



Universidade de Coimbra
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Matemática

Dissertação de Mestrado em Engenharia Geográfica
2016/2017

**Modelação 3D da Barragem do Cabril
por Varrimento LASER Terrestre e Fotogrametria Digital**

*(3D Modeling of the Cabril Dam by Terrestrial LASER Scanning
and Digital Photogrammetry)*

Bruno Baeta Baptista

Orientação

Professor Doutor Gil Rito Gonçalves
Engenheiro António Berberan

Coimbra, 2017

Agradecimentos

Quero expressar o reconhecimento a todos aqueles que colaboraram, directa ou indirectamente, neste percurso académico. O meu particular agradecimento aos que mais de perto me acompanharam:

Aos orientadores deste trabalho, o Professor Doutor Gil Gonçalves e o Engenheiro António Berberan, pela disponibilidade e orientação facultadas, pelo incentivo, pelo apoio paciente e estimulante, pelas observações oportunas, pelos conselhos e conhecimentos que se revelaram essenciais ao bom desenvolvimento desta tese.

Ao LNEC, que me acolheu e disponibilizou os recursos necessários à realização do trabalho. A todos os Investigadores do Departamento de Barragens de Betão (DBB) por toda a disponibilidade e sabedoria transmitida.

À Artescan - Digitalização Tridimensional, que colocou à disposição o equipamento Laser Scanner Terrestre. Ao Engenheiro João Boavida e Engenheiro Adriano Oliveira por toda a disponibilidade e atenção que me cederam ao longo da tese.

Aos colegas de trabalho pela colaboração e experiência transmitida.

À minha família pela paciência, ânimo e força que muito ajudaram ao longo deste tempo.

“Contaram-me e esqueci ...

Vi e entendi ...

Fiz e aprendi...”

Confúcio

**Mestrado em Engenharia Geográfica – Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC)**

Nº do aluno: 1995109715

Nome: Bruno Baeta Magalhães Baptista

Título da dissertação:

**Modelação 3D da Barragem do Cabril por Varrimento LASER
Terrestre e Fotogrametria Digital**

***3D Modeling of the Cabril Dam by Terrestrial LASER Scanning and
Digital Photogrammetry***

Palavras-Chave (*Key Words*):

- Laser Scanner Terrestre
Terrestrial Laser Scanner (TLS)
- Sistemas Combinados de Imagens Terrestre
Combined Terrestrial Image System (CTIS)
- Fotogrametria
Photogrammetry
- Modelo Digital de Superfície
Surface Digital Model (SDM)
- Modelação 3D
3D Modelling;

Resumo

As grandes barragens de betão começaram a ser construídas na primeira metade do século passado. Muitas dessas estruturas têm agora mais de 50 anos e, devido ao seu envelhecimento, torna-se fundamental o controlo de segurança dessas estruturas. Estender a vida útil destas infraestruturas é também uma necessidade de rentabilização que passa igualmente pelo referido controlo.

O controlo de segurança requer programas de monitorização adequados aos tipos de estruturas. A inspeção visual é uma vantagem acrescida, tendo em conta que em muitas estruturas antigas não existem equipamentos instalados para a monitorização do seu comportamento.

Com o avanço das tecnologias LASER, como é o caso do Sistema Combinado de Imagens Terrestre (*Combined Terrestrial Imagin System*, CTIS), perspectiva-se um novo modo de inspeções visuais, designadas por inspeções visuais assistidas.

Os Laser Scanner Terrestres (*Terrestrial Laser scanner*, TLS) determinam as coordenadas de milhões de pontos em superfícies reflectivas, obtendo-se assim modelos tridimensionais dos objectos de uma maneira rápida e precisa. Acoplando ao laser *scanner* uma câmara digital, é possível integrar a informação laser com as imagens digitais.

Após processamento adequado, obtêm-se orto-imagens com a resolução adequada, úteis para a identificação e classificação de anomalias bem como para análise de deformações da estrutura.

Com os modelos tridimensionais obtidos em diferentes épocas, com cotas de albufeira e condições meteorológicas diferentes, é possível quantificar as deformações do paramento da barragem.

Este relatório descreve o estudo da aplicação dos Sistemas Combinados de Imagens Terrestres à Barragem do Cabril nas duas vertentes referidas, a aquisição de orto-imagens e a comparação de diferentes modelos tridimensionais.

Na estrutura deste relatório, estão na íntegra os dois artigos referentes às duas vertentes referidas, que foram apresentados na VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia que decorreu entre 29 e 30 de Outubro de 2015, em Lisboa.

O uso de termos anglo-saxónicos ao longo do trabalho ocorre quando, devido à falta de termos adequados em português, isso se torne necessário.

Abstract

Several large concrete dams began to be built in the first half of the last century. Many of these structures are now over than 50 years old and the security control of these structures becomes fundamental. This control is fundamental for the maintenance of the structure and to understand these infrastructures behaviour.

Security control requires monitoring programs in accordance with the types of structures. The visual inspection is an added advantage, considering that in many old structures there are no installed equipment's to monitor their behaviour.

With the development of LASER technologies, such as the Combined Terrestrial Imaging System (CTIS), it is expected a new mode of visual inspection, called visual assisted inspections.

On reflective surfaces the Terrestrial Laser Scanner (TLS) gets the coordinates of millions of points used to model 3D objects in a fast and precise way. By attaching a digital camera to the laser scanner, it is also possible to integrate the laser data with the digital images.

After processing the data from the CTIS, orthoimages with adequate resolution are acquired and are useful for the identification and classification of anomalies as well as, for the analysis of structure deformations.

With three-dimensional models obtained at different epoch, with different water level and different environmental conditions, it is possible to quantify the deformations of the dam.

This report describes the study of the application of the CTIS in the Cabril dam in the two mentioned aspects, the processing of orthoimages and the evaluation of the three-dimensional models.

In the structure of this report there are included two papers of the two mentioned aspects that were presented at the “*VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*” that took place between 29th and 30th of October of 2015 in Lisbon.

The use of Anglo-Saxon terms in this work occurs when necessary.

Índice Geral

Agradecimentos	i
Resumo	iv
Abstract.....	v
Índice Geral	vi
Índice de Figuras	viii
Índice de Quadros.....	ix
Lista de Siglas, Acrónimos e Abreviaturas	x
1. Introdução	1
2. Objectivos	2
3. Fundamentos de Fotogrametria Digital, Varrimento Laser e Modelação 3D.....	3
3.1. Fotogrametria digital	3
3.2. Varrimento Laser Terrestre	5
3.3. Modelação Tridimensional	6
4. Combinação da Fotogrametria Digital e dos Sistemas de Varrimento Laser Terrestre na inspecção visual assistida de barragens de betão: o caso da barragem do Cabril.....	7
4.1. Introdução	8
4.2. Princípios básicos de funcionamento dos sensores e sua combinação	9
4.2.1. Sensor Laser	9
4.2.2. Sensor fotográfico.....	9
4.2.3. Combinação dos sensores	10
4.3. Especificações técnicas	10
4.4. Aquisição e processamento de dados	11
4.4.1. Fases do processamento	11
4.4.1.1. Filtragem de dados	12
4.4.1.2. Reamostragem	12
4.4.2. Documentos de engenharia.....	12
4.4.2.1. Engenharia Inversa e Modelação 3D.....	13
4.4.2.2. Orto-Imagens.....	14
4.4.3. Análise da Exactidão	15
4.5. Investigação e Desenvolvimento	16
4.6. Conclusões	18
4.7. Agradecimentos	18
4.8. Referências Bibliográficas.....	18

5. Modelação 3D da deformação da barragem do Cabril recorrendo a Sistemas de Varrimento Laser Terrestre	20
5.1. Introdução	21
5.2. Princípios básicos de funcionamento dos SVLT	22
5.3. Especificações técnicas	23
5.4. Aquisição e processamento de dados	24
5.4.1. Aquisição de dados	24
5.4.2. Fases do processamento	25
5.4.2.1. Filtragem de dados	26
5.4.2.2. Reamostragem	26
5.4.2.3. Modelação tridimensional	26
5.4.3. Análise da deformação	27
5.4.4. Análise da Exactidão	29
5.5. Conclusões	30
5.6. Agradecimentos	30
5.7. Referências Bibliográficas.....	30
6. Conclusões Finais	32
7. Bibliografia	33
Anexo A: Pormenor da zona de estudo	A
Anexo B: Características da Barragem do Cabril	B
Anexo C: Características do Laser Scan Riegl VZ400	C
Anexo D: Características da Câmara Fotográfica Nikon D300	D

Índice de Figuras

Figura 1 – Vista geral do paramento de jusante da Barragem do Cabril.....	1
Figura 2 – Nuvem de Pontos do paramento da barragem do Cabril.....	13
Figura 3 – Diferentes representações do mesmo modelo 3D.....	14
Figura 4 – Orto-imagem do paramento jusante da barragem do Cabril.....	14
Figura 5 – Orto-imagem de alta resolução do paramento jusante da barragem do Cabril.	15
Figura 6 – Pontos materializados no paramento jusante da barragem.....	15
Figura 7 – Mapeamento de deteriorações com base numa orto-imagem.....	16
Figura 8 – Sistema de gestão da informação “GestBarragens”.....	17
Figura 9 – Cálculo teórico por Interpretação quantitativa da deformação.....	23
Figura 10 – Nuvem de Ponto da barragem do Cabril.....	24
Figura 11 – Fluxograma das fases do processamento.	25
Figura 12 – Pormenor do paramento de jusante da barragem do Cabril.....	27
Figura 13 – Resultados da comparação das duas campanhas do SVLT.	28
Figura 14 – Pormenor da comparação das duas campanhas.	28
Figura 15 – Diferenças ente deslocamentos geodésicos e deslocamentos SVLT.....	29

Índice de Quadros

Quadro 1 – Espaçamento entre pontos da nuvem Laser e resolução da imagem digital.....	11
Quadro 2 – Comparação das coordenadas do modelo 3D com as coordenadas dos métodos geodésico.....	15
Quadro 3 – Densidade (ρ) da nuvem de pontos Laser em pts/cm ² ..	23
Quadro 4 – Principais características do trabalho de campo com o SVLT.....	24

Lista de Siglas, Acrónimos e Abreviaturas

- 2D - Bidimensional;
- 3D - Tridimensional;
- ASCII - *American Standard Code for Information Interchange*;
- CAD - *Computer Assisted Drafting*;
- CCD - *Charge Coupled Device*;
- CM - Centímetro;
- CTIS - *Combined Terrestrial Imaging Systems*;
- DBB - Departamento de Barragens de Betão;
- EDP - Energias de Portugal;
- FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra;
- ICOLD - *International Commission On Large Dams*;
- LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*;
- LIDAR - *Light Detection and Ranging*;
- LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil;
- M - Metro;
- MM - Milímetro;
- OBJ - *Object File Format* (Extensão de ficheiro);
- PDF - *Portable Document Format* (Extensão de ficheiro);
- PIXEL - *Picture (PIX) Element*;
- PPM - Partes por milhão;
- RGB - *Red, Green, Blue*;
- SDM - *Surface Digital Model* (MDS – Modelo Digital de Superfície);
- SVLT - Sistemas de Varrimento Laser Terrestre;
- TIN - *Triangular Irregular Network*;
- TLS - *Terrestrial Laser Scanner*;
- VRML - *Virtual Reality Modeling Language* (Extensão de ficheiro WRL).

1. Introdução

Como dissertação de mestrado, este documento foi elaborado por Bruno Baeta Magalhães Baptista, aluno finalista do mestrado em Engenharia Geográfica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC) e foi orientado pelo Professor Doutor Gil Gonçalves da FCTUC e pelo Engenheiro António Berberan, Investigador Auxiliar no Departamento de Barragens de Betão (DBB) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

O trabalho decorreu no Departamento de Barragens de Betão (DBB) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Lisboa, ao longo do ano de 2010. O LNEC, que é uma instituição de Ciência e Tecnologia e que exerce a sua actividade nos múltiplos domínios da Engenharia Civil e áreas afins, proporcionou a realização deste estudo pela disponibilização dos recursos necessários. O DBB é uma das 10 unidades departamentais do LNEC e é vocacionado para o estudo do comportamento de grandes barragens de betão e obras subterrâneas anexas. No DBB promove-se a utilização de sistemas combinados terrestres de captação de imagens para apoio às inspecções visuais, visando codificar em ambiente electrónico a informação tipicamente levantada durante as inspecções visuais tradicionais tornando esta actividade mais objectiva, rápida, económica e fiável.

O objecto de estudo foi a Barragem do Cabril (Figura 1), cuja construção terminou em 1954. Fica situada no rio Zêzere, concelho da Sertã, distrito de Castelo Branco (no Anexo A encontra-se o pormenor da zona de estudo). É uma das maiores barragens portuguesas e origina uma das maiores reservas de água doce do país, de 615 000 000 m³, sendo a sua utilização exclusiva para a produção de energia. Esta é uma barragem de abóbada com dupla curvatura, tem um coroamento à cota 297 m com 290 m de comprimento e uma altura máxima de 132 metros acima da fundação que é constituída por granito (no Anexo B encontram-se outras características da barragem).



Figura 1 – Vista geral do paramento de jusante da Barragem do Cabril.

2. Objectivos

Este estudo tem dois objectivos principais: a modelação tridimensional da deformação do paramento de jusante da barragem e a geração de imagens com qualidades métricas.

Para a modelação da deformação, foram feitas duas coberturas do paramento da barragem do Cabril com o laser *scanner Riegl VZ400* (no Anexo C encontram-se as características deste equipamento), para se poder analisar a deformação geométrica entre as duas épocas, uma em Março com cota de albufeira nos 294,5 m e a segunda em Agosto com cota de albufeira de 272,6 metros. A partir das nuvens de pontos recolhidas, obtiveram-se modelos tridimensionais úteis para este tipo de análise geométrica.

Para a obtenção de imagens digitais, foi utilizada uma câmara fotográfica digital Nikon D300 (no Anexo D encontram-se as características desta câmara) com lentes de 20 mm, 180 mm e 300 mm de distância focal. A obtenção de imagens com qualidade métricas, ortoimagens e imagens do desenvolvimento cilíndrico do paramento, é feita através do Sistema Combinado de Imagens Terrestre (CTIS). Estas ortoimagens são úteis para auxiliar a inspecção visual, permitindo identificar, vectorizar e analisar as deteriorações existentes no betão da barragem.

A problemática deste estudo situa-se na segurança, pelo que a monitorização das barragens de betão é fundamental para a avaliação das condições de segurança estrutural e ampliação do conhecimento do comportamento estrutural deste tipo de obras.

Monitorizar este tipo de barragens envolve várias actividades, nomeadamente: um plano de monitorização e a sua execução; a instalação de equipamentos de monitorização; a recolha de dados desses equipamentos em intervalos de tempo preestabelecidos; a conversão dos dados em quantidades que façam sentido do ponto de vista da engenharia e interpretação dessas quantidades; a comparação dos dados recolhidos com dados anteriores; a inspecção visual da barragem e a emissão de um relatório de segurança, [Berberan *et al.*, 2007].

Um plano de monitorização estabelece as quantidades observáveis a analisar, a par dos instrumentos a instalar para medir essas quantidades. Simultaneamente, o plano deve definir a localização dos equipamentos, os respectivos procedimentos de observação e a frequência com que esta é efectuada. Estes factores dependem da idade da barragem, acontecimentos extremos, acções externas, condições de conservação, tecnologias disponíveis, entre outras [Berberan *et al.*, 2007]. No entanto, existem aspectos da maior importância só detectáveis por inspecção visual, como por exemplo a fissuração do betão e a eventual existência de exsudações de diversos tipos a ela associadas, a verificação do estado das juntas de contracção, as infiltrações pelo corpo da estrutura, as ressurgências no maciço a jusante, entre outras [Ramos, 2004].

