

• U



C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Teste de um equipamento de baixo custo para caraterização da forma de superfícies sólidas tridimensionais**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

**Autor**

**Marcelo Sousa Paulino**

**Orientadores**

**Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira**

**Professor Thomas K. Thiis (NULS)**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor José Manuel Baranda Ribeiro  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogal** Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Orientador** Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Colaboração Institucional**

---



**Associação para o Desenvolvimento da  
Aerodinâmica Industrial**

**Coimbra, Junho, 2014**



The most worthwhile thing is to try to put happiness into the lives of others.

Be Prepared... the meaning of the motto is that a scout must prepare himself by previous thinking out and practicing how to act on any accident or emergency so that he is never taken by surprise.

[Roberto Baden Powell, (1857-1941.)]

Aos meus pais e irmãos



## Agradecimentos

O trabalho que se segue marca o fim de um longo percurso que, graças ao apoio de algumas pessoas, se tornou concretizável. O meu enorme agradecimento a todos eles, em especial:

Ao Senhor Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira, pelo empenho, dedicação e disponibilidade ao longo da elaboração desta dissertação e também pelos valiosos conselhos e ensinamentos transmitidos.

Ao professor Thomas K. Thiis (NULS), pela vontade enorme em ajudar e pela preocupação constante acerca da evolução dos trabalhos.

Ao aluno de doutoramento João Carreira, pelo apoio inicial com o Kinect, preponderante na primeira fase da pesquisa.

Aos meus amigos de sempre, que me apoiaram e deram força nos momentos mais difíceis deste percurso.

Ao Artur Lopes, ao João Marques, ao Jorge Roxo e ao José Carlos por serem os meus colegas de carteira desde o primeiro ano e por estarem sempre disponíveis, quer nos momentos de brincadeiras, quer nos momentos de trabalho árduo.

À minha família e namorada pelo apoio constante e incondicional, por me obrigarem a aplicar-me e a ter bons resultados e por me ajudarem a tornar-me numa pessoa melhor ao longo destes 5 anos.



## Resumo

Esta dissertação consiste no teste de um equipamento de baixo custo, para caracterização da forma de superfícies sólidas tridimensionais. Este equipamento, designado por Kinect, foi desenvolvido como parte da consola de jogos Xbox 360, existindo já uma versão para Windows, permitindo utilizar o Kinect em diversas aplicações, alheias à original. Após a familiarização com o equipamento e com os softwares destinados ao tratamento dos dados, executaram-se diversos testes com o objetivo de apurar a precisão e exatidão do mesmo. Destes, concluiu-se que o erro do Kinect pode ir até 4 cm. Devido às limitações encontradas, desenvolveram-se alguns métodos e algoritmos com o intuito de minimizar o erro do Kinect.

Realizou-se também uma comparação com um sistema de tecnologia laser utilizado na caracterização de superfícies 3D.

Por fim, aplicou-se o equipamento a uma situação real, consistindo a mesma num teste de erosão, realizado em túnel de vento, de uma pilha de areia, exposta à ação do vento. Foi assim possível analisar a viabilidade da utilização do Kinect para trabalhos futuros neste campo de investigação.

Da análise de todos os testes mencionados, concluiu-se que esta tecnologia ainda não está capaz de substituir a tecnologia laser, dada a baixa exatidão e precisão dos valores de medição obtidos, mas que tem um futuro promissor em outras áreas da ciência.

**Palavras-chave:** Kinect, Erosão, Areia, Superfícies 3D, Relevô.



## Abstract

The purpose of this thesis is to test the applicability of a low cost equipment on the characterization of the shape of tridimensional surfaces. This equipment, known as Kinect, was developed as part of the Xbox 360 console, though there exists already a Windows's version, that allows you to use the Kinect for several tasks, different from the original one. Once the familiarization with the equipment and the softwares meant for the treatment of data was concluded, several tests took place in order to determine its precision and exactitude. These led to the conclusion that the error associated to the Kinect can reach 4 cm. Due to some limitations that were faced, some methods and algorithms were developed with the purpose of minimalizing them.

There was also held a comparison with the current laser technology system used on the characterization of tridimensional surfaces.

Finally, the equipment was used in a "real/practical situation" in which the erosion of a sand pile, exposed to the wind, was registered. This enabled the conclusion about the feasibility of the Kinect in future work on this field of investigation.

From the analysis of the tests mentioned above, it was concluded that this technology is not able to replace the laser technology yet, given the low exactitude and precision of the measurements obtained, although it seems to have a promising future ahead in other areas of science.

**Keywords** Kinect, Erosion, Sand, 3D Surfaces, Topography.



---

## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. Sensor de distância laser .....	3
2.2. Apresentação do Kinect .....	4
2.2.1. Sensores de profundidade 3D .....	6
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	9
3.1. Aquisição dos dados fornecidos pelo Kinect .....	9
3.1.1. Precauções a tomar .....	10
3.2. Imagem Real vs Imagem Kinect .....	11
3.3. Testes da Precisão do Kinect .....	13
3.3.1. Teste da Precisão 1 .....	13
3.3.2. Teste da Precisão 2 – Variação Angular Eixo Vertical .....	16
3.3.3. Teste da Precisão 3 – Variação Angular Eixo Horizontal .....	18
3.4. Limitações do Kinect encontradas após os testes .....	21
4. MINIMIZAÇÃO DOS ERROS ASSOCIADOS AO KINECT .....	25
4.1. Controlo das condições de luminosidade .....	25
4.2. Análise da regularidade da aquisição de imagens .....	26
4.3. Algoritmos de correção .....	27
4.3.1. Algoritmos 1 e 2 .....	28
4.3.2. Algoritmos 3 e 4 .....	30
4.3.3. Comparação de algoritmos .....	31
5. APLICAÇÃO DO KINECT NO REGISTO DE UMA PILHA DE AREIA .....	37
5.1. Kinect vs Laser .....	37
5.1.1. Teste de Comparação .....	38
5.2. Registo da evolução da erosão de uma pilha de areia por ação do vento .....	42
6. Conclusões .....	45
6.1. Avaliação dos resultados obtidos .....	45
6.2. Dificuldades encontradas .....	46
6.3. Propostas para trabalhos futuros .....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Visualização do Sistema Laser utilizado instalado no túnel aerodinâmico. ....	4
Figura 2.2. Constituição do Kinect.....	5
Figura 2.3. Identificação dos sensores de profundidade 3D.....	6
Figura 2.4. Esquema ilustrativo do funcionamento dos sensores de profundidade.....	6
Figura 2.5. <i>Near Range</i> vs <i>Default Range</i> .....	7
Figura 3.1. Vista lateral do Kinect com o sensor calibrado.....	10
Figura 3.2. Vista superior do Kinect com o sensor calibrado .....	11
Figura 3.3. Teste de identificação da posição dos objetos nas imagens obtidas com o Kinect. ....	12
Figura 3.4. Imagem adquirida pelas câmaras RGB e IR do Kinect.....	12
Figura 3.5. Teste da Precisão 1 .....	13
Figura 3.6. Registo dos valores de profundidade a 1000 e 1700 milímetros .....	14
Figura 3.7. Profundidade Real vs Kinect Teste 1.....	15
Figura 3.8. Evolução do erro absoluto no Teste 1.....	15
Figura 3.9. Evolução do desvio padrão no Teste 1.....	16
Figura 3.10. Teste da Precisão 2.....	16
Figura 3.11. Esquema do cálculo da profundidade real no Teste 2.....	17
Figura 3.12. Profundidade Real vs Kinect Teste 2.....	17
Figura 3.13. Evolução do erro absoluto no Teste 2.....	18
Figura 3.14. Teste da Precisão 3.....	19
Figura 3.15. Esquema do cálculo da profundidade real no Teste 3.....	19
Figura 3.16. Profundidade Real vs Kinect Teste 3.....	20
Figura 3.17. Evolução do erro absoluto no Teste 3.....	20
Figura 3.18. Valores de profundidade adquiridos pelo Kinect.....	21
Figura 3.19. Imprecisão na aquisição de valores.....	22
Figura 3.20. Exemplo da distorção de uma imagem. ....	23
Figura 4.1. Teste de controlo de luminosidade e reflexos.....	25
Figura 4.2. Comparação entre a matriz obtida na amostra 1 e a matriz média.....	27

Figura 4.3. Sugestão de correção de valores incoerentes.....	28
Figura 4.4. Diferenciação das células usadas pelos algoritmos 1 e 2.....	28
Figura 4.5. Representação esquemática do cálculo de P.....	29
Figura 4.6. Código referente ao algoritmo 2. ....	30
Figura 4.7. Diferenciação das células usadas pelos algoritmos 3 e 4.....	30
Figura 4.8. Código referente ao algoritmo 4. ....	31
Figura 4.9. Teste de algoritmos 1.....	32
Figura 4.10. Configuração usada para teste dos algoritmos.....	33
Figura 4.11. Teste de algoritmos 2 (3ª análise).....	35
Figura 5.1. Posicionamento do equipamento laser e do Kinect. ....	38
Figura 5.2. Cones de areia para comparação entre o Kinect e a tecnologia laser na sua caraterização.....	39
Figura 5.3. Coincidência entre o centro da pilha de areia e o centro da imagem obtida com o Kinect. ....	40
Figura 5.4. Comparação de matrizes entre o Laser e o Kinect.....	41
Figura 5.5. Evolução 3D computacional da pilha de areia.....	43

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Resultados obtidos após os testes realizados nas diferentes condições de luminosidade. ....	26
Tabela 4.2. Comparação entre matrizes das diversas imagens capturadas em condições idênticas. ....	27
Tabela 4.3. Comparação entre matrizes no teste de algoritmos 1. ....	32
Tabela 4.4. Comparação entre matrizes no teste de algoritmos 2 (1ª análise). ....	34
Tabela 4.5. Comparação entre matrizes no teste de algoritmos 2 (2ª análise). ....	34
Tabela 4.6. Comparação entre matrizes no teste de algoritmos 2 (3ª análise). ....	35
Tabela 4.7. Comparação entre matrizes no teste de algoritmos 2 (4ª análise). ....	36
Tabela 5.1. Laser vs Kinect - Desvantagens e Vantagens. ....	37
Tabela 5.2. Erro do Kinect. ....	41



## 1. INTRODUÇÃO

A dissertação que aqui se apresenta insere-se no curso de Engenharia Mecânica e o trabalho realizado integra-se no plano de trabalhos destinado à obtenção do grau de Mestre. Esta tem como objetivo principal avaliar e testar um equipamento recente e de baixo custo na caracterização da forma de superfícies tridimensionais.

