



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE INSPEÇÃO VISUAL ASSISTIDA NA MONITORIZAÇÃO DE ENSAIOS DE FLEXÃO ATÉ À ROTURA DE VIGAS DE MADEIRA

Lisboa • dezembro de 2013

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 453/2013 – **DBB/NGA**

Título

APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE INSPEÇÃO VISUAL ASSISTIDA NA MONITORIZAÇÃO DE ENSAIOS DE FLEXÃO ATÉ À ROTURA DE VIGAS DE MADEIRA

Autoria

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

Dora Roque

Bolseira de Iniciação à Investigação Científica, Núcleo de Geodesia Aplicada

Ana Fonseca

Investigadora Principal, Núcleo de Geodesia Aplicada

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 453/2013

Proc. 0404/112/17722

Resumo

A inspeção visual assistida pode ser utilizada para a monitorização de ensaios de flexão até à rotura de vigas de madeira, tendo sido usado um sistema de observação com fotografia e vídeo. Foi desenvolvido um programa para identificação automática das imagens da viga, que registaram alterações significativas, tendo a fratura sido delineada através de técnicas de análise de imagem orientada por objetos.

Palavras-chave: Inspeção visual assistida, Processamento digital de imagem, Análise de imagem orientada por objetos, vigas de madeira

APPLICATION OF ASSISTED VISUAL INSPECTION TECHNIQUES FOR MONITORING TESTS OF BENDING UNTIL CRACKING OF WOODEN BEAMS

Abstract

Bending until cracking tests in wooden beams can be monitored using assisted visual inspection techniques. An observation system using both photography and video was used to analyse these events. A program was developed in order to automatically identify the images, in which significant changes were registered, and the crack boundary was delimited using object-based image analysis.

Keywords: Assisted visual inspection, Digital image processing, Object-based image analysis, wooden beams

Índice

1	Introdução	1
2	Aquisição de imagens	2
2.1	Monitorização da deformação.....	2
2.2	Monitorização da rotura	3
3	Extração de informação através de processamento digital de imagem	6
4	Análise de resultados	9
5	Conclusões.....	11
	Referências Bibliográficas	13
	Anexo.....	15
	ANEXO I – Propriedades das imagens	17

Índice de figuras

Figura 2.1 – Ensaio de flexão de uma viga de madeira	2
Figura 2.2 – Distribuição espacial dos equipamentos de aquisição de imagem (a zona da viga oculta pela máquina de ensaios está representada a preto)	4
Figura 2.3 – Viga de madeira no final do ensaio.....	5
Figura 3.1 – Imagem do módulo da diferença entre a primeira e a última fotografia do ensaio.....	6
Figura 3.2 – Imagem RGB da rotura (a) e imagem do módulo da diferença do par correspondente (b).....	7
Figura 3.3 – Imagem sintética do logaritmo do brilho	8
Figura 3.4 – Evolução da fratura ao longo do ensaio, em que T1 é o instante correspondente à primeira imagem e T2 o correspondente à segunda (câmara do lado direito).....	8
Figura 4.1 – Medição da flecha da viga na direção vertical (comprimento do segmento de reta vermelho)	9

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Comparação das características das câmaras fotográficas	3
Quadro 4.1 – Quantificação de amplitudes e intervalos de tempo	10
Quadro A.1 - Propriedades das imagens para diferentes modos de aquisição.....	19

1 | Introdução

O LabImagem do Núcleo de Geodesia Aplicada do Departamento de Barragens de Betão tem desenvolvido estudos de aplicação de técnicas de inspeção visual assistida (IVisA) em que se aplicam algoritmos de processamento digital de imagem a fotografias numéricas para caracterizar e monitorizar patologias em obras de engenharia. O LabImagem está dotado de vários programas de processamento de imagens, nomeadamente para reconhecimento de padrões, processamento geométrico e radiométrico de imagens, processamento de nuvens de pontos e, ainda, uma estação fotogramétrica digital. Contudo, os programas generalistas nem sempre são os mais adequados para a realização de estudos muito específicos, sendo necessário desenvolver algoritmos para extrair a informação pretendida das imagens.

