

# **PROJETO ELEVAR – ESTUDO LOCALIZADO DE ESTRUTURAS VERTICAIS COM AERONAVES ROBOTIZADAS. UMA CONTRIBUIÇÃO PARA AS INSPEÇÕES VISUAIS ASSISTIDAS DE OBRAS DE ENGENHARIA**

## **PROJECT ELEVAR– STUDY OF VERTICAL STRUCTURES WITH ROBOTIZED AIRCRAFTS. A CONTRIBUTION TO VISUAL INSPECTIONS OF ENGINEERING WORKS**

Henriques, Maria João; *LNEC, Lisboa, Portugal, mjoao@lnec.pt*  
Pinto, Tiago; *TEKEVER ASDS, Lisboa, Portugal, tiago.pinto@tekever.com*  
Andrade, João; *TEKEVER ASDS, Lisboa, Portugal, joao.andrade@tekever.com*  
Dornellas, Duarte; *ISR/IST, Lisboa, Portugal, duarte.dornellas@tecnico.ulisboa.pt*  
Gonçalves, Jorge; *ISR/IST, Lisboa, Portugal, jorgeguilherme95@gmail.com*  
Ribeiro, Ricardo; *ISR/IST, Lisboa, Portugal, ribeiro@isr.tecnico.ulisboa.pt*  
Bernardino, Alexandre; *ISR/IST, Lisboa, Portugal, alexandre.bernardino@tecnico.ulisboa.pt*  
Santos-Victor, José; *ISR/IST, Lisboa, Portugal, jasv@isr.tecnico.ulisboa.pt*  
Batista, António Lopes; *LNEC, Lisboa, Portugal, albatista@lnec.pt*

### **RESUMO**

O projeto "ELEVAR – Estudo Localizado de Estruturas Verticais com Aeronaves Robotizadas", financiado pelo programa COMPETE, tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma aeronave destinada à realização autónoma de levantamentos fotográficos de superfícies verticais, nomeadamente paramentos de barragens, pilares de pontes e fachadas de edifícios e de monumentos. As fotografias obtidas servirão de apoio às inspeções visuais realizadas no âmbito do acompanhamento e controlo de segurança das obras de engenharia civil. A navegação da aeronave será realizada através de câmaras estereoscópicas, sensores e algoritmos dedicados que permitem o posicionamento autónomo e reconstrução tridimensional das estruturas sem o auxílio de sistemas GNSS em zonas de fraca cobertura de sinal ou em que é necessária alta precisão. Os levantamentos fotográficos serão realizados com uma câmara distinta, de alta definição, auxiliada por um sistema que permite adquirir imagens no instante pretendido. O sistema está a ser desenvolvido por um consórcio liderado pela empresa TEKEVER ASDS, integrando o Instituto de Sistemas e Robótica do Instituto Superior Técnico e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil. A presente comunicação destina-se a apresentar o projeto e os resultados alcançados nos primeiros 18 meses de atividade.

### **ABSTRACT**

The "Project ELEVAR– Study of Vertical Structures with Robotized Aircrafts" financed by the COMPETE program, has as its main objective the development of an aircraft for the autonomous photogrammetric surveys of vertical surfaces, namely of dam walls, bridge pillars and facades of buildings and monuments. The photographs obtained will support the visual inspections carried out in the scope of monitoring and safety control of civil engineering works. The aircraft will navigate through stereoscopic cameras, sensors and dedicated algorithms that allow the autonomous positioning and three-dimensional reconstruction of the structures without the aid of GNSS systems in areas of poor signal coverage or where high precision is required. The photographic surveys will be carried out with a distinct, high-definition camera, aided by a system that allows to acquire images at the desired moment. The system is being developed by a consortium led by the company TEKEVER ASDS, integrating the Institute of Systems and Robotics of Instituto Superior Técnico and the National Laboratory for Civil Engineering. This paper presents the project and the results achieved in the first 18 months of activity.

### **1 - INTRODUÇÃO**

O controlo de segurança de obras de engenharia civil é suportado por um conjunto de atividades de observação, designadamente os elementos recolhidos em inspeções visuais, em conjunto com dados obtidos da instrumentação e de ensaios. Devido às grandes dimensões das estruturas de engenharia civil, as inspeções visuais diretas (em que o especialista fica junto à estrutura sem necessidade de meios auxiliares) ficam limitadas a pequenas áreas. Andaimes, bailéus e câmaras digitais com zoom são alguns dos meios auxiliares que podem ser utilizados para obter informação das zonas normalmente inacessíveis. Veículos aéreos não tripulados (VANT, ou, em inglês, UAV) controlados remotamente, e mais especificamente os modelos multicópteros (vulgo *drone*), transportando câmaras digitais, permitem a obtenção de fotografias a muita curta distância, por um custo relativamente baixo, sendo por isso um equipamento cuja utilização deve ser ponderada pelos peritos em inspeções visuais.