Como é premissa nos nossos dias, “tempo é dinheiro”, e a substituição de equipamentos mais antigos pelas novas tecnologias está cada vez mais em foco. Se aliarmos a esta renovação, maior rapidez de processamento, nível de detalhe e precisão elevados e baixo custo, estamos então perante um novo sucesso na indústria.

Na análise de um leito constituído por partículas, sujeito ao escoamento de um fluido com velocidade suficiente para as mover, constata-se que a posição inicial de algumas é alterada. Se a quantidade de partículas deslocadas for elevada, há então uma alteração na morfologia do leito inicial. Identificando agora a posição dessas mesmas partículas em dois instantes diferentes, é possível quantificar as taxas locais de erosão e deposição. Para tal, até ao momento, tem-se recorrido a medições feitas com um sistema laser, registando a altura do leito em vários pontos dispostos numa grelha. No entanto, esta tecnologia, para além de dispendiosa, é bastante morosa o que impossibilita o estudo de situações num curto espaço de tempo, e aumenta a complexidade na realização desses estudos.

O equipamento em estudo, designado por Kinect, para além de económico, permite uma aquisição quase instantânea dos valores numa área relativamente ampla, o que revela uma grande vantagem comparativamente ao laser. Associando a isto um nível de precisão e exatidão elevado, estar-se-ia então perante uma solução inovadora, e expedita, neste campo, que poderia dar ênfase aos estudos realizados nesta área de investigação.

Torna-se então importante analisar e testar esta tecnologia no sentido de verificar se a mesma constitui uma alternativa útil para esta área de aplicação.

A dissertação divide-se em 4 capítulos: no primeiro apresenta-se a revisão bibliográfica do tema, o segundo é dedicado a testes de precisão do Kinect e o terceiro se foca em métodos para minimizar o erro do equipamento. Finalmente, o quarto e último

capítulo trata do estudo experimental de um caso real, comparando os resultados desta nova tecnologia com a existente no mercado. O procedimento experimental foi feito no LAI, Laboratório de Aerodinâmica Industrial, utilizando o túnel aerodinâmico aí existente e um sistema laser para medição de distância. Os testes à precisão do Kinect foram realizados no laboratório didático de Mecânica de Fluidos situado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo pretende-se apresentar o equipamento existente para a medição da deslocação de partículas, o seu funcionamento e a tecnologia utilizada, assim como o equipamento em foco na dissertação. É feita uma apresentação global do Kinect e das suas funcionalidades, debruçando-se posteriormente nos sensores de profundidade 3D.

### 2.1. Sensor de distância laser

O equipamento atualmente disponível no LAI para fazer a caracterização de superfícies tridimensionais é o modelo DLS-B15 da marca Dimetix. Este é um sensor de distância baseado na tecnologia laser que opera segundo o princípio de mudança de fase (phase shift) [1].

De acordo com as especificações do fabricante [1], o mesmo tem uma precisão de até  $\pm 1.5$  mm e resolução de 0.10 mm podendo funcionar com distâncias compreendidas entre 0.05 m até 500 m oferecendo um nível de confiança de 95.4%.

No LAI o laser está alocado num sistema de atravessamento que permite a translação segundo dois eixos horizontais, no plano em que o sensor se insere, possibilitando assim a medição de pontos obtidos numa grelha pré definida. O laser encontra-se à distância de 2.77 m do chão do túnel projetando um ponto com um diâmetro aproximado de 3 mm [2]. A Figura 2.1 [3] representa a tecnologia utilizada.

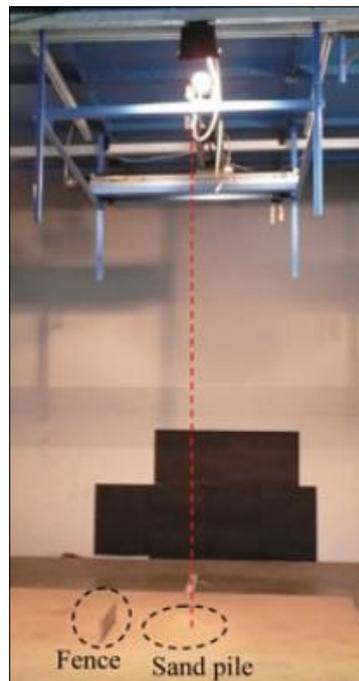


Figura 2.1. Visualização do Sistema Laser utilizado instalado no túnel aerodinâmico.

## 2.2. Apresentação do Kinect

O Kinect, palavra que deriva da junção de *kinetic* (cinética) mais *connect* (conectar) [4], é um sensor de movimentos que veio revolucionar o mundo dos videogames. O seu grande trunfo é o facto de permitir ao utilizador jogar sem ter que interagir com um comando real, uma vez que o seu próprio corpo basta. Já vários aparelhos deste género tinham sido lançados no mercado mas nenhum alcançou a popularidade do Kinect, o que se poderá dever à sua qualidade.

Desenvolvido pela Microsoft, junto com a empresa Prime Sense, e baseado na tecnologia de software criada pela empresa Rare [4], foi comercializado pela primeira vez em 2010, como parte integrante da Xbox 360. As capacidades do Kinect eram tantas que os *hackers* acabaram por desenvolver uma plataforma que permitiu a conexão do equipamento ao computador. Mais tarde, foi a própria Microsoft a lançar um conjunto de *drivers* oficiais, com diversos tutoriais e aplicações permitindo assim ao utilizador explorar todas as funcionalidades do Kinect. Atualmente, o mesmo é utilizado nas mais variadas aplicações, desde a robótica à produção industrial, servindo também como câmara de segurança ou simplesmente como sensor de movimento. A nível mais avançado, já há quem o utilize para

controlo de dispositivos eletrónicos, bem como para reconhecimento facial. Existem muitos investigadores a trabalhar nesta área e o futuro da interação livre entre equipamentos informáticos e os utilizadores está cada vez mais próximo do consumidor final [4,5].

Quanto à constituição do sensor, o Kinect possui:

- **1 Câmara RGB (Red, Green, Blue)** – Em tudo semelhante às *webcam* tradicionais, ajudando no reconhecimento facial e deteção do meio envolvente.
- **Sensores de profundidade 3D** – Permitindo a captura do espaço envolvente em três dimensões.
- **Microfone Multidirecional** – Capaz de detetar várias vozes diferentes na mesma sala, isolando também as mesmas dos ruídos externos [5, 6].

A resolução máxima da câmara de infravermelhos é de 640x480 enquanto que a da câmara RGB é de 1280x1024. Possuem um campo de visão de 43° na vertical e 57° na horizontal. O Kinect grava vídeos de 30 fps na resolução 640x480 e 15 fps na resolução mais elevada. Por último, este equipamento possui um eixo motorizado que permite a rotação de  $\pm 27^\circ$  em torno do mesmo, sendo 0° a posição base [7,8].

É a união de todos estes componentes que permite a interação jogador-videojogo através do reconhecimento de movimentos e controlo por voz. Ao longo de uma experiência real de jogo, o Kinect cria também um esqueleto digital do jogador e memoriza os seus dados físicos, possibilitando assim o seu reconhecimento facial.

Para o caso em que a dissertação se centra, importa então estudar mais detalhadamente o funcionamento dos sensores de profundidade 3D.



Figura 2.2. Constituição do Kinect.

### 2.2.1. Sensores de profundidade 3D

A grande vantagem do Kinect em relação aos outros sensores de movimento é a sua capacidade de capturar uma imagem 3D do cenário inteiro, permitindo assim um mapa de profundidade do local.

Estes sensores de profundidade 3D são constituídos por um projetor de infravermelhos e um recetor dos mesmos (câmara infravermelha): o primeiro é responsável por projetar um padrão de pontos no meio envolvente, enquanto que o segundo deteta esses mesmos pontos. Aliada a este sistema, existe uma tecnologia capaz de atribuir luminosidades diferentes aos diversos pontos consoante a sua distância, isto é, quanto mais próximos da câmara estão os feixes emitidos pelo projetor, mais brilhantes são [9].

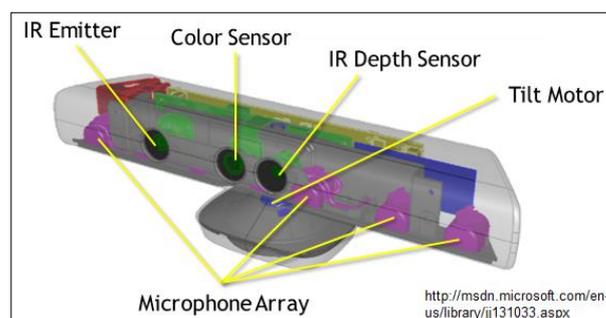


Figura 2.3. Identificação dos sensores de profundidade 3D.

