

# SISTEMA DE VISÃO ARTIFICIAL PARA MONITORIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM TIRANTES DE PONTES

S. Silva<sup>1</sup>, J. Bateira<sup>2</sup>, E. Caetano<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Estudante de Doutoramento, <sup>2</sup>Bolseiro de Investigação, <sup>3</sup>Profª Associada  
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores<sup>1,2</sup>/ Engenharia Civil<sup>3</sup>  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## RESUMO

*Apresenta-se neste trabalho um inovador sistema de visão artificial desenvolvido para análise de vibrações em estruturas de engenharia civil. Baseando-se na utilização de uma câmara de vídeo e em algoritmos de análise de imagem, este sistema de visão pode ser utilizado na activação de um sistema de monitorização de estruturas convencional, ou então na obtenção de registos temporais em pontos seleccionados. A aplicação à monitorização de vibrações em tirantes de pontes é exemplificada e discutida considerando como exemplo a ponte Internacional sobre o rio Guadiana, em que se evidencia a capacidade de detecção de vibrações com uma câmara localizada a uma distância de 850m da ponte.*

## 1- INTRODUÇÃO

A evolução dos sistemas de visão artificial durante as últimas décadas revelou um enorme potencial de aplicações, permitindo o seu uso como instrumento de medida fiável. Com efeito, não só houve um contínuo aumento da capacidade computacional, mas foram também introduzidas no mercado melhores câmaras digitais, com maiores taxas de aquisição de imagem, maiores resoluções e melhores lentes. Este cenário permitiu o desenvolvimento de novos e mais poderosos algoritmos de análise de imagem para medição de características físicas, tornando interessante a sua aplicação em diferentes domínios.

No caso específico da engenharia civil, é conhecido o elevado potencial dos sistemas de monitorização actuais, baseados em redes de acelerómetros e extensómetros, que permitem a obtenção de dados relativos ao comportamento estrutural com

elevada qualidade. A sua instalação é no entanto difícil e custosa, nomeadamente quando são necessários numerosos pontos de observação e o seu acesso é limitado. O sistema de visão artificial proposto neste trabalho utiliza câmaras de vídeo com uma frequência de amostragem de 30 imagem/s e visa uma instalação fácil e rápida para obtenção de imagens à distância e consequente processamento das mesmas de forma a obter séries temporais que descrevam a vibração de vários pontos de interesse. Em contrapartida, são utilizados algoritmos complexos e computacionalmente pesados com a obtenção, no momento actual, de dados com uma menor precisão em comparação com os dados obtidos por acelerómetros ou extensómetros.

Existem no entanto situações em que uma menor precisão é aceitável em face das vantagens adicionadas, como é o caso da monitorização de pontes atirantadas.

Efectivamente, se o objectivo for identificar as condições de ocorrência de vibrações em tirantes, é exigida a instalação de um elevado número de sensores nestes elementos, o que constitui uma tarefa virtualmente impossível, dada a dificuldade, o custo e o risco de conduzir os sinais medidos a um sistema central de aquisição através de cablagens. Pelo contrário, usando apenas uma câmara, é possível adquirir imagens que cubram toda a área de interesse e observar simultaneamente a vibração em vários pontos, ainda que a sua caracterização espacial seja incompleta. O processamento em tempo real de um conjunto de pontos considerados críticos permite ainda que o sistema de visão active o sistema geral de monitorização. A combinação destes sinais com os obtidos simultaneamente através de uma rede de acelerómetros e anemómetros instalados no tabuleiro da ponte, permite uma análise integrada da estrutura.

Considerando como objectivo a monitorização dos tirantes da ponte Internacional sobre o rio Guadiana, e sendo conhecidos os níveis de vibração e intervalos de frequência envolvidos, foi desenvolvido o sistema de visão que se caracteriza neste trabalho e implementados e testados diferentes algoritmos para análise do movimento. O sistema descrito baseia-se na análise do fluxo óptico de uma sequência de imagens e na correspondência deste com o movimento dos objectos em questão. Esta técnica permite o estudo do movimento com uma precisão ao nível do sub-píxel, não exigindo alvos específicos nem informação prévia para além da selecção dos pontos de interesse e da indicação do factor de escala correcto.

Utilizando resultados obtidos em situações controladas e em medições efectuadas sobre a ponte, discutem-se neste trabalho as vantagens e limitações deste sistema e os níveis de erro alcançados. Demonstra-se a utilidade do sistema para análises modais, verificando-se que apesar da menor sensibilidade às altas frequências, este permite uma identificação precisa das principais frequências de vibração presentes nas estruturas de interesse.

