



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO
Núcleo de Geodesia Aplicada
Núcleo de Observação

Proc. 0404/11/17722
Proc. 0403/11/17718

MEMORANDO SOBRE A INSPECÇÃO VISUAL ASSISTIDA DE PARAMENTOS DE BARRAGENS DE BETÃO

Lisboa • Novembro de 2011

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 399/2011 – NGA/NO

Resumo

Neste relatório faz-se a síntese dos métodos disponíveis para realizar a Inspeção Visual Assistida (IVISA) de paramentos de barragens de betão, no que diz respeito às várias fases envolvidas: aquisição de imagens, processamento, monitorização temporal e arquivo. Apresentam-se os recursos existentes no LNEC e a adquirir, assim como os custos associados.

Synopsis

This report presents the summary of the available methods to perform Assisted Visual Inspection (IVISA) of concrete dam surfaces, concerning the many phases involved: imagery acquisition, processing, temporal monitoring and archiving. The existing equipments at LNEC are presented, as well as those which should be acquired and their costs.

Índice do Texto

1. Introdução	1
2. Aquisição de imagens e MNS do paramento e produtos derivados	2
2.1 Mono-Fotografias.....	2
2.2 Mono-fotografias e aquisição do MNS do paramento	2
2.3 Pares estereoscópicos.....	3
3. Processamento de imagem para detecção automática de anomalias.....	4
4. Monitorização da evolução do dano	5
5. Recursos	5
5.1 Recursos humanos	6
5.2 Câmara digital	6
5.3 Computadores e <i>software</i>	6
6. Considerações finais.....	6
Referências	7
Anexos	11
ANEXO I – Características de câmaras digitais e imagens	12
ANEXO II – Equipamentos	14
ANEXO III – Métodos de PDI.....	15
Algoritmo Percolation.....	15
Algoritmo Aglomeração Evolutiva Variável	15
Modelo de Contornos Activos Baseado em Curvas de Nível.....	16

Índice das Figuras

Figura 1 – Fenda em paramento de barragem.....	1
Figura 2 – Fiada de pares estereoscópicos com pontos de apoio.....	3

Índice dos Quadros

Quadro 1 – Características de câmaras digitais para IVISA	12
Quadro 2 – Características de imagens para IVISA	13
Quadro 3 – Custos dos equipamentos e dos dados	14

Memorando sobre Inspeção Visual Assistida de Paramentos de Barragens de Betão

1. INTRODUÇÃO

A Inspeção Visual Assistida (IVISA) de paramentos de barragens é um método não destrutivo de monitorização da saúde estrutural da obra. O principal objectivo deste tipo de monitorização é o desenvolvimento de uma solução automática de detecção, identificação e quantificação de danos, assim como a sua monitorização ao longo do tempo (Chen and Tara, 2010). Neste tipo de inspecção são utilizadas imagens numéricas e geradas representações digitais 2D do paramento, sobre as quais se realiza a quantificação do dano. Nestas imagens podem ser detectadas, localizadas, classificadas e quantificadas anomalias, podendo atingir-se um ou mais destes objectivos em função dos métodos de aquisição e processamento de imagem adoptados. Os tipos de anomalias mais importantes a monitorizar são fendas na superfície do paramento (Figura 1) e repasses. Numa metodologia de sistematização da informação das inspecções visuais, proposta no LNEC (Portela, 2000, 2002; Portela *et al.*, 2002) as fendas são caracterizadas à custa dos parâmetros: localização, extensão, abertura, desenvolvimento, evolução, orientação e continuidade no bloco. As aberturas de fendas a monitorizar são classificadas em intervalos, de 0 a 0,2 mm, de 0,2 mm a 2,0 mm e superiores a 2,0 mm. Outros efeitos associados, tais como lascagem, percolação, movimento e exsudação, são úteis para a caracterização do dano e podem também ser identificadas, classificadas e quantificadas nas imagens. Os repasses são caracterizados pela localização, orientação, extensão, idade, estado, existência e tipo de depósitos.



Figura 1 – Fenda em paramento de barragem.

Este relatório pretende fazer uma síntese das metodologias de aquisição e processamento de imagens para a IVISA, fazendo ênfase em fendas em paramentos de barragens. As metodologias descritas terão que ser adaptadas à inspecção de outros órgãos da barragem tais como encontros, parte emersa do paramento de montante, paramento de jusante, galerias, maciços de fundação, encostas a montante e a jusante da barragem e as estruturas dos órgãos de segurança e exploração.

As fases críticas da IVISA são:

- 1 – a aquisição das imagens;
- 2 – o seu processamento geométrico e radiométrico para cartografar anomalias;

- 3 – a quantificação das características das anomalias;
- 4 – a caracterização da sua evolução ao longo do tempo;
- 5 – o arquivo.