A utilização desta técnica tem três fases: a aquisição das imagens, o seu processamento geométrico e a extração de informação relevante para a análise. Os objetos de estudo podem ser bastante diversificados, tendo já sido aplicada a paramentos de barragens de betão [1,2], superfícies azulejadas [3] e para monitorizar a estabilidade de escavações em encostas para a construção de barragens [4, 5]. Enquanto em alguns casos de estudo se pretende realizar uma análise estática, como nas superfícies azulejadas, em que o objetivo é a construção de um registo gráfico de danos para uma determinada época, noutras situações pretende-se efetuar uma análise dinâmica, avaliando a evolução do fenómeno ao longo do tempo. No caso dos paramentos de barragens e das encostas, o fenómeno evolui lentamente, sendo suficiente adquirir imagens com uma frequência que vai desde diária a anual. No entanto, para determinados estudos em que o fenómeno se desenvolve rapidamente, a aquisição de imagens tem de ser realizada com uma frequência elevada, sendo aconselhável, em alguns casos, a utilização de câmaras de vídeo em vez de câmaras fotográficas.

O LabImagem realizou, em colaboração com o Departamento de Estruturas (DE) do LNEC, a monitorização com IVisA de um ensaio de flexão de uma viga de madeira. O objetivo foi a monitorização da deformação e da rotura da viga, tendo sido dado especial destaque à localização do ponto inicial da fratura e à sua evolução ao longo do ensaio. Nos ensaios de flexão até à rotura de vigas de madeira, a deformação é muito lenta na fase inicial mas a rotura é muito rápida, pelo que deve ser monitorizada com registo em fotografia, até próximo da rotura, e em vídeo, na fase da rotura. A aplicação da IVisA para monitorização dos ensaios introduz objetividade e rigor na análise das alterações.

2 | Aquisição de imagens

O DE possui uma máquina de ensaios mecânicos, na qual ensaiou a flexão até à rotura uma viga com 3,5 m de comprimento. No âmbito do ensaio, a equipa do LabImagem adquiriu imagens fotográficas e de vídeo para a realização de IVisA. A viga foi colocada na máquina, sobre dois suportes próximos das suas extremidades, de modo a que a força fosse exercida em dois pontos da viga próximos do centro (Figura 2.1), com direção e sentido constantes e intensidade crescente, mas com incrementos lentos de carga. O ensaio terminou quando a rotura da viga ocorreu.



Figura 2.1 – Ensaio de flexão de uma viga de madeira

2.1 Monitorização da deformação

A deformação da viga processa-se lentamente. Para monitorizar este fenómeno com IVisA, é vantajoso utilizar um sistema de aquisição que permita captar toda a viga numa única imagem. O intervalo de tempo entre aquisição de fotografias não é crítico para este estudo, devido à reduzida velocidade de deformação. Contudo, o tamanho do *pixel* é fundamental, pois a dimensão da deformação detetada depende da resolução espacial da imagem. Desta forma, foi seleccionada para o estudo uma câmara fotográfica em vez de uma câmara de vídeo. As câmaras fotográficas consideradas para a realização do ensaio foram uma Nikon D200 e uma Nikon E8800, ambas pertencentes ao NGA. As características das duas câmaras, com relevância para o ensaio, podem ser consultadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Comparação das características das câmaras fotográficas

Câmara	Nikon D200	Nikon E8800
Intervalo de tempo entre aquisições (s)	2	30
Pixel no sensor (mm)	0,006	0,003
Distância focal (mm)	28	8,9

A câmara Nikon D200 foi selecionada para a monitorização, pois a maior distância focal permite, para um estacionamento à mesma distância da viga, obter uma resolução espacial superior à da Nikon E8800.

Para o estacionamento da câmara foram considerados vários aspetos:

- Distância entre a câmara e a viga;
- Resolução espacial da imagem;
- Área captada pela imagem;
- Direção do eixo ótico;
- Necessidade de estacionar outros equipamentos sem obstruir o campo de visão da câmara.

Dadas as dimensões da sala do ensaio, a distância máxima possível entre a câmara e a viga era de 4,30 m. Verificou-se que o estacionamento a esta distância com a objetiva de 28 mm de distância focal permite fotografar 3,62 m na direção horizontal, ou seja, a viga estava completamente contida na imagem e ocupava quase toda a extensão horizontal desta. A resolução espacial da imagem adquirida nestas condições é de 0,92 mm. Os valores de distância entre a câmara e a viga necessários para obter uma determinada resolução espacial, assim como o comprimento da viga captado em cada caso, podem ser consultados no Anexo 1. A câmara foi estacionada de modo a que o eixo ótico fosse perpendicular à viga e a intersetasse no seu ponto médio.

