



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO DANO EM MODELOS FÍSICOS DE QUEBRA-MARES DE TALUDES

**Levantamentos tridimensionais de superfície com sensor
de posição Kinect e pós-processamento de nuvens de pontos**



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO DANO EM MODELOS FÍSICOS DE QUEBRA-MARES DE TALUDES

**Levantamentos tridimensionais de superfície com sensor
de posição Kinect e pós-processamento de nuvens de pontos**

COASTLIFE – Melhoria das estruturas costeiras e portuárias
na promoção da resiliência costeira e da biodiversidade

Lisboa • dezembro 2025

I&D HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 360/2025 – DHA/NPE

Título

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO DANO EM MODELOS FÍSICOS DE QUEBRA-MARES DE TALUDES

Levantamentos tridimensionais de superfície com sensor de posição Kinect e pós-processamento de nuvens de pontos

Autoria

DEPARTAMENTO HIDRÁULICA E AMBIENTE

Rute Lemos

Técnica Superior, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Rui Reis

Técnico Superior, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Conceição Juana Fortes

Investigadora Principal, Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Colaboração

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

Carolina Martínez

Bolseira de Investigação, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 360/2025

Proc. 0603/1101/24027

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO DANO EM MODELOS FÍSICOS DE QUEBRA-MARES DE TALUDES

Levantamentos tridimensionais de superfície com sensor de posição Kinect e pós-processamento de nuvens de pontos

Resumo

Este relatório tem como objetivo descrever os procedimentos para o pós-processamento de nuvens de pontos de superfície obtidas através dos levantamentos tridimensionais com o sensor de posição Kinect V2 em ensaios em modelo físico de quebra-mares. É também objetivo descrever a metodologia para a determinação do volume erodido e subsequentemente, a estimativa do número de blocos removidos do manto, bem como o cálculo do parâmetro adimensional do dano (S).

A metodologia desenvolvida, que inclui a comparação de nuvens de pontos, permitiu ainda avaliar zonas do manto resistente com blocos que sofreram movimentos imperceptíveis ou quedas não detetáveis a olho nu, bem como quantificar translações de elementos da superestrutura.

Palavras-chave: Modelo físico / Sensor Kinect / Nuvens de pontos / Evolução do dano / Quebra-mar

METHODOLOGY FOR EVALUATING DAMAGE EVOLUTION IN PHYSICAL MODELS OF RUBBLE-MOUND BREAKWATERS

Three-dimensional surface surveys with Kinect position sensor and post-processing of point clouds

Abstract

This report aims to describe the methodology used for post-processing surface point clouds obtained through three-dimensional surveys with the Kinect V2 position sensor in tests on a physical model of breakwaters. It also aimed to determine the eroded volume and subsequently, to estimate the number of blocks removed from the armour layer, as well as to calculate the dimensionless damage parameter (S).

The methodology, which involved the comparison of point clouds, also enabled the assessment of armour layer zones where blocks underwent imperceptible displacements or falls not visible to the naked eye, as well as quantifying translations of superstructure elements.

Keywords: Physical model / Kinect sensor / Point clouds / Damage evolution / Breakwater

Índice

1	Introdução	1
1.1	Considerações gerais	1
1.2	Objetivos	4
1.3	O caso de estudo do quebra-mar do porto da Ericeira.....	5
2	Metodologias de aquisição e coordenação de nuvens de pontos	7
2.1	Aquisição das nuvens de pontos	7
2.2	Coordenação das nuvens de pontos dos levantamentos	10
3	Metodologias de análise das nuvens de pontos: determinação de parâmetros.....	18
3.1	Metodologia para a determinação do volume erodido.....	18
3.2	Procedimentos para a estimativa do número de blocos removidos e para o cálculo do parâmetro adimensional do dano	20
4	Exemplos de aplicação de levantamentos tridimensionais na avaliação da estabilidade	22
5	Conclusões.....	26
	Referências bibliográficas	28

Índice de figuras

Figura 1.1 – Exemplos de quebra-mares de talude a) Quebra-mar oeste do porto de Sines b) Quebra-mar do porto da Ericeira	1
Figura 1.2 – Perfilador mecânico automatizado (Hofland, 2011)	2
Figura 1.3 – Área erodida (A_e) e profundidade erodida (d_e)	3
Figura 1.4 – Determinação de volumes: Vermelho: Depósito; Azul: Erosão	4
Figura 1.5 – Vista geral do tanque de ondas irregulares e do modelo físico do quebra-mar	5
Figura 1.6 – Perfis-tipo do tronco (a) e da cabeça (b) do quebra-mar	6
Figura 2.1 – Sensor de Posição Kinect (a) e interface do software para realização dos levantamentos (b)	7
Figura 2.2 – Nuvens de pontos relativas aos levantamentos no início (a) e no final da série de ensaios (b)	8
Figura 2.3 – Pontos de controlo	9
Figura 2.4 – Carregamento de uma nuvem de pontos para o espaço de trabalho do <i>CloudCompare</i>	10
Figura 2.5 – Menu para definição do número de pontos da nuvem	11
Figura 2.6 – Escolha do número de pontos ou da densidade da nuvem	11
Figura 2.7 – Limpeza de pontos da nuvem externos ao levantamento (a). Nuvem limpa (b)	12
Figura 2.8 – Lista de pontos de controlo (a) e sua representação gráfica numa folha de cálculo excel (b)	13
Figura 2.9 – Pontos de controlo a utilizar na coordenação da nuvem de pontos	14
Figura 2.10 – Janela para introdução das coordenadas	14
Figura 2.11 – Seleção, com o rato, dos pontos de controlo escolhidos para alinhar	15
Figura 2.12 – Preenchimento das coordenadas de referência dos pontos de controlo escolhidos	15
Figura 2.13 – Erro associado ao alinhamento	16
Figura 2.14 – Aceitação do erro obtido e conclusão do alinhamento	16
Figura 2.15 – Informação sobre o erro final do alinhamento	17
Figura 3.1 – Seleção das nuvens de pontos a comparar	18
Figura 3.2 – Seleção do levantamento inicial, levantamento final e espaçamento da malha	19
Figura 3.3 – Cálculo das diferenças de volume e criação do mapa de diferenças	19
Figura 3.4 – Mapa de diferenças. Vermelho: Depósito; Azul: Remoção	20
Figura 3.5 – Sequência de procedimentos para a determinação do parâmetro adimensional do dano e para a estimativa do número de blocos removidos	21
Figura 4.1 – Nuvem de pontos do modelo físico da reparação do quebra-mar principal de Ponta Delgada	22
Figura 4.2 – Nuvem de pontos relativa à zona A (a) e mapa de diferenças de cotas (b) no final Rumo Sul no final da série de ensaios de Preia-mar	22
Figura 4.3 – Nuvem de pontos do modelo físico da aplicação do molhe leste do porto de Sines	23
Figura 4.4 – Nuvem de pontos relativa à cabeça do molhe, após uma série de ensaios com o nível de PM e $T_p=20$ s (a) Mapa de diferenças entre as nuvens de pontos inicial e final (b) Perfil P10 (c)	23
Figura 4.5 – Nuvem de pontos no final de uma série de ensaios com $T_p=12$ s (a) Perfil P2 (b)	24
Figura 4.6 – Levantamento tridimensional de uma secção do quebra-mar (a). Diferenças das nuvens de pontos com vista à quantificação de translações dos blocos do coroamento (b)	25

1 | Introdução

1.1 Considerações gerais

Devido à sua extensa zona costeira, Portugal possui um número significativo de estruturas de proteção marítima, sendo os quebra-mares de talude as mais comuns (Figura 1.1).



Figura 1.1 – Exemplos de quebra-mares de talude a) Quebra-mar oeste do porto de Sines b) Quebra-mar do porto da Ericeira

De modo a otimizar o dimensionamento hidráulico destas estruturas, recorre-se com frequência a ensaios em modelo físico reduzido onde é avaliada a agitação, o espraio e o galgamento no quebra-mar, bem como a sua estabilidade hidráulica. Neste último caso, o dano do manto resistente é vulgarmente caracterizado através de parâmetros adimensionais tais como o parâmetro adimensional do dano, (S) (Broderick e Ahrens, 1982) e a profundidade do dano (E) (Hofland et al., 2014 e Hofland et al., 2017).

- O **parâmetro adimensional do dano**, S , de um perfil do manto resistente, é determinado com base na relação entre a área erodida (A_e) desse perfil e o quadrado do diâmetro nominal mediano do bloco, Dn_{50}

$$S = A_e / Dn_{50}^2 \quad (1)$$

Uma forma simplista de definir este parâmetro é dizer que ele traduz o número de blocos que foram removidos da zona erodida do perfil.

O dano associado a um determinado trecho de estrutura é representado pela média dos S obtidos nos n perfis levantados ($\bar{S}$).

- A **profundidade do dano** é calculada com base na maior profundidade erodida num perfil do manto resistente

$$E = \max(d_e) / Dn_{50} \quad (2)$$

- onde $\max(d_e)$ é a máxima profundidade erodida, d_e , medida perpendicularmente à espessura do manto) obtida em n perfis de um trecho com uma determinada largura.

Em ambos os casos, o levantamento destes perfis é tradicionalmente feito com perfiladores mecânicos, os quais apenas permitem o levantamento de um limitado número de perfis (Figura 1.2).



Figura 1.2 – Perfilador mecânico automatizado (Hofland, 2011)

A Figura 1.3 ilustra o conceito de área erodida (A_e) e de profundidade erodida (d_e) num determinado perfil.

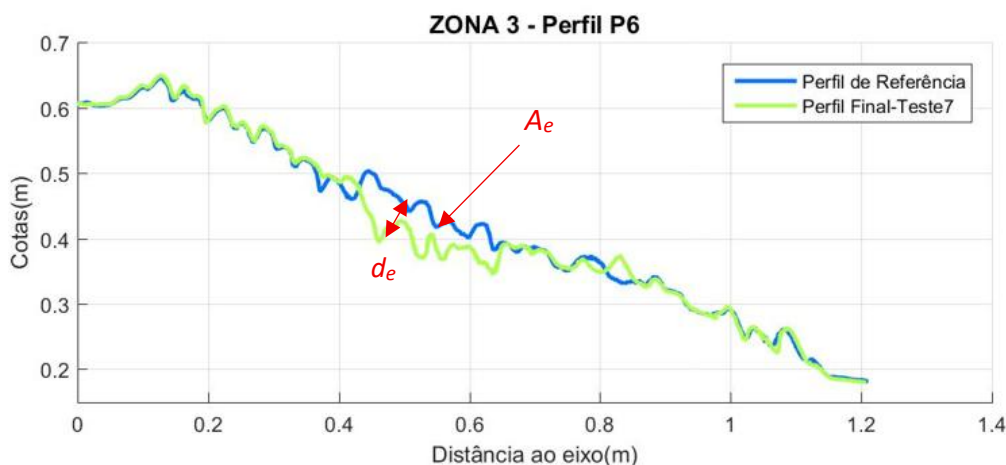


Figura 1.3 – Área erodida (A_e) e profundidade erodida (d_e)

Com o aparecimento dos métodos de levantamento tridimensional da envolvente, nomeadamente a Fotogrametria e o LiDAR (*laserscan* e sensores de posição, por exemplo), tornou-se possível “fatiar” a envolvente do manto resistente, permitindo a avaliação da área erodida de um maior número de perfis.

Não obstante esta melhoria, devido à existência, sempre presente, de uma descontinuidade entre perfis, e por vezes, uma grande variabilidade no dano entre os perfis levantados, o erro na avaliação do parâmetro adimensional, S , ou da profundidade do dano, E , é tanto maior quanto menor for o número de perfis levantados.

Os levantamentos tridimensionais da envolvente do manto, para além da extração de perfis, permitem também a comparação do volume erodido entre ensaios de agitação (Figura 1.4).