## 2– SISTEMA DE VISÃO

Para cumprir os objectivos de fazer uma análise fiável e com algum detalhe e ao mesmo tempo monitorizar em tempo-real estruturas de grande dimensão, foram, por um lado, adquiridos equipamentos de elevada qualidade e, por outro lado, aplicados algoritmos de extrema robustez. Tendo em vista a integração num sistema de monitorização global, é apresentado o esquema das comunicações entre equipamentos, bem como a interacção entre estes.

### 2.1 – Equipamento

O conjunto do equipamento usado compreende uma câmara de vídeo, uma lente, um computador portátil, um modem e um router, para a ligação do sistema em rede (Fig 1).



**Fig 1-** Equipamento do sistema de visão: câmara, lente, computador portátil, modem, router e UPS.

Foi usada uma câmara industrial com sensor CCD que operou a 800×600 píxels e a 30 imagens por segundo. Trata-se de uma câmara com varrimento progressivo (requisito fundamental para análise de movimento), com ajuste automático de exposição (essencial para contornar a variação de luminosidade que existe ao longo de um dia), e níveis de ruído muito baixos. É da maior importância que as imagens adquiridas sejam “não-entrelaçadas” (uma imagem por campo total, ao invés de duas por campo par e ímpar) de forma a não exibirem artefactos de movimento que introduziriam erros de medida substanciais. Foram usadas lentes de baixa distorção e com alta definição.

Nas experiências preliminares foram escolhidas lentes do tipo grande angular que permitiram uma visão mais abrangente das pontes. No ensaio da ponte sobre o Guadiana foi escolhida uma tele-objectiva (Fig 1) dada a distância a que a câmara se encontrava. As lentes, para além de terem de garantir uma resolução ajustada ao sensor usado na câmara, devem possuir uma baixa distorção geométrica. Caso esta se faça ainda notar de forma significativa (como é o caso das lentes de grande angular usadas para a visualização de grandes áreas), deverá ser possível a sua correcção (aproximada por um polinómio de 2º grau até ao limite da resolução da imagem).

Para processar as imagens foi usado um computador portátil (processador a 2GHz) correndo software em tempo-real. A gravação das imagens é feita para um disco duro com velocidade e capacidades adequadas para vídeo de alta-resolução.

Foi ainda usado um router com uma ligação VPN através de um modem UMTS para acesso remoto e ligação em rede.

## 2.2 – Análise de imagem

Os requisitos de aplicações como a análise de vibrações de estruturas de engenharia civil incorporada num sistema de monitorização permanente implicaram que a escolha da algoritmia de análise de imagem recaísse num método ao mesmo tempo robusto, de processamento rápido e de elevada precisão. Pretendia-se, um sistema que funcionasse durante o dia, sujeito, portanto, a variações de luminosidade, em tempo-real (com uma taxa de aquisição até 30 imagens por segundo), e que fosse capaz de detectar movimentos muito subtis, de apenas alguns píxeis de amplitude.

A nossa escolha recaiu sobre o método de análise do fluxo óptico. Este algoritmo baseia-se numa análise entre duas imagens distanciadas temporalmente (duas frames de uma sequência de vídeo), onde é pretendido calcular-se os vectores dos quais resultam as diferenças entre as duas imagens. Para isto assume-se que a variação da intensidade da imagem numa

determinada zona é apenas devida ao movimento dos píxeis que compõem o objecto, permitindo a formulação da seguinte equação:

$$I_x \times u + I_y \times v + I_t = 0$$

onde  $I_x$ ,  $I_y$  e  $I_t$  representam, respectivamente, as derivadas das intensidades de cada imagem em ordem a  $x$ ,  $y$  e  $t$  (tempo), e  $u$  e  $v$ , as componentes horizontal e vertical do fluxo óptico. Existem vários métodos para resolver esta equação, sendo o mais adequado para o processamento em tempo-real o de Lucas e Kanade (1981). No entanto, após algumas experiências verificámos que o método proposto por Horn e Schunck (1981) é mais rigoroso e não compromete o requisito de tempo-real.

Para a obtenção do vector de velocidade do objecto (no nosso caso um tirante ou uma porção do tabuleiro da ponte) assume-se que o único objecto com movimento dentro da região de interesse é o objecto a analisar, que o seu movimento está contido num único plano, que o seu movimento não excede os limites da região de interesse e que este não tem velocidade angular (Fig 2).

Assim é possível fazer a média dos valores do fluxo-óptico calculados para cada píxel e chegar a uma estimativa da velocidade instantânea do objecto.

O sinal de velocidade obtido é projectado segundo a direcção de maior amplitude, filtrado e integrado de forma a ter-se uma medida de deslocamento (Fig 2). Alternativamente pode ser diferenciado obtendo-se uma aceleração. Um sinal de aceleração poder ser facilmente comparado com dados obtidos a partir acelerómetros, utilizados habitualmente em aplicações de engenharia civil.

A tradução dos valores obtidos em valores correctamente escalados pode ser feita mediante a afectação por factores de escala facilmente obtidos a partir da identificação de estruturas de medidas conhecidas na imagem.