2.2 Monitorização da rotura

A resolução espacial da imagem também é um fator importante para a monitorização da rotura. No entanto, dada a elevada velocidade de propagação da fratura na rotura, o intervalo de tempo entre a aquisição de imagens é o fator que determina a seleção do equipamento mais adequado a este estudo. Desta forma, foram utilizadas câmaras de vídeo em vez de câmaras fotográficas, pois as primeiras permitem adquirir 24 imagens (*frames*) em cada segundo, o que implica um intervalo de

0,04 s entre cada imagem, largamente inferior ao conseguido com as câmaras fotográficas. O posicionamento e a orientação das câmaras de vídeo foram condicionados pela posição da câmara destinada à monitorização da deformação, tendo havido o cuidado de garantir que nenhuma câmara de vídeo se encontrava no campo de visão da câmara fotográfica. Os eixos óticos das câmaras de vídeo ficaram com uma orientação oblíqua em relação à viga. A fim de obter uma resolução espacial aceitável, as câmaras foram estacionadas o mais próximo possível do objeto em estudo. Dado que a máquina de ensaios ocultava a parte central da viga, foram utilizadas três câmaras: duas delas foram colocadas de forma a que cada uma captasse metade do objeto, enquanto a terceira foi orientada de modo a filmar a zona central, que se encontrava oculta para as restantes (Figura 2.2).

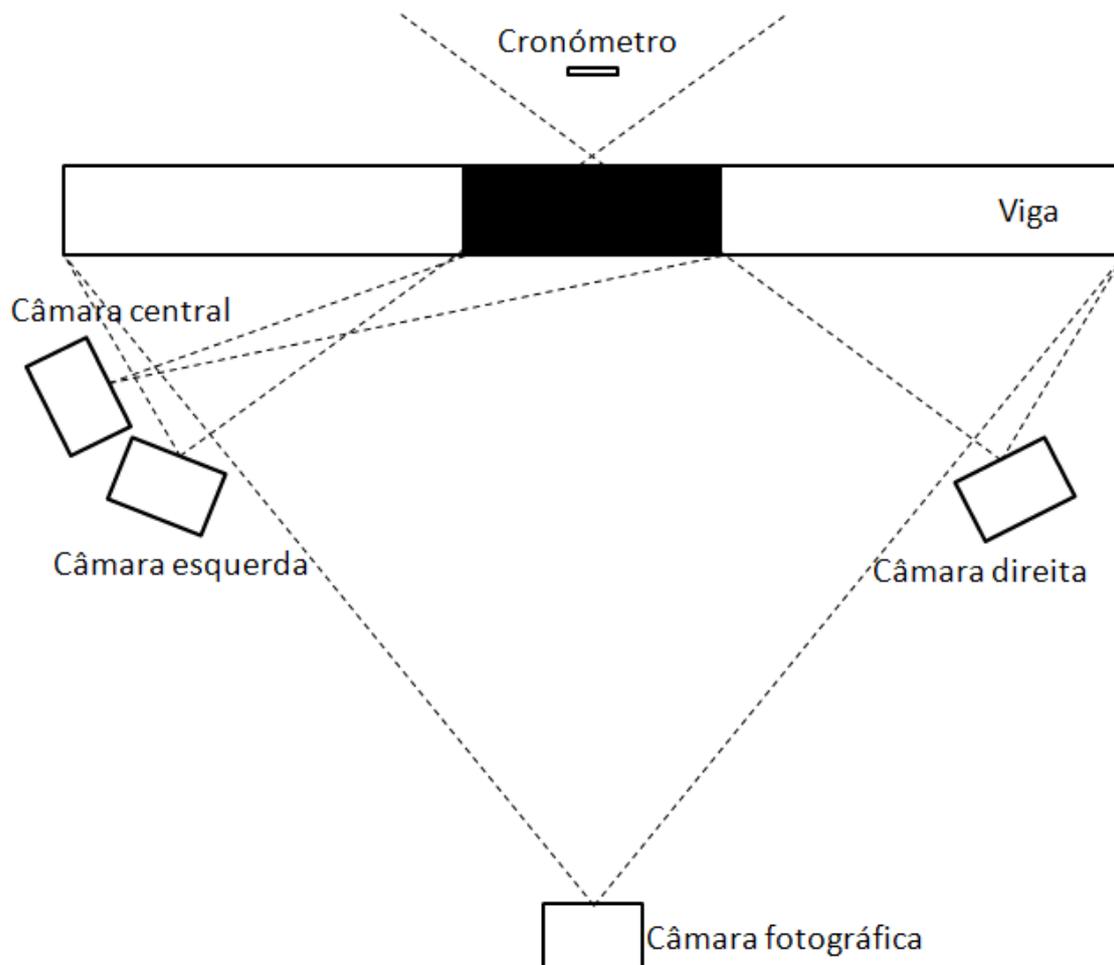


Figura 2.2 – Distribuição espacial dos equipamentos de aquisição de imagem (a zona da viga oculta pela máquina de ensaios está representada a preto)

Como as câmaras não estavam sincronizadas, foi utilizado um cronómetro, visível nas imagens captadas pelas câmaras direita e esquerda, para que fosse possível, durante o processamento, comparar imagens obtidas no mesmo instante por câmaras diferentes.

