



AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE TÉCNICAS DE RECONSTITUIÇÃO 3D APLICADAS A MODELOS FÍSICOS DE QUEBRA-MARES

Rui Capitão, Rute Lemos, Conceição J.E.M. Fortes, Ricardo Jónatas
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil 101, 1700-066 Lisboa
rcapitao@lnec.pt, rlemos@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, rjonatas@lnec.pt

Resumo

A avaliação da evolução dos danos causados pela agitação incidente em modelos físicos de quebra-mares de taludes pode ser efetuada através da quantificação de movimentos e quedas dos elementos do manto resistente (métodos tradicionais), ou pela determinação de volumes e profundidades erodidas entre levantamentos consecutivos dos respetivos taludes (métodos mais atuais). Para se efetuarem esses levantamentos dos taludes, podem aplicar-se técnicas fotogramétricas com sensores *RGB*, sensores de profundidade baseados na metodologia *ToF (Time of Flight)* e sensores de laser *LiDAR (Light Detection And Ranging)*.

No presente trabalho, aplicam-se essas técnicas ao modelo físico do quebra-mar do porto da Ericeira, que está presentemente a ser ensaiado no LNEC, e avalia-se, comparativamente, o respetivo desempenho, adequabilidade e usabilidade na determinação da evolução dos danos, identificando vantagens e desvantagens de cada uma destas técnicas.

Introdução

Em geral, nos ensaios em modelo físico de quebra-mares de talude, a quantificação dos movimentos e quedas dos elementos que os constituem é tradicionalmente efetuada mediante inspeção visual durante o período de ensaio. Esta técnica apresenta, porém, algumas limitações, entre as quais o facto de estar muito dependente da experiência do observador.

Como alternativa, é possível efetuar a determinação de volumes e profundidades de erosão/acreção no manto do talude, com base na realização de levantamentos consecutivos da envolvente do talude. Esses levantamentos podem ser realizados de forma não intrusiva, recorrendo a técnicas fotogramétricas mediante utilização de diversos tipos de sensores de posição, de imagem e de laser. Dependendo das condições de levantamento e da metodologia de pós-processamento das nuvens de pontos obtidas, estas técnicas permitem obter modelos tridimensionais de superfície, perfis e/ou volumes de erosão ou acreção, com maior ou menor precisão. Além disso, também a facilidade de utilização em ambiente laboratorial é um fator a ter em consideração na utilização deste tipo de metodologias, e depende da técnica utilizada.

No presente trabalho, foram testadas 4 técnicas de reconstrução 3D no modelo físico 3D do quebra-mar do porto da Ericeira, atualmente em exploração no LNEC. O objetivo deste estudo é avaliar a melhor técnica a aplicar na identificação e medição de deslocamentos de blocos em modelo físico.

O modelo físico 3D do quebra-mar da Ericeira

O modelo físico 3D do quebra-mar de proteção do porto da Ericeira, Portugal, foi construído no tanque de ondas TO12 do Pavilhão de Hidráulica Marítima do LNEC. Este tanque tem dimensões 46.6 m x 20.6 m, e está equipado com 2 geradores de ondas irregulares móveis com 6.0 m de comprimento cada, para profundidades até 0.75 m (Figura 1).

O modelo físico foi construído e operado de acordo com a lei da semelhança de *Froude* com uma escala geométrica de 1:75. A secção ensaiada é um quebra-mar de taludes, com um núcleo trapezoidal coberto por um filtro composto por 2 camadas de rocha. O manto resistente nesta secção transversal é constituído por tetrápodes com peso de 300 kN, entre +10.2 m(ZH) e -4.5 m(ZH), com uma porosidade de cerca de 40% desenvolvendo-se numa inclinação de 2:3. A cabeça contém cubos *Antifer* de 550 kN, colocados regularmente.

Para o alinhamento das nuvens de pontos obtidas com as várias técnicas, foram colocados pontos de controlo no coroamento e no chão do modelo na zona do pé dos taludes, Figura 1b.

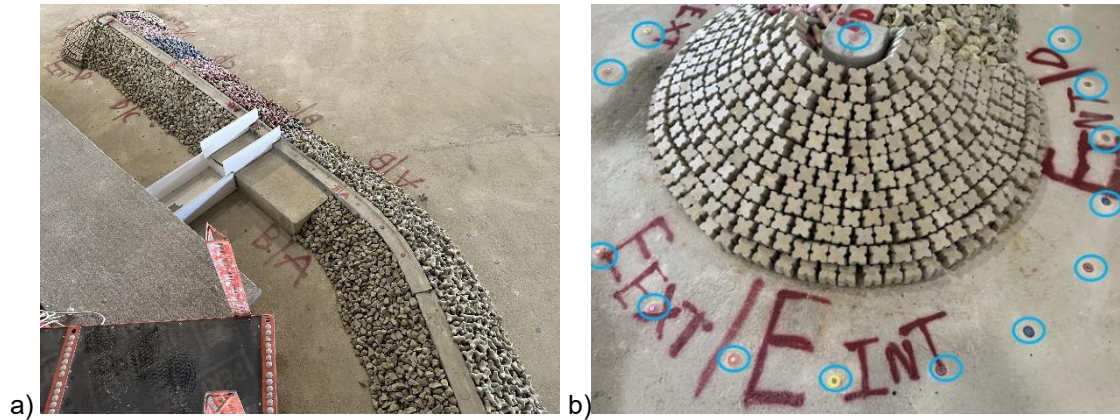


Figura 1. Modelo 3D do quebra-mar do porto da Ericeira. a) Aspeto geral do tanque com o modelo; b) Localização dos pontos de controlo junto à cabeça.

