de desvio, e tendência, muito similares aos obtidos com os dezasseis alvos. Este facto mostra que as fontes de perturbação presentes são de natureza sistemática (ex. sistema

de coordenadas do sistema de referência com orientação ligeiramente diferente da do sistema de coordenadas do sistema de visão) e ou de larga abrangência e intensidade (ex. turbulência atmosférica), de modo que a perturbação afectou todos os alvos de forma idêntica, não se obtendo ganho algum com o aumento do número de alvos.

- A reprodução, por meio de simulação numérica, das condições de realização do ensaio em ambiente interior (procurou reproduzir-se, fundamentalmente, a posição das câmaras e de cada um dos LEDs, individualmente) mostrou concordância entre os resultados obtidos por via experimental com os obtidos por meio de simulação numérica. Para além disso, também o comportamento do sinal de desvio mostrou uma tendência com muitas semelhanças com o obtido durante o ensaio com modelo físico, nomeadamente no que diz respeito ao efeito de *deriva*. A causa para a origem deste efeito de deriva foi atribuída à posição não coplanar dos LEDs e ao erro de ortogonalidade entre os planos definidos pela posição dos LEDs. Esta constatação, de grande importância, reforça a validade dos resultados obtidos por simulação numérica para cenários de longa distância.

7.4 Conclusão Final e Perspectivas Futuras

Os ensaios realizados, tanto por meio de simulação numérica como de simulação física, permitiram alcançar resultados que validam, em primeiro lugar, as metodologias de calibração e de seguimento estabelecidas e, em segundo lugar, mostram a sua fiabilidade e robustez perante eventuais perturbações, conseguindo-se satisfazer o grau de exactidão pretendido com uma configuração mínima de câmaras e de alvos.

Naturalmente, como já por diversas vezes se salientou, deverá agora proceder-se ao desenvolvimento do sistema de medição, com base na contribuição exposta, tendo em vista a medição do movimento de translação e de rotação do tabuleiro da P25A. Para tal, de entre outros aspectos, será necessário desenvolver o alvo activo com emissão de radiação em duas direcções, sendo desejável que este disponha de funcionalidades que permitam ao sistema ajustar a intensidade de radiação em função das condições atmosféricas vigentes num dado momento.

Em termos de avanços futuros, considera-se deverem ser realizados estudos que permitam determinar as incertezas associadas ao sistema de medição, recorrendo para o efeito à aplicação do método de *Monte Carlo*. Ainda neste contexto, segundo Fraser (2005-b), começam-se a dar os primeiros passos no sentido de utilizar o método de *Monte Carlo* para a determinação dos valores iniciais dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos dos subsistemas de visão, os quais são

depois refinados por meio de *bundle adjustment*. Neste sentido, poder-se-á justificar a exploração desta outra via, pelo menos, para comparação da eficiência entre os dois métodos.

Adicionalmente, na sequência dos resultados obtidos, os quais mostraram que é possível satisfazer o grau de exactidão fazendo uso de uma configuração mínima de câmaras e de alvos, tanto na fase de calibração, como na fase de seguimento da estrutura, foram já dados os primeiros passos no sentido de desenvolver um algoritmo que permita realizar as duas tarefas em simultâneo e de forma integrada. Desta forma, pretende-se que o filtro recursivo IEKF, para além da estimação do movimento e da estrutura do objecto (posição relativa dos alvos), já incorporada e validada, seja igualmente capaz de estimar as matrizes de projecção de cada uma das câmaras, sem necessitar de informação adicional, para além da que é requerida actualmente pelo sistema.

Bibliografia

1. Abdel-Aziz, Y.; Karara, H. (1971) – *Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry*. Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, American Society of Photogrammetry, pp. 1–18.
2. Albert, J.; Maas, H.; Schade, A.; Schwarz, W. (2002) – *Pilot studies on photogrammetric bridge deformation measurement*. 2nd IAG Commission IV Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Berlin.
3. Aloimonos, J.; Brown, C. (1986) – *Perception of structure from motion: I) Optic flow vs discrete displacements; II) Lower bound results*. Conference of Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society, Florida, pp.510–517.
4. Banerjee, S. (2001) – *Camera models and affine multiple views geometry*. Department Computer Science and Engineering, IIT Delhi.
5. Bar-Shalom, Y.; Li, X. (1993) – *Estimation and tracking: principles, techniques, and software*. Artech House, Inc., Norwood, MA.
6. Basler (2005) – *A400K User's manual*. Document number DA00062408. Disponível em: www.basler-vc.com.
7. Behr, J.; Hudnut, K.; King, N. (1998) – *Monitoring structural deformation at Pacoima dam, California, using continuous GPS*. Proc 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation [ION GPS-98; Nashville, TN], pp. 59–68.
8. Bernardini, G.; Gallino, N.; Gentile, G.; Ricci, P. (2007-a) – *Dynamic monitoring of civil engineering structures by microwave interferometer*. 4th Conceptual Approach to Structural Design, Venice, Italy.
9. Bernardini, G.; Pasquale, G.; Bicci, A.; Marra, A.; Coppi, F.; Ricci, P.; Pieraccini, M. (2007-b) – *Microwave interferometer for ambient vibration measurement on civil engineering structures: 1. Principles of the radar technique and laboratory tests*. EVA-CES'07, Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, Porto, Portugal.
10. Bernardini, G.; Pasquale, G.; Gallino, N.; Gentile, G. (2007-c) – *Microwave interferometer for ambient vibration measurement on civil engineering structures: 2. Application to full-scale bridges*. EVACES'07, Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, Porto, Portugal.

11. Bernardini, G.; Ricci, P.; Coppi, F. (2007-d) – *A ground base microwave interferometer with imaging capabilities for remote measurements of displacements*. 3rd International Geotelematics Fair (GlobalGeo), Barcelona, Spain.
12. Bloom, S. (2001) – *Wireless optical networking*. Optics in Information Systems, SPIE's International Technical Group Newsletter, Vol. 12, N° 2.
13. Bloom, S.; Korevaar, E.; Schuster, J.; Willebrand. H. (2003) – *Understanding the performance of free-space optics [Invited]*. Journal of Optical Networking, Vol. 2, N° 6, pp. 178-200.
14. Borghese, N.; Cerveri, P. (2000) – *Calibrating a video camera pair with a rigid bar*. Pattern Recognition, Vol. 33, N° 2000, pp. 81–95.
15. Bösemann, W. (2005) – *Advances in photogrammetric measurement solutions*. Computer in Industry, N° 56, pp. 886–893, DOI: 10.1016/j.compind.2005.05.014.
16. Bouchet, O.; Marquis, T.; Chabane, M.; Naboulsi, M.; Sizun, H. (2005) – *FSO and quality of service software prediction*. Free-Space Laser Communications, Proceedings of the SPIE, Vol. 5892, pp. 28-39.
17. Broida, T.; Chandrashekar, S.; Chellappa, R. (1990) – *Recursive 3-D motion estimation from a monocular image sequence*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 26, N° 4, pp. 639–656.
18. Broida, T.; Chellappa, R. (1991) – *Estimating the kinematics and structure of a rigid object from a sequence of monocular images*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, N° 6, pp. 497–513.
19. Brooker, G. – *Chapter 8-Signal Propagation*. Sensor Systems, Course Lecture Notes. Disponível em: <http://www.acfr.usyd.edu.au/pdfs/training/sensorSystems/08%20Signal%20Propagation.pdf>
20. Caetano, E. (2000) – *Dynamics of cable-stayed bridges: Experimental assessment of cable-structure interaction*. PhD Thesis; Chapter 5. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
21. Caetano, E.; Silva, S.; Bateira, J. (2007) – *Application of a vision system to the monitoring of cable structures*. 7th International Conference on Cable Dynamics, Viena, Austria.
22. Cao, W.; Che, R.; Ye, D. (2007) – *Estimation of the center of rotation and 3D motion parameters from stereo sequence images and virtual validation using three-COMERO*. Pattern Recognition Letters, Vol. 28, pp.1593–1599.
23. Casey, J. (2003) – *Blue skies, red sunsets, and the milk way: scattering of light*. Phys 420. Disponível em: http://www.physics.ubc.ca/~kotlicki/Physics_420/jehan_Proposal.pdf#search=%22%20%20%22blue%20skies%2C%20red%20sunsets%2C%20and%20the%20milky%20way%22%22.

24. Castanheta, M. (1961) – *Nivelamento hidrostático. Sua aplicação a observação de obras.* Relatório Proc. II–23.
25. Çelebi, M.; EERI, M.; Prescott, W.; Stein, R.; Hudnut, K.; Behr, J.; Wilson, S. (1999) – *GPS monitoring of dynamic behavior of long-period structures.* Earthquake Spectra, Vol. 15, Nº 1, pp. 55 – 66.
26. Çelebi, M. (2000) – *GPS in dynamic monitoring of long-period structures.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Nº 20, pp. 477–483.
27. Çelebi, M.; Eeri, M.; Sanli, A. (2002) – *GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures.* Earthquake Spectra, Vol. 18, Nº 1, pp. 47–61.
28. Cerveri, P.; Borghese, N.; Pedotti, A. (1998) – *Complete calibration of a stereo photogrammetric system through control points of unknown coordinates.* Journal of Biomechanics, Vol. 31, pp. 935–940.
29. Chabane, M.; Naboulsi, M.; Sizun, H.; Bouchet, O. (2005) – *A new quality of service FSO software.* ECPS 2005, European Conference on Propagation and Systems, Brest, France.
30. Cooper, M.; Robson, S. (1994) – *Photogrammetric methods for monitoring deformation: theory, practice and potential.* Recent Advances in Experimental Mechanics, Silva Gomes *et al.* (eds), Rotterdam, pp. 395–400.
31. Dalsa Coreco (2005) – *X64-CL iPro Series user's manual.* Edition 1.10, Document number OC-64EM-USER0. Disponível em: www.dalsa.com/mv.
32. DDTF (2009) – *Optical properties of aerosols.* A Project of The Data Discovery Toolkit and Foundry. Disponível em: [http://www.newmediastudio.org/DataDiscovery/Aero Ed Center/](http://www.newmediastudio.org/DataDiscovery/Aero%20Ed%20Center/)
33. Duffie, J.; Beckman W. (1991) – *Solar engineering of thermal processes (Second Edition).* John Wiley & Sons.
34. Dumont, A. – *Hydrostatic levelling of a NPP (Nuclear power plant) floor during the pressure test of the surrounding wall experimental measurement.* ESIC – European Space Industrial Control.
35. Fakuda, Y.; Feng, M.; Shinozuka, M. (2009) – *Cost-effective vision-based system for monitoring dynamic response of civil engineering structures.* Structural Control and Health Monitoring, DOI: 10.1002/stc.360.
36. Faugeras, O.; Luong, Q. (2001) – *The geometry of multiple images: the laws that govern the formation of multiple images of a scene and some of their applications.* The MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London, England, ISBN: 0262062208.

37. Ferreira, H. (1956) – *O clima de Portugal – valores médios dos elementos climáticos no território nacional em 1921 – 1950*. Serviço Meteorológico Nacional, Fascículo IX, Lisboa.
38. Ferreira, H. (1965) – *Climatologia aeronáutica de Portugal – aeroporto de Lisboa/Portela*. Serviço Meteorológico Nacional, Fascículo I, Lisboa.
39. fib Task Group 5.1 (2002) – *Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures*. State-of-the-Art Report.
40. Fraser, C.; Shortis, M. (1995-a) – *Metric exploitation of still video imagery*. Photogrammetric Record, Vol. 15, Nº 85, pp.107–122.
41. Fraser, C.; Shortis, M.; Ganci, G. (1995-b) – *Multi-sensor system self-calibration*. SPIE Conference 2598, Videometrics IV, Philadelphia, USA.
42. Fraser, C. (1998) – *Automated processes in digital photogrammetric calibration, orientation, and triangulation*. Digital Signal Processing, Nº 8, Article SP980321, pp. 277–283.
43. Fraser, C.; Edmundson, K. (2000) – *Design and implementation of a computational processing system for off-line digital close-range photogrammetry*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 55, Nº 2, pp. 94–104.
44. Fraser, C.; Brizzi, D. (2002) – *Deformation monitoring of reinforced concrete bridge beams*. Proceedings of 2nd International Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, pp. 338–343.
45. Fraser, C.; Brizzi, D.; Hira, A. (2003) – *Vision-based, multi-epoch deformation monitoring of the atrium of federation square*. Proceedings of 11th International Symposium on Deformation Measurements, pp. 599–604.
46. Fraser, C. (2005-a) – *A Step-by-step example of a digital close-range photogrammetric measurement of a car door using Australis*. Australis Car Door Demo Guide.
47. Fraser, C. (2005-b) – *Network orientation models for image-based 3D measurement*. Proceedings of the ISPRS Working Group V/4 Workshop ‘3D-Arch 2005’, Vol. 36, Part 5/W17, Venice.
48. Fraser, C.; Hanley, H.; Cronk, S. (2005-c) – *Close-range photogrammetry for accident reconstruction*. Proceedings of Optical 3D Measurements VII, Vol. II, pp. 115–123, Viena.
49. Fraser, C.; Woods, A. (2005-d) – *Hyper redundancy for accuracy enhancement in automated close range photogrammetry*. The Photogrammetric Record, Vol. 20, Nº 111, pp. 205–217.

50. Gayde, J.; Humbertclaude, C.; Lasseur, C. (1997) – *Prospects of close range digital photogrammetry in large physics installations*. Proceedings of the 5th International Workshop on Accelerator Alignment
51. Gentile, C.; Bernardini, G.; Ricci, P. (2008) – *Operational modal analysis of a cable-stayed bridge from conventional and radar-based measurements*. 7th European Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2008), Southampton.
52. Gentile, C. (2010) – *Application of radar technology to deflection measurement and dynamic testing of bridges*. InTech, Publishing, ISBN: 978-953-307-029-2.
53. Ghuman, B.; Willebrand, H. (2006) – *Making free-space optics work (from the book “Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today’s Networks”)*. Pearson Education, Sams Publishing. Disponível em: <http://www.informit.com/articles/article.asp?p=26141&rl=1>.
54. Gonçalves, N.; Araújo, H. (2003) – *Analysis and comparison of two methods for the estimation of 3D motion parameters*. Robotics and Autonomous Systems, Vol. 45, pp. 23–49.
55. Goryn, D.; Hein, S. (1995) – *On the estimation of rigid body rotation from noisy data*. IEEE Transactions on Pattern and Machine Intelligence, Vol. 17, N° 12, pp. 1219–1220.
56. Gracias, N.; Santos-Vitor, J. (2007) – *Robust estimation of the fundamental matrix and stereo correspondences*. IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 29, N° 1, pp. 82–97.
57. Habed, A.; Boufama, A. (2010) – *Affine camera calibration from homographies of parallel planes*. Proceedings of IEEE 17th International Conference on Image Processing, Hong Kong, pp. 4249–4252.
58. Habel, W., Kohlhoff, H., Knapp, J., Helmerich, R. (2002) – *Monitoring system for long-term evaluation of prestressed railway bridges in the new Lehrter Bahnhof in Berlin*. 3th World Conference on Structural Control, Como, Italy.
59. Halvorsen, K.; Lesser, M.; Lundberg, A. (1999) – *A new method for estimating the axis of rotation and the center of rotation*. Journal of Biomechanics, Vol. 32, pp. 1221–1227.
60. Hambling, D. (2011) – *GPS chaos: how a \$30 box can jam your life*. Newscientist. Disponível em: www.newscientist.com/article/dn20202-gps-chaos-how-a-30-box-can-jam-your-life. Acedido em 6 de Março de 2011.
61. Hartley, R. (1992) – *Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras*. Lecture Notes in Computer Science, Proceedings of the Second European Conference on Computer Vision, ECCV’92, Vol. 588, pp. 579–587.

62. Hartley, R.; Mundy, J. (1993) – *The relationship between photogrammetry and computer vision*. Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision, Vol. 1944, SPIE, pp. 92–105.
63. Hartley, R. (1997-a) – *In defense of the eight-point algorithm*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 19, N° 6, pp. 580–593.
64. Hartley, R. (1997-b) – *Kruppa's equations derived from the fundamental matrix*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 19, N° 2, pp. 133–135.
65. Hartley, R.; Zisserman, A. (2003) – *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press, Second edition.
66. Heikkilä, J.; Silvén, O. (1997) – *A four-step camera calibration procedure with implicit image correction*. Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR'97, pp. 1106–1112.
67. Horn, B. (2000) – *Tsai's camera calibration method revisited*. Disponible em: http://people.csail.mit.edu/bkph/articles/Tsai_Revisited.pdf.
68. Huang, T.; Lee, C. (1989) – *Motion and structure from orthographic projections*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, N° 5, pp. 536–540.
69. Imperx (2006) – *LINX hardware user's manual*. Rev. 5. Disponible em: www.imperx.com.
70. ISIS CANADA (2001) – *Guidelines for structural health monitoring; Design Manual N° 2*. The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, pp. 1.1–2.4. Disponible em: www.ishmii.org/Download%20Folder/ISIS%20Canada%20%20SHM%20Guidelines.pdf.
71. Ji, Y.; Chang, C. (2008) – *Nontarget image-based technique for small cable vibration measurement*. Journal of Bridge Engineering, Vol. 13, N° 1, pp. 34–42.
72. Jiang, R. (2005) – *Development of a digital photogrammetric system for bridge deflection measurement*. PhD Thesis, New Mexico State University.
73. Jiang, R.; Jáuregui, D.; White, K. (2006) – *Review of close-range photogrammetry applications in bridge engineering*. Proceedings of the 85th Annual Transportation Research Board Meeting, Technical Session: Advanced Bridge Inspection Techniques, Washington, DC.
74. Jiang, R.; Jáuregui, D.; White, K. (2008) – *Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: literature review*. Measurement, Vol. 41, pp. 823–834.
75. Jos. Schneider Optische Werke GmbH – *B+W filters*. Filter handbook. Disponible em: www.schneiderkreuznach.com.

76. Kahl, F.; Heyden, A. (1998) – *Robust self-calibration and Euclidean reconstruction via affine approximation*. 14th International Conference on Pattern Recognition, ICPR'98, Vol. 1.
77. Kazaura, K.; Omae, K.; Suzuki, T.; Matsumoto, M.; Mutafungwa, E.; Korhonen, T.; Murakami, T.; Takahashi, K.; Matsumoto, H.; Wakamori, K.; Arimoto, Y. (2006) – *Enhancing performance of next generation FSO communication systems using soft computing based predictions*. Optics Express, Vol. 14, N° 12.
78. Kijewski-Correa, T. (2003) – *Full-scale measurements and system identification: a time-frequency perspective*. Volume II. PhD Thesis.
79. Kim, I.; McArthur, B.; Korevaar, E. (2001) – *Comparison of Laser Beam Propagation at 785 nm and 1550 nm in Fog and Haze for Optical Wireless Communications*. Optical Wireless Communications III, Proceedings of SPIE, Vol. 4214, pp. 26-37.
80. Korevaar, E.; Kim, I.; McArthur, B. (2002) – *Debunking the recurring myth of a magic wavelength for free-space optics*. Optical Wireless Communications V, Proceedings of SPIE, Vol. 4873, pp. 155-166.
81. Korevaar, E.; Kim, I.; McArthur, B. (2003) – *Atmospheric propagation characteristics of highest importance to commercial free space optics*. Atmospheric Propagation, Proceedings of SPIE, Vol. 4976, pp. 1-12.
82. Kwon3D – *DLT method*. Disponível em: <http://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html>.
83. Lee, J., Shinozuka, M. (2006-a) – *Real-time displacement measurement of a flexible bridge using digital image processing techniques*. Society for Experimental Mechanics, N° 46, pp. 105–114.
84. Lee, J.; Shinozuka, M. (2006-b) – *A vision-based system for remote sensing of bridge displacement*. NDT&E International, N° 39, pp. 425–431.
85. Lee, J.; Cho, S.; Shinozuka, M.; Yun, C. (2006-c) – *Evaluation of bridge carrying based on dynamic displacement measurement using real-time image processing techniques*. Steel Structures, N° 6, pp. 377–385.
86. Lenz, R.; Tsai, R. (1987) – *Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3D machine vision metrology*. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 68–75, DOI: 10.1109/ROBOT.1987.1088012.
87. Lepetit, V.; Fua, P. (2005) – *Monocular model-based 3D tracking of rigid objects: a survey*. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, Vol. 1, N° 1, pp. 1–89.

88. Liebowitz, D. (2001) – *Camera Calibration and Reconstruction of Geometry from Images*. PhD Thesis, University of Oxford.
89. Los Alamos National Laboratory Report (2003) – *A review of structural health monitoring literature: 1996-2001*. LA-13976-MS. Disponível em: www.lanl.gov/projects/damage_id/reports/LA_13976_MS_Final.pdf.
90. Lucas, B.; Kanade, T. (1981) – *An iterative image registration technique with an application to stereo vision*. Proceedings of Imaging Understanding Workshop, pp. 121–130.
91. Maas, H. (1998) – *Photogrammetric techniques for deformation measurements on reservoir walls*. IAG SC4 Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Austria.
92. Maas, H.; Hampel, U. (2006) – *Photogrammetric techniques in civil engineering material testing and structure monitoring*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 72, Nº 1, pp. 1–7.
93. Macdonald, J.; Dagless, E.; Thomas, B.; Taylor, C. (1997) – *Dynamic measurements of the second severn crossing*. Proceedings Instrumentation Civil Engineers, Transport, Vol. 123, pp 241–248, paper 11483.
94. Macdonald, J.; Taylor, C.; Thomas, B.; Dagless, E. (1998) – *Real-time remote monitoring of dynamic displacements by computer vision*. 6th Society for Earthquake and Civil Engineering Dynamics Conference, pp. 389–396.
95. Malis, E.; Bartoli, A. (2001) – *Euclidean bundle adjustment independent on camera intrinsic parameters*. INRIA, Nº 4377, ISSN 0249-6399.
96. Malis, E.; Bartoli, A. (2004) – *Euclidean reconstruction independent on camera intrinsic parameters*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Japan.
97. Manetti, L.; Frapolli, M.; Knecht, A. (2002) – *Permanent autonomous monitoring of landslide movements with GPS*. 1st European Conference on Landslides, Prague.
98. Manetti, L.; Glisic, B. (2003) – *Monitoring a harbor structure during reinforcement using a GPS-based monitoring system*. FMGM, 6th International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics, Oslo.
99. Marécos, J.; Castanheta, M.; Trigo, J. (1969) – *Field observation of status river suspension bridge*. Journal of the Structural Division; Proceedings of the American Society of Civil Engineering.

100. Martin, D. (2002) – *The European synchrotron radiation facility hydrostatic levelling system – twelve years experience with a large scale hydrostatic levelling system*. Proceedings of 7th International Workshop on Accelerator Alignment.
101. Maybeck, P. (1994) – *Compensation of linear model inadequacies*. Stochastic models, estimation and control, Navtech Book & Software Store, Arlington, VA, N° 2, pp. 23–59.
102. Meng, X.; Dodson, A.; Andreotti, M.; Roberts, G.; Cosser, E.; Capra, M. (2004) – *Prototype of a remote bridge health monitoring system (RBHMS) using wired/internet based RTK GPS*. European Navigation Conference GNSS (GNSS – Global Navigation Satellite Systems), Rotterdam.
103. Morlier, J.; Salom, P.; Bos, F. (2007) – *New image processing tools for structural health monitoring*. Key Engineering Materials, Vol. 347, pp. 239–244.
104. Naboulsi, M.; Sizun, H.; Fornel, F. (2004) – *Fog attenuation prediction for optical and infrared waves*. SPIE, Optical Engineering, Vol. 43, N° 2.
105. Naboulsi, M.; Sizun, H.; Fornel, F. (2005-a) – *Fog attenuation in visible and infrared spectrum*. ECPS 2005, European Conference on Propagation and Systems, Brest, France.
106. Naboulsi, M.; Sizun, H.; Fornel, F. (2005-b) – *Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere*. 28th General Assembly of URSI (Union Radio-Scientifique Internationale), New Delhi, India.
107. Nakamura, S. (2000) – *GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements*. Journal of Structural Engineering, Vol. 126, N° 12, pp. 1413–1419.
108. Nickitopoulou, A.; Protopsalti, K.; Stiros, S. (2006) – *Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: accuracy, limitations and promises*. Engineering Structures, Vol. 28, pp. 1471–1482.
109. Niederöst, M.; Maas, H. (1997) – *Automatic deformation measurement with a digital still video camera*. Optical 3D measurement techniques IV, Zurich, Wichmann, Karlsruhe, Germany, pp. 266–271.
110. Noury, N.; Sur, F.; Berger, M. (2007) – *Fundamental matrix estimation without prior match*. 14th IEEE International Conference on Image Processing – ICIP 2007.
111. OCDE (2007) – *Manual de Frascati 2002. Proposta de práticas para inquéritos sobre investigação e desenvolvimento experimental*. F-Iniciativas, ISBN: 9789264065611.
112. Ogaja, C. (2002) – *A framework in support of structural monitoring by real kinematic GPS and multisensor Data*. University of New South Wales, Sydney, Australia. PhD Thesis; Chapter 1, 2, 3, 4 and 5; Disponível em: www.library.unsw.edu.au/~thesis/adtNUN/uploads/approved/adtUN20020925.144123/public/02whole.pdf.

113. Olaszek P. (1999) – *Investigation of the dynamic characteristics of bridge structures using a computer vision method*. Measurement, Vol. 25, Nº 3, pp. 227–236.
114. Ono, T.; Hattori, S. (2002) – *Fundamental principles of image orientation using orthogonal projection model*. ISPRS Commission III Symposium, Austria.
115. Ono, T.; Akamatsu, S.; Hattori, S. (2004) – *A long range photogrammetric method with orthogonal projection model*. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 35, Part 3, pp. 1010–1015.
116. Pasquale, G.; Bernardini, G.; Ricci, P.; Gentile, C. (2010) – *Ambient vibration testing of bridges by non-contact microwave interferometer*. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, Vol. 25, N. 3, pp. 19–26, DOI: 10.1109/MAES.2010.5463952.
117. Patsias, S.; Staszewski, W. (2002) – *Damage detection using optical measurements and wavelets*. Structural Health Monitoring, Vol. 1 (1), pp. 1–4, DOI: 10.1177.
118. Pellissier, P. (1965) – *Hydrostatic levelling systems*. IEEE Transactions on Nuclear Science.
119. Pieraccini, M.; Parrini, F.; Fratini, M.; Atzeni, C.; Spinelli, P. (2008) – *In-service testing of wind turbine towers using a microwave sensor*. Renewable Energy, Vol. 33, pp. 13–21.
120. Pierce, B. (2001) – *Predicting the availability of free-space optical communications links*. Optics in Information Systems, SPIE's International Technical Group Newsletter, Vol. 12, Nº 2.
121. Poelman, C.; Kanade, T. (1997) – *A paraperspective factorization method for shape and motion recovery*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 19, Nº 3, pp. 206–217.
122. Quan, L. (1996) – *Self-calibration of an affine camera from multiple views*. International Journal of Computer Vision, Vol. 19, pp. 93–110.
123. Quan, L.; Triggs, B. (2000) – *A unification of autocalibration methods*. 4th Asian Conference on Computer Vision, Taiwan, pp. 917–922.
124. Ribeiro, A. (2000) – *Instrumentação de uma estação de medição de iluminação natural*. Teses de Mestrado, LNEC, pp. 22-30.
125. Roberts, G.; Meng, X.; Brown, C. (2006) – *When bridges move: GPS-based deflection monitoring*. Sensors; Vol. 23, Nº 4. Disponível em: sensorsmag.com.
126. Santos, C.; Oliveira Costa, C. (2006) – *Propagação através da atmosfera de ondas electromagnéticas do espectro do visível e do infravermelho próximo*. Relatório 316/2006, CIC, LNEC, Lisboa.