O dano do manto resistente pode ainda ser caracterizado através da contagem do número de blocos removidos do manto (método tradicional), traduzido em parâmetros como:

- $D_N\%$ - Percentagem de quedas, relativa ao número total de blocos de uma determinada zona ou trecho do quebra-mar (SPM, 1984);
- Nod - número de blocos removidos numa faixa do manto com a largura do diâmetro nominal do bloco (D_n), (CEM, 2011)

$$Nod = \frac{N^{\circ} \text{ blocos removidos}}{\text{largura da secção}/D_n} \quad (3)$$

Se, por um lado, o método tradicional de contagem de blocos não é viável sempre que o número de blocos removidos se torne incontável, por outro lado, a avaliação da erosão através de perfis singulares também não permite a caracterização plena dos estragos ocorridos num determinado trecho do quebra-mar.

Assim sendo, a avaliação do dano através do volume erodido da seção testada entre ensaios consecutivos, parece ser o método mais adequado. O cálculo do volume erodido é feito através da comparação nuvens de pontos das envolturas do manto, entre levantamentos tridimensionais consecutivos (Figura 1.4).

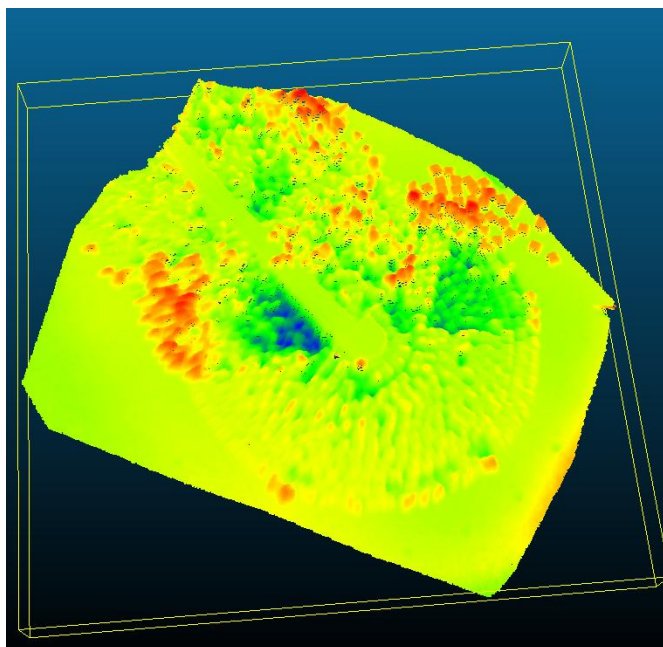


Figura 1.4 – Determinação de volumes: Vermelho: Depósito; Azul: Erosão

1.2 Objetivos

Este relatório tem como objetivo descrever:

- os procedimentos utilizados para o pós-processamento de nuvens de pontos de superfície de quebra-mares em ensaios em modelo físico, obtidas através dos levantamentos tridimensionais com o sensor de posição Kinect V2;
- a metodologia utilizada para a determinação do volume erodido e subseqüentes estimativas do número de blocos removidos e do parâmetro adimensional do dano, S , baseadas nas nuvens de pontos obtidas pelos levantamentos tridimensionais com o sensor Kinect V2.

Esta metodologia permite, assim a determinação do parâmetro adimensional do dano, S , baseado no volume erodido, traduzido pelo número de blocos removidos numa da secção do modelo.

$$N^{\circ} \text{ de blocos} = (VE \cdot (1-P)) / (\text{Volume do bloco}) \quad (4)$$

onde:

- VE é o volume erodido
- P é a porosidade do manto

Permite ainda a determinação de uma área erodida média, através do quociente entre o volume erodido e a Largura (L) da secção em análise, permitindo assim o cálculo do parâmetro adimensional do dano médio $\bar{S}$.

1.3 O caso de estudo do quebra-mar do porto da Ericeira

Neste subcapítulo é feita uma breve descrição do modelo físico do quebra-mar do porto da Ericeira, usado como caso de estudo na descrição dos procedimentos utilizados.

O estudo foi realizado num dos tanques de ondas irregulares do Pavilhão de Hidráulica Marítima do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas (NPE) do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA).

O tanque utilizado, TO2, tem 46.6 m de comprimento, 20.6 m de largura e 1.5 m de profundidade, equipado com um sistema de geração de ondas do tipo pistão com uma largura de 6 m.

O modelo construído representa a bacia portuária e o quebra-mar do porto da Ericeira (Figura 1.5).



Figura 1.5 – Vista geral do tanque de ondas irregulares e do modelo físico do quebra-mar

O modelo foi construído e explorado à escala de 1:65, de acordo com a Lei de semelhança de Froude.

O manto resistente do quebra-mar desenvolve-se em talude de 2:3 e as suas secções características são constituídas por:

- Tronco: Tetrápodos de 300 kN com um diâmetro nominal de 0.034 m e uma porosidade de 0.45 (Figura 1.6a);
- Cabeça: Cubos Antifer com 550 kN com um diâmetro nominal de 0.042 m e uma porosidade de 0.30 (Figura 1.6b).

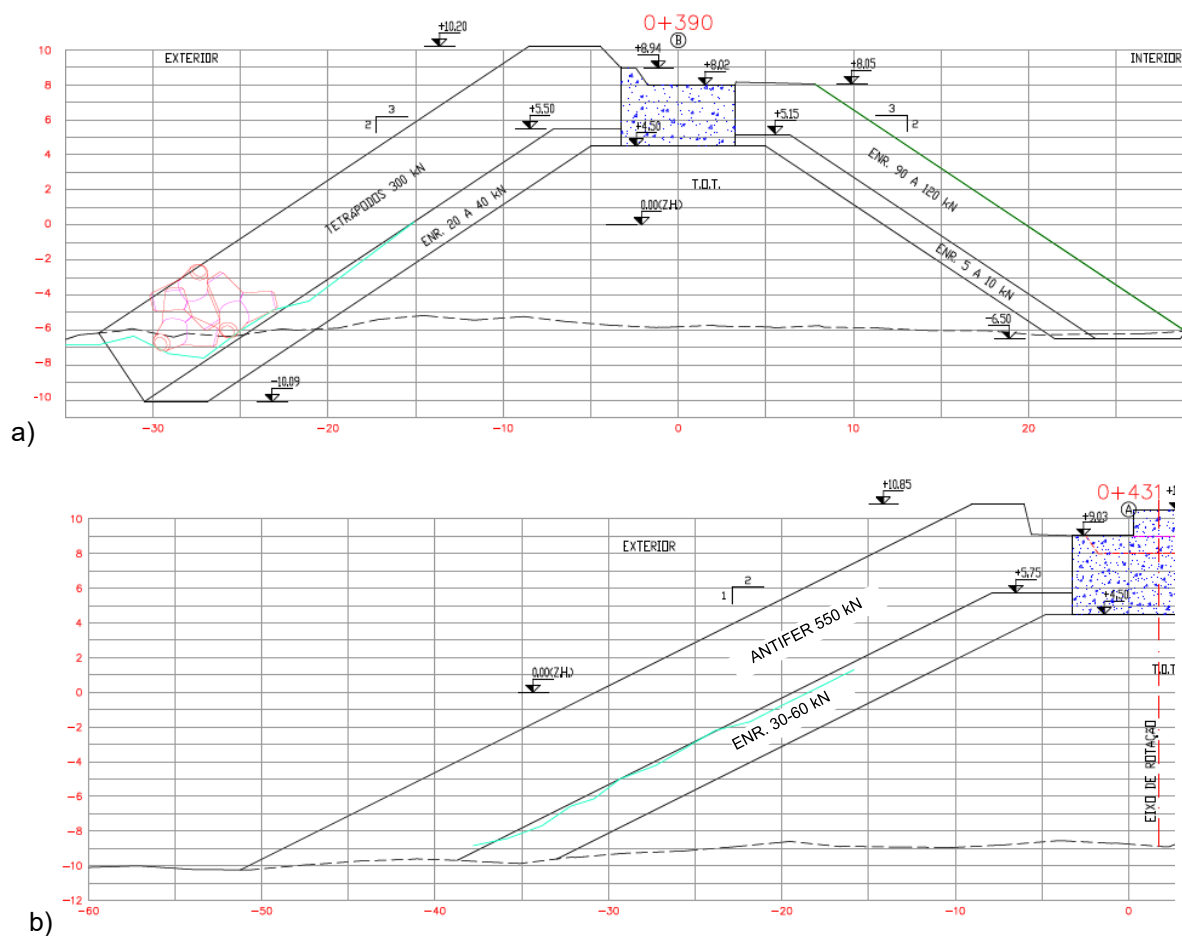


Figura 1.6 – Perfis-tipo do tronco (a) e da cabeça (b) do quebra-mar

O próximo capítulo (Capítulo 2) consiste num breve manual de procedimentos para o pós-processamento das nuvens de pontos. O cálculo do volume erodido e a estimativa de blocos removidos será descrito no Capítulo 3. No Capítulo 4 são ilustrados alguns exemplos de aplicação de levantamentos tridimensionais em ensaios de estabilidade, com recurso ao sensor Kinect na avaliação da estabilidade em modelos físicos de quebra-mares. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões advindas da aplicação da metodologia.

2 | Metodologias de aquisição e coordenação de nuvens de pontos

2.1 Aquisição das nuvens de pontos

A realização do levantamento da envolvente do manto com um sensor de movimento (Kinect V2) colocado cerca de 2.0 m acima modelo do quebra-mar (Figura 2.1 a).

O sensor Kinect utiliza o princípio de funcionamento *Time of Flight* (ToF). Este princípio consiste na estimativa da posição de um ponto relativamente ao sensor, medindo o tempo que um feixe de luz demora a percorrer a distância entre o sensor e o objeto, considerando a velocidade da luz

O software para aquisição, em tempo real, das nuvens de pontos, é o *Kinect Fusion Explorer*, incluído num pacote de bibliotecas do *Software Development Kit* (SDK) da Microsoft (Figura 2.1 b)

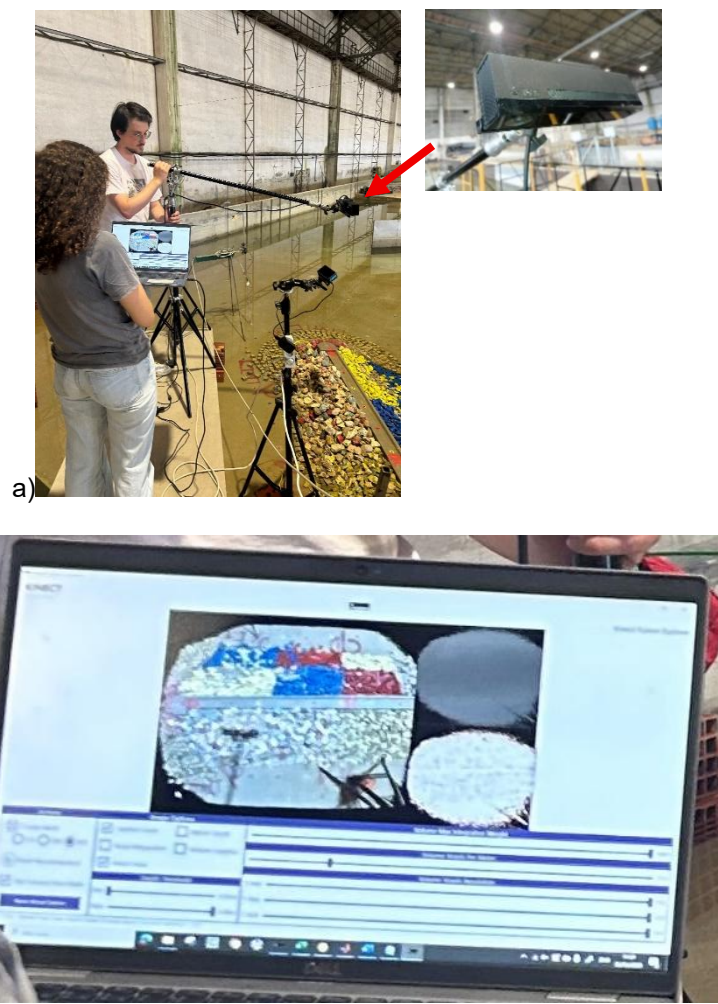


Figura 2.1 – Sensor de Posição Kinect (a) e interface do software para realização dos levantamentos (b)

Os parâmetros do sensor usados nos levantamentos foram:

- Resolução do volume do voxel (pixel em 3D) para os três eixos coordenados x, y e z: 512;
- Voxel por metro: 256.