A motivação para a execução deste trabalho foi a perspectiva de contribuir com o estudo feito, para o aperfeiçoamento dos métodos aplicados nas inspecções visuais e para os sistemas de monitorização de grandes barragens de betão.

3. Fundamentos de Fotogrametria Digital, Varrimento Laser e Modelação 3D

3.1. Fotogrametria digital

O objectivo principal de uma medição fotogramétrica é a reconstrução tridimensional de um objecto em forma digital (coordenadas e elementos geométricos) ou forma gráfica (imagens, desenhos, mapas). A fotogrametria engloba métodos de medição e interpretação de imagens para determinar a forma e a localização espacial de um objecto a partir de uma ou mais fotografias desse objecto. Em princípio, os métodos fotogramétricos podem ser aplicados em qualquer situação em que o objecto de estudo possa ser registado fotograficamente [Luhmann *et al.*, 2006].

Segundo o mesmo autor, com o desenvolvimento de sistemas de imagem digital e processamento os procedimentos fotogramétricos mudaram significativamente. O processamento fotogramétrico pode ser executado rapidamente, utilizando pontos objecto apropriadamente identificados e fazendo o registo digital de imagens. Uma análise totalmente automática dos pontos objecto substitui os procedimentos manuais de orientação e medição. Os instrumentos de medição fotogramétricos especiais não serão mais necessários e serão substituídos por equipamentos de computação gráfica. O elevado grau de automatização permite também a utilizadores não especializados realizar o registo fotogramétrico e a avaliação dos dados [Luhmann *et al.*, 2006].

A aquisição de imagens é um dos processos fundamentais para a fotogrametria e para os trabalhos de Laser Scanner. As imagens do objecto de interesse devem ser capturadas e armazenadas de modo a permitir o processamento com transformações fotogramétricas, sendo então possível realizar medições no espaço imagem e determinar características ou dimensões do objecto [Luhmann *et al.*, 2006].

Para o processamento fotogramétrico, as características de câmara são descritas por parâmetros intrínsecos, por parâmetros de orientação interna e orientação externa. Os parâmetros intrínsecos dizem respeito ao sensor CCD (*Charge Coupled Device*), nomeadamente: número de pixéis no eixo das abcissas (N_x); número de pixéis no eixo das ordenadas (N_y); dimensões do pixel (dx , dy) e consequentemente o tamanho físico do CCD em milímetros. Estes parâmetros são normalmente fornecidos pelo fabricante da câmara. Os parâmetros da calibração interna definem a posição que a imagem toma dentro da câmara no momento da exposição.

Apoiando-nos em Linder [2003], sabemos que utilizando os valores obtidos no processo de calibração (distorção radial e tangencial da objectiva, distância focal e posição do ponto principal) e utilizando os valores obtidos no processo de orientação interna da câmara fotográfica (ou das imagens / fotografias), é possível realizar operações que têm como objectivo reconstruir os feixes captados em perspectiva, nas condições semelhantes à sua formação dentro da câmara fotográfica. Na orientação interna podemos também reduzir os erros decorrentes do uso de câmaras fotográficas não-métricas [Linder, 2003].

As distorções das lentes provocam o deslocamento da posição dos pontos imagem das suas posições reais. As equações que são utilizadas para modelar as distorções das lentes englobam habitualmente duas componentes: as distorções radiais e as distorções descentradas.

Em geral, o relatório de calibração da câmara fornece os coeficientes polinomiais para a distorção radial simétrica das lentes ($\kappa_0, \kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4$), os coeficientes das distorções descentradas ($\rho_0, \rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$) e ainda as coordenadas do ponto principal (x_0, y_0). Assim, as coordenadas imagem corrigidas das distorções das lentes (x_c, y_c) são obtidas com base nas equações abaixo definidas por *Wolf e Dewitt* [2000].

Equação (1):

$$\begin{cases} x_c = \bar{x} + \delta x + \Delta x \\ y_c = \bar{y} + \delta y + \Delta y \end{cases}$$

Onde:

Equação (1.1) $r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$

Equação (1.2) $\bar{x} = x - x_0$

Equação (1.3) $\delta x = \bar{x}(k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + k_4 r^8)$

Equação (1.4) $\Delta x = (1 + p_3 r^2 + p_4 r^4)[p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x}\bar{y}]$

Equação (1.5) $\bar{y} = y - y_0$

Equação (1.6) $\delta y = \bar{y}(k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + k_4 r^8)$

Equação (1.7) $\Delta y = (1 + p_3 r^2 + p_4 r^4)[p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2p_1 \bar{x}\bar{y}]$

As distorções radiais simétricas das lentes são inevitáveis e resultam da construção das lentes, apesar de nos dias de hoje ser possível reduzi-las a um valor muito pequeno. Por outro lado, as distorções descentradas das lentes resultam da construção imperfeita das lentes e não da sua idealização teórica.

Na orientação externa da câmara fotográfica (ou das imagens / fotografias) os feixes gerados no processo de orientação interna são posicionados em relação ao objecto na mesma posição adoptada no momento da exposição das fotografias. Definimos orientação externa de uma câmara (ou fotografia / imagem), como a operação que se executa para a determinação dos parâmetros que posicionam, no espaço objecto, terrestre ou cartográfico, a referida câmara. Analiticamente esta operação fica determinada pelo conhecimento das coordenadas do centro de projecção (X_0, Y_0, Z_0) e pela atitude angular do eixo óptico da câmara, a qual é definida pelos ângulos ω, ϕ e κ . As equações que permitem estabelecer a orientação externa de uma fotografia podem ser derivadas das equações de colinearidade.

As equações de colinearidade expressam (independentemente da posição que a câmara tenha assumido no espaço) o raio luminoso que teoricamente descreve uma recta, entre o ponto objecto $P(X, Y, Z)$, Centro de Projecção (CP) e o Ponto Imagem $p(x', y', 0)$.

As equações de colinearidade são deduzidas com base no princípio de colinearidade e podem ser expressas em ordem às coordenadas fotográficas ou em ordem às coordenadas objecto [Redweik, 2004]. O princípio de colinearidade é desenvolvido no capítulo “4.2.3. Combinação dos sensores”.

De acordo com a formulação fundamental da fotogrametria, nomeadamente as equações de colinearidade (Equação 2 no capítulo 4.2.3.), é possível obter os valores RGB (*Red, Green, Blue*) das imagens (obtidas pela câmara) para cada ponto das coordenadas determinadas pelo TLS (*Terrestrial Laser Scanner*), sendo assim possível a fusão dos dados de ambos os sensores, dando lugar a registos do tipo (x, y, z, I, R, G, B) , onde o “xyz” localizam os pontos no espaço, o “I” representa a intensidade de reflectância do feixe Laser e o RGB a combinação das cores primárias vermelho, verde e azul que permitem a composição de diferentes cores e tons. Para o efeito é necessário o uso dos parâmetros de calibração da câmara e da excentricidade (*offset*) da câmara digital em relação ao TLS [Berberan *et al.*, 2006].

3.2. Varrimento Laser Terrestre

O princípio de operação do sistema laser *scanner* é bastante simples. Os feixes laser são gerados e emitidos pelo sistema, e com o auxílio de um espelho rotativo, são direccionados atingindo a superfície do objecto em vários pontos. O objecto reflecte o feixe laser incidente e parte do feixe volta para o sistema. É possível assim determinar a distância entre o sensor e o objecto através do intervalo de tempo entre a emissão e a recepção (retorno) do feixe laser.

A cada posição do scan é recolhida uma densa nuvem de pontos referenciada no seu sistema de coordenadas independentes. As obstruções normalmente levam a que se faça o scan de posições (atitudes) diferentes e, para obter um modelo completo do objecto em estudo é necessário concatenar as várias nuvens numa só nuvem de pontos. À medida que cada nuvem é referenciada num sistema instrumental independente é necessário encontrar os parâmetros tridimensionais de transformação, que relacionam cada sistema de referência independente com um comum, o sistema cartesiano (X, Y, Z) relacionado com o objecto.

É possível, usando técnicas de correlação de formas, encontrar os parâmetros de transformação entre várias nuvens, desde que elas tenham uma cobertura do objecto suficientemente sobreposta. No entanto, para transformar os dados num sistema de referência conhecido, é necessário a identificação de pontos de controlo e uma estimativa dos parâmetros de transformação [Mills e Barber, 2004]. Após este procedimento obtém-se uma única nuvem de pontos composta por um conjunto de pontos muito denso que cobre a totalidade do objecto em estudo, ligado a um sistema de coordenadas de referência. Estas representações numéricas XYZ da superfície do objecto, apesar da sua natureza discreta, podem ser consideradas contínuas para quase todas as aplicações práticas, desde que a resolução espacial seja suficientemente alta.

Desde que a calibração interna da câmara tenha sido efectuada (e a câmara seja dimensionalmente estável no que concerne à formação de imagem) e os parâmetros de orientação externa tenham sido determinados para cada imagem, os pontos de coordenadas XYZ registados pelo laser *scanner* podem ser associados com os seus valores RGB através da formulação fundamental da fotogrametria.

A fusão destes dois tipos de dados leva a um conjunto muito denso de pontos cujos valores XYZRGB são conhecidos e obtém-se um modelo geométrico texturizado – uma imagem tridimensional. Em termos práticos, obtém-se um modelo contínuo com qualidades métricas e informação pictórica.

3.3. Modelação Tridimensional

A modelação tridimensional é o processo de desenvolvimento de uma representação matemática de qualquer superfície tridimensional de um objecto. Estas operações tiveram uma evolução considerável com o desenvolvimento tecnológico das áreas computacionais, permitindo desenvolver modelos tridimensionais muito aproximados da realidade.

Das nuvens de pontos recolhidas pelo TLS (formato discreto de informação geométrica) pretende-se fazer a modelação tridimensional dos pontos em superfícies contínuas, com formas paramétricas. Executam-se um conjunto de operações onde se pretende a definição da geometria dos objectos ou a modelação dos objectos. A modelação geométrica de objectos integra propriedades como o volume, a massa, a cor, a textura e o acabamento de superfícies, características que estão intimamente relacionadas com a geometria dos objectos.

A modelação geométrica de sólidos tem assim que corresponder a necessidades várias que dependem dos fins em vista. Esta diversidade conduziu ao aparecimento de tipos variados e específicos de representação para a modelação de sólidos, em que cada tipo pretende responder aos requisitos de um certo objectivo.

Após a correcta edição dos dados procede-se à modelação tridimensional de objectos, pela geração de uma TIN (*Triangular Irregular Network*), que é um modelo 3D contínuo, um produto intermédio entre a nuvem de pontos e os produtos finais, e que é obtida por uma triangulação de *Delaunay* numa representação paramétrica da superfície do paramento. Igualmente pode-se gerar a representação de objectos por meio de “*Mesh*”, que é um conjunto de vértices, arestas e faces que descrevem a forma de um objecto 3D. A partir destas representações, ou mesmo directamente da nuvem de pontos, pode fazer-se a representação de objectos por superfícies paramétricas, sólidos e superfícies contínuas com geometria e definições matemáticas.

Os fundamentos teóricos descritos para a Fotogrametria Digital, para o Varrimento Laser Terrestre e para a Modelação Tridimensional estão aprofundados, pela sua aplicação prática, nos dois trabalhos apresentados nos capítulos seguintes.

4. Combinação da Fotogrametria Digital e dos Sistemas de Varrimento Laser Terrestre na inspecção visual assistida de barragens de betão: o caso da barragem do Cabril

Bruno BAETA BAPTISTA ^{1,*}, Gil GONÇALVES ^{1,2} e António BERBERAN ³

¹ Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Coimbra

² Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores - Coimbra

³ Consultor de modelação e monitorização - Lisboa

(¹ baetabruno@gmail.com; ^{1,2} gil@mat.uc.pt; ³ berberan@epoch-suite.com)

Palavras-chave: Laser *Scanner* Terrestre, Sistemas Combinados de Imagens Terrestres, Fotogrametria, Modelação 3D, Modelo Digital de Superfície, Orto-Imagens de alta resolução, Inspeção Visual Assistida.

Resumo: As grandes barragens de betão, que começaram a ser construídas na primeira metade do último século, têm agora mais de 50 anos. Dado o seu envelhecimento torna-se fundamental a monitorização dessas estruturas. A inspeção visual é uma mais-valia, tendo em conta que em muitas estruturas antigas não existem equipamentos instalados para a monitorização e avaliação da sua segurança.

Os Sistemas de Varrimento Laser Terrestres (SVLT) permitem obter de forma rápida, suficientemente precisa e exacta, modelos tridimensionais de superfícies reflectivas. Acoplando ao digitalizador LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) um sistema de imageamento (câmara fotográfica digital), é possível combinar os dados Laser com as imagens digitais. Com a integração destes dois sistemas num único sistema, perspectiva-se um novo modo de inspeções visuais, designadas por inspeções visuais assistidas.

Neste artigo é apresentada uma metodologia que combina a Fotogrametria Digital com os SVLT na inspeção visual assistida de barragens, nomeadamente a sua aplicação ao paramento jusante da Barragem do Cabril. Após o adequado processamento fotogramétrico, são produzidas orto-imagens com exactidão de 3 cm e resolução espacial variando entre 3-10 mm, adequadas para a identificação, classificação e arquivo de anomalias bem como na análise de deformação da estrutura. Os resultados obtidos mostram que na inspeção visual de barragens de betão, esta combinação de tecnologias constitui uma ferramenta adequada, relativamente aos métodos tradicionais, em termos de custos e tempos de produção.

4.1. Introdução

Os SVLT permitem criar modelos tridimensionais de objectos a baixo custo e com adequada precisão e exactidão geométrica. Obtêm-se modelos densos, compostos por milhões de pontos cujas coordenadas são recolhidas a frequências que podem atingir 1 milhão de pontos por segundo. Se anexarmos uma câmara fotográfica digital, co registada no sistema de coordenadas do SVLT é possível enriquecer o modelo geométrico com informação pictórica (em geral com as componentes RGB da luz solar).

A fusão da informação geométrica e radiométrica, que provêm respectivamente do digitalizador (*scanner*) Laser terrestre e da câmara fotográfica, dá origem ao que podemos chamar de uma fotografia 3D com qualidades métricas. Estes modelos foto-realísticos de objectos podem ser explorados das mais variadas formas pelos responsáveis da exploração e segurança das grandes barragens.

No âmbito da engenharia aplicada a barragens, os resultados obtidos após o processamento dos dados provenientes da combinação entre os SVLT com as câmaras fotográficas, podem ser utilizados em diversas fases do ciclo de vida de uma barragem. A quantidade sem precedentes de informação geométrica e radiométrica pode ser utilizada, por exemplo, somente para registo de informação das fundações, para o caso de estas terem que ser revistas após a construção da barragem, ou para mapear e acompanhar a evolução de deteriorações visíveis provenientes do envelhecimento da estrutura. Também, sistemas de engenharia inversa podem ser fácil e rapidamente desenvolvidos com o intuito de gerar modelos tridimensionais CAD (*Computer Aided Design*) tendo em mente a renovação e manutenção das barragens cujos documentos tenham sido perdidos ou estejam muito desactualizados.