Quando o levantamento fotográfico é efetuado cumprindo regras da Fotogrametria, o processamento das fotografias por *software* adequado permite a geração de nuvens de pontos e ortomosaicos, dois suportes que possibilitam a medição de comprimentos, áreas ou volumes e, no caso dos ortos, também a aplicação de técnicas de processamento digital de imagem para realçar características das superfícies. Para uma boa cobertura fotográfica é importante que o levantamento aéreo cumpra vários requisitos – incluindo sobreposição elevada das fotografias e distância à superfície fotografada com poucas variações – os quais são facilmente atingidos quando o voo é autónomo. Para conseguir esta autonomia em voo as aeronaves recorrem a sinais dos satélites GNSS para determinar a sua posição. Quando há obstruções à receção destes sinais a única opção é a realização de voos em modo manual, totalmente controlados pelo operador, situação que deve ser evitada.

Para ultrapassar as limitações das atuais aeronaves, nomeadamente para poder realizar voos autónomos em locais onde existem obstruções parciais à receção de sinais GNSS, a empresa TEKEVER ASDS, o Instituto de Sistemas e Robótica do Instituto Superior Técnico e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil estão a desenvolver um multicóptero destinado à realização autónoma de levantamentos de superfícies verticais, nomeadamente de paramentos de barragens, pilares de pontes e fachadas de edifícios e de monumentos. A navegação será realizada com o auxílio de câmaras, sensores e algoritmos dedicados nos períodos em que o posicionamento por GNSS não tiver a integridade necessária. O projeto, que recebeu o nome "ELEVAR – Estudo Localizado de Estruturas Verticais com Aeronaves Robotizadas" e é financiado pelo programa COMPETE, propõe ainda a criação de um serviço que envolve a utilização da aeronave e também a criação de produtos fotogramétricos, do interesse dos responsáveis pela segurança de estruturas de engenharia civil. A presente comunicação destina-se a apresentar os desenvolvimentos obtidos nos primeiros 18 meses de atividade do projeto ELEVAR.

## **2 - O CONSÓRCIO DO PROJETO ELEVAR**

O projeto ELEVAR (Henriques *et al.*, 2018) está a ser desenvolvido por três entidades: a empresa TEKEVER ASDS (líder do projeto), o Instituto de Sistemas e Robótica do Instituto Superior Técnico (IST/ISR) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Dada a sua relevância, nesta secção faz-se a apresentação do envolvimento dos três membros do consórcio.

A empresa TEKEVER ASDS, do grupo TEKEVER, desenvolve tecnologias e novos produtos para a área aeroespacial, defesa e segurança, até estes atingirem um nível de maturidade que justifique uma estratégia de comercialização. Para este fim, a TEKEVER ASDS tem apostado em atividades de investigação que permitem acelerar o processo de desenvolvimento de tecnologias tais como sistemas de comunicações espaciais e plataformas aéreas não-tripuladas.

Sendo a entidade líder do projeto, a TEKEVER ASDS é responsável pela gestão e coordenação de tarefas, de modo a garantir um desenvolvimento coerente entre as mesmas dentro do tempo esperado, sendo também responsável pelas atividades de comunicação e divulgação de resultados do projeto. Numa perspetiva mais técnica, a TEKEVER ASDS é responsável pelo desenvolvimento do conceito de operação da plataforma ELEVAR e da aeronave a ser utilizada. Além disso, a empresa tem também a seu cargo a experimentação, integração e verificação dos sistemas e a realização de voos de teste que culminarão numa demonstração em ambiente real para entidades interessadas e relevantes na área cuja problemática é abordada pelo ELEVAR.

O ISR é uma unidade de investigação do IST onde são desenvolvidas atividades de investigação multidisciplinar avançada nas áreas da Robótica e Processamento de Informação, incluindo Sistemas e Teoria do Controlo, Processamento de Sinal, Visão por Computador, Otimização, Inteligência Artificial e Sistemas Inteligentes, bem como a Engenharia Biomédica. Neste projecto, uma equipa do laboratório de Visão por Computador do ISR centrar-se-á na investigação e desenvolvimento de sistemas e algoritmos para a navegação por odometria visual e inercial. Paralelamente, desenvolverá ferramentas para reconstrução 3D das estruturas, para a navegação dos veículos nas proximidades evitando colisões e para a criação de ortomosaicos de análise de imagens das estruturas com vista à deteção de anomalias. Contribuirá também para a especificação e definição dos sistemas de aquisição de imagem, processamento e controlo a utilizar no projeto.