Isto significa que o volume de cada cena levantada é de 2m×2m×2m.

- O leque de distância de aquisição permitido pelo sensor é entre 0.5 m e 8 m.

Os levantamentos com o Kinect foram realizados sem água no tanque no início e no final de cada série de ensaios (Figura 2.2) e com água no tanque no final de cada teste intermédio.

Foi também utilizado o método tradicional de contagem dos blocos removidos do manto, com vista a validar o número de blocos removidos estimado através da comparação de nuvens de pontos, utilizando um determinado espaçamento de malha. Este espaçamento foi calibrado até que o número de blocos removidos estimado seja o mais aproximado possível ao número de blocos contados visualmente.

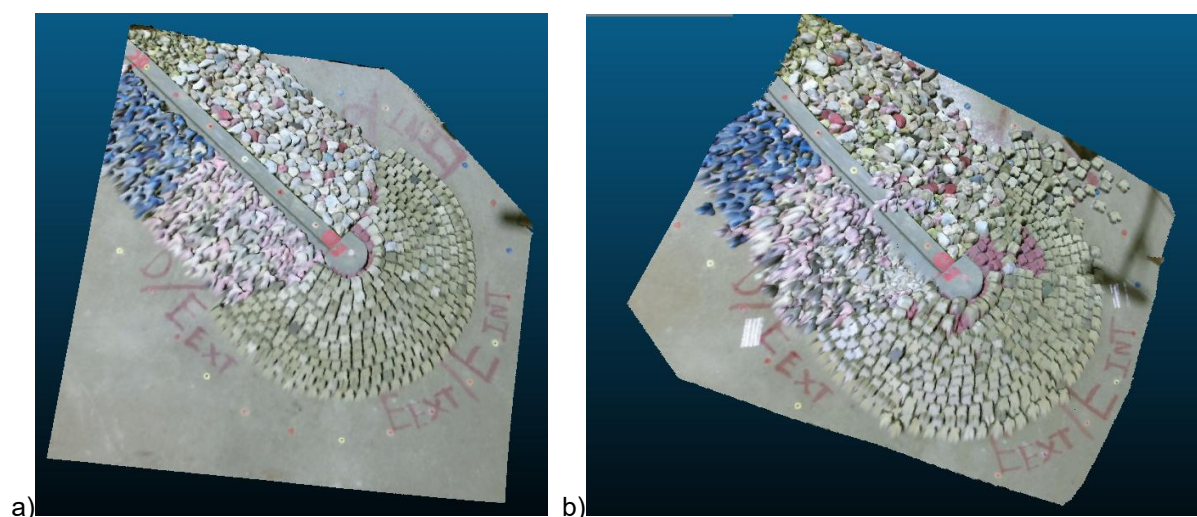


Figura 2.2 – Nuvens de pontos relativas aos levantamentos no início (a) e no final da série de ensaios (b)

Para referenciar as nuvens de pontos resultantes dos levantamentos, ou seja, para transpor as coordenadas do sistema de referência do sensor para um sistema de coordenadas referenciado ao fundo do canal, foram utilizados 70 pontos de controlo (GCP). Estes foram identificados com botões coloridos colocados no fundo do tanque, à frente da base da estrutura e na superestrutura do coroamento (Figura 2.3). As coordenadas dos GCP foram obtidas com uma estação total antes do início da série de testes.



Figura 2.3 – Pontos de controlo

Este procedimento de referência também promove a correção da distorção causada pela refração da luz na interface ar-água nas pesquisas intermédias realizadas com água. Este tipo de correção de refração só é possível quando os GCP submersos conseguem ser detetados pelo sensor, permitindo assim corrigir o ângulo de rotação. Musumeci et al. (2018). Para a referenciação dos GPC foi utilizado o software de código aberto *CloudCompare* (Girardeau-Montaut 2006).

Quanto ao pós-processamento dos levantamentos realizados com água, este incluiu também um alinhamento fino das nuvens de pontos resultantes do procedimento de referência anterior com uma nuvem semelhante obtida sem água no canal. Este alinhamento fino foi realizado utilizando o algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP) (Chen et al. 1992), disponível no software *CloudCompare*.

Para cada ponto na nuvem de pontos com água, o algoritmo ICP faz a correspondência com o ponto mais próximo na nuvem de pontos de referência (sem água). Ele estima a combinação de rotação e translação, utilizando uma técnica de minimização da distância, ponto-a-ponto, (calculando o valor quadrático médio das distâncias - RMS), que melhor alinhará cada ponto da nuvem com água com a sua correspondência encontrada na nuvem obtida sem água.

O algoritmo realiza um determinado número de iterações, o qual depende do critério escolhido para terminar essas iterações (uma determinada diferença de RMS ou um número predefinido de iterações ou percentagem de sobreposição). Neste caso, foi utilizado o valor de $RMS = 10^{-5}$ m, sugerido pelo algoritmo para uma sobreposição final de 100%.

2.2 Coordenação das nuvens de pontos dos levantamentos

As nuvens de pontos provenientes dos levantamentos são compostas por pontos, cujas coordenadas (x, y, z) se referem à posição do sensor. Por exemplo, a coordenada “z” de um ponto corresponde sensivelmente à distância, na vertical, entre o sensor e o modelo.

Contudo, o que se pretende são as coordenadas relativas ao ponto de referência (0,0,0) localizado no chão do tanque de ensaios, utilizado aquando do levantamento das coordenadas dos GPC com a estação total. Há, pois, a necessidade proceder a uma transformação de coordenadas através da referência das nuvens de pontos com o auxílio dos GPC (Figura 2.3).

A lista de coordenadas dos GPC deverá estar disponível num ficheiro em suporte editável (word ou excel, por exemplo). Os pontos seguintes descrevem as etapas principais para a coordenação das nuvens de pontos utilizando o software CloudCompare.

1 - Abrir o CloudCompare e arrastar/abrir o ficheiro *.ply com o levantamento Inicial (levantamento efetuado antes da série de ensaios) para a zona de trabalho

- A nuvem aparecerá na lista da *DB Tree*;
- Guardar o projeto: *File->Save project -> Nome_do_Projeto.bin* (*.bin é o tipo de ficheiro para entidades do CloudCompare). Por exemplo: *Comparar_Inicio_Final.bin*;
- Nota: Após a conclusão de cada procedimento importante, convém voltar a guardar o projeto. O CloudCompare não tem a ferramenta “undo”. Em caso de erro (apagar algo sem querer, por exemplo) pode-se abandonar o projeto sem guardar e voltar a carregar a última versão válida.

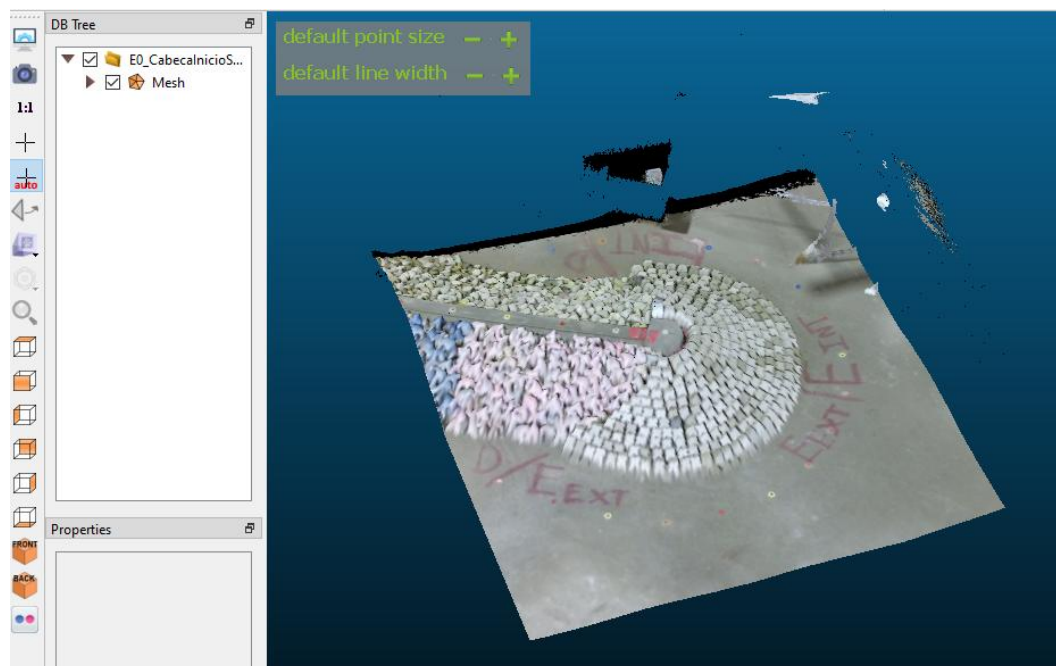


Figura 2.4 – Carregamento de uma nuvem de pontos para o espaço de trabalho do *CloudCompare*

2 - Inserir o número de pontos para a nuvem

Selecionar a “Mesh”-> Edit -> Mesh -> Sample Points (Figura 2.5).

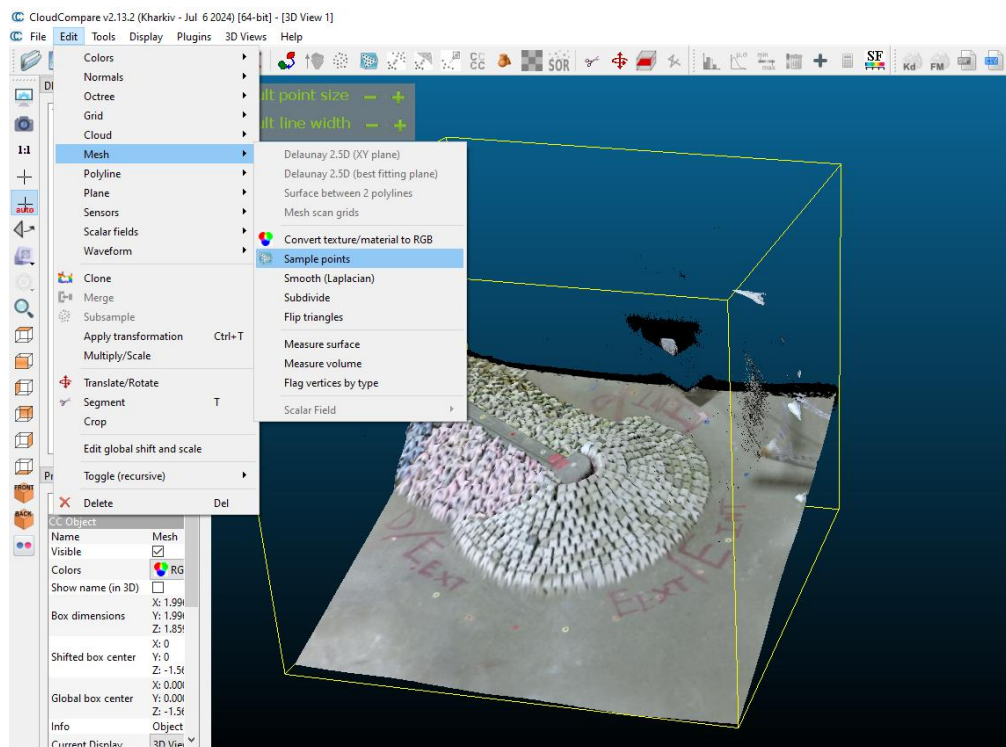


Figura 2.5 – Menu para definição do número de pontos da nuvem

3 - Inserir o número de pontos ou a densidade da nuvem

Na caixa de diálogo, em “*points number*” introduzir o valor 3000000 de pontos (Figura 2.6a). Como resultado, é criada uma nuvem com o nome genérico Mesh.sampled (Figura 2.6 b)

Convém atribuir-lhe um nome alusivo à nuvem em causa (ver Figura 2.6c), de modo a evitar confusão com os nomes de outras nuvens que se vierem a introduzir no projeto.