Este trabalho descreve a combinação desta tecnologia de multisensores para a obtenção de imagens de alta resolução do paramento de jusante da Barragem do Cabril. O trabalho foi requerido pela EDP (Energias de Portugal) e produzido pela empresa Artescan, tendo sido o LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) contratado como consultor. Este estudo iniciou-se com os trabalhos de campo em Março de 2010 e terminou em Janeiro de 2011 com os processamentos finais. A barragem do Cabril foi construída em 1954, no Rio Zêzere, para produção de energia eléctrica. O seu paramento é uma abóbada com dupla curvatura, tem uma altura máxima acima da fundação de 132 metros e o coroamento tem um desenvolvimento de 290 metros.

Após esta secção introdutória, faz-se uma breve descrição da tecnologia dos sistemas de varrimento Laser e das câmaras fotográficas. Tendo em conta a enorme quantidade de informação que é recolhida numa rápida operação de campo, algumas especificações devem ser aclaradas antes da fase de aquisição de dados. Estas especificações serão descritas no terceiro capítulo. O ponto quarto deste trabalho descreve as diferentes fases do processamento, bem como alguns exemplos de produtos 2D provenientes destas tecnologias. Serão também enumerados alguns exemplos de produtos 3D que só poderão ser explorados na sua totalidade recorrendo a meios de visualização electrónica. Estes produtos terão diferentes aplicações em diversas áreas da engenharia. No ponto 5 são descritas algumas das necessidades de investigação e desenvolvimento com base na experiência adquirida em processos de combinação da fotogrametria digital com os SVLT. Por fim, no ponto 6 são referidas as principais conclusões quanto à aplicabilidade do método utilizado.

4.2. Princípios básicos de funcionamento dos sensores e sua combinação

Dado que os SVLT são plataformas multisensores, os sensores Laser e fotográfico serão abordados de forma breve em parágrafos distintos. O leitor poderá encontrar em *Shan, J. e Toth, C. K. [2008]* e *Luhmann et al. [2006]* uma descrição mais aprofundada dos fundamentos teóricos utilizados pelos sistemas.

4.2.1. Sensor Laser

Os sensores Laser emitem radiação electromagnética, geralmente luz monocromática visível, que se difunde no espaço com grande coerência e que tem um grau de divergência muito reduzido. O digitalizador Laser ao emitir impulsos, com elevada potência, consegue calcular a distância ao ponto objecto P, pelo tempo que o impulso leva a percorrer o trajecto entre a componente emissora e o objecto e o regresso novamente à componente emissora.

O digitalizador Laser ao emitir o feixe, incrementa mecanicamente um desvio angular, decomposto em ângulo vertical e ângulo horizontal. Isto significa, que para cada impulso emitido e reflectido, obtém-se, para além da intensidade do impulso reflectido (I), as coordenadas tridimensionais polares do ponto de reflexão. Estas coordenadas polares podem ser transformadas num sistema cartesiano de coordenadas associadas ao instrumento. Depois desta transformação, obtém-se uma nuvem de pontos com coordenadas 3D instrumentais registadas com o respectivo valor da intensidade de reflectância, isto é, para cada ponto, as ordenadas (x, y, z, I) . As coordenadas instrumentais referidas podem ser convertidas para um sistema de referência objecto quer por referenciação indirecta, via pontos de controlo, ou por referenciação directa, se o SVLT possuir capacidades de posicionamento ou de orientação. Obtém-se então uma nova matriz de transformação que permite fazer a relação entre as coordenadas instrumento (x, y, z) e as coordenadas objecto (X, Y, Z) . [Lerma *et al.*, 2008]. Como os SVLT utilizam sensores activos, podem ser utilizados sem luz externa e consegue-se criar um mapa de intensidades (I) que se vai assemelhar a uma fotografia monocromática.

4.2.2. Sensor fotográfico

O sensor de uma câmara fotográfica, com os elementos organizados numa matriz pode captar, por meio de um sistema de lentes, radiométrica e espacialmente um objecto e discretizá-lo de diversas maneiras. A imagem digital 2D obtida é um ficheiro com os valores de intensidade da cor vermelha, da verde e da azul, de um cenário representado em *pixéis* organizados em i linhas e j colunas da matriz do sensor, ou seja cada pixel terá as coordenadas (i, j) e os atributos (R, G, B) . As câmaras digitais incorporadas nos SVLT estão em geral calibradas, conhecendo-se previamente os efeitos $(\delta i, \delta j)$ das distorções geométricas existentes no sistema de lentes, assim como os parâmetros de transformação que relacionam as coordenadas matriciais (i, j) com as foto-coordenadas (u, v) .

4.2.3. Combinação dos sensores

A partir de uma orto-imagem digital, representada analiticamente por uma função do tipo:

$$G(i,j) = (g_r(i,j), g_g(i,j), g_b(i,j)) \quad (\text{Equação 2})$$

onde g_r , g_g e g_b são funções discretas das três intensidades (vermelho, verde e azul) do comprimento de onda da parte visível do espectro electromagnético, e utilizando as equações de colinearidade, dadas na forma mais simples por:

$$u = c \frac{r_{11}\Delta X + r_{12}\Delta Y + r_{13}\Delta Z}{r_{31}\Delta X + r_{32}\Delta Y + r_{33}\Delta Z} \quad v = c \frac{r_{21}\Delta X + r_{22}\Delta Y + r_{23}\Delta Z}{r_{31}\Delta X + r_{32}\Delta Y + r_{33}\Delta Z} \quad (\text{Equação 3})$$

onde u e v são foto-coordenadas, c é a distância focal, r são os nove elementos de uma matriz tridimensional de rotação que relaciona as coordenadas da fotografia com as do objecto, e ΔX , ΔY e ΔZ são as três componentes de um vector conhecido que liga a origem das foto-coordenadas ao ponto P no objecto. Obtém-se uma nuvem de pontos texturizada, representada por uma função do tipo:

$$G(X,Y,Z) = (g_r(X,Y,Z), g_g(X,Y,Z), g_b(X,Y,Z)) \quad (\text{Equação 4})$$

Com base na equação (4), poderemos obter a nuvem de pontos não estruturada num ficheiro (binário ou ASCII) com uma organização do tipo (X, Y, Z, R, G, B, I).

4.3. Especificações técnicas

O volume de informação a recolher num curto espaço de tempo requer especificações técnicas detalhadas, da parte do consumidor da informação, e um planeamento cuidadoso, do lado do produtor. Os objectivos das especificações consistem em: estabelecer parâmetros de qualidade adequados ao trabalho, definir critérios de rejeição ou de aceitação, permitir a comparação entre épocas distintas e homogeneizar suportes e formatos de dados a fim de migrar dados entre utilizadores, plataformas, redes, aplicativos e *software*. Os itens a especificar deverão incluir os metadados, a área e o objecto de interesse, as restrições da operação, o sistema de coordenadas e a sua materialização, restrições electrónicas nos métodos de processamento de dados, resolução cronológica (se, para efeitos de monitorização), resolução espacial e resolução radiométrica, alcance mínimo e máxima divergência do feixe Laser, bem como outras especificações técnicas do equipamento, calibração e procedimentos de referenciação, controle de qualidade e entregas de produtos finais. Porque o sensor Laser pode ser biologicamente nocivo, a classe do Laser deve ser referida. O prestador de serviços deve fornecer ao utilizador de dados os *softwares* de visualização apropriados para documentos 3D de engenharia que só podem ser vistos em computadores.

A forma de um objecto pode ser detectada numa nuvem de pontos e o detalhe do objecto pode ser identificado numa imagem, dependendo do espaçamento entre pontos (ou densidade) e da resolução da imagem, respectivamente. No Quadro 1, encontram-se os valores que podem ser definidos para alcançar os resultados desejados.

Quadro 1 – Espaçamento entre pontos da nuvem Laser e resolução da imagem digital.

PONTOS LASER	Probabilidade de detectar a forma	
Dimensão da forma (λ)	0.66	0.95
	Espaçamento entre pontos	
	$\lambda / 3$	$\lambda / 20$
IMAGEM DIGITAL	Probabilidade de identificar detalhes	
Dimensão do detalhe (δ)	0.66	0.95
	Resolução (no cenário)	
	$\delta \times 3$	δ

4.4. Aquisição e processamento de dados

A alta frequência com que se faz a aquisição de dados permite a recolha de grandes quantidades de informação num curto período de tempo. Isto significa que se deve ter em consideração a fase das especificações técnicas, a fase do planeamento, do processamento e do controlo de qualidade.

Neste estudo foram feitos diversos estacionamentos do Laser *scanner* de forma a cobrir todo o paramento jusante da barragem e evitar obstruções que provocam inexistência de informação. Ao SVLT foi acoplado uma câmara fotográfica com uma lente de 20 mm para uma primeira cobertura total da estrutura. Uma outra lente 180 mm também foi utilizada com o SVLT numa segunda cobertura do paramento, de modo a obter imagens igualmente georreferenciadas de toda a estrutura. Finalmente, fez-se uma terceira cobertura fotográfica do paramento, com uma lente de 300 mm a qual não sendo passível de ser acoplada ao sistema Laser, foi referenciada posteriormente via *software*.

As diferentes etapas do processamento, bem como alguns exemplos práticos em 2D e 3D, serão expostas nesta seção. Adicionalmente serão apresentadas diferentes formas de sistematizar a informação gerada em documentos de engenharia.

4.4.1. Fases do processamento

Os dados brutos são recolhidos em várias nuvens de pontos, dependendo do tamanho do objecto, informação topográfica existente, alcance do Laser *scanner*, obstruções, entre outros parâmetros. A fase do pré-processamento, *in situ*, permite a texturização das diferentes nuvens de pontos. Várias etapas de processamento terão lugar, antes destes dados serem convertidos em documentos de engenharia. O nível de automação destas etapas é consideravelmente mais baixo quando comparado com a fase de aquisição de dados, o que significa que o número de dias necessários para o processamento dos dados será maior do que os dias de campo, dependendo do tipo e qualidade dos documentos finais produzidos.

4.4.1.1. Filtragem de dados

Entre os milhões de pontos recolhidos, existe uma quantidade considerável de ruído devido a muitos e variados factores, como obstruções temporárias ou permanentes, multi-reflexões, fraca reflectividade da superfície, entre outros. A filtragem manual (i.e. limpeza) de dados foi feita quando o operador foi capaz de identificar pontos que não estão relacionados com o objecto em estudo. A filtragem automática de dados foi feita recorrendo a algoritmos automáticos de filtragem próprios dos *softwares* de edição de nuvens de pontos. Em ambos os casos, a remoção de ruído, foi executada de forma a garantir uma fidelidade, julgada razoável, entre o objecto real e a sua representação virtual.

4.4.1.2. Reamostragem

A resolução das nuvens de pontos recolhidas varia em função do ângulo de deflexão do feixe Laser e da distância ao objecto, o que pode levar a uma sobre amostragem nos cenários mais próximos e a uma subamostragem nos planos mais afastados. Considerando a grande quantidade de dados a ser processado, procedeu-se a uma reamostragem dos dados, com o intuito de eliminar e reduzir os pontos que não adicionam informação útil ao modelo, melhorando assim a velocidade de processamento, bem como da transferência e do armazenamento dos dados. Neste processo foi igualmente considerada a qualidade da representação do objecto em causa.

4.4.2. Documentos de engenharia

O LNEC levou a cabo diversas pesquisas sobre a utilização e aplicação dos SVLT combinados com câmaras digitais e recomenda, aos proprietários das grandes barragens, a utilização destas metodologias, quando apropriada [Oliveira *et al.*, 2010].

Os resultados deste processamento podem ser apresentados em diferentes tipos de documentos tradicionais de engenharia ou seja, documentos bidimensionais que representem objectos tridimensionais e que foram gerados automaticamente a partir dos modelos 3D: secções transversais e longitudinais, perfis, curvas de nível, entre outros. Outros novos tipos de documentos de engenharia são as representações virtuais em 3D dos objectos, que só podem ser totalmente explorados de forma interactiva em plataformas computacionais, devido à sua natureza tridimensional. Alguns exemplos de documentos de engenharia, com diferentes níveis de processamento, serão apresentados seguidamente.

Dados geométricos e radiométricos

O registo de dados radiométricos e geométricos referenciados, de estruturas de grandes dimensões, será visto cada vez mais como um trunfo inestimável. A Figura 2 representa uma nuvem de pontos não editada que pode ser visualizada *in situ* e onde se podem fazer medições quase em tempo real.

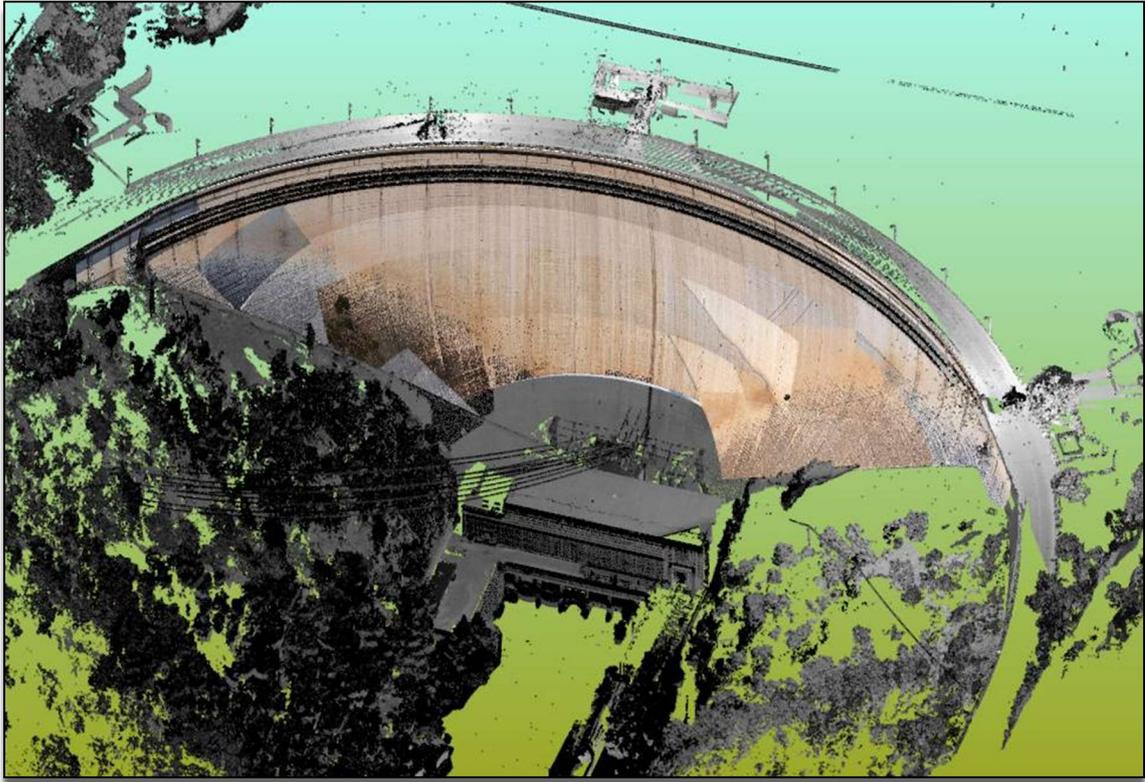


Figura 2 – Nuvem de Pontos do paramento da barragem do Cabril, com 1 a 2 cm de precisão nas coordenadas 3D e com uma resolução de 1 decímetro cúbico.

Neste trabalho, foram feitos 8 estacionamentos do SVLT para representar o paramento da barragem do Cabril numa nuvem com aproximadamente 19 milhões de pontos. Para referenciar as diferentes posições SVLT, utilizaram-se 6 pontos de referência da rede de monitorização geodésica, 30 pontos de ligação (alvos do SVLT) e 30 pontos de verificação (pontos materializados no paramento).