O LNEC tem por missão empreender, coordenar e promover a investigação científica e o desenvolvimento tecnológico, tendo em vista o contínuo aperfeiçoamento e a boa prática da engenharia civil. Tem assim como prioridades a criação, o desenvolvimento e a difusão da investigação em domínios relacionados com a engenharia civil. A intervenção do LNEC incidirá, predominantemente, nas fases inicial e final do projeto. Na fase inicial do projeto apoiará a definição dos requisitos a que a aeronave deverá obedecer, e, na fase final, na verificação da qualidade dos voos e dos produtos gerados. Estando-se atualmente a, sensivelmente, três quartos do projeto, foi só cumprida, como previsto, a primeira parte da intervenção do LNEC. Para além destas duas atividades, o LNEC acompanha o desenvolvimento

do projeto, constituindo-se como entidade privilegiada para estabelecer contactos com entidades que possam colaborar nos testes.

### 3 - NECESSIDADE DE UMA AERONAVE PARA REALIZAR AUTONOMAMENTE LEVANTAMENTOS DE SUPERFÍCIES VERTICAIS

Para realizar voos ditos automáticos, onde a aeronave executa o plano de voo pré-estabelecido, esta tem que integrar um sistema GNSS que inclua não só componentes para receção do sinal, mas também *software* para determinar a sua posição. O plano de voo deve ser estabelecido previamente, e depois de transferido para a aeronave, sendo cumprido integralmente porque a aeronave recorre aos sinais emitidos pelos satélites GNSS para determinar a sua posição em tempo real, com vista a cumprir o trajeto. Há, no entanto, situações em que ocorrem obstruções – parciais ou totais – à propagação dos sinais GNSS pelo que a aeronave tem que ser operada manualmente. Neste tipo de voo é mais difícil o cumprimento do plano de voo, sendo que a solução passa pela realização dos voos em velocidade lenta, o que diminui a área levantada por voo pois a duração deste está limitada pela carga da bateria, e também por obter, por vezes, um número de fotografias muito elevado, frequentemente excessivo, por segurança.

Sobre a regularidade das trajetórias de voos apresentam-se, nos gráficos das Figuras 1, 2 e 3, as posições de uma aeronave do LNEC (DJI Inspire V1) nos instantes em que foram obtidas fotografias durante levantamentos aéreos de superfícies. As posições da aeronave são calculadas pelo *software* que gera as nuvens de pontos e os ortomosaicos. A Figura 1 é relativa a um voo totalmente automático realizado sobre um quebra-mar. As Figuras 2 e 3 são relativas a dois voos operados manualmente para levantamento da mesma superfície vertical, uma secção do paramento de uma barragem, secção esta situada próximo de um dos encontros. O primeiro voo foi realizado em 2017, o segundo dez meses depois, tendo a aeronave sido pilotada pelo mesmo operador, o qual veio a ganhar mais experiência de pilotagem nesse intervalo de tempo. Na Figura 1 é notória a regularidade do voo. Na Figura 3 respeita a um melhor levantamento, já que é mais regular e com menos sobreposição de trajetória, quando comparado com o apresentado na Figura 2, mas é bastante mais irregular que o apresentado na Figura 1. Na Figura 2, e especialmente na Figura 3, pode inferir-se que as trajetórias foram bastante condicionadas pela geometria da encosta.

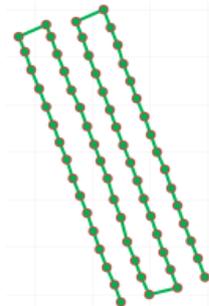


Figura 1 –  
Trajetória de um  
voo automático

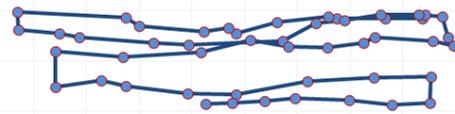


Figura 2 – Trajetória de um voo manual  
realizado em 2017 em frente a uma  
superfície vertical

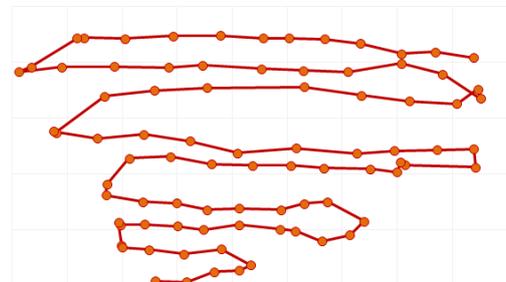


Figura 3 – Trajetória de um voo manual  
realizado 2018 em frente a uma superfície  
vertical

Outro inconveniente dos voos operados manualmente é a alteração imprevista da trajetória por influência do vento, sendo que as rajadas são o fator que mais interferência apresenta. O *software* que controla automaticamente a aeronave durante os voos pré-programados está integrado em controladores eletrónicos que, por sua vez, se conetam a atuadores capazes de corrigir quase instantaneamente e suavemente a direção do voo quando o sistema determina que ocorreu uma alteração da posição em relação ao previsto. Num voo manual o tempo de reação é necessariamente mais longo, frequentemente demasiado, pois envolve não só o tempo de reação do operador, incluindo a capacidade de este responder da forma correta, mas também o tempo gasto na transmissão dos comandos do controlo remoto para a aeronave. Outro elemento que torna os voos próximos de superfícies especialmente perigosos são as alterações à direção de propagação do vento pelos obstáculos que este encontra.