As condições de aquisição das imagens vão condicionar o tipo de produtos que é possível produzir assim como a sua qualidade. O registo das condições geométricas da câmara fotográfica no momento da aquisição das fotografias assim como o conhecimento do modelo numérico de superfície (MNS) do paramento da barragem são críticos para o processo. São necessários para permitir co-registar imagens multitemporais e para lhes associar uma métrica de modo a realizar medições sobre elas.

Neste relatório descrevem-se as várias etapas da inspecção visual assistida, as abordagens possíveis e os produtos derivados, no que diz respeito:

- à aquisição de imagens e/ou do MNS do paramento da barragem;
- ao processamento das imagens para detectar, localizar, classificar e caracterizar os elementos sinalizadores de dano;
- à monitorização temporal do dano baseada em imagens.

2. AQUISIÇÃO DE IMAGENS E MNS DO PARAMENTO E PRODUTOS DERIVADOS

2.1 MONO-FOTOGRAFIAS

Na literatura consultada, a abordagem mais proposta e/ou adoptada é a recolha de mono-imagens com câmaras digitais comerciais, tanto em testes em laboratório como em obra. O processo de inspecção visual assistida pode passar unicamente pela aquisição de imagens do paramento da barragem sem aquisição de informação referente ao seu MNS. Esta metodologia permitirá dispor de conjuntos multitemporais de imagens registados geometricamente entre si, desde que as imagens sejam recolhidas aproximadamente com a mesma orientação externa da câmara ao longo do tempo (mesmo ponto estação e mesma atitude da câmara, para cada foto). Esta solução não permite ortorrectificar as imagens e associar-lhes uma métrica. Só será possível, com este conjunto de dados, classificar os elementos detectados na imagem e monitorizar a sua evolução ao longo do tempo, mas não quantificar os parâmetros que os caracterizam, nomeadamente extensão e abertura de fendas.

2.2 MONO-FOTOGRAFIAS E AQUISIÇÃO DO MNS DO PARAMENTO

Para poder associar uma métrica às imagens, que permita quantificar os parâmetros caracterizadores do dano, é necessário conhecer as coordenadas de pontos identificáveis nas imagens (pontos de controlo). Estes seriam utilizados para realizar a orientação externa da câmara e construir um MNS do paramento para ortorrectificar as imagens. A ortorrectificação das imagens garante o seu registo geométrico ao longo do tempo e associa-lhes uma métrica, permitindo monitorizar a evolução do dano e a sua quantificação. As coordenadas dos pontos de controlo são obtidas por métodos trigonométricos, através da medição de ângulos e distâncias para pontos notáveis do paramento, identificáveis nas fotografias, no momento da sua aquisição; para tal seria útil sinalizar no paramento uma grelha de pontos e determinar as suas coordenadas; este objectivo pode ser atingido acoplando a câmara a um taqueómetro, sem prisma reflector, estacionado com centragem forçada em pilares da observação geodésica (Wada and Kono, 2011); para ortorrectificar a foto com o software disponível no LNEC são necessárias, no mínimo, as coordenadas de 11 pontos por foto, o que torna a operação demorada, se tivermos em conta que um levantamento típico de um paramento de uma barragem poderá produzir uma cobertura fotográfica com cerca de 750 imagens (Oliveira *et al.*, 2010), das quais cerca de 150 serão seleccionadas para produzir uma imagem ortorrectificada do paramento.

Mais recentemente, tem sido investigada a utilização da tecnologia *Laser Scanning* (LS) na obtenção de coordenadas de pontos de controlo do paramento da barragem. Esta tecnologia, que disponibiliza

as coordenadas de uma nuvem de pontos de grande densidade, permite obter um modelo 3D do paramento da barragem que poderá ter utilidade para o acompanhamento da obra ao longo da sua vida (Berberan *et al.*, 2010, 2011; Oliveira *et al.*, 2010). Dispondo de um levantamento da obra por LS está disponível um MNS do paramento que poderá ser utilizado para ortorrectificar as fotografias. Seleccionada esta opção é aconselhável realizar o levantamento por LS e as fotos em simultâneo, com a máquina acoplada ao LS, para se obter um modelo fotográfico 3D de melhor qualidade (Baptista, 2011).

Qualquer das opções descritas (taqueometria ou LS) para aquisição do MNS do paramento e orientação externa das fotografias exige a disponibilização de equipamentos que não existem no LNEC: um taqueómetro sem prisma reflector ou um *Laser Scanning*, cujos custos se apresentam no Anexo II deste relatório.