4.4.2.1. Engenharia Inversa e Modelação 3D

Terminado o processamento e o pós-processamento, geram-se vários documentos de engenharia com procedimentos mais ou menos automáticos. Na Figura 3 é representado um pormenor do paramento jusante da barragem, com a representação de diferentes fases de processamento, da nuvem de pontos (à esquerda), à modelação da superfície representada com triângulos irregulares (ao centro) e à texturização com informação pictórica dessa mesma superfície (à direita). A TIN (*Triangular Irregular Network*), mostrada ao centro na imagem, é o "esqueleto" do modelo 3D real, um produto intermediário na transformação dos dados para obter produtos finais, como por exemplo, as orto-imagens e é obtida por uma triangulação de *Delaunay* numa representação paramétrica da superfície do paramento [George e Borouchaki, 1997].

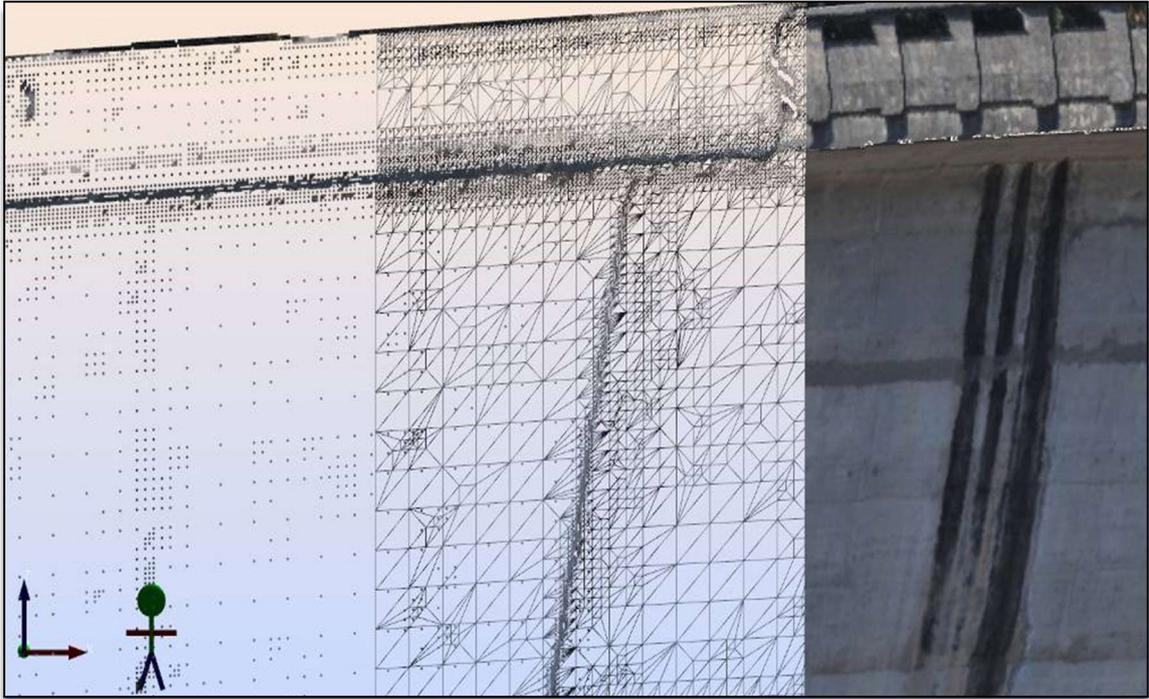


Figura 3 – Diferentes representações do mesmo modelo 3D de um pormenor do paramento da barragem do Cabril.

4.4.2.2. Orto-Imagens

A produção de orto-imagens, a partir de modelos tridimensionais texturizados, gerados com base nas nuvens de pontos com informação RGB, foi um procedimento realizado com *software* específico. Foram então produzidas orto-imagens com resolução de 1 cm (Figura 4) da totalidade do paramento de jusante da barragem, recorrendo à cobertura fotográfica feita pelo Laser *scanner* com a lente de 180 mm, fotografias georreferenciadas ao sistema Laser, pois são conhecidos os parâmetros que relacionam o sistema de coordenadas do Laser e da câmara acoplada ao sistema.

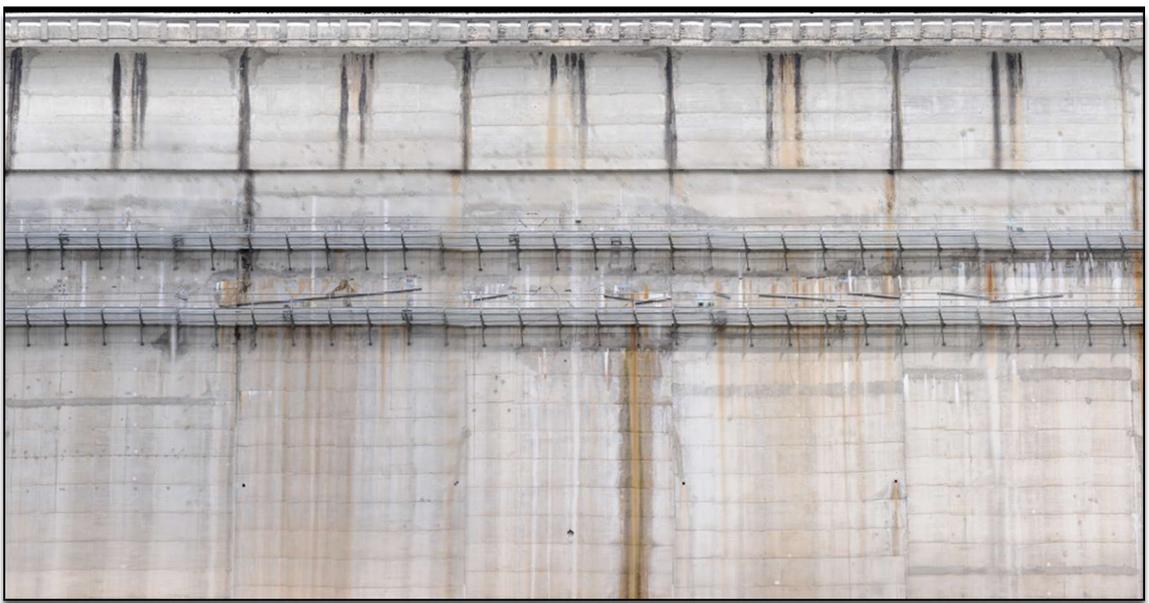


Figura 4 – Orto-imagem do paramento jusante da barragem do Cabril, com uma resolução de 1 centímetro.

Com o intuito de produzir orto-imagens de 3 mm resolução, foi feita a georreferenciação das fotografias obtidas com a lente de 300 mm tendo como referência externa a modelação 3D texturizada. Ficamos então em condições de produzir orto-imagens com qualidade espacial útil para as operações de inspecção visual (Figura 5). Produzimos também imagens da projecção cilíndrica da modelação texturizada, com resolução espacial de 1 cm e de 3 mm [Oliveira *et al.*, 2010].



Figura 5 – Orto-imagem de alta resolução do paramento jusante da barragem do Cabril, com uma resolução de 3 milímetros.

4.4.3. Análise da Exactidão

Em simultâneo com a campanha de Laser *scanner*, foi efectuada uma campanha de monitorização geodésica pela equipa de topografia da EDP, que fez o cálculo das coordenadas de pontos que se encontram materializados no paramento jusante da barragem (Figura 6). Estas coordenadas serviram para fazer o controlo da incerteza de cada fase, desde a nuvem de pontos original às orto-imagens. Estes pontos são identificados e as suas coordenadas comparadas com as coordenadas provenientes dos métodos geodésicos.

No Quadro 2 temos as coordenadas do modelo 3D comparadas com as coordenadas de um dos 30 pontos de verificação (ponto GH280).



Figura 6 – Pontos materializados no paramento jusante da barragem.

Quadro 2 – Comparação das coordenadas do modelo 3D com as coordenadas dos métodos geodésico.

GH280	Geodesia (m)	Modelo (m)	Δ (m)
X	169.310	169.339	-0.030
Y	428.090	428.081	0.009
Z	280.863	280.868	-0.006

4.5. Investigação e Desenvolvimento

Estes sistemas combinados têm sido comercialmente disponibilizados nas duas últimas décadas e comprovaram já ser uma tecnologia fiável utilizada nas mais variadas áreas e com diferentes aplicações. Esta é também uma tecnologia que está com um nível significativo de desenvolvimento [Staiger, 2005]. Primeiro, com melhorias contínuas em termos de exactidão, resolução e frequência de recolha de dados. Segundo, existe uma constante necessidade de desenvolvimento de algoritmos e *software*, e em terceiro, ainda não existe um consenso no melhor *design* ou melhor tecnologia a ser incorporada neste equipamento. Esta terceira observação explica a dificuldade em especificar modelos de erro e procedimentos de calibração. A utilização de sensores infravermelhos deve ser desenvolvida como ferramenta útil para ajudar na detecção e classificação de deteriorações. Sobre a aplicação desta tecnologia na inspecção visual, tem sido feita alguma investigação e desenvolvimento na extracção automática ou semiautomática de deteriorações [e. g. Chen *et al.*, 2006; Yamaguchi *et al.*, 2008].

As Inspeções Visuais são processos importantes na monitorização de barragens e que quando feitos de forma tradicional são muito dispendiosos, morosos e eventualmente perigosos. A abordagem tradicional das inspeções visuais é fisicamente exigente e tem de ser realizada no local por pessoal qualificado. O resultado é muito subjectivo uma vez que é dependente do técnico e não do equipamento de recolha automática de dados. Não tem um resultado abrangente e não tem exactidão posicional devido a dificuldades operacionais [Berberan *et al.*, 2011]. A Figura 7 mostra uma orto-imagem, que utilizada como uma imagem com escala pode servir para mapear as deteriorações visíveis no paramento da barragem, sem qualquer tipo de dificuldades operacionais.

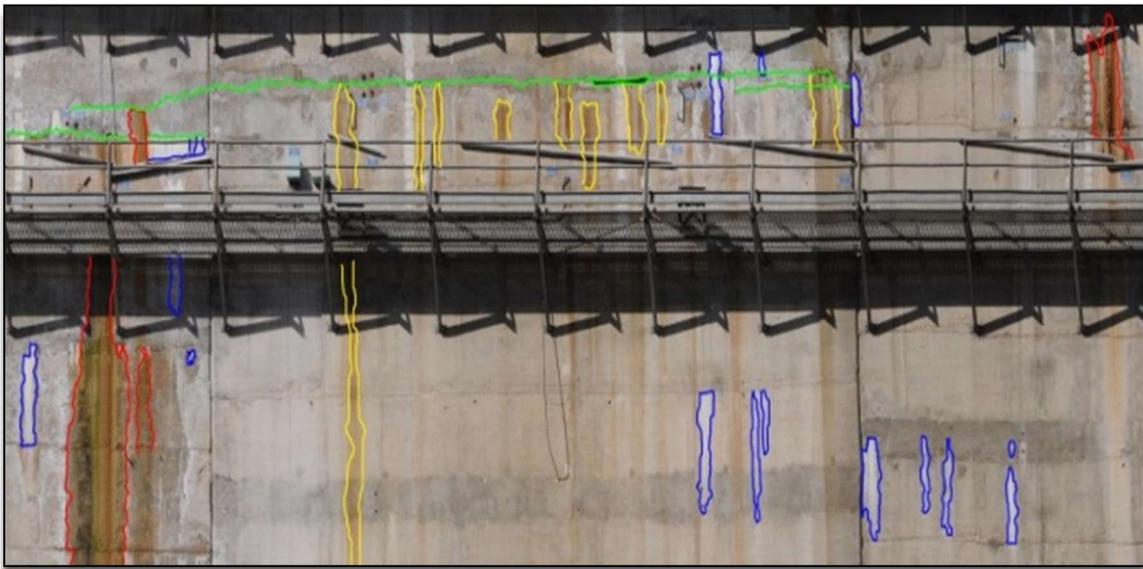


Figura 7 – Mapeamento de deteriorações com base numa orto-imagem.

Sob a orientação de um engenheiro qualificado, vários técnicos podem inspeccionar simultaneamente várias barragens, em diferentes computadores. Esta possibilidade pode ser de grande importância na sequência de terremotos ou em outras catástrofes naturais que possam afectar simultaneamente várias barragens. O mapeamento de deteriorações deve seguir um catálogo de sintomas que deverá ser definido inicialmente. Os resultados do mapeamento deverão ser validados no local e com a ajuda de técnicos da própria barragem.

Os sintomas mapeados podem ser associados aos seus atributos mais significativos e completar assim um sistema de informação onde diferentes tipos de observações, provenientes de diversos instrumentos de monitorização, podem ser cruzados e validados para estimar o comportamento ou o estado da barragem (Figura 8).



Figura 8 – Sistema de gestão da informação “GestBarragens” de diferentes tipos de observações efectuadas pelo LNEC.

Uma última referência vai para o constante desenvolvimento na variedade de documentos digitais 3D de engenharia que somente podem ser visualizados em dispositivos de visualização electrónica e que serão uma vantagem para a engenharia, para além dos tradicionais documentos 2D. Uma vez gerados os modelos tridimensionais texturizados, é possível disponibilizá-los em ficheiros CAD 3D, ficheiros PDF 3D, ficheiros OBJ, ficheiros VRML, entre outros. Definindo percursos em torno do modelo, é possível também produzir relatórios vídeo que permitirão inspeccionar de muito perto o paramento em análise.

4.6. Conclusões

Este estudo confirmou que a fusão da informação proporcionada pelas câmaras digitais com a proveniente dos SVLT permite adicionar aos dados geométricos destes SVLT uma riqueza semântica que pode ser explorada com objectiva vantagem para obter o mesmo tipo de informação que é recolhida tradicionalmente durante a inspecção visual dos paramentos e encontros das barragens. A informação recolhida pela via aqui descrita, tem melhor qualidade em termos de posicionamento, de resolução cronológica, de rigor, de integridade, de objectividade e de custos. Como é registado e processado em tempo real, quer os dados brutos quer a informação processada estão prontos para serem migrados para outras aplicações ou *software* e serem enviados através de uma intranet ou internet para proprietários, consultores, autoridades, fiscalizações e projectistas.

A experiência obtida, demonstrou que a instalação de uma unidade de produção de modelos tridimensionais e aquisição de imagem carece de grandes investimentos iniciais no SVLT, na câmara digital e respectivas lentes, em computadores de alta performance em termos de cálculo numérico, processamento e gráfico, sistemas de armazenamento de dados, licenças e manutenção de *software*, bem como na formação de quadros qualificados, investimento que é bastante significativo [Oliveira *et al.*, 2010].

A incerteza posicional e o alcance dos Laser *scanners*, é agora suficiente para a maioria dos trabalhos de engenharia que requerem um sistema de recolha de dados radiométricos e de posicionamento com alta frequência, como é o caso da inspecção visual ou da monitorização de estruturas, como foi apresentado neste trabalho sobre a barragem do Cabril. Espera-se que a evolução da tecnologia Laser *scanner*, que não foi desenvolvida inicialmente em ambientes geodésicos mas que actualmente também está a ser feito pelos fabricantes de estações totais, venha a melhorar ainda mais a qualidade posicional dos dados adquiridos.

4.7. Agradecimentos

Agradecemos à EDP e à Artescan pela disponibilização dos dados recolhidos. Agradecemos também ao LNEC, entidade consultora e de acolhimento deste estudo, pela disponibilização dos recursos necessários ao processamento dos dados.