## 4 - CARACTERÍSTICAS DA AERONAVE

### 4.1 - Características físicas

A aeronave está a ser desenvolvida pela TEKEVER ASDS, a entidade líder do projeto. Consiste num quadrirotor de 86 cm de diâmetro (entre rotores) e 46 cm de altura, que pode atingir uma autonomia de 18 minutos para um *payload* de 1 kg utilizando uma bateria de 20000 mAh. Esta aeronave foi sujeita a vários testes internos durante o seu período de desenvolvimento até se garantir que o sistema navega e se comporta nas condições desejadas. Após a finalização dos testes internos, a aeronave foi testada em ambiente operacional na barragem de Fagilde, localizada nas proximidades de Viseu. Na Figura é possível observar a aeronave nos momentos antecedentes a um dos testes realizados nesta barragem. Estes testes foram levados a efeito ainda sem a integração do sistema de navegação por visão, que foi realizada apenas no fim do terceiro (e penúltimo) semestre do projeto. Ainda assim, este teste permitiu validar a navegação manual da aeronave junto a barragens, tendo já como *payload* a câmara de alta resolução necessária para a aquisição de imagens de elevada qualidade.



Figura 4 – Aeronave da plataforma ELEVAR no teste em ambiente de obra

Nos próximos meses do projeto espera-se realizar mais um teste e validação em ambiente operacional já com todos os sistemas integrados. Contudo, ainda será necessária uma posterior adaptação do *software* do piloto automático para que o *drone* siga as coordenadas calculadas e enviadas pelo sistema de visão.

Esta aeronave responde ao conceito de operação, que consiste numa navegação autónoma baseada em visão estereoscópica recorrendo a algoritmos que permitam construir o ambiente tridimensional circundante para auxiliar a navegação do piloto automático nos momentos em que o sinal GNSS seja fraco ou não possa oferecer a integridade necessária. O conceito de operação permitiu definir as seguintes funcionalidades da plataforma ELEVAR:

- *Path Following* – seguimento de coordenadas pré-definidas;
- *Geofencing* – manter autonomamente a aeronave dentro de limites geográficos pré-estabelecidos;
- *Return to Home* – guiamento autónomo e em segurança da aeronave para uma coordenada de aterragem pré-definida;
- *Obstacle Avoidance* – manter uma distância de segurança entre a aeronave e a estrutura a analisar;
- Detecção de anomalias no sistema – monitorização contínua do estado da aeronave e sinalização em caso de alerta.

### 4.2 - Sistema de aquisição de imagens para navegação

A navegação por visão requer sensores que permitam capturar a posição relativa da aeronave em relação à estrutura. Para tal recorreu-se a uma câmara estereoscópica cujas imagens permitem a modelação 3D do ambiente circundante à aeronave, o qual será usado para o cálculo autónomo da posição da aeronave e do mapeamento da estrutura. O sistema desenvolvido, mostrado na Figura 5, inclui duas câmaras monocromáticas (Point Grey BlackFly) e um sensor inercial (XSens MTi), que contém um acelerómetro, um giroscópio e um magnetómetro, sincronizados através de um sinal de *trigger* gerado por um microcontrolador (Arduino Nano). O mesmo controlador é também usado para a interface com o utilizador monitorizando e actuando os interruptores e LEDs no exterior da caixa. O sistema contém ainda uma placa computacional (Nvidia Jetson TX2), responsável pelo processamento *onboard*, e uma bateria LiPo 3S para garantir a alimentação eléctrica do conjunto.



Figura 5 – Protótipo do sistema de sensores

Este sistema foi utilizado para a gravação de um conjunto de dados, tendo para esse efeito sido transportado manualmente sem a utilização da aeronave num ensaio realizado na barragem de Fagilde. Estes dados foram usados para o teste dos algoritmos de navegação que serão descritos mais à frente.

Actualmente, o sistema está a ser adaptado a fim de ser integrado na aeronave. Este processo inclui a redução do seu peso e a sua integração elétrica com a aeronave, tanto para a alimentação de energia como para a partilha e captura de dados sensoriais.