127. Santos, C.; Oliveira Costa, C.; Batista, J. (2007) – *Disponibilidade ao longo do tempo de um sistema óptico de medição de deslocamentos da P25A*. ICM 2007, Encontro Nacional sobre A Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil, LNEC, Lisboa, pp. 30–37.
128. Santos, C.; Oliveira Costa, C.; Batista, J. (2009) – *Sistema de medição de deslocamentos verticais e transversais de tabuleiros de pontes suspensas ou atirantadas por meio de dispositivos ópticos*, ASCP'09, 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP, Lisboa, Vol. II, pp. 125–132.
129. Seedahmed, G., Habib, A. (2002) – *Two new algorithms to retrieve the calibration matrix from the 3-D projective camera model*. ISPRS Commission III Symposium, Photogrammetric Computer Vision, Graz, Austria.
130. Shapiro, L. (2005) – *Affine analysis of image sequences*. Distinguished Dissertations in Computer Science, Cambridge University Press.
131. Shortis, M.; Beyer, H. (1996) – *Sensor technology for digital photogrammetry and machine vision*. Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Ed. K. B. Atkinson. Whittles Publishing, Scotland.
132. Silva, S.; Bateira, J.; Caetano, C. (2007-a) – *Sistema de visão artificial para análise de vibrações em grandes estruturas*. ICM 2007, Encontro Nacional sobre A Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil, LNEC, Lisboa, pp. 38–45.
133. Silva, S.; Bateira, J.; Caetano, C. (2007-b) – *Development of vision system for vibration analysis*. EVACES'07, Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, Porto, Portugal.
134. Slama, C. (1980) – *Manual of photogrammetry*. American Society of Photogrammetry, Fourth Edition.
135. Soatto, S.; Frezza, R.; Perona, P. (1996) – *Motion estimation via dynamic vision*. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 41, N° 3, pp. 393–413.
136. Solheim, F.; Vivekanandan, J.; Ware, R.; Rocken, C. (1999) – *Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates*. Journal of Geophysical Research, Vol. 104, N° D8, pp. 9663–9670.
137. Sood, D.; Repko, M.; Kelley, R. (1990) – *An implementation of a camera technique to obtain three-dimensional (3D) vision information for simple assembly tasks*. Cirss Report #76.
138. Sousa, A. (2003) – *Arquitecturas de Sistemas Robóticos e Localização em Tempo Real Através de Visão. Aplicações no Domínio do Futebol Robótico*. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto.

139. Stein, G. (1993) – *Internal camera calibration using rotation and geometric shapes*. Massachusetts Institute of Technology, Technical Report: AITR-1426, Master's Thesis.
140. Stephen, G. (1991) – *Visual determination of dynamic displacement for structural monitoring*. PhD Thesis.
141. Stephen, G.; Brownjohn, J.; Taylor, C. (1993) – *Measurement of static and dynamic displacement from visual monitoring of the Humber bridge*. Engineering Structures, Vol. 15, N° 3, pp. 197–208.
142. Sturm, P.; Quan, L. (1995) – *Affine stereo calibration*. Lecture Notes In Computer Science, Vol. 970, Proceedings of the 6th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns, pp. 838–843.
143. Sturm, P. (1998) – *A case against Kruppa's equations for camera self-calibration*. Extended version of: ICIIP – IEEE International Conference on Image Processing, pp. 172–175, Chicago, Illinois.
144. Sturm, P. (2001) – *On focal length calibration from two views*. CVPR – International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. II, pp.145–150, Kauai, USA.
145. Sturm, P.; Cheng, Z.; Chen, P.; Poo, A. (2005) – *Focal length calibration from two views: method and analysis of singular cases*. Computer Vision and Image Understanding, Vol. 99, pp.58–95.
146. Stürze, A.; Boedecker, G. (2004) – *50 Hz high precision kinematic GNSS observations for airborne vector gravimetry – first experiences*. IAG International Symposium, GGSM2004, Gravity, Geoid and Space Missions.
147. Svoboda, T.; Martinec, D.; Pajdla, T. (2005) – *A convenient multi-camera self-calibration for virtual environments*. PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 14, N° 4, pp 407–422.
148. Tapper, M.; McKerrow, P.; Abrantes, J. (2002) – *Problems encountered in the implementation of Tsai's algorithm for camera calibration*. Proceedings of 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation, ARAA'2002, Auckland.
149. Tomasi, C.; Kanade, T., (1992) – *Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method*. International Journal of Computer Vision, 9:2, pp.137–154.
150. Tsai, R. (1987) – *A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses*. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, N° 4, pp.323–344.

151. Tsakiri, M.; Lekidis, V.; Stewart, M.; Karabelas, J. (2003) – *Testing procedures for the monitoring of seismic induced vibrations on a cable-stayed highway bridge*. 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece.
152. Ullman, S. (1982) – *The interpretation of visual motion*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London, England.
153. Valença, J.; Júlio, E.; Araújo, H. (2007) – *Aplicações de fotogrametria à monitorização de estruturas*. ICM 2007, Encontro Nacional sobre A Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil, LNEC, Lisboa, pp. 23–29.
154. Varshney, L. (2002) – *Radar principles*. Technical Report, Revision N° 3, Syracuse Research Corporation, North Syracuse, New York. Disponível em: www.mit.edu/~lrv/cornell/publications/radar%20principles.pdf.
155. Wahbeh, A.; Caffrey, P.; Masri, S. (2003) – *A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems*. Institute of Physics Publishing, Smart Materials and Structures, Vol. 12, pp. 785–794.
156. Whiteman, T.; Lichti, D.; Chandler, I. (2002) – *Measurement of deflections on concrete beams by close-range digital photogrammetry*. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa
157. Wieser, A.; Brunner, F. (2002) – *Analysis of bridge deformation using continuous GPS measurements*. INGENIO2002, 2nd Conference of Engineering Surveying, Bratislava, pp. 45–52.
158. Wilczkowiak, M.; Boyer, E.; Sturm, P. (2001) – *Camera calibration and 3D reconstruction from single images using parallelepipeds*. 8th International Conference on Computer Vision, ICCV'01, Vol. 1, pp. 142–148.
159. Wilczkowiak, M.; Sturm, P.; Boyer, E. (2003) – *Using geometric constraints through parallelepipeds for calibration and 3D modelling*. INRIA, N° 5055, ISSN 0249-6399.
160. Willson, R.; Shafer, S. (1994) – *What is the center of the image?* Journal of Optical Society of America Vol. 11, N° 11.
161. Witiw, M.; Fischer, K.; Eisenberg, E.; Pierce, R. (2004) – *Optical attenuation in fog at a wavelength of 1550 nanometers*. 3rd International Conference on Fog, Fog Collection and Dew, Session K – Physical and Chemical Fog Characteristics, Cape Town.
162. Wong, K.; Man, K.; Chan, W. (2001) – *Monitoring Hong Kong's bridges. Real-time kinematic spans the gap*. GPS World.

163. Woodhouse, N.; Robson, S.; Eyre, J. (1999) – *Vision metrology and three dimensional visualization in structural testing and monitoring*. Photogrammetric Record, Vol. 16, N° 94, pp. 625–641.
164. Wu, F.; Hu, Z.; Zhu, H. (2005) – *Camera calibration with one-dimensional objects*. Pattern Recognition, Vol. 38, pp. 755–765.
165. Xu, J.; Fang, Z.; Malcolm, A.; Wang, H. (2002) – *A robust close-range photogrammetric system for industrial metrology*. 7th International Conference on Control, Automation Robotics and Vision (ICARCV'02), Singapore.
166. Yi, J.; Yang, T.; Oh, J. (1995) – *Estimation of depth and 3D motion parameters of moving objects with multiple stereo images by using Kalman filter*. IEEE, Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Florida, USA, pp. 1225–1230.
167. Young, G.; Chellappa, R. (1988) – *3-D motion estimation using a sequence of noisy stereo images*. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Ann Arbor, MI: pp.710–716.
168. Young, G.; Chellappa, R. (1990) – *3-D Motion estimation using a sequence of noisy stereo images: models, estimation, and uniqueness results*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 12, N° 8, pp. 735–759.
169. Young, A. (2008) – *Atmospheric extinction*. Disponível em: <http://mintaka.sdsu.edu/GF/explain/extinction/extintro.html>;
170. Zezhi, C.; Chengke, W.; Shen, P.; Liu, Y.; Quan, L. (2000) – *A robust algorithm to estimate the fundamental matrix*. Pattern Recognition Letters, Vol. 21, pp. 851–861.
171. Zhang, Z.; Xu, G. (1998) – *A unified theory of uncalibrated stereo for both perspective and affine cameras*. Journal of Mathematical Imaging and Vision, Vol. 9, pp. 213–229.
172. Zhang, Z. (1999) – *Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations*. International Conference on Computer Vision, Corfu, Greece, pp. 666–673.
173. Zhang, Z. (2000) – *A Flexible new technique for camera calibration*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, N° 11, pp. 1330–1334.
174. Zhang, Z. (2001) – *Camera calibration with one-dimensional objects*. Microsoft Research, Technical Report: MSR-TR-2001-120.
175. Zhang, Z. (2002) – *A Flexible new technique for camera calibration*. Microsoft Research, Technical Report: MSR-TR-98-71.
176. Zollner, H.; Sablatnig, R. (2004) – *Comparison of methods for geometric camera calibration using planar calibration targets*. AAPR'2004, Proceedings of 28th Workshop Austrian Association of Pattern Recognition, pp. 237–244.

ANEXO I

SELECÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA DA FONTE DE RADIAÇÃO

I.1 Introdução

Um requisito indispensável ao normal funcionamento de um sistema de medição baseado em dispositivos ópticos é o estabelecimento de uma linha de vista entre os alvos (fontes emisso- ras de radiação) e as câmaras de vídeo (receptores). A existência de condições atmosféricas adversas, como por exemplo a presença de nevoeiro, podem afectar a fiabilidade e a disponibili- dade do sistema de medição. Por este motivo, estes parâmetros estão fortemente dependentes dos fenómenos físicos que intervêm sobre o feixe de radiação quando este se propaga através da atmosfera, desde a fonte até ao receptor. Neste contexto, justificava-se a realização de um estudo que permitisse identificar e compreender os fenómenos físicos que podem estar envolvidos durante a propagação de ondas electromagnéticas através da atmosfera, em particular do espectro do visível e do infravermelho próximo, e quantificar, tanto quanto possível, o seu efeito. Só estando na posse deste conhecimento foi possível tomar decisões, devidamente fundamentadas, tendo em vista a minimização dessas perturbações, através da selecção de componentes e de sis- temas electrónicos, e da aplicação de técnicas de execução consideradas as mais adequadas.

Um dos objectivos do estudo estava relacionado com a selecção do comprimento de onda da radiação emitida pelo alvo, mais concretamente, obter uma resposta para a seguinte questão:

- Qual o comprimento de onda que é menos susceptível a perturbações quando a radiação associada se propaga através da atmosfera, quaisquer que sejam as condições atmosféri- cas, como por exemplo na presença de nevoeiro, de chuva, de poluição atmosférica, de turbulência de ar, entre outras?

Nos sistemas de visão presentemente conhecidos foram usados alvos de emissão de radia- ção com comprimento de onda da zona do espectro do infravermelho, do vermelho e do visível¹,

¹ Os alvos do tipo passivo usam a radiação ambiente, natural ou artificial, para alcançar o sensor da câmara de vídeo. Atendendo às características de sensibilidade do sensor das câmaras de vídeo usualmente empregues, pode- se considerar que o comprimento de onda da radiação emitida pelo alvo se situa, predominantemente, na zona do visível. Embora a zona do espectro do visível inclua o comprimento de onda relativo à cor do vermelho, preten- deu-se com a separação pôr em evidência uma parte específica do espectro do visível.

querendo isto dizer que não existe um consenso generalizado quanto à selecção do comprimento de onda. Para além disso, em nenhum destes estudos são apresentadas quaisquer justificações para a opção tomada, indiciando a ausência de conhecimento nesta área.

Na realidade, esta constatação parece ser confirmada pelo facto de na pesquisa efectuada terem sido encontrados somente estudos realizados pela comunidade científica que desenvolve sistemas de comunicação sem fios por meio de dispositivos ópticos (*FSO – Free Space Optics*), desconhecendo-se a existência de estudos provenientes de outras áreas de investigação, nomeadamente da área da visão computacional e da fotogrametria.

De referir que nos sistemas de comunicação baseados em *FSO* a informação é transmitida em código binário e a recepção consiste, basicamente, em sinalizar a presença ou a ausência de radiação recebida. Na etapa de recepção de radiação é indiferente qual a zona do sensor de recepção que foi atingida pelo feixe óptico, desde que se garanta que a intensidade de radiação recebida é superior ao nível de ruído presente no receptor. Por este motivo, a investigação desenvolvida nesta área concentra-se, maioritariamente, na procura de soluções que permitam o desenvolvimento de sistemas de comunicação capazes de vencer distâncias e ritmos de transmissão cada vez maiores. Já no caso dos sistemas de medição por meio de visão, o problema da distância entre o emissor e o receptor não se coloca da mesma forma, uma vez que as distâncias envolvidas, geralmente, são menores mas, em contrapartida, é imprescindível que o feixe óptico não seja desviado da sua trajectória.

Neste anexo são apresentados, de forma sucinta, os vários conceitos relacionados com o tema da propagação de um feixe óptico através da atmosfera, com comprimento de onda da zona do espectro do visível e do infravermelho próximo e no final procurar-se-á responder à questão formulada anteriormente (Santos, 2006, 2007).

I.2 Atenuação Provocada Pela Atmosfera

De uma forma generalizada, pode-se afirmar que o princípio de funcionamento de qualquer sistema óptico assenta na recepção de uma onda de radiação electromagnética. No caso particular dos sistemas de medição por meio de visão, o comprimento de onda dessa radiação situa-se entre o visível e o infravermelho a qual, no caso da observação de pontes, se propaga através da atmosfera terrestre (Figura I.1).

Durante o trajecto do feixe óptico (onda de radiação) este é sujeito a um conjunto de fenómenos e de interacções que podem modificar as suas características, nomeadamente, a perda substancial de potência de radiação e o desvio do feixe óptico ao longo do percurso, com a con-

sequente afectação da disponibilidade e da fiabilidade dos resultados produzidos pelo sistema de medição. Tal facto deve-se, fundamentalmente, às condições atmosféricas do local, à composição química da atmosfera e à existência de partículas suspensas de maiores dimensões. Deste último grupo, denominado o grupo dos aerossóis, fazem parte as poeiras, os núcleos de condensação (ex. partículas no estado sólido, fluidos, esporos, sal marinho, fumos e outros poluentes), os cristais de gelo e as gotículas de água agrupadas sob a forma de neblina, a névoa e o nevoeiro (Tabela I.1). Este último, atendendo ao efeito de atenuação que produz sobre o feixe óptico, representa o factor mais importante.

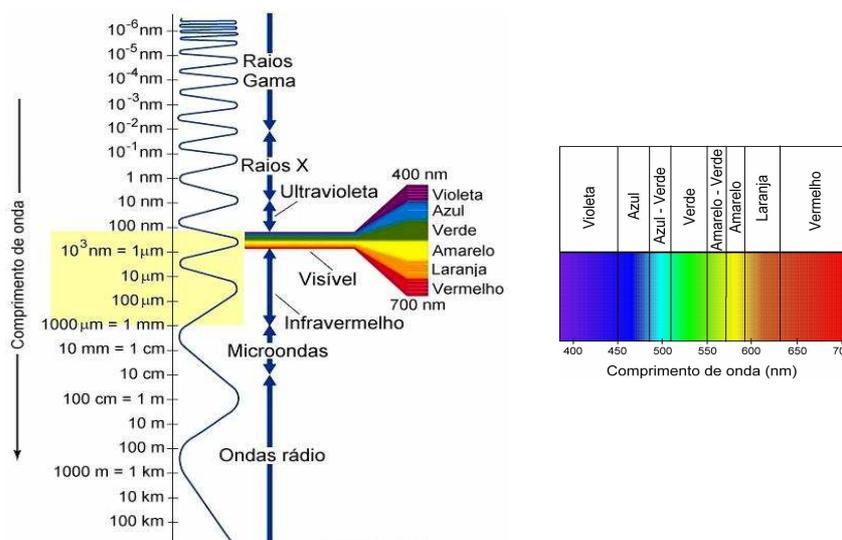


Figura I.1 – Divisão do espectro de radiação por bandas (a parte sombreada corresponde à região do visível e do infravermelho) (esq.) e espectro de cores da banda do visível (dir.).

Tabela I.1 – Dimensão típica das partículas existentes na atmosfera (adaptado de Kim, 2001).

Tipo de partículas	Dimensão (μm)
Moléculas de ar	0,0001
Poeiras	0,1
Núcleos de condensação	0,1 – 1
Neblina	0,01 – 1
Gotículas de nevoeiro	1 – 20
Chuva	100 – 10000
Neve	1000 – 5000
Granizo	5000 – 50000

As partículas do grupo dos aerossóis encontram-se suspensas na atmosfera, com uma velocidade de queda muito baixa, e a sua dimensão situa-se, geralmente, entre 0,1 μm e 100 μm (Naboulsi, 2005-b). Nas nuvens altas, e em situação de chuva, é ainda possível encontrar gotas de chuva, com dimensão da ordem de 1 mm, e gotas de aguaceiro e granizo, com dimensão entre 10 mm e 100 mm.

Nos ambientes marítimos os aerossóis são maioritariamente constituídos por gotículas de água (ex. espuma, nevoeiro, chuvisco e chuva) e cristais de sal e, ainda, por partículas de origem continental. O tipo, a densidade e as características das partículas continentais dependem da distância à costa. O primeiro quilómetro da atmosfera contém cerca de 80% da massa dos aerossóis. Destes, a maior contribuição provém dos continentes, com o hemisfério norte a produzir cerca de 61% do total de aerossóis no mundo (Ghuman, 2006).

Da diversidade de fenómenos que podem perturbar um feixe óptico, quando este se propaga através da atmosfera, são cinco aqueles cujo efeito é mais significativo no funcionamento de um sistema de medição por meio de visão:

- Absorção atmosférica;
- Dispersão de *Rayleigh*;
- Dispersão de *Mie*;
- Dispersão Geométrica;
- Turbulência e Cintilação.

A optimização do desempenho e da fiabilidade de um sistema de visão requer a compreensão dos efeitos atmosféricos que afectam o feixe luminoso. A minimização destes efeitos passa pela procura e pela selecção do comprimento de onda que é menos susceptível a perturbações, para as várias condições atmosféricas a que o sinal óptico é submetido.

A presença de nevoeiro constitui o factor mais importante na degradação da radiação electromagnética, com especial destaque para a zona do visível e do infravermelho próximo (*near infrared*)², em virtude do elevado factor de atenuação. Como é comumente sabido, mas nem sempre devidamente reconhecido, a penetração da luz visível através de nevoeiro denso é mais difícil que através de chuva intensa (Naboulsi, 2004).

A análise e a quantificação dos fenómenos atmosféricos são tarefas muito complexas, sendo, frequentemente, abordadas de uma forma menos profunda, recorrendo a pressupostos que não reflectem adequadamente a realidade.

² A banda do infravermelho, geralmente, encontra-se subdividida em secções, não sendo, contudo, consensual o número de secções e as respectivas fronteiras. No presente documento adoptaremos a subdivisão em cinco secções, correspondentes a:

- Infravermelho próximo – 750 nm a 1400 nm (1,4 μm);
- Infravermelho curto – 1,4 μm a 3 μm ;
- Infravermelho médio – 3 μm a 8 μm ;
- Infravermelho longo – 8 μm a 15 μm ;
- Infravermelho distante – 15 μm a 1000 μm (1 mm).

I.2.1 Absorção

O fenómeno da absorção molecular, também chamado de absorção verdadeira ou de absorção selectiva³ (Young, 2008), tal como o nome sugere, resulta da interacção do feixe óptico com as moléculas de ar e com as partículas sólidas e líquidas suspensas na atmosfera. Quando um feixe de fótons choca contra uma partícula pode ocorrer uma de duas situações:

- A energia recebida pela partícula pode ser re-radiada noutra direcção, sem alteração do comprimento de onda, conduzindo a um processo de dispersão;
- A energia pode ser transformada pela partícula noutra forma de energia (calor) ou re-radiada noutra comprimento de onda, conduzindo a um processo de absorção (DDTF, 2009).

A absorção atmosférica é um processo selectivo, na medida em que no espectro de transmissão da atmosfera é possível encontrar zonas transparentes, chamadas de *janelas de transmissão atmosférica*, e zonas opacas, chamadas de *janelas de bloqueamento atmosférico* (Naboulsi, 2005-b). A absorção selectiva de um feixe óptico, com um determinado comprimento de onda e que se propaga pela atmosfera, resulta da interacção entre os fótons do feixe óptico e os átomos ou moléculas que este encontra no percurso, nomeadamente o oxigénio (O₂), o ozono (O₃), o hidrogénio (H₂), o anidrido carbónico (CO₂), o vapor de água (H₂O), o óxido de azoto (N₂O), o metano (CH₄) e o Árgon (A_r). As colisões que se dão provocam o desaparecimento dos fótons incidentes e o aumento da temperatura do gás (Ribeiro, 2000; Naboulsi, 2005-b). O grau de absorção depende do tipo de moléculas do gás e da sua concentração.

Na Figura I.2 apresenta-se um gráfico que mostra a densidade energética da radiação solar no topo da atmosfera e após sofrer absorção e dispersão de *Rayleigh*. Nas Figuras I.3 e I.4 apresentam-se dois gráficos relativos à transmissividade da atmosfera, calculada segundo o programa *MODTRAN*⁴, para dois casos de visibilidade⁵ (Bloom, 2001; 2003).

Da observação dos gráficos são identificáveis as diversas janelas de comprimento de onda onde a absorção é mais intensa e os principais elementos responsáveis por essa absorção. Destas, destacam-se as janelas centradas em 950 nm, 1150 nm, 1400 nm e 1800 nm (esta última apenas visível na Figura I.2), em que o vapor de água é o gás absorvente preponderante. Por este facto,

³ As denominações alternativas pretendem evidenciar a distinção entre a atenuação devida à absorção da atenuação provocada pela dispersão, assim como enfatizar o facto da absorção se concentrar em bandas estreitas do espectro.

⁴ **MODTRAN**, acrónimo de *MODerate resolution atmospheric TRANsmision*, é a denominação de uma aplicação informática desenvolvida para modelar a propagação de radiação através da atmosfera.

⁵ Nas Figuras I.3 e I.4, a faixa entre os 700 nm e os 750 nm não se encontra atribuída, dado tratar-se da banda de transição entre as zonas do visível e do infravermelho e, por isso, ser indefinida.

estas janelas também são conhecidas por bandas ou janelas de água (Bloom, 2001). Na verdade, o vapor de água faz parte integrante da atmosfera, mesmo em situações de bom tempo e de grande visibilidade.

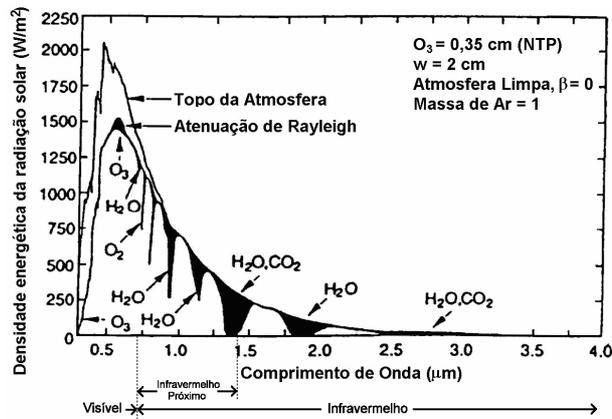


Figura I.2 – Densidade energética da radiação solar no topo da atmosfera e após sofrer absorção atmosférica e dispersão de Rayleigh, expressa em função do comprimento de onda (adaptado de Duffie, 1991)

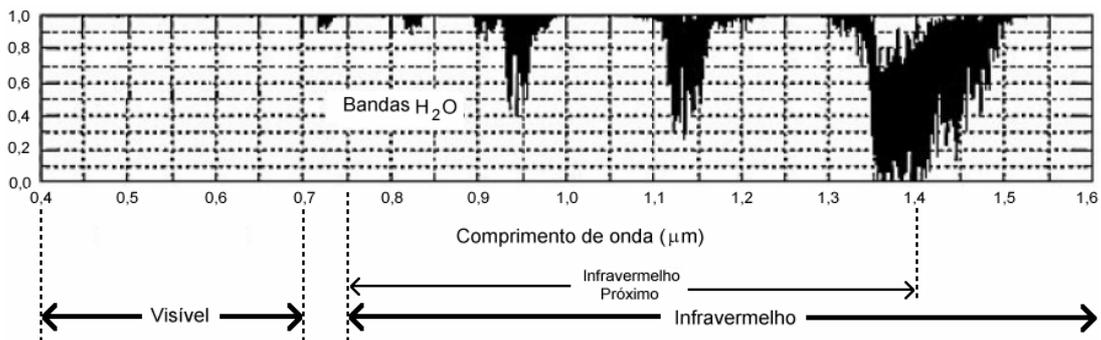


Figura I.3 – Fração da energia de radiação transmitida, em função do comprimento de onda, medida a 200 m de da fonte de radiação e em condições atmosféricas de visibilidade até cerca de 200 m de distância (nevoeiro de advecção) (adaptado de Bloom, 2001).