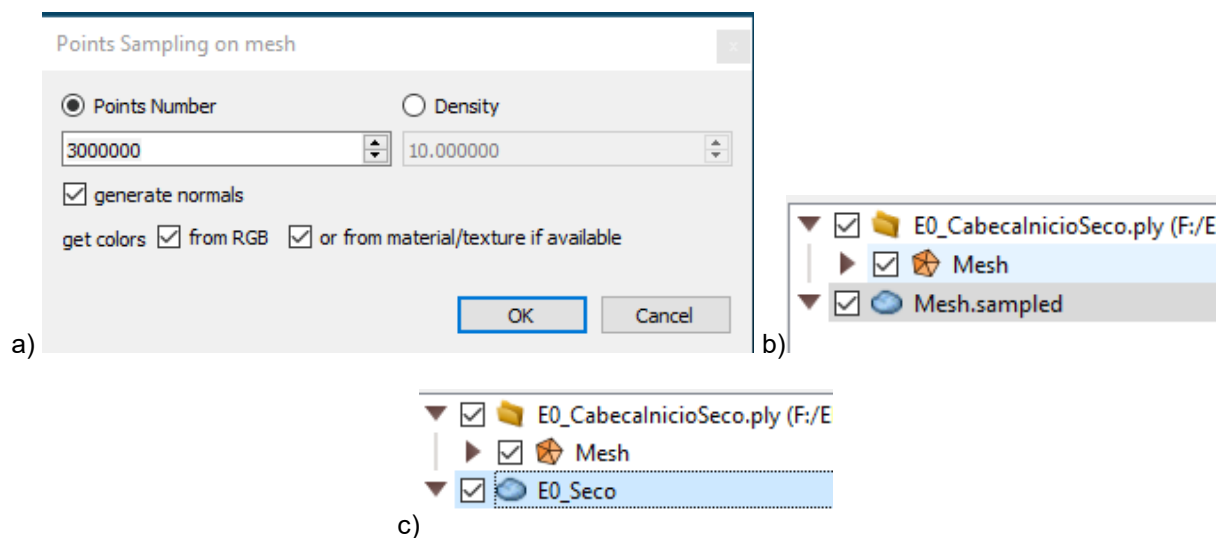


Figura 2.6 – Escolha do número de pontos ou da densidade da nuvem

4 - Limpar pontos espúrios e elementos externos à nuvem

- Selecionar a nuvem
- Na barra de ferramentas superior, usar a ferramenta  para “cortar”. Desenhar um polígono de modo que defina a zona com que queremos ficar  ou excluir  (Figura 2.7a).
- Repetir o procedimento até a nuvem estar completamente limpa e pronta a alinhar (Figura 2.7b).

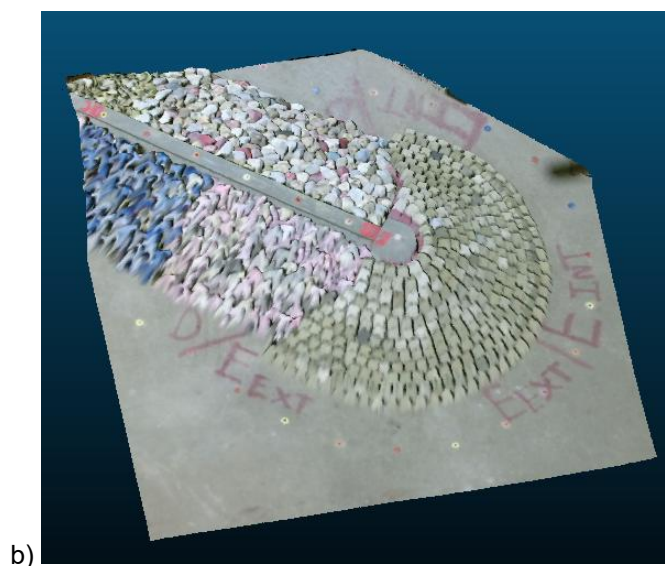
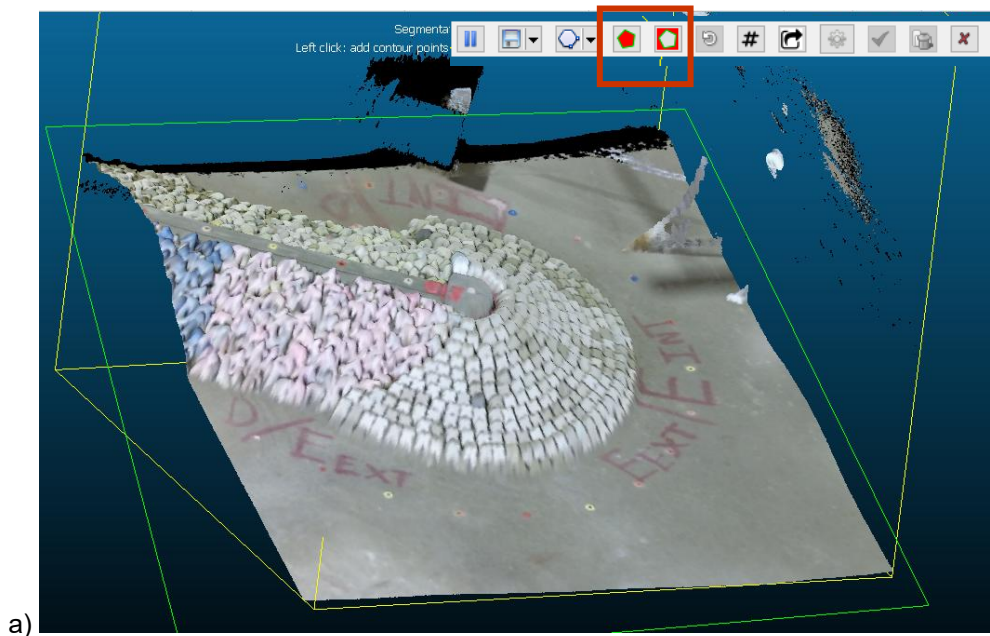


Figura 2.7 – Limpeza de pontos da nuvem externos ao levantamento (a). Nuvem limpa (b)

5 - Coordenar a nuvem usando os pontos de controlo

- Abrir o ficheiro editável corresponde aos pontos de controlo. É também de grande utilidade usar uma plataforma que permita identificar em planta os pontos de controlo a utilizar, como por exemplo, recorrendo a um gráfico xy numa folha de cálculo excel (Figura 2.8) ou uma imagem de topo do modelo (Figure 3.9).

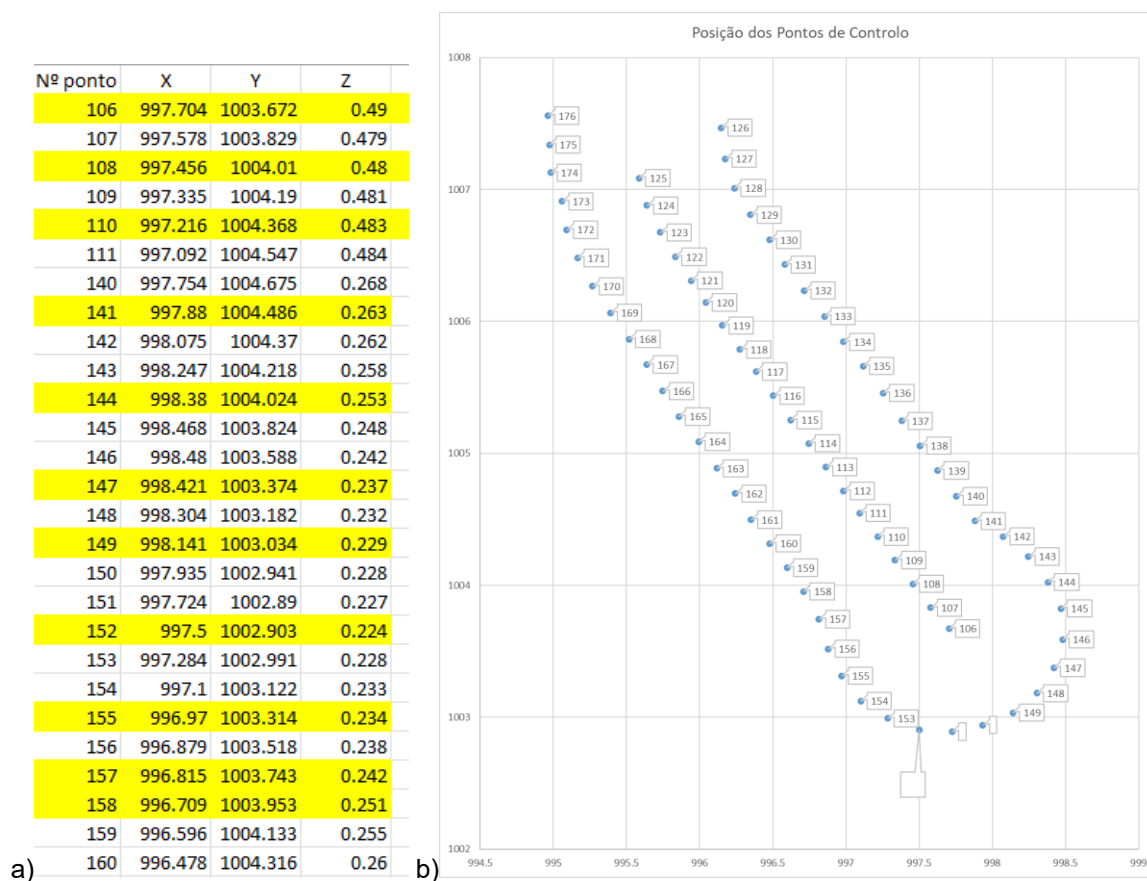


Figura 2.8 – Lista de pontos de controlo (a) e sua representação gráfica numa folha de cálculo excel (b)

- Escolher na nuvem, alguns pontos para servirem de pontos de controlo. A sua numeração corresponde à constante na lista.

Convém escolher pontos no chão à volta do modelo e também no coroamento, de modo a diminuir o erro da coordenação (ver exemplo da Figura 2.9).