#### 4.3 - Algoritmo de navegação por visão

A navegação por visão usando um sistema estereoscópico calibrado é feita incrementalmente, calculando a transformação entre instantes de captação consecutivos. Realiza-se uma deteção de pontos salientes nas imagens das duas câmaras que são posteriormente associados. A triangulação do mesmo ponto nas duas imagens, juntamente com a informação precisa sobre a geometria de cada câmara, permitem determinar a sua posição 3D incluindo a distância. Gera-se assim uma nuvem de pontos cujo seguimento através da sua redeteção no *frame* seguinte, assumindo que a sua posição é estática, permite estimar a rotação e a translação que o conjunto de câmaras sofreu entre os dois *frames*. A concatenação destas transformações ao longo do tempo para múltiplos frames corresponde à trajetória percorrida pelo conjunto e a nuvem de pontos gerada a um mapa esparso do ambiente observado.

Contudo, existem algumas limitações nos sistemas de visão estereoscópica. Por exemplo, quando o objecto observado está longe, a distância entre câmaras é significativamente inferior à distância ao objeto e as imagens captadas pelas duas câmaras são praticamente iguais, não existindo disparidade entre elas. Nesta situação, os pontos detetados não são trianguláveis uma vez que os raios óticos são paralelos, e a escala do ambiente (e, portanto, da trajetória) deixa de ser observável - o conjunto degenera no caso monocular. A utilização em paralelo de sensores inerciais não só resolve esta limitação como ainda contribui para um aumento global na precisão da trajetória estimada.

Como análise preliminar, utilizou-se o código *open-source* do algoritmo proposto por Mur-Artal e Tardós (2017) aplicado a parte de uma das trajetórias gravadas na barragem de Fagilde, correspondente à subida de um lance de escadas. Obteve-se o resultado que se apresenta em duas vistas na Figura 6, em que o mapeamento esparso se representa a preto e a trajetória estimada a azul.

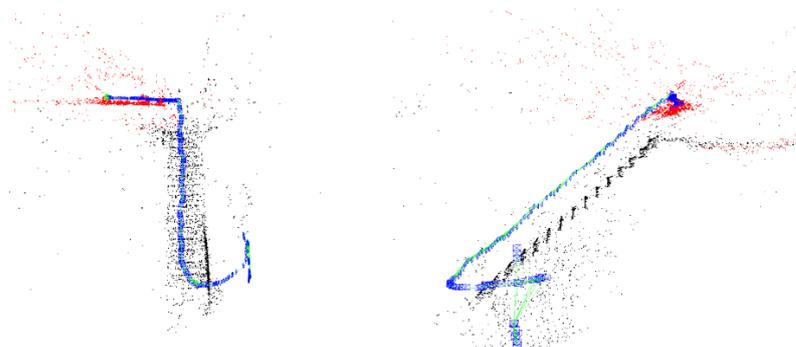


Figura 6 – Trajetória estimada e região mapeada (duas vistas – frontal e lateral) no ensaio realizado na barragem de Fagilde

Esta avaliação, ainda que aparentemente positiva, é apenas qualitativa porque no ensaio realizado na barragem de Fagilde era impraticável obter medições diretas de posição para comparar os resultados obtidos (*ground truth*). De forma a aferir a precisão dos resultados, numa próxima etapa serão usados sistema de captura de movimento (*motion capture*) em ambiente de laboratório. Os dados laboratoriais permitirão fazer uma análise quantitativa da *performance* dos algoritmos desenvolvidos e validar o sistema proposto.

## 5 - PRODUÇÃO DE PRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS PARA A ENGENHARIA CIVIL

Como foi referido na introdução, o projeto ELEVAR contempla também a criação de um serviço destinado a gerar produtos de interesse para os técnicos que avaliem o estado e a segurança de estruturas de engenharia civil. Estes produtos são ortomosaicos e nuvens de pontos. Na fase atual do projeto o módulo destinado a criar ortomosaicos encontra-se quase concluído.

Os ortomosaicos resultam da junção de várias imagens dum mesmo objeto. Para tal é usado o algoritmo *feature based alignment* (Brown e Lowe, 2007), que consiste na detecção de *features* (pontos de interesse) presentes em cada imagem e na correspondência (*matching*) dessas *features* de modo a obter a informação acerca dos pontos comuns onde as imagens se sobrepõem. Obtendo estes *matches*, é possível calcular o modelo geométrico que define a transformação não só dos pontos de uma imagem para a outra como também de todas as imagens para um referencial comum (o referencial do mosaico final). Para melhorar a estimação do modelo, é ainda aplicado um método de otimização bastante robusto chamado *Bundle Adjustment* (Triggs *et al.*, 1999). Depois de otimizada, esta informação geométrica relativa pode ser usada para transformar as coordenadas de cada imagem para coordenadas do mosaico final, obtendo-se assim uma imagem única com informação referente a todas as fotografias individuais.