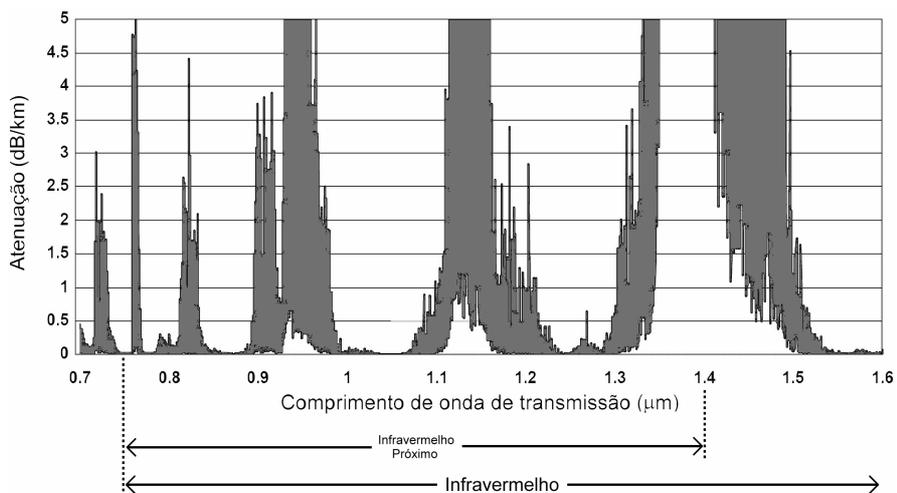


Figura I.4 – Atenuação atmosférica (dB/km) em função do comprimento de onda, calculada para condições de céu limpo (clear weather), para uma distância de visibilidade superior a 16 km (10 milhas) (adaptado de Bloom, 2003).

A absorção por parte dos gases NO_x e CO_x também ocorre nas bandas de água, embora a sua contribuição seja desprezável face à absorção provocada pelo vapor de água. Contudo, para comprimentos de onda superiores a 2000 nm ($2 \mu\text{m}$), a contribuição destes gases pode dominar as propriedades de absorção da atmosfera (Bloom, 2003). De referir ainda que a absorção é proporcional à densidade do ar (Brooker), sendo, por este motivo, mais intensa ao nível do mar.

Embora não seja possível modificar a constituição da atmosfera é possível tirar partido das janelas de transmissão, seleccionando o comprimento de onda mais adequado e menos susceptível a absorção.

De forma a minimizar a atenuação do sinal, por efeito da absorção e da dispersão, os sistemas de comunicação *FSO* operam com comprimentos de onda do espectro do visível e do infravermelho próximo e que se enquadram nas janelas de transmissão centradas em 690 nm^6 , 780 nm^7 , 850 nm e 1550 nm (Naboulsi, 2004; 2005-a) (Figura I.5). Existem outras janelas de transmissão alternativas, entre $3 \mu\text{m}$ e $5 \mu\text{m}$ e entre $8 \mu\text{m}$ e $14 \mu\text{m}$ (Figura I.15). No entanto, o seu uso comercial está limitado pela disponibilidade de dispositivos e de componentes e por dificuldades relacionadas com a sua implementação prática, como por exemplo a necessidade de arrefecimento dos componentes (Ghuman, 2006). No caso concreto dos sistemas de visão, a sensibilidade do sensor das câmaras de vídeo que reúnem os requisitos desejados, regra geral, não vai além de 1000 nm ($1 \mu\text{m}$). Por este motivo, somente as três primeiras janelas de transmissão constituem verdadeiro motivo de estudo.

A absorção atmosférica, tipicamente, é dominada pelo nevoeiro; todavia, a presença de nuvens de baixa altitude, de chuva, de neve e de poeiras, ou uma combinação de todas, também pode contribuir de forma severa para este efeito (Bloom, 2003). Seleccionando uma janela de transmissão e para percursos de curta distância (até aproximadamente 2 km), o efeito da absorção do feixe óptico pode, na maior parte dos casos, ser desprezado face a outros efeitos (Kim, 2001), como se verá mais adiante. A Figura I.6 mostra o mesmo cenário em três situações de visibilidade distintas, onde é notório o aumento da atenuação na presença de nevoeiro.

I.2.2 Dispersão

O fenómeno da dispersão está intimamente relacionado com a presença de partículas na atmosfera. Contrariamente ao processo de absorção, o fenómeno da dispersão não envolve a transformação de energia recebida noutra forma de energia; antes promove a sua redistribuição,

⁶ Esta janela, única na banda do visível (próximo do limite do vermelho) não se encontra representada na figura.

⁷ Em alguns documentos esta janela aparece centrada em 785 nm (Bloom, 2003; Kim, 2001; Korevaar, 2002).

com a consequente diminuição da densidade de potência ao longo da direcção inicial de propagação, mantendo-se inalterável o comprimento de onda. Do ponto de vista do receptor, tendo presente que a área colectora da radiação é finita, o efeito produzido traduz-se numa atenuação do sinal óptico.

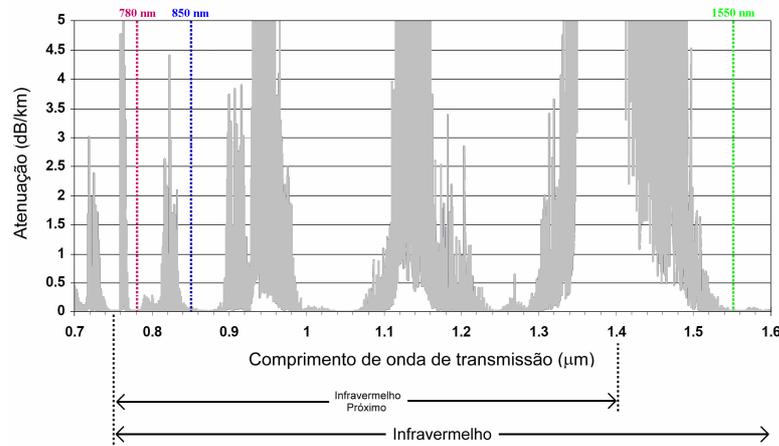


Figura I.5 – Posicionamento das janelas de transparência, geralmente usadas pelos sistemas FSO, no espectro de comprimento de onda (adaptado de Bloom, 2003).



Figura I.6 – Três imagens da cidade de Denver, Colorado, relativas a três condições atmosféricas de visibilidade e respectivos valores de atenuação do sinal óptico (infravermelho próximo). A torre do edifício, situado à direita da imagem encontra-se a cerca de 300 m de distância e o ponto indicado pelo fim da linha a amarelo a cerca de 2,4 km (adaptado de Bloom, 2003).

O fenómeno de dispersão resulta de diversos factores, nomeadamente da dimensão e da concentração das partículas, do caminho percorrido e da sua extensão, da variação do índice de refração entre cada uma das partículas e o meio circundante e do comprimento de onda do feixe óptico transmitido.

A relação entre a dimensão das partículas e o comprimento de onda do feixe óptico determina o tipo de dispersão com que um determinado feixe óptico é perturbado, podendo ser de três tipos: i) de *Rayleigh*; ii) de *Mie*; e iii) Geométrica. Esta dependência é descrita pelo parâmetro α (Equação I.1) (adimensional), denominado de relação de tamanho (*size parameter*), em que r representa o raio da partícula e λ o comprimento de onda do feixe óptico.

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \quad (I.1)$$

Na Figura I.7 é apresentado o valor de α para diversos tipos de partículas presentes na atmosfera e para dois comprimentos de onda (usualmente empregues em FSO).

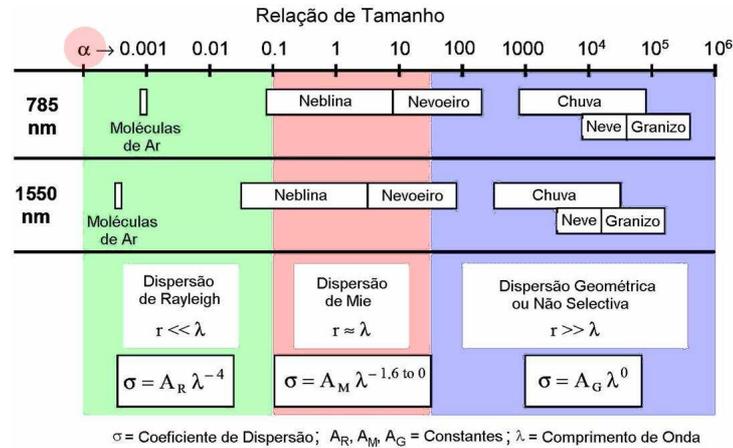


Figura I.7 – Valor do parâmetro α em função da dimensão das partículas presentes na atmosfera, para os comprimentos de onda de 785 nm e 1550 nm (adaptado de Kim, 2001).

A dispersão de **Rayleigh** ocorre quando a dimensão das partículas é muito inferior ao comprimento de onda do feixe óptico. Para comprimentos de onda do espectro do visível e do infravermelho próximo este tipo de dispersão deve-se, fundamentalmente, às moléculas gasosas presentes na atmosfera. A radiação electromagnética ao incidir nos electrões de valência (*bound electrons*) de um átomo ou de uma molécula induz um desequilíbrio de cargas ou dipolo, com a mesma frequência da radiação incidente, passando os electrões a re-radiar em todas as direcções, sob a forma de onda dispersa. A radiação é difundida, predominantemente, no sentido da luz incidente e no sentido oposto (Figura I.8).



Figura I.8 – Representação esquemática dos diversos tipos de dispersão (adaptado de Casey, 2003).

A fórmula clássica para o cálculo do coeficiente de atenuação por dispersão de **Rayleigh** (Equação I.2) mostra que o coeficiente de atenuação (σ_R) varia inversamente com a quarta potência do comprimento de onda (λ) da radiação incidente. Quer isto dizer que quanto menor é o comprimento de onda maior é a atenuação provocada pela dispersão de **Rayleigh** (Ghuman, 2006).

$$\sigma_R \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (\text{I.2})$$

A dispersão de *Rayleigh* é o fenómeno responsável pela cor azul do céu, uma vez que da radiação solar incidente na atmosfera, o comprimento de onda correspondente à cor azul é o que sofre maior dispersão, enquanto que o correspondente à cor vermelha sofre a menor (Kim, 2001).

A conclusão que se tira da Equação I.2 é a de que à medida que o comprimento de onda aumenta o seu contributo no coeficiente de atenuação diminui, chegando a ser desprezável. Ao contrário da dispersão de *Mie* (ver a seguir), a dispersão de *Rayleigh* só se torna verdadeiramente significativa para longas distâncias. Este facto significa que, no caso concreto da aplicação dos sistemas de visão na observação de pontes, como a distância em causa, geralmente, é inferior a 1000 m, o efeito de atenuação provocado por este tipo de dispersão pode ser desprezado.

A dispersão de *Mie* ocorre quando a dimensão das partículas é da ordem de grandeza do comprimento de onda, mais concretamente, quando o valor de α varia entre 0,1 e 50 (Kim, 2001). Neste caso, as partículas de maior dimensão geram maior dispersão no sentido do feixe óptico incidente em detrimento da dispersão no sentido oposto (Figura I.8).

A intensidade da dispersão depende da distribuição das partículas segundo a sua dimensão (*particle-size distribution*) e da sua densidade. Nos comprimentos de onda do espectro do visível e do infravermelho próximo, este fenómeno surge em condições atmosféricas de neblina e de nevoeiro, formado por pequenas partículas, sendo esta a explicação para a cor branca das nuvens e do nevoeiro cerrado (denso) (Bloom, 2001).

Nestas condições, o coeficiente de atenuação (σ_M) é dado pela Equação I.3, em que V representa a visibilidade em km, λ o comprimento de onda em nm e q é uma constante que pode assumir valores entre 0 e 1,6.

$$\sigma_M = \frac{3,912}{V} \cdot \left(\frac{\lambda}{550_{nm}} \right)^{-q} \quad (\text{I.3})$$

A Equação I.3 mostra que o coeficiente de atenuação, devido à dispersão de *Mie*, varia inversamente com o comprimento de onda do feixe óptico transmitido.

A dispersão **Geométrica**, ou não selectiva, ocorre quando a dimensão das partículas é muito maior que o comprimento de onda, isto é, para valores de α superiores a 50 (Kim, 2001). As partículas formadas por gotas de chuva, de neve, de granizo, de gotículas de nuvens e de nevoeiro intenso são as principais responsáveis por este tipo de dispersão (Kim, 2001). Estas partículas são de tal modo grandes que a distribuição angular da dispersão da radiação pode ser descrita por meio de leis da óptica geométrica (Kim, 2001).

Este fenómeno está relacionado com a divergência do feixe óptico (Bloom, 2001; 2003). Tipicamente, o feixe óptico tende a divergir à medida que se afasta da fonte de luz, com a frente de onda a alcançar dimensões superiores à abertura óptica do receptor e, por este facto, resulta numa perda de potência óptica. Esta atenuação pode ser reduzida aumentando o diâmetro da abertura óptica do receptor e/ou usando fontes de luz com menor divergência (Bloom, 2003).

Este tipo de dispersão também é denominado de não selectivo, em virtude do coeficiente de atenuação (σ_G) ser independente do comprimento de onda, sendo dado pela Equação I.4, em que S_L representa a secção recta do feixe óptico (em m^2), medida à distância L da fonte de luz, em metros, S_{Rx} representa a área de captura do receptor, em m^2 , e θ representa o ângulo sólido de divergência do feixe, em esterradianos (sr) (Chabane, 2005).

$$\sigma_G = \frac{S_L}{S_{Rx}} = \frac{\pi \cdot (L \cdot \theta)^2}{4 S_{Rx}} \quad (I.4)$$

I.2.3 Turbulência e Cintilação

À medida que a superfície terrestre aquece, por acção da radiação recebida do sol, a camada de ar também aquece. No entanto, este aumento de temperatura não é uniforme em toda a camada de ar, podendo originar bolsas de ar a diferentes temperaturas e com dimensão variável desde 10 cm até 1 km. Este efeito provoca a alteração do coeficiente de refração do ar, o qual, por seu lado, modifica a trajectória do feixe óptico à medida que este se propaga através dessa camada de ar⁸.

Atendendo a que as bolsas de ar criadas por este efeito não se mantêm estáticas nem no tempo nem no espaço, a variação do coeficiente de refração induz um movimento aleatório no feixe óptico que, quando visto por um observador situado fora da sua zona de influência, aparenta um comportamento turbulento. Dada a sua natureza, este efeito de turbulência é mais frequente em ambientes quentes e secos (Ghuman, 2006).

Uma forma de quantificar o efeito de turbulência é através do coeficiente estrutural do índice de refração (*refractive index structure coefficient*), denominado por C_n^2 , o qual representa a intensidade de turbulência em função da radiação solar, da humidade e da albedo terrestre (Bouchet, 2005; Ghuman, 2006). Como o aquecimento da camada de ar não é instantânea, sur-

⁸ Os sistemas de medição por meio de dispositivos ópticos requerem o estabelecimento de uma linha de vista entre o alvo e o sistema de visão. Por este motivo, a presença de efeitos de turbulência e de cintilação no espaço existente entre o alvo e o sistema de visão poderá induzir um valor errado de deslocamento e, por conseguinte, afectar a fiabilidade do sistema de medição.

gem períodos de maior e de menor intensidade do efeito de turbulência que são, tipicamente, a meio da tarde ($C_n^2 = 10^{-13} m^{-2/3}$) e uma hora após o nascer do sol e o pôr-do-sol ($C_n^2 = 10^{-17} m^{-2/3}$), respectivamente. Além disso, o valor de C_n^2 é mais elevado em pontos situados próximo da superfície terrestre, decrescendo com o aumento da altitude.

Um feixe óptico quando atravessa uma zona de turbulência é exposto a três efeitos (Ghuman, 2006) (Figura I.9):

- Desvio aleatório da trajectória (feixe errante);
- Variação de intensidade ou cintilação; e
- Espalhamento (*spread*), maior do que a teoria de difracção vaticina.

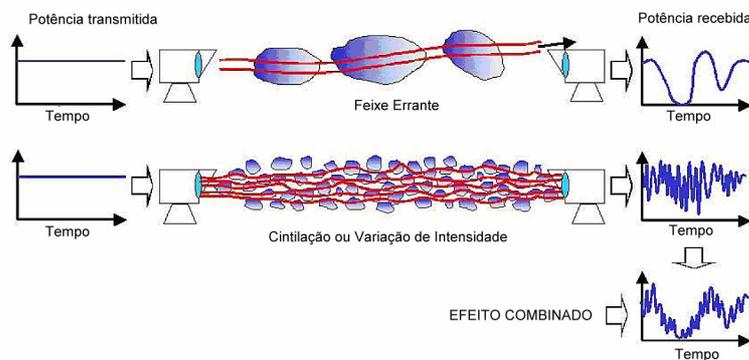


Figura I.9 – Diagrama representativo dos efeitos de turbulência atmosférica (feixe errante) e de cintilação sobre o sinal óptico transmitido⁹ (adaptado de Kazaura, 2006).

O feixe óptico ao atravessar bolsas de ar com índices de refração diferentes é desviado da sua trajectória de forma aleatória, sendo, por este facto, conhecido por feixe errante (*beam wander*). Atendendo a que o princípio subjacente ao fenómeno da refração de um feixe óptico que se propaga através do ar é o mesmo que quando este se propaga através de uma óptica, o feixe óptico vai chegar ao receptor ora focado ora desfocado, de forma aleatória, de acordo com a variação do índice de refração das bolsas de ar atravessadas ao longo do percurso.

Na presença de bolsas de ar de turbulência, com dimensões muito superiores ao diâmetro do feixe óptico, a óptica geométrica pode ser usada para descrever a variância radial do feixe óptico (σ_r^2 , Equação I.5), em função do comprimento de onda λ , em metros, da distância L , em metros, e do coeficiente estrutural do índice de refração C_n^2 , em $m^{-2/3}$ (Ghuman, 2006).

$$\sigma_r^2 = 1,83 \cdot C_n^2 \cdot \sqrt[6]{\frac{L^{17}}{\lambda}} \quad (I.5)$$

⁹ A amplitude e a frequência de cintilação dependem da dimensão relativa das bolsas de ar e do diâmetro do feixe óptico. Assim, bolsas de ar com grande dimensão provocam o desvio do feixe, enquanto que bolsas de ar de menor dimensão provocam o seu espalhamento (Chabane, 2005).

A Equação I.5 mostra que os comprimentos de onda maiores são sujeitos a menores desvios aleatórios, embora esta dependência com o comprimento de onda se apresente fraca (Ghuman, 2006).

Por seu lado, o efeito de cintilação é causado por pequenas flutuações do índice de refração da atmosfera, acontecendo, normalmente, em dias de grande visibilidade. No espaço entre a fonte de radiação e o receptor podem-se gerar bolsas de ar com temperaturas diferentes e, por consequência, com níveis de refração diferentes. Desta forma, dois fótons que atravessem bolsas de ar com índices de refração diferentes são sujeitos a desvios (*blending*) ligeiramente diferentes, dando origem a uma diferença de fase na frente de onda. Esta diferença de fase gera interferência construtiva/destrutiva no seio do feixe óptico à medida que este se propaga na atmosfera (Korevaar, 2003). Por seu lado, esta interferência gera flutuações da intensidade óptica que chega ao receptor, com frequência variável entre 0,01 Hz e 200 Hz (Chabane, 2005).

Em virtude da interferência óptica, no receptor o padrão de intensidade apresentará a forma de cristas (manchas) luminosas e escuras, sendo a sua dimensão equiparável ou superior à abertura óptica do receptor, a qual poderá dar origem a vales ou picos de intensidade luminosa (Korevaar, 2003) e a consequente saturação ou perda do sinal por parte do receptor. Um feixe óptico com o comprimento de onda de 850 nm, a 1 km de distância da fonte poderá apresentar manchas com diâmetro de 3 cm (Ghuman, 2006).

Para uma onda plana, sujeita a pequenas flutuações, o efeito de cintilação segue uma distribuição normal logarítmica (*log-normal*), definida pela relação entre a amplitude instantânea e o respectivo valor médio, podendo ser caracterizado pela variância (σ_γ^2 , Equação I.6), em que λ representa o comprimento de onda, em metros, L representa a distância, em metros, e C_n^2 representa o coeficiente estrutural do índice de refração, em $m^{-2/3}$ (Chabane, 2005; Naboulsi, 2005-b)¹⁰.

$$\sigma_\gamma^2 = 23,17 \cdot C_n^2 \cdot \sqrt[6]{\frac{L^{11}}{\lambda^7}} \cdot (2 \cdot \pi)^7 \quad (I.6)$$

Deste modo, e para as condições apresentadas, o valor da atenuação é aproximadamente igual a $2 \cdot \sigma_\gamma$ e o valor de pico é igual a $4 \cdot \sigma_\gamma$ (Naboulsi, 2005-b). A Equação I.6 permite concluir que os comprimentos de onda maiores são sujeitos a menor variância (Chabane, 2005; Ghuman, 2006).

¹⁰ Em alguns documentos (Bouchet, 2005; Ghuman, 2006), a constante de valor 23,17 aparece como sendo 1,23.

No caso de grandes flutuações a variância é dada pela Equação I.7 (Ghuman, 2006), de onde se constata que, contrariamente ao verificado para o caso de pequenas flutuações, os comprimentos de onda maiores apresentam maior variância. Este efeito de atenuação tende a piorar para os comprimentos de onda superiores devido ao facto das manchas escuro/luminoso aumentarem com o comprimento de onda (Korevaar, 2003).

$$\sigma_{\gamma_high}^2 = 1,0 + 0,86 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{\sigma_{\gamma}^2}\right)^2} \quad (I.7)$$

Para pequenas distâncias, da ordem dos 100 m a 200 m, a atenuação provocada pelo efeito de cintilação é de apenas alguns decibéis (Bloom, 2001). Ainda assim, de forma a minimizar o impacto negativo sobre o feixe óptico, poder-se-á usar uma óptica com abertura elevada, para diminuir a flutuação da intensidade luminosa (funcionando como um filtro passa-baixo), ou usar uma câmara de vídeo com um sensor de gama dinâmica elevada. Outra solução poderá ser a utilização de várias fontes de radiação, espaçadas, uma vez que os padrões de cintilação das fontes estão, em princípio, não correlacionados¹¹ (Korevaar, 2003) (Figura I.10).

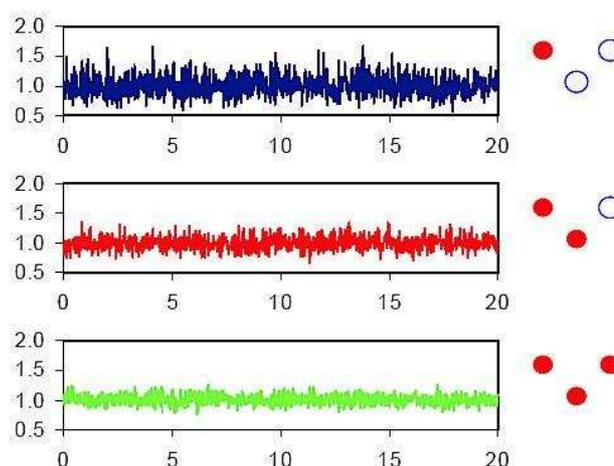


Figura I.10 – Intensidade luminosa recebida por um receptor (supostamente constante), após exposição ao efeito de cintilação, em função do tempo, para o caso de uma, de duas e de três fontes de luz (adaptado de Korevaar, 2003).

Quantitativamente, o efeito de cintilação é muito complexo e ainda não está devidamente compreendido. Na realidade, a informação experimental recolhida contendo todos os parâmetros necessários para aplicação nos modelos é escassa (Korevaar, 2003). Além disso, o efeito de cintilação está fortemente dependente da localização, como por exemplo, a proximidade ao chão ou a um telhado aquecido, da hora do dia e das condições climáticas que se verifiquem num dado momento.

¹¹ Esta solução é adequada ao desenvolvimento de um alvo formado por vários LEDs.

Tendo por base estudos experimentais, realizados em instalações típicas e na pior hora do dia, foi deduzida uma fórmula (Equação I.8) para a determinação da atenuação por efeito da cintilação (σ_C), em que N representa o número de fontes, d_R representa o diâmetro da abertura do receptor, em mm, L representa a distância, em metros, e σ representa a atenuação provocada pela atmosfera, por efeito de absorção e de dispersão, em dB¹² (Korevaar, 2003).

$$\sigma_C = 2 + \frac{12}{N} \cdot \left(\frac{100_{(mm)}}{d_R} \right)^2 \cdot \frac{L}{1000_{(m)}} \cdot e^{\left(\frac{10}{\sigma} \right)} \quad (I.8)$$

O último termo da equação está relacionado com o facto de em condições de baixa visibilidade o diferencial de temperatura com a superfície terrestre ser menor e, por consequência, a atenuação provocada pelo efeito de cintilação tender a diminuir. Da análise da Equação I.8 verifica-se que, em condições de baixa/média visibilidade (σ elevado), a contribuição da atenuação por efeito da cintilação se reduz a, aproximadamente, 2 dB (valor conservador).

Alguns estudos experimentais têm demonstrado que, dependendo das condições atmosféricas verificadas ao longo do percurso, o desvanecimento do feixe óptico, induzido pelo efeito de cintilação, atinge um valor máximo a partir do qual não aumenta com a distância (Bloom, 2003). Ainda assim, para minimizar os efeitos provocados pelo efeito de cintilação, deve-se evitar que o feixe óptico passe por cima de superfícies quentes, sendo recomendável instalar o sistema receptor da radiação afastado de 1,5 m (ou mais) de superfícies expostas ao sol (telhado e paredes laterais) (Ghuman, 2006).

Saliente-se o facto de que quando as condições atmosféricas são propícias à formação de nevoeiro, geralmente, estas são contrárias ao aparecimento de cintilação/turbulência, traduzindo-se num efeito não cumulativo, em termos de atenuação. No caso dos sistemas de medição por visão, a estabilidade da direcção do feixe óptico é tão ou mais importante que a atenuação que este sofre ao longo do percurso, uma vez que a ocorrência de desvio do feixe óptico gera, inevitavelmente, erro de medição e compromete a fiabilidade do sistema de medição.

A dimensão do feixe óptico pode ser caracterizada pelo raio efectivo, r_{ef} (Equação I.9), correspondente à distância medida a partir do centro ($L = 0$) até ao ponto em que a intensidade média relativa decresce de um factor de e^{-1} (e – número de *Euler*), em que λ representa o comprimento de onda, em metros, L representa a distância medida a partir do centro, em metros, e C_n^2 representa o coeficiente estrutural do índice de refração, em m^{-2/3} (Ghuman, 2006).