Para explicar melhor esta tecnologia, atenta-se ao esquema mostrado na Figura

2.4

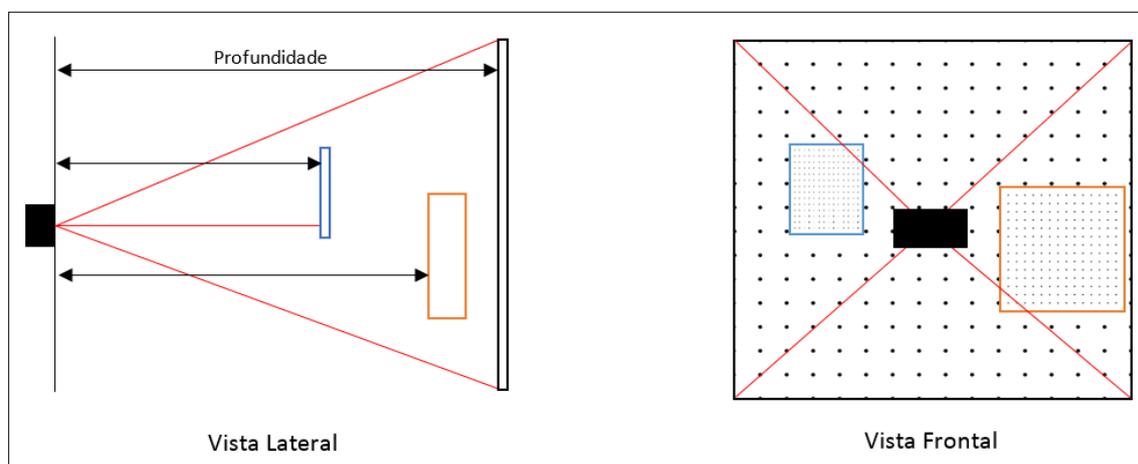


Figura 2.4. Esquema ilustrativo do funcionamento dos sensores de profundidade.

Como se pode verificar, os objetos mais afastados do Kinect apresentam uma maior distância entre os pontos projetados e, portanto, uma maior distância ao sensor. Quanto maior a proximidade relativamente à câmara, menor a distância entre os feixes de luz infravermelha projetada e, por conseguinte, menor a profundidade medida. Assim, os valores de profundidade são calculados com base num algoritmo que relaciona as distâncias entre os pontos projetados com a mesma luminosidade e a distância ao Kinect [10,11].

O sensor de profundidade pode trabalhar em dois modos diferentes consoante as profundidades medidas. No *Default Range* funciona bem entre 0.8 e 4 metros enquanto que no *Near Range* entre 0.4 e 3 metros. Em ambos os modos é possível fazer medições até 8 metros mas a precisão e exatidão dos valores diminuem com o aumento da distância do objeto medido ao sensor [8]. O Kinect apenas apresenta 11 bits de precisão (2048 valores) o que sugere uma vasta gama de valores não mensurados entre os 0.4 e 8 metros.

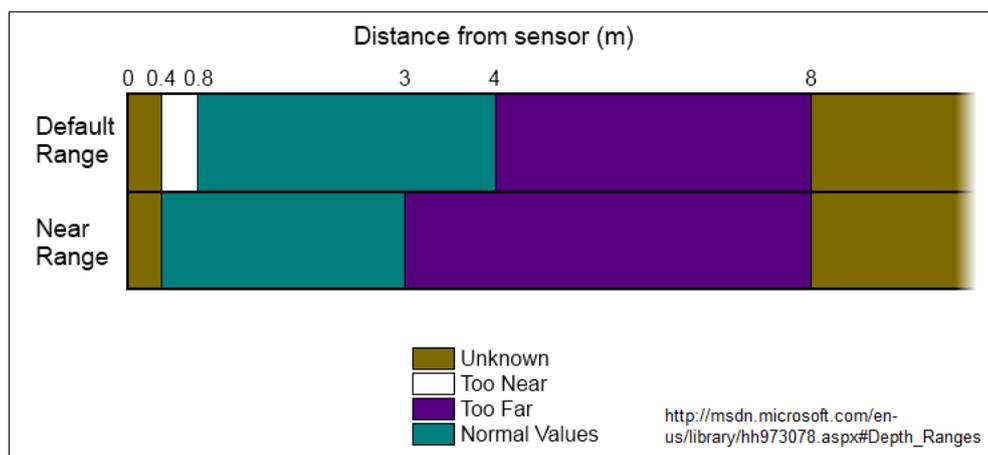


Figura 2.5. *Near Range vs Default Range.*



### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo aborda os primeiros ensaios realizados com o Kinect, a fim de testar a precisão dos valores de profundidade adquiridos com o mesmo. Após a familiarização com o método de aquisição de imagens e com o tratamento dos dados obtidos, realizaram-se diversos ensaios, comparando os valores reais com os obtidos pela câmara. Estes testes consistiram na colocação de um plano rígido (uma caixa), em frente do equipamento, em diversas posições.

#### 3.1. Aquisição dos dados fornecidos pelo Kinect

A aquisição dos valores de profundidade com o Kinect foi realizada recorrendo-se ao programa MATLAB. Este possui uma aplicação (*Image Acquisition*) que permite a transformação direta de um conjunto de pixéis, em tons de cinzento, numa matriz cujos valores são as profundidades obtidas, expressas em milímetros. É possível a obtenção de imagens através da câmara de infravermelhos com as resoluções de 640x480, 320x240 e 80x60, sendo que cada célula da matriz corresponde a um pixel. Se se trabalhar com a resolução máxima, ter-se-á então uma matriz com 640 colunas e 480 linhas.

O tratamento dos dados das matrizes foi realizado com recurso ao Microsoft Office Excel. Optou-se pela utilização deste software dada a sua simplicidade e rápida interpretação dos valores obtidos.

Foi também utilizado o programa Kinect Studio para a aquisição das imagens coloridas e infravermelhas do Kinect e para a definição da orientação do eixo motorizado da câmara.

### 3.1.1. Precauções a tomar

Os primeiros ensaios realizados com o Kinect levaram à obtenção de valores bastantes irreais. Exemplo disso foi uma fotografia tirada a um plano paralelo à câmara, onde, na matriz resultante, os valores do topo do plano apresentavam uma profundidade muito inferior aos valores da base do mesmo. Concluiu-se então que era necessário realizar-se uma calibração inicial do sensor para corrigir estes erros.

A primeira precaução a ter consiste na orientação angular do eixo motorizado do Kinect. Colocando um plano paralelo em frente do equipamento, é requerido que a imagem desse plano seja paralela ao sensor, tanto na vista lateral como na frontal. Para diferentes situações, o ângulo do eixo motorizado varia. Enquanto nos primeiros ensaios, em que a distância ao plano paralelo foi próxima de 1000 mm, o ângulo foi de  $5^\circ$ , já nos testes realizados no túnel aerodinâmico, cuja distância era superior a 2000 mm, o ângulo do eixo motorizado foi  $12^\circ$ . A Figura 3.1 e a Figura 3.2 ilustram a calibração do Kinect.

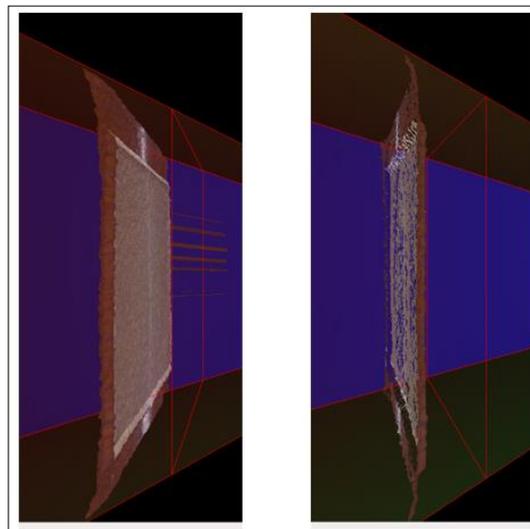
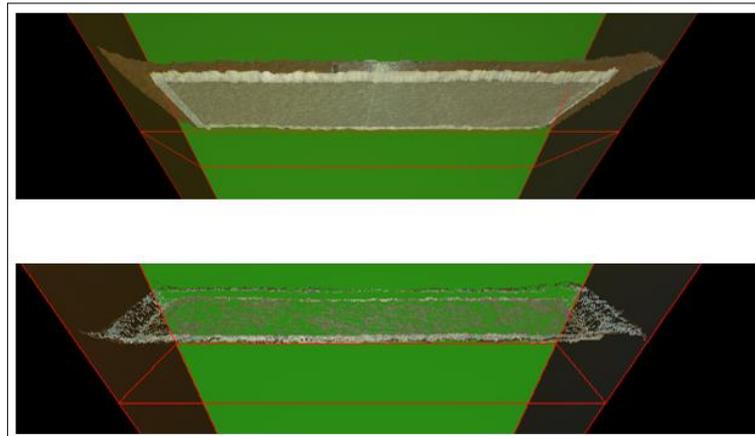


Figura 3.1. Vista lateral do Kinect com o sensor calibrado.



**Figura 3.2.** Vista superior do Kinect com o sensor calibrado

Outro aspeto a ter em conta é a resolução de imagem escolhida. Uma vez que o principal objetivo é a obtenção da maior gama de valores disponíveis a fim de ter os resultados com a melhor precisão possível, quanto maior a resolução, melhores serão os parâmetros acabados de referir. Apesar de a quantidade dos valores a tratar ( $640 \times 480 = 307200$  células) tornar o ficheiro por vezes pesado, optou-se sempre por utilizar a resolução máxima disponível.

Por fim, como referido na secção 2.2.1, é importante escolher o modo de trabalho do sensor de profundidade mais adequado para a situação.

### 3.2. Imagem Real vs Imagem Kinect

De modo a termos uma perceção mais real de como o Kinect “vê” o que o rodeia e compreender o que se está a analisar aquando do tratamento dos dados recolhidos, optou-se por fazer uma comparação entre fotos do Kinect e fotos reais. Para isto, executou-se um teste ao qual se deu o nome de teste de identificação da posição dos objetos. O ensaio consistiu na colocação de duas caixas em frente da câmara, desfasadas entre si tanto no plano paralelo à camara como no eixo central. A Figura 3.3 mostra essa mesma situação.