A Figura 7 apresenta o ortomosaico obtido com imagens captadas pela aeronave em ambiente operacional na barragem de Fagilde. Como se pode observar, os resultados obtidos são bastante satisfatórios. No entanto, existem ainda aspetos a melhorar. É possível verificar pequenas imperfeições na figura tais como descontinuidades em linhas retas, imperfeições nas margens de cada imagem, vulgarmente conhecidas como "costuras" (*seams*), e imperfeições devido a diferenças de iluminação entre imagens que tornam o mosaico final visualmente imperfeito. Para colmatar estes problemas, serão utilizados algoritmos desenhados para harmonizar estas ligações e corrigir as imperfeições de modo a que a imagem final seja mais apelativa visualmente e mais próxima da realidade. Também estão a ser realizados mais testes com diferentes *datasets* de modo a melhorar o método apresentado e, conseqüentemente, o resultado obtido.



Figura 7 – Ortomosaico obtido com imagens captadas pela aeronave em ambiente operacional na barragem de Fagilde

Em estudos de anomalias, e principalmente quando existe uma necessidade de efetuar um acompanhamento de evolução, é importante associar uma métrica às imagens. Esta associação permite que sejam realizadas medições sobre as imagens, designadamente comprimentos, áreas e até, em algumas situações, volumes. Esta métrica permite também posicionar a ocorrência, ou seja, determinar coordenadas (absolutas ou relativas) de elementos relevantes. A exploração de uma imagem, fazendo uso de ferramentas de processamento digital de imagens, permite realçar uma anomalia, facilitando a sua deteção ou o seu acompanhamento. Estas ferramentas vão desde o uso de técnicas de realce de

cores (Figuras 8 a 11) até técnicas mais complexas como são a da classificação orientada por objetos (Figura 12). Na Figura 8 apresenta-se uma secção de um ortomosaico gerado pelo LNEC a partir de fotografias da parede exterior de um edifício. Nas Figuras 9 a 11 (Dias et al., 2017) apresenta-se o resultado da aplicação de técnicas de processamento digital de imagens: i) na Figura 9 o realce de fendas e das zonas sem tinta efetuada sobre a versão monocromática da imagem; ii) na Figura 10 a marcação dos pixéis mais claros com cor azul; e iii) na Figura 11 a marcação dos pixéis mais escuros, que no exemplo correspondem a fendas, com cor vermelha. Este tipo de marcações facilita muito a contagem dos pixéis e o correspondente cálculo de áreas.



Figura 8 – Pormenor de uma parede (imagem retirada de um ortomosaico)



Figura 9 – Aplicação de técnicas de processamento digital de imagens para realce de anomalias

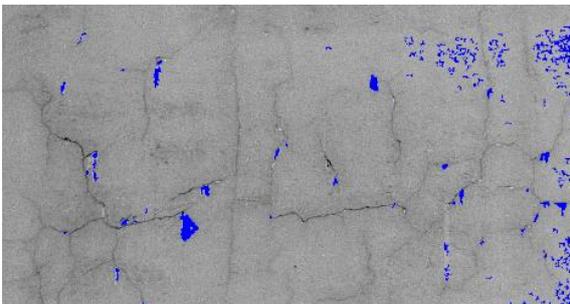


Figura 10 – Áreas mais brancas realçadas a azul

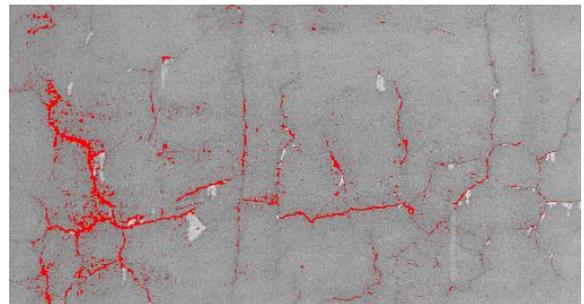


Figura 11 – Áreas mais escuras realçadas a vermelho

A classificação orientada por objetos exige um período de aprendizagem em que o utilizador “ensina” ao *software* as características das anomalias em determinadas zonas. Posteriormente o *software*, de forma automática, procura em toda a imagem zonas com características semelhantes. Esta procura pode não incidir somente na cor mas também na forma. Por exemplo, uma cor escura tanto pode estar associada a uma mancha de humidade (que frequentemente apresenta algumas formas arredondadas) como estar associada a uma fenda (geralmente tem uma distribuição predominantemente linear, com uma largura muito reduzida, por vezes quase sem expressão). Um *software* evoluído deve ser capaz de diferenciar entre uma cor escura que está numa mancha, de uma que esteja ligada a uma fenda. Na Figura 12, retirada de Henriques e Roque (2015), apresentam-se: (A) uma secção de um ortomosaico construído com fotografias do paramento jusante de uma barragem; (B) a delimitação de diferentes zonas com base na forma e na cor; e (C) identificação de áreas com coloração idêntica. Na Figura 13, retirada de Fonseca et al. (2017), uma análise semelhante foi estendida ao paramento de uma barragem.