¹² O factor exponencial, acrescentado de uma forma empírica, representa a dualidade do fenómeno menor visibilidade (maior atenuação por absorção e dispersão) menor efeito de cintilação.

$$r_{ef} = 2,01 \cdot \sqrt[5]{\frac{(C_n^2)^3 \cdot L^8}{\lambda}} \quad (\text{I.9})$$

A Equação I.9 mostra que a dependência do efeito de espalhamento (*spread*) com o comprimento de onda é fraca embora este efeito seja menor para comprimentos de onda maiores. Os sistemas de comunicação FSO apresentam espalhamento de aproximadamente 1 m por cada km de distância (Ghuman, 2006). No caso de sistemas não seguidores¹³ o feixe óptico à saída da fonte de radiação pode apresentar uma divergência entre 2 mrad e 10 mrad, originando um espalhamento do feixe entre 2 m e 10 m a 1 km de distância da fonte de radiação (Bloom, 2003). Tipicamente, um feixe óptico com um diâmetro entre 5 cm e 8 cm à saída da fonte de radiação poderá apresentar um diâmetro entre 1 m e 5 m a 1 km de distância (Bloom, 2003). Estes valores, de um modo geral, estão em concordância com a Equação I.10, em que D_L representa o diâmetro da frente de onda do feixe luminoso, em metros (à distância L), θ representa o ângulo de divergência do feixe luminoso, em radianos, e L representa a distância à fonte de luz, em metros (Bouchet, 2005).

$$D_L \approx L \cdot \tan(\theta) \quad (\text{I.10})$$

Se considerarmos uma fonte de radiação¹⁴, cujo ângulo de divergência é de $\pm 7,5^\circ$, aplicando a Equação I.10, verifica-se que à distância de 500 m o diâmetro da frente de onda assume valores da ordem de 2,285 m. Quer isto dizer que a potência óptica emitida pela fonte de radiação encontra-se dispersa por uma área muito superior à área de captura da óptica, resultando numa perda da margem de ganho do sistema.

I.3 Visibilidade

O conceito de visibilidade surge, na meteorologia, como forma de caracterizar a transparência da atmosfera (Chabane, 2005). Embora inicialmente fosse estimada por um observador humano, actualmente a sua medição é efectuada através do recurso a dispositivos electrónicos (Pierce, 2001).

¹³ Alguns sistemas de comunicação do tipo FSO estão dotados de sistemas de controlo com o objectivo de manter o alinhamento entre o receptor e a fonte de radiação, e a consequente minimização da perda de potência óptica, principalmente a provocada pelo efeito de dispersão geométrica. Atendendo a que o receptor é capaz de seguir eventuais movimentos da fonte de radiação, provocados pelo movimento dos suportes de apoio (normalmente nos telhados dos edifícios altos), devido à acção do vento, entre outros factores, a fonte de radiação pode ser do tipo de abertura estreita, com baixa divergência do feixe óptico. Já no caso dos sistemas não seguidores, de forma a garantir a continuidade da recepção do sinal óptico, é necessário tolerar algum grau de desalinhamento entre o receptor e a fonte de radiação, conseguido à custa de um feixe óptico com divergência superior à que seria necessária se o alinhamento fosse perfeito.

¹⁴ No LED, com a referência HSDL-4260, produzido pela empresa *AVAGO Technologies*, o ângulo de divergência do feixe óptico é de $\pm 7,5^\circ$, correspondente a 50% do valor emitido na direcção principal de propagação.

Apesar de um sistema de visão conseguir chegar mais longe do que a visão humana¹⁵, a medição da visibilidade a “olho nu” continua a ser um bom indicador das condições de operação de qualquer sistema de visão, sobretudo em termos qualitativos. Como é sabido, a visão humana também é afectada pelas condições atmosféricas, sendo exemplo disso a capacidade de visualizar a maior distância, em condições de chuva (mesmo que intensa) comparativamente a condições de nevoeiro. Uma regra prática (*rule of thumb*), com boa aproximação para curta distância, diz que é possível estabelecer um canal comunicação por meio de dispositivos ópticos até onde se consegue ver (Bloom, 2001).

A distância de visibilidade (V) varia com as condições atmosféricas, ao nível do microclima, e, por conseguinte, em função do lugar, da estação do ano e da hora do dia. O seu valor é medido no comprimento de onda de 550 nm, correspondente ao comprimento de onda de máxima intensidade do espectro solar, através da aplicação da lei de *Koschmieder* (Equação I.11) (Naboulsi, 2004).

$$V(km) = \frac{3,912}{\gamma_{550nm}} \quad (I.11)$$

A atenuação do sinal óptico, transmitido através da atmosfera, está associada ao conceito de visibilidade, em que menor visibilidade significa maior atenuação e, por conseguinte, necessidade de maior potência de transmissão para conseguir o mesmo alcance (ou menor alcance para a mesma potência) (Figura I.11 e Tabela I.2). Deste modo, a visibilidade constitui um parâmetro fundamental na avaliação da disponibilidade do sistema de visão.

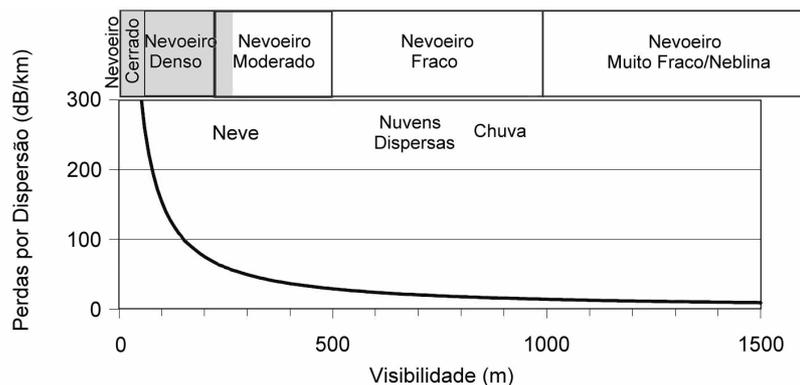


Figura I.11 – Atenuação atmosférica em função da visibilidade, e correspondente condição atmosférica, calculada para o comprimento de onda de 785 nm, com base a Equação I.3 (adaptado de Kim, 2001).

Para comprimentos de onda do espectro do visível e do infravermelho próximo, a atenuação provocada pelo nevoeiro, pela chuva e pela neve está relacionada com o grau de visibilidade

¹⁵ Um sistema de comunicação FSO é capaz de alcançar uma distância duas a três vezes superior à alcançada pela vista humana, a “olho nu”, em qualquer condição de visibilidade (Bloom, 2003).

(Pierce, 2001; Witiw, 2004). Deste modo, o valor da atenuação (σ), em dB/km, é calculado com base na Equação I.12, em que V representa a distância de visibilidade, medida em km, κ representa um parâmetro empírico, cujo valor típico se situa entre 8 dB e 17 dB. Nestas condições, supõe-se que o valor da atenuação é independente do comprimento de onda do feixe óptico (ver adiante).

$$\sigma(\text{dB/km}) = \frac{\kappa}{V} \quad (\text{I.12})$$

Tabela I.2 – Valores de atenuação típicos, para diferentes condições atmosféricas e respectivas distâncias de visibilidade(adaptado de Ghuman, 2006).

Condição Atmosférica	Tipo de Precipitação		Precipitação (mm/hr.)	Visibilidade (km)	Atenuação (dB/km)
Nevoeiro Cerrado				0,00 ... 0,05	271,65
Nevoeiro intenso				0,05 ... 0,20	59,57
Nevoeiro moderado	Neve			0,20 ... 0,50	20,99
Nevoeiro fraco	Neve	Aglomerado de nuvens	100	0,77 ... 1,00	12,65 ... 9,26
Nevoeiro muito fraco	Neve	Chuva intensa	25	1,90 ... 2,00	4,22 ... 3,96
Neblina	Neve	Chuva média	12,5	2,80 ... 4,00	2,58 ... 1,62
Neblina fraca	Neve	Chuva fraca	2,5	5,9 ... 10,0	0,96 ... 0,44
Claro	Neve	Chuviscos	0,25	18,1 ... 20,0	0,24 ... 0,22
Muito claro				23 ... 50	0,19 ... 0,06

Atendendo à especificidade e à grande variabilidade da visibilidade, quer em termos espaciais quer em termos temporais, periódicos e não periódicos, seria desejável ter acesso ao máximo de informação, correspondente ao maior intervalo de tempo possível. Esta informação, normalmente, é apenas registada pelos serviços de meteorologia dos aeroportos e ao nível da pista de aviação. Acontece que o aeroporto, de um modo geral, dada a distância ao local de interesse, não reflecte as condições reais deste último. Além disso, a visibilidade tende a diminuir em altitude, em virtude da ascensão do nevoeiro para passagem a nuvens de baixa altitude (Pierce, 2001), o que poderá dificultar ainda mais a extrapolação dos dados disponíveis para o local de interesse. Há ainda que ter em conta que a informação registada, normalmente, não discrimina valores abaixo de 400 m de visibilidade e não apresenta indicação do tipo de condição atmosférica nem das condições de luminosidade. Ainda assim, na falta de informação mais fidedigna,

estes dados, juntamente com algumas conjecturas, poderão ser usados para a obtenção de uma estimativa.

O grau de visibilidade está directamente relacionado com o contraste de uma imagem, razão pela qual, o valor de visibilidade registado pode ser inferior ao valor real, uma vez que o contraste varia com a intensidade de luz ambiente (Pierce, 2001). Quer isto dizer que, do ponto de vista do parâmetro da atenuação, os valores registados são penalizadores para o sistema. Desse modo, para as mesmas condições atmosféricas, o alcance do sistema de medição poderá ser superior ao valor calculado.

A Equação I.13 fornece uma medida da capacidade de distinção de um alvo situado à distância L , em que I_1 e I_2 representa, respectivamente, a luminosidade das partes brilhantes e das partes escuras de uma imagem (Figura I.12) (Pierce, 2001).

$$C(L) = \frac{I_1(L) - I_2(L)}{I_1(L) + I_2(L)} \quad (\text{I.13})$$

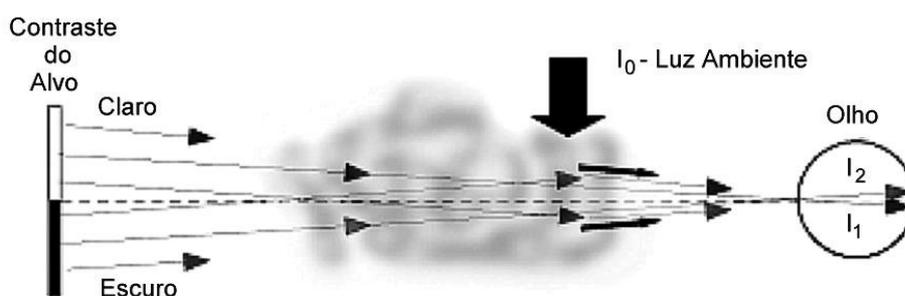


Figura I.12 – Representação de como a luz a partir de dois ângulos distintos se mistura devido à dispersão do feixe original de luz. A intensidade de luz ambiente, I_0 , provoca dispersão adicional, a qual pode induzir uma redução de visibilidade (adaptado de Kim, 2001).

Em condições de sol brilhante o valor do contraste pode ser muito baixo. Por definição, a visibilidade é igual a L , quando $C(L)$ é inferior a 2% de $C(L = 0)$ ¹⁶ (Pierce, 2001) ou, em alternativa, é a distância à qual a potência óptica decresce até 2% da potência original. Em termos qualitativos, a visibilidade é a distância à qual ainda é possível distinguir um objecto escuro no horizonte (Kim, 2001). Por outro lado, no glossário do *Instituto Nacional de Meteorologia*¹⁷, a visibilidade é definida, para fins aeronáuticos, como sendo o maior valor entre:

- “a) A maior distância à qual um objecto preto de dimensões adequadas, situado junto ao solo, pode ser visto e reconhecido quando observado contra um fundo brilhante; e
- b) A maior distância à qual luzes de aproximadamente 1000 candelas podem ser vistas e identificadas contra um fundo não iluminado”. É ainda mencionado que: “as duas distân-

¹⁶ A Equação (I.13) não toma em consideração a intensidade de luz ambiente.

¹⁷ http://www.meteo.pt/pt/aeronautica/aero_glossario.html#.

cias têm valores diferentes em ar com um dado coeficiente de extinção, e a última distância b) varia com a iluminação de fundo. A primeira distância a) é representada pelo alcance óptico meteorológico (MO)”.

O conceito de distância de visibilidade, como se verá a seguir, é incorporado nas fórmulas de cálculo para a determinação do valor da atenuação do sinal óptico quando este se propaga através da atmosfera, nomeadamente quando sujeito a condições de presença de nevoeiro.

I.4 Atenuação Provocada Pelo Nevoeiro

De um modo genérico, a dimensão das partículas de nevoeiro é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda do infravermelho próximo. Por este motivo, o nevoeiro é o primeiro elemento, e o mais importante, na atenuação de um feixe óptico com comprimento de onda desta zona do espectro. As gotas de chuva e os flocos de neve, pelo facto de terem maiores dimensões, atenuam menos o feixe óptico. A título de exemplo, é sabido que o grau de visibilidade na presença de nevoeiro denso é superior ao verificado em ambiente de chuva intensa. Pela mesma razão, e a título comparativo, as ondas de feixes de microondas são mais perturbadas pela chuva do que pelo nevoeiro (Korevaar, 2003; Ghuman, 2006).

A caracterização do nevoeiro é uma tarefa difícil, uma vez que este fenómeno não segue um padrão, variando com a localização, com a altitude, com a época do ano e com a hora do dia, entre muitos outros factores. Além disso, as suas características variam durante a fase de formação, de maturação e de dissipação (Naboulsi, 2004). Dadas as razões apresentadas, o conhecimento pleno deste fenómeno está longe de ser dominado.

O nevoeiro é constituído por gotículas de água, suspensas no ar, com diâmetro inferior a 100 μm , produzindo, espontaneamente, uma redução da visibilidade. Existem vários tipos de nevoeiro, consoante o processo de formação, sendo mais frequentes, na natureza, dois tipos de nevoeiro (Naboulsi, 2004):

- **Radiação** – forma-se com o arrefecimento terrestre, por radiação, aparecendo quando o ar é suficientemente arrefecido e se torna saturado. Aparece, normalmente, durante a noite e no fim do dia, com a dimensão das partículas a variar muito pouco, em torno de 4 μm , e o conteúdo de água líquida a variar entre 0,01 e 0,1 g/m^3 .
- **Advecção** – forma-se quando as massas de ar quentes e húmidas se movimentam sobre superfícies, marítimas ou continentais, mais frias. A dimensão das partículas possui um diâmetro da ordem dos 20 μm e um conteúdo de água líquida superior a 0,2 g/m^3 .

Como já se fez referência, a propagação de um feixe óptico através da atmosfera é sujeito, simultaneamente, aos fenómenos de absorção e de dispersão, designados, genericamente, por atenuação ou extinção. Assim, a potência recebida à distância L da fonte de radiação está relacionada com a potência emitida pela lei de *Beer-Lambert* (Kim, 2001; Naboulsi, 2004; 2005-a; 2005-b; Chabane, 2005), representada pela Equação I.14, em que $\tau(\lambda, L)$ representa a transmissividade da atmosfera para o comprimento de onda λ , $P(\lambda, 0)$ e $P(\lambda, L)$ representam, respectivamente, a potência do sinal óptico no ponto de emissão e à distância L , e $\sigma(\lambda)$ representa o coeficiente de atenuação ou de extinção por unidade de comprimento.

$$\tau(\lambda, L) = \frac{P(\lambda, L)}{P(\lambda, 0)} = \exp[-\sigma(\lambda) \cdot L] \quad (\text{I.14})$$

Por outro lado, $\sigma(\lambda)$ é calculado através da Equação I.15, em que α_m e α_a representam, respectivamente, os coeficientes de atenuação por absorção molecular e por aerossol, e β_m e β_a representam, respectivamente, os coeficientes de dispersão molecular (dispersão de *Rayleigh*) e de aerossol (dispersão de *Mie*), fenómenos descritos anteriormente.

$$\sigma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (\text{I.15})$$

Contudo, partindo do princípio de que o comprimento de onda seleccionado se encontra numa das janelas de transmissão, como é suposto, a contribuição de α_m e de α_a , na Equação I.15, pode ser desprezada.

Embora a caracterização do tipo de nevoeiro se possa fazer com base em parâmetros do ponto de vista quantitativo, nomeadamente através da distribuição do tamanho das partículas, da sua densidade e do conteúdo de água líquida (Ghuman, 2006), é usual recorrer-se ao parâmetro da distância de visibilidade (por este ser o parâmetro registado nos aeroportos ao longo das últimas décadas) para quantificar o efeito combinado do nevoeiro e dos aerossóis sobre as ondas electromagnéticas com comprimentos de onda até 2,5 μm .

Assim, tecnicamente, é considerada a existência de nevoeiro quando a visibilidade é inferior a 1 km e a humidade relativa do ar atinge o limiar da saturação (humidade relativa próxima de 100%) (Naboulsi, 2004) ou, em alternativa, quando a visibilidade é inferior a 2 km (Ghuman, 2006). Assim, surgiu, de um modo semi-empírico (Witiw, 2004), uma equação, denominada de equação de *Kruse*, a qual expressa a atenuação (σ), em dB/km, em função da visibilidade (V), em km, e do comprimento de onda (λ), em nm (Kim, 2001; Naboulsi, 2004; 2005-a; 2005-b; Witiw, 2004).

$$\sigma = \frac{3,912}{V} \cdot \left(\frac{\lambda}{550_{\text{nm}}} \right)^{-q} \quad (\text{I.16})$$

O parâmetro q , determinado via experimental, depende da distribuição de dimensão de partículas e assume valores distintos consoante a distância de visibilidade.

$$q = \begin{cases} 1,6 & \text{se } V > 50 \text{ km} \\ 1,3 & \text{se } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,585 \cdot V^{1/3} & \text{se } V < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (\text{I.17})$$

A Equação I.16 mostra que, para as mesmas condições de visibilidade, a atenuação diminui com o aumento do comprimento de onda (Tabela I.3). No entanto, presentemente ainda não existe um consenso generalizado quanto à definição final do parâmetro q , nomeadamente para distâncias de visibilidade inferiores a 6 km e, em particular, inferiores a 1 km (Kim, 2001; Naboulsi, 2004; 2005-a; 2005-b).

Tabela I.3 – Atenuação atmosférica em função da distância de visibilidade, para dois comprimentos de onda, calculada com base na Equação I.16 (adaptado de Kim, 2001).

Visibilidade (km)	dB/km @ 785 nm	dB/km @ 1550 nm	Condição atmosférica
0,05	340	340	Nevoeiro
0,2	85	85	
0,5	34	34	
1	14	10	Neblina
2	7	4	
4	3	2	
10	1	0,4	Céu limpo
23	0,5	0,2	

Os dados experimentais usados na validação da equação de *Kruse* não foram recolhidos em condições de nevoeiro intenso (tipicamente com visibilidade inferior a 1 km), os quais contradizem a Equação I.16 (Kim, 2001; Naboulsi, 2004). Por este motivo, foi proposta uma definição alternativa (Equação I.18)¹⁸ para o parâmetro q , subdividindo o último sector em três (Kim, 2001):

$$q = \begin{cases} 1,6 & \text{se } V > 50 \text{ km} \\ 1,3 & \text{se } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,16 \cdot V + 0,34 & \text{se } 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0,5 & \text{se } 0,5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \\ 0 & \text{se } V < 0,5 \text{ km} \end{cases} \quad (\text{I.18})$$

¹⁸ Definição criada de forma empírica e ainda não testada experimentalmente (Naboulsi, 2004).

A nova definição para o parâmetro q sugere que no caso de nevoeiro muito intenso, isto é, quando a distância de visibilidade é inferior a 500 m, o coeficiente de atenuação não depende do comprimento de onda (desde que este esteja contido numa das janelas de transmissão). Contudo, esta teoria também não reúne o consenso generalizado, sendo apontado um estudo no qual se demonstra que, apesar da dependência da atenuação com o comprimento de onda ser fraca ela existe (Naboulsi, 2004; 2005-a). Esta conclusão foi obtida da aplicação do modelo de nevoeiros, denominado de *FASCOD*¹⁹, do qual foi construída a Equação I.19, que relaciona a atenuação provocada pelo nevoeiro (σ) com a visibilidade (V), em metros, e com os parâmetros a e b , os quais assumem os valores definidos na Tabela I.4, em função do comprimento de onda (λ).

$$\sigma(\lambda) = \frac{a(\lambda)}{V + b(\lambda)} \quad (\text{I.19})$$

Tabela I.4 – Valores dos parâmetros a e b , presentes na Equação I.19, para vários comprimentos de onda e para dois tipos de nevoeiro (adaptado de Naboulsi, 2004).

Tipo de Nevoeiro	λ	690 nm	780 nm	850 nm	1550 nm
Advecção	a	3,91	3,92	3,93	4,01
	b	-0,00021	-0,00026	-0,00027	-0,00033
Radiação	a	3,93	3,96	4,00	4,40
	b	-0,00019	-0,00027	-0,00028	-0,00034

O trabalho experimental foi executado tendo por base os dois tipos de nevoeiro mais frequentes, e já anteriormente mencionados. A caracterização dos dois tipos de nevoeiros é a apresentada na Tabela I.5 e a distribuição de dimensão de partículas a apresentada na Figura I.13 (Naboulsi, 2004). Neste estudo apenas foi tido em consideração o efeito das gotículas de água, sendo que:

- α , a e b representam os parâmetros que caracterizam a distribuição de dimensão de partículas;
- N representa o número total de partículas de água presentes por unidade de volume;
- r_m representa o raio modal para o qual a distribuição atinge o valor máximo;
- W representa o conteúdo de água líquida; e
- V representa a visibilidade associada ao tipo de nevoeiro.

A Figura I.14 e os dados da Tabela I.6 denotam um ligeiro aumento da atenuação com o aumento do comprimento de onda. Além disso, verifica-se que, de uma forma genérica, a dimi-

¹⁹ FASCOD é um acrónimo de *Fast Atmospheric Signature Code*.

nuição da distância de visibilidade se traduz num aumento do valor da atenuação. Os valores mínimos de atenuação verificam-se para os comprimentos de onda de 10,6 μm , para o nevoeiro do tipo advecção, e de 11,5 μm para o nevoeiro do tipo radiação. Na Tabela I.6 apresentam-se os valores de atenuação para alguns comprimentos de onda usualmente empregues, relativos aos dois tipos de nevoeiro considerados.

Tabela I.5 – Caracterização dos dois tipos de nevoeiro usados no modelo de nevoeiros FASCOD (adaptado de Naboulsi, 2004).

Tipo de Nevoeiro	α	a	B	N (nb/cm ³)	W (g/m ³)	r_m (μm)	V (m)
Advecção Intenso	3	0.027	0,3	20	0,37	10	130
Radiação Moderado	6	607,5	3	200	0,02	2	450

Tabela I.6 – Coeficientes de atenuação (dB/km), para vários comprimentos de onda (adaptado de Naboulsi, 2004).

Tipo de nevoeiro	690 nm	780 nm	850 nm	1550 nm
Advecção denso	30,15	30,24	30,32	30,94
Radiação moderado	8,74	8,82	8,90	9,78

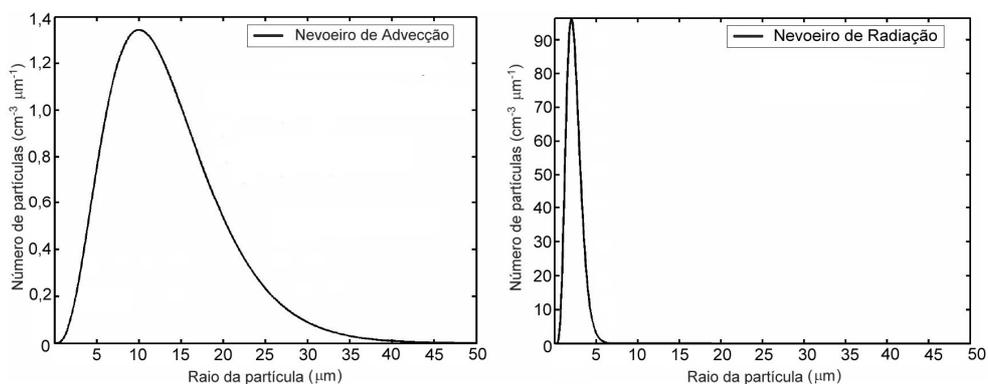


Figura I.13 – Distribuição da dimensão de partículas em função do seu raio para o modelo de nevoeiros FASCOD (adaptado de Naboulsi, 2005-a).

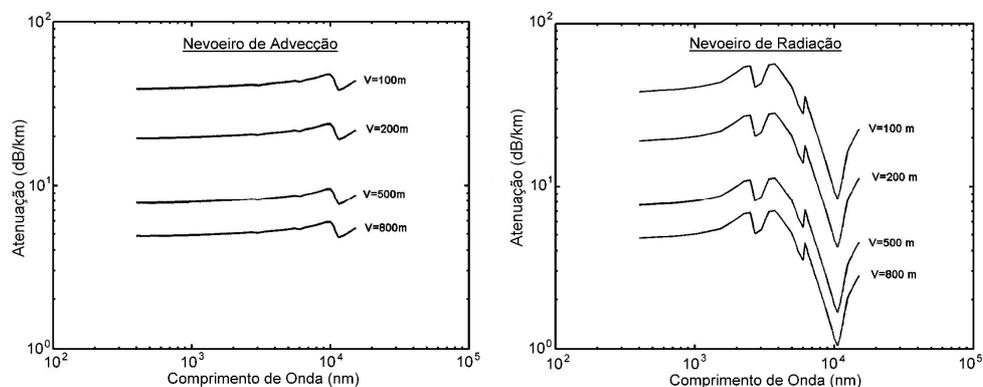


Figura I.14 – Coeficiente de atenuação em função do comprimento de onda e da distância de visibilidade (V). Nevoeiro do tipo advecção (esq.) e nevoeiro do tipo radiação (dir.) (adaptado de Naboulsi, 2004).

Apesar de se notar uma ligeira variação da atenuação com o comprimento de onda, na realidade esta é quase insignificante, principalmente no caso do nevoeiro de advecção. Para nevoeiros com distribuições de dimensão de partículas diferentes ter-se-ão, certamente, coeficientes de atenuação também diferentes, embora, em princípio, com valores situados entre os apresentados para os dois tipos de nevoeiro (Naboulsi, 2005-a).

Naboulsi (2005-a) cita um estudo no qual foi demonstrado que na fase de formação dos nevoeiros estudados, a atenuação era inferior para comprimentos de onda superiores, apontando para uma predominância de gotículas pequenas nesta fase de formação. Concluíram, igualmente, que na presença de nevoeiro ligeiro os comprimentos de onda entre 4 μm e 10,6 μm eram sujeitos a menor atenuação que os da zona do visível e do infravermelho próximo, e que na presença de nevoeiros intensos não existe dependência entre a atenuação e o comprimento de onda. Tendo em conta a zona do espectro que interessa para os sistemas de visão (visível e infravermelho próximo), verifica-se que os comprimentos de onda em questão estão fora da zona de interesse.