4.8. Referências Bibliográficas

- Berberan, A.; Ferreira, I.; Portela, E.; Oliveira, S.; Oliveira, A.; Baptista, B. (2011). Overview on Terrestrial Laser Scanning as a Tool for Dam Surveillance. 6th International Dam Engineering Conference. LNEC, Lisboa.
- Chen, L.; Shao, Y.; Jan, H.; Huang, C.; Tien, Y. (2006). Measuring System for Cracks in Concrete Using Multitemporal Images. *Journal of Surveying Engineering* © ASCE.
- George, P. L., Borouchaki, H. (1997). *Triangulation de Delaunay et maillage: applications aux éléments finis*. Hermes.
- Lerma García, J.L.; Van Genechten, B.; Heine, E.; Quintero, M.S. (2008). *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.

- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I. (2006). Close range photogrammetry: Principles, methods and applications (pp. 1-510). Whittles.
- Oliveira, S.; Ferreira, I.; Berberan, A.; Mendes, P.; Boavida, J.; Baptista, B. (2010). Monitoring the structural integrity of large concrete dams: the case of Cabril Dam. Hydropower 2010, Lisboa.
- Staiger, R. (2005). The Geometrical Quality of Terrestrial Laser Scanner (TLS), FIG Working Week 2005 and GSDI-8, Cairo, Egypt. April 16-21.
- Shan, J., Toth, C. K. (Eds.). (2008). Topographic Laser ranging and scanning: principles and processing. CRC press.
- Yamaguchi, T.; Nakamura, S.; Saegusa, R.; Hashimoto, S. (2008). Image-Based Crack Detection for Real Concrete Surfaces. IEEJ Trans2008; 3: Págs.128–135.

5. Modelação 3D da deformação da barragem do Cabril recorrendo a Sistemas de Varrimento Laser Terrestre

Bruno BAETA BAPTISTA ^{1,*}, Gil GONÇALVES ^{1,2} e António BERBERAN ³

¹ Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Coimbra

² Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores - Coimbra

³ Consultor de modelação e monitorização - Lisboa

(¹ baetabruno@gmail.com; ^{1,2} gil@mat.uc.pt; ³ berberan@epoch-suite.com)

Palavras-chave: Barragens de Betão, Deformação, Sistemas de Varrimento Laser Terrestre, Modelação 3D, Modelo Digital de Superfície.

Resumo: A monitorização das barragens de betão é obrigatória e fundamental na avaliação das condições de segurança estrutural e na ampliação do conhecimento sobre o comportamento estrutural deste tipo de obras. Monitorizar estas barragens envolve várias actividades, nomeadamente a caracterização geométrica da deformação.

Os métodos tradicionais para monitorização geométrica deste tipo de estruturas assentam na observação de um pequeno número de pontos que foram materializados e considerados representativos do comportamento estrutural do objecto em estudo. Os Sistemas de Varrimento Laser Terrestre (SVLT) além de fornecerem um modelo geométrico exacto e rigoroso da superfície reflectora, que, em termos práticos, pode ser considerado contínuo, permitem a determinação das coordenadas 3D das marcas materializadas, num mesmo sistema de coordenadas cartesianas dos métodos geodésicos tradicionais.

Neste artigo é apresentada uma metodologia complementar para a monitorização geométrica da deformação da barragem do Cabril. Recorrendo a duas campanhas de observação realizadas em épocas diferentes (Março e Agosto de 2010) com um SVLT operando em alta resolução foram calculadas as deformações do paramento jusante. O co-registo das duas nuvens de pontos foi feito em pós-processamento utilizando um algoritmo de *best-fit*.

Os resultados da comparação entre as duas nuvens de pontos e as correspondentes superfícies modeladas mostram que a metodologia apresentada é aplicável em deformações superiores a 1 cm. Além disso os SVLT permitiram modelar a deformação com elevada resolução espacial ao longo de todo o paramento de jusante da barragem, e não apenas nos pontos materializados.

5.1. Introdução

Em países onde os recursos hídricos ainda estão subaproveitados, como é o caso de Portugal, estão a ser construídas novas grandes barragens e a ser feito o reforço de potência em algumas barragens existentes. No âmbito destes programas é promovido o desenvolvimento/melhoria de sistemas automáticos de monitorização que requerem o desenvolvimento de metodologias para acompanhar e analisar a evolução em "tempo real" do comportamento estrutural das barragens ao longo do tempo. A monitorização de grandes barragens envolve, em geral, as seguintes actividades: 1) elaboração e execução do plano de monitorização; 2) instalação de equipamentos de monitorização; 3) recolha de dados desses equipamentos em intervalos de tempo preestabelecidos; 4) conversão dos dados em quantidades que façam sentido do ponto de vista da engenharia e interpretação dessas quantidades; 5) comparação dos dados recolhidos com dados anteriores; 6) inspecção visual da barragem; 7) emissão de um relatório de segurança e finalmente 8) identificação de medidas de correcção previstas. Utilizando as mais recentes tecnologias que permitem a automatização do processo de recolha, partilha e armazenamento de dados, novos sistemas de monitorização devem prever a utilização de sistemas informáticos que possibilitem a comparação automática de dados de observação e permitam obter resultados em modelos numéricos. Estes modelos numéricos devem ser desenvolvidos de modo a ter em consideração: (1) a interacção dinâmica entre a estrutura e a água da albufeira, (2) os efeitos dos processos de deterioração e (3) os efeitos associados a eventos excepcionais, tais como grandes inundações e terremotos [Oliveira *et al.*, 2010].

Nas últimas duas décadas os Sistemas de Varrimento Laser Terrestre (SVLT) têm contribuído para um enorme avanço nas técnicas de aquisição de dados espaciais. Estes sistemas permitem obter por varrimento vertical e horizontal, as coordenadas tridimensionais de milhões de pontos da superfície que reflectiram a luz laser emitida pelo equipamento. No âmbito da engenharia de barragens, os resultados obtidos após o processamento dos dados provenientes dos SVLT, podem ser utilizados em diversas fases do ciclo de vida de uma barragem. A quantidade sem precedentes de informação geométrica e radiométrica obtida pode ser utilizada, por exemplo, somente para registo de informação das fundações, para o caso de estas terem que ser revistas após a construção da barragem, ou para mapear e acompanhar a evolução de deteriorações visíveis provenientes do envelhecimento da estrutura. Os sistemas de engenharia inversa podem também ser fácil e rapidamente desenvolvidos com o intuito de gerar modelos tridimensionais CAD (*Computer Aided Design*) tendo em mente a renovação e manutenção das barragens cujos documentos tenham sido perdidos ou estejam muito desactualizados [Baptista *et al.*, 2015]. A aplicação dos SVLT na monitorização de barragens permite criar modelos tridimensionais de objectos a baixo custo, com precisão e exactidão adequadas. Obtêm-se assim modelos densos, compostos por milhões de pontos cujas coordenadas são recolhidas a frequências que podem atingir 1 milhão de pontos por segundo.

Este artigo descreve a utilização dos SVLT para a modelação 3D da deformação do paramento de jusante da Barragem do Cabril. No âmbito do estudo para o desenvolvimento de sistemas de monitorização de barragens, este trabalho foi requerido pela EDP (Energias de Portugal) e a aquisição de dados geoespaciais efectuada pela empresa Artescan, tendo sido o LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) contratado

como consultor. A barragem do Cabril foi construída em 1954, no Rio Zêzere, para produção de energia eléctrica. O seu paramento é uma abóbada com dupla curvatura, tem uma altura máxima acima da fundação de 132 metros e o coroamento tem um desenvolvimento de 290 metros.

5.2. Princípios básicos de funcionamento dos SVLT

Os SVLT, também denominados de Sistemas LiDAR Terrestre (*Light Detection And Ranging*), são sistemas apropriados para a escala da engenharia de estruturas, fornecendo informação geométrica 3D da superfície visível da obra em estudo. Os dados são adquiridos rapidamente e com alta resolução espacial. Estes sistemas podem medir mais de 1 milhão de pontos por segundo com uma precisão ligeiramente melhor que 3 milímetros, dependendo, entre outros, da distância e do ângulo de incidência da superfície reflectora e do equipamento utilizado. As principais características dos SVLT consistem na integridade, exactidão e rapidez na recolha de dados. O seu princípio de funcionamento é bastante simples: os feixes laser são gerados e emitidos pelo SVLT e são direccionados para o objecto de análise, com o auxílio de um espelho de varrimento, atingindo a superfície do objeto em vários pontos [Shan e Toth, 2008]. O objecto reflecte o feixe laser incidente e parte deste volta ao SVLT. É possível assim determinar a distância entre o sensor e o objecto através do intervalo de tempo entre a emissão e a recepção (retorno) do feixe laser. Os princípios básicos de funcionamento do sensor Laser poderão ser consultados em *Baptista et al. (2015)*. Uma descrição mais aprofundada dos fundamentos teóricos utilizados nos SVLT com câmaras digitais poderá ser consultada em *Luhman et al. [2006]* e em *Shan e Toth [2008]*.

Estes sistemas possuem três componentes principais: 1) unidade de medição laser (responsável pela emissão e recepção do sinal laser), 2) sistema de varrimento óptico-mecânico e 3) unidade de registo de medições. Em ambos os tipos de SVLT o feixe laser é emitido com dois graus de liberdade, em dois planos definidos por dois eixos de rotação, utilizando, em geral, um espelho rotativo ou um prisma oscilante, cujo mecanismo está numa cabeça rotativa. Os dois eixos de rotação devem ser perpendiculares entre si. A distância para o ponto objecto e os dois ângulos de deflexão do feixe permitem obter as coordenadas esféricas do ponto (r, θ, φ) , que são transformadas em coordenadas cartesianas instrumentais (x, y, z) . Além da medição da distância o sensor laser regista ainda, para cada ponto, a intensidade (I) do sinal laser de retorno, obtendo-se assim, nuvens de pontos com coordenadas objecto (x, y, z, I) . Para digitalizar tridimensionalmente um objecto são necessárias várias posições de varrimento existindo assim a necessidade de referenciar todas as nuvens de pontos num único sistema de coordenadas (X, Y, Z) , geralmente relacionado com o objecto. Se o sinal laser não for reflectido adequadamente por um determinado material, ou não se obtém a distância ao objecto e conseqüentemente não se obtém as coordenadas dos pontos do objecto ou então as coordenadas são afectadas por uma grande incerteza. Isto acontece com superfícies molhadas, em água, em vidro ou em superfícies com gordura. O tratamento posterior da nuvem de ponto (pós-processamento) permite a extracção de primitivas CAD, como modelos 3D, curvas de nível, perfis e secções.

5.3. Especificações técnicas

A informação a recolher requer especificações técnicas detalhadas, da parte do utilizador da informação, e um planeamento cuidadoso, do lado do produtor. Os objectivos das especificações são: estabelecer parâmetros de qualidade adequados, definir critérios de rejeição/aceitação, permitir a comparação entre épocas distintas e homogeneizar suportes e formatos de dados a fim de migrar dados entre utilizadores, plataformas, redes, aplicativos e *software*. Os itens a especificar deverão incluir os metadados, a área e o objecto de interesse, as restrições à operação, o sistema de coordenadas e a sua materialização, restrições no processamento de dados, resolução cronológica (se, para efeitos de monitorização), resolução espacial e resolução radiométrica, alcance mínimo e máxima divergência do feixe laser, bem como outras especificações técnicas do equipamento, calibração e procedimentos de referenciação, controle de qualidade e entregas de produtos finais. Porque o sensor Laser pode ser biologicamente nocivo, a classe do Laser deve ser referida. O prestador de serviços deve fornecer ao utilizador de dados os *softwares* de visualização apropriados para documentos 3D de engenharia que só podem ser vistos em computadores [Baptista *et al.*, 2015].

Quadro 3 – Densidade (p) da nuvem de pontos Laser em pts/cm². ($p=1/d^2$).

PONTOS LASER	Probabilidade de detectar a forma	
	0.66	0.95
Dimensão da forma (λ) em cm	Espaçamento (d) entre pontos em cm	
	$\lambda / 3$	$\lambda / 20$

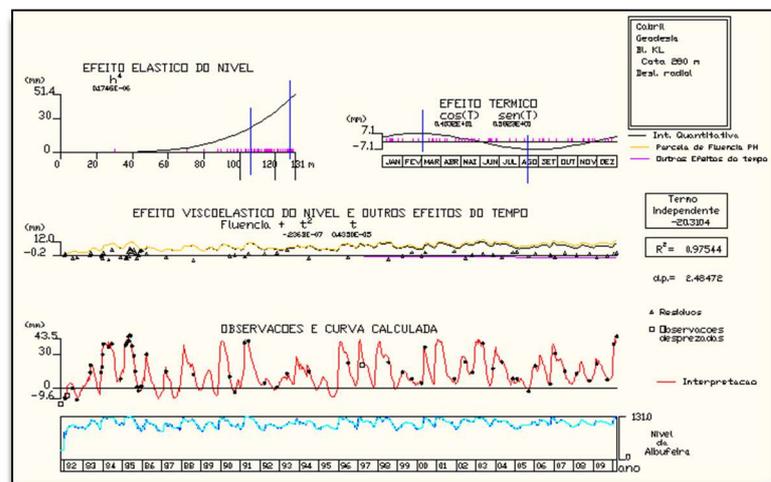


Figura 9 – Cálculo teórico por Interpretação quantitativa da deformação.

Considerando que a precisão linear associada às estações totais utilizadas em trabalhos de monitorização geodésica é, em geral da ordem de $1\text{mm}\pm 1\text{ppm}$, os SVLT têm uma precisão ligeiramente inferior a este equipamento. No entanto, a precisão angular tem tido uma evolução que já permite atingir os padrões necessários para estes trabalhos. Em termos práticos, isto significa que os vectores de deformação, com uma magnitude superior a 1 cm podem ser identificáveis, desde que seja aplicado o equipamento e metodologia apropriados [Berberan *et al.*, 2011]. Neste trabalho, definiram-se as especificações técnicas, com base nos valores de deformação esperados, tendo em consideração a época do ano e a cota da albufeira. A Figura 9 (adaptada da aplicação de gestão de dados “GestBarragens” desenvolvida pelo LNEC) ilustra a metodologia utilizada para o cálculo teórico por interpretação quantitativa da deformação e utilizada neste trabalho na fase de planeamento. Para calcular a densidade de pontos (p) adequada foram utilizadas as fórmulas empíricas do Quadro 3 que nos dão a relação entre a forma do objecto (λ) e o espaçamento (d) entre pontos para uma dada probabilidade.

5.4. Aquisição e processamento de dados

5.4.1. Aquisição de dados

A alta frequência do equipamento na aquisição de dados permite a recolha de grandes quantidades de dados num intervalo de tempo que é proporcional à densidade da nuvem de pontos: quanto maior for a densidade mais tempo se gasta em cada estacionamento. Assim, no planeamento dos trabalhos de campo teve-se em consideração todas as fases da elaboração das especificações técnicas bem como as fases do planeamento, do processamento e do controlo de qualidade.

A barragem do Cabril foi digitalizada por duas vezes em 2010 (Março e Agosto), com o intuito de comprovar a viabilidade da utilização dos SVLT na monitorização das barragens de betão. Para este efeito utilizou-se o SVLT da *Riegl, VZ-400*. No trabalho de campo, foram feitos diversos estacionamentos do SVLT de forma a cobrir todo o paramento jusante da barragem e a evitar obstruções que provocam “sombras” e consequentemente zonas 3D com falta de informação. A Figura 2 representa uma nuvem de pontos não editada que pode ser visualizada *in situ* e onde se podem fazer medições quase em tempo real. Na primeira campanha a barragem foi observada com a cota de albufeira em 294.5 metros (próximo da sua capacidade máxima) tendo-se recolhido mais de 19 milhões de pontos com coordenadas conhecidas (X, Y, Z, I) para a representação geométrica do paramento jusante da barragem (Figura 10). Na segunda campanha a barragem foi observada com cota da água da albufeira nos 272.6 metros e utilizando a mesma metodologia da primeira campanha. O resultado destes dois estudos será um modelo de deformação do paramento jusante entre o período chuvoso e seco.