A aquisição de imagens pelas quatro câmaras foi iniciada em simultâneo com o início do ensaio e foi realizada até ao final da rotura (Figura 2.3), o que aconteceu cerca de 30 minutos mais tarde. Os vídeos realizados foram processados com o programa VLC para individualizar as *frames* e ser

possível trabalhá-las como imagens independentes. Foram adquiridas 692 imagens com a câmara fotográfica e cerca de 43200 com cada uma das câmaras de filmar.

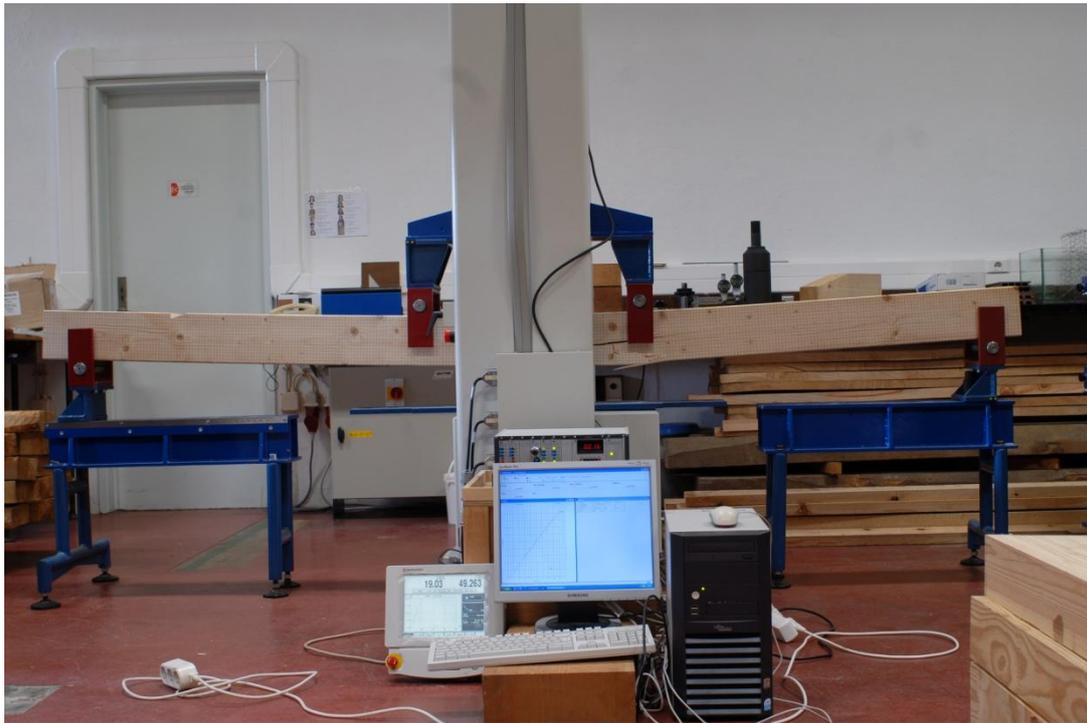


Figura 2.3 – Viga de madeira no final do ensaio

3 | Extração de informação através de processamento digital de imagem

A monitorização da deformação e da evolução da fratura na viga foi realizada através da análise de alterações registadas em imagens da mesma área adquiridas em instantes diferentes. A técnica mais utilizada em processamento digital de imagens (PDI) para a identificação de alterações é a subtração de imagens, na qual os *pixels* que permanecem inalterados apresentam valor zero, enquanto os que registam mudanças têm valores inferiores ou superiores.

Para analisar a deformação da viga ao longo do ensaio, foi calculada a imagem do módulo da diferença entre duas imagens da câmara fotográfica adquiridas em instantes distintos. O cálculo do módulo implica que todos os *pixels* correspondentes a alterações apresentam valores superiores a zero. No caso em estudo, foram identificadas duas zonas de alteração devidas à flexão, identificadas por *pixels* claros (Figura 3.1): uma zona de alteração de viga para *background* (em cima) e outra de *background* para viga (em baixo).