Principais características dos sensores e técnicas de reconstrução 3D

As 4 metodologias/técnicas de levantamento da envolvente foram aplicadas ao modelo 3D do quebra-mar no início e após uma série de ensaios (conjunto de ensaios com o mesmo período de onda e alturas significativas de onda crescentes). Em detalhe, foram utilizadas as seguintes técnicas e sensores para reconstituição 3D do modelo físico, Figura 2:

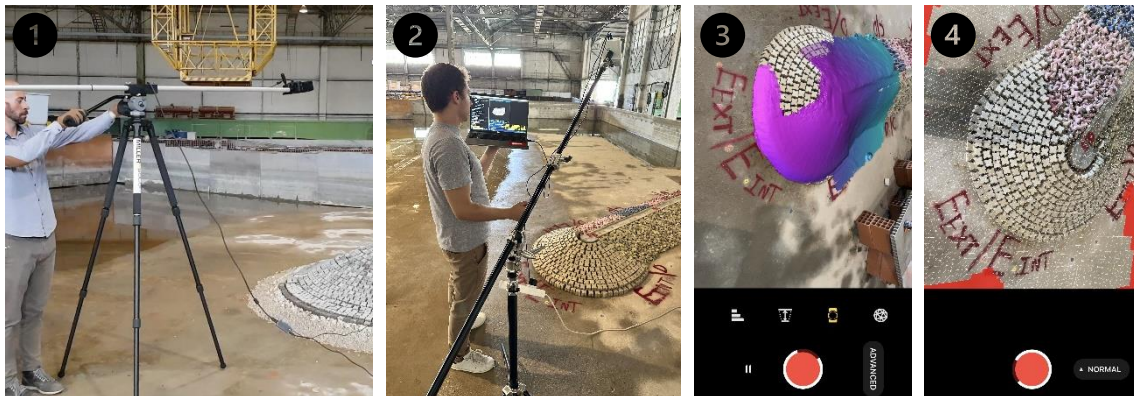


Figura 2. Aspetos das quatro técnicas utilizadas (Kinect, Azure, Fotogrametria e LiDAR)

1 **Kinect** – Sensores de profundidade e RGB do Microsoft Kinect 2.0. Os levantamentos com este equipamento são realizados, de forma estacionária e morosa, a uma distância de 2.0 m, usando o software Microsoft Kinect Fusion (Izadi *et al.*, 2011), sendo o pós-processamento realizado com o software *Cloud Compare*;

2 **Azure** – Sensores de profundidade e RGB do Microsoft Kinect Azure (versão melhorada do anterior), incorporando também os sensores de profundidade, IR e RGB, mas de tipos mais refinados e mais precisos. Os levantamentos com este equipamento são realizados através de varrimento rápido com o utilizador a deslocar-se sobre a área coberta pelo modelo, usando o *kit* de desenvolvimento Azure Kinect SDK (Microsoft, 2023). Trata-se de levantamentos com um equipamento de baixo custo e envolvem uma leitura bastante rápida à medida que o utilizador se desloca pela área considerada. O pós-processamento é efetuado mediante uso de um conjunto de scripts muito recentes, atualmente em desenvolvimento na plataforma *GitHub*;

3 Fotogrametria – Sensor RGB (smartphone iPhone 14 Pro). O levantamento é feito com captura de fotos oblíquas em torno do modelo físico, com ângulos e posições diferentes com grande sobreposição entre fotos (+80%) com o utilizador deslocando-se sobre a área coberta pelo modelo, quer em planta quer em altimetria. Estas capturas permitiram obter fotografias oblíquas em torno do modelo físico, com os dois dispositivos, para diferentes ângulos e posições. A câmara do smartphone tem resolução de 12 M-pixels. Para a reconstrução 3D a partir destas fotografias, foi utilizado o software comercial Metashape (Agisoft, 2021).

4 LiDAR – Sensor LiDAR de baixo custo do smartphone iPhone 14 Pro. Trata-se de um simples smartphone possuidor de um sensor LiDAR de baixo-custo e a aplicação 3dScanner iOS (Laan Labs, 2021), para efetuar a digitalização 3D do mesmo modelo. A captura com este sensor é efetuada pelo utilizador também ao deslocar-se sobre a área coberta pelo modelo, sob instruções e controlo em tempo real da aplicação iOS 3dScanner. Tanto quanto é do conhecimento dos autores deste trabalho, esta metodologia não foi levada a cabo em nenhum trabalho científico, mas à primeira vista apresenta como grandes vantagens a sua portabilidade, facilidade de utilização e custo reduzido.