A atenuação provocada pela atmosfera é muito variável e difícil de prever, podendo variar desde 0,2 dB/km, em condições excepcionais de claridade, até 310 dB/km, em condições de nevoeiro cerrado, como as que se verificam no Reino Unido (Kim, 2001). Outros estudos indicam valores superiores, podendo chegar a 350 dB/km ou mais (Bloom, 2001).

De uma forma aproximada, a determinação da potência recebida no receptor de radiação pode ser calculada através da Equação I.20, em que P_T e P_R representam, respectivamente, a potência transmitida e recebida, d_T e d_R representam, respectivamente, o diâmetro da abertura do transmissor e do receptor, em metros, D representa a divergência do feixe luminoso, em mrad, L representa a distância entre o receptor e o transmissor, em km, e σ representa a atenuação atmosférica, em dB/km (Bloom, 2003).

$$P_R = P_T \cdot \frac{d_R^2}{[d_T + (D \cdot L)]^2} \cdot 10^{\left(-\frac{\sigma L}{10}\right)} \quad (\text{I.20})$$

Neste caso concreto, verifica-se que a atenuação atmosférica é o único factor não controlável da equação, a qual, em condições atmosféricas de média/baixa visibilidade, é independente do comprimento de onda.

A Figura I.15 apresenta um gráfico relativo à atenuação total em função do comprimento de onda, obtido através do modelo *MODTRAN* e para uma distribuição particular de nevoeiro (indicada na figura), a 100 m do solo (Korevaar, 2002; 2003).

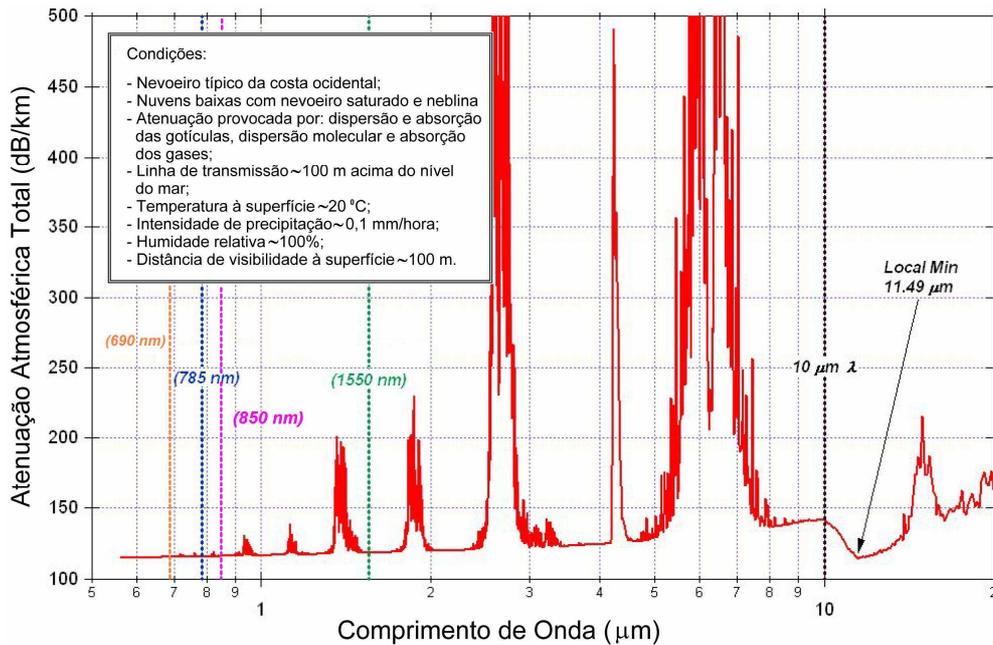


Figura I.15 – Atenuação para um nevoeiro típico de Primavera na costa ocidental dos EUA, em função do comprimento de onda (adaptado de Korevaar, 2002; 2003).

I.5 Atenuação Provocada Pela Chuva

O impacto negativo da presença de precipitação de chuva sobre um feixe óptico, embora não desprezável, é significativamente inferior ao provocado pelo nevoeiro. A explicação reside no facto da dimensão das gotas de chuva ser muito superior ao comprimento de onda da zona do espectro em análise e, por conseguinte, o valor da atenuação ser independente da dimensão das gotas de chuva. Todavia, a atenuação é proporcional ao conteúdo de água, em g/m^3 , e, consequentemente, directamente proporcional à intensidade de precipitação (Brooker). Tipicamente, os valores de atenuação são moderados, podendo alcançar cerca de 6 dB/km para uma chuvada com intensidade de precipitação de 25 mm/hora (Ghuman, 2006). Contudo, quando a intensidade de precipitação aumenta para níveis da ordem dos 100 mm/hora, o seu efeito pode tornar-se preocupante.

A atenuação do feixe óptico devida à precipitação da chuva é dada pela Equação I.21, em que R representa a ritmo de precipitação, em mm/hora, e a e b são coeficientes que dependem da temperatura e do comprimento de onda da radiação emitida²⁰ (Brooker).

$$\sigma_{rain} = a \cdot R^b \quad (\text{I.21})$$

A Figura I.16 representa a atenuação provocada pela chuva, em função da frequência, para diferentes intensidades de precipitação. A figura mostra que à medida que a intensidade de pre-

²⁰ Os coeficientes a e b tomam, respectivamente, os valores 1,076 e 0,67 (Naboulsi, 2005-b; Bouchet, 2005).

cipitação aumenta o valor máximo de atenuação ocorre para um valor de frequência menor (maior comprimento de onda). Este facto deve-se à proporcionalidade que existe entre o tamanho médio das gotas de chuva e a intensidade de precipitação (Brooker).

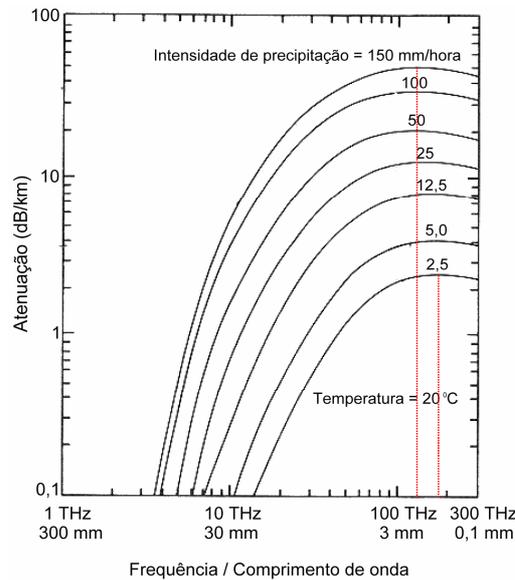


Figura I.16 – Atenuação provocada pela precipitação de chuva, em função da frequência (adaptado de Brooker).

A Figura I.17 pretende pôr em evidência três tipos de atenuação, resultantes do efeito da atmosfera, do nevoeiro e da chuva (Brooker). Do ponto de vista quantitativo a escala do gráfico não permite tirar conclusões com rigor. Ainda assim, é possível verificar que, genericamente, na zona do visível e do infravermelho próximo a atenuação provocada pela chuva é constante e só depende da intensidade de precipitação.

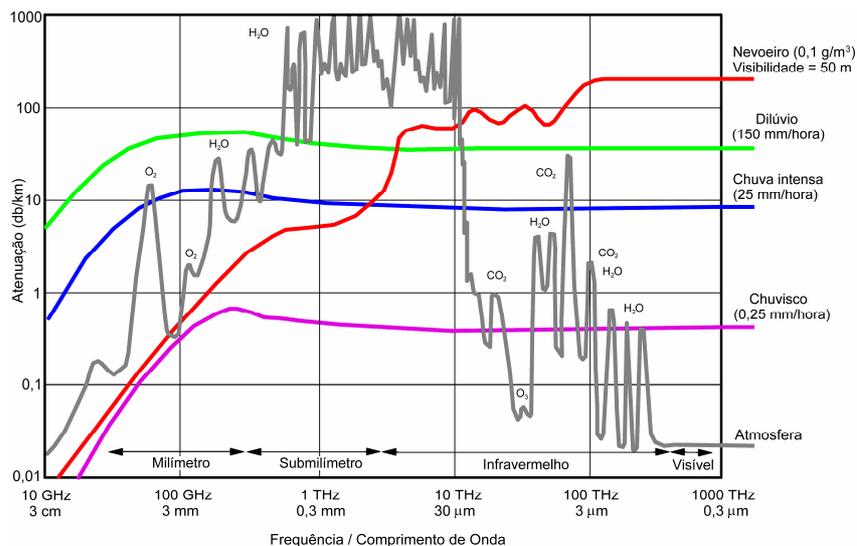


Figura I.17 – Atenuação do feixe óptico, em função do comprimento de onda, provocada pela atmosfera, pelo nevoeiro e pela chuva. Note-se o efeito de ressonância existente na faixa entre 3 μm e 30 μm, provocado pelas partículas de nevoeiro, e o pico de atenuação devido à chuva, existente nos comprimentos de onda entre 1 mm e 3 mm (adaptado de Brooker).

I.6 Conclusões

Ao longo do presente anexo foram descritos os principais fenómenos físicos que podem intervir sobre um sinal óptico quando este se propaga através da atmosfera, desde a fonte de emissão de radiação (alvo) até ao receptor (sensor da câmara de vídeo). O objectivo do presente estudo era recolher um conjunto de informações que permitisse seleccionar o comprimento de onda da fonte de radiação que fosse menos susceptível a perturbações, quando esta se propaga através da atmosfera, independentemente das condições climáticas existentes.

A resposta para a questão que motivou a realização deste estudo de pesquisa teve em consideração a compatibilização das características da fonte de radiação com as do sensor da câmara de vídeo, nomeadamente em termos de sensibilidade no comprimento de onda seleccionado.

O sensor das câmaras de vídeo que satisfazem os requisitos necessários, nomeadamente em termos de resolução e de frequência de aquisição, são, predominantemente, sensíveis à radiação da zona do visível, podendo, em alguns casos, ser também sensíveis à radiação de infravermelho próximo. Na realidade, são poucas as câmaras de vídeo com sensor sensível a radiação de comprimento de onda para além do espectro do visível, sendo que nas restantes, de um modo geral, o limite superior de sensibilidade situa-se próximo de 1000 nm (1 μm). De facto, existem câmaras de vídeo cujo sensor é sensível à radiação com comprimento de onda de infravermelho. Todavia, a resolução do sensor assim como a frequência de aquisição de imagens destas câmaras de vídeo fica muito aquém do desejado sendo, geralmente, aplicadas em termografia.

Deste modo, a gama do espectro que foi analisada limitou-se à zona do visível até ao infravermelho próximo (1 μm). Dentro desta banda, atendendo a que o comprimento de onda se devia situar numa das janelas de transmissão, apenas foram estudadas as janelas centradas nos comprimentos de onda de 690 nm, de 780 nm e de 850 nm. Por outro lado, uma vez que o comprimento de onda de 780 nm se situava entre os outros dois e este não representava vantagens significativas, considerou-se para efeito de selecção apenas os comprimentos de onda de 690 nm, zona do visível, e de 850 nm, zona do infravermelho próximo. Na Tabela I.10 apresentam-se as principais vantagens associadas a cada um dos comprimentos de onda.

Pelo facto de a atenuação ser menor em 690 nm²¹ e a sensibilidade do sensor das câmaras de vídeo ser superior neste comprimento de onda, poder-se-ia pensar que 690 nm seria a melhor opção. No entanto, considerando as vantagens inerentes ao comprimento de onda de 850 nm e, principalmente, o facto de com este se poder eliminar a radiação ambiente, considerou-se que

²¹ De referir que o ganho resultante da menor atenuação no espectro do visível face à verificada no infravermelho próximo é residual, não constituindo factor de decisão.

este comprimento de onda seria a solução mais adequada, desde que a sensibilidade do sensor da câmara não fosse penalizada em demasia, como se veio a comprovar. A decisão final foi tomada com base nos resultados obtidos da realização de ensaios com alvos protótipo, construídos com LEDs de emissão de radiação dos dois tipos (conforme descrito no Anexo IV).

Tabela I.10 – Vantagens associadas aos comprimentos de onda de 690 nm e de 850 nm.

Vantagens de 690 nm	Vantagens de 850 nm
Maior sensibilidade do sensor da câmara de vídeo.	Menor dispersão de <i>Rayleigh</i> .
Menor atenuação do feixe óptico (ainda que ligeira) na presença de nevoeiro.	Menor dispersão de <i>Mie</i> .
Menor efeito de cintilação no caso de grandes flutuações.	Menor efeito de turbulência (ainda que ligeiro).
	Menor efeito de cintilação, no caso de pequenas flutuações.
	Menor divergência do feixe óptico.
	Possibilidade de eliminar a radiação ambiente, através da aplicação de um filtro óptico do tipo passa-alto.

ANEXO II

CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS DE VISIBILIDADE DA ZONA ENVOLVENTE DA PONTE 25 DE ABRIL

II.1 Introdução

Os fenómenos físicos mais importantes, em termos de perturbação do feixe óptico quando este se propaga através da atmosfera, são a turbulência/cintilação e o nevoeiro. O primeiro desvia o feixe óptico da sua trajectória, dita normal, e o segundo atenua a potência de radiação emitida.

Apesar das medidas que se esperam vir a adoptar, ainda assim, na presença de nevoeiro intenso é espectável que o sistema de medição possa ficar inoperante. Deste modo, a estimação da taxa anual de inoperacionalidade do sistema de medição, devido à presença de nevoeiro, revelou-se fundamental para validar a eficiência do projecto, tendo-se procedido à caracterização das condições atmosféricas da zona envolvente à Ponte 25 de Abril (P25A), em termos de número médio de dias de ocorrência de nevoeiro ao longo do ano.

II.2 Caracterização das Condições Atmosféricas

As condições atmosféricas apresentam grande variabilidade, quer em termos espaciais quer em termos temporais. Daí que, para se proceder à caracterização das condições atmosféricas de um local, com um grau aceitável de representatividade, seja conveniente dispor de um conjunto de observações realizadas nas proximidades desse local e referentes a um intervalo de tempo mais ou menos alargado. No entanto, a informação disponível raramente diz respeito ao local em estudo. A alternativa consiste em usar a informação respeitante ao local mais próximo ou com características climáticas idênticas.

No caso concreto da zona envolvente da P25A desconhece-se a existência de registos de visibilidade¹. Assim, e na falta de dados mais representativos da zona em estudo, a sua caracterização foi efectuada tendo por base um conjunto de dados, gentilmente cedidos pelo Instituto

¹ Foram contactadas algumas entidades, como os pilotos da Barra de Lisboa, que, pela sua actividade, poderiam proceder ao registo de ocorrência de nevoeiro. Todavia, verificou-se que não efectuavam qualquer registo.

Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG), registados por quatro estações meteorológicas localizadas na área de Lisboa, das quais duas estão localizadas em aeroportos (Tabela II.1).

Tabela II.1 – Identificação e posicionamento das estações meteorológicas (zona de Lisboa).

Estação	Latitude (Norte)	Longitude (Oeste)	Altitude (m)
Alverca/Base Aérea	38° 53	9° 02	3
Lisboa (Jardim Botânico)	38° 43	9° 09	77
Lisboa/Portela	38° 47	9° 08	103
Lisboa/Tapada da Ajuda	38° 42	9° 11	60

Relativamente à localização das estações meteorológicas, tendo presente o objectivo que é a caracterização da visibilidade da zona envolvente à P25A, importa referir que:

- A estação *Alverca/Base Aérea* encontra-se localizada na base aérea de Alverca e é a estação mais distante da zona de estudo (≈ 20 km). No entanto, a zona de localização, junto ao rio Tejo, possui características que, à partida, parecem apontar semelhanças com as existentes na proximidade do local de interesse. Esta observação assenta no facto da estação estar posicionada a uma altitude idêntica à da base dos pilares da ponte e, por outro lado, estar próxima das margens do rio, onde a influência das correntes de ar marítimas mais se fazem sentir.
- A estação *Lisboa/Jardim Botânico* está localizada nas proximidades do centro urbano, em que a presença de edifícios altos, juntamente com a poluição atmosférica, podem influenciar de forma activa as características atmosféricas do local.
- A estação *Lisboa/Tapada da Ajuda*, localizada nas instalações do *Instituto Superior de Agronomia*, é a estação que se encontra mais próxima da zona de interesse. No entanto, esta estação está localizada numa encosta e em zona arborizada.
- A estação *Lisboa/Portela*², localizada nas proximidades do aeroporto internacional de Lisboa, seria a escolha acertada não fosse o facto desta se encontrar distante da zona de estudo e a uma altitude apreciável, para além de estar próxima do centro urbano.

² “O aeroporto de Lisboa/Portela está situado a norte da cidade, cerca de 2,5 km da margem direita do rio Tejo. Está abrigado do oceano Atlântico por uma linha de alturas orientada na direcção SW-NE, constituída pela serra de Sintra (altitude máxima 529 m) e por uma série de linhas de cumeadas (...). A norte do aeroporto e ao longo da margem direita do rio Tejo estende-se uma vasta zona industrial (...). A leste do aeroporto fica o estuário do Tejo (...)” (Ferreira, 1965).

Assim, atendendo à especificidade do problema e à falta de dados representativos do local de estudo apresentam-se de seguida algumas observações obtidas da análise dos dados provenientes das estações meteorológicas mencionadas.

Os dados disponibilizados pelo INMG constam, essencialmente, de dois documentos publicados (Ferreira, 1956; Ferreira, 1965). Num dos documentos encontram-se inscritos “os valores médios do número de dias em que se observaram os seguintes fenómenos: (...) céu encoberto (..), céu limpo (...), quantidade de precipitação (...), neve granizo e saraiva, trovoadas, nevoeiro, (...)”, referentes a intervalos de tempo de vários anos (mínimo de dez) (Ferreira, 1956). O segundo documento contém o “número médio de ocorrências³ simultâneas de determinados valores da visibilidade horizontal e da altura da base da camada mais baixa das nuvens que cobrem mais de 4/8 do céu”, registadas pela estação meteorológica Lisboa/Portela, entre o ano de 1951 e 1960 (Ferreira, 1965). É referido ainda que “As observações da visibilidade foram executadas utilizando pontos de referência situados a distâncias conhecidas do ponto de observação”.

Do conjunto de grandezas registadas pelas estações meteorológicas apenas o registo de ocorrências de nevoeiro/visibilidade foi analisado. Além disso, na análise dos dados fornecidos pelo documento *Climatologia Aeronáutica de Portugal* (Ferreira, 1965) apenas foram tidos em conta as ocorrências simultâneas de redução da visibilidade para menos de 1 km e a altura da base das nuvens inferior a 120 m.

A Tabela II.2 contém o número médio de dias em que foi observada a presença de nevoeiro, durante um determinado intervalo de tempo, registado por cada uma das estações meteorológicas e em cada mês do ano. As Figuras II.1 e II.2 apresentam, sob a forma gráfica, os dados da Tabela II.2. Na Figura II.1 encontra-se representado o número médio de dias, em que foi registada a presença de nevoeiro por cada uma das estações/época, em cada mês do ano. Na Figura II.2 está representado o número médio de dias anual em que foi registada a presença de nevoeiro, por cada uma das estações/época, correspondente ao somatório dos dias registados ao longo do ano por cada uma das estações/época.

A Tabela II.3 contém o número médio de ocorrências em que a distância de visibilidade foi inferior a 1 km e a altura da base da camada das nuvens inferior a 120 m, no intervalo de tempo compreendido entre 1951 e 1960. As observações foram efectuadas em períodos de três horas pela estação Lisboa/Portela.

³ “Cada valor é obtido da expressão $k \cdot \frac{n}{s}$, em que k representa o número de dias do mês, n representa o número total de ocorrências observadas, e s representa o número total de observações disponíveis” (Ferreira, 1965).

Tabela II.2 – Número médio de dias em que foi observada a presença de nevoeiro, registados por quatro estações meteorológicas situadas na área de Lisboa (Ferreira, 1956).

Estação	Alverca/ Base Aérea	Lisboa/ Portela	Lisboa/Jardim Botânico			Lisboa/Tapada Ajuda	
	1971/80	1951/80	1921/50	1931/60	1951/80	1921/50	1951/80
Janeiro	5,8	4,8	5,1	4	2,9	0,8	1,1
Fevereiro	1,9	3	3,1	2	1,7	0,4	0,7
Março	1,2	3	1,6	1	1,2	0,2	0,5
Abril	1,3	1,2	0,8	0	0,1	0,1	0,1
Mai	0,3	0,7	0,4	0	0,1	0	0
Junho	0,9	0,4	0,4	0	0,2	0	0
Julho	0,1	0,3	0,3	0	0,2	0	0,2
Agosto	0,4	0,4	0,4	0	0,1	0	0
Setembro	0,8	1,1	0,9	1	0,3	0	0,1
Outubro	2,5	3,1	1,8	1	1,2	0	0,4
Novembro	3,5	3,4	3,5	2	1,3	0,2	0,3
Dezembro	3,8	4,9	5,4	4	2,5	0,6	0,7
TOTAL	22,5	26,3	23,7	15	11,8	2,3	4,1

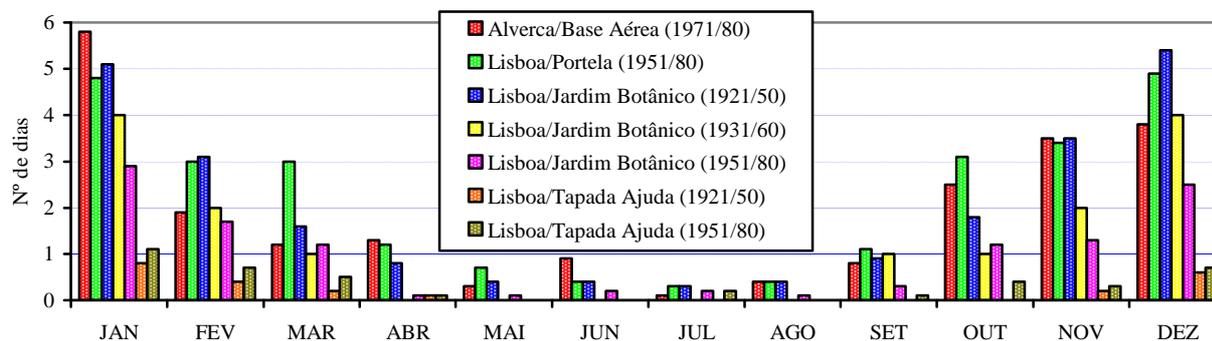


Figura II.1 – Número médio de dias, por mês, em que foi registada a ocorrência de nevoeiro, em função do local/época.

A Tabela II.3 contém o número médio de ocorrências em que a distância de visibilidade foi inferior a 1 km e a altura da base da camada das nuvens inferior a 120 m, no intervalo de tempo compreendido entre 1951 e 1960. As observações foram efectuadas em períodos de três horas pela estação *Lisboa/Portela*.

Nas Figuras II.3 e II.4 estão representados, sob a forma gráfica, os dados da Tabela II.3, em função das horas do dia e dos meses do ano, respectivamente. O gráfico da Figura II.5 apresenta, de forma discriminada, o número médio de ocorrências com visibilidade inferior a 0,5 km e entre 0,5 km e 1 km (com a altura da base da camada das nuvens inferior a 120 m, em ambos os casos) observados pela estação *Lisboa/Portela* entre 1951 e 1960.

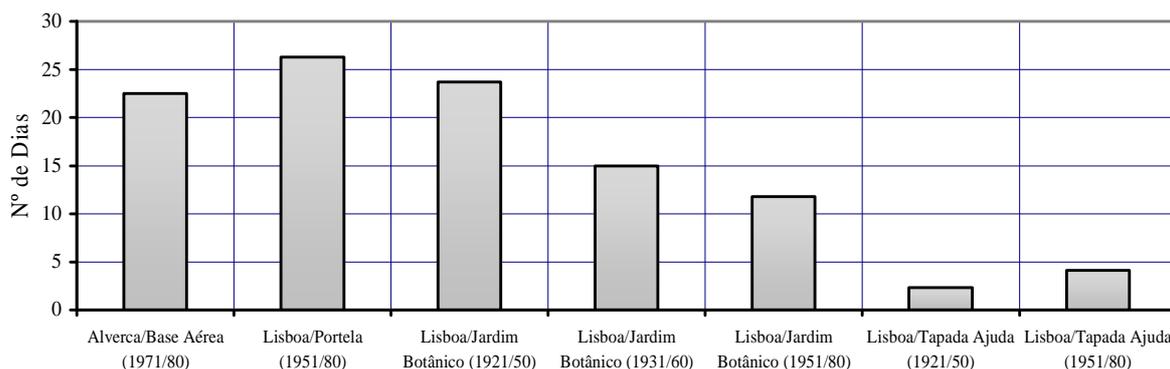


Figura II.2 – Número médio de dias, por ano, em que foi detectada a presença de nevoeiro, em função do local/época.

Tabela II.3 – Número médio de ocorrências de visibilidade inferior a 1 km e a altura da base da camada das nuvens inferior a 120 m, registadas pela estação Lisboa/Portela, no intervalo de tempo compreendido entre 1951 e 1960 (Ferreira, 1965)

Horas da observação	00h00	03h00	06h00	09h00	12h00	15h00	18h00	21h00
Janeiro	0,2	0,6	0,8	1,0	0,9	0,2	0,5	0,0
Fevereiro	0,2	0,4	1,3	1,1	0,4	0,0	0,1	0,1
Março	0,2	0,6	1,2	1,6	0,2	0,0	0,0	0,0
Abril	0,0	0,0	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Mai	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Junho	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Julho	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Agosto	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Setembro	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outubro	0,2	0,0	0,1	0,8	0,2	0,0	0,0	0,1
Novembro	0,0	0,4	0,7	1,0	0,3	0,2	0,2	0,2
Dezembro	0,6	0,6	0,9	1,1	0,8	0,2	0,2	0,5

Da observação e análise das Figuras II.1 a II.5 pode-se constatar, genericamente, que:

- A ocorrência de nevoeiro acontece durante todo o ano, embora a sua presença seja mais predominante entre o mês de Outubro e o mês de Março, com destaque para os meses de Dezembro e Janeiro (Figura II.1).
- Considerando os valores menos optimistas, poder-se-á dizer que a ocorrência de nevoeiro acontece, em média, entre 20 a 30 dias por ano, correspondente a uma taxa entre 5,6% e 8,4% do tempo total anual. Contudo, se considerar que a presença de nevoeiro não se verifica durante as 24 horas do dia então a percentagem de tempo com visibilidade reduzida será, certamente, inferior à indicada (Figura II.2).
- O período do dia entre as 03h00 e as 12h00 é o mais propício à presença de nevoeiro e, dentro deste, entre as 06h00 e as 09h00 (Figura II.3).