Na literatura técnico científica, vários autores relatam experiências de utilização de mono-imagens para a inspecção assistida de paramentos. Portela *et al.* (2002) propuseram um método baseado no registo de mono-imagens do paramento de uma barragem e aplicação de técnicas da fotogrametria para cartografar o paramento e identificar patologias. Chen and Hutchinson (2010) descrevem um *framework* para a quantificação e monitorização de fendas em superfícies de betão em que se propõe uma metodologia para incorporar, no modelo de calibração geométrico das imagens, as variações geométricas introduzidas pelo movimento de corpo rígido da estrutura, de modo a poder garantir um rigoroso registo geométrico das imagens ao longo do tempo e permitir a utilização de algoritmos de detecção de alterações. No que diz respeito à capacidade para medir abertura de fendas em obra, Wada and Kono (2011) relataram que, se se obtiver, com uma câmara com uma resolução de 12,6 milhões de píxeis (2 900 x 4 350 píxeis), uma imagem de uma secção de 4 m x 6 m do paramento, a imagem terá uma resolução de 1,4 mm. A aquisição de uma imagem com estas características pode obter-se com uma teleobjectiva de 400 mm a uma distância de 120 m do paramento. Segundo estes autores, com uma imagem com estas características e com técnicas de processamento digital de imagens (PDI) adequadas é possível detectar fendas com aberturas mínimas de 0,2 mm se se mantiver um ângulo de vista baixo.

2.3 PARES ESTEREOSCÓPICOS

A aquisição de imagens do paramento pode realizar-se através da aquisição de pares estereoscópicos de modo a poder utilizar-se as metodologias da fotogrametria terrestre, que permitem associar uma métrica às imagens e obter também um MNS do paramento com menos pontos de coordenadas conhecidas, do que nas abordagens a) e b) da secção 2.2.

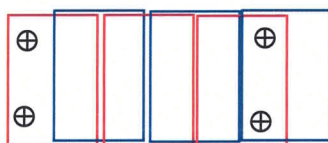


Figura 2 – Fiada de pares estereoscópicos com pontos de apoio.

Os alvos existentes no paramento, nos pontos objecto da observação geodésica, poderiam ser utilizados para fazer o apoio das fiadas de pares de fotografias, para permitir a sua orientação externa, mas a sua densidade não é suficiente, dada a alta resolução que se pretende para as fotografias. Teriam que ser implantados mais alvos no paramento da barragem e obtidas as suas coordenadas (Figura 2). A utilização de pares estereoscópicos de fotografias permite obter o MNS do paramento da barragem. Esta metodologia não é adoptada em nenhum artigo da literatura consultada. A sua adopção, que permite ortorrectificar as imagens do paramento, exige conhecimento e *software* especializado existente no LNEC.

3. PROCESSAMENTO DE IMAGEM PARA DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE ANOMALIAS

Dispondo de imagens ortorrectificadas do paramento da barragem podem ser utilizadas técnicas de PDI para realizar alguma automatização das tarefas de detecção, classificação e quantificação de artefactos sinalizadores de dano. Em toda a literatura técnico-científica consultada são realçadas as dificuldades introduzidas pela existência nas imagens de descontinuidades radiométricas que não correspondem a manifestações de dano e que constituem efeitos adversos que impedem a completa automatização da identificação dos elementos relevantes. Os processamentos terão que ser monitorizados por um técnico com experiência em IVISA e PDI (Chen and Hutchinson, 2010).

Em toda a literatura consultada é feita ênfase na detecção, classificação e quantificação de fendas, descritas como objectos 2D alongados e estreitos com fronteiras fechadas (Chen and Hutchinson, 2010).

As técnicas de PDI descritas na literatura dividem-se em quatro categorias:

- 1 – pré-processamento: com o objectivo de diminuir a existência de ruído nas imagens (elementos lineares que não são fendas);
- 2 – processamento: com o objectivo de identificar, classificar e quantificar manifestações de dano, com grande ênfase na identificação, extracção e quantificação de fendas;
- 3 – análise multitemporal: com o objectivo de identificar manifestações de danos em séries multitemporais de imagens e quantificar a sua evolução;
- 4 – extracção dos elementos relevantes e armazenamento num sistema de informação.

Dos vários métodos de pré-processamento descritos (Chen and Hutchinson, 2010; Fujita *et al.*, 2006; Gordan *et al.*, 2008) destaca-se um, relatado em vários artigos e reportado como eficiente, que consiste em aplicar um filtro da média à imagem original e subtrair esta imagem filtrada da original, para eliminar sombras e elementos que não correspondem a fendas.

Na fase de processamento realizam-se operações aritméticas de imagens (Fujita *et al.*, 2006; Oh *et al.*, 2009) para fazer o realce das fronteiras radiométricas que correspondem a fendas. Para a extracção automática ou supervisionada de fendas utilizam-se diferentes metodologias de uso corrente em Detecção Remota tais como: métodos de detecção de fronteiras radiométricas (operadores de Sobel, Canny, Fujita, etc.), métodos de seguimento automático de objectos lineares, operadores morfológicos, funções de nível, métodos de classificação difusos, análise de Fourier, wavelets, método da percolação (Tomoyuki *et al.*, 2008), entre outros.