**Figura 3.3.** Teste de identificação da posição dos objetos nas imagens obtidas com o Kinect.

Da análise das imagens obtidas pelo Kinect, quer da câmara RGB como da câmara IR, e através da sua comparação com a imagem real, concluiu-se que há uma simetria segundo o eixo vertical. Um objeto que se encontre no lado esquerdo de uma situação real é visto pelo Kinect como estando no lado direito da imagem. Aquando do tratamento de dados é essencial ter em conta este aspeto. Para melhor exemplificar o descrito, veja-se a Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Imagem adquirida pelas câmaras RGB e IR do Kinect.

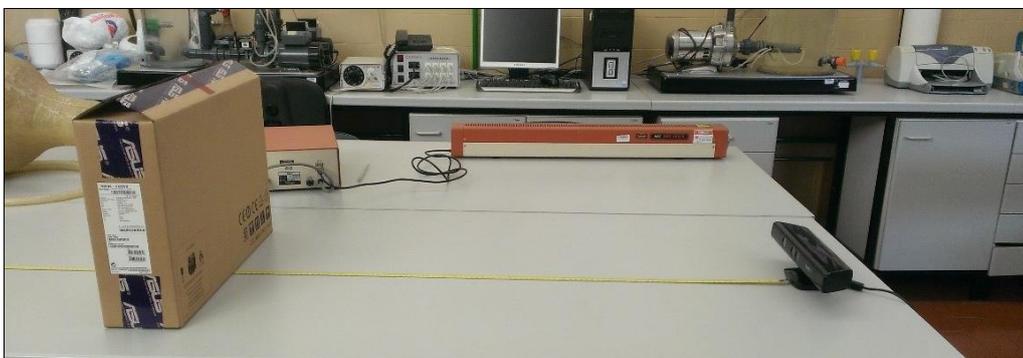
Denota-se também um ligeiro desfasamento das imagens entre as câmaras presentes no Kinect uma vez que a de infravermelhos encontra-se à esquerda da outra.

### 3.3. Testes da Precisão do Kinect

No sentido de validar e perceber quais os resultados esperados aquando da aplicação do Kinect numa situação mais real, estudou-se a precisão do mesmo através de três testes simples: o primeiro, e mais comum neste tipo de situações, semelhante a testes já realizados [12,13], passou por colocar uma caixa em frente da câmara, aumentando a sua distância relativamente à mesma, gradualmente, à medida que se iam registando os valores de profundidade obtidos; os outros dois testes consistiram na rotação segundo o eixo vertical e segundo o eixo horizontal da caixa, registando-se as distâncias de profundidade entre as suas extremidades e comparando as mesmas com os valores reais.

#### 3.3.1. Teste da Precisão 1

Como já referido anteriormente, este teste consistiu na medição das distâncias entre o Kinect e uma caixa colocada à frente do mesmo e cuja posição se fez variar. Foram realizados 12 ensaios com a caixa a 1000, 1025, 1050, 1100, 1150, 1200, 1250, 1300, 1400, 1500, 1600 e 1700 milímetros de distância do Kinect. É relevante destacar que a fita métrica foi colocado por baixo do sensor de infravermelhos, o centro da caixa colocado no seguimento da fita e o ângulo do eixo motorizado escolhido de modo a colocar o plano frontal da caixa paralelo ao Kinect. A Figura 3.5 ilustra o ensaio realizado a 1 metro de distância.

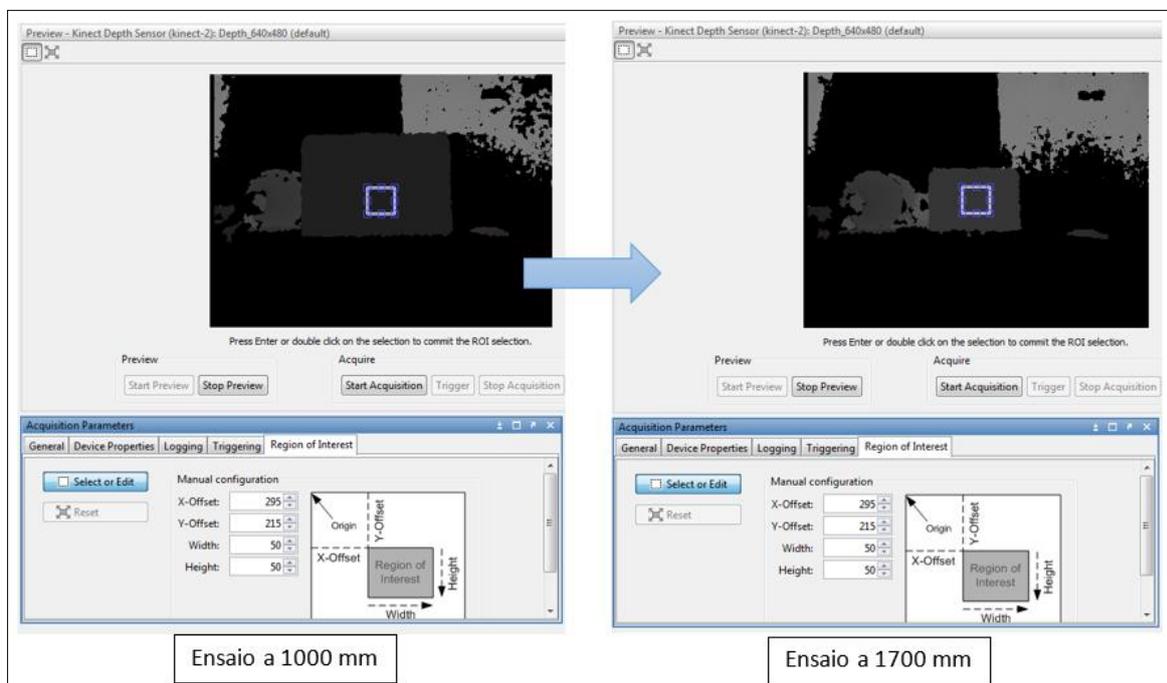


**Figura 3.5.** Teste da Precisão 1

Para analisar os valores adquiridos, seleccionou-se uma matriz 50x50 cujo centro coincidia com o da imagem. Uma vez que é difícil saber exatamente qual a posição inicial a

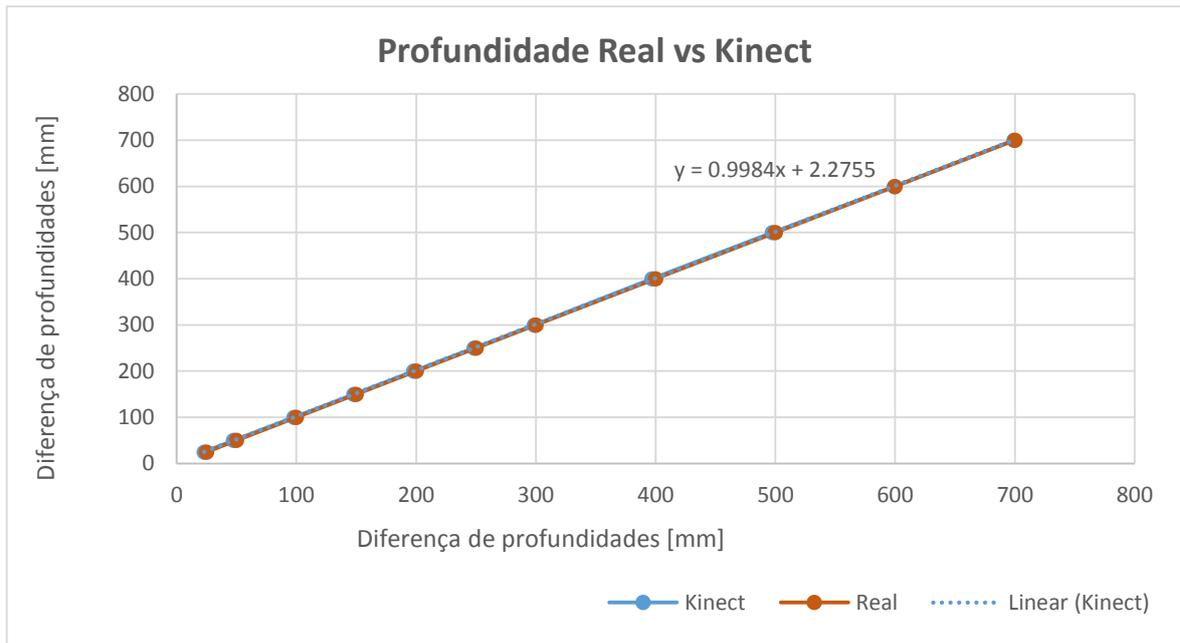
Teste de um equipamento de baixo custo para caracterização da forma de superfícies sólidas tridimensionais

partir da qual a câmara mede os valores de profundidade, os dados analisados foram as diferenças entre as matrizes registadas. Isto é, por exemplo, para comparar as situações em que a distância à câmara foi de 1000 mm e 1025 mm, fez-se a subtração das matrizes obtidas e comparou-se a média dos 2500 valores (50x50) situados no centro da imagem, coincidindo sensivelmente com o centro da caixa, com a diferença real entre as caixas (25 mm). Em cada matriz, registou-se a média, o máximo, o mínimo e o desvio padrão. Para facilitar a compreensão do ensaio, atenta-se à Figura 3.6.