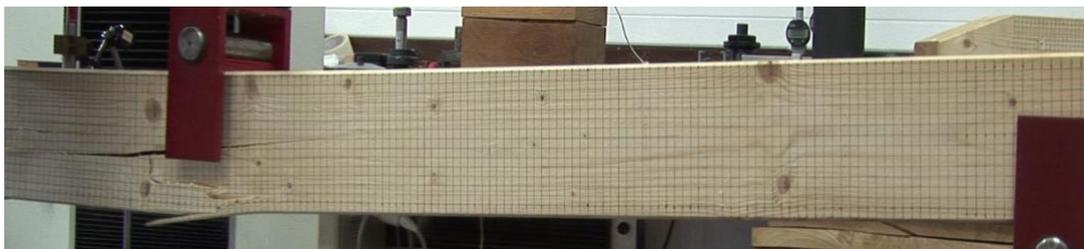
Figura 3.1 – Imagem do módulo da diferença entre a primeira e a última fotografia do ensaio

O número de imagens adquirido por cada câmara foi demasiado elevado para que a identificação de alterações fosse realizada de forma manual. Desta forma, foi construído um programa em MATLAB® para a deteção automática das imagens que registaram alterações. A fim de evitar a deteção de imagens que registaram alterações exteriores à viga (falsos positivos), estas foram cortadas de modo

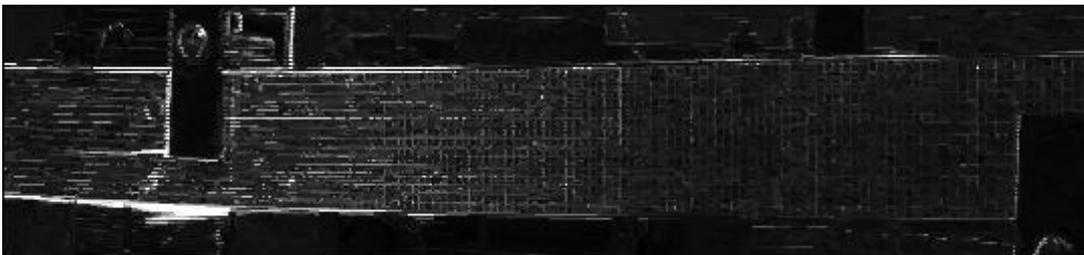
a excluir outros elementos, como por exemplo, a informação referente à data e hora visível nas *frames* de vídeo.

O programa constrói a imagem do módulo da diferença para cada par de imagens consecutivas, adquiridas pelo mesmo equipamento, e calcula o seu desvio padrão. Para imagens do módulo da diferença onde não são registadas alterações, todos os *pixels* apresentam valores próximos de zero e, conseqüentemente, desvio padrão baixo. Em imagens com *pixels* correspondentes a alteração, o desvio padrão é mais elevado. Tendo em vista a identificação das imagens que registaram alterações, são seleccionados os pares de imagens cujo módulo da diferença apresenta maior valor de desvio padrão. O programa constrói um ficheiro com a lista dos nomes das imagens identificadas.

As imagens provenientes do vídeo e identificadas pelo programa foram processadas no Definiens® Developer, a fim de obter a delimitação da fratura em cada instante em que as alterações da viga foram detetadas. Por cada imagem identificada, foram introduzidas no programa duas fontes de informação: a imagem RGB original e a imagem do módulo da diferença entre esta e a imagem seguinte no vídeo (Figura 3.2). O processamento realizado consiste numa segmentação da imagem em objetos homogéneos e sua posterior classificação.



(a)



(b)

Figura 3.2 – Imagem RGB da rotura (a) e imagem do módulo da diferença do par correspondente (b).

Como o objetivo era a construção de objetos de radiometria homogénea que delimitassem corretamente a fratura, na fase de segmentação das duas imagens [6] foi atribuído um peso 2 à imagem do módulo da diferença, onde a fratura está realçada, e um peso 1 à imagem RGB original. Para os outros cinco parâmetros que é necessário definir para a segmentação da imagem, foi escolhido um valor baixo para a escala (5) e foram atribuídos os pesos máximos aos parâmetros cor e suavidade (0,9) em detrimento da forma e da compacidade (0,1). Deste modo, foram construídos objetos de pequena dimensão e pouco compactos, adequados à tipologia de uma fratura em madeira.