Alguns autores (Gordan *et al.*, 2008) propõem uma ferramenta computacional de visão automática constituída por uma componente de realce na imagem dos objectos de interesse para a avaliação do dano, uma componente de treino do sistema e uma componente de avaliação da superfície em estudo. A primeira componente, de PDI, é baseada em métodos de realce, extracção e quantificação de fendas que incluem algoritmos de detecção e realce de fronteiras radiométricas e dividem as fronteiras detectadas em três classes: as fronteiras radiométricas fortes, indesejáveis, que correspondem a elementos estruturais tais como fronteiras entre blocos, as fronteiras radiométricas fracas que correspondem aos danos que se pretendem identificar e os aglomerados de píxeis que corresponde a superfícies suaves classificadas como *background*.

No que diz respeito à quantificação da extensão de fendas, esta é conseguida através da medição do comprimento linear do elemento classificado como fenda. A determinação, mais difícil, da abertura das fendas pode ser obtida pela distância entre os dois pontos de inflexão de um perfil radiométrico na direcção ortogonal ao progresso da fenda (Oh *et al.*, 2009).

A capacidade para medir abertura de fendas é relatada essencialmente em ensaios em laboratório (Valença *et al.*, 2011), e, na literatura a que tivemos acesso, numa única experiência em obra (Wada and Kono, 2011), em que as condições para a aquisição das imagens foram favoráveis. Segundo estes

autores, quando as limitações na resolução das imagens não permite a medição directa da abertura das fendas com dimensões inferiores à dimensão do píxel, pode adoptar-se uma metodologia em que se estabelece uma relação entre o nível de cinzento do píxel que contém um segmento da fenda e a abertura da fenda (Hiroshi, 2004; Wada and Kono, 2011). A principal limitação para atingir este objectivo é a qualidade da imagem, condicionada pela resolução da máquina fotográfica, das lentes tele-objectivas (Valença *et al.*, 2011) e da distância ao objecto.

A companhia japonesa KANSAI Electric Power Co. (KEPCO) já realizou IVISA em 16 barragens de betão das 39 da qual é concessionária (Wada and Kono, 2011). Nas experiências relatadas foram realizados testes de comparação de medição de extensão e aberturas de fendas na imagem e pelo método convencional com diferenças na determinação de aberturas de fendas de $\pm 0,1$ mm, em cerca de 98% das fendas, e de $\pm 10\%$ na sua extensão.

Foram também desenvolvidos ou adaptados algoritmos para a detecção de artefactos sinalizadores de dano em imagens de órgãos de obras de engenharia, dos quais o mais descrito é o algoritmo *Percolation*. Este é baseado no modelo físico de difusão de líquidos, utilizado na modelação da propagação de diversos fenómenos como doenças ou incêndios (Yamaguchi, 2008). Uma das aplicações deste modelo encontradas na literatura consiste na detecção automática de fendas em superfícies de betão (Tomoyuki *et al.*, 2008), que é realizada através da análise dos valores radiométricos dos píxeis que compõem a vizinhança do ponto a classificar.

Para a delimitação de fendas foram também adaptados algoritmos sofisticados baseados na teoria dos grafos, como o algoritmo de Aglomeração Evolutiva Variável (*Manifold Distances*) (Gong *et al.*, 2008). Este método utiliza métricas não Euclidianas para decidir da proximidade de píxeis da imagem, aglutinando-os em objectos homogéneos.

Outro método descrito na literatura para delinear fendas consiste na utilização de um modelo de Contornos Activos Baseado em Curvas de Nível (Chen and Hutchinson, 2010). O contorno da fenda é a curva de nível mínima de uma função de energia. A curva de nível mínima é calculada a partir de um conjunto de curvas de nível iniciais, que são adaptadas à fenda por um método iterativo em que se comparam os níveis de intensidade radiométricos da imagem, dentro e fora das curvas. Apenas quando a curva de nível coincide com a fronteira da fenda, a função de energia apresenta o seu valor mínimo (Chan and Vese, 2001). Alguns destes métodos de PDI encontram-se descritos com mais detalhe no Anexo III.

4. MONITORIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO DANO

A monitorização da evolução das fendas ao longo do tempo pode realizar-se através da aplicação de métodos de detecção de evoluções em séries de imagens multitemporais (subtracção radiométrica de imagens, análise em componentes principais, etc.) ou por comparação dos parâmetros de caracterização das fendas, em datas diferentes, na base de dados (Gordan *et al.*, 2008). Depois de extraídos da imagem e vectorizados os elementos relevantes para a avaliação do dano devem ser arquivados num sistema de informação.