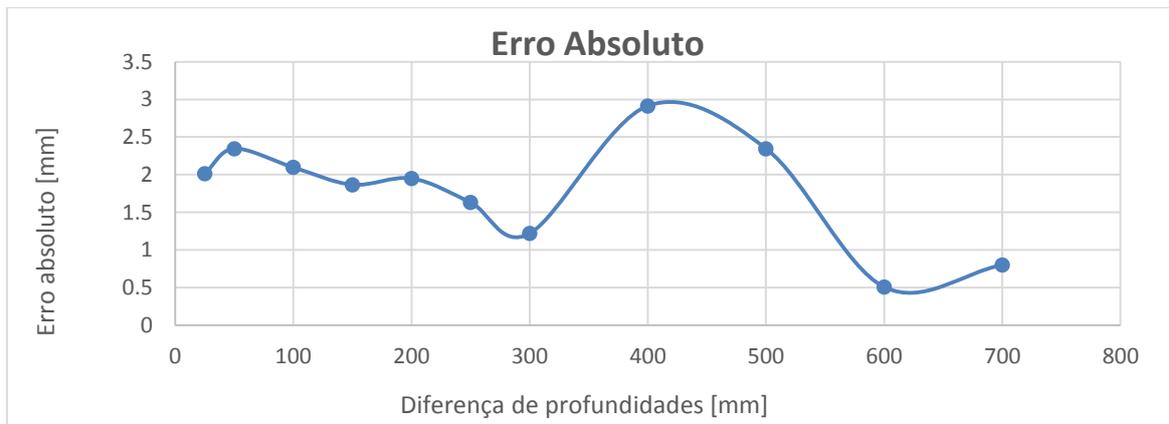


**Figura 3.6.** Registo dos valores de profundidade a 1000 e 1700 milímetros

Do registo dos ensaios realizados obtiveram-se os gráficos representados na Figura 3.7 e na Figura 3.8. O primeiro compara as diferenças de profundidade entre as diferentes posições da caixa com os valores reais, enquanto que o segundo se refere ao erro absoluto das mesmas.



**Figura 3.7.** Profundidade Real vs Kinect Teste 1.



**Figura 3.8.** Evolução do erro absoluto no Teste 1.

A análise dos dois gráficos acima apresentados mostra um erro máximo próximo de 3 mm, quando os valores a comparar são as médias das matrizes obtidas. No entanto, ao analisar os valores máximos e mínimos de cada matriz, deparámo-nos com situações em que a diferença entre extremos, num mesmo plano, atinge os 30 mm, o que sugere uma imprecisão relativamente elevada na aquisição dos valores. Quanto aos valores do desvio padrão, a Figura 3.9 ilustra uma evolução crescente do mesmo à medida que a diferença de profundidades aumenta. Conclui-se que, quanto maior a distância a medir, maior será o desvio padrão correspondente. Isto sugere também que, para um mesmo plano, os valores são mais díspares com o aumento da distância dos objetos ao Kinect.

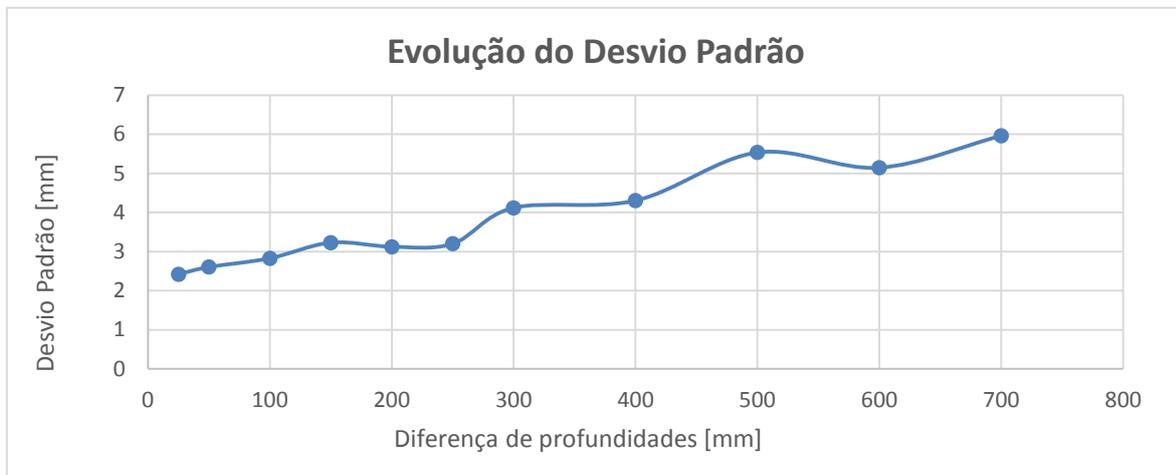


Figura 3.9. Evolução do desvio padrão no Teste 1.

### 3.3.2. Teste da Precisão 2 – Variação Angular Eixo Vertical

Este teste consistiu na rotação da caixa segundo o seu eixo vertical, simulando a análise do Kinect em relação a superfícies inclinadas. Foram testados ângulos de inclinação entre os  $0^\circ$  e os  $45^\circ$ , desfasados entre si de  $5^\circ$ . Optou-se por não fazer mais testes, pois é sabido que o ângulo de repouso da areia é no máximo entre  $33^\circ$  e  $34^\circ$ , conforme se apresentará mais adiante. A caixa foi posicionada a 1000 mm do equipamento. A Figura 3.10 ilustra 3 exemplos.



Figura 3.10. Teste da Precisão 2

Para validação dos resultados dados pelo Kinect, selecionaram-se as profundidades relativas aos pontos 1 e 2 mostrados na Figura 3.10 e comparou-se a diferença entres as mesmas com a diferença real, calculada através do recurso à trigonometria.

Sabendo o comprimento da caixa (C) e o ângulo ( $\alpha$ ) que a mesma faz com o Kinect, facilmente se calcula a profundidade real (P) entre 1 e 2.

$$P = C \times \text{sen}(\alpha). \quad (3.1)$$

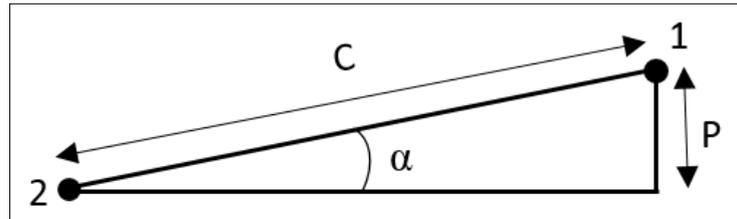


Figura 3.11. Esquema do cálculo da profundidade real no Teste 2

Comparando agora os valores obtidos das duas formas traçaram-se os gráficos das Figura 3.12 e Figura 3.13, que mostram a evolução do erro ao longo da variação angular.

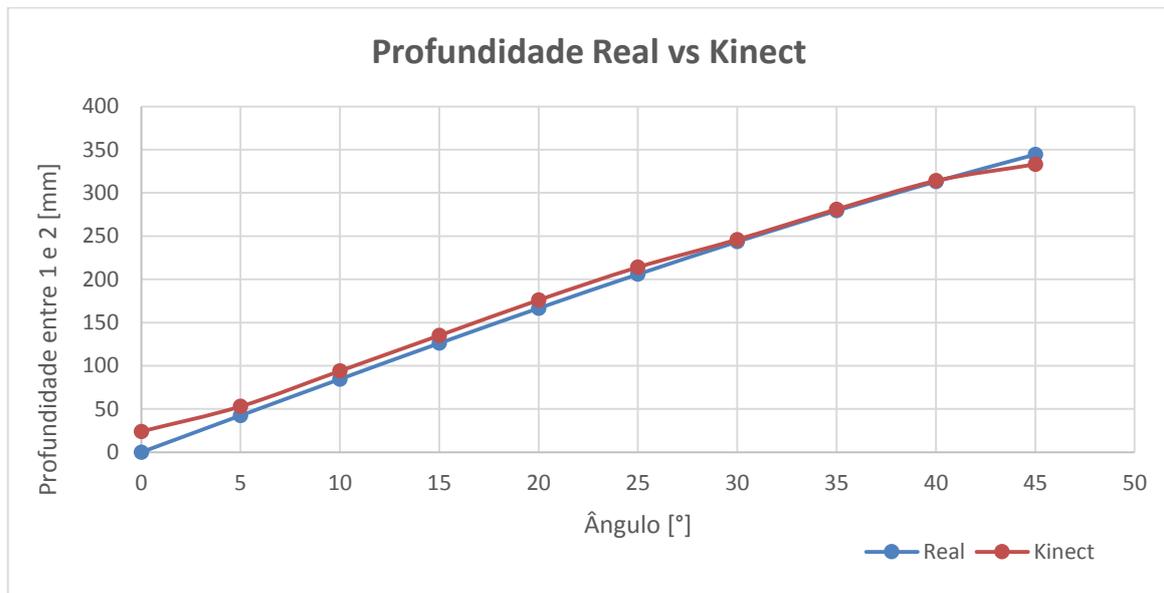
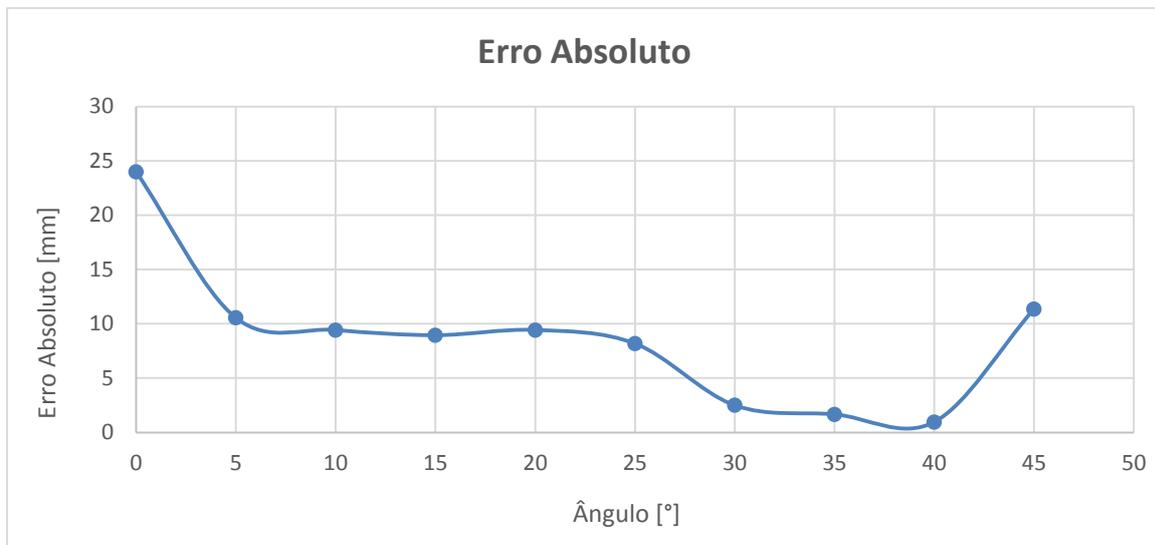


Figura 3.12. Profundidade Real vs Kinect Teste 2.