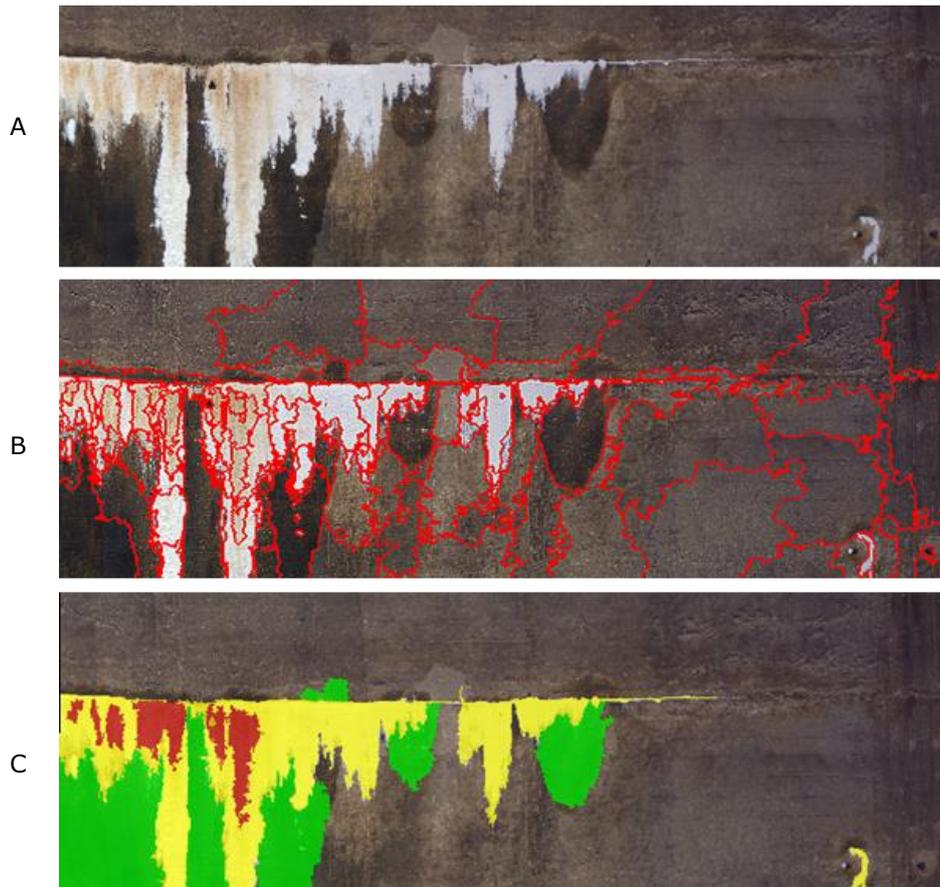


Figura 12 – Exploração de um ortomosaico de pormenor do paramento de uma barragem: A – imagem original, B – delimitação automática de zonas com iguais características de cor; C – preenchimento destas zonas em função da cor base: verde - zonas molhadas; amarelo – zonas com carbonato de cálcio; ocre – carbonato de cálcio manchado com cor castanha

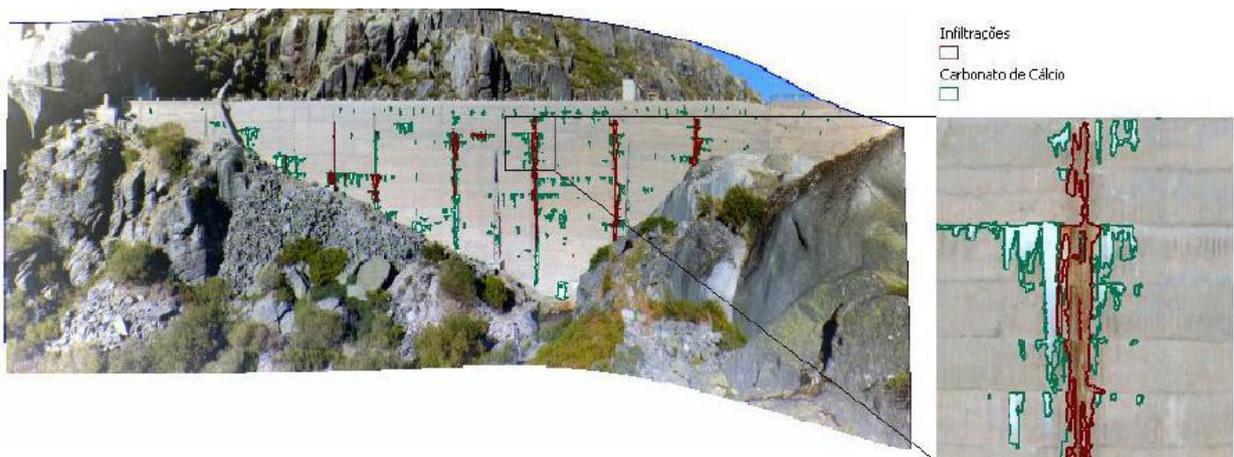


Figura 13 – Exploração de um ortomosaico do paramento de uma barragem: marcação automática de zonas que mostram a ocorrência de infiltrações (cor escura) e deposição de carbonato de cálcio (cor branca)