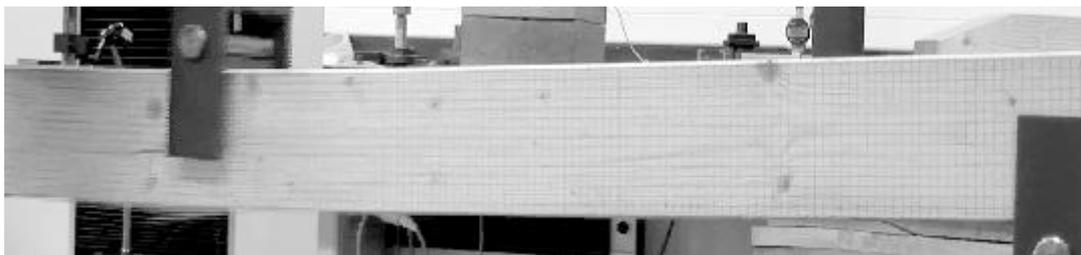


Figura 3.3 – Imagem sintética do logaritmo do brilho

Na fase de classificação dos objetos foram definidas duas classes: fratura e viga sem fratura. A classificação foi realizada recorrendo a duas imagens sintéticas construídas à custa das variáveis módulo da diferença e logaritmo da média das bandas espectrais do vermelho, verde e azul (logaritmo do brilho), para cada objeto. Os objetos de fratura apresentam valores elevados de módulo da diferença e valores baixos de logaritmo do brilho, como se pode ver na Figura 3.3. Desta forma, foi construída uma função de pertença dos objetos às classes à custa da qual foram classificados como fratura os objetos que apresentavam, simultaneamente, valores de módulo de diferença superiores a um determinado limiar e valores de logaritmo do brilho inferiores ao limiar correspondente, sendo obtida a delimitação da fratura na imagem em estudo. Para a segunda imagem identificada no par (adquirida mais tarde), o algoritmo identifica tanto a fratura já existente na imagem anterior como a evolução desta. A fim de obter ficheiros vetoriais disjuntos para épocas distintas, aquando do processamento da segunda imagem do par, foi considerado o ficheiro vetorial proveniente da classificação da primeira imagem, sendo apenas classificados os objetos que respeitem as condições radiométricas expostas anteriormente e que não estejam contidos na área definida pelo ficheiro vetorial da primeira imagem. No caso de serem identificados vários pares de imagens com alterações, é necessário, para o processamento de cada imagem, considerar todos os ficheiros vetoriais gerados no processamento das imagens anteriores. Os resultados obtidos no Definiens[®] Developer foram exportados para o ArcGIS[®], onde foram sobrepostos à imagem final do ensaio, tendo sido atribuído um código de cores aos vários polígonos correspondendo aos diferentes instantes em que a fratura evoluiu (Figura 3.4).

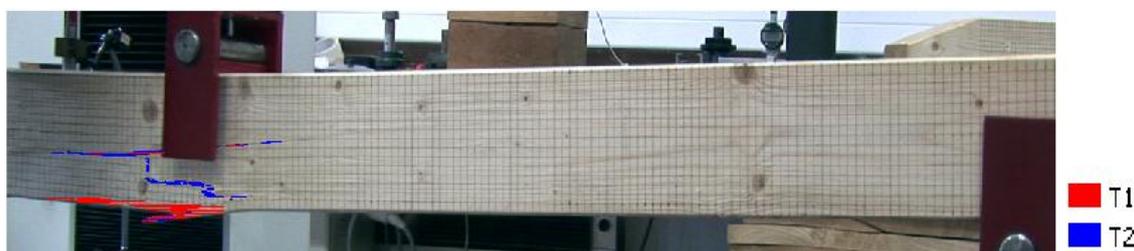


Figura 3.4 – Evolução da fratura ao longo do ensaio, em que T1 é o instante correspondente à primeira imagem e T2 o correspondente à segunda (câmara do lado direito)

4 | Análise de resultados

As imagens adquiridas pela câmara fotográfica foram adequadas para a análise da deformação. Verificou-se que não foram identificadas alterações significativas entre imagens consecutivas, ou seja, que as eventuais flechas da viga ocorridas num intervalo de tempo de 2 s foram inferiores a 0,92 mm. Contudo, se for calculado o módulo da diferença entre imagens não consecutivas, são detetados alguns *pixels* de alteração, o que mostra que a viga estava de facto a ser lentamente deformada durante todo o ensaio. A determinação do número de *pixels* alterados, na direção vertical, entre o início e o fim do ensaio, permitiu concluir que a viga apresentava uma flecha vertical de 60 mm (Figura 4.1).