Se consideramos que a região de interesse na imagem a analisar é pequena e que por isso podemos considerar a distorção geométrica causada pela lente desprezável, temos que o mapeamento dos pontos do espaço tridimensional dos objectos no plano da imagem é dado pela transformação projectiva:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}$$

onde se verifica a relação:

$$(x, y) = (x_1 / x_3, x_2 / x_3)$$

$$(X, Y, Z) = (X_1, X_2, X_3, X_4)$$

No caso dos movimentos em estudo, podemos considerar que a variação de profundidade é pequena (ou mesmo nula) e que o plano que contém os movimentos é aproximadamente perpendicular ao eixo da câmara. Assim a matriz de transformação é simplificada reduzindo-se a uma transformação afim, sendo ainda possível escrever:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{f}{Z_0 + \Delta Z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$$

Aqui  $f$  é a distância focal da lente,  $Z_0$  é a distância ao objecto em questão e  $\Delta Z$  a variação de profundidade. Expandindo em série de Taylor e tomando apenas o termo de ordem zero ficamos com:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{f}{Z_0} \left( 1 - \frac{\Delta Z}{Z_0} + \left( \frac{\Delta Z}{Z_0} \right)^2 - \dots \right) \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \approx \frac{f}{Z_0} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$$

O erro cometido por esta aproximação é dado por:

$$x_{err} = \frac{f}{Z_0} \left( \frac{\Delta Z}{Z_0 + \Delta Z} \right) \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$$

Logo, para regiões de interesse pequenas (o que implica um valor de  $Z_0$ , e portanto um factor de escala diferente para cada região de interesse da área visualizada), obtidas a uma distância muito maior do que a distância focal, é possível

usar um modelo simplificado de projecção da câmara. Nos casos estudados o erro é varias vezes inferior à resolução do sistema confirmando a aproximação (exemplo:  $f=16\text{mm}$ ,  $Z_0=50\text{m}$ ,  $x_{err} = 1\text{mm} \ll 30\text{mm}$  de resolução a  $800 \times 600$ ). Assim é possível a conversão de valores em píxeis por segundo (píxel/s) para metros por segundo (m/s) usando um simples factor de escala.

Refere-se finalmente que, ao contrário de outros métodos de análise de imagem, este dispensa conhecimento prévio dos objectos em análise, e tem, por isso, a grande vantagem de dispensar a colocação de alvos ou a realização de qualquer tipo de treino do algoritmo, sendo a sua aplicação imediata. Além disso, usando objectos estáticos presentes na imagem, é possível estimar o movimento da câmara. Esta estimativa é, no entanto, ruidosa devendo-se evitar que a câmara esteja sujeita a vibrações. Outras técnicas podem ser usadas em aplicações onde o movimento dos objectos seja de maior amplitude, como é o caso do seguimento de peões em pontes pedonais [Silva *et al* (2007)]. Nesta situação a diferença entre duas imagens é suficientemente pronunciada para permitir algoritmos de identificação do movimento eventualmente mais rápidos.

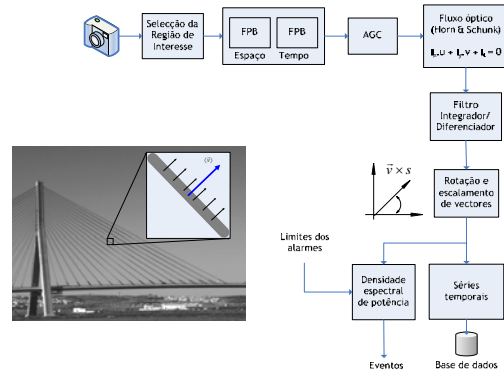


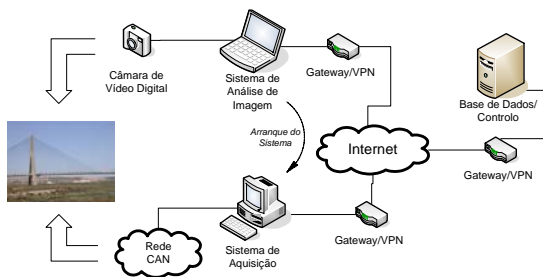
Fig 2- Sequência de processamento e análise de imagem para detecção de vibrações.

### 2.3 - Sistema integrado de monitorização

Uma aplicação possível para este sistema de visão artificial é a sua integração num sistema de monitorização dinâmica. A vantagem de o sistema

permitir a observação permanente de vários pontos de interesse de uma estrutura (por exemplo, vários tirantes de uma ponte) traduz-se também na possibilidade de, usando informação obtida em tempo-real, despoletar o funcionamento de um sistema de aquisição tradicional (uma rede de acelerómetros, por exemplo). Deste modo, consegue-se uma activação controlada de um sistema de aquisição cuja quantidade de dados adquiridos é normalmente muito elevada e, por isso, de difícil armazenamento e triagem.