## 6 - CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se o projeto "ELEVAR", os seus objetivos e as contribuições esperadas de cada um dos parceiros do consórcio. Descreveu-se a aeronave desenvolvida no âmbito do projeto, assim como o sistema de sensores para navegação visual e os algoritmos de navegação e de criação de ortomosaicos. Demonstraram-se as capacidades da aeronave em voos de ensaio realizados, alguns deles numa obra, a barragem de Fagilde. Nesses mesmos voos foram captadas múltiplas imagens dos

paramentos da barragem, com vista à construção de ortomosaicos. Foram ainda adquiridos dados com o sistema de sensores para navegação, ainda que preliminarmente de forma manual (i.e., sem utilização da aeronave). Com estes dados demonstrou-se, de forma qualitativa, a eficácia dos algoritmos de navegação por visão.

Estão a ser realizados testes em laboratório para aferir quantitativamente a precisão do sistema de navegação visual. Os algoritmos de construção de mosaicos estão a ser melhorados, para eliminar algumas pequenas imperfeições ainda existentes. Estando-se a iniciar o último semestre do projeto, está a ser feita a integração do sistema de sensores com a aeronave, de forma a poder cooperar mais tarde no controlo da mesma. O objetivo será evitar o choque da aeronave com obstáculos, nomeadamente com a própria estrutura que está a ser levantada.

Na fase final do projeto serão realizados testes em obras com características diversificadas. Para além de barragens, serão também consideradas pontes, viadutos e postes, de forma a contemplar diversos ambientes com características muito próprias e anomalias variadas. Serão também efetuadas apresentações nas diversas entidades que poderão beneficiar com a tecnologia em desenvolvimento.

## AGRADECIMENTOS

O projeto “ELEVAR – Estudo Localizado de Estruturas Verticais com Aeronaves Robotizadas” é financiado pela Comissão da União Europeia, no âmbito do programa Portugal 2020, através do contracto de I&D em Co-Promoção com o número 17924 (ELEVAR).

## REFERÊNCIAS

- Blösch, M., Weiss, S., Scaramuzza, D., e Siegwart, R. (2010). Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments. Em *Robotics and automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference*, 21–28. IEEE.
- Brown, M.R., e Lowe, D.G. (2007). Automatic panoramic image stitching using invariant features. *International Journal of Computer Vision* 74(1), 59–73.
- Dias, J.M., Matias, L.M.; Henriques, M.J., Ribeiro, M.S. e Santos, T.O. (2017). Combined use of non-destructive methods for the assessment of facades anomalies of heritage buildings with structural concrete elements. *Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Engineering Surveying - INGEO 2017*, Lisboa.
- Fonseca, A., Roque, D., Henriques, M.J., Muralha, J. (2017). Visual inspection automation with image processing. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Engineering Surveying - INGEO 2017*, Lisboa.
- Geiger, A., Lenz, P., e Urtasun, R. (2012) Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite. Em *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference*, 3354–3361. IEEE.
- Henriques, M.J., e Roque, D. (2015). Unmanned aerial vehicles (UAV) as a support to visual inspections of concrete dams. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International DAM WORLD Conference*, Lisboa.
- Henriques, M.J., Pinto, T., Dornellas, D., Gonçalves, J., Ribeiro, R., Bernardino, A. e Santos-Victor, J. (2018). Projeto ELEVAR – Estudo Localizado de Estruturas Verticais com Aeronaves Robotizadas. *Atas da IX Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*, Amadora.
- Maimone, M., Cheng, Y., Matthies, L. (2007). Two years of visual odometry on the Mars exploration rovers. *Journal of Field Robotics*, 24(3):169–186.
- Mur-Artal, R., Tardós, J. (2017). ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo and RGB-D cameras. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(5):1255–1262.
- Szeliski, R. (2006). Image alignment and stitching: A tutorial. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, vol. 2, Issue 1, 1--104. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1561/06000000009> .
- Triggs, B., McLauchlan, P.F., Hartley, R. I., Fitzgibbon, A.W. (2000). Bundle adjustment - a modern synthesis. Em *Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms: Theory and Practice*, ser. ICCV '99. London, UK, Springer-Verlag, 298--372. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=646271.685629>.