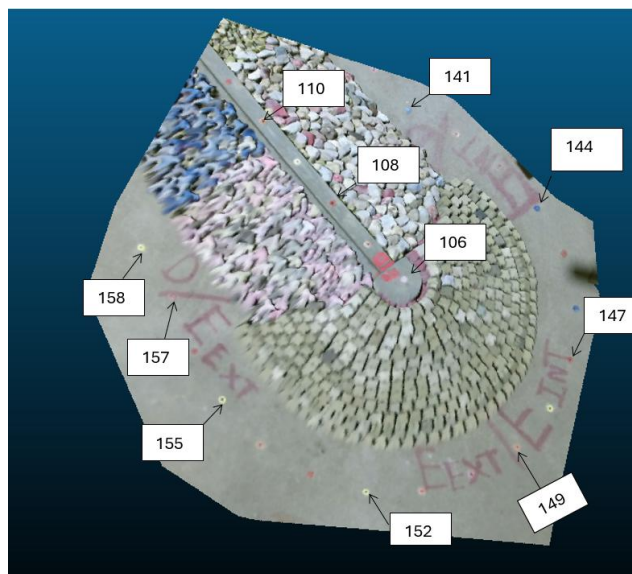


Figura 2.9 – Pontos de controlo a utilizar na coordenação da nuvem de pontos

- Selecionar a nuvem a alinhar, na DB Tree
- Na barra de ferramentas superior, escolher a ferramenta  (alinhamento com pontos correspondentes)
 - ✓ Abrirá uma janela (Figura 2.10) onde serão introduzidas as coordenadas:
 - dos pontos a alinhar (A) - **através da seleção com o rato**
 - dos pontos de referência homólogos (R) - **que serão copiadas da lista de pontos** (Figura 3.8a)

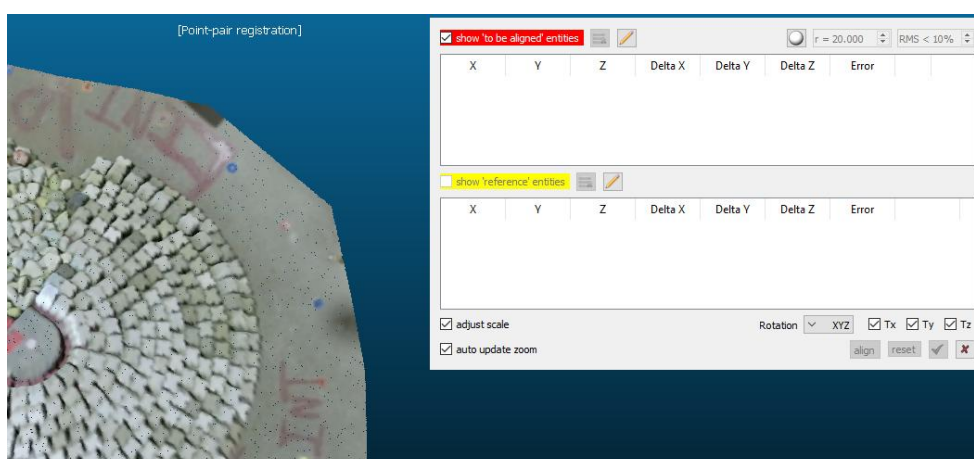


Figura 2.10 – Janela para introdução das coordenadas

- Ao selecionar os pontos escolhidos a alinhar, o setor superior da tabela (Pontos a alinhar) vai sendo preenchido com as respetivas coordenadas relativas ao sensor (Figura 2.11). Sugere-se que a seleção dos pontos escolhidos (neste caso, A0 a A9) siga uma ordem numérica

crescente ou decrescente da lista de pontos. Uma seleção aleatória dos pontos poderá vir a confundir a introdução manual das coordenadas pontos de referência.

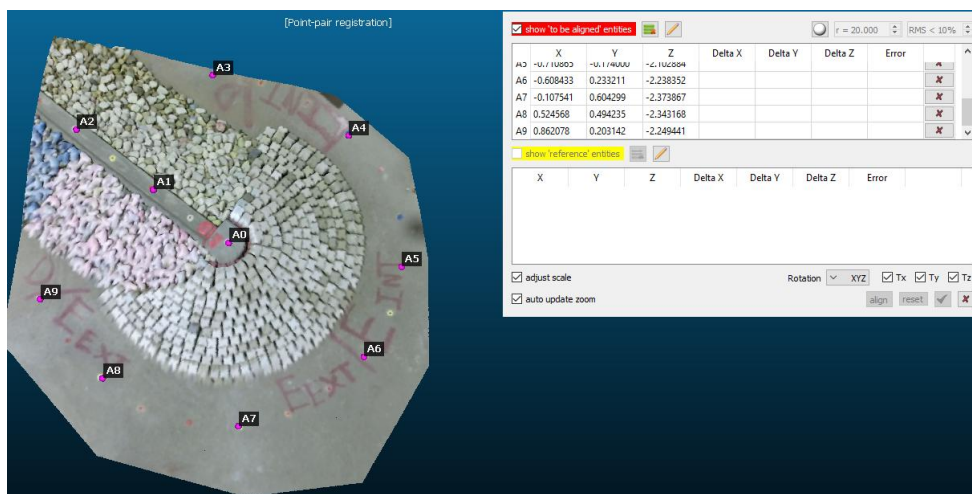


Figura 2.11 – Seleção, com o rato, dos pontos de controlo escolhidos para alinhar

- O setor inferior da tabela (x, y, e z dos pontos de referência) será preenchido manualmente, usando o icon  para adicionar os pontos de referência aos selecionados na parte superior da tabela e fazendo copy/paste das coordenadas dos pontos (Figura 2.12).

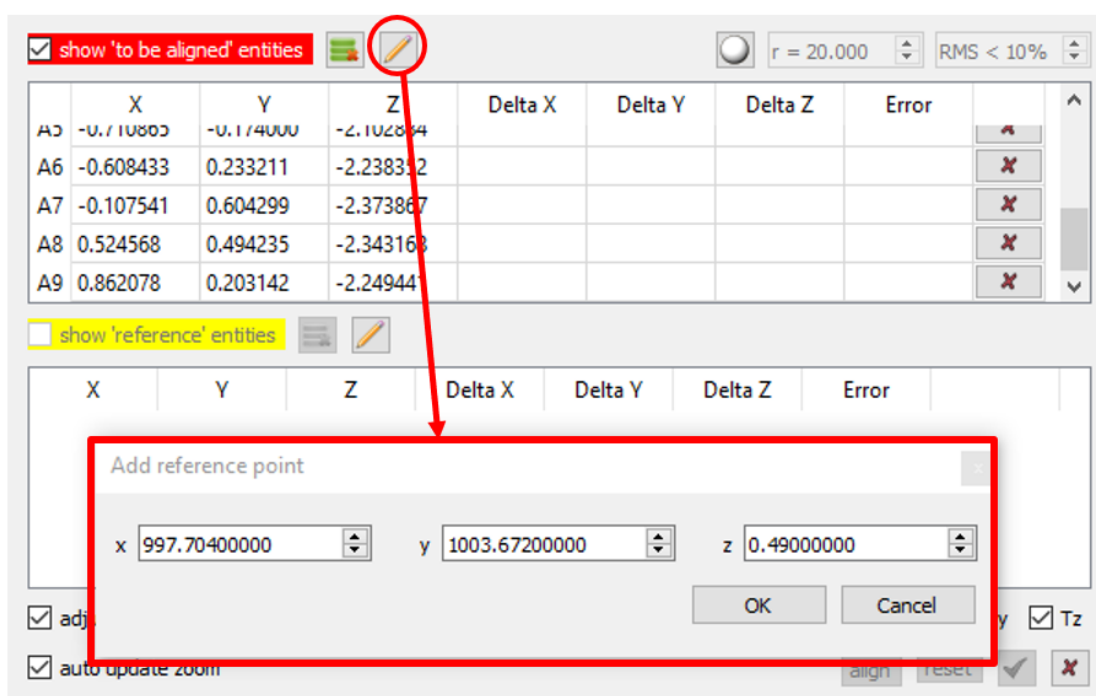


Figura 2.12 – Preenchimento das coordenadas de referência dos pontos de controlo escolhidos

- Após o preenchimento de todos os pontos homólogos, a coluna com o erro de alinhamento em cada ponto (erro médio quadrático - RMS), fica preenchida (Figura 2.13).

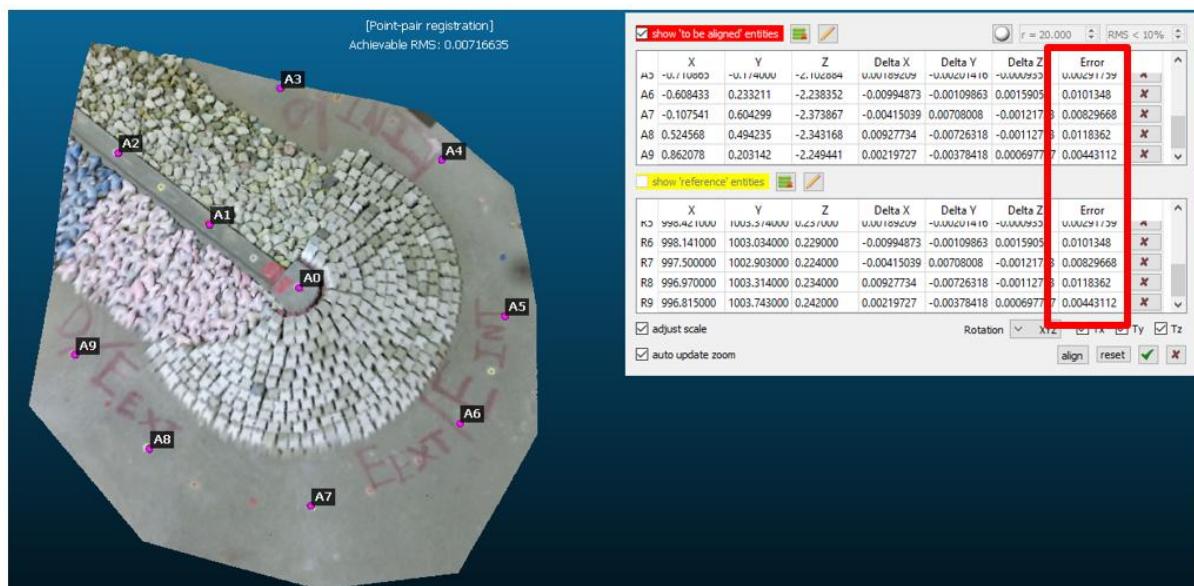


Figura 2.13 – Erro associado ao alinhamento

O erro deverá ser, sempre que possível, inferior a 0.01. Se houver pontos com um erro (RMS) maior, poderão ser apagados, de modo a diminuir o erro do alinhamento. Para concluir o alinhamento, aceitando o erro obtido, há que carregar em “align” e depois  (Figura 2.14).

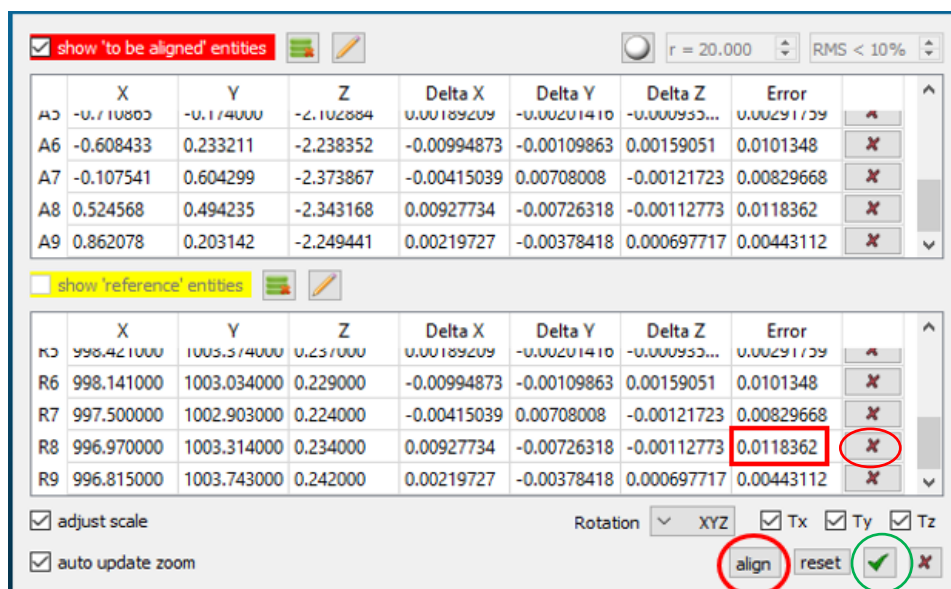


Figura 2.14 – Aceitação do erro obtido e conclusão do alinhamento

Surgirá uma caixa informativa com o erro final do alinhamento e com a matriz de transformação. Fazer OK e a nuvem ficará alinhada (Figura 2.15).