**Figura 3.13.** Evolução do erro absoluto no Teste 2.

Da análise dos dois gráficos conclui-se que o erro máximo é de 24 milímetros, quando o plano analisado é paralelo ao Kinect, mas que, na situação mais enviesada, entre 30 e 40°, o erro não ultrapassa os 5 milímetros, o que demonstra uma melhor aquisição dos valores de profundidade quando o perfil a caracterizar se encontra nestas condições.

### **3.3.3. Teste da Precisão 3 – Variação Angular Eixo Horizontal**

Este último teste à precisão do Kinect é semelhante ao abordado na secção 3.3.2 anteriormente. A única diferença está na rotação da caixa, que agora se faz em relação a um eixo horizontal, partindo do ângulo da posição inicial, 0°, até 35°, com um incremento de 5° por teste. Este limite angular deve-se, mais uma vez, à tentativa de aproximar o declive máximo dos grãos numa pilha de areia e à dificuldade em manter a caixa em posições de ângulo superior. Novamente, a caixa foi colocada a 1000 milímetros da câmara e o eixo fixo da mesma foi a aresta inferior, como se pode observar na Figura 3.14.

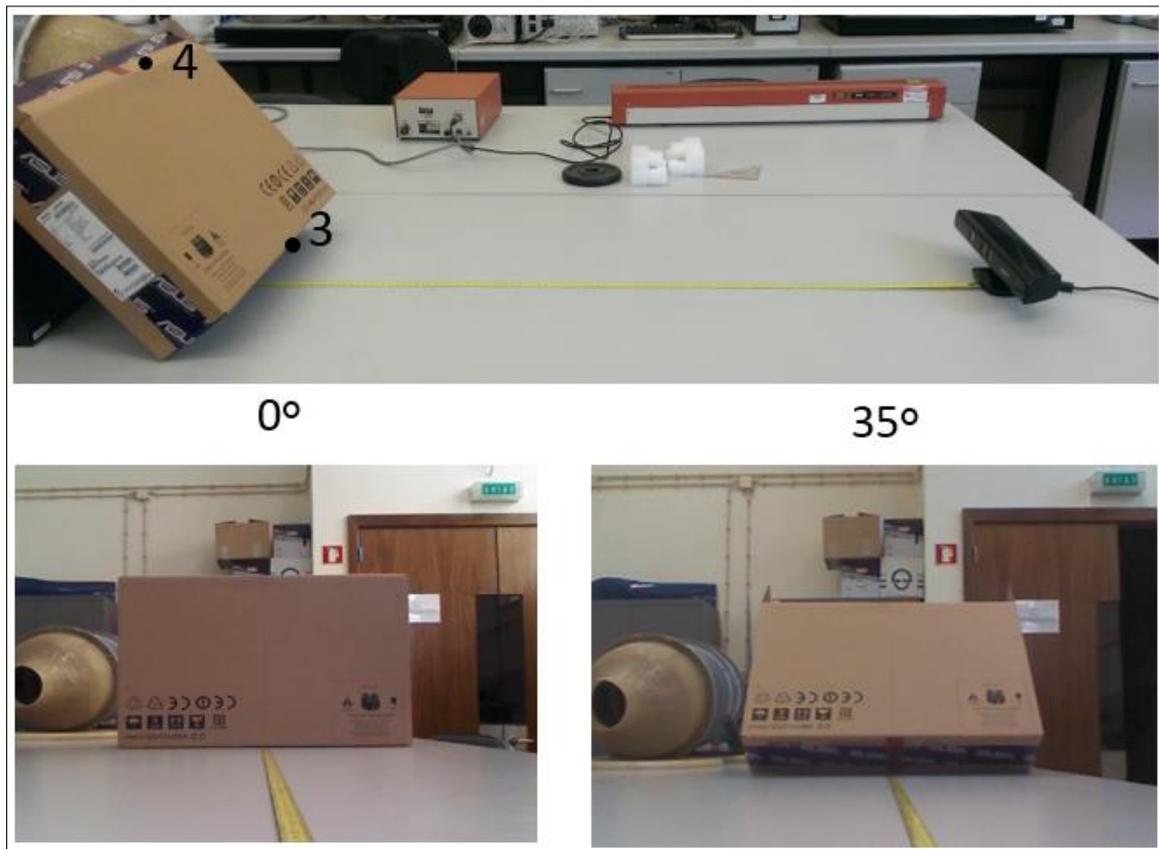


Figura 3.14. Teste da Precisão 3

Para o cálculo das diferenças reais de profundidades entre 3 e 4, recorreu-se novamente, à trigonometria.

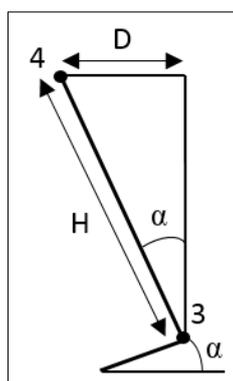


Figura 3.15. Esquema do cálculo da profundidade real no Teste 3

Como verificado na Figura 3.15, sabendo que  $H$  é a altura da caixa e  $\alpha$  o ângulo de inclinação da mesma com a horizontal, tem-se que:

$$D = H \times \text{sen}(\alpha). \quad (3.2)$$

Após o cálculo das diferenças entre os valores obtidos nas posições 3 e 4 em cada situação angular e posterior comparação com os valores reais, obtiveram-se os gráficos ilustrados na Figura 3.16 e na Figura 3.17.

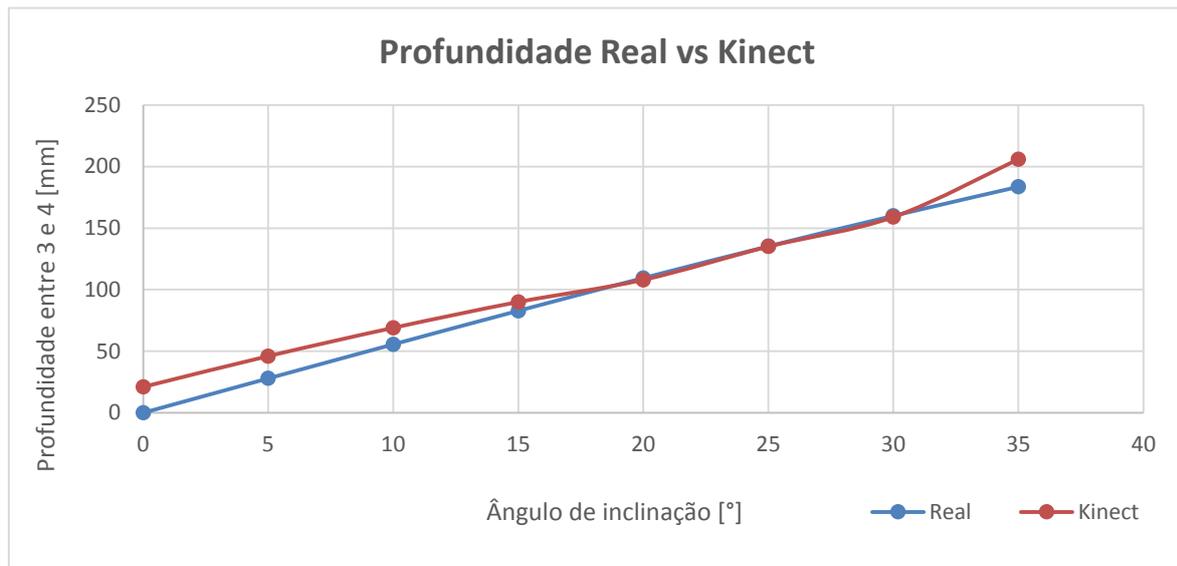


Figura 3.16. Profundidade Real vs Kinect Teste 3.

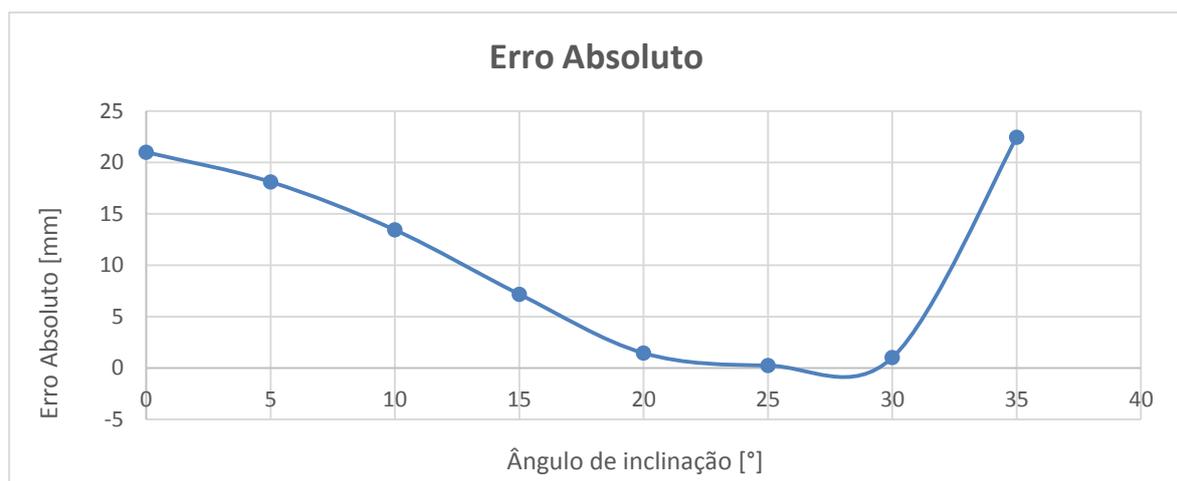


Figura 3.17. Evolução do erro absoluto no Teste 3.