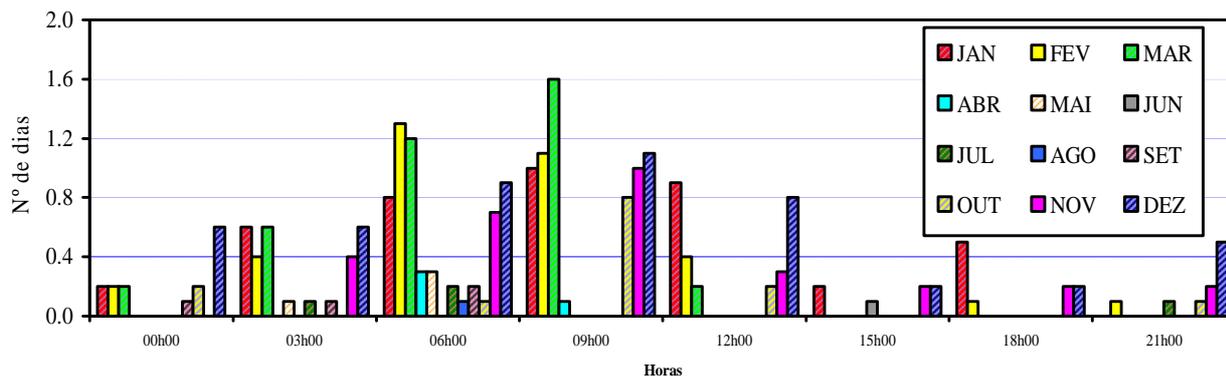


Figura II.3 – Número médio de ocorrências de visibilidade inferior a 1 km e a altura da base das nuvens inferior a 120 m, registados entre 1951 e 1960 pela estação meteorológica Lisboa/Portela, em função da hora de observação (períodos de três horas) e do mês.

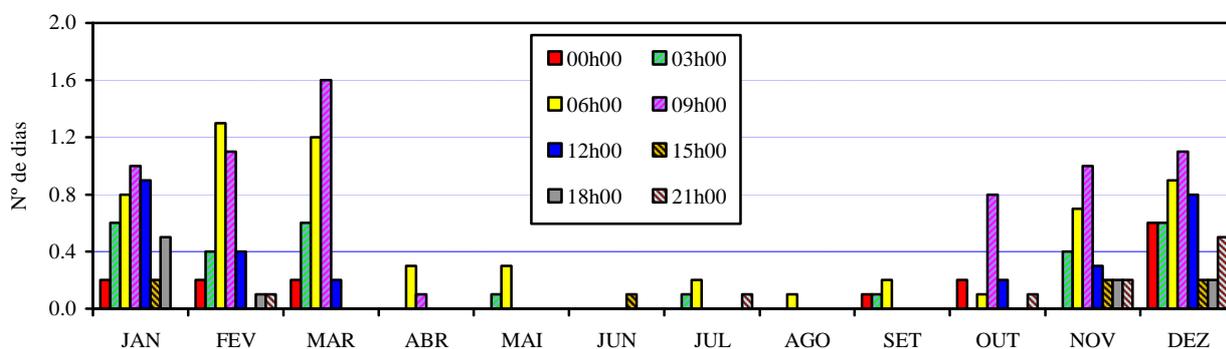


Figura II.4 – Número médio de ocorrências de visibilidade inferior a 1 km e a altura da base das nuvens inferior a 120 m, registados entre 1951 e 1960 pela estação meteorológica Lisboa/Portela, em função do mês e da hora de observação.

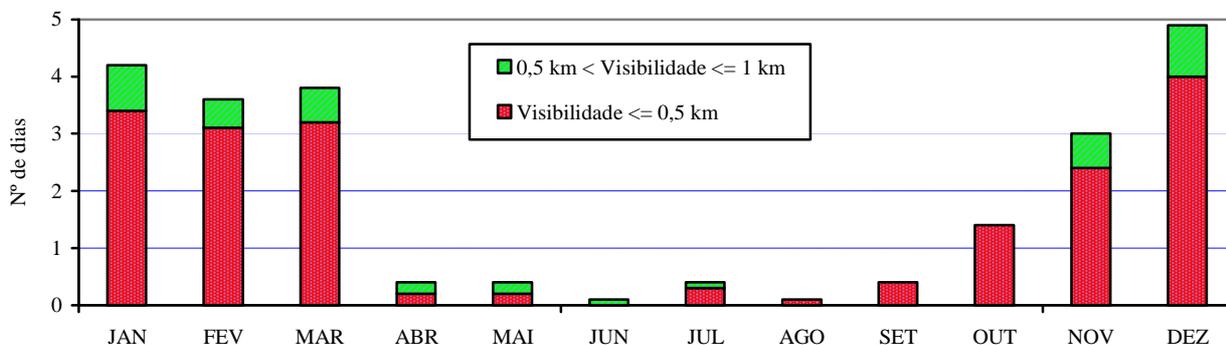


Figura II.5 – Número médio de ocorrências de visibilidade inferior a 0,5 km e a 1 km e a altura da base das nuvens inferior a 120 m, registados entre 1951 e 1960 pela estação Lisboa/Portela.

- De Outubro para Março verifica-se uma tendência crescente da presença de nevoeiro. Neste período, verifica-se igualmente uma tendência crescente do número de ocorrências entre as 03h00 e as 09h00, seguida de decréscimo para o período das 12h00 (valor máximo a ser alcançado às 09h00) (Figura II.4). Durante os meses de Abril a Setembro o valor máximo de ocorrências acontece por volta das 06h00.

- Embora nos meses de Fevereiro e Março se registem valores de pico mais elevados de ocorrências de nevoeiro que nos meses de Janeiro e Dezembro, o somatório de ocorrências ao longo do dia é mais elevado nestes dois últimos meses, querendo isto dizer que nos meses de Fevereiro e Março a presença de nevoeiro é menos persistente no tempo, concentrando-se mais durante o período da madrugada e manhã (entre as 06h00 e as 09h00). Nos meses de Janeiro e Dezembro a presença de nevoeiro é mais duradoura, prolongando-se desde as 00h00 até às 12h00.
- A presença de nevoeiro das classes moderado, intenso ou cerrado (visibilidade inferior a 0,5 km) é mais frequente que a de nevoeiro fraco (visibilidade inferior a 1 km) (classificação de acordo com a Tabela I.2), querendo isto dizer que o nevoeiro quando aparece, geralmente, é de grande intensidade (Figura II.5).

Os gráficos representados na Figura II.6 “dão uma visão de conjunto das condições meteorológicas” (Ferreira, 1965) existentes na zona do aeroporto da Portela entre 1951 e 1960, para as situações de simultaneidade de visibilidade (V) e de altura da base das nuvens (h_s). Os gráficos traduzem a percentagem de ocorrências de nevoeiro em função da hora do dia e do mês do ano.

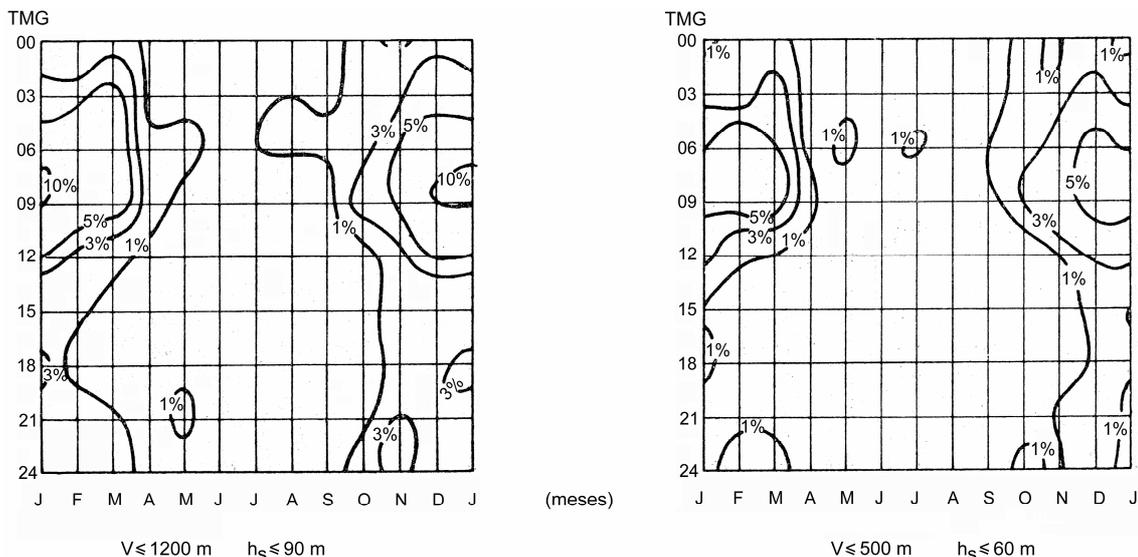


Figura II.6 – Ocorrência de nevoeiro, em percentagem, para dois casos de visibilidade (V) e de altura da base das nuvens (h_s) que cobrem mais de 4/8 do céu (Ferreira, 1965).

II.3 Conclusões

Tendo em conta os dados apresentados, verifica-se que a maior percentagem de ocorrências de nevoeiro acontece durante o período entre os meses de Outubro a Março e entre as 03h00 e as 12h00. O valor máximo (10%) ocorre, apenas, no período compreendido entre as 06h00 e as 09h00 dos meses de Dezembro e Janeiro.

Em conclusão, se tivermos em conta que a presença de nevoeiro não subsiste durante as 24 horas do dia e que, em média, a presença do nevoeiro não vai além de 3 horas por dia (em face dos dados apresentados), prevê-se que o tempo inoperante do sistema de medição seja inferior a 1% do tempo total anual. Para além disso, e apesar deste valor ser perfeitamente aceitável, podem-se implementar medidas adicionais no sentido de manter o sistema funcional na presença de neblina e de nevoeiro fraco ou moderado. Por conseguinte, é espectável que o tempo inoperante seja bastante inferior a qualquer um dos valores indicados.

ANEXO III

ALVO

III.1 Introdução

A sinalização das zonas de interesse para observação de uma infra-estrutura, geralmente, é realizada por meio de alvos fixos nessas zonas. Por vezes, em aplicações específicas, são usados elementos característicos da própria estrutura para obter a informação desejada, dispensando-se, nesse caso, a utilização de alvos. No entanto, tal como já foi mencionado anteriormente (cf. Capítulo 2), a utilização de alvos, ou de elementos que funcionem como alvos, puramente passivos¹ limita a acção de observação da infra-estrutura ao período diurno e a condições de boa visibilidade, ou a ensaios realizados em ambiente laboratorial (*indoor*), em condições de luminosidade controlada e a curta distância.

Em sistemas automáticos de observação, como é o caso dos sistemas de SHM, a identificação e a localização correcta do alvo na imagem é essencial para a observação em modo permanente, de modo a garantir o arranque automático do processo de observação em caso de interrupção. A interrupção pode dever-se a perda temporária do alvo, provocada por obstáculos que se interpõem no campo de vista do subsistema de visão, a perturbação do meio (ex. nevoeiro), ou ainda devido a falha temporária de energia do sistema de alimentação, entre outros factores. Por outro lado, as características do alvo, tais como a forma geométrica e a possibilidade de ajustar a intensidade de radiação emitida às condições atmosféricas, também influenciam o desempenho dos algoritmos de processamento de imagem na determinação das coordenadas do alvo na imagem.

Neste Anexo apresentam-se alguns aspectos relacionados com o desenvolvimento do alvo, nomeadamente em termos de soluções adoptadas para a forma geométrica, dimensões e outras funcionalidades consideradas úteis para o sistema de medição, terminando com a apresentação dos resultados obtidos da aquisição de imagens do alvo num ensaio realizado na Ponte 25 de Abril (P25A).

¹ Entende-se por alvo passivo um alvo que apenas reflecte a radiação que nele incide e não tem capacidade própria para emitir radiação electromagnética.

III.2 Activo versus Passivo

Com excepção dos estudos desenvolvidos por Marécos (1969) e Wahbeh (2003), em todas as restantes aplicações conhecidas o alvo usado era do tipo passivo, isto é, sem capacidade para gerar radiação própria. Quer isto dizer que a radiação é gerada por outras fontes de radiação e chega ao sensor da câmara de vídeo após reflexão do alvo. Em aplicações de exterior, geralmente é usada a radiação ambiente, a qual cobre uma vasta gama do espectro de radiação e sobre a qual não é possível exercer qualquer tipo de controlo. No caso das aplicações realizadas em ambiente laboratorial, a iluminação dos alvos é efectuada por intermédio de fontes de luz artificial, podendo, neste caso, haver algum controlo sobre a intensidade e sobre o ângulo de incidência, ainda que de forma muito limitada.

Por vezes, a radiação que atinge um conjunto de píxeis do sensor da câmara de vídeo é de tal modo intensa que a capacidade de carga destes elementos é excedida, provocando a saturação destes. A tendência é para que o excesso de carga gerada se redistribua pelos píxeis vizinhos, dando origem ao fenómeno denominado de efeito fluorescente (*blooming*), o qual, geralmente, está associado a fontes de luz intensa, como por exemplo a utilização de flash, e alvos de material reflector (Shortis, 1996). Este fenómeno produz na imagem capturada um efeito de espalhamento ou de arrastamento, assemelhando-se ao efeito produzido pelo movimento do alvo (Figura III.1)².

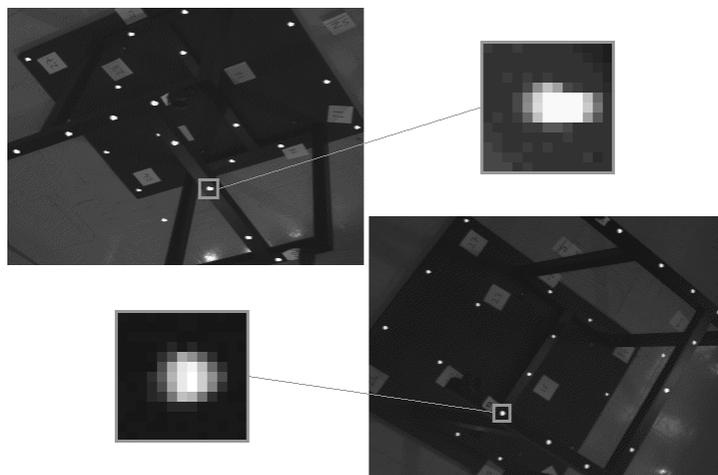


Figura III.1 – Imagem do alvo com efeito de espalhamento (*blooming*) devido à forte intensidade de radiação reflectida pelo alvo (Shortis, 1996).

Com os alvos do tipo activo é possível seleccionar o comprimento de onda da fonte de radiação, controlar a intensidade da radiação emitida e o ângulo de emissão e, eventualmente, efectuar modulação no tempo. A implementação destas funcionalidades, juntamente com a apli-

² Embora não seja possível eliminar completamente o efeito de *blooming*, actualmente, os sensores CCD já incorporam meios que permitem reduzir, de forma significativa, o seu efeito (Shortis, 1996).

cação de filtros ópticos e o sincronismo entre a aquisição da imagem e a emissão da radiação por parte do alvo, permitem isolar, de uma forma mais eficiente, a radiação emitida por este da radiação ambiente e de outras fontes externas de perturbação. Na sequência de um ensaio realizado (Albert, 2002), tendo em vista a medição dos deslocamentos vertical e transversal do tabuleiro de uma ponte, fazendo uso de uma câmara de vídeo e de alvos passivos, é relatado que a qualidade do processamento das imagens foi deteriorada em virtude de uma sobre-exposição dos alvos e de variações da iluminação ambiente, apesar do céu nublado.

III.3 Forma Geométrica

A forma geométrica dos alvos descritos na literatura varia muito consoante o objectivo que se pretende alcançar. Assim, as formas geométricas mais comuns são a quadrada (ou rectangular) e a redonda, dispostas em xadrez ou em anéis concêntricos (Figura III.2), em que o material de tonalidade escura alterna com o material de tonalidade clara, para criar áreas distintas de elevado contraste. A forma de alvo mais simples consiste, simplesmente, em uma única superfície esférica (ou rectangular) de tonalidade clara sob um fundo escuro.

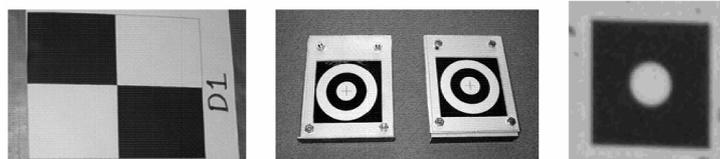


Figura III.2 – Alvos com forma geométrica quadrada e redonda (Jiang, 2005) e alvo formado por uma única superfície esférica sob fundo escuro (Albert, 2002).

Com a incorporação de tecnologia digital na área da fotogrametria de proximidade (*close-range photogrammetry*), através da introdução das câmaras digitais, surgiu a oportunidade de automatizar todo o processo, desde a calibração do sistema de medição até à reconstrução do objecto em observação (Fraser, 2005-b). Neste contexto, a meio da década de 90, surgiram alvos com características específicas, denominados de dispositivos de orientação exterior (*EO – Exterior Orientation device*), os quais possuem formas singulares, inconfundíveis e, por isso mesmo, facilmente reconhecidos pelo sistema de processamento de imagem (Fraser, 2005-b) (Figura III.3). Na realidade, estes dispositivos são formados por um conjunto de alvos dispostos segundo uma geometria conhecida a qual estabelece, e permite saber de antemão, as suas coordenadas no espaço tridimensional. Este grupo de alvos fornece um conjunto mínimo de restrições, necessárias para determinar a *resectioning*, isto é, a estimativa inicial da posição e da orientação dos diversos sistemas de visão que compõem o sistema de medição.



Figura III.3 – Alvos com forma singular para reconhecimento e identificação automática pelo sistema de processamento de imagem (Fraser, 2005-b).

Ainda no contexto de automatização, no caso do dispositivo *EO* não ser visível em todas as imagens adquiridas, é necessário determinar a respectiva correspondência dos alvos que são visíveis em duas ou mais imagens, para efectuar a triangulação de pontos. Para que esta correspondência possa ser realizada de forma automática é usual o recurso a alvos codificados, geralmente com formas complexas, em representação de um código binário (Figura III.4).

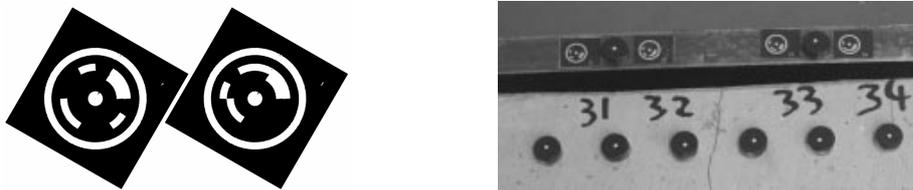


Figura III.4 – Dois alvos codificados e a sua aplicação na medição das deformações de barras de betão, ao longo do tempo (Niederöst, 1997).

Numa aplicação de grandes dimensões, em que a distância entre os alvos pode atingir vários metros, a posição relativa dos alvos, observada por cada um dos subsistemas de visão, praticamente não varia, não se justifica a utilização de alvos codificados. A identificação dos alvos e a respectiva correspondência só é necessária aquando da primeira calibração do sistema de medição, podendo ser efectuada de forma manual, dado o número reduzido de alvos. Apesar disso, se desejável, a correspondência entre os alvos projectados nas imagens de dois ou mais subsistemas de visão também pode ser efectuada através das propriedades da matriz fundamental.

Num sistema de medição por meio de visão, já apresentado anteriormente (cf. Capítulo 2), o alvo usado é formado por dois traços dispostos de modo a formarem um ângulo de 90° (Figura III.5), (Olaszek, 1999). Este alvo é simples de realizar e fácil o processamento da imagem.



Figura III.5 – Alvo formado por dois traços (Olaszek, 1999).

A forma geométrica representada na Figura III.6 é a que se afigura mais adequada para aplicações de observação a longa distância, dado que esta reúne a generalidade das características associadas ao alvo em círculo e o processamento da imagem, para a detecção, a identificação e a determinação das coordenadas, é mais simples de realizar. Por exemplo, na maioria dos sistemas de visão presentemente conhecidos, em que foi usado um alvo com a forma circular, a identificação da marca foi efectuada por meio da correlação entre uma imagem padrão e a imagem em processamento (*template matching*) (cf. Capítulo 2); já no caso em que foi usado um alvo em forma de cruz, o processamento da imagem assentou, basicamente, na aplicação de algoritmos de detecção de cantos (*edge detect*), cuja execução é mais rápida.

Também a determinação das coordenadas do alvo na imagem é mais simples de realizar no caso do alvo em forma de cruz, dado que esta operação envolve, habitualmente, a determinação dos pontos de intercepção de quatro (ou oito) rectas (Figura III.6). Já no caso do alvo em forma circular, a determinação das coordenadas do alvo na imagem pode abranger apenas a determinação das coordenadas do centro de massa da marca, nos caso mais simples, como acontece na maioria dos sistemas de visão que são conhecidos, ou a determinação dos parâmetros característicos de funções de ajuste (e.g. curva de regressão não linear de Gauss, cónica). A execução de qualquer destas operações requer quantidades significativas de recursos (e.g. memória) e capacidade de processamento ou, em alternativa, de disponibilidade de tempo.

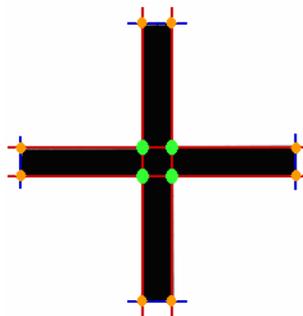


Figura III.6 – Pontos de intercepção de oito rectas, obtidas da aplicação do algoritmo de detecção de cantos (*edge detect*).

As principais vantagens que resultam da opção pela forma geométrica em cruz são:

- Facilidade de reproduzir a forma geométrica com elementos discretos (LEDs), nomeadamente em termos de alinhamento.
- Facilidade em aumentar ou diminuir a espessura do traço, actuando sobre o número de linhas e de colunas de elementos.
- Forma singular, com os dois traços a formarem um ângulo aproximadamente de 90° (a superfície cilíndrica pode ser facilmente confundida com a mancha circular de brilho gerada por uma lâmpada de iluminação).

- Simplicidade do algoritmo de detecção de contornos, para a determinação da equação das rectas que delimitam cada um dos traços.
- Simplicidade do algoritmo de cálculo das coordenadas do alvo na imagem, através da determinação das coordenadas dos pontos de intercepção das rectas que delimitam cada um dos traços.

III.4 Alvo Activo

Seleccionada a fonte de radiação e a forma geométrica do alvo, foi desenvolvido um alvo protótipo com vista a realizar ensaios em condições reais na P25A e avaliação, entre outros parâmetros, relação sinal/ruído da imagem do alvo activo adquirida pelo sistema de visão.

Pretendia-se obter um conjunto de dados que, de forma fundamentada, permitissem validar as opções tomadas. Considerou-se conveniente dotar o alvo com algumas funcionalidades que permitissem diversificar o tipo de ensaios a realizar e estudar o comportamento do sistema electrónico do alvo face às diversas situações de teste.

O alvo é formado por três linhas e por três colunas de LEDs de emissão de radiação de infravermelho próximo (875 nm), montados numa das faces de uma caixa de aço, com as dimensões externas de 400 x 400 x 120 mm (Figura III.7). Cada uma das linhas e colunas é composta por 29 LEDs, num total de 165 LEDs, alinhados e espaçados de 10 mm segundo as direcções vertical e horizontal. O comprimento de cada um dos traços, definido pelo número de LEDs e pelo espaçamento entre LEDs, foi determinado de forma a gerar um traço na imagem com aproximadamente 50 píxeis³.

O comando da radiação emitida pelas linhas e pelas colunas de LEDs é efectuado de forma independente, permitindo actuar sobre a espessura do traço vertical e horizontal.

A intensidade de corrente que percorre cada uma das linhas/colunas é configurada de forma independente, podendo ser ajustada entre 0 e 80 mA por LED, correspondente a 80% do valor máximo admissível.

Os LEDs que formam cada uma das linhas e cada uma das colunas estão ligados em paralelo, de modo que a avaria de um deles não impede o funcionamento dos restantes.

A arquitectura do alvo desenvolvido encontra-se esquematizada na Figura III.8, onde estão representados os principais elementos e a sua interligação.

³ Para a determinação deste valor considerou-se que: i) a distância focal da óptica era 640 mm (óptica disponível para a realização do ensaio); ii) a distância média entre o alvo e o sistema óptico era 510 m; e iii) o píxel do sensor da câmara de vídeo possuía secção quadrada e 7,4 µm de lado.

Para satisfazer a intensidade de corrente necessária, o alvo dispõe de duas fontes de alimentação, uma para a alimentação das linhas e a outra para a alimentação das colunas e da zona central de LEDs (Figura III.9).



Figura III.7 – Alvo protótipo, construído com LEDs de emissão de infravermelho próximo.

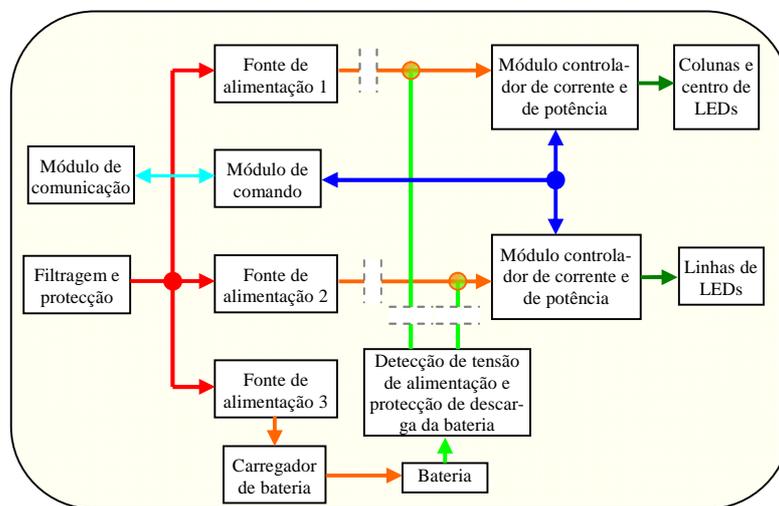


Figura III.8 – Diagrama de blocos da arquitectura do alvo activo.

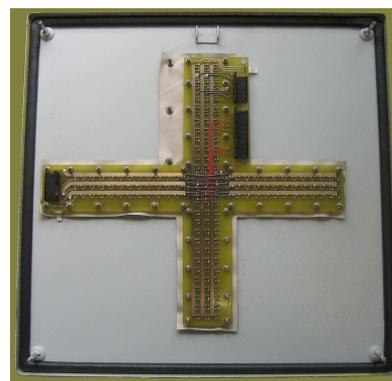
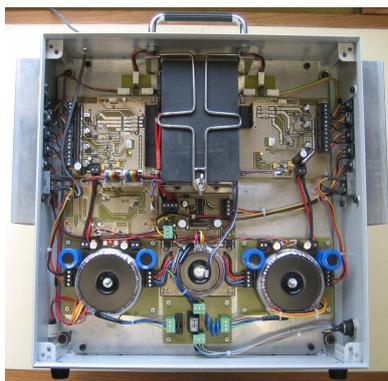


Figura III.9 – Vista do interior da caixa de alojamento do alvo. Circuito electrónico de gestão e de comando do alvo (esq.) e fixação dos LEDs na tampa da caixa (dir.).