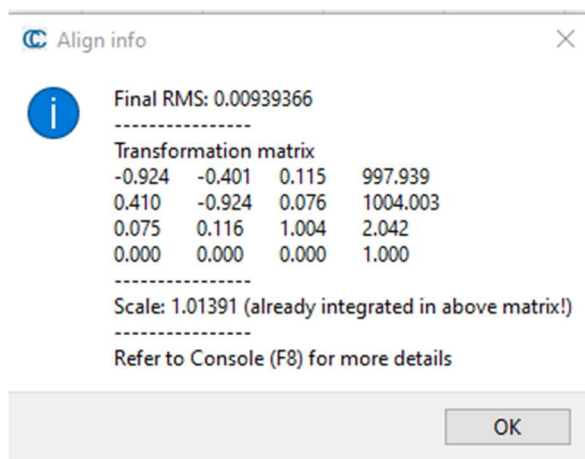


Figura 2.15 – Informação sobre o erro final do alinhamento

Repetir o procedimento descrito nos pontos 1 a 5 para coordenar também a nuvem do **Levantamento Final (levantamento efetuado depois da série de ensaios)**, assim como eventuais nuvens relativas a levantamentos intermédios (levantamentos durante a série de ensaios).

Este processo revela-se bastante moroso, tendo sido recentemente criada uma aplicação, desenvolvida em Python, para a sua agilização, evitando a introdução manual das coordenadas de referência (Reis et al., 2025).

3 | Metodologias de análise das nuvens de pontos: determinação de parâmetros

3.1 Metodologia para a determinação do volume erodido

O primeiro passo para a determinação do volume erodido é a comparação das nuvens resultantes dos levantamentos inicial e final, através da ferramenta do *CloudCompare* “Compute 2.5D volume”.

Esta ferramenta funciona através da criação de uma malha, permitindo o cálculo do volume, com base nas diferenças de cotas entre as nuvens. O algoritmo divide a área das nuvens com base na malha criada, determina a diferença de cotas entre as duas nuvens, em cada ponto da malha, calcula os volumes de cada célula individual da malha e por fim faz o somatório desses volumes individuais.

O intervalo da malha é definido através da especificação do *grid step*. Este intervalo tem um forte impacto na precisão do cálculo do volume. Um intervalo menor conduzirá a um maior detalhe, mas necessitará de maior poder computacional. É, por isso, aconselhável realizar um teste de calibração, onde a diferença de volume entre levantamentos seja facilmente confirmada. Um exemplo sugerido para esse teste poderá ser a comparação entre dois levantamentos onde tenha sido removido apenas um bloco do manto resistente, de volume conhecido. O intervalo da malha poderá, assim, ser ajustado de modo que o volume erodido calculado seja semelhante ao volume do bloco removido.

Nos pontos seguintes descrevem-se os pontos mais importantes para a determinação das diferenças de volume entre nuvens resultantes de dois levantamentos.

1 – Selecionar as duas nuvens a comparar (Figura 3.1).

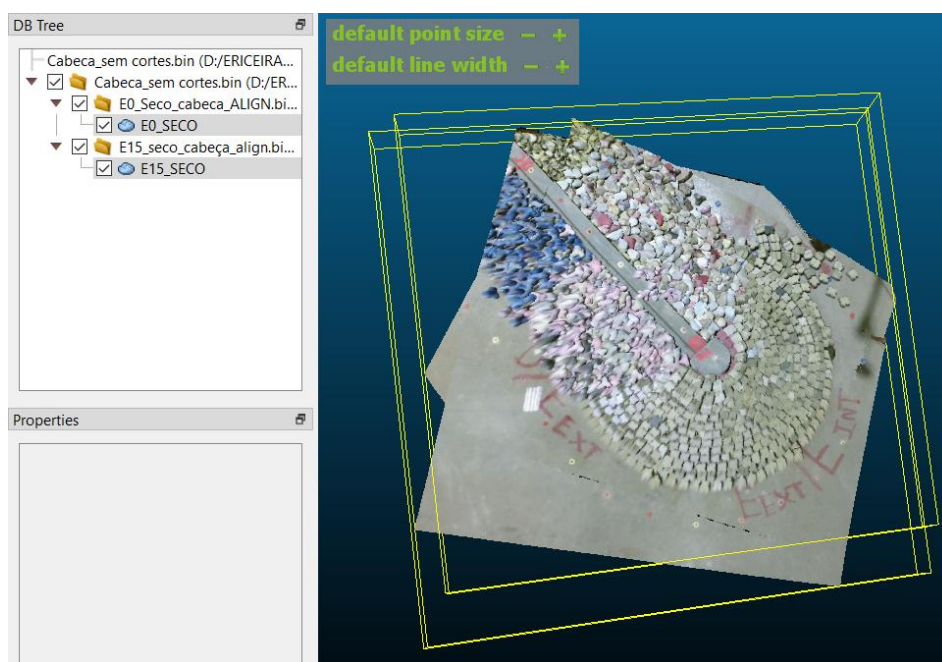


Figura 3.1 – Seleção das nuvens de pontos a comparar

2 – Utilizar a ferramenta “Compute 2.5D volume” em Menu Tools -> Volume -> Compute 2.5D volume

- Surgirá o formulário para a seleção de: Levantamento inicial, Levantamento final e espaçamento da malha. No caso de nuvens pouco densas, onde há células da malha sem pontos, na caixa “empty cells”, escolher a opção “leave empty” e premir “Update” (Figura 3.2).

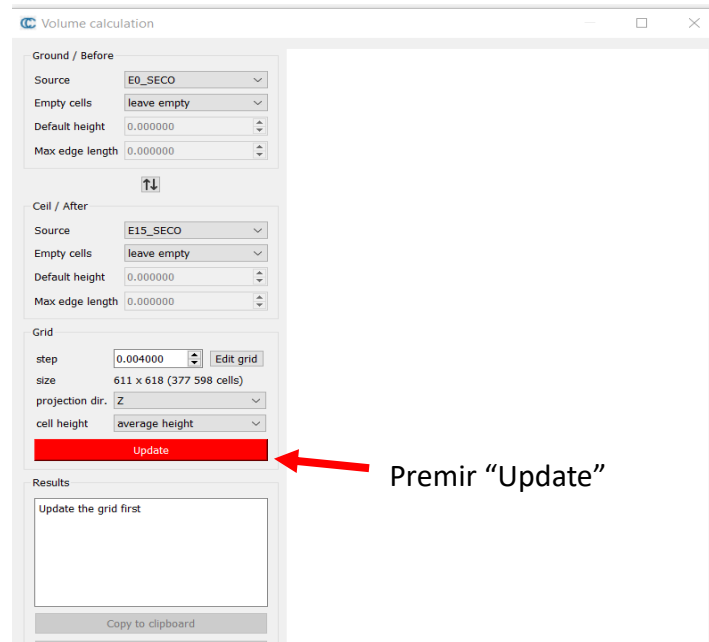


Figura 3.2 – Seleção do levantamento inicial, levantamento final e espaçamento da malha

- Ao premir “Update”, são calculados o volume erodido e o volume depositado, sendo possível exportar a malha relativa ao mapa de diferenças como nuvem (Figura 3.3), a qual será adicionada à árvore de documentos do CloudCompare, podendo ser analisada, formatada e visualizada em modo 3D (Figura 3.4).

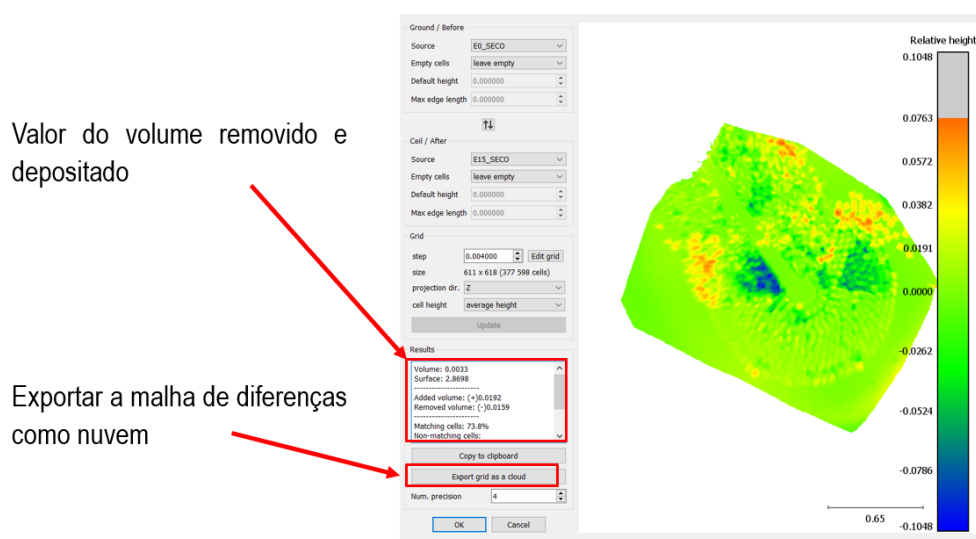


Figura 3.3 – Cálculo das diferenças de volume e criação do mapa de diferenças

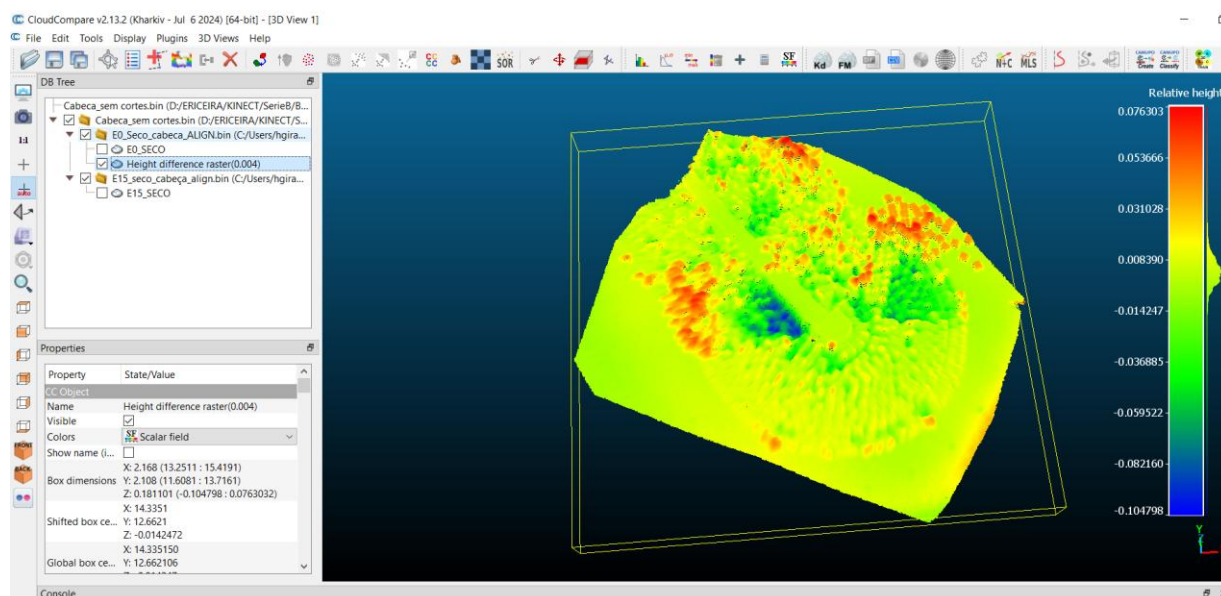


Figura 3.4 – Mapa de diferenças. Vermelho: Depósito; Azul: Remoção

3.2 Procedimentos para a estimativa do número de blocos removidos e para o cálculo do parâmetro adimensional do dano

Tal como referido na secção 1 deste relatório, a avaliação da estabilidade de um troço de quebra-mar, pode ser avaliada através do número de blocos removidos do manto resistente desse troço ou através do parâmetro adimensional do dano médio $\bar{S}$ resultante da média dos parâmetros $S=A_e/Dn^2$, obtidos em cada perfil em que o troço é dividido.

Tanto o número de blocos removidos (VE_b), como o parâmetro adimensional do dano médio $\bar{S}$ podem ser obtidos através do valor do volume erodido, calculado através da metodologia descrita em 3.1.

O diagrama apresentado na Figura 3.5 resume o conjunto de procedimentos necessários à obtenção destes dois parâmetros.