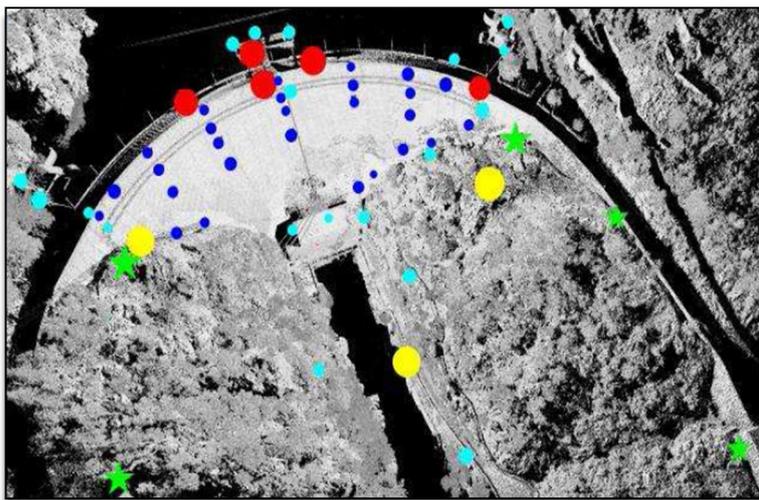


Figura 10 – Nuvem de Ponto da barragem do Cabril, com as estações de digitalização (círculos amarelo e vermelho), os pontos de referência (estrelas verde), pontos de ligação (círculos azul claro) e pontos de verificação (círculos azul escuro).

Quadro 4 – Principais características do trabalho de campo com o SVLT.

Estações SVLT	8
Pontos XYZ recolhidos	19 004 632
Resolução espacial da nuvem de pontos	10 pontos/dm ²
Pontos de ligação	30
Pontos de referência	6
Pontos de verificação	30

Em ambas as campanhas (Março e Agosto), foi utilizada a mesma metodologia de campo nos 8 estacionamentos do SVLT (círculos amarelos e vermelhos na Figura 10) necessários para realizar o varrimento completo do paramento da barragem do Cabril. Destes estacionamentos, somente 3 (círculos amarelos) serviram para o trabalho de avaliação da deformação, pois são as posições de estacionamento mais perpendiculares ao paramento jusante da barragem. Apesar dos dados dos restantes 5 estacionamentos, feitos na zona do coroamento, não terem sido utilizados neste trabalho, estes serviram para a documentação 3D completa da barragem e para a sua modelação 3D em CAD. Para referenciar as diferentes posições do SVLT, utilizaram-se 6 pontos de referência da rede de monitorização geodésica (estrelas verde na Figura 10), 30 pontos de ligação, alvos do SVLT (círculos azul claro na Figura 10) e 30 pontos de verificação, materializados no paramento (círculos azul escuro na Figura 10). As coordenadas dos 30 pontos de verificação, materializados no paramento, foram determinadas por métodos taqueométricos e serão utilizadas para verificar a exactidão da deformação determinada pelos dados do SVLT. O Quadro 4 resume algumas principais características dos trabalhos efectuados com recurso ao SVLT.

5.4.2. Fases do processamento

Ao longo de três dias de campo foram recolhidos e pré-processados os dados brutos, operação que consiste essencialmente na validação e referenciação dos dados. A referenciação dos dados é conseguida por métodos indirectos e individualmente para cada nuvem de pontos. O processamento destas nuvens de pontos já referenciadas em gabinete leva consideravelmente mais tempo. A duração efectiva da fase de processamento depende do tipo e da diversidade dos produtos finais, bem como das suas especificações. Para cumprir os objectivos deste trabalho, foi necessário um mês, com dois técnicos a trabalhar a tempo inteiro para se obter os resultados previstos.

O fluxo de trabalho, representado na Figura 11, desta fase consiste nas seguintes principais etapas: 1) filtragem de dados, 2) reamostragem, 3) modelação tridimensional, 4) análise da deformação e 5) análise da exactidão. Neste caso particular, comparou-se a modelação de cada uma das campanhas, realizadas em épocas distintas, a fim de modelar as deformações.

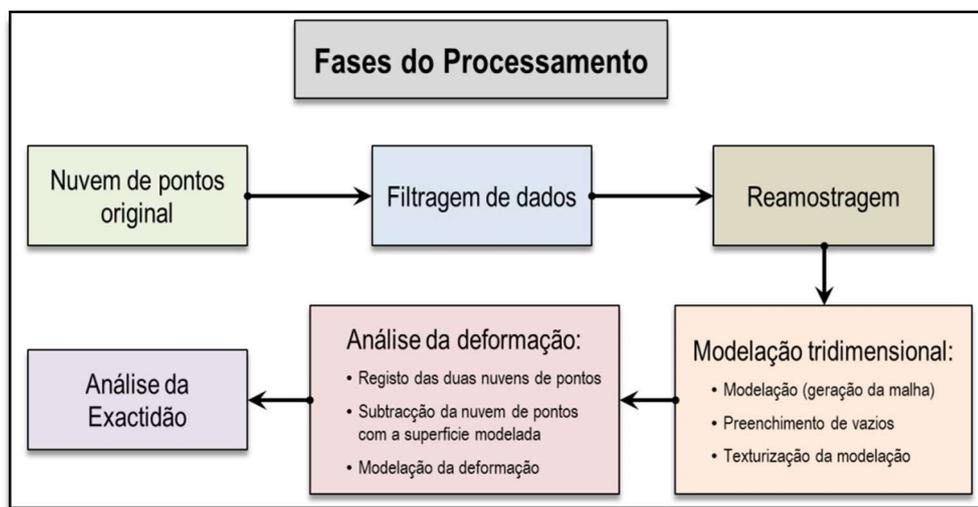


Figura 11 – Fluxograma das fases do processamento.

5.4.2.1. Filtragem de dados

Entre os milhões de pontos recolhidos, existe uma quantidade considerável de ruído devido a muitos e variados factores, como obstruções temporárias ou permanentes, multi-reflexões, fraca reflectividade da superfície, entre outros. A filtragem manual (i.e. limpeza) de dados foi feita sempre que era possível ao operador identificar pontos que não estão relacionados com o objecto em estudo. A filtragem automática de dados foi feita recorrendo a algoritmos automáticos de filtragem próprios dos *softwares* de edição de nuvens de pontos. Tanto na filtragem manual como na automática, a remoção de ruído foi executada de forma a garantir uma fidelidade, aceitável para o trabalho em causa, entre o objecto real e a sua representação virtual [Baptista *et al.*, 2015].

5.4.2.2. Reamostragem

A resolução das nuvens de pontos recolhidas varia em função do ângulo de deflexão do feixe laser e da distância ao objecto, o que pode levar a uma sobre amostragem nos cenários mais próximos e a uma subamostragem nos planos mais afastados. Considerando a grande quantidade de dados a ser processada, procedeu-se a uma reamostragem dos dados com o intuito de eliminar e reduzir os pontos que não adicionam informação útil ao modelo, melhorando assim a velocidade de processamento, de transferência e de armazenamento dos dados. Neste processo foi igualmente considerada a qualidade da representação do objecto em causa [Baptista *et al.*, 2015].

5.4.2.3. Modelação tridimensional

Após a filtragem e a reamostragem de dados procede-se à geração de uma TIN (*Triangular Irregular Network*), que é um modelo 3D contínuo, um produto intermédio entre a nuvem de pontos e os produtos finais, e que é obtida por uma triangulação de *Delaunay* numa representação paramétrica da superfície do paramento [George e Borouchaki, 1997].

Na Figura 12 representam-se as diferentes fases de processamentos dos dados do paramento jusante da barragem. Da esquerda para a direita: 1) corte transversal da nuvem de pontos original do paramento; 2) pormenor da nuvem original onde se identificam os passadiços construídos no paramento jusante; 3) reamostragem da nuvem de pontos já filtrada do ruído; 4) paramento de jusante modelado como superfície representada com uma triangulação irregular. Depois de gerada esta superfície é feito o preenchimento de vazios. Caso se justifique, esta modelação pode também ser texturizada com a informação pictórica proveniente da cobertura fotográfica.

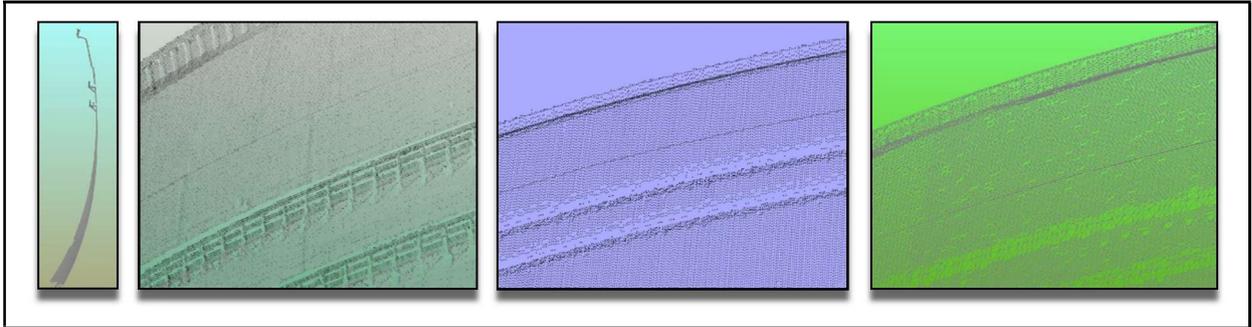


Figura 12 – Pormenor do paramento de jusante da barragem do Cabril - Diferentes fases do processamento.

5.4.3. Análise da deformação

A monitorização da deformação num sistema de referência externo à influência da barragem é tradicionalmente feita com métodos geodésicos. Estes métodos fornecem as componentes dos vectores de deslocamento de pontos objecto que são considerados representativos do comportamento estrutural da barragem. Com formação, equipamentos e procedimentos específicos, os métodos geodésicos podem atingir uma incerteza de 2 mm para deslocamentos horizontais (2D) com taqueometria e 0,2 mm para deslocamentos verticais (1D), utilizando técnicas de nivelamento geométrico. Os SVLT, dada a elevada resolução espacial dos dados recolhidos, podem fornecer a deformação quer dos pontos objecto materializados, quer do paramento. Neste trabalho a deformação foi modelada com elevada resolução espacial ao longo de todo o paramento de jusante da barragem, e não somente nos pontos materializados.

Combinando a orientação do SVLT de forma indirecta (com base em alvos retro-reflectores) com uma Transformação Euclidiana (ou Transformação Rígida), que preserva a forma e o tamanho dos objectos, obtiveram-se os parâmetros de transformação entre a nuvem de pontos de Março e a nuvem de pontos de Agosto. Nesta transformação, pretende-se determinar a matriz de rotação e translação que relaciona as duas nuvens de pontos e que tenha o menor valor de “erro mínimo quadrático”. Utilizaram-se então algoritmos de “best fit” como o ICP (*Iterative Closest Point*) ou o “*shape matching*”. [Pulli, 1999; Pottmann *et al.*, 2002] Fez-se também o cálculo dos parâmetros de transformação para um sistema de coordenadas conhecidas, através da identificação de pontos de controlo.

Uma vez que o feixe laser atinge o objecto em diferentes pontos nas duas campanhas, a subtracção é feita entre os pontos medidos na nuvem de Agosto e a superfície modelada a partir da nuvem de pontos obtida em Março. De notar que a modelação da deformação não é feita com base num só ponto. Na realidade, a interpretação tem de ser feita com base numa área do objecto. Os deslocamentos são medidos segundo a normal da superfície que passa por cada ponto da nuvem.

Os resultados da modelação da deformação, ou seja, da subtracção entre as duas campanhas são apresentados na Figura 13 (*software Riscan Pro*), que consiste num gradiente de cores que representa os deslocamentos de zero (azul escuro) a seis centímetros (vermelho).

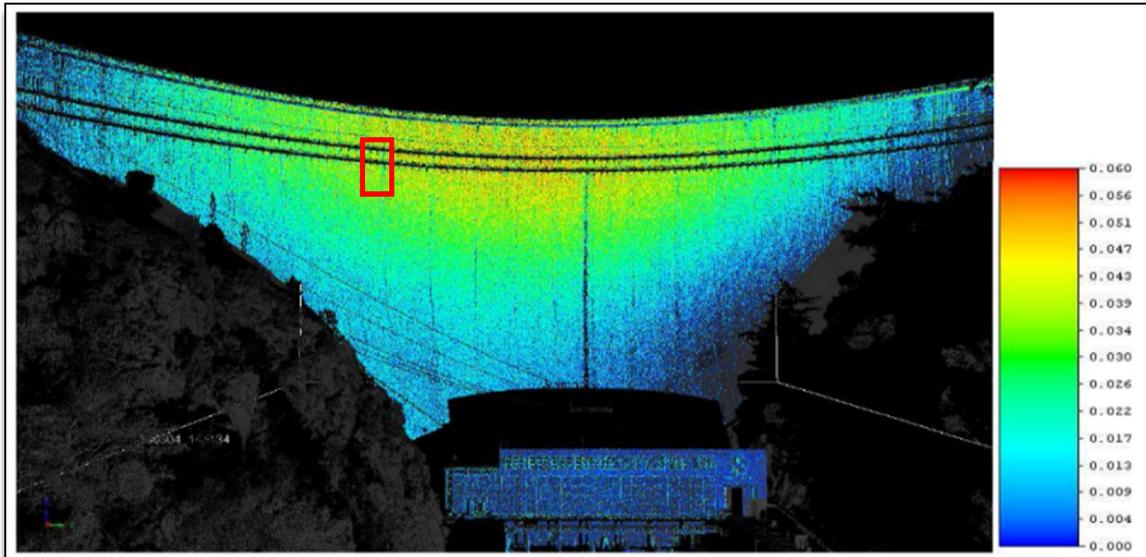


Figura 13 – Resultados da comparação das duas campanhas do SVLT, representados com um gradiente de cores a variar entre 0 e 6 cm.

Na Figura 14 (*software 3D Reconstructor*), à esquerda, é representado um pormenor da comparação entre as duas superfícies, a superfície de Março (a azul) e a superfície de Agosto (a vermelho). Ambas as superfícies estão sobrepostas com a nuvem de pontos utilizada para a sua modelação. À direita, na Figura 14, temos um pormenor das duas nuvens de pontos com informação da cota da albufera, a localização deste pormenor está representado a vermelho (rectângulo) na Figura 13.