O estabelecimento da comunicação com o alvo, para definir a configuração desejada, é realizada por meio de uma interface de comunicação do tipo *UART* (*Universal Asynchronous Recei-*

ver *Transmitter*), presente no microcontrolador. Para o efeito, o envio de comandos e a recepção da resposta pode ser efectuado através de um computador equipado com uma porta série. Para que a operacionalidade do alvo não ficasse limitada à disponibilidade de um computador, foi desenvolvida uma consola portátil a partir da qual é possível configurar o alvo e/ou interrogar o mesmo com vista à obtenção dos parâmetros de configuração, armazenados localmente, e executar a medição de algumas grandezas para efeito de monitorização do funcionamento do alvo (Figura III.10).



Figura III.10 – Consola portátil, com visor e teclado, para configurar o alvo.

III.5 Aquisição de Imagens do Alvo na P25A

Com o objectivo de avaliar a sensibilidade do sensor da câmara de vídeo no comprimento de onda da fonte de radiação (875 nm), assim como as funcionalidades implementadas no alvo activo, foi realizado um teste na P25A para aquisição de imagens do alvo. Para este efeito usou-se uma câmara de vídeo com a resolução de 1920 x 1080 píxeis e uma óptica com a distância focal de 640 mm⁴, dotada com um filtro óptico de IR (infravermelho), do tipo passa-alto (*Hoya R-72*)⁵.

O subsistema de visão foi montado na base do pilar da margem Sul, denominado de P3, e o alvo activo foi fixado no exterior da estrutura da plataforma móvel que se encontrava posicionada na zona do meio vão do tabuleiro e por baixo deste (Figuras III.11 e III.12).

O subsistema de visão foi montado sobre uma estrutura, desenvolvida para o efeito, e com características adequadas ao tipo de superfície. Este acessório permitiu o nivelamento da base de suporte no plano horizontal, através de parafusos de nivelamento, e proporcionou uma ligação segura e estável à superfície do maciço, por meio dos apoios semi-perfurantes (Figura III.13).

⁴ A óptica usada neste teste, exemplar único, fez parte do primeiro sistema de visão que esteve instalado na P25A, entre 1969 e 1979 (cf. Capítulo 2).

⁵ A frequência de corte (-3 dB) do filtro óptico situa-se em 720 nm, sendo praticamente plana entre 760 nm e 1600 nm e com uma taxa de transmissão de 92%.

A aquisição das imagens foi realizada por meio de uma placa de aquisição de imagens (*frame grabber*), com a referência *FrameLink*, produzida pela empresa IMPERX, com uma interface do tipo *PCMCIA* (*Personal Computer Memory Card International Association*) e instalada num computador portátil, juntamente com a aplicação que acompanha a referida placa, denominada de *FrameLink Application*, desenvolvida também pela IMPERX. Esta aplicação, juntamente com o *frame grabber*, permitiu adquirir imagens e sequências de vídeo nos formatos *BMP* e *AVI*, respectivamente.

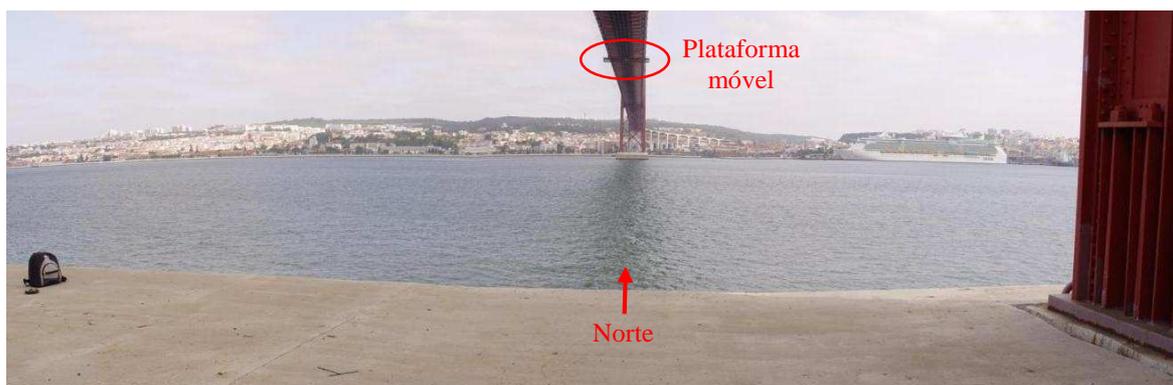


Figura III.11 – Vista da base do pilar P3 para a zona do meio vão do tabuleiro.



Figura III.12 – Subsistema de visão alinhado na direcção do alvo.



Figura III.13 – Posição do subsistema de visão no maciço superior da base do pilar P3 (esq.). Base de fixação e de nivelamento do subsistema de visão (dir.).

III.5.1 Fixação do Alvo

O alvo foi fixado na estrutura da plataforma móvel que se encontrava posicionada na zona do meio vão do tabuleiro, por baixo do tabuleiro ferroviário. Para a fixação do alvo foi adquirido um dispositivo, que possibilita o ajuste da rotação do alvo segundo os três eixos, e desenvolvidos acessórios adicionais para a ligação do sistema de suporte do alvo à estrutura da plataforma (Figura III.14).



Figura III.14 – Dispositivo de fixação e de orientação do alvo.

III.5.2 Aquisição de Imagens

Os objectivos que se pretendiam alcançar com a realização deste ensaio eram, fundamentalmente, avaliar a relação sinal/ruído das imagens adquiridas pelo subsistema de visão e quantificar a atenuação do meio de propagação por meios indirectos. Para a concretização destes objectivos realizaram-se diversas experiências, com aquisição de imagens e de vídeos, tendo-se actuado sobre três parâmetros: i) a intensidade de corrente de excitação dos LEDs; ii) o tempo de exposição de aquisição das imagens; e iii) o tipo de traço, simples (uma linha e uma coluna de LEDs) ou completo (três linhas e três colunas de LEDs).

Refira-se que a capacidade do sistema de medição se manter em pleno funcionamento na presença de condições atmosféricas de fraca visibilidade, nomeadamente na presença de nevoeiro, depende, directamente, destes três parâmetros e daí o interesse do estudo realizado.

Neste contexto, a aquisição das imagens foi realizada sob condições de intensidade de corrente de excitação dos LEDs a variar entre 5 mA e 70 mA (entre 5% e 70% da intensidade de corrente máxima admissível) e de tempo de exposição a variar entre 2,5 ms e 30 ms⁶. As imagens que se apresentam a seguir (Figuras III.15 a III.18), com a resolução de 1920 x 1080 píxeis, foram adquiridas nas condições indicadas junto das mesmas.

⁶ Se a frequência de aquisição for 20 Hz significa que o tempo de exposição máximo pode ir até próximo dos 50 ms.



Figura III.15 – Imagem do alvo no modo de traço simples, adquirida com uma intensidade de corrente de 5 mA e um tempo de exposição de 10 ms (esq.) e 30 ms (dir.).

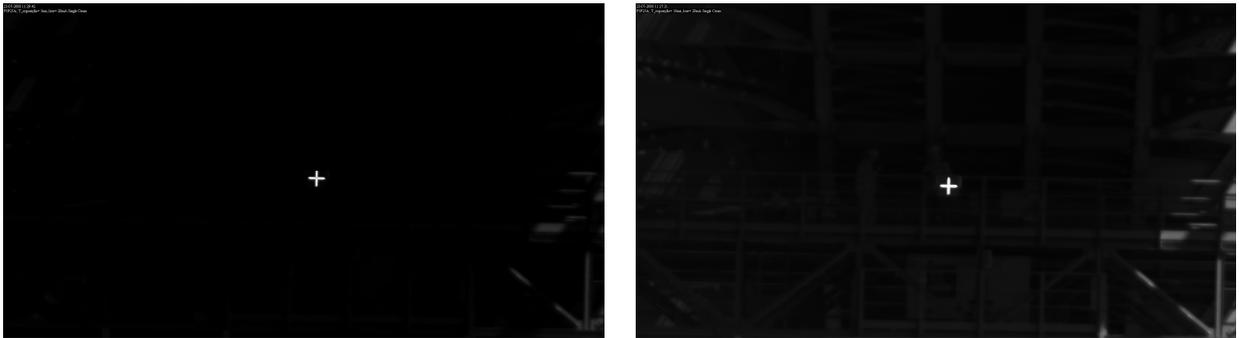


Figura III.16 – Imagem do alvo no modo de traço simples, adquirida com uma intensidade de corrente de 20 mA e um tempo de exposição de 5 ms (esq.) e 10 ms (dir.).

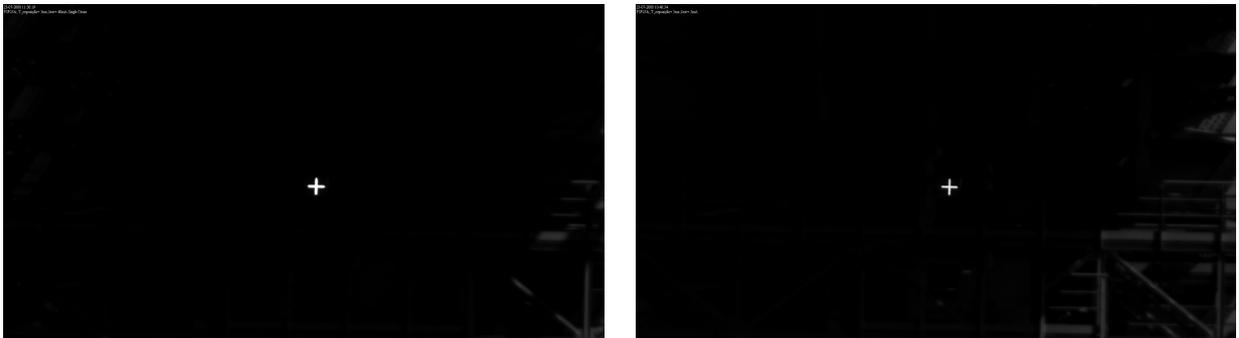


Figura III.17 – Imagem do alvo no modo de traço simples, adquirida com uma intensidade de corrente de 40 mA e um tempo de exposição de 5 ms (esq.) e imagem do alvo no modo de traço completo, adquirida com uma intensidade de corrente de 5 mA e um tempo de exposição de 5 ms (dir.).



Figura III.18 – Imagem do alvo no modo de traço completo, adquirida com uma intensidade de corrente de 20 mA e um tempo de exposição de 2,5 ms (esq.) e com uma intensidade de corrente de 70 mA e um tempo de exposição de 2,5 ms (dir.).

No lado direito das imagens adquiridas são visíveis alguns elementos da estrutura do tabuleiro, tornando-se mais nítidos com o aumento do tempo de exposição. Esta particularidade deve-se ao facto do lado Este do tabuleiro estar a ser iluminado pelo Sol no momento do ensaio, o qual se realizou durante o período da manhã, fazendo com que os próprios elementos da estrutura do tabuleiro emitissem radiação de infravermelho, sob a forma de calor, não tendo sido possível eliminá-la com o filtro óptico.

A colectânea de imagens apresentadas nas Figuras III.19 e III.20 foram extraídas das imagens originais, adquiridas pela câmara de vídeo, e a área delimitada por cada uma das molduras tem a resolução de 150 x 150 píxeis. De referir que na configuração de traço simples, i.e., uma linha e uma coluna de LEDs, o LED central não se encontrava ligado (Figuras III.19). Este acontecimento não foi intencional e deveu-se a uma falha do operador que operava a consola. No entanto, este facto revelou-se muito útil na medida em que permitiu observar o efeito produzido por um LED avariado, em função da intensidade de corrente e do tempo de exposição.

Da observação do conjunto das imagens adquiridas é possível constatar que:

- Cada um dos segmentos da marca, formados por 29 LEDs, gera na imagem um traço com o comprimento variável entre 49 e 54 píxeis (valor aproximado), dependendo da intensidade de corrente, do tempo de exposição e da espessura do traço. Tal como mencionado anteriormente, era esperado obter-se na imagem um traço com o comprimento de cerca de 50 píxeis, demonstrando uma boa concordância.
- Com boas condições de visibilidade, como se verificaram no dia do ensaio, a marca do alvo é perfeitamente visível, mesmo em condições de muito baixa intensidade de corrente de excitação dos LEDs e com tempo de exposição baixo. Quer isto dizer que a margem de ganho do sistema é elevada, indiciando boas perspectivas de utilização do sistema, mesmo em condições de baixa visibilidade, como as que se verificam na presença de nevoeiro. Deste modo, actuando sobre o valor da intensidade de corrente de excitação dos LEDs e/ou do tempo de exposição será possível manter o sistema de medição em funcionamento (disponível) durante mais tempo. Recorde-se que a intensidade de corrente máxima dos LEDs, em regime contínuo, é de 100 mA⁷ e o tempo de exposição máximo, correspondente a uma frequência de aquisição de 25 Hz, é de 40 ms. Para além disso, em condições de fraca visibilidade poder-se-á aumentar o tempo de exposição, com penalização da frequência de aquisição (uma vez que a alternativa poderá significar a total indisponibilidade do sistema de medição).

⁷ Optando-se por modular a radiação do alvo (ex. *PWM – Pulse Width Modulation*), a intensidade de corrente do LED pode chegar a 500 mA.

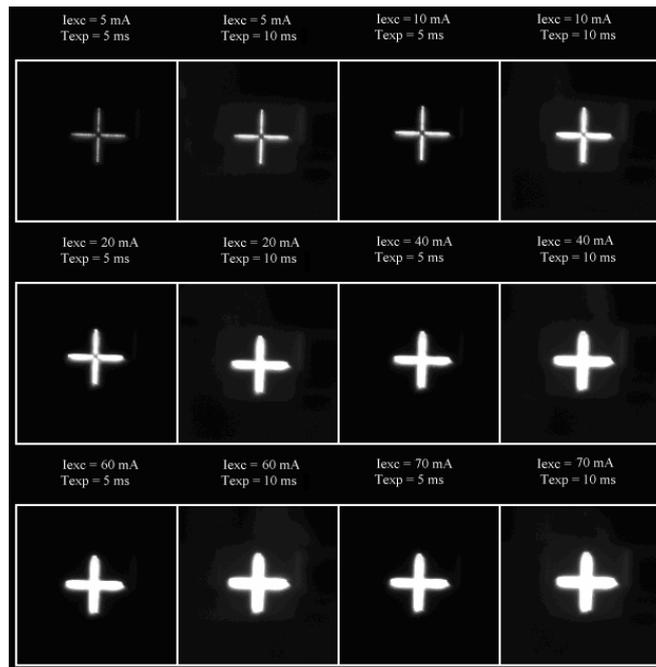


Figura III.19 – Colectânea de imagens do alvo, no modo de traço simples.

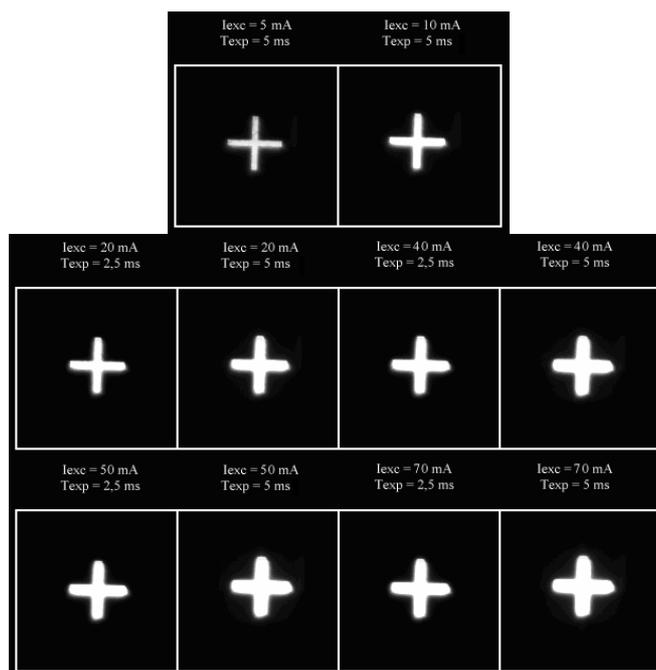


Figura III.20 – Colectânea de imagens do alvo, no modo de traço completo.

- Em condições de boa visibilidade, a avaria de um LED é perfeitamente detectável em regime de baixa intensidade de corrente de excitação dos LEDs e/ou de baixo tempo de exposição. Isto confirma que a dispersão da intensidade luminosa gerada pelos LEDs seleccionados é baixa e está de acordo com as características divulgadas pelo fabricante.
- No modo de traço completo, a imagem dos traços apresenta uma forma mais próxima da forma rectangular, particularmente visível nas extremidades dos traços, enquanto que no

modo de traço simples a extremidade dos traços apresenta uma forma arredondada. Para além disso, no modo de traço completo e para a mesma intensidade de corrente de excitação dos LEDs, o tempo de exposição necessário para produzir uma imagem com contraste idêntico é menos de metade do tempo de exposição requerido para o modo de traço simples. Na prática significa que é preferível optar por um traço completo e diminuir o tempo de exposição, uma vez que aumenta a relação sinal/ruído e diminui o efeito de arrastamento do alvo na imagem, gerado pelo movimento do tabuleiro. As desvantagens desta opção são o maior consumo de intensidade de corrente (maior dissipação de calor) e a ausência de redundância em termos de linhas/colunas de LEDs, o que inviabiliza a substituição de linha/coluna no caso de um dos LEDs de uma linha/coluna se avariar.

- Os traços da marca apresentam uma pequena assimetria em torno do eixo horizontal e vertical, semelhante ao efeito gerado pelo arrastamento do alvo no sentido de baixo para cima. O efeito observado traduz-se num traço horizontal mais largo na metade inferior e mais estreito na extremidade superior do traço vertical (afunilamento). Aparentemente poder-se-ia ser levado a pensar que durante o tempo de exposição da imagem o alvo (tabuleiro da ponte) se tinha movido no sentido de baixo para cima. No entanto, este fenómeno é visível em praticamente todas as imagens e só por coincidência esta hipótese seria plausível. Da observação da Figura III.14, relativa à fixação do alvo na plataforma, é possível constatar que o ângulo de rotação do alvo, segundo o eixo transversal do tabuleiro, era inferior ao valor desejado (aproximadamente $11,3^\circ$).
- O filtro óptico, com passagem de IR, eliminou a maior parte da radiação ambiente, classificada como ruído.

Na zona envolvente à marca do alvo (Figuras III.19 e III.20), principalmente nas imagens adquiridas com tempo de exposição de 10 ms, observa-se uma mancha em forma de auréola e de tonalidade mais clara, a contrastar com o fundo. A razão desta mancha deve-se à cor da face da caixa em que se encontravam montados os LEDs, que na altura em que se realizou o ensaio era branco fosco, tendo dado origem a reflexão de radiação na direcção do subsistema de visão.

III.6 Conclusões

O presente anexo foi dedicado à selecção da forma geométrica do alvo, à apresentação do alvo protótipo desenvolvido e à descrição das actividades realizadas no âmbito de um ensaio executado em condições reais na P25A, com o objectivo de avaliar a viabilidade prática de uma solução desta natureza.

Quanto à forma geométrica do alvo considerou-se que a mais adequada, face às características da aplicação, é a representada por dois traços dispostos em forma de cruz.

Do ensaio realizado foi possível confirmar que em condições de boa visibilidade a marca do alvo é perfeitamente visível, mesmo em condições de muito baixa intensidade de corrente de excitação dos LEDs e de tempo de exposição. Este facto reflecte a compatibilidade desejada entre as características do sensor da câmara de vídeo e as da fonte de radiação do alvo, isto é, o sensor da câmara de vídeo apresenta grande sensibilidade no comprimento de onda da fonte de radiação.

Em suma, pode-se afirmar que a margem de ganho do sistema de medição é elevada, indicando boas perspectivas de operacionalidade, mesmo em condições de baixa visibilidade, como as que se verificam na presença de nevoeiro moderado, contribuindo, deste modo, para o aumento da disponibilidade do sistema de medição.

ANEXO IV

COMPONENTES DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

IV.1 Introdução

No presente anexo é descrito o equipamento seleccionado, tendo como objectivo a observação do tabuleiro da Ponte 25 de Abril (P25A), ao nível do meio vão. O equipamento necessário para a construção do modelo protótipo do sistema de medição inclui a câmara de vídeo, a placa de aquisição de imagens (*frame grabber*), a óptica e o filtro óptico (Santos, 2009). Para além disso, são também descritos alguns dos ensaios realizados e apresentados os respectivos resultados obtidos que conduziram à selecção da fonte de radiação do alvo.

IV.2 Sistema de Visão

Num sistema composto por vários componentes, a compatibilização das características de cada um, com o respectivo par e com o todo, é inquestionável. Por exemplo, o sensor da câmara de vídeo deve possuir grande sensibilidade no comprimento de onda de radiação da fonte, a interface do sinal de vídeo deve ser compatível, em termos eléctricos e mecânicos, com a respectiva interface da placa de aquisição de imagens, a ligação da câmara de vídeo à óptica deve ser eficiente e robusta. Este facto condiciona, e dificulta, a tarefa de selecção dos componentes, na medida em que obriga a que esta seja realizada no seu conjunto e não componente a componente.

Assim, atendendo ao grande número e à variedade de câmaras de vídeo disponíveis no mercado, optou-se por seleccionar, numa primeira fase, um conjunto reduzido de câmaras de vídeo com características compatíveis com os objectivos do projecto, tendo-se elaborado, antecipadamente, uma lista com as principais características a satisfazer pelas câmaras de vídeo. Posteriormente, efectuou-se a pesquisa de placas de aquisição de imagens, seguido da óptica e, por último, da fonte de radiação do alvo, tendo presente a compatibilidade das características entre todos os componentes. O processo de selecção foi realizado de forma iterativa, até se chegar à solução final.

IV.2.1 Câmara de Vídeo

A selecção da câmara de vídeo foi precedida pela elaboração de um conjunto de especificações mínimas a satisfazer, nomeadamente em termos de resolução do sensor e de ritmo de

aquisição de imagens. Importa ter presente que o campo de medição do sistema de visão é estabelecido, não só pelas características da câmara de vídeo, como também, pela distância focal da óptica.

A câmara de vídeo que foi seleccionada é produzida pela empresa *IMPERX*, com a referência *IPX-2M30H-LM* (Figura IV.1), e possui as seguintes características:

- Sensor do tipo CCD (*Charge Coupled Device*), monocromático.
- Resolução de 1980 x 1080 píxeis.
- Píxel com secção quadrada e 7,4 μm de lado.
- Gama dinâmica de 60 dB.
- Sensibilidade do sensor, com pico em 500 nm, prolonga-se até 1000 nm, embora com diminuição progressiva da sensibilidade (Figura IV.2).
- Saída do sinal de vídeo configurável entre 8, 10 ou 12 bits, proporcionando uma intensidade de píxel de até 4096 níveis de cinzento.
- Capacidade de aquisição até 33 imagens por segundo completas (*full resolution*).
- Interface digital de comunicação do tipo *Camera Link*, modo *Base*.
- Possibilidade de comando da aquisição de imagens por meio de sinal de disparo (*trigger*) por *hardware* e/ou por *software* (ex. sincronismo de aquisição de imagens entre os vários subsistemas de visão).
- Amplificador analógico do sinal de vídeo, cujo ganho pode ser configurável entre 6 dB e 40 dB. Esta funcionalidade pode ser usada para contrariar o efeito de atenuação do meio de propagação (ex. nevoeiro).
- Temperatura ambiente de funcionamento entre 0 e 50°C.
- Obturador do tipo global (ao invés de obturador do tipo deslizante – *rolling shutter*) (Figura IV.3), com tempo de exposição configurável entre 1/35000 e 1/15 segundos.
- Delimitação, por meio de AOI (*Area Of Interest*), de uma parte da imagem, permitindo aumentar o ritmo de aquisição de imagens até 60 imagens por segundo.

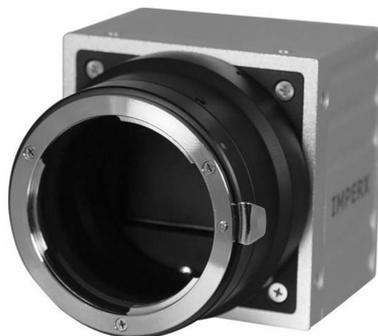


Figura IV.1 – Câmara de vídeo *IPX-2M30H-LM*, dotada com interface óptica do tipo *F* (*IMPERX*, 2006)

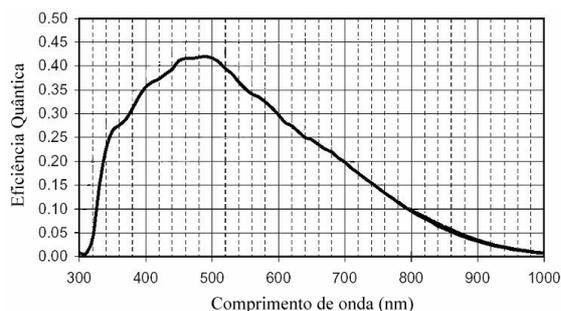


Figura IV.2 – Resposta espectral do sensor da câmara de vídeo IPX-2M30H-LM, em função do comprimento de onda (IMPERX, 2006).

O tipo do sensor, embora não tenha sido decisivo na selecção da câmara de vídeo, contribuiu, em parte, para esse fim. Na realidade, não se pode afirmar que um tipo de sensor, CCD ou CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*), seja melhor que o outro, na medida em que ambos apresentam vantagens e desvantagens. Contudo, atendendo à especificidade da aplicação, interessava que o sensor possuísse elevada gama dinâmica e elevada relação sinal/ruído, de modo a maximizar a disponibilidade do sistema de medição, nomeadamente na presença de nevoeiro. Na Tabela IV.1 estabelece-se a comparação entre os sensores do tipo CCD e do tipo CMOS.

Tabela IV.1 – Comparação entre os sensores do tipo CCD e do tipo CMOS.

Característica	CCD	CMOS
Velocidade de varrimento	Normal	Bom
Sensibilidade	Normal	Mau
Relação sinal/ruído	Bom	Mau
Corrente escura	Bom	Mau
Gama dinâmica	Bom	Mau
ROI (múltiplos)	Mau	Bom
Espalhamento (<i>Smear</i>)	Normal	Bom
Miniaturização	Bom	Normal

Outro aspecto, muito importante para a aplicação em vista, tem a ver com o tipo de obturador. Atendendo a que o tabuleiro da ponte se encontra em movimento permanente, o tipo de obturador mais indicado é o do tipo global e não o do tipo deslizante, uma vez que com este último, a imagem gerada pode aparecer deformada, criando o efeito aparente de rotação do objecto (Figuras IV.3 e IV.4).