A informação de que o sistema de visão detectou a ocorrência de um evento estranho é enviada via Internet para o sistema de aquisição que se encontra instalado na estrutura em observação (Fig 3). Este entra imediatamente em funcionamento e, quer a informação dos sensores, quer a informação sobre o evento que causou a aquisição, são guardadas numa base de dados. Tanto o sistema de visão como os restantes sistemas de monitorização estão referenciados à mesma medida temporal via GPS, permitindo a correlação fácil dos seus dados.



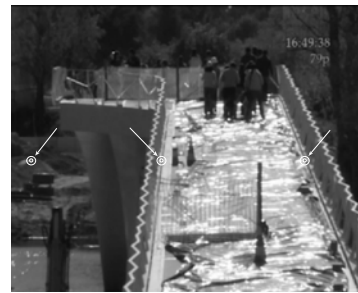
**Fig 3** - Sistema integrado de monitorização: ligação e interação entre elementos.

### 3- ENSAIOS PRELIMINARES

Foram realizados alguns ensaios preliminares que serviram de prova de conceito e também para detectar eventuais falhas e cuidados a ter no futuro. Os espectros resultantes da análise com o sistema de visão apresentam pior resolução que os dos sismógrafos ou acelerómetros usados para comparação, por corresponderem, os primeiros, entre outros factores, a séries temporais de menor duração.

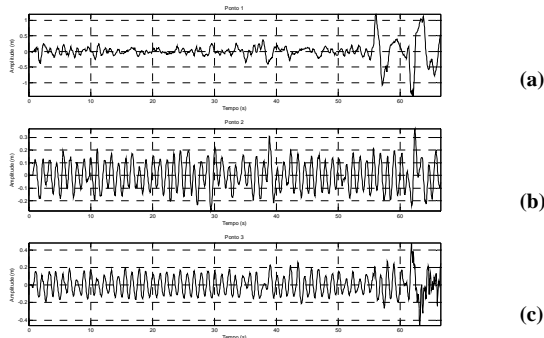
### 3.1 - Ponte “Pedro e Inês”, Coimbra

Nesta experiência foi feita uma análise *a posteriori* de um vídeo feito, ao contrário dos outros ensaios, com uma câmara comercial (formato entrelaçado) colocada na ponte pedonal Pedro e Inês, em Coimbra, durante um ensaio realizado mediante a passagem de grandes grupos de peões, antes da instalação de um sistema de controlo de vibrações [Caetano *et al* (2008)]. Na Fig 4 estão assinalados os dois pontos do tabuleiro que foram analisados e um ponto fora do tabuleiro considerado fixo para detecção de movimentos da câmara e estimação do ruído.



**Fig 4** – Imagem do vídeo com pontos analisados da ponte pedonal “Pedro e Inês” (Coimbra).

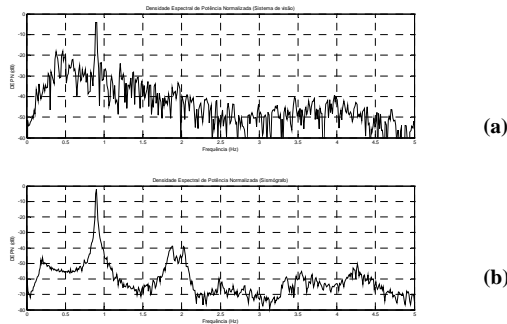
Nos gráficos da Fig 5 podem observar-se as vibrações laterais (deslocamentos em fase) do tabuleiro (Figuras 5 (a) e (b)), sendo evidente uma vibração da própria câmara na parte final dos registos, assinalada especificamente na Fig. 5(a), correspondente ao ponto fixo, mas também visível nas outras duas séries temporais. Observando o ponto de referência (Fig. 5(a)) pode-se concluir que o nível de ruído é elevado para este caso, o que se deve, para além do ruído tipicamente elevado que caracteriza câmaras do tipo da utilizada, à cintilação da imagem induzida pelas condições de iluminação (reflexão da luz do sol nos plásticos que cobriam o tabuleiro da ponte) e a um sistema de ajuste automático de exposição demasiado turbulento. O desentrelaçamento da imagem também introduz uma quantidade significativa de artefactos que se evidenciam exactamente em objectos com movimento. Daqui se conclui que para este tipo de aplicações é da maior importância a escolha de uma câmara que permita uma i-



**Fig 5** – Deslocamentos detectados pelo sistema de visão referentes aos pontos indicados na Fig 4.

magem de grande qualidade.

Os espectros apresentados na Fig 6 revelam a dominância de uma frequência de 0.9Hz na resposta, caracterizada por um pico evidenciado quer pela análise de imagem (Fig 6 (a)), quer pelo espectro representado na Fig. 6(b), obtido através de um sismógrafo colocado no tabuleiro.