A análise desses gráficos indica-nos que, nas posições de maior e menor inclinação, o erro é bastante significativo - aproximadamente 20 mm-, enquanto, nas posições similares à condição de repouso da areia (sensivelmente 33° na posição mais

extrema) numa pilha cónica, o erro é inferior a 5 mm. De novo, concluiu-se que, num perfil de inclinação semelhante ao que se pretende estudar, o erro do Kinect é baixo.

Em todos os testes acima descritos, foi ainda observado que, nas zonas em que as diferenças reais de profundidade são maiores, o Kinect possui uma certa dificuldade em representar essas “arestas”.

### 3.4. Limitações do Kinect encontradas após os testes

Após a análise detalhada dos testes apresentados, concluiu-se que o Kinect apresenta algumas limitações na medição dos valores de profundidade de cada fotografia. Uma dessas limitações é o número de valores de profundidade disponíveis. Uma vez que apenas estão disponíveis 11 bits de precisão (2048 valores), é natural que na gama de aquisição de valores apresentada, alguns valores não existam. A Figura 3.18 exemplifica isso mesmo onde se representa a distribuição de valores numa superfície plana colocada a 907 mm do Kinect.

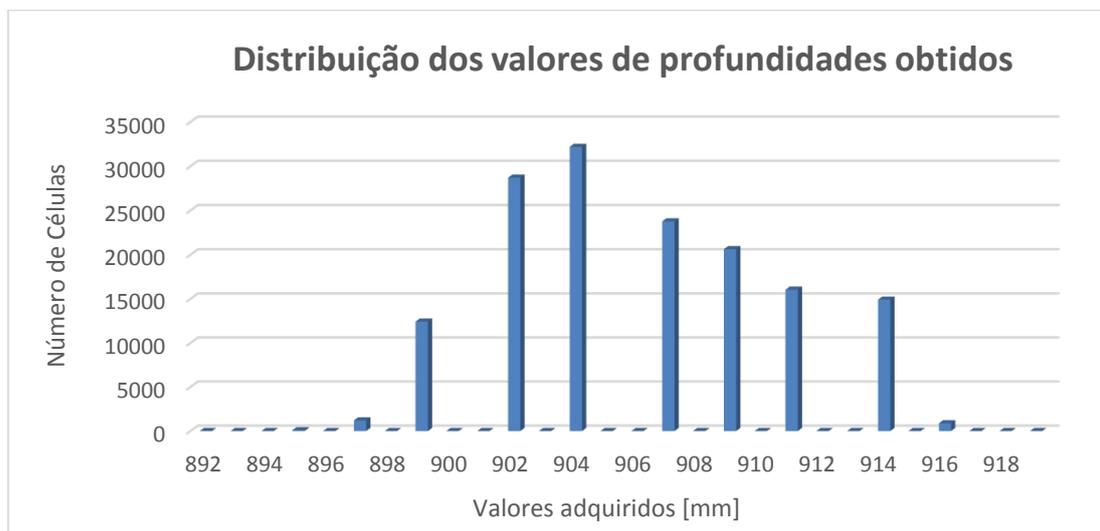
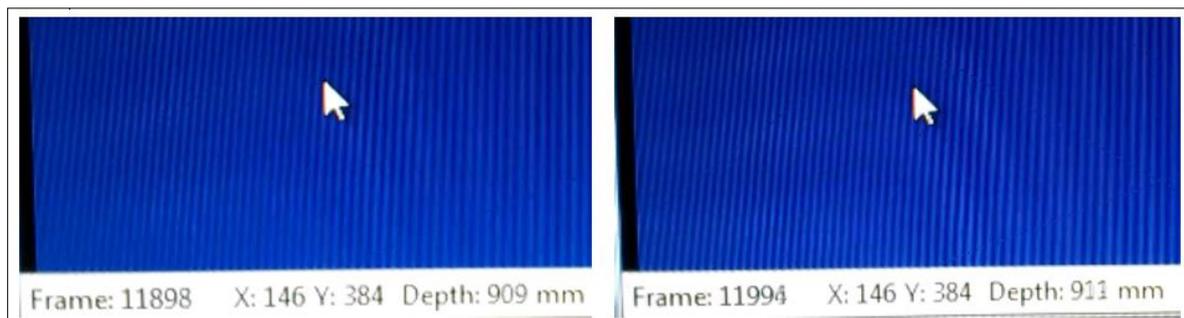


Figura 3.18. Valores de profundidade adquiridos pelo Kinect

Do gráfico retém-se que apenas alguns valores são representados, numa gama entre  $907 \pm 10$  mm.

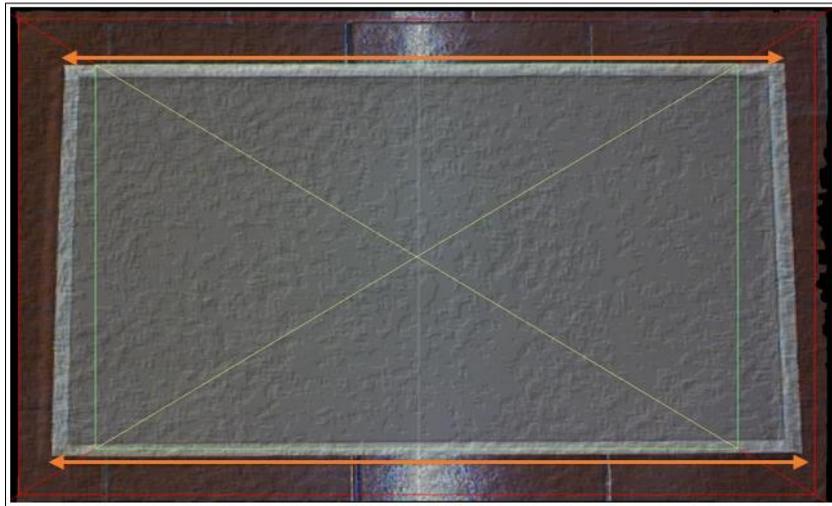
Outra dificuldade encontrada foi a imprecisão na aquisição dos valores relativos à profundidade: ao tirar duas fotografias seguidas a uma mesma situação, alguns valores sofrem alterações. Na Figura 3.19, para as coordenadas X=146 e Y=384, o valor de profundidade nesse ponto variou entre 909 mm e 911 mm, exemplificando o que foi acabado de referir.



**Figura 3.19.** Imprecisão na aquisição de valores

Passando agora às condições de luminosidade e propriedades dos materiais, também se concluiu que nas zonas onde os objetos apresentavam reflexos, os valores eram muito irrealistas quando comparados às células adjacentes aos mesmos. Sendo o material final do estudo a areia, não refletor, esta limitação não se tornou preponderante nos resultados finais.

A última limitação encontrada foi a difícil relação dos valores associados a cada pixel com a realidade. Esta dificuldade deve-se ao facto do eixo motorizado do Kinect não estar na sua posição base ( $0^\circ$ ), para que seja possível o paralelismo referido na secção 3.1.1, o que leva a uma distorção da imagem, como se verifica com o caso de um retângulo na Figura 3.20.



**Figura 3.20.** Exemplo da distorção de uma imagem.

As distâncias identificadas com as setas a laranja, deveriam contemplar o mesmo número de pixéis na matriz adquirida, pois os comprimentos reais são iguais. Não acontecendo isto, torna-se bastante difícil atribuir a cada pixel, a coordenada correspondente a uma posição real.

Conhecendo estas limitações, o próximo passo passou por procurar contorná-las tanto quanto possível, de modo a tornar mínimo o erro associado ao Kinect.

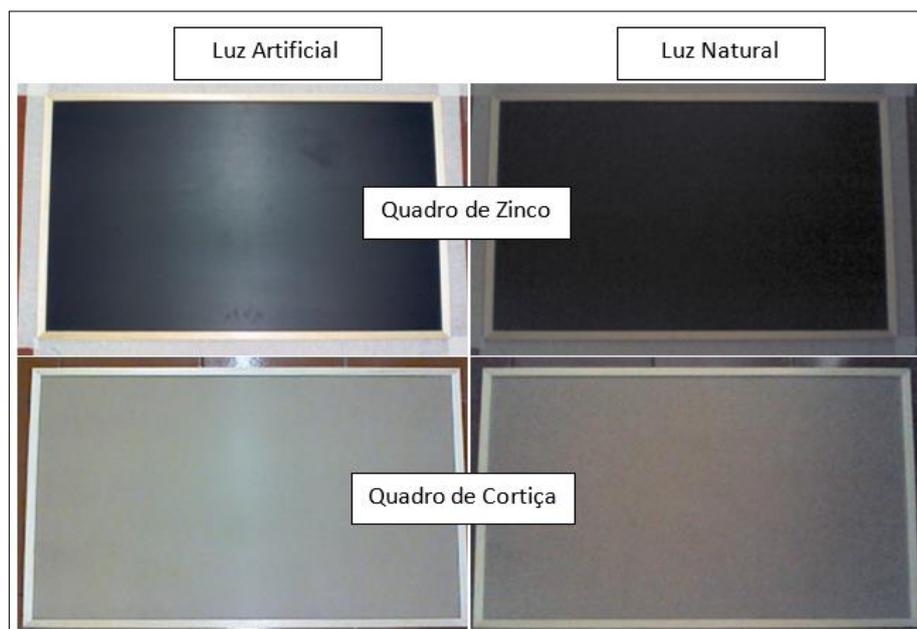


## 4. MINIMIZAÇÃO DOS ERROS ASSOCIADOS AO KINECT

Como referido anteriormente, este capítulo visa minimizar o erro do Kinect na caracterização de superfícies tridimensionais, tendo em conta o objeto final de estudo, nomeadamente o registo da topografia de uma pilha de areia. Desenvolveram-se então alguns métodos e algoritmos que permitiram suprimir em parte algumas das limitações encontradas.