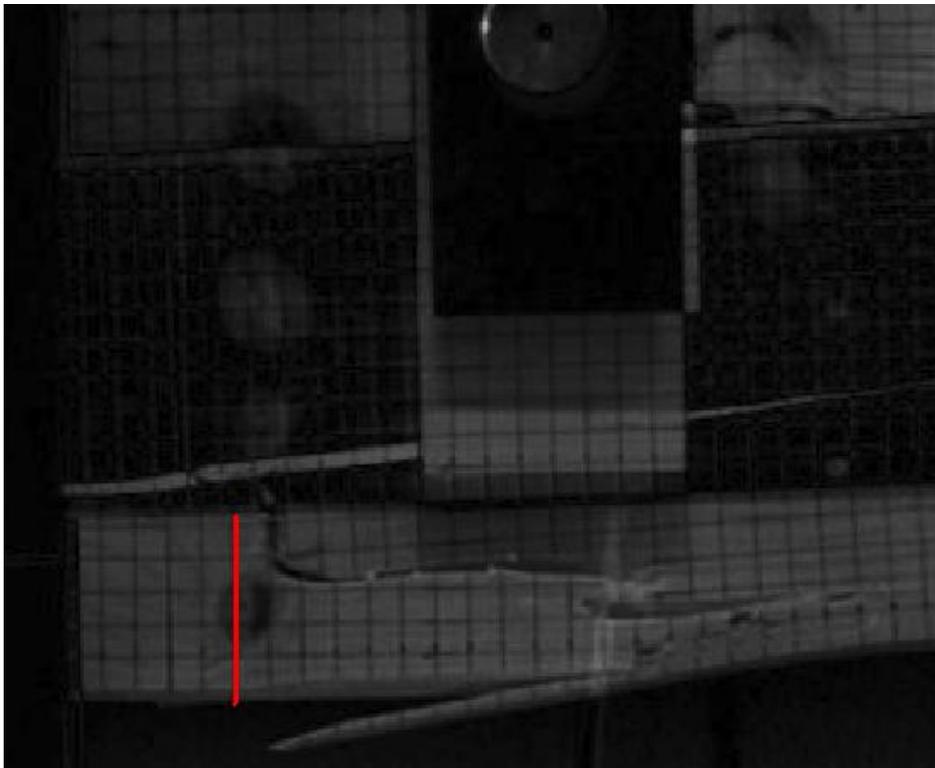


Figura 4.1 – Medição da flecha da viga na direção vertical (comprimento do segmento de reta vermelho)

A aplicação do programa de deteção automática de imagens com alterações identificou vários conjuntos de imagens com mudanças. A maioria correspondia a falsos positivos, nomeadamente a situações em que os operadores atravessaram o campo de visão da câmara a fim de realizar ajustamentos à máquina de ensaios. O programa de identificação automática detetou o par de imagens em que foi registada a rotura. No entanto, esta apenas foi identificada num par de fotografias, o que significa que a fratura se desenvolveu durante um intervalo de tempo inferior a 2 s. Este resultado mostra que, para o estudo da evolução da fratura, a câmara fotográfica não é o equipamento mais adequado.

Na análise da evolução da fratura com as câmaras de vídeo, a câmara colocada do lado esquerdo não registou alterações significativas, uma vez que a fratura se formou e propagou apenas na parte central e do lado direito da viga. As câmaras orientadas para o centro e para o lado direito da viga registaram apenas dois pares de imagens consecutivas com o aparecimento e a evolução da rotura, o que implica que o fenómeno decorreu num intervalo de tempo inferior a 0,08 s (Quadro 4.1). Apesar de as câmaras de vídeo terem uma maior frequência de aquisição de imagens que as fotográficas, este equipamento não permitiu obter informação detalhada sobre a propagação da fratura, sendo recomendável, para a realização de ensaios desta natureza, a utilização de câmaras de vídeo existentes no mercado que registam um maior número de *frames* por segundo (fps), nomeadamente da ordem de 1000 ou 2000 fps que possibilitam a monitorização de fenómenos que decorrem em intervalos de tempo de milésimas de segundo. Informações relativas às características deste género de câmaras podem ser consultadas em <http://www.olympus-ims.com/pt/hsv-products/i-speed-fs/>.

Quadro 4.1 – Quantificação de amplitudes e intervalos de tempo

	Amplitude (mm)	Intervalo de tempo (s)	Equipamento
Deformação vertical total	60	~1800	Câmara fotográfica
Deformação parcial	<0,92	2	Câmara fotográfica
Fratura (direção vertical)	5,5	0,04 – 0,08	Câmara de vídeo

5 | Conclusões

O sistema de observação utilizado na monitorização do ensaio de carga em flexão até à rotura de uma viga de madeira com IVisA permitiu analisar deformações correspondentes a flechas superiores a 0,92 mm, tendo sido observada a deformação total da viga durante o ensaio correspondente a uma flecha de 60 mm. A utilização de câmaras de vídeo para a monitorização da evolução da fratura possibilitou a construção de mapas de evolução desta. Contudo, como o fenómeno ocorre num pequeno intervalo de tempo (entre 0,04 s e 0,08 s), seriam necessárias câmaras com aquisição de um maior número de *frames* por segundo para possibilitar a construção de mapas mais detalhados.