As mesmas metodologias de processamento de imagem são utilizadas na inspecção de outro tipo de obras de engenharia, tais como pontes (Oh *et al.*, 2009).

5. RECURSOS

No LNEC, nomeadamente no DBB, existem recursos humanos, equipamentos e software para realizar IVISA.

5.1 RECURSOS HUMANOS

Para além da coordenação (IA Eliane Portela) o LNEC dispõe de recursos humanos com *know-how* nas seguintes áreas da IVISA:

- topometria do paramento da barragem: IP Maria João Henriques, Eng.º Henrique Candeias (NGA);
- processamento de imagem: IP Ana Fonseca, BIIIC Dora Roque, BE Nuno Afonso (NGA/Labimagem);
- arquivo da informação em SIG: BE Nuno Afonso (NGA/Labimagem);
- aquisição e processamento geométrico de fotos e de nuvens de pontos *Laser Scanning*: BE Bruno Baptista (NO).

5.2 CÂMARA DIGITAL

O DBB dispõe de uma câmara digital comercial, Nikon D200 (Quadro 1, anexo I), com a qual já se realizaram experiências de aquisição de imagens de paramentos de barragens para a IVISA (Oliveira *et al.*, 2010; Berberan *et al.*, 2011; Baptista, 2011).

Neste momento já existem no mercado câmaras fotográficas de melhor qualidade, nomeadamente no que diz respeito à sua resolução (nº de píxeis por área), que é crítica para a IVISA. A resolução (em megapíxeis), assim como a distância ao objecto, vão determinar a dimensão do elemento do objecto que corresponde a um píxel da imagem, como se pode ver no Quadro 2 do Anexo I, o que vai condicionar a detecção de fendas de pequena abertura. Podemos verificar no Quadro 2 (Anexo I) que a câmara existente no LNEC pode conseguir um elemento de objecto de 1,52 mm, a 100 m do objecto e com uma lente de 400 mm de distância focal (não existente no LNEC). Na câmara topo de gama, pode conseguir-se, nas mesmas condições, um elemento de objecto de 1,3 mm. O ganho aqui é na dimensão da imagem (maior no último caso, o que facilita a identificação de pontos para realizar a orientação externa da câmara).

Para a determinação de coordenadas de pontos notáveis do paramento da barragem (sem implantação de alvos), assim como para a determinação do MNS do paramento, é necessário dispor de uma estação total sem prisma ou um *Laser Scanning*. Pode também optar-se por adquirir o levantamento da barragem por LS. Os custos associados apresentam-se no Anexo II.

5.3 COMPUTADORES E SOFTWARE

O DBB dispõe de três computadores onde está instalado *software* para realizar a ortorrectificação de imagens (LISA, PCI Geomatica), o processamento de nuvens de pontos do LS (JRC Reconstructor), o processamento de imagens e reconhecimento de padrões (PCI Geomatica, Definiens Professional, MatLab Image Processing Tools) e de organização de informação em SIG (ArcGis), para além de outros pacotes de *software* auxiliares.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fase de aquisição de imagens para IVISA está operacional e unicamente condicionada pela resolução das câmaras digitais e pela possibilidade de estacionar a câmara em pontos para aquisição de imagens em boas condições. Uma optimização desta fase pode passar pela construção na obra de estruturas que permitam estacionar a câmara em condições óptimas (proximidade e perpendicularidade do eixo óptico da câmara em relação ao paramento).

No que diz respeito à fase de georreferenciação e registo geométrico de imagens multitemporais, de modo a poder associar uma métrica às imagens, as técnicas estão disponíveis, havendo unicamente a

necessidade de dispor de pontos de controlo de coordenadas conhecidas, com uma densidade adequada, no paramento.

A fase de PDI para extracção automática de objectos relevantes para a IVISA é a fase crítica em que o aumento desejável da automatização passa pelo desenvolvimento de algoritmos de PDI mais eficientes. Este esforço também servirá outros métodos de inspecção de obras de engenharia, como os métodos baseados na utilização de UAV (*Unmanned aerial vehicle*), assim como a Detecção Remota de recursos naturais em que o esforço de I&D passa sempre pelo desenvolvimento e optimização de *software*.

Referências

- Baptista, B. B. (2011) – *Modelação 3D da Barragem do Cabril por Varrimento LASER Terrestre e Fotogrametria Digital*. Tese de dissertação de mestrado em Engenharia Geográfica. FCTUC/LNEC. Coimbra 2011.
- Berberan, A. (2002) – *Codificação da Sintomatologia Visível Associada à Deterioração de uma Barragem de Betão*. Encontro Nacional Betão Estrutural 2002, Lisboa.
- Berberan, A., I. Ferreira, E. Portela, S. Oliveira, A. Oliveira, B. Baptista (2011) – *Overview on Terrestrial Laser Scanning as a Tool for Dam Surveillance*. - 6th International Dam Engineering Conference. February 2011, LNEC, Lisboa.
- Chan, T. F. and L. A. Vese (2001). *Active Contours without Edges*. IEEE Transactions on Image Processing, vol. 10, no. 2, pp. 266–277.
- Chen, ZhiQiang and Tara C. Hutchinson (2010) – *Image-Based Framework for Concrete Surface Crack Monitoring and Quantification*. Advances In Civil Engineering. Hindawi Publishing Corporation, Volume 2010, Article ID 215295, 18 Pages Doi:10.1155/2010/215295.
- Fujita, Yusuke, Yoshihiro Mitani and Yoshihiko Hamamoto (2006) – *A Method for Crack Detection on a Concrete Structure*. The 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06).
- Gong, M., L. Jiao, L. Bo, L. Wang and X. Zhang (2008). *Image Texture Classification Using a Manifold-distance-based Evolutionary Clustering Method*. Optical Engineering 47(7), 077201.
- Gordan, Mihaela, Ovidiu Dancea, Aurel Vlaicu, Ioan Stoian and Odysseas Tsatos (2008) – *Computer Vision Support Tool for assessing Concrete Hydro-Dams Surface Deterioration*. Control Engineering and Applied Informatics (CEAI), Vol. 10, No. 2, pp. 68-75.
- Oh, Je-Keun, Giho Jang, Semin Oh, Jeong Ho Lee, Byung-Ju Yi, Young Shik Moon, Jong Seh Lee and Youngjin Choi (2009) – *Bridge Inspection Robot System with Machine Vision*. Automation in Construction, 18, (2009), 929–941.
- Oliveira, S., I. Ferreira, A. Berberan, P. Mendes, J. Boavida, B. Baptista (2007) – *Monitoring the Structural Integrity of Large Concrete Dams: The Case of Cabril Dam, Portugal*. Hydropower 2010, September 2010, Lisboa.
- Portela, E. (2000) – *Proposta de uma Metodologia para Sistematização da Informação das Inspeções Visuais em Barragens de Betão*. Relatório 46/00 – NO, LNEC, Lisboa.
- Portela, E. (2002) – *Uma Metodologia de Sistematização da Informação das Inspeções Visuais. Aplicação à Barragem de Vilarinho das Furnas*. Relatório 150/02 - NO, LNEC, Lisboa.
- Portela, E., A. Berberan, S. de Pinho (2002) – *Inspeções Visuais em Barragens de Betão. Uma abordagem metodológica*. Encontro Nacional Betão Estrutural 2002, Lisboa.
- Tomoyuki Yamaguchi, Shingo Nakamura, Ryo Saegusa, Shuji Hashimoto (2008) – *Image-Based Crack Detection for Real Concrete Surfaces*. Transactions on Electrical and Electronic Engineering, *IEEJ Trans*, 2008; 3: 128–135.

- Valença, J., D. Dias-da-Costa, E. Júlio e H. Araújo (2011) – *Sistema Integrado para Detectar e Caracterizar Fendas em Superfícies de Betão durante Ensaios Laboratoriais*. Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia 2011. Coimbra.
- Yamaguchi, T. (2008) – *A Study on Image Processing Method for Crack Inspection of Real Concrete Surfaces*. Graduate School of Science and Engineering, Waseda University, Japan.
- Yamaguchi, T. and S. Hashimoto (2009a) – *Practical Image Measurement of Crack Width for Real Concrete Structure*. Electronics and Communications in Japan, Vol. 92, No. 10, 2009. Translated from Denki Gakkai Ronbunshi, Vol. 127-C, No. 4, April 2007, pp. 605–614.
- Yamaguchi, T. and S. Hashimoto (2009b). *Fast Crack Detection Method for Large-size Concrete Surface Images Using Percolation-based Image Processing*. Machine Vision and Applications, Springer-Verlag. DOI 10.1007/s00138-009-0189-8.
- Wada, S., Y. Kono (2011) – *The Investigation Method of Hydroelectric Facilities by Using Digital Camera*. Dams and Reservoirs under Changing Challenges. 2011 Taylor and Francis. London.

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Observação



Eng.º António Lopes Batista

O Chefe do Núcleo de
Geodesia Aplicada



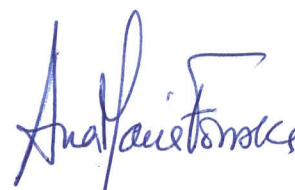
Eng.º João Manuel Martins Casaca

O Director do Departamento de
Barragens de Betão



Eng.º José Vieira de Lemos

AUTORIA



Eng.ª Ana Fonseca
Investigadora Principal



Eng.ª Dora Roque
Bolsaira de Iniciação à
Investigação Científica



Eng.º Bruno Batista
Bolsairo de Experimentação



Eng.º Nuno Afonso
Bolsairo de Experimentação

ANEXOS

ANEXO I – CARACTERÍSTICAS DE CÂMARAS DIGITAIS E IMAGENS

Quadro 1 – Características de câmaras digitais para IVISA.