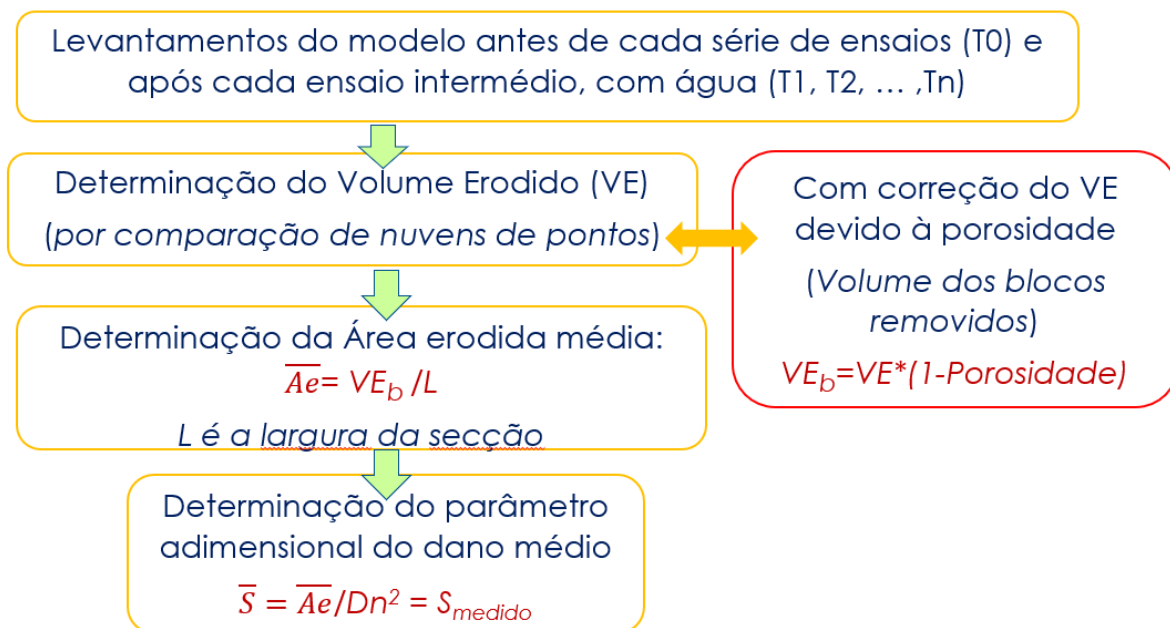


Figura 3.5 – Sequência de procedimentos para a determinação do parâmetro adimensional do dano e para a estimativa do número de blocos removidos

4 | Exemplos de aplicação de levantamentos tridimensionais na avaliação da estabilidade

Neste capítulo apresentam-se alguns exemplos de aplicação de levantamentos tridimensionais de superfície com o sensor de posição Kinect, aplicados a ensaios correntes no LNEC.

Através destes levantamentos, foi possível detetar zonas de erosão e movimentos de blocos dificilmente identificáveis à vista desarmada (Figura 4.1), obter e comparar perfis em zonas do modelo, mesmo após a conclusão dos ensaios (Figura 4.2) e quantificar movimentos de elementos da superestrutura (Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6).

Reparação do quebra-mar principal do porto de Ponta Delgada

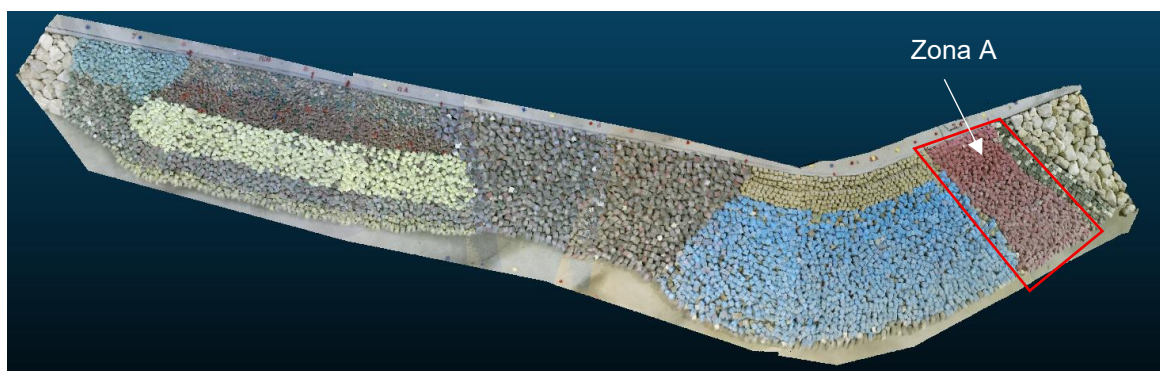


Figura 4.1 – Nuvem de pontos do modelo físico da reparação do quebra-mar principal de Ponta Delgada.

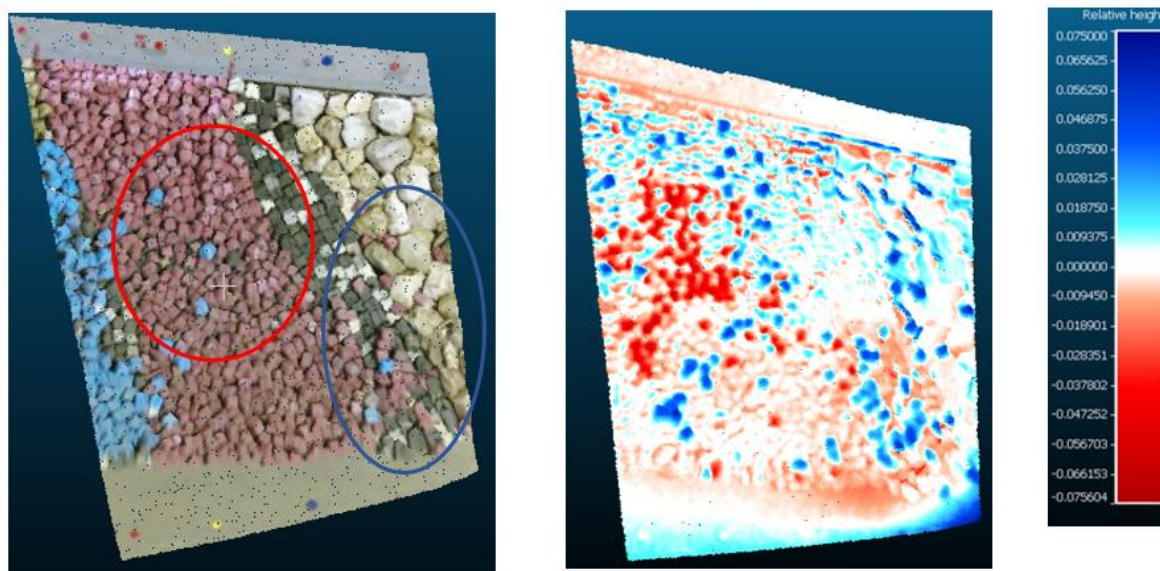


Figura 4.2 – Nuvem de pontos relativa à zona A (a) e mapa de diferenças de cotas (b) no final Rumo Sul no final da série de ensaios de Preia-mar

Ensaio em modelo reduzido tridimensional da 3ª fase de ampliação do molhe leste do porto de Sines



Figura 4.3 – Nuvem de pontos do modelo físico da aplicação do molhe leste do porto de Sines

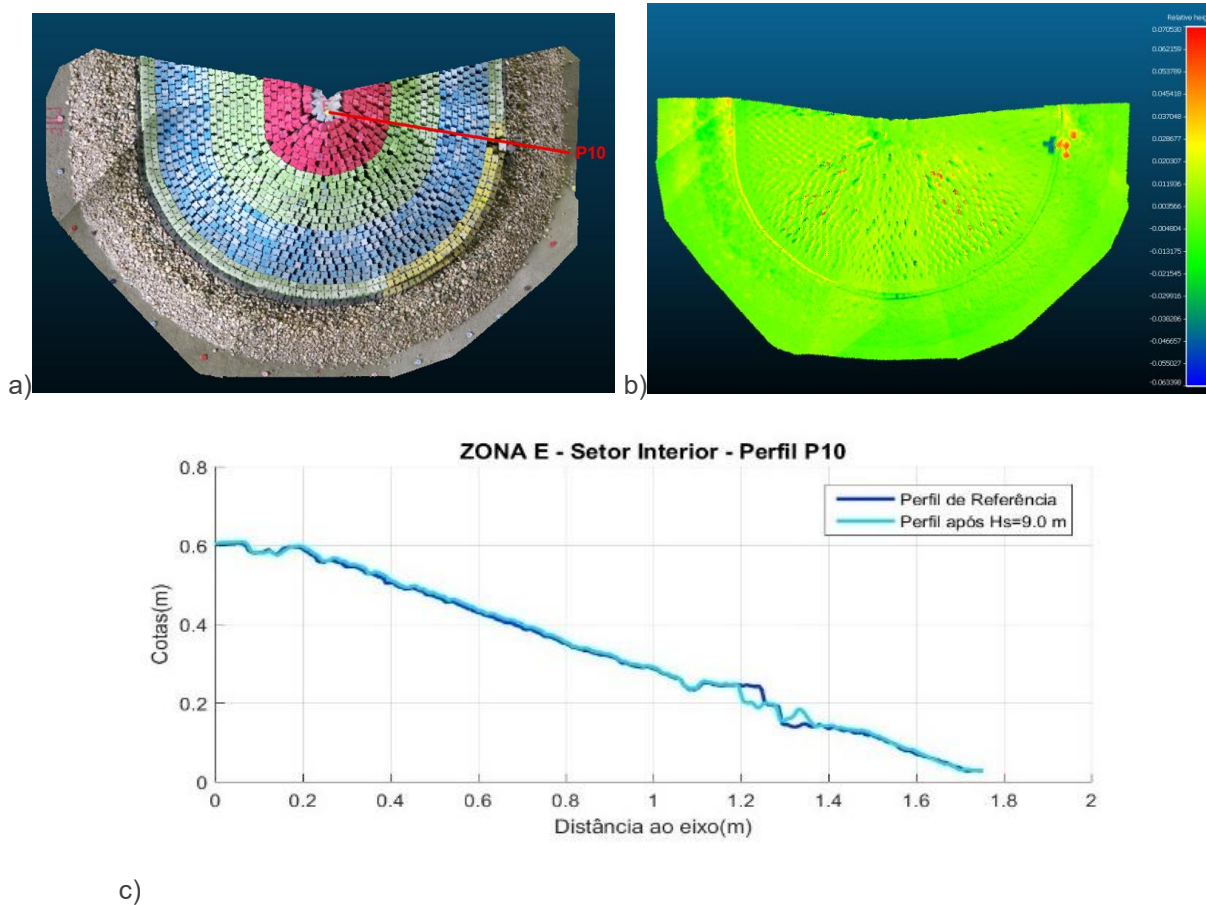


Figura 4.4 – Nuvem de pontos relativa à cabeça do molhe, após uma série de ensaios com o nível de PM e $T_p=20$ s
(a) Mapa de diferenças entre as nuvens de pontos inicial e final (b) Perfil P10 (c)

Reconstrução do quebra-mar de proteção do porto das Lajes das Flores (Ilha das Flores – Açores)