Resultados

Na Figura 3 mostram-se as nuvens de pontos obtidas com as quatro técnicas consideradas.



Figura 3. Nuvens de pontos obtidas com as 4 técnicas (Kinect, Azure, Fotogrametria e LiDAR)

De modo a avaliar a qualidade dos levantamentos obtidos com as quatro técnicas, foi utilizado o parâmetro de desvio RMSE (*root mean square error*), quando do alinhamento das nuvens com GCP (pontos de controlo). O **Error! Reference source not found.** apresenta os valores de RMSE obtidos para as diferentes nuvens alinhadas com os pontos de controlo, realizados com estação total Leica TCR307, e para as três primeiras técnicas.

Quanto à 4^a técnica (LiDAR), os resultados obtidos, nas condições descritas neste trabalho, não são aceitáveis quanto à definição e precisão mínimas, pelo que não foram apresentados naquele quadro. No entanto, é de salientar, que a utilização desta técnica é muito rápida, muito fácil e sem custos, pelo que pode ser usada como primeiro indicador da evolução dos danos no modelo durante uma série de ensaios.

Quanto às três técnicas (Kinect, Azure e Fotogrametria com sensor do Iphone14 Pro) mostraram produzir resultados muito bons e comparáveis, Quadro 1. Com efeito, obtiveram-se excelentes valores de RMSE, da mesma ordem de grandeza (inferiores a 0.0048), o que mostra que com qualquer uma das técnicas foi possível realizar o alinhamento das nuvens com boa qualidade.



Quadro 1 – RMSE, número de pontos da nuvem e número de pontos de controlo, obtidos com as diferentes técnicas

	1 Kinect	2 Azure	3 Fotogrametria
RMSE	0.0048	0.0046	0.0048
Nº de pontos da nuvem	3 000 000	2 465 586	5 884 065
Nº de Pontos de controlo	18	13	19

Com as técnicas Kinect e Azure (com sensores de profundidade), foram obtidas nuvens de pontos com a mesma ordem de grandeza em termos de número de pontos. A qualidade do alinhamento com Azure foi ligeiramente melhor, atendendo a que se obteve um RMSE menor, usando menos pontos de controlo. A técnica Azure apresenta ainda a vantagem da facilidade de utilização/manuseamento face à técnica Kinect.

No entanto, a qualidade do RGB obtido com Azure mostrou-se bastante inferior a qualquer uma das outras três técnicas, o que dificultou a seleção dos pontos de controlo. Além disso, o pós-processamento das nuvens de pontos obtidas a partir do Azure (com captura em movimento) exige uma curva de aprendizagem mais elevada do software de processamento, dado tratar-se de software bastante recente e sem interface amigável. Já no que diz respeito ao tempo de pós-processamento das nuvens obtidas com o Kinect este é feito em tempo real, através do software KinectFusion usado na aquisição, o que se traduz numa grande vantagem.

Quanto à técnica Fotogrametria (com imagens RGB) foi, sem dúvida, a que conduziu a uma nuvem com maior número de pontos. Mas o elevado tempo de pós-processamento associado, atendendo a que se trata de um método fotogramétrico aliado ao facto de se ter de usar um produto comercial (Agisoft Metashape), cuja licença de utilização exige investimento inicial mais elevado constituem desvantagens desta técnica face às técnicas Kinect e Azure.

Em conclusão, as técnicas Kinect, Azure e Fotogrametria produziram resultados de elevada qualidade e revelaram (mesmo a LiDAR), no âmbito deste trabalho, espaço para melhorias, o que constituirá trabalho futuro.

Agradecimentos

Agradece-se aos projetos financiados pela União Europeia C2IMPRESS (Horizonte Europa, GA n.º 101074004) e LIFE Garachico (LIFE20 CCA/ES/001641) e ao projeto financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia DikesFPro (PTDC/ECI-EGC/7739/2020). Agradece-se também a colaboração de Jan Hilário no levantamento dos pontos de controlo com estação total.

Referências Bibliográficas

- Agisoft (2021). Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.7. Agisoft LLC. https://www.agisoft.com/pdf/Metashape-pro_1_7_en.pdf.
- Izadi, S.; Kim, D.; Hilliges, O.; Molyneaux, D.; Newcombe, R.; Kohli, P.; Shotton, J.; Hodges, S.; Freeman, D.; Davison, A.; Fitzgibbon, A. (2011) - Kinect Fusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera.
- Laan Labs (2021). 3d Scanner App™. LIDAR Scan in 3D. <https://apps.apple.com/us/app/3d-scanner-app/id1419913995>.
- Microsoft (2023). Azure Kinect DK documentation. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/>.