**Fig 6** – Espectros obtidos pelo sistema de visão (em cima) e por um sismógrafo colocado no tabuleiro (em baixo).

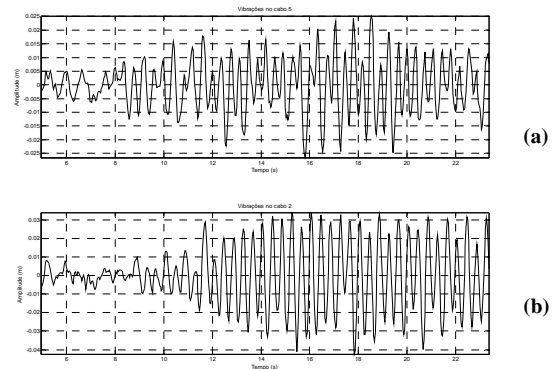
### 3.2 - Ponte pedonal em Viana do Castelo

Na ponte pedonal construída recentemente na marina de Viana do Castelo foi feito um ensaio com recurso a três peões onde se pretendia perceber a viabilidade do estudo, por análise de imagem, da interacção entre as vibrações induzidas no tabuleiro e a dos tirantes de uma ponte. Foram desenvolvidos algoritmos para analisar o movimento dos peões e foi aplicado o algoritmo do fluxo óptico para a análise dos tirantes (Fig 7).

As séries temporais apresentadas na Fig 8 ilustram o início das vibrações dos tirantes resultantes da entrada dos peões no tabuleiro.

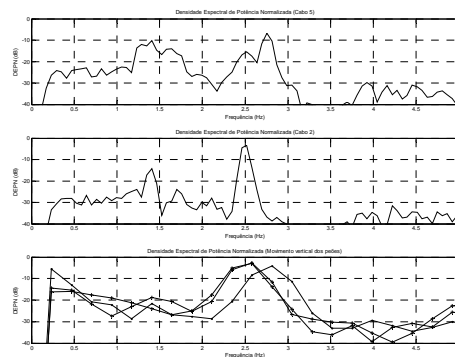


**Fig 7** – Pontos analisados na ponte pedonal de Viana do Castelo.



**Fig 8** - Deslocamentos obtidos pelo sistema de visão relativos aos tirantes da Fig 7: 1R (a) e 3C (b).

Foi possível identificar algumas frequências naturais dos tirantes assinalados, e validar as medidas feitas ao tirante 1R com um acelerómetro (ver Tabela 1). A componente dos 1,8Hz não foi detectada pelo acelerómetro, talvez pelo facto de as séries temporais terem sido registadas em alturas diferentes, e essa componente estar associada ao movimento dos peões.



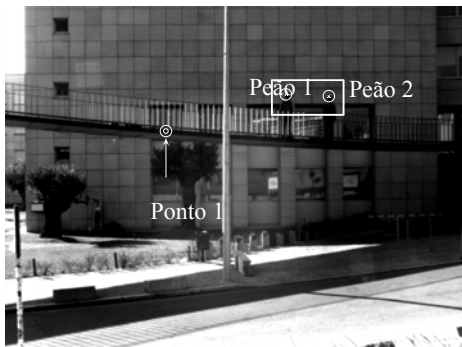
**Fig 9** - Espectros obtidos pelo sistema de visão referentes ao ponto 3C, 1R e movimento vertical dos peões.

**Tabela 1** - Frequências dos modos de vibração detectados na ponte pedonal de Viana do Castelo.

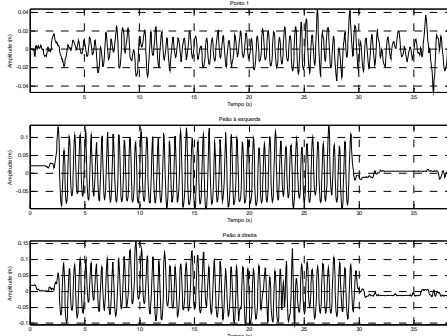
Tirante	Frequência do modo de vibração (Hz)				
	1°	2°	3°	4°	5°
Tirante 3C	1,6	2,6	2,8	-	-
Tirante 1R	1,4	1,8	2,5	-	-
Tirante 1R (acelerómetro)	1,38	-	2,46	3,73	4,95

### 3.3 - Ponte pedonal da FEUP

Foi também realizado um ensaio na ponte pedonal da FEUP para o qual foi, novamente, desenvolvida algoritmia de análise de imagem para caracterizar, em simultâneo, as vibrações do tabuleiro e o movimento dos peões (Fig 10). Neste caso os peões moviam-se apenas na direcção vertical, saltando a uma frequência aproximadamente fixa e provocando as vibrações apresentadas no primeiro gráfico da Fig 11.