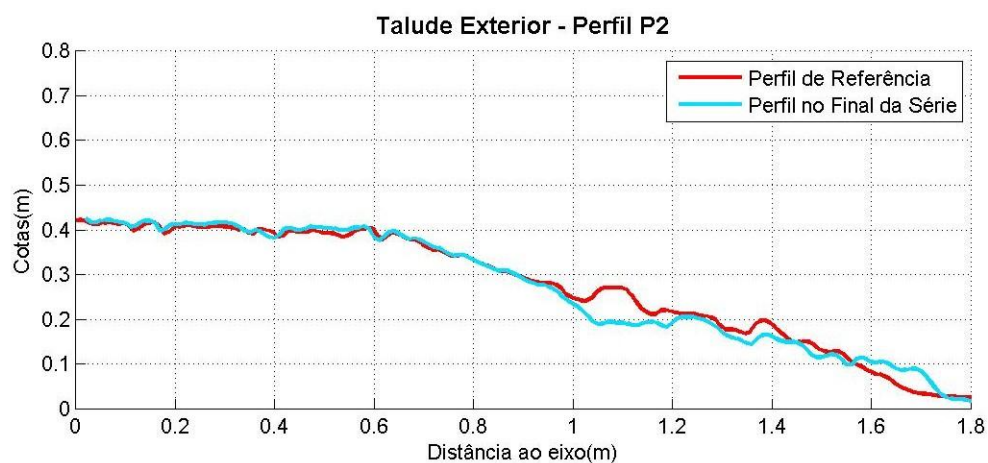
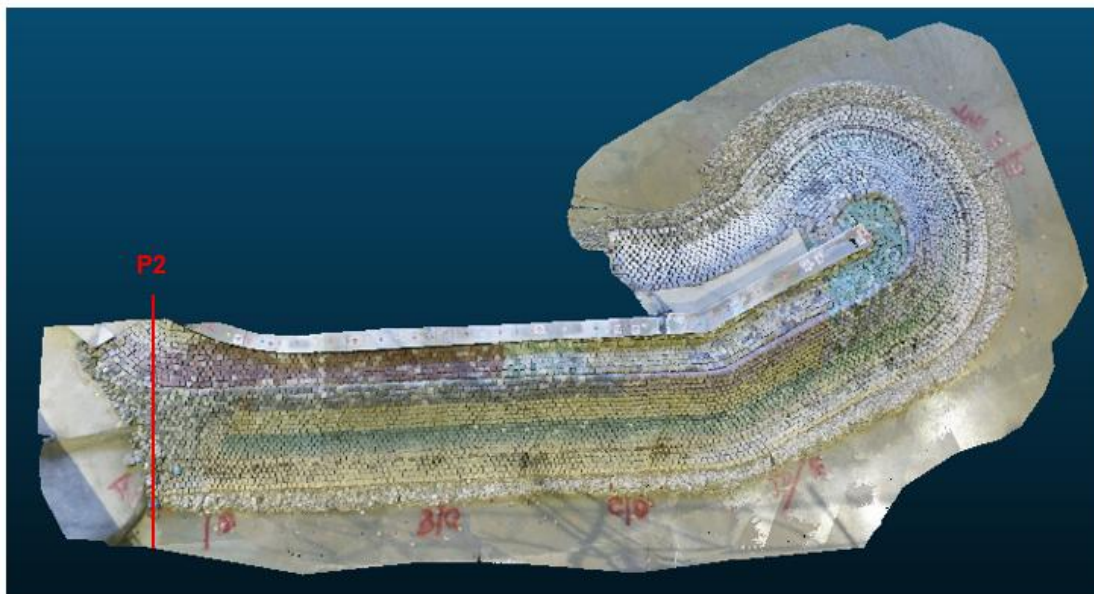


Figura 4.5 – Nuvem de pontos no final de uma série de ensaios com $T_p=12$ s (a) Perfil P2 (b)

Prolongamento do porto de Praia da Vitória (ilha de Terceira, Açores)

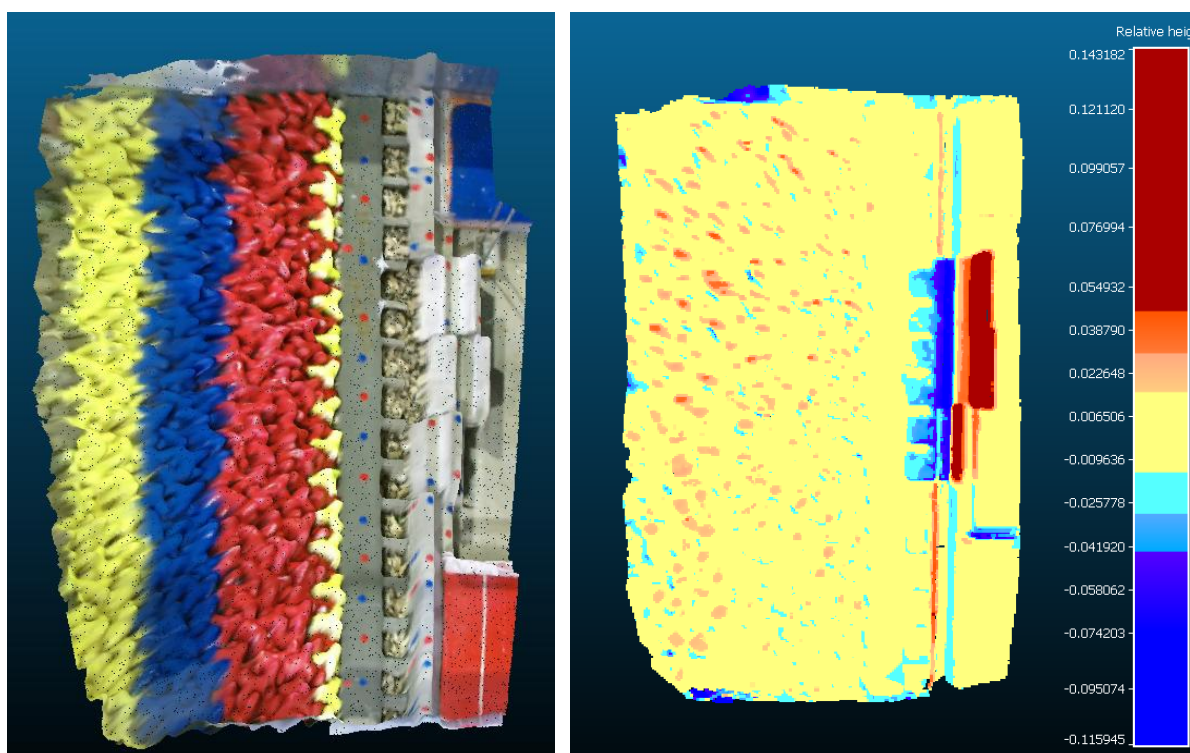
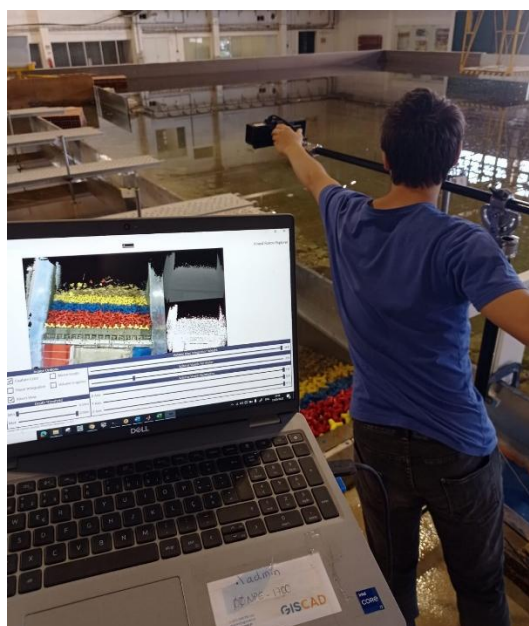


Figura 4.6 – Levantamento tridimensional de uma secção do quebra-mar (a). Diferenças das nuvens de pontos com vista à quantificação de translações dos blocos do coroamento (b)

5 | Conclusões

No presente relatório foram descritos os procedimentos utilizados no pós-processamento das nuvens de pontos resultantes de levantamentos tridimensionais com o sensor de posição Kinect. Foi ainda descrita a metodologia para a determinação do volume erodido com vista à estimativa do número de blocos removidos e do parâmetro adimensional do dano (S), usando modelos físicos 3D.

Conclui-se que, apesar do pós-processamento moroso das nuvens de pontos no que diz respeito à sua referênciação, os levantamentos tridimensionais com o sensor Kinect revelaram-se particularmente úteis na análise da estabilidade da obra.

A análise *a posteriori* das nuvens de pontos permite examinar pormenorizadamente as diferentes zonas dos modelos físicos (por vezes de grandes dimensões), possibilitando a extração de perfis em qualquer zona do modelo, bem como quantificar a sua área erodida e na quantificação da translação das peças constituintes da superestrutura do coroamento num ensaio bidimensional.

A análise *a posteriori* das nuvens de pontos permite examinar pormenorizadamente as diferentes zonas dos modelos físicos (por vezes de grandes dimensões), possibilitando a extração de perfis em qualquer zona do modelo, bem como a quantificação da área erodida e da translação das peças constituintes da superestrutura do coroamento num ensaio bidimensional.

A possibilidade de quantificação do volume erodido entre levantamentos permite ainda estimar o número de blocos removidos do manto resistente, mesmo quando a sua contabilização à vista se torna impossível.

Lisboa, LNEC, novembro de 2025

VISTO

A Diretora do Departamento de Hidráulica e
Ambiente

Assinado por: **MARIA HELENA VERÍSSIMO COLAÇO
ALEGRE**
Num. de Identificação: 04873591
Data: 2026.01.17 19:10:45+00'00'

Helena Alegre

AUTORIA

Assinado por: **Rute Maria Gomes de Lemos**
Num. de Identificação: 08046442
Data: 2025.12.22 20:07:35+00'00'

Rute Lemos
Técnica Superior

Assinado por: **Rui de Almeida Reis**
Num. de Identificação: 12636056
Data: 2025.12.23 10:37:17+00'00'

Rui Reis
Técnico Superior

Assinado por: **Conceição Juana Espinosa Morais
Fortes**
Num. de Identificação: 07071225
Data: 2025.12.23 10:17:22+00'00'

Conceição Juana Fortes
Investigadora Principal
Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas
Marítimas

Referências bibliográficas

- BRODERICK, L., AHRENS, J.P., 1982 - **Riprap Stability Scale Effects**. Technical Report TP 82-3; CERRE-CS: Fairfax County, VA, USA.
- CHEN, Y.; MEDIONI, G., 1992 - **Object modelling by registration of multiple range images**. Image and vision computing, 10.3: 145-155.
- GIRARDEAU-MONTAUT, D., 2006 - **Détection de changement sur des données géométriques tridimensionnelles**. PhD Thesis. Télécom ParisTech.
- HOFLAND, B.; GENT, M.V.; RAAIJMAKERS, T.; LIEFHEBBER, F., 2011 - **Damage Evaluation Using the Damage Depth**. Proceedings of the Coastal Structures, Yokohama, Japan, 5–9 September 2011; pp. 812–823
- HOFLAND, B.; DISCO M.; VAN GENT M.R.A., 2014 - **Damage characterization of rubble mound roundheads**. Proceedings of CoastLab2014. Varna, Bulgaria.
- HOFLAND, B. ROSA-SANTOS, P., TAVEIRA-PINTO, F., ALMEIDA, E., LEMOS, R., MENDONÇA, A., FORTES, C.J.E.M., 2017 - **Measuring damage in physical model tests of rubble mounds**. Proceedings of ICE Breakwaters 2017, 5 - 7 September 2017 - Liverpool Waterfront, UK, 2017
- MUSUMECI R., MOLTISANTI D, FOTI E. & BATTIATO S., 2018 - **3-D monitoring of rubble-mound breakwater damages**. Measurement, 117 (March 2018), 347-364.
- REIS, R., LEMOS, R., FORTES, C.J.E.M., 2025 - **Ferramenta Python para a referência geométrica de nuvens de pontos de Superfície. Guia de aplicação**. Relatório LNEC 359/2025 – DHA/NPE.
- UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2011 - **Coastal Engineering Manual, EM 110-2-1100 (Part VI) Change 3 (28 September 2011)**. USACE: Washington, DC, USA, 2002.
- USACE, 1984 - **Shore Protection Manual**, 4th ed.; U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office: Washington, DC, USA.



www.lnec.pt

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL
tel. (+351) 21 844 30 00
lnec@lnec.pt www.lnec.pt