

Inspecção de Estruturas de Betão com *Laser Scanning*, Análise Multi-Espectral e Processamento de Sinal



Jónatas Valença¹



Eduardo Júlio²



Helder Araújo³



José C. Príncipe⁴

RESUMO

O desenvolvimento da fotografia digital e do tratamento digital da imagem tornou a aplicação de métodos ópticos em Engenharia Civil extremamente interessante, em especial no campo do levantamento geométrico e da monitorização do comportamento estrutural de construções. Na sequência dos excelentes resultados obtidos num anterior estudo sobre aplicações de fotogrametria em Engenharia de Estruturas, decidiu-se aprofundá-lo, testando outras tecnologias e novas possibilidades.

Neste artigo, descreve-se a fase de arranque do novo projecto de investigação, o qual tem como principal objectivo desenvolver um método inovador de levantamento geométrico e identificação automática de anomalias em estruturas de betão à vista – barragens, pontes e edifícios.

Pretende-se utilizar *laser scanning*, para realizar o levantamento geométrico das estruturas, associado a análise multi-espectral, para identificar diferentes tipos de anomalias do betão. Para este efeito, serão utilizadas imagens obtidas pelo registo da radiação electromagnética reflectida pelas superfícies das estruturas em análise, incluindo frequências situadas fora do espectro visível. Com vista à caracterização de cada uma das anomalias, o estudo incluirá ainda o processamento de resultados, com recurso a algoritmos de aprendizagem baseados em redes neuronais.

PALAVRAS-CHAVE

Betão; inspecção *in situ*; ensaios não-destrutivos; anomalias; análise multi-espectral; *laser scanning*; processamento de sinal.

¹ ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal. jonatas@dec.uc.pt

² ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal. ejulio@dec.uc.pt

³ ISR, Departamento de Eng. Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra, Portugal, helder@isr.uc.pt

⁴ CNEL, University of Florida, United States of America, principe@cnel.ufl.edu

1. INTRODUÇÃO

A intervenção numa estrutura existente deve ser sempre precedida de uma inspecção técnica. Por falta ou para validar a informação disponível, é sempre necessário efectuar um levantamento geométrico da estrutura, tarefa que se pode revelar morosa e particularmente fastidiosa.

Quando a estrutura apresenta anomalias, torna-se igualmente necessário proceder à sua observação, medição, registo, análise e diagnóstico, seguindo-se, sempre que se justifique, a concepção da intervenção a realizar, a elaboração do respectivo projecto de execução e a sua orçamentação. As anomalias típicas de estruturas de betão incluem a carbonatação e o ataque de cloretos e sulfatos, a fissuração, o esmagamento, a colonização biológica e a vegetação pioneira, as manchas de humidade e de sujidade, as reparações mal executadas, a corrosão das armaduras, entre outras. A metodologia seguida na sua caracterização compreende normalmente o recurso a ensaios *in situ*, parcialmente destrutivos, a recolha de amostras e o seu posterior ensaio laboratorial. Esta metodologia requer, regra geral, a inspecção de determinadas zonas da estrutura de difícil acesso e confronta-se com a necessidade de lidar com um grande volume de informação e técnicas, implicando o recurso a técnicos devidamente qualificados. Este facto contribui igualmente para a morosidade do processo e para a sua vulnerabilidade a erros e à sua propagação.

Estudos anteriormente desenvolvidos pelos autores [1, 2] permitiram concluir que a utilização da técnica de fotogrametria terrestre no levantamento geométrico de estruturas de Engenharia Civil apresenta vantagens importantes: aumento considerável da velocidade de execução; elevada precisão dos resultados; aumento muito significativo da quantidade de informação obtida (3D); e redução do tempo e custos envolvidos. Dados os bons resultados obtidos e, sendo a técnica de *laser scanning* uma evolução da fotogrametria tradicional, aliando às vantagens desta a capacidade de marcação e referenciação automática de pontos, a investigação evoluiu no sentido de considerar esta técnica, incorporando ainda outras técnicas existentes. O objectivo último é o desenvolvimento de um método inovador de levantamento geométrico, detecção e caracterização automática de anomalias em estruturas de betão à vista, combinando a aplicação de métodos ópticos, como a fotogrametria e o *laser scanning*, à análise multi-espectral da radiação electromagnética reflectida, otimizada com recurso a processamento de sinal utilizando algoritmos baseados em redes neuronais. O resultado pretendido é a geração de modelos 3D *renderizados* com informação refinada, acrescentando ao levantamento geométrico, um mapeamento pormenorizado das diferentes anomalias existentes, i.e., uma avaliação rigorosa do estado de conservação das estruturas.

2. TÉCNICAS A UTILIZAR

A fusão de vários sensores, dos quais se extrai diferente tipo de informação e/ou informação complementar, tem recebido nas últimas décadas uma atenção especial em várias áreas, apesar de inicialmente esta abordagem ser desenvolvida para aplicações militares. O conceito da utilização de informação proveniente de multisensores baseia-se na observação da natureza. Humanos e animais desenvolveram a capacidade de utilizar múltiplos sensores para melhorar a sua capacidade de sobrevivência [3]. Como consequência, verificou-se um aumento significativo de publicações que relacionam e combinam diferentes técnicas. A necessidade de integrar várias tecnologias envolvidas tem como objectivo atingir um maior nível de resolução, um aumento de precisão e diminuição do tempo de execução do processamento da informação [4]. A redundância de resultados contribui, de forma decisiva, para aperfeiçoar e otimizar as metodologias propostas para cada um dos métodos em separado e para as diferentes situações de aplicação.

2.1 *Laser scanning*

A técnica de *laser scanning* possibilita o levantamento geométrico tridimensional de construções. A sua aplicação permite obter, além das coordenadas de um número elevado de pontos através de um

laser, a construção de modelos 3D *renderizados*, onde a informação relativa à textura dos materiais é extraída da câmara digital, acoplada e referenciada com todo o sistema de aquisição de dados - *laserscanner* e câmara digital. Os campos de aplicação desta técnica incluem a Arquitectura e as Engenharias Civil, Mecânica, Industrial, Geológica, Aeroespacial e Naval; a Astronomia; a Medicina; a Arqueologia; operações censitárias e investigação forense [5, 6, 7].

2.2 Análise multi-espectral de imagem

A análise multi-espectral da imagem é uma tecnologia originalmente desenvolvida para tratar imagens obtidas por satélite. Permite captar imagens correspondentes a radiação de frequências situadas fora do espectro visível. Este facto possibilita a extracção de informação que o olho humano, preparado para captar imagens com radiação na região do espectro do vermelho, do verde e do azul, situados entre os comprimentos de onda de 400nm e 700nm, não consegue captar (Fig. 1).

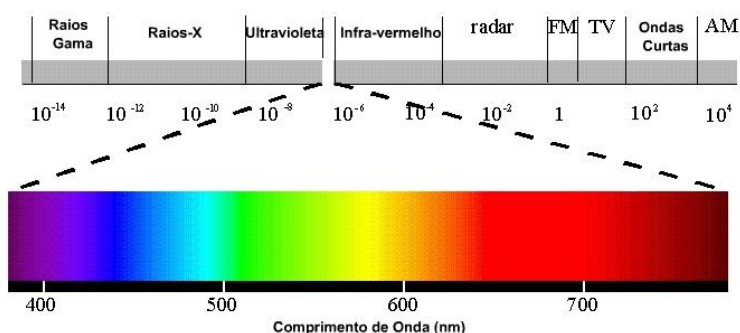


Figura 1. Espectro de resposta electromagnético [8].

Para cada frequência da luz visível é associada uma cor, determinada pela forma como as radiações electromagnéticas são absorvidas e reflectidas por esse mesmo corpo, ou seja, qualquer corpo possui um determinado espectro de resposta para os vários comprimentos de onda.

Pretende-se analisar, utilizando análise multi-espectral, se é possível realçar, mapear e quantificar as anomalias em estruturas de betão à vista usualmente detectadas por inspecção visual – fissuração e esmagamento do betão; colonização biológica e vegetação pioneira; manchas de humidade, sujidade e ferrugem; e reparações mal executadas, entre outras, assim como as anomalias apenas detectáveis através de ensaios *in situ* – carbonatação; ataque de cloretos e de sulfatos; reacção álcalis-agregados, entre outras.

Alguns trabalhos publicados recorrendo a esta técnica incluem a detecção de anomalias em construções, nomeadamente, a colonização biológica ou humidade em edifícios e o levantamento automático de fachadas com diferenciação dos materiais constituintes [9, 10, 11]. No trabalho de investigação desenvolvido por Arita *et al* [12] foram estudados três processos diferentes de degradação do betão, causados por: dióxido de carbono (carbonatação); cloreto de sódio (ataque de cloretos); e ácido sulfúrico (ataque de sulfatos). A metodologia adoptada nos ensaios, realizados com um espectrómetro, permite a medição hiper-espectral da superfície de betão obtendo-se o espectro de resposta de provetes para comprimentos de onda situados entre 400nm e 2500nm, com intervalos inferiores a 10nm. Os autores demonstraram que as características espectrais do betão degradado e dos químicos produzidos durante a reacção de degradação revelam uma correlação elevada. A profundidade de carbonatação do betão foi avaliada com sucesso através de modelos de regressão entre as características do espectro em determinados comprimentos de onda e as características da degradação.

Existem estudos que descrevem a indução de cloretos em argamassa de cimento e em betão, através do contacto do material com soluções salinas. Na investigação descrita por Barberon *et al* [13] foram estudados dois tipos de material: (1) uma argamassa de cimento, hidratada directamente aquando da

sua fabricação com uma solução de NaCl; e (2) um betão corrente que, após hidratação, foi colocado numa solução básica de NaCl e NaOH, de forma a coincidir com o pH da solução intersticial do material. Durante o estudo registaram-se os espectros de resposta dos provetes em várias fases dos ensaios.

Actualmente, com a crescente utilização do betão branco, fabricado com cimento branco, o qual apresenta um comportamento idêntico aos betões cinzentos, a resposta espectral do material ganhou maior visibilidade e importância. A pureza da cor do betão branco é um parâmetro essencial de avaliação da sua qualidade, depende dos cimentos, dos fíleres e dos pigmentos inorgânicos, adicionados durante a amassadura. A capacidade do betão reflectir a luz – índice de reflectância (I) é determinada a partir de medições colorimétricas, tendo o branco puro uma reflectância de 100. Foram publicados os índices de reflectância referentes a três tipos de betão branco em função da natureza do fíler: calcário, silicioso, e mármore [14]. Ainda no mesmo trabalho é feita uma comparação do índice de reflectância do betão moldado em diferentes tipos de cofragem: metálica e contraplacado.

3. ANOMALIAS NO BETÃO

A durabilidade dos materiais, relativamente à agressão causada por agentes exteriores, é o factor mais condicionante do tempo de vida útil de uma estrutura. Dependendo da sua utilização, materiais como o betão, podem ser expostos a diferentes tipos e níveis de agressões ambientais. Das anomalias provocadas por agentes químicos, tais como a carbonatação do betão e o ataque de cloretos ou sulfatos, resulta uma anomalia, com gravidade do ponto de vista estrutural – a corrosão das armaduras, sempre que o recobrimento é afectado e a degradação atinge o betão que envolve os varões. Este fenómeno induz, por sua vez, outras anomalias como a fendilhação, a fissuração e a delaminação do betão, igualmente com consequências na resistência dos elementos estruturais. Outro tipo de contaminação ambiental, tal como a sujidade ou a variação do teor em humidade, afecta a aparência e o estado de conservação das estruturas em betão. Intervenções de manutenção e/ou de reparação mal conduzidas representam, igualmente, anomalias com impacto na estética e na durabilidade da estrutura. Processos de colonização biológica, por fungos, musgos, algas e outros organismos, ou o desenvolvimento de vegetação pioneira, podem representar igualmente anomalias relevantes nas estruturas de betão.

3.1 Anomalias a induzir

Pretende-se induzir em laboratório o maior número possível das anomalias anteriormente referidas, de forma acelerada, em provetes de argamassa de cimento ou de betão. Face à dificuldade em induzir, em tempo útil, anomalias de origem biológica em laboratório, serão utilizados elementos pertencentes a estruturas de betão em serviço, afectados com essas anomalias. Relativamente às anomalias de origem química, a sua indução é habitualmente realizada através do contacto dos provetes com soluções previamente preparadas, sujeitando-os a ciclos de secagem-molhagem e monitorizando a evolução da anomalia ao longo do tempo [13, 15].

A carbonatação do betão resulta fundamentalmente da penetração de CO₂ na superfície de betão, levando à alteração do pH de aproximadamente 12 para valores menores. O betão sujeito a este fenómeno, quando em contacto com as armaduras, provoca a corrosão das mesmas, a qual se inicia quando o pH do betão em torno das armaduras atinge valores entre 9 e 10 [16]. Relativamente ao ataque de cloretos, a determinação da concentração do ião cloreto no betão é essencial para avaliar a necessidade de proceder à reparação em estruturas existentes, bem como verificar se os materiais usados em construções novas possuem boas condições de durabilidade. O ataque por sulfatos do betão, encontra-se entre os maiores problemas de durabilidade deste material. Actualmente, a deterioração do betão por ataque de sulfatos é a segunda maior causa de problemas de durabilidade no betão, após a corrosão das armaduras. Este tipo de ataque pode ocorrer quando exista uma fonte interna de sulfatos no betão (ISA – *internal sulfate attack*) ou uma fonte externa de sulfatos (ESA – *external sulfate*

attack). Durante muitos anos apenas se considerou como únicas formas de ataque por sulfatos a formação de gesso e de etringita. Só mais tarde foi encontrada outra forma de ataque, a taumasita. Dado que a etringita e a taumasita apresentam estruturas idênticas, não é de estranhar que tenham sido confundidas durante tanto tempo [17]. Os sulfatos mais recorrentes em estruturas de betão são o sulfato de magnésio e o sulfato de sódio. Em geral as reacções provocadas pelo ataque por sulfatos causam expansão, fissuração, descamação, amolecimento e desintegração do betão [18, 19, 20].

3.2 Métodos tradicionais de detecção

No Quadro 1, apresenta-se um resumo dos métodos tradicionalmente aplicados para a detecção, qualificação e/ou quantificação de algumas das anomalias referidas no ponto anterior, assim como os documentos normativos utilizados. Estes testes são parcialmente destrutivos, podem ser aplicados *in situ*, sendo alguns deles complementados com ensaios em laboratório.

Quadro 1. Métodos *standard* e normas.

Anomalia	Método de detecção	Norma
Colonização biológica	Inspecção visual	-
Vegetação pioneira	Inspecção visual	-
Carbonatação	Análise química – Pulverizar com indicador ácido/base (solução de fenolftaléina)	LNEC E391
Ataque de cloretos	Análise química – Medir o teor de cloretos em pó de betão extraído (<i>Rapid chloridirc test</i>)	LNEC E383 LNEC E390 ASTM C1202
Ataque de sulfatos	Análise visual – Microscópico electrónico de varrimento; Espectrometria de raio-X	ASTM C109
Humidade	Humidímetro portátil; Termografia por infravermelhos.	-
Sujidade	Inspecção visual	-
Intervenções inadequadas	Inspecção visual	-

4. ESTUDO EXPERIMENTAL E RESULTADOS PRELIMINARES

4.1 Material

Na investigação serão estudadas argamassas e betões produzidos com dois tipos de cimento: a) cimento cinzento Portland do tipo I 42.5R; e b) cimento branco do mesmo tipo. A escolha prende-se com o facto de, após desenvolvimento, calibração e validação da metodologia proposta, se pretender aplicá-la ao levantamento geométrico e patológico dos seguintes casos de estudo: a) edifício sede da Fundação Calouste Gulbenkian, em Lisboa; e b) Casa da Música, no Porto, por serem estruturas emblemáticas em betão à vista, sendo a primeira, em betão cinzento e, a segunda, em betão branco.

4.2 Equipamento

No âmbito do trabalho laboratorial a desenvolver, a geometria dos provetes produzidos será levantada com um *laser scanner Konica Minolta Vivid 910*. Este equipamento é um digitalizador 3D não invasivo que utiliza a tecnologia associada ao seccionamento da luz por um feixe *laser* para efectuar *scans* de objectos em 2.5seg, 0.5seg ou em 0.3seg, no modo *FINE*, modo *COLOR* e modo *FAST*, respectivamente. A luz reflectida pelo objecto é adquirida por uma câmara CCD e os dados 3D são então obtidos por triangulação. A existência de um espelho deslocado por um galvanómetro permite os varrimentos feitos pelo feixe *laser*, possibilitando em cada *scan* medir 640x480 pontos individuais. O equipamento possibilita a obtenção de imagens a cores recorrendo a um filtro que separa a luz

adquirida, sendo a informação também captada pelo CCD [21]. O *laser* utilizado tem um comprimento de onda de $690nm$ e pertence à classe 2 de acordo com a Norma europeia IEC60825, que define os critérios para a exposição da pele e dos tecidos à radiação óptica coerente.

4.3 Resultados preliminares

Foram realizados alguns ensaios preliminares. Utilizando um *laser scanner Konica Minolta Vivid 910*, efectuou-se o levantamento de uma superfície de betão, tratada ainda no estado fresco com jacto de água, tendo-se obtido um modelo 3D bastante pormenorizado da sua textura (Fig. 2).

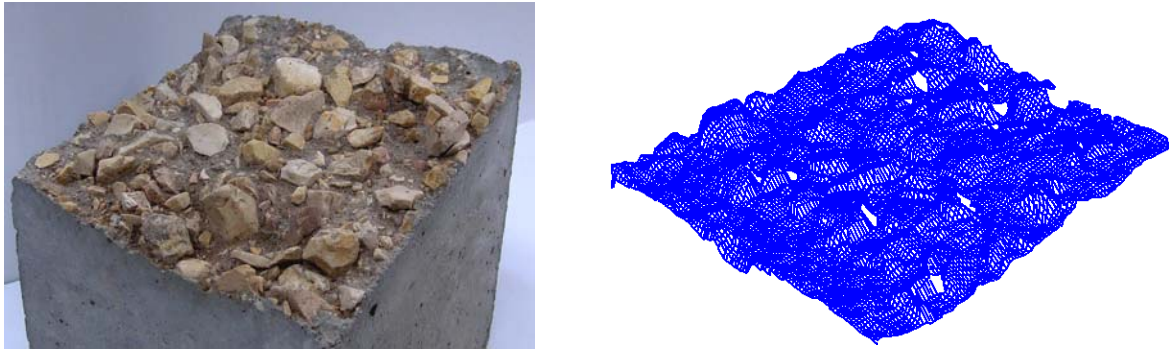


Figura 2. Levantamento geométrico com *laser scanning*. a) provete; b) modelo 3D.

Realizou-se igualmente uma análise multi-espectral de algumas imagens, no espectro visível, capturadas com uma máquina fotográfica digital *Single Lens Reflex (SLR) Nikon D200*, com uma lente com distância focal de $70mm$. As imagens foram exportadas no formato TIFF e analisadas no *software MultiSpec Application v3.1*.

A Figura 3 apresenta a imagem do elemento utilizada na análise e as suas características. A inspecção visual da imagem permite destacar duas situações relevantes em algumas áreas do elemento: colonização biológica; e presença de argamassa de reparação. Com o objectivo de estudar as potencialidades da análise multi-espectral e do *software* foram definidas três classes distintas no elemento: área com colonização biológica; áreas de betão original; e área com argamassa de reparação.



Formato do ficheiro: TIFF
Tipo de imagem: Multispectral
Band interleave format: BIS
Tipo de dados: *Integer*
Número de linhas: 1371
Número de colunas: 2048
Número de canais: 3
Número de *bytes*: 2
Número de *bits*: 16
Número de *bytes* do cabeçalho: 309324
Início das linhas: 1
Início das colunas: 1

Figura 3. Superfície de um muro de betão

Foi seleccionada uma pequena área de *pixels* relativa às três classes definidas e medida a sua resposta ou reflectância espectral nas três bandas consideradas: banda 1-vermelho; banda 2-verde; e banda 3-azul. As áreas avaliadas, assinaladas no Figura 3, correspondem aos seguintes grupos de *pixels*: a) colonização biológica – linhas 254 a 269 e colunas 352 a 368; b) betão original – linhas 311 a 323 e colunas 131 a 146; e c) argamassa de reparação – linhas 206 a 221 e colunas 1758 a 1769. No

Quadro 2, apresentam-se os valores obtidos em cada uma das bandas analisadas e, nas Figuras 4 a 6, as áreas e gráficos de resposta espectral.

Quadro 2. Resposta espectral – reflectância.

	<i>Colonização Biológica</i>	<i>Betão original</i>	<i>Argamassa de reparação</i>
<i>Banda 1 (vermelho)</i>	12.9	26.2	29.7
<i>Banda 2 (verde)</i>	12.5	28.6	30.8
<i>Banda 3 (azul)</i>	5.4	21.6	28.4

Da análise individual das três bandas conclui-se que: a) nas três bandas a área avaliada com colonização biológica é claramente diferenciada das áreas de betão original e de argamassa de reparação; b) a banda 1 e a banda 2 apresentam uma resposta semelhante para as três classes consideradas; e c) a área de argamassa de reparação tem uma resposta semelhante nas três bandas.

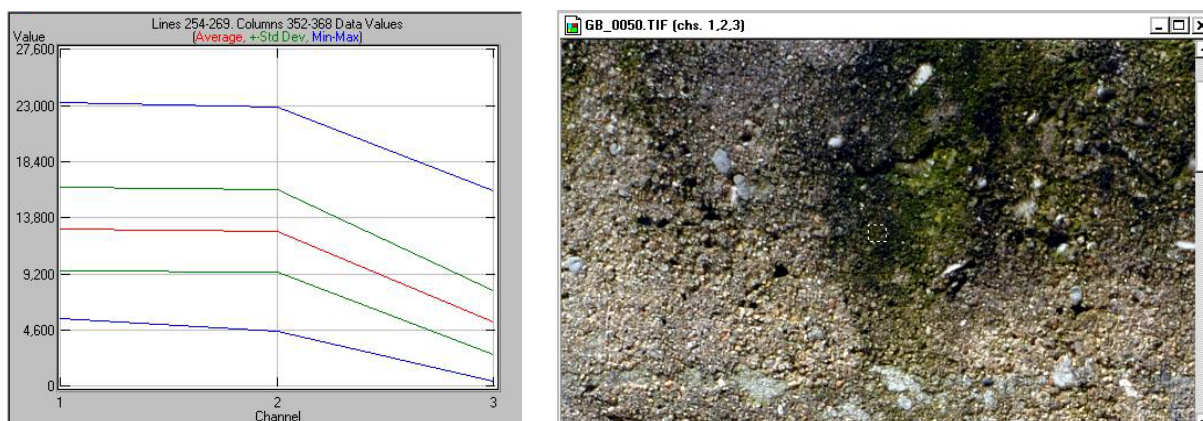


Figura 4. Resposta espectral – Colonização biológica

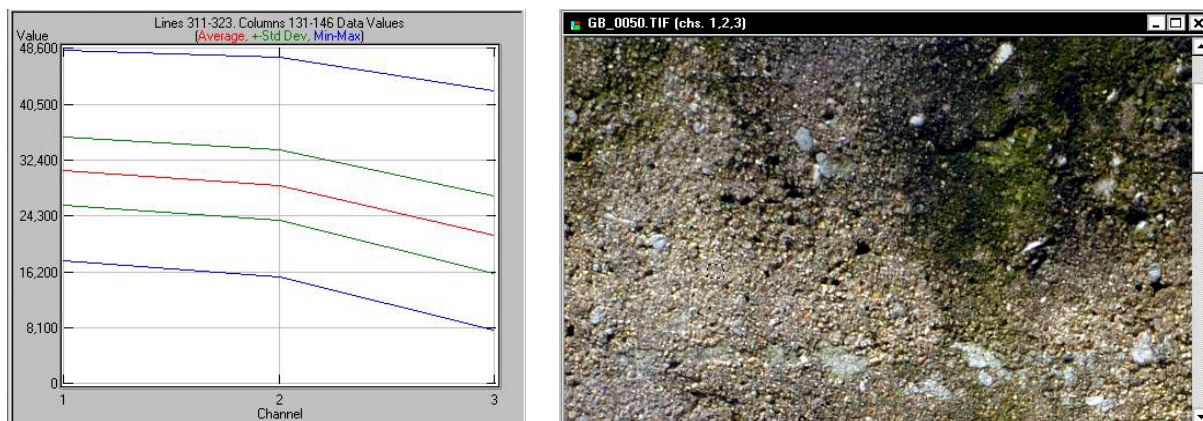


Figura 5. Resposta espectral – Betão original

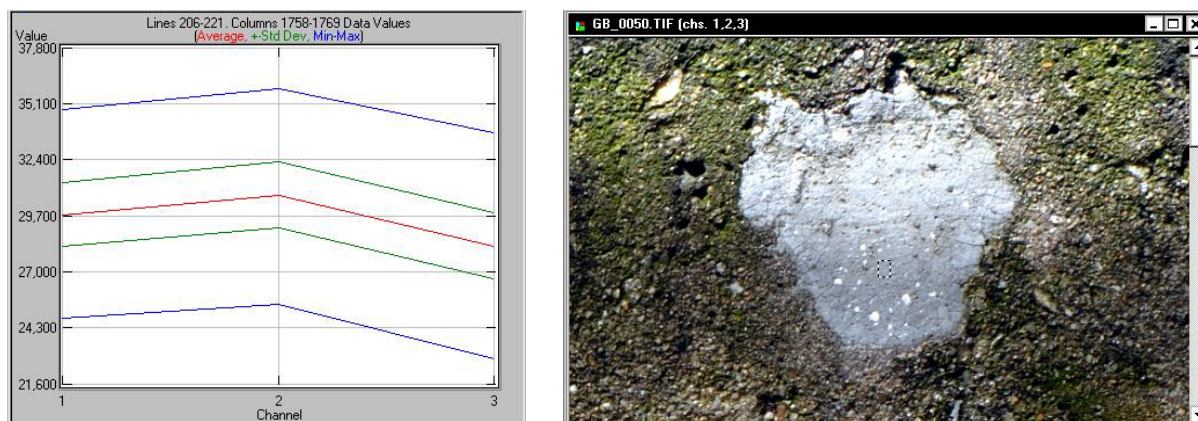


Figura 6. Resposta espectral – Argamassa de reparação

Decidiu-se efectuar uma classificação dos *pixels* por conjunto (*cluster*), ou seja, agrupar *pixels* que tenham característica em comum – *cluster analysis*. Esta divisão baseou-se numa classificação não supervisionada - *Maximum Likelihood*, efectuada com o algoritmo matemático ISODATA, ambas as opções disponibilizadas pelo *software*. Dado que se identificaram anteriormente três classes distintas no elemento de betão, realizou-se uma divisão dos *pixels* em 3 conjuntos ou classes. A distribuição das classes, realizada automaticamente pelo *software*, está em conformidade com o observado *in situ*. Após o processamento, foram quantificadas as áreas de cada classe: A colonização biológica ocupa 21.2% da área analisada; o betão original 46.7%; e as áreas reparadas 32.1 % (Fig. 7).

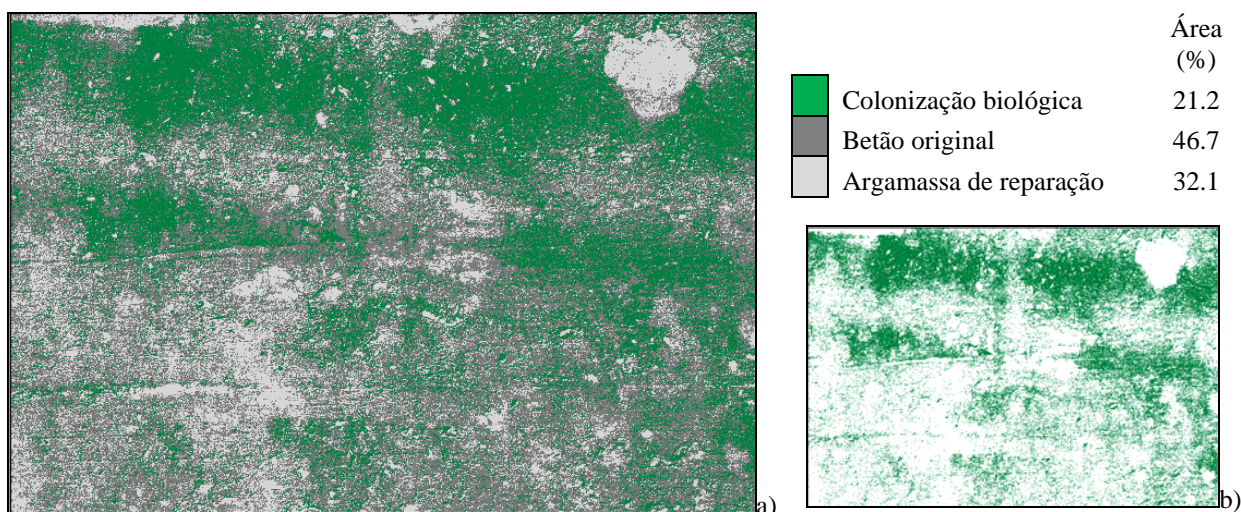


Figura 7. Análise multi-espectral. a) divisão em três classes; b) mapa da colonização biológica

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados preliminares indiciam a viabilidade do projecto de desenvolvimento de um método *in situ*, verdadeiramente não destrutivo, de levantamento geométrico rigoroso, utilizando *laser scanning*, incluindo a geração de modelos 3D *renderizados*, associado ao levantamento patológico, utilizando análise multi-espectral, com vista à detecção, identificação, qualificação, quantificação e mapeamento automático de anomalias, em estruturas de betão à vista.

A fase laboratorial que agora se inicia, compreende a execução de um número significativo de provetes de betão e argamassa, os quais serão submetidos a ensaios acelerados para produção de diferentes tipos e níveis de patologia, quantificados utilizando técnicas *standard*. Posteriormente, os corpos de prova serão utilizados para calibração das componentes de análise multi-espectral e de processamento de sinal, utilizando algoritmos baseados em redes neuronais, do método inovador que

se pretende desenvolver, associando ao levantamento por *laser-scanning* da sua geometria, o mapeamento automático das diferentes anomalias produzidas e dos respectivos níveis de degradação. Numa terceira e última fase, após calibração em laboratório, o método será testado *in situ*, em diferentes casos de estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através da bolsa de doutoramento com referência SFRH / BDE / 15660 / 2007 e à firma Eugénio Cunha & Associados, Lda (EC+A), pelo co-financiamento da mesma. Os agradecimentos são extensivos à empresa SECIL e à Fundação Calouste Gulbenkian pelo apoio financeiro e material.

REFERÊNCIAS

- [1] VALENÇA, J. [et al.] – Aplicações de fotogrametria em engenharia civil, Patorreb2006 - 2.º Encontro sobre patologias e Reabilitação de Edifícios, 20 e 21 de Março 2006, FEUP, Porto, Portugal, p.803-810.
- [2] VALENÇA, J.[et al.] – Aplicações de fotogrametria na monitorização de estruturas”, ICM2007 - A Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil, 5 de Novembro 2007, LNEC, Lisboa, Portugal, p.23-29.
- [3] HALL, D.L. – An introduction to multisensor data fusion. Proceedings of the IEEE, 85 (1), p.6-23. 1997
- [4] BERALDIN, J. – Integration of laser scanning and close range Photogrammetry - The last decade beyond: National Research Council Canada, Commission V, WG V/2, Ottawa - Canada. 2004.
- [5] LICHTI, D.; HARVEY, B. – The Effects of Reflecting Surface Material Properties on Time-of-Flight Laser Scanner Measurements, Symposium of Geospatial Theory, Processing and application. Ottawa, 2002.
- [6] FRASER, C, RIEDEL, B, – Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology, Published in ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 55 (4), p268-276. 2000.
- [7] GORDON, S. [et al] – Structural Measurement using terrestrial laser scanners, Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini - Greece. 2003.
- [8] Disponível em http://www.dpi.inpe.br/~carlos/Academicos/Cursos/Pdi/pdi_cores.html [Consult. 29 Junho. 2008].
- [9] HEMELEB, M [et al]. – Damage detection on building surfaces with multi-spectral techniques, CIPA 2005 XX International Symposium, 26 September – 01 October, Torino, Italy. 2005.
- [10] RUIZ, L. [et al] – Application of computer vision techniques to support in the restoration of historical buildings, Department of Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Polytechnical University of Valencia, Valencia, Spain.
- [11] LERMA, J. – Automatic Plotting of Architectural Facades with Multispectral Images. Journal of Surveying Engineering, Vol. 131, No. 3, American Society of Civil Engineers, August 2005.

- [12] ARITA, R.[et al] – Assessment of Concrete Degradation with Hyper-spectral Remote Sensing; 22nd Asian Conference on Remote Sensing, Singapore, 5-9 November 2001.
- [13] BARBERON, F. [et al] – Interactions between chloride and cement-past materials. Magnetic Resonance Imaging 23, p267-272, Elsevier. 2005.
- [14] ADÃO DA FONSECA, A. NUNES, A. – Betão branco: fabrico, características e utilização estrutural, 2^{as} Jornatas de estruturas de betão, Porto, 24 de Abril de 1998.
- [15] TANG, D. [et al] – The influence of chloride induce corrosion cracks on the strength confined and unconfined reinforced concrete. 12th International Conference on Structural Faults & Repair 2008, Edinburgh - Scotland, 10-12 June 2008.
- [16] COSTA, António – Durabilidade de estruturas de betão em ambiente marinho.. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 1997. Tese de Doutoramento.
- [17] PINHEIRO-ALVES, M.[et al] – Um cimento mais sustentável frente a um ataque severo por sulfatos. Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional 17 a 19 de Dezembro, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2007.
- [18] AL-DULAIJAN, S. [et al] – Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate. Cement & Concrete Composites. Elsevier Science Ltd. 2002.
- [19] VITTERY, J. [et al] – Sulfate induced deterioration of above ground components of highway structures. 12th International Conference on Structural Faults & Repair 2008, Edinburgh – Scotland, 10-12 June 2008.
- [20] AL-MOUNDI, O. – Sulfate attack and reinforcement corrosion in plain and blended cements exposed to sulfate environments. Building and Environment, Vol. 33, No. 1, pp 53-61. Elsevier Science Ltd. 1998.
- [21] <http://konicaminolta.com/products/instruments/vivid/vivid910.html> [Consult. 03 Fevereiro. 2007].
- [22] MultiSpec© Purdue Research Foundation. A Multispectral Image Data Analysis System. Disponível em <http://cobweb.ecn.purdue.edu/~biehl/MultiSpec> [Consult. 03 Fevereiro. 2008].