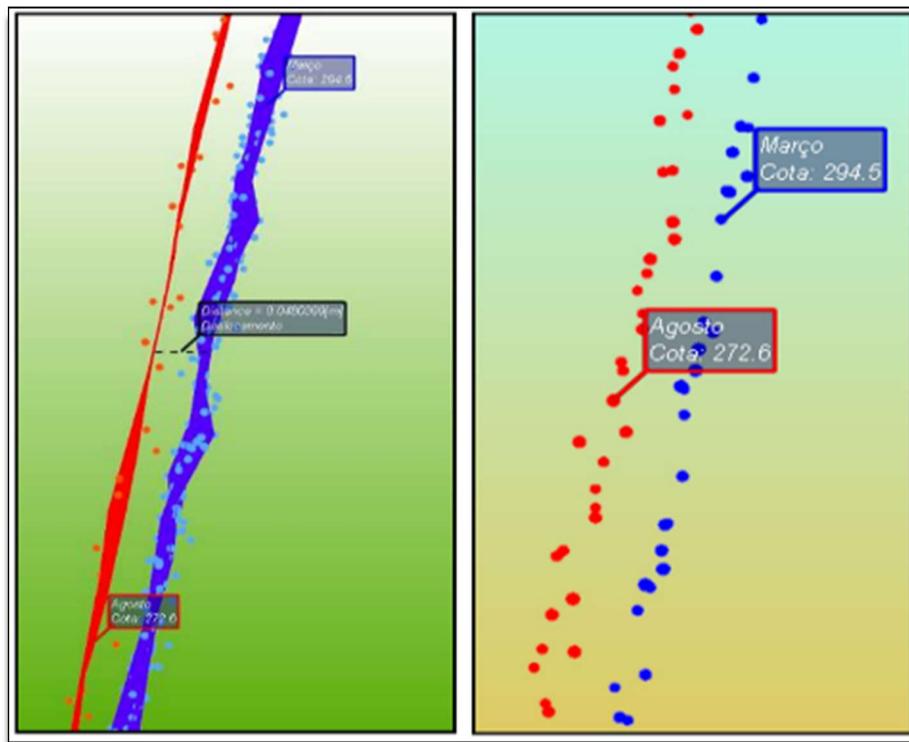


Figura 14 – Pormenor da comparação das duas campanhas.

5.4.4. Análise da Exactidão

A informação recolhida pelos SVLT pode ser utilizada para a monitorização da deformação com uma incerteza variável que pode atingir alguns milímetros. A incerteza depende das especificações do equipamento, procedimentos operacionais e computacionais, acessórios, configuração do sistema, propriedades ópticas das superfícies reflectoras e competências dos quadros técnicos. O uso destes documentos digitais de engenharia é diversificado, uma vez que permite monitorizar grandes estruturas de forma espacialmente contínua, com uma incerteza quantificada com desvio padrão de cerca de 1 cm [ICOLD, 1998].

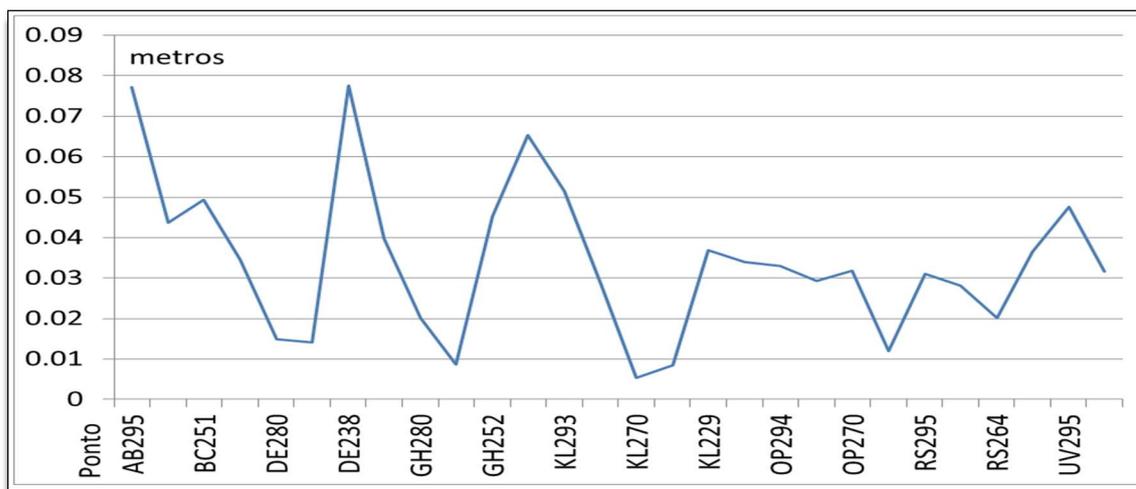


Figura 15 – Diferenças entre deslocamentos geodésicos e deslocamentos SVLT.

A qualidade métrica destes documentos foi avaliada comparando as coordenadas 3D medidas nos produtos finais com as coordenadas obtidas pelos métodos geodésicos [Tucker, 2002]. Em simultâneo com as campanhas de laser scan, foram efectuadas campanhas de monitorização geodésica pela equipa de topografia da EDP, que fez o cálculo das coordenadas de pontos que se encontram materializados no paramento jusante da barragem. Estas coordenadas serviram para fazer o controlo da exactidão dos resultados obtidos via SVLT. Estes pontos são identificados e as suas coordenadas comparadas com as coordenadas provenientes dos métodos geodésicos. Na Figura 15 apresenta-se a variação das diferenças de coordenadas do modelo 3D comparadas com as coordenadas dos 30 pontos de verificação, onde se obteve uma variação média de 3 centímetros, um valor máximo de 7 cm e mínimo de 5 milímetros.

O estudo para avaliar a exactidão do processo de medição 3D com o SVLT foi feito ao longo das várias fases de processamento dos dados, nomeadamente na fase de concatenação das nuvens de pontos e correspondência entre superfícies. Os resultados obtidos demonstram que a exactidão pode ser inferior a 5 mm nos pontos medidos e inferior a 3 mm na superfície modelada.

5.5. Conclusões

Este estudo permitiu demonstrar que os SVLT, no âmbito da monitorização de grandes barragens, podem ser utilizados para o acompanhamento das marcas de superfície (pontos objecto materializados no paramento), bem como para acompanhar a deformação de toda a superfície visível da barragem (paramentos e encontros), com incertezas próximas das especificações de exactidão habituais para este tipo de actividade. Além disso, a informação proporcionada pelos SVLT permite adicionar uma riqueza semântica que pode ser explorada para completar a informação que é recolhida tradicionalmente durante as campanhas geodésicas de monitorização dos paramentos e encontros das barragens. Uma vez que os dados são registados e processados em tempo real, tanto os dados brutos como a informação processada estão prontos para serem migrados para outras aplicações ou *software* e serem enviados através de uma intranet ou internet para proprietários, consultores, autoridades, fiscalizações e projectistas.

A experiência obtida demonstrou que a instalação de uma unidade de produção de modelos tridimensionais e análise da sua deformação, carece de grandes investimentos iniciais no SVLT, nomeadamente em computadores de alto rendimento necessários para o cálculo numérico, processamento de dados e processamento gráfico. É também fundamental o investimento em sistemas de armazenamento de dados, em licenças e manutenção de *software*, bem como na formação de quadros qualificados, sendo este ultimo bastante significativo [Oliveira *et al.*, 2010].

5.6. Agradecimentos

Agradecemos à EDP e à Artescan pela disponibilização dos dados recolhidos. Agradecemos também ao LNEC, entidade consultora e de acolhimento deste estudo, pela disponibilização dos recursos necessários ao processamento dos dados.

5.7. Referências Bibliográficas

- Baptista, B.; Gonçalves, G.; Berberan, A. (2015) Combinação da Fotogrametria Digital e dos Sistemas de Varrimento Laser Terrestre na inspeção visual assistida de barragens de betão: o caso da barragem do Cabril. Submetido à VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Lisboa.
- Berberan, A.; Ferreira, I.; Portela, E.; Oliveira, S.; Oliveira, A.; Baptista, B. (2011). Overview on Terrestrial Laser Scanning as a Tool for Dam Surveillance. 6th International Dam Engineering Conference. LNEC, Lisboa.
- George, P. L., e Borouchaki, H. (1997). Triangulation de Delaunay et maillage: applications aux éléments finis. Hermes.
- ICOLD (1998) "World register of dams", ICOLD, Paris.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I. (2006). Close range photogrammetry: Principles, methods and applications (pp. 1-510). Whittles.
- Oliveira, S.; Ferreira, I.; Berberan, A.; Mendes, P.; Boavida, J.; Baptista, B. (2010). Monitoring the structural integrity of large concrete dams: the case of Cabril Dam. Hydropower 2010, Lisboa.

- Pottmann, H., Leopoldseder, S., Hofer, M. (2002). Simultaneous registration of multiple views of a 3D object. Photogrammetric Computer Vision. ISPRS Commission III.
- Pulli, K. (1999). Multiview registration for large data sets. Proceedings 2nd international conference on 3D Digital Imaging and Modelling. Ottawa.
- Staiger, R. (2005). The Geometrical Quality of Terrestrial Laser Scanner (TLS), FIG Working Week 2005 and GSDI-8, Cairo, Egypt. April 16-21.
- Shan, J., Toth, C. K. (Eds.). (2008). Topographic Laser ranging and scanning: principles and processing. CRC press.
- Tucker, C. (2002). Testing and verification of the accuracy of 3D laser scanning data. Symposium on geospatial theory, Processing and Applications, Ottawa.

6. Conclusões Finais

Os dois principais objectivos deste trabalho, a modelação tridimensional da deformação do paramento de jusante da barragem do Cabril e a geração de imagens com qualidades métricas, foram atingidos com resultados satisfatórios.

A experiência obtida demonstrou que a instalação de uma unidade de produção de modelos tridimensionais e a aquisição de imagem, no âmbito da monitorização de grandes barragens, podem ser utilizados para o acompanhamento da deformação em paramentos de barragens, com incertezas próximas das especificações de exactidão habituais para este tipo de actividade.

A incerteza posicional e o alcance dos Laser *scanners*, é agora suficiente para a maioria dos trabalhos de engenharia que requerem um sistema de recolha de dados radiométricos e de posicionamento. Além disso, a informação proporcionada pelos SVLT permite adicionar uma riqueza significativa que pode ser explorada para completar a informação que é recolhida tradicionalmente durante as campanhas geodésicas de monitorização dos paramentos e encontros das barragens.

O estudo aplicado à barragem do Cabril e os dois objectivos propostos demonstram que a fusão da informação proporcionada pelas câmaras digitais com a informação proveniente dos SVLT são ferramentas úteis para os sistemas de monitorização e inspecção visual das grandes barragens. A qualidade da informação recolhida pela via aqui descrita, trás um valor adicional aos estudos nas barragens e em outros tipos de estrutura.

A nível pessoal, os conhecimentos adquiridos neste trabalho contribuíram de forma determinante para o desenvolvimento de novas competências, o que possibilitou trabalhar com novas tecnologias, metodologias e procedimentos para a recolha de dados geométricos e radiométricos. O tipo de informação recolhida e todo o processamento executado permitiu-me ganhar conhecimentos para diferentes estudos elaborados em diferentes tipos de estruturas.

Os conhecimentos adquiridos neste trabalho, além de possibilitarem as duas apresentações na VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, permitiram também fazer outras apresentações como: no 3º Encontro Nacional de Geodesia Aplicada (enga 2012, LNEC) sob o tema “Aplicações do laser scanning em obras de engenharia: casos de estudo”; na Feira Ibérica da Indústria Mineira (FIIM 2013, Aljustrel), no 1º Encontro Nacional de Utilizadores Laser Scanner da Leica (Lisboa, 2014), na *Reunión de usuarios HDS* (Madrid, 2014) e no encontro da Hexagon Live (Lisboa, 2015) todas sob o tema “Aplicações da tecnologia laser scan na indústria mineira” (*Aplicaciones del Laser Scanner en la Industria Minera*) e como no encontro da Hexagon Live (Las Vegas, 2015) com o tema “*User’s Perspective on the Versatility of ScanStation C10 for Mining: From Terrain to Industrial Plant Applications*”.

Actualmente e ao longo dos últimos cinco anos tenho aplicado estes conhecimentos em diferentes trabalhos não só a nível da construção, reabilitação e monitorização de estruturas civis e industriais, mas também a nível da engenharia geográfica, civil e mecânica, da arquitectura e da arqueologia, e em diferentes países como Portugal, Espanha, Irlanda, Áustria, Cuba, Angola, Cabo Verde e Moçambique.

7. Bibliografia

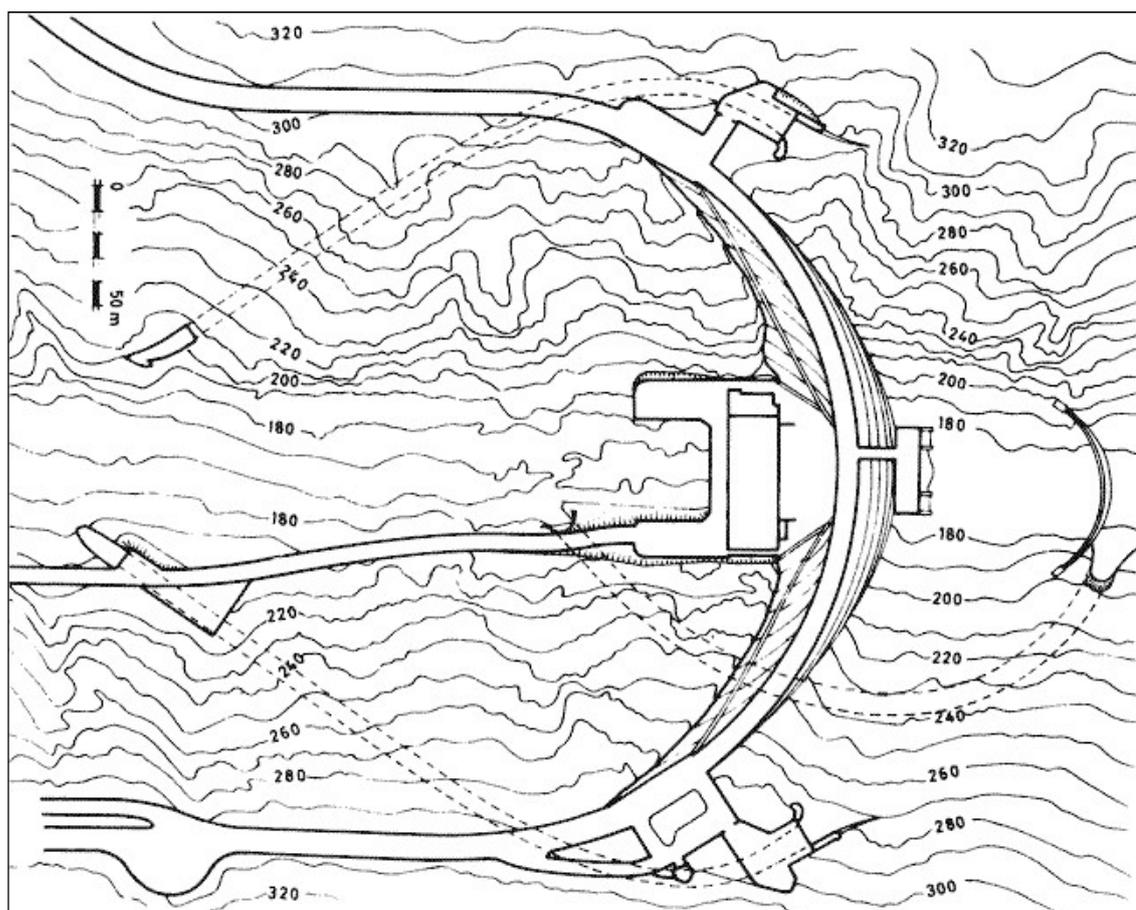
- Aguilera, Diego González; Lahoza, Javier Gómez; Finatb, J. J.; Martíneza, J. Fernández; José, J. San. (2006). *Terrestrial Laser Scanning and low-cost Aerial Photogrammetry in the Archaeological modeling of a jewish tanneries*. Spain: IMAP3D Group, High Polytechnic School, Ávila, Univ. of Salamanca.
- Aguilera, Diego González; González, Pablo Rodríguez; Lahoz, Javier Gómez. (2008). *An automatic procedure for co-registration of terrestrial laser scanners and digital cameras*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing.
- ArteScan, Página da empresa ArteScan, <http://www.artescan.net>.
- ASPRS, Página do *American Society Photogrammetry and Remote Sensing*, <http://www.asprs.org>.
- Atkinson, K.B. (2001). *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles Publishing, Roseleigh House, Latheronwheel, Caithness KW5 6DW, Scotland, U.K. Págs.9-51.
- Baptista, Bruno Baeta. (2008). *Aquisição do Modelo Numérico de um Modelo Físico de uma Barragem por Fotogrametria Digital Terrestre – Relatório de Estágio Curricular em Engenharia Geográfica*. FCTUC, Coimbra.
- Beraldin, J. (2004). - A. *Integration of Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry - The Last Decade and Beyond*. National Research Council Canada, Institute for Information Technology.
- Berberan, António. (2003). *Elementos de Fotogrametria - Aplicada à aquisição de informação geográfica*. Gráfica Europam, Lda., Lisboa.
- Berberan, A., Portela E.A., Boavida, J. (2006). *Assisted visual inspection of dams as a tool for structural safety control. A case study*. Hydro 2006.
- Berberan, A., Marcelino, J., Boavida, J., Oliveira, A. (2007). *Deformation monitoring of earth dams using laser scanner and digital imagery*. Hydro 2007.
- Branco, Patrícia. (2007). *Levantamento Laser Fotogramétrico para Inspeção Visual Assistida da Barragem do Cabril*. F.C.U.L., Lisboa.
- Caprioli, M.; Minchillib, M.; Scognamiglio, A.; Strisciuglio, G. (2003). *Using Photogrammetry and laser scanning in surveying monumental heritage: Le Grotte di castellana*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/W12.
- CNPGB INAG, Página da *Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens do Instituto das Águas*, <http://cnpgb.inag.pt>.
- IFP, Página do *Institut für Photogrammetrie*, <http://www.ifp.uni-stuttgart.de>.
- IGEO, Página do *Instituto Geográfico Português*, <http://www.igeo.pt>.
- IGEOE, Página do *Instituto Geográfico do Exército*, <http://www.igeoe.pt>.
- ISPRS, Página do *International Society Photogrammetry and Remote Sensing*, <http://www.isprs.org>.
- Kersten, Thomas. (2006). *Combination and Comparison of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for the Generation of Virtual Models in Cultural Heritage Applications*. HafenCity University Hamburg, Department Geomatics, Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg, Germany.