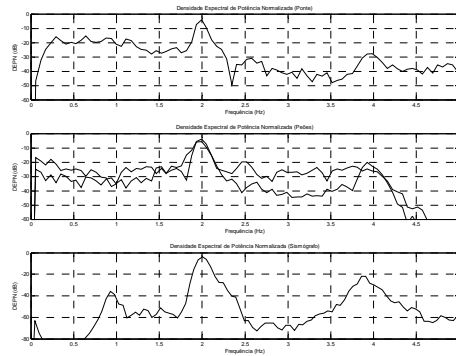


**Fig 10** - Pontos analisados na ponte pedonal da FEUP.



**Fig 11** - Deslocamentos obtidos pelo sistema de visão relativos aos pontos da Fig 10: Ponto 1 e os dois peões.

Em termos espectrais foram obtidos novamente resultados coincidentes com medidas efectuadas por um sismógrafo (colocado no Ponto 1 - Fig 10). Verificou-se, no entanto, que houve uma componente a 0,98Hz que o sistema de visão não conseguiu detectar, por se tratar de um sinal cuja contribuição fica abaixo do nível de sensibilidade do sistema. As frequências dos modos de vibração estão resumidas na Tabela 2.



**Fig 12** - Espectros das vibrações do tabuleiro, dos peões e do sismógrafo (ponte pedonal da FEUP).

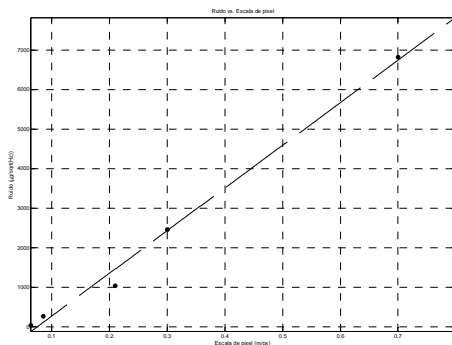
**Tabela 2** - Frequências dos modos de vibração detectados na ponte pedonal da FEUP.

Ponto	Frequências identificadas (Hz)
Ponto 1	2,0; 3,9
Peão 1	1,9; 3,9
Peão 2	1,9; 3,9
Ponto 1, sismógrafo	0,98; 1,98; 2,00; 2,15; 2,22; 3,91

## 4 – ERROS E LIMITAÇÕES DO SISTEMA

As limitações mais significativas do sistema são a resolução, a taxa de aquisição de imagens, o ruído do sensor de imagem e, mais óbvio, as condições de iluminação. Em muitos casos a resolução e taxa de aquisição possíveis estão relacionadas e são um parâmetro a otimizar. Com uma taxa de aquisição de 30 imagens por segundo, é possível descrever modos de vibração até 15 Hz. Este é, no entanto, um limite teórico que na prática é mais baixo devido à sensibilidade do sistema. A relação sinal-ruído é altamente dependente da amplitude

das vibrações em relação à área observada. Para a mesma amplitude de vibrações, quanto menor for a área observada, maior é a relação sinal-ruído. Na Fig 13 é mostrado o agravamento do nível de ruído do sistema com o aumento da área de visualização (com um factor de escala também maior), podendo-se obter, nos melhores casos, níveis de ruído da ordem das centenas de  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Comparando com sistemas de medida baseados em acelerómetros de elevada sensibilidade utilizados correntemente em aplicações de engenharia civil, este sistema tem uma sensibilidade reduzida de cerca de duas ordens de grandeza. No entanto, a facilidade de instalação e a possibilidade de realizar medições em pontos de difícil acesso, oferecem um extenso campo de aplicações de inegável interesse.



**Fig 13** - Nível de ruído em função da escala de pixel (área de imagem observada).

Condições climatéricas adversas (chuva forte, nevoeiro intenso) podem levar à interrupção do funcionamento do sistema. Isto é algo não evitável devido à natureza óptica do funcionamento do sistema.

## 5 - PONTE INTERNACIONAL SOBRE O RIO GUADIANA

A Ponte Internacional do Guadiana (Fig 14), construída entre as povoações de Castro Marim (Portugal) e Ayamonte (Espanha), foi projectada por Câncio Martins (1992) e entrou em serviço no Verão de 1991. Trata-se de uma ponte atirantada de suspensão parcial, com um vão central de 324m, dois vãos laterais de 135m, dois vãos de transição de 36m, e duas torres