Figura IV.3 – Imagens adquiridas com obturador global (esq.) e obturador deslizante (dir.).

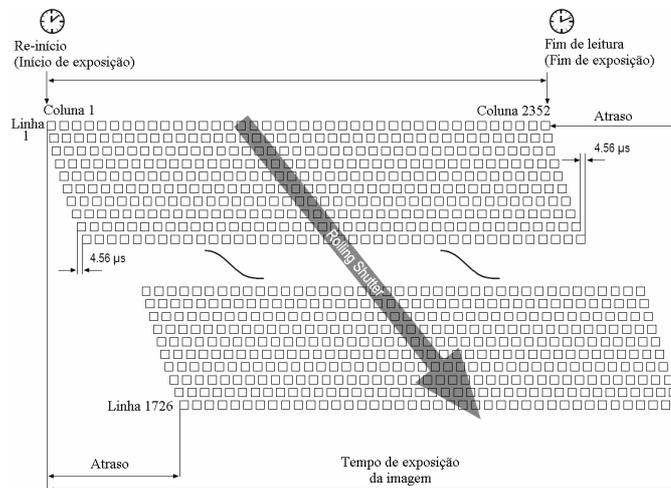


Figura IV.4 – Princípio de funcionamento de um obturador do tipo móvel (Rolling Shutter)¹ (adaptado de BASLER, 2005).

IV.2.2 Placa de Aquisição de Imagens

A placa de aquisição de imagens (*frame grabber*) é o dispositivo encarregue de estabelecer o protocolo de comunicação com a câmara de vídeo de forma a realizar a transferência das imagens, adquiridas por esta, para o dispositivo de armazenamento e/ou de processamento da imagem (computador pessoal).

Apesar do processo iterativo na selecção dos componentes, a selecção da placa de aquisição de imagens foi, naturalmente, condicionada pelas características da câmara de vídeo, tendo em vista a compatibilidade das características de ambos os componentes. Neste aspecto, as características que mereceram especial atenção foram o tipo de interface e a largura de banda do canal de transmissão destinado à transferência das imagens.

A placa seleccionada é produzida pela empresa *DALSA Coreco*, com a referência oficial *COR-OC-64E0-IPRO0*, também designada por *X64-CL iPro* (Dalsa Coreco, 2005). Esta placa dispõe de dois canais de comunicação do tipo *Base*, possibilitando a ligação simultânea de duas câmaras do tipo *Base* ou, em alternativa, a ligação a uma câmara de vídeo com um canal do tipo *Medium*, sendo a capacidade de transferência de dados de 255 MBytes por segundo por canal,

¹ O obturador do tipo deslizante faz com que a cada momento exista apenas uma única linha de píxeis exposta à radiação. Como consequência, no caso do objecto se mover durante a captura da imagem este vai aparecer na imagem distorcido (inclinação aparente). A título de exemplo, dado que o atraso de exposição entre duas linhas consecutivas é de 4,56 μ s significa que entre a exposição da primeira e da última linha o atraso é de 7,87 ms.

directamente para a memória e sem intervenção do processador central, por meio de DMA (*Direct Memory Access*).

A placa seleccionada disponibiliza funcionalidades extra que permitem realizar, localmente, algumas das etapas de processamento de imagem, nomeadamente de segmentação da imagem por meio de AOI, de correcção de tonalidade (*shading correction*) e de conversão de intensidade de píxel, por meio de tabelas geradas pelo utilizador (*iLUT – Input Lookup Tables*) diminuindo, deste modo, o tempo de ocupação do processador central. Esta placa dispõe ainda de duas entradas e de duas saídas de sinal de sincronismo (*trigger/strobe*), para sincronização da captura das imagens com eventos externos, e de dois portos de comunicação série, independentes, para configuração da câmara de vídeo e outros dispositivos periféricos.

IV.2.3 Óptica

Como mencionado anteriormente, o campo de medição do sistema depende das dimensões do sensor da câmara, da distância focal da óptica e da distância entre o subsistema de visão e o alvo. Durante o processo de selecção da óptica constatou-se que existia pouca variedade no segmento de grandes distâncias focais, sendo os valores correntes de 300 mm, de 500 mm e de 800 mm. As ópticas com distância focal variável (*zoom*) não são adequadas, uma vez que são menos fiáveis e a distância focal pode variar ao longo do tempo em face das condições de funcionamento (ex. variação da temperatura ambiente).

Neste contexto, face ao elevado custo das ópticas com distâncias focais superiores a 300 mm, a solução adoptada consistiu em adquirir uma óptica com a distância focal de 300 mm, produzida pela empresa *Sigma*, com a referência *Sigma 300mm/2,8 APO EX DG*, e acoplar-lhe um multiplicador óptico, produzido pela mesma empresa, com a referência *Sigma Tele Converter APO2,0xEX DG*, para obter a distância focal de 600 mm (Figura IV.5). O acoplamento do tele-conversor tem como consequência directa a diminuição do valor da abertura da óptica de 2,8 para aproximadamente 5,6.



Figura IV.5 – Óptica *Sigma 300 mm/2,8 APO EX DG* e Tele conversor *Sigma APO 2,0xEX DG*.

Considerando as características da câmara de vídeo e a distância entre a zona do tabuleiro a observar e a base dos pilares (510 m), verifica-se que com a solução adoptada o campo de medição fica limitado a aproximadamente 12 m, segundo a componente horizontal e a aproximada-

mente 6,5 m, segundo a componente vertical. Nestas condições, a resolução do sistema de visão é, aproximadamente, 6,3 mm/píxel.

Em termos de características principais, a óptica seleccionada apresenta:

- Construção – 12 elementos em 10 grupos.
- Ângulo de vista – 8,2°.
- Abertura mínima – F32 (máximo F2,8, sem tele-conversor e F5,6 com tele-conversor).
- Distância mínima de focagem – 200 cm.
- Ampliação máxima – 1:7,5.
- Dimensões – 119 mm (diâmetro) x 214 mm (comprimento).
- Dimensão do filtro (parte posterior) – 46 mm.
- Peso – 2,4 kg.

IV.2.4 Filtro Óptico

Como se verá adiante, a fonte de radiação seleccionada emite o máximo de intensidade no comprimento de onda de 875 nm, correspondente ao infravermelho próximo. Uma das razões que contribuíram, de forma decisiva, para esta opção, está relacionada com o facto desta solução possibilitar a eliminação da radiação ambiente, através da aplicação de um filtro óptico do tipo passa-alto ou passa-banda.

O filtro óptico com o diâmetro de 46 mm (Jos. Schneider Optische Werke GmbH) e a referência *B+W Infrared Filter 092*, é montado na parte posterior da óptica². Em termos da função de transferência, este filtro elimina a quase totalidade da radiação com comprimento de onda inferior a 650 nm e deixa passar a radiação com comprimento de onda superior a 730 nm (Figura IV.6).

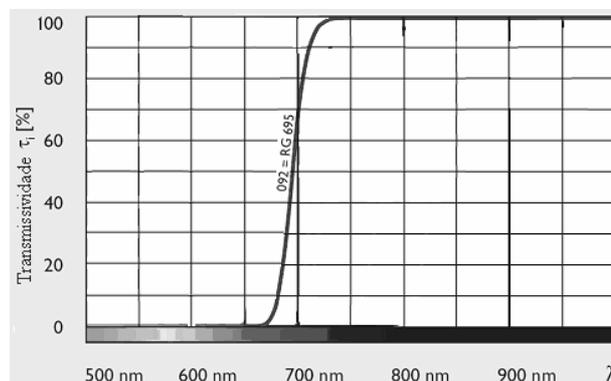


Figura IV.6 – Função de transferência do filtro óptico de infravermelho B+W 092.

² O filtro óptico foi proposto pelo fornecedor da óptica, de acordo com as especificações apresentadas, tendo em vista a compatibilização das características deste com as da óptica, nomeadamente em termos de dimensões.

IV.3 Fonte de Radiação

Como mencionado no Capítulo 2, o tipo de alvo que se considera mais adequado para a observação de obras em modo permanente é o do tipo activo, com emissão de radiação própria. Neste contexto, o LED reúne vantagens consideráveis relativamente a outras fontes de radiação, nomeadamente: i) baixo custo; ii) longa duração; iii) baixo consumo energético; iv) rendimento elevado; v) pequenas dimensões; e vi) feixe estreito (menor dispersão).

A conjugação das conclusões obtidas do estudo apresentado no Anexo I com as características de sensibilidade do sensor da câmara de vídeo seleccionada limitaram a selecção do comprimento de onda da fonte de radiação a duas opções: 690 nm ou 850 nm. Como já foi mencionado anteriormente, com o comprimento de onda de 850 nm é possível eliminar a quase totalidade da radiação ambiente da zona do espectro do visível, conferindo ao sistema de medição um aumento, muito significativo, da relação sinal/ruído. Por outro lado, a sensibilidade do sensor da câmara de vídeo é menos sensível neste comprimento de onda do que no de 690 nm (Figura II.2).

A decisão foi tomada após a realização de um conjunto de testes executados com dois tipos de LEDs, de emissão de radiação no comprimento de onda do vermelho (650 nm) e do infravermelho próximo (875 nm). Com a realização destes ensaios pretendeu-se, essencialmente, avaliar³:

- A sensibilidade do sensor da câmara de vídeo para os dois comprimentos de onda.
- A intensidade de radiação dos LEDs em função da corrente de excitação, traduzida pela dimensão da marca projectada na imagem.
- A qualidade da imagem, em termos de contraste e de nível de ruído, gerada pelos dois tipos de LEDs.
- A eficiência dos dois LEDs a longa distância e, por conseguinte, a sua viabilidade para a concretização deste tipo de aplicação.

IV.3.1 Características dos LEDs Seleccionados

Da pesquisa efectuada constatou-se que, do conjunto de LEDs disponíveis no mercado, nenhum apresentava o pico de máxima radiação nos comprimentos de onda desejados. Os LEDs que mais se aproximam do objectivo pretendido possuem o pico de máxima radiação em 650 nm e em 875 nm, respectivamente. Assim, à falta de opções alternativas foi decidido efectuar a avaliação destes dois tipos de LEDs. O LED seleccionado, com emissão de radiação de vermelho,

³ À data da realização dos testes não se dispunha da óptica seleccionada, tendo sido usada uma óptica com a distância focal de 640 mm, a qual fazia parte do sistema original de observação da P25A.

possui a referência *TLDR5800* e é produzido pela empresa *Vishay*, enquanto que o LED de infravermelho próximo possui a referência *HSDL-4260* e é produzido pela empresa *Avago Technologies*.

Os parâmetros que contribuíram de forma decisiva para a selecção dos referidos LEDs foram: i) o comprimento de onda de máxima radiação; ii) a intensidade de radiação emitida; e iii) o ângulo de abertura do feixe óptico. O LED de emissão de vermelho emite cerca de 2500 mcd quando percorrido por uma intensidade de corrente de 40% do valor máximo recomendado e numa abertura do feixe óptico de $\pm 4^\circ$ (Figura IV.7). No caso do LED de emissão de infravermelho próximo, o valor típico da intensidade de radiação é de 200 mW/Sr, para o valor máximo recomendado de intensidade de corrente, e a abertura do feixe óptico é de $\pm 7,5^\circ$ (Figura IV.8).



Figura IV.7 – Intensidade de luminosidade, do LED de emissão de vermelho (*TLDR5800*) em função do comprimento de onda (esq.) e do deslocamento angular (dir.).

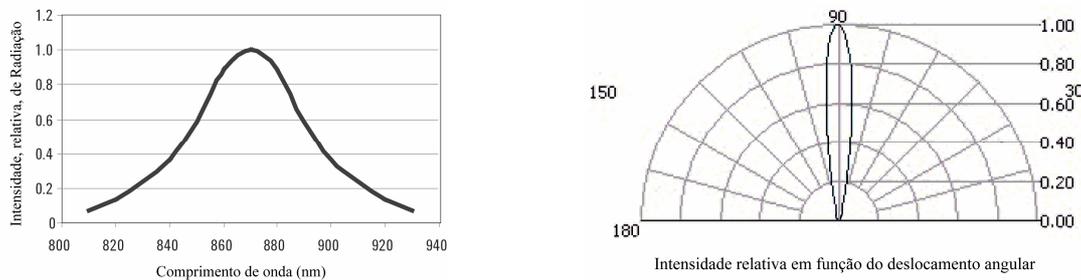


Figura IV.8 – Intensidade relativa de radiação, do LED de emissão de infravermelho próximo (*HSDL-4260*) em função do comprimento de onda (esq.) e do deslocamento angular (dir.).

IV.3.2 Avaliação da Compatibilidade Câmara – LED

A selecção do LED foi realizada tendo por base a execução de testes de aquisição de imagens de alvos protótipo construídos com os dois tipos LEDs. A aquisição das imagens foi efectuada pela câmara de vídeo seleccionada, acoplada a uma óptica com 640 mm de distância focal. A distância entre o subsistema de visão e o alvo era de cerca de 450 m.

Os dois alvos de teste, construídos com LEDs de radiação de vermelho e com LEDs de radiação de infravermelho próximo, são idênticos em termos de funcionalidades, de número de LEDs e de espaçamento entre LEDs (Figura IV.9).

Nas Figuras IV.10 a IV.14 apresenta-se uma síntese das imagens adquiridas do alvo de teste com LEDs de emissão de radiação de vermelho, agrupadas segundo as diferentes configurações e em função da intensidade de corrente. As imagens foram adquiridas com um tempo de exposição de 2 ms.



Figura IV.9 – Alvo de testes formado por quatro linhas de LEDs de emissão de radiação de vermelho (centro) e de infravermelho próximo (dir.), com espaçamento de 10 mm entre LEDs.

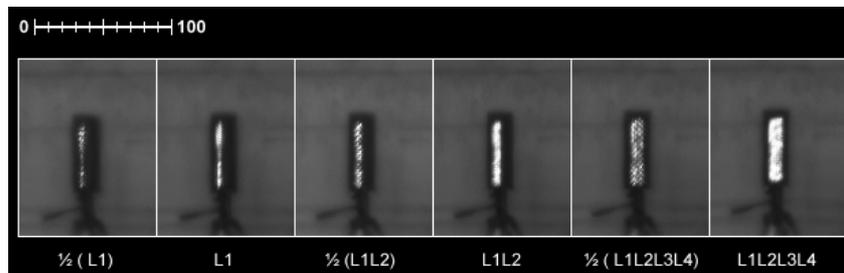


Figura IV.10 – Aquisição de imagens com LEDs de emissão de vermelho, em diversas configurações, percorridos por uma intensidade de corrente de 5 mA ($\frac{1}{2}$ linha significa espaçamento de 20 mm entre os LEDs e L_x significa que os LEDs da linha x estão ligados).

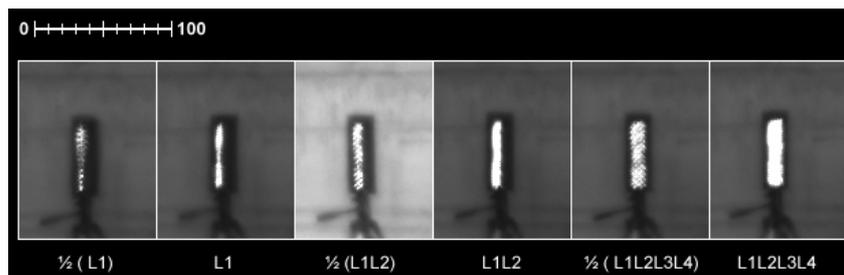


Figura IV.11 – Aquisição de imagens com LEDs de emissão de vermelho, em diversas configurações, percorridos por uma intensidade de corrente de 10 mA.

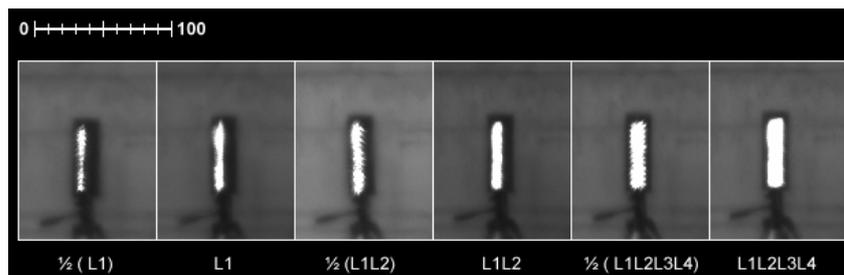


Figura IV.12 – Aquisição de imagens com LEDs de emissão de vermelho, em diversas configurações, percorridos por uma intensidade de corrente de 20 mA.

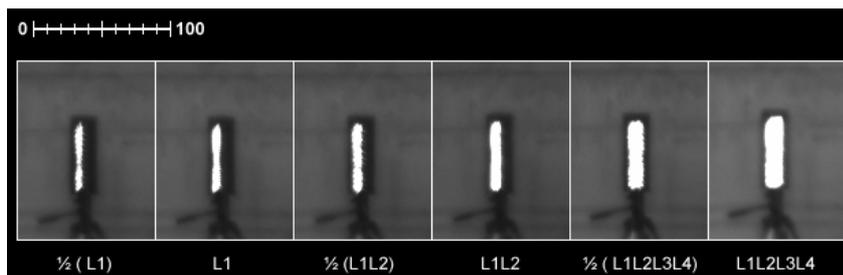


Figura IV.13 – Aquisição de imagens com LEDs de emissão de vermelho, em diversas configurações, percorridos por uma intensidade de corrente de 30 mA.

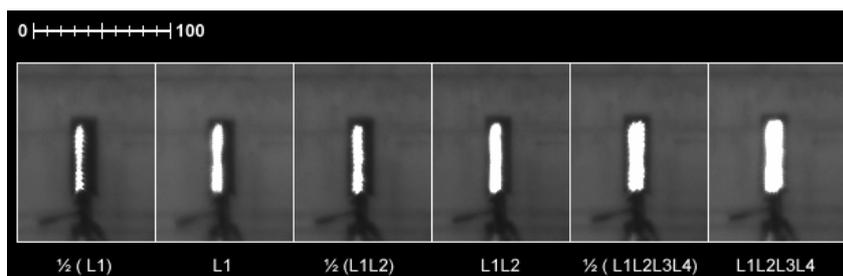


Figura IV.14 – Aquisição de imagens com LEDs de emissão de vermelho, em diversas configurações, percorridos por uma intensidade de corrente de 40 mA.

Da observação das Figuras IV.10 a IV.14 constata-se que:

- A forma geométrica da mancha é irregular, apresentando dois lóbulos, a qual tende a uniformizar com o aumento da intensidade de corrente dos LEDs e/ou com o aumento do número de linhas activas de LEDs. Este facto foi atribuído a um possível desalinhamento dos LEDs, que se torna crítico quando a abertura do feixe de radiação é apertada.
- Mesmo com intensidades de corrente de valor considerável, com espaçamento da ordem dos 20 mm entre os LEDs, nota-se um recartilhado na marca. No entanto, diminuindo o espaçamento para 10 mm, este efeito praticamente desaparece, mesmo com valores baixos de intensidade de corrente.
- Para se obter uma marca com brilho intenso e uniforme, sem descontinuidades, é desejável que o espaçamento entre os LEDs seja da ordem dos 10 mm e que a intensidade de corrente seja superior a cerca de 20% da máxima intensidade de corrente (10 mA).

Dando continuidade ao teste, procedeu-se à execução do ensaio com o alvo de teste construído com LEDs de emissão de infravermelho próximo (Figuras IV.15 a IV.19). Neste caso, o tempo de exposição foi de 2,5 ms. Refira-se que no dia de execução do presente teste o vento soprava com intensidade moderada, tendo induzido vibração no subsistema de visão. Assim, e apesar dos cuidados tidos durante a aquisição da imagens, em algumas delas são visíveis efeitos de arrastamento.

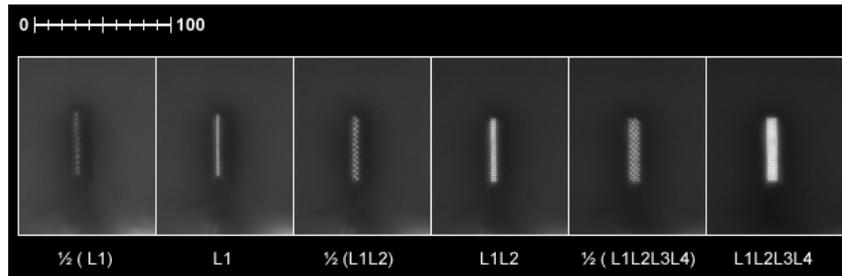


Figura IV.15 – Aquisição de imagens com LEDs de emissão de infravermelho próximo, em diversas configurações, percorridos por uma intensidade de corrente de 10 mA ($\frac{1}{2}$ linha significa espaçamento de 20 mm entre os LEDs e L_x significa que os LEDs da linha x estão ligados).

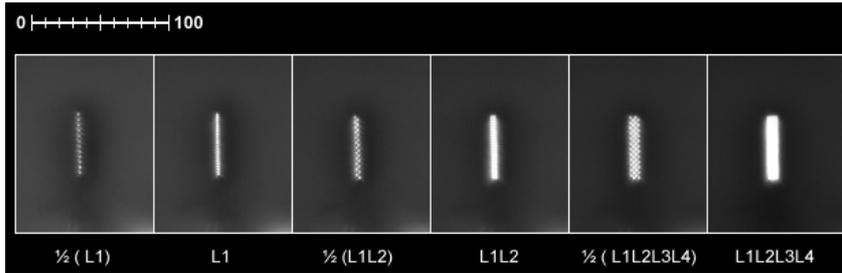


Figura IV.16 – Aquisição de imagens com LEDs de emissão de infravermelho próximo, em diversas configurações, percorridos por uma intensidade de corrente de 20 mA.

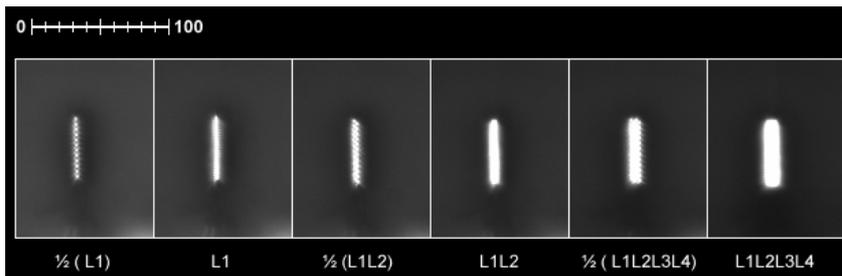


Figura IV.17 – Aquisição de imagens com LEDs de emissão de infravermelho próximo, em diversas configurações, percorridos por uma intensidade de corrente de 40 mA.

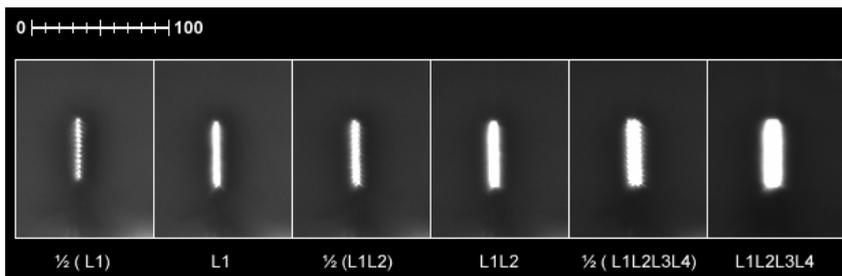


Figura IV.18 – Aquisição de imagens com LEDs de emissão de infravermelho próximo, em diversas configurações, percorridos por uma intensidade de corrente de 60 mA.

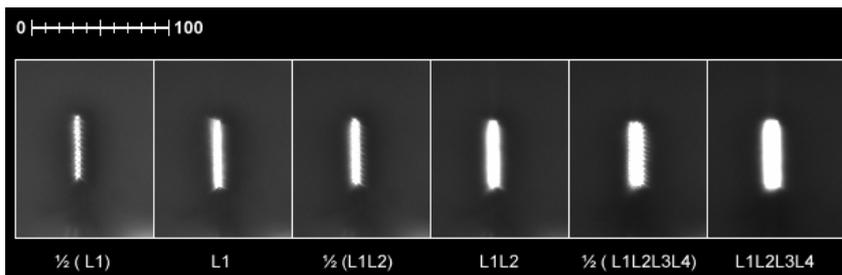


Figura IV.19 – Aquisição de imagens com LEDs de emissão de infravermelho próximo, em diversas configurações, percorridos por uma intensidade de corrente de 80 mA.

Da observação das Figuras IV.15 a IV.19 constata-se que:

- O sensor da câmara de vídeo possui sensibilidade suficiente para detectar a presença do alvo. Para além disso, não se notam diferenças significativas relativamente ao LED de emissão de vermelho, sendo apenas necessário aumentar, ligeiramente, o tempo de exposição.
- A marca do alvo apresenta uma forma regular e bem definida, mesmo quando a intensidade de corrente é baixa.
- Com os LEDs espaçados de 20 mm e para valores baixos de intensidade de corrente aparecem na imagem zonas escuras no interior da marca, passando a irregularidades de contorno, para valores de intensidade de corrente mais elevados.
- No caso presente, observa-se grande contraste entre a marca gerada pela radiação emitida pelos LEDs e o fundo da imagem.
- Com 20% do valor máximo admissível de intensidade de corrente (20 mA) e com duas linhas activas de LEDs obtém-se uma marca perfeitamente definida.

A principal conclusão, e a mais importante, é a de que a câmara de vídeo seleccionada é perfeitamente adequada para fazer o seguimento de um alvo de emissão de radiação de infravermelho próximo, não sendo visíveis diferenças significativas relativamente ao alvo de emissão de vermelho. Assim sendo, atendendo à possibilidade de eliminação da radiação ambiente através da aplicação de um filtro óptico, considera-se que o comprimento de onda de 875 nm é a escolha mais adequada para o fim em vista.

A segunda conclusão é a de que o espaçamento entre LEDs não deve ser superior a 10 mm e que três linhas de LEDs são suficientes para produzir um traço com a espessura adequada.

IV.4 Conclusões

Neste anexo foram descritos os principais componentes que compõem o sistema de medição e as razões que conduziram à sua selecção.

Foram também descritos alguns dos ensaios realizados e apresentados os respectivos resultados que permitiram, finalmente, seleccionar o comprimento de onda da fonte de radiação do alvo activo que melhor se adequa à observação dos deslocamentos de grandes obras, nomeadamente do tabuleiro da P25A. O comprimento de onda seleccionado situa-se na zona do espectro do infravermelho próximo (875 nm).