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Geodesia Aplicada



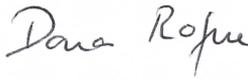
João M. Martins Casaca

O Diretor do Departamento de
Barragens de Betão



António Lopes Batista

AUTORIA



Dora Roque
Mestre em Engenharia Geográfica

Bolseira de Iniciação à
Investigação Científica



Ana Fonseca
Doutora em Deteção Remota
Investigadora Principal

Referências Bibliográficas

- [1] LNEC – **Memorando sobre a Inspeção Visual Assistida de Paramentos de Barragens**. Relatório 399/2011 do NGA/NO/DBB.
- [2] LNEC – **Barragem do Covão do Meio: Campanha de Referência para a Inspeção Visual Assistida**. Relatório 351/2012 do NGA/DBB.
- [3] Roque, D., M. Mendes, S. Pereira, A. Fonseca, J. M. Mimoso – **Deteção de Anomalias em Azulejos através de Técnicas de Processamento Digital de Imagem**. Congresso Internacional AZULEJAR 2012. Aveiro. 2012.
- [4] LNEC – **Inspeção Visual Assistida por Fotografia Digital – Aplicação às Encostas da Barragem de Foz Tua**. Relatório 356/2012 do NGA/NFOS/DBB.
- [5] LNEC – **Barragem de Foz Tua – Campanha de Operacionalização do Sistema de Inspeção Visual Assistida das Encostas durante a Construção**. Nota Técnica 22/2013 do NGA/DBB.
- [6] Definiens® AG – **User Guide**. Munique, Alemanha: Definiens® AG, 2008.

Anexo

ANEXO I – Propriedades das imagens

Quadro A.1 – Propriedades das imagens para diferentes modos de aquisição

Resolução espacial (mm)	Distância focal (mm)	Distância ao objeto (m)	Comprimento de viga coberto (m)
0,05	28	0,233	0,197
0,10		0,467	0,393
0,15		0,700	0,590
0,20		0,933	0,787
0,25		1,167	0,983
0,30		1,400	1,180
0,35		1,633	1,377
0,40		1,867	1,573
0,45		2,100	1,770
0,50		2,333	1,967
0,55		2,567	2,163
0,60		2,800	2,360
0,65		3,033	2,557
0,70		3,267	2,753
0,75		3,500	2,950
0,80		3,733	3,147
0,85		3,967	3,343
0,90	4,200	3,540	
0,92	4,300	3,624	
0,05	17	0,142	0,197
0,10		0,283	0,393
0,15		0,425	0,590
0,20		0,567	0,787
0,25		0,708	0,983
0,30		0,850	1,180
0,35		0,992	1,377
0,40		1,133	1,573

Resolução espacial (mm)	Distância focal (mm)	Distância ao objeto (m)	Comprimento de viga coberto (m)
0,45	17	1,275	1,770
0,50		1,417	1,967
0,55		1,558	2,163
0,60		1,700	2,360
0,65		1,842	2,557
0,70		1,983	2,753
0,75		2,125	2,950
0,80		2,267	3,147
0,85		2,408	3,343
0,90		2,550	3,540
0,95		2,692	3,737
1,00		2,833	3,933
1,05		2,975	4,130
1,10		3,117	4,327
1,15		3,258	4,523
1,20		3,400	4,720
1,25		3,542	4,917
1,30	3,683	5,113	
1,35	3,825	5,310	
1,40	3,967	5,507	
1,45	4,108	5,703	
1,50	4,250	5,900	
1,52	4,300	5,969	
0,05	35	0,292	0,197
0,10		0,583	0,393
0,15		0,875	0,590
0,20		1,167	0,787

Resolução espacial (mm)	Distância focal (mm)	Distância ao objeto (m)	Comprimento de viga coberto (m)	
0,25	35	1,458	0,983	
0,30		1,750	1,180	
0,35		2,042	1,377	
0,40		2,333	1,573	
0,45		2,625	1,770	
0,50		2,917	1,967	
0,55		3,208	2,163	
0,60		3,500	2,360	
0,65		3,792	2,557	
0,70		4,083	2,753	
0,74		4,300	2,899	
0,05		50	0,417	0,197
0,10			0,833	0,393
0,15			1,250	0,590
0,20	1,667		0,787	
0,25	2,083		0,983	
0,30	2,500		1,180	
0,35	2,917		1,377	
0,40	3,333		1,573	
0,45	3,750		1,770	
0,50	4,167		1,967	
0,52	4,300		2,030	