com a forma de “A” com uma altura de cerca de 100m. Apesar do bom comportamento estrutural desta ponte, os seus tirantes são extremamente vulneráveis à acção do vento, exibindo frequentemente oscilações de elevada amplitude, facto que se encontra de alguma forma associado à inexistência de uma bainha em torno dos feixes de cordões. Refere-se que a tecnologia utilizada na construção destes elementos foi introduzida em 1988, tendo sido utilizada em diversas pontes construídas até ao início da década de 90, altura em que os fenómenos de vibração dos tirantes eram ainda pouco conhecidos. Acresce ainda a ocorrência também frequente de oscilações de muito elevada amplitude para determinados tirantes, quando outros tirantes na vizinhança não apresentam vibrações significativas, mesmo após a redução da velocidade do vento. Estes fenómenos, aparentemente relacionados com a designada “excitação paramétrica” têm merecido a atenção dos autores, requerendo a sua caracterização uma monitorização permanente dos tirantes. Dada a elevada amplitude das ocorrências, a exigência de precisão das medidas é menor do que a colocada para instrumentar tabuleiros de pontes rodoviárias, por exemplo, mas em contrapartida é fundamental a caracterização global das vibrações dos diferentes tirantes. Trata-se portanto de uma situação em que o sistema de vídeo se revela de grande utilidade.

O ensaio nesta ponte foi realizado com a câmara a uma distância de 850m (Fig 14) e com uma lente varifocal regulada para 50mm. A imagem apresentada na Fig 15 abranje uma área de 112x150 metros. A Fig 16 mostra uma situação observada correntemente nesta ponte, em que alguns dos maiores tirantes do tramo central exibem vibrações significativas para um dos panos de tirantes, mas não para o outro, pese embora o facto de serem idênticos.

Os espectros dos sinais obtidos são apresentados na Fig 17 e as frequências dos modos encontrados são resumidas na Tabela 3. Nas últimas linhas desta tabela apresentam-se ainda as frequências identificadas para os tirantes 3, 4 e 5 jusante a-

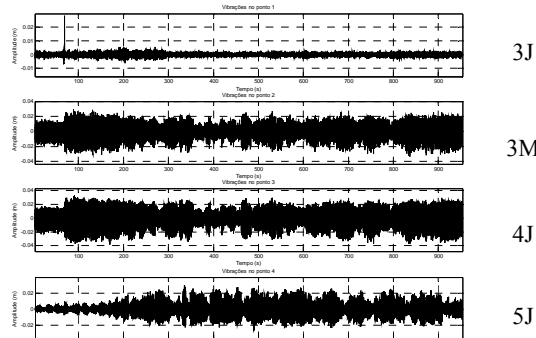




**Fig 14** - Ponte do Guadiana, vista da ponte no local onde se recolheram imagens



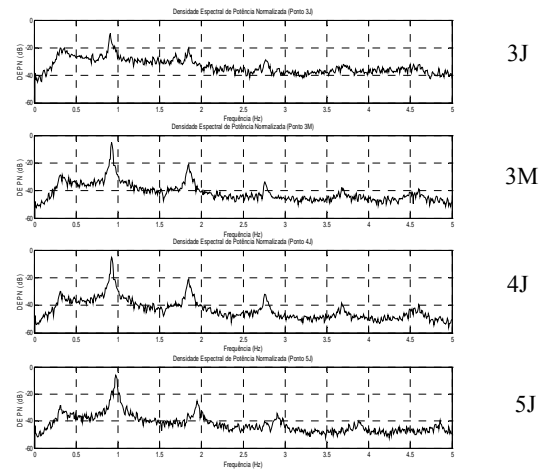
**Fig 15** - Pontos analisados na Ponte Internacional do Guadiana.



**Fig 16** - Vibrações nos tirantes analisados da Ponte Internacional do Guadiana (ver Fig 15).

através de medições directas realizadas com um acelerómetro junto da ancoragem destes tirantes.

A análise dos espectros apresentados na figura 17 e das frequências resumidas na tabela 3 mostra que, durante o período de 15 minutos de duração deste sinal, a resposta de todos os tirantes foi dominada por duas frequências correspondentes ao 1º e 2º modo do tirante 4 jusante, que oscilou com a maior das amplitudes (cerca de



**Fig 17** - Espectro dos sinais recolhidos.

0.60 m pico a pico). É visível contudo no espectro relativo ao tirante 3J, que exhibe vibração de baixa amplitude, a contribuição da frequência de 1,7Hz, correspondente à oscilação do tirante no seu segundo modo de vibração. Igualmente, o espectro relativo ao tirante 5 jusante apresenta um pico dominante a 0.98Hz, frequência própria do tirante, mas também um alargamento desse pico na vizinhança de 0.92Hz, e ainda uma frequência de 2,92Hz, correspondente ao 3º harmónico do próprio tirante.