- Lichti, D.D., Stewart, M.P., Tsakiri, M., Snow, A.J. (2000). *Calibration and Testing of a Terrestrial Laser Scanner*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam.
- Linder, Wilfried. (2003). *Digital Photogrammetry - Theory and Applications*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York.
- LNEC, Página do *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, <http://www.lnec.pt>.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I. (2006). *Close range photogrammetry: Principles, methods and applications*. Whittles.
- Mills, J., Barber, D. (2004). *Geomatics Techniques for Structural Surveying*. Journal of Engineering.
- Nikon Corporation. (2008). *Guia da Nikon de fotografia digital com a D300 – Câmara digital*, Japão.
- NMCAs, Página do *European National Mapping and Cadastral Agencies*, <http://www.eurogeographics.org>.
- Ramos, José Mora. (2004). *Observação do comportamento estrutural de Barragens de betão - Aspectos práticos*. LNEC, Lisboa.
- Ratcliffe, Simon; Myers, Andrew. (2006). *Scanning in the Open Pit Mining Environment. A Comparison with Photogrammetry*, I-SiTE Product Development White Paper.
- Redweik, Paula. (2004). *Fotogrametria Analítica*. 2ª Edição, A.E.F.C.U.L., Lisboa.
- RIEGL, Página da RIEGL, *RISCAN PRO*, www.reigl.com.
- Sequeira, F., (2006). *A Fotogrametria aplicada ao estudo multi-temporal de movimentos de vertente*. Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra. Departamento de Matemática. Faculdade de Ciências. Universidade de Lisboa.
- Tommaselli, A.M.G. (2003). *Um estudo sobre as técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamento 3D a curta distância*. Geodesia Online, N°4.
- Vosselman, G.; Maas, H-G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, Dunbeath, Caithness KW6 6EY, Scotland, UK.
- Wikipédia, <http://pt.wikipedia.org>.
- Wikipedia, <http://en.wikipedia.org>.
- Wolf, P.R., Dewitt B.A. (2000). *Elements of Photogrammetry, with Applications in GIS*. 3rd edition, Copyrighted Material, McGraw-Hill. United States of America.
- Yastikli, N., Alki, Z. (2005). *Documentation of Cultural Heritage by using Digital Close Range Photogrammetry*, Yildiz Technical University, Civil Engineering Faculty, Division of Photogrammetry and Remote Sensing TR-80750 Besiktas, Istanbul, Turkey.
- 3D RiskMapping. (2008). *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning – Training material based on practical applications*. Leonardo da Vinci, version 4 June.

Anexo A: Pormenor da zona de estudo



Vista geral do paramento de jusante da Barragem do Cabril.



Pormenor da Zona de Estudo - Vista geral em planta.

Anexo B: Características da Barragem do Cabril

UTILIZAÇÕES	Energia
LOCALIZAÇÃO	Distrito - Castelo Branco Concelho - Sertã Local - Cabril Bacia Hidrográfica - Tejo Linha de Água - Rio Zêzere
DADOS GERAIS	Promotor - CPPE, Cª. Portuguesa de Produção de Electricidade, SA Dono de Obra (RSB) - CPPE Projectista - Hidroeléctrica do Zêzere Construtor - Moniz da Maia & Vaz Guedes Ano de Projecto - 1950 Ano de Conclusão - 1954
CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS	Área da Bacia Hidrográfica - 2340 km ² Precipitação média anual - 1300 mm Caudal integral médio anual - 1577000 x 1000 m ³ Caudal de cheia - 4000 m ³ /s Período de retorno - 1000 anos
CARACTERÍSTICAS DA ALBUFEIRA	Nível de pleno armazenamento (NPA) - 294 m Nível de máxima cheia (NMC) - 296,3 m Área inundada ao NPA - 20230 x 1000m ² Capacidade total - 720000 x 1000m ³ Capacidade útil - 615000 x 1000m ³
CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM	Betão - Abóboda de dupla curvatura Altura acima da fundação - 132 m Cota do coroamento - 297 m Comprimento do coroamento - 290 m Fundação - Granito Volume de betão - 360 x 1000 m ³
DESCARREGADOR DE CHEIAS	Localização - Em ambas as margens Tipo de controlo - Controlado Tipo de descarregador - Poço vertical ou inclinado Cota da crista da soleira - 278 m Comportas - 2 Caudal máximo descarregado - 2200 m ³ /s Dissipação de energia - Jacto e fossas de erosão
DESCARGA DE FUNDO	Localização - Talvegue Tipo - Através da barragem Secção da conduta - 3 m Caudal máximo - 200 m ³ /s Controlo a jusante - Válvula dispersora Dissipação de energia - Jacto oco e fossas de erosão
CENTRAL HIDROELÉCTRICA	Tipo de central - Pé de barragem Nº de grupos instalados - 2 Tipo de grupos - Eixo vertical Potência total Instalada - 97 MW Energia produzida em ano médio - 301 GWh
http://cnpqb.inag.pt	

Anexo C: Características do Laser Scan Riegl VZ400

Technical Data RIEGL VZ [®] -400																			
Laser Product Classification	Class 1 Laser Product according to IEC60825-1:2007 The following clause applies for instruments delivered into the United States: Complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 except for deviations pursuant to Laser Notice No. 50, dated June 24, 2007.																		
																			
Range Performance ¹⁾																			
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Long Range Mode</th> <th>High Speed Mode</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Laser Pulse Repetition Rate PRR (peak) ²⁾</td> <td>100 kHz</td> <td>300 kHz</td> </tr> <tr> <td>Effective Measurement Rate (meas./sec) ²⁾</td> <td>42 000</td> <td>122 000</td> </tr> <tr> <td>Max. Measurement Range ³⁾ natural targets $\rho \geq 90\%$ natural targets $\rho \geq 20\%$</td> <td>600 m 280 m</td> <td>350 m 160 m</td> </tr> <tr> <td>Max. Number of Targets per Pulse</td> <td colspan="2">practically unlimited ⁴⁾</td> </tr> <tr> <td>Accuracy ^{5) 7)} Precision ^{6) 7)}</td> <td colspan="2">5 mm 3 mm</td> </tr> </tbody> </table>		Long Range Mode	High Speed Mode	Laser Pulse Repetition Rate PRR (peak) ²⁾	100 kHz	300 kHz	Effective Measurement Rate (meas./sec) ²⁾	42 000	122 000	Max. Measurement Range ³⁾ natural targets $\rho \geq 90\%$ natural targets $\rho \geq 20\%$	600 m 280 m	350 m 160 m	Max. Number of Targets per Pulse	practically unlimited ⁴⁾		Accuracy ^{5) 7)} Precision ^{6) 7)}	5 mm 3 mm	
	Long Range Mode	High Speed Mode																	
Laser Pulse Repetition Rate PRR (peak) ²⁾	100 kHz	300 kHz																	
Effective Measurement Rate (meas./sec) ²⁾	42 000	122 000																	
Max. Measurement Range ³⁾ natural targets $\rho \geq 90\%$ natural targets $\rho \geq 20\%$	600 m 280 m	350 m 160 m																	
Max. Number of Targets per Pulse	practically unlimited ⁴⁾																		
Accuracy ^{5) 7)} Precision ^{6) 7)}	5 mm 3 mm																		
Minimum Range Laser Wavelength Laser Beam Divergence ⁸⁾	1.5 m near infrared 0.35 mrad																		
¹⁾ With online waveform processing. ²⁾ Rounded values. ³⁾ Typical values for average conditions. Maximum range is specified for flat targets with size in excess of the laser beam diameter, perpendicular angle of incidence, and for atmospheric visibility of 23 km. In bright sunlight, the max. range is shorter than under overcast sky.	⁴⁾ Details on request. ⁵⁾ Accuracy is the degree of conformity of a measured quantity to its actual (true) value. ⁶⁾ Precision, also called reproducibility or repeatability, is the degree to which further measurements show the same result. ⁷⁾ One sigma @ 100 m range under RIEGL test conditions. ⁸⁾ Measured at the 1/e ² points. 0.35 mrad corresponds to an increase of 35 mm of beam diameter per 100 m distance.																		
Scanner Performance																			
Scan Angle Range Scanning Mechanism Scan Speed Angular Step Width $\Delta \theta$ (vertical), $\Delta \phi$ (horizontal)	<table border="0"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <i>Vertical (Line) Scan</i> total 100° (+60° / -40°) rotating multi-facet mirror 3 lines/sec to 120 lines/sec $0.0024^\circ \leq \Delta \theta \leq 0.288^\circ$ ⁹⁾ between consecutive laser shots </td> <td style="vertical-align: top; padding-left: 20px;"> <i>Horizontal (Frame) Scan</i> max. 360° rotating head 0°/sec to 60°/sec ¹⁰⁾ $0.0024^\circ \leq \Delta \phi \leq 0.5^\circ$ ⁹⁾ between consecutive scan lines </td> </tr> </table>	<i>Vertical (Line) Scan</i> total 100° (+60° / -40°) rotating multi-facet mirror 3 lines/sec to 120 lines/sec $0.0024^\circ \leq \Delta \theta \leq 0.288^\circ$ ⁹⁾ between consecutive laser shots	<i>Horizontal (Frame) Scan</i> max. 360° rotating head 0°/sec to 60°/sec ¹⁰⁾ $0.0024^\circ \leq \Delta \phi \leq 0.5^\circ$ ⁹⁾ between consecutive scan lines																
<i>Vertical (Line) Scan</i> total 100° (+60° / -40°) rotating multi-facet mirror 3 lines/sec to 120 lines/sec $0.0024^\circ \leq \Delta \theta \leq 0.288^\circ$ ⁹⁾ between consecutive laser shots	<i>Horizontal (Frame) Scan</i> max. 360° rotating head 0°/sec to 60°/sec ¹⁰⁾ $0.0024^\circ \leq \Delta \phi \leq 0.5^\circ$ ⁹⁾ between consecutive scan lines																		
Angle Measurement Resolution	better 0.0005° (1.8 arcsec) better 0.0005° (1.8 arcsec)																		
Inclination Sensors GPS Receiver Compass Internal Sync Timer Scan Sync (optional)	integrated, for vertical scanner setup position, details see page 2 integrated, L1, with antenna optional, for vertical scanner setup position, details see page 2 integrated, for real-time synchronized time stamping of scan data scanner rotation synchronization																		
⁹⁾ Selectable.	¹⁰⁾ Frame scan can be disabled, providing 2D scanner operation.																		
General Technical Data																			
Power Supply Input Voltage Power Consumption External Power Supply	11 - 32 V DC typ. 65 W (max. 80 W) up to three independent external power sources can be connected for uninterrupted operation																		
Main Dimensions Weight Humidity Protection Class Temperature Range Storage Operation Low Temperature Operation ¹¹⁾	Ø 180 x 308 mm (diameter x length) approx. 9.6 kg max. 80 % non condensing @ +31°C IP64, dust- and splash-proof -10°C up to +50°C 0°C up to +40°C: standard operation -20°C: continuous scanning operation if instrument is powered on while internal temperature is at or above 0°C and still air -40°C: scanning operation for about 20 minutes if instrument is powered on while internal temperature is at or above 15°C and still air																		
	¹¹⁾ Insulating the scanner with appropriate material will enable operation at even lower temperatures.																		

in "www.reigl.com".

Anexo D: Características da Câmera Fotográfica Nikon D300

Effective pixels	12.3 million
Image sensor	CMOS sensor, 23.6 x 15.8 mm; total pixels: 13.1 million; Nikon DX format
Image size (pixels)	4,288 x 2,848 [L], 3,216 x 2,136 [M], 2,144 x 1,424 [S]
Sensitivity	ISO 200 to 3200 in steps of 1/3, 1/2 or 1 EV; can also be set to approx. 0.3, 0.5, 0.7 or 1 EV (ISO 100 equivalent) below ISO 200 or to approx. 0.3, 0.5, 0.7 or 1 EV (ISO 6400 equivalent) above ISO 3200
Storage media	Type I CompactFlash memory cards (UDMA compliant); SD memory cards, SDHC compliant
Monitor	3-in., approx. 920k-dot (VGA), low-temperature polysilicon TFT LCD with 170° viewing angle, approx. 100% frame coverage, and brightness adjustment
Exposure metering	3D color matrix metering II, center-weighted and spot metering
Exposure modes	Programmed Auto with flexible program (P); Shutter-Priority Auto (S); Aperture-Priority Auto (A); Manual (M)
Interface	Hi-Speed USB
Power sources	One Rechargeable Li-ion Battery EN-EL3e, optional Multi-Power Battery Pack MB-D10 with one Rechargeable Li-ion Battery EN-EL3e, EN-EL4a/EN-EL4 or eight R6/AA-size alkaline, Ni-MH, lithium or nickel-manganese batteries; Rechargeable Li-ion Battery EN-EL4a/EN-EL4 and R6/AA-size batteries available separately; Battery Chamber Cover BL-3 (available separately) required when using Rechargeable Li-ion Battery EN-EL4a/EN-EL4, AC Adapter EH-5a/EH-5 (available separately)
Dimensions (W x H x D)	Approx. 147 x 114 x 74 mm (5.8 x 4.5 x 2.9 in.)
Weight	Approx. 840 g (1 lb. 14 oz.) without battery, memory card, body cap or monitor cover

in "Nikon Corporation. Guia da Nikon de fotografia digital com a D300 – Câmera digital".