### 4.1. Controlo das condições de luminosidade

Para melhor entender a influência das condições de luminosidade e dos reflexos dos materiais na aquisição de imagens com o Kinect, testaram-se quatro situações diferentes. Colocou-se um quadro preto de zinco sob condições de luz artificial e natural e, de igual modo, sob as mesmas condições de luz, um quadro em cortiça, material semelhante à areia no que respeita a capacidade refletora.



**Figura 4.1.** Teste de controlo de luminosidade e reflexos.

Após a aquisição das matrizes, dos quadros apenas, correspondentes a cada situação descrita, fez-se um tratamento dos dados, analisando os máximos e mínimos de cada matriz, bem como a média geral dos valores obtidos. A Tabela 4.1 exemplifica isso mesmo.

**Tabela 4.1.** Resultados obtidos após os testes realizados nas diferentes condições de luminosidade.

	<u>Zinco</u>		<u>Cortiça</u>	
	Luz Artificial	Luz Natural	Luz Artificial	Luz Natural
<b>Máximo (M)</b>	921	923	916	919
<b>Mínimo (m)</b>	895	902	897	899
<b>Variação entre extremos (M-m)</b>	26	21	19	20
<b>Média (K)</b>	910.64	911.53	907.03	907.19
<b>Valor "Real" (R)</b>	910	910	907	907
<b>Erro absoluto (K-R)</b>	0.64	1.53	0.03	0.19

Concluiu-se que, utilizando um material pouco refletor (cortiça), comparativamente a uma superfície refletora (zinco), obtêm-se melhores resultados. Quanto à iluminação da sala, os testes realizados não foram conclusivos. No entanto, o uso de luz artificial no teste com a placa de cortiça apresentou os melhores resultados, pelo que todos os testes posteriormente realizados foram concebidos nestas mesmas condições.

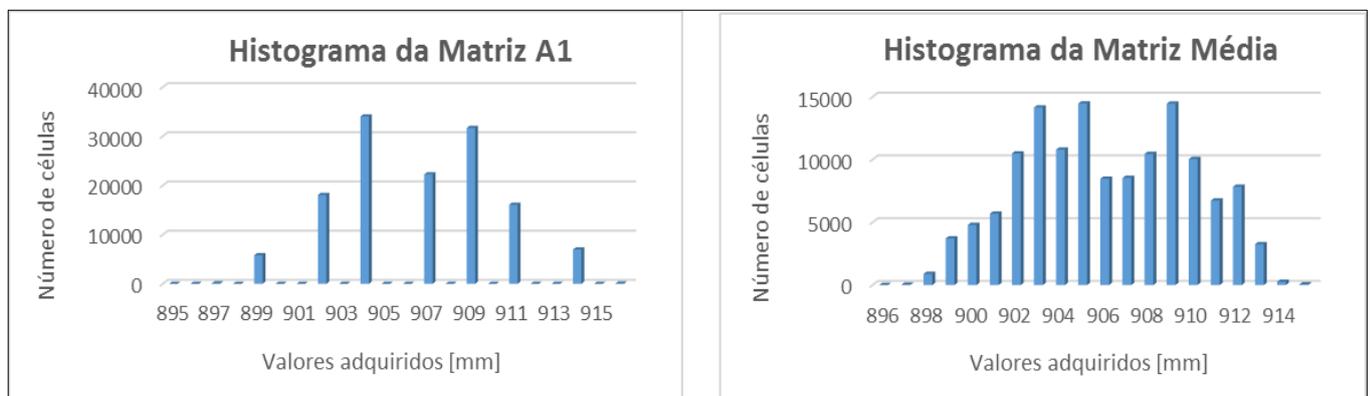
## 4.2. Análise da regularidade da aquisição de imagens

O método aqui utilizado consistiu na captura de várias fotos de uma mesma situação. Neste caso, colocou-se novamente o quadro de cortiça perante o Kinect, tirando 7 fotos em iguais condições à situação descrita. Posto isto, calculou-se a média dos valores de cada pixel das matrizes associadas a cada foto, obtendo-se assim uma matriz da média de todos os valores adquiridos. Os valores analisados foram os referidos na secção 4.1, tendo apenas sido acrescentado o desvio padrão da matriz.

**Tabela 4.2.** Comparação entre matrizes das diversas imagens capturadas em condições idênticas.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	Média
<b>Máximo (M)</b>	916	921	914	921	916	914	914	915
<b>Mínimo (m)</b>	895	897	895	895	895	895	895	896
<b>Varição entre extremos (M-m)</b>	21	24	19	26	21	19	19	19
<b>Média (K)</b>	906.54	907.13	905.69	906.76	905.56	905.31	905.33	906.06
<b>Desvio Padrão</b>	3.69	4.84	3.75	4.85	3.82	3.78	3.82	3.73
<b>Valor "Real" (R)</b>	907	907	907	907	907	907	907	907
<b>Erro absoluto (K-R)</b>	0.46	0.13	1.31	0.24	1.44	1.69	1.67	0.94

Da análise da Tabela 4.2 não se pode concluir que a matriz média apresenta os melhores resultados. Apesar dos valores desta matriz não se destacarem perante os restantes, este método apresenta a grande vantagem de disponibilizar uma maior gama de valores, como se verifica nos gráficos da Figura 4.2.



**Figura 4.2.** Comparação entre a matriz obtida na amostra 1 e a matriz média.

### 4.3. Algoritmos de correção

A inclusão de um algoritmo de correção às matrizes de valores obtidas pelo Kinect tem por objetivo contornar ao máximo as irregularidades por vezes apresentadas. Para melhorar ilustrar esta situação, segue a Figura 4.3.



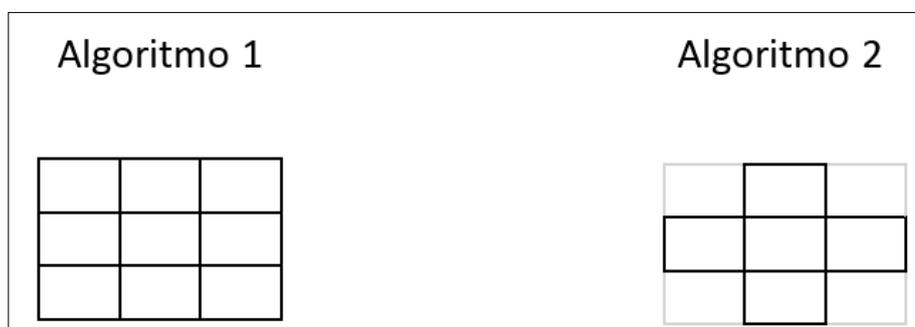
**Figura 4.3.** Sugestão de correção de valores incoerentes.

Reparando na evolução dos valores no lado esquerdo da figura, tem-se que os números 2 e 5, evidenciados com um círculo vermelho, estão incorretos, assumindo que os valores em questão correspondem, por exemplo, a um plano inclinado sem irregularidades. Associando agora esta ideia a uma pilha cônica de areia, cujo ângulo de repouso se sabe próximo dos  $33^\circ$ , podemos corrigir alguns valores das matrizes obtidas. A sucessão de valores do lado direito da figura acima apresentada é uma possível correção. A implementação deste tipo de algoritmos é então possível uma vez conhecido o ângulo associado à superfície a corrigir, bem como um valor aproximado da distância entre pixels. Posto isto, basta aplicar algumas regras básicas da trigonometria.

Foram desenvolvidos 4 algoritmos que são seguidamente expostos. A programação e implementação dos mesmos foi desenvolvida no Excel.

#### 4.3.1. Algoritmos 1 e 2

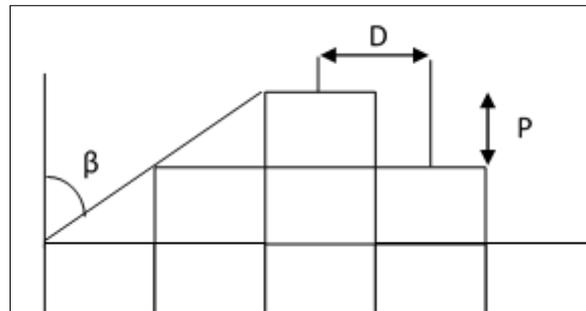
Identificados com os números 1 e 2, estes algoritmos baseiam-se nas diferenças individuais entre os pixels adjacentes e o central. A única diferença entre os mesmos encontra-se nas células vizinhas utilizadas, representadas na Figura 4.4.



**Figura 4.4.** Diferenciação das células usadas pelos algoritmos 1 e 2.

Como podemos constatar, o algoritmo 1 utiliza todas as células adjacentes à central, enquanto que o 2 apenas recorre às de contacto direto. Optou-se por fazer esta diferenciação com o simples intuito de obter mais termos de comparação.

Quanto à fórmula dos algoritmos, uma vez identificada a célula central, o ângulo da superfície ( $\beta$ ) e a distância entre pixels ( $D$ ), pode facilmente ser calculada a profundidade máxima ( $P$ ) entre células vizinhas, como apresentado em 4.1 e esquematizado na Figura 4.5



**Figura 4.5.** Representação esquemática do cálculo de  $P$ .

$$P = D \times \tan(\beta). \quad (4.1)$$

Sabendo agora este valor, estes dois algoritmos apenas comparam a profundidade entre a célula central e as adjacentes com a profundidade máxima dada pela equação anterior. Caso a diferença de valores entre células vizinhas seja inferior ou igual ao valor calculado em 4.1, nada se altera. Caso seja superior, esse mesmo valor é substituído por um valor correspondente à média da célula central e da adjacente em questão, sendo posteriormente feita a média de todos os valores obtidos entre a célula central e as vizinhas, quer tenham sido alterados ou não. Visto que os resultados do Kinect são sempre números inteiros, os valores corrigidos também o serão.

Com o objetivo de garantir uma melhor compreensão do código utilizado, apresenta-se o esquema da Figura 4.6 aplicada apenas ao algoritmo 2, por ser menos extenso.