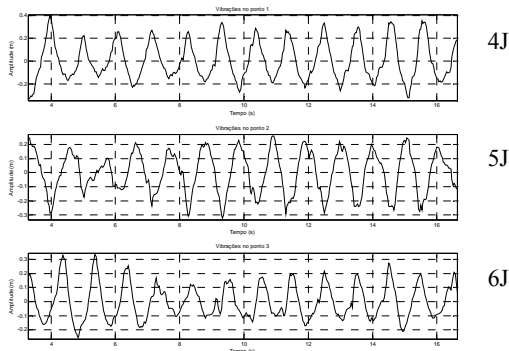
**Tabela 3-** Frequências dos modos de vibração detectados na ponte sobre o Guadiana.

Tirante	Frequências naturais identificadas (Hz)
3 Jusante	0,90; 1, 70; 1,85; 2,77; 3,69
3 Montante	0,92; 1,85; 2,77; 3,69; 4,6
4 Jusante	0,92; 1,85; 2,77; 3,69; 4,6
5 Jusante	0,98; 1,95; 2,77; 2,92
3 Jusante, acelerómetro	0,85; 1,70; 2,55; 3,40
4 Jusante, acelerómetro	0,90; 1,81; 2,71; 3,62; 4,52
5 Jusante, acelerómetro	0,98; 1,92; 2,86; 3,81; 4,76

Foram também analisados os tirantes indicados na Fig 18. Neste caso os tirantes exibiam vibrações mais significativas, como se pode ver na Fig 19, com amplitudes da ordem de 0,20- 0,40m.

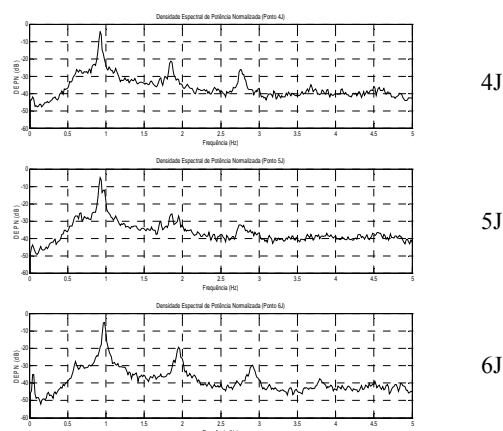


**Fig 18** - Pontos analisados no segundo ensaio da Ponte Internacional do Guadiana.



**Fig 19** - Vibrações nos tirantes analisados da Ponte Internacional do Guadiana (ver Fig 18).

Os espectros das séries temporais obtidas são ilustrados na Fig 20. De novo os valores das frequências obtidos para os picos espectrais são concordantes com os valores obtidos com o sismógrafo (Tabela 4).



**Fig 20** - Espectro dos sinais recolhidos.

**Tabela 4** - Frequências dos modos de vibração detectados na ponte sobre o Guadiana.

Tirante	Frequências naturais identificadas (Hz)
4 Jusante	0,92; 1,85; 2,75
5 Jusante	0,98; 1,95; 2,91
6 Jusante	0,98; 1,95; 2,91
4 Jusante, sismógrafo	0,90; 1,81; 2,71; 3,62; 4,52

Com esta experiência verificou-se que este sistema de visão permite fazer a monitorização de vários pontos de interesse de uma estrutura de grandes dimensões. A significativa amplitude de vibração dos tirantes permite a sua captação a uma distância considerável.

## 6-CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que, apesar dos níveis de ruído serem de pelo menos uma ordem de grandeza superior aos relativos a acelerómetros de grande sensibilidade utilizados na monitorização do comportamento dinâmico de estruturas de engenharia civil, o sistema de visão desenvolvido permite com grande facilidade a detecção e quantificação de vibrações de relativamente elevada amplitude, possibilitando igualmente uma rigorosa caracterização em frequência dos sinais medidos. Destacam-se em particular os ensaios realizados na ponte Internacional do Guadiana, onde se obtiveram registos de elevada qualidade das vibrações dos diferentes tirantes com uma câmara instalada a uma distância de 850m da ponte.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado através do projecto de investigação FCT: POCTI/ECM/46475/2002. Os autores agradecem à EP e ao ICNB a autorização concedida para realização dos ensaios.

## REFERÊNCIAS

- Lucas, B., Kanade, T., “An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision”, Proc. of Imaging Understanding Workshop, pág. 121-130, 1981
- Horn, B.; Shunk, B. - “Determining Optical Flow”, Artificial Intelligence Vol. 17, pág. 185-203, 1981
- Silva, S.; Bateira, J.; Caetano, E. - “Development of a vision system for vibration analysis”, Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES) 2007, Porto
- Câncio Martins, J. –“The International Guadiana Bridge at Castro Marim”, em Guadiana and Arade Cable-Stayed Bridges. Ed. por J. Almeida Fernandes e L. Oliveira Santos, LNEC, 1992, pp. 3-15.
- Caetano, E.; Cunha, A.; Silva, J. M.; Freitas, F. – “Avaliação Experimental da Eficiência de TMDs para Controlo de Vibrações Laterais da Ponte Pedro e Inês”, Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Vila Real, 2008