Comparativo de diferentes máquinas Nikon (para utilizar com lentes Nikkor)

Marca	Modelo	Nº Pixeis (MPx)	Dim. Píxel (μ)	Sensor	Dim. Sensor (mm)	Resolução Max (Px)	Preço (€)
Nikon	D200	10.2	6.09	CCD	15,8 x 23,6	3872 x 2592	1 187
Nikon	D7000	16.2	4.78	CMOS	23,6 x 15,6	4928 x 3264	1 189
Nikon	D700	12.1	8.44	CMOS	36 x 23,9	4256 x 2832	2 400
Nikon	D3S	12.1	8.44	CMOS	36 x 23,9	4256 x 2832	4 814
Nikon	D3X	24.5	5.94	CMOS	35,9 x 24	6048 x 4032	6 623
Phase One	IQ 180 *	80	5.2	CCD	53,7 x 40,4	10328 x 7760	36 990

* (KIT IQ180 + 645DF + 80MM SCHNEIDER)

Quadro 2 – Características de imagens para IVISA.

Marca Modelo	Distancia Focal (mm)	Distância ao Objecto (m)	Elem. de imagem no Objecto (mm)	Área da fotografia no Objecto (m ²)	Escala 1 /	
Nikon D200	35	100	17.42	3046	2857	
		200	34.83	12175	5714	
	100	100	6.1	373	1000	
		200	12.19	1491	2000	
	200	100	3.05	93	500	
		200	6.1	373	1000	
	400	100	1.52	23	250	
		200	3.05	93	500	
	Nikon D3X	35	100	16.98	7031	2857
			200	33.97	28140	5714
100		100	5.94	860	1000	
		200	11.89	3447	2000	
200		100	2.97	215	500	
		200	5.94	860	1000	
400		100	1.49	54	250	
		200	2.97	215	500	
Phase One IQ180		35	100	14.87	17721	2857
			200	29.73	70838	5714
	100	100	5.2	2167	1000	
		200	10.41	8685	2000	
	200	100	2.6	542	500	
		200	5.2	2167	1000	
	400	100	1.3	135	250	
		200	2.6	542	500	

Nota: a amarelo equipamento existente no LNEC

ANEXO II – EQUIPAMENTOS

Quadro 3 – Custos dos equipamentos e dos dados.

Equipamento	Custo sem IVA
Estação Total	36 000 €
<i>Laser Scanning</i>	150 000 a 300 000 €

Dados/Barragem	Custo
Nuvem de pontos LS +cobertura fotográfica	5 000 a 15 000 €

ANEXO III – MÉTODOS DE PDI

Algoritmo *Percolation*

O fenómeno a estudar tem início num determinado ponto – ponto focal – e propaga-se para os pontos na vizinhança que apresentem maior susceptibilidade à propagação, tendo em conta a conectividade entre os pontos. O modelo pode ser aplicado ao Processamento Digital de Imagem, onde cada píxel é um potencial ponto focal ou vizinho para o qual o fenómeno em estudo se pode expandir. Uma das aplicações deste modelo encontradas na literatura consiste na detecção automática de fendas em superfícies de betão (Tomoyuki *et al.*, 2008). O processamento tem início num determinado píxel – o píxel focal – e o objectivo do processamento é classificar este como sendo um píxel pertencente a uma fenda ou ao fundo da imagem. Com essa finalidade, é efectuada uma avaliação para verificar se existem píxeis na vizinhança do píxel focal (região candidata) que apresentem números digitais inferiores a um determinado limiar, uma vez que as fendas apresentam valores menores que os do fundo da imagem por serem mais escuras. Se esta condição for satisfeita, os píxeis que a verificam são aglomerados ao píxel focal. A agregação de novos píxeis é efectuada iterativamente, até que o aglomerado atinja o limite da área de pesquisa ou não existam píxeis na região candidata com número digital inferior ao limiar radiométrico. A área da imagem em que é realizada a pesquisa é variável, permitindo, desta forma, a detecção de fendas de diferentes comprimentos. A classificação do píxel focal é obtida através da avaliação da geometria do aglomerado. A circularidade F_c é determinada pela equação (1), onde C_{count} é o número de píxeis do aglomerado e C_{max} é o comprimento máximo deste.

$$F_c = \frac{4 \cdot C_{count}}{\pi \cdot C_{max}^2} \quad (1)$$

Os valores da circularidade podem variar entre 0 e 1, onde valores próximos de 0 correspondem a estruturas lineares, como fendas, e valores próximos de 1 são relacionados com estruturas circulares (características de aglomerados com píxel focal pertencente ao fundo). O processamento é repetido até todos os píxeis da imagem terem sido processados como píxeis focais, sendo obtida uma imagem com o valor de F_c determinado para cada píxel, a qual é, posteriormente, alvo de um tratamento para atenuação de ruído e binarizada. O algoritmo proposto permite a identificação de fendas com exactidão, mesmo em imagens com pouco contraste, mas apresenta um tempo de processamento elevado. Foram introduzidas no algoritmo algumas condições com o objectivo de identificar, numa fase inicial do processamento, se o píxel focal seria um píxel de fundo. No caso de as condições serem verificadas, a interrupção do processamento é antecipada, permitindo uma análise global da imagem mais rápida, sem prejudicar a exactidão do produto final (Yamaguchi and Hashimoto, 2009b).

Algoritmo *Aglomeração Evolutiva Variável*

A *Aglomeração Evolutiva Variável* é um algoritmo de segmentação de imagem, proposto por Gong *et al.* (2008), que utiliza como critério de agregação um novo conceito de distância: a distância variável. A nova definição de distância permite que píxeis que pertençam ao mesmo aglomerado estejam mais próximos entre si do que píxeis situados em aglomerados diferentes, mesmo que a distância euclidiana entre o primeiro par de píxeis seja superior à do segundo. Esta propriedade torna o algoritmo mais apropriado para a segmentação de imagens onde estejam representados aglomerados com formas complexas, do que um algoritmo de segmentação que seja baseado na distância euclidiana. O comprimento variável de um segmento de recta $L(x_i, x_j)$ é determinado pela expressão (2), onde ρ é um factor superior a 1 que pode ser ajustado para aumentar ou diminuir o comprimento do segmento e $dist(x_i, x_j)$ é a distância euclidiana entre os píxeis.

$$L(x_i, x_j) \triangleq \rho^{dist(x_i, x_j)} - 1 \quad (2)$$

A distância variável entre dois píxeis é a soma dos comprimentos variáveis dos segmentos de recta que formam o caminho mais curto entre os pontos. O algoritmo da Aglomeração Evolutiva Variável é aplicado em várias iterações, em cada uma das quais é definido um conjunto de píxeis para representar os aglomerados presentes na imagem, e em que cada píxel analisado é atribuído ao aglomerado cujo píxel representante está mais próximo. O tempo de processamento deste algoritmo é mais elevado do que o de outros semelhantes que recorram ao cálculo da distância euclidiana, devido ao demorado processo de procurar o caminho óptimo entre pares de píxeis.

Algoritmo Modelo de Contornos Activos Baseado em Curvas de Nível

Foi encontrado um estudo na literatura que propõe a utilização de um Modelo de Contornos Activos Baseado em Curvas de Nível para detecção automática de fendas em superfícies de betão (Chen and Hutchinson, 2010). Para que o modelo mencionado possa conduzir a resultados aceitáveis, as imagens sobre as quais este é aplicado apenas devem apresentar dois aglomerados: a fenda e o fundo da imagem. Desta forma, antes da aplicação do modelo, é necessário identificar as zonas onde é provável que haja presença de fendas. A aquisição de várias imagens da mesma superfície em épocas diferentes, posteriormente divididas em imagens de menores dimensões, permite o cálculo de uma função de resíduo, a qual depende da diferença entre os valores de cinzento entre imagens de épocas distintas. A análise do valor desta função para cada uma das imagens de pequenas dimensões permite identificar quais as áreas onde poderá existir presença de fendas. A determinação da função de resíduo só pode ser efectuada após a realização de correcções geométricas e radiométricas sobre as imagens.

O objectivo do Modelo de Contornos Activos Baseado em Curvas de Nível é definir uma função $\phi(x,y)$ que a cada píxel da imagem, com coordenadas (x,y) , faz corresponder um valor real. O conjunto de pontos tais que $\phi(x,y)=0$ correspondem à curva Γ , cuja forma inicial é alvo de sucessivos ajustamentos até coincidir com o contorno das fendas representadas na imagem. A forma da curva Γ está relacionada com uma função de energia, a qual depende da função $\phi(x,y)$ e das diferenças entre o valor radiométrico de cada píxel da imagem e o valor médio dos números digitais dos píxeis que se encontram no interior da curva Γ , c_1 , e o dos que se encontram no exterior desta, c_2 . De acordo com Chan and Vese (2001), se a curva Γ estiver localizada no interior ou no exterior da fenda a identificar, pelo menos uma das referidas diferenças apresenta valor bastante diferente de zero. Apenas quando a curva Γ coincide com a fronteira da fenda, a função de energia apresenta o seu valor mínimo. Com este objectivo, através de várias iterações de processos numéricos, é determinada a função $\phi(x,y)$ que minimiza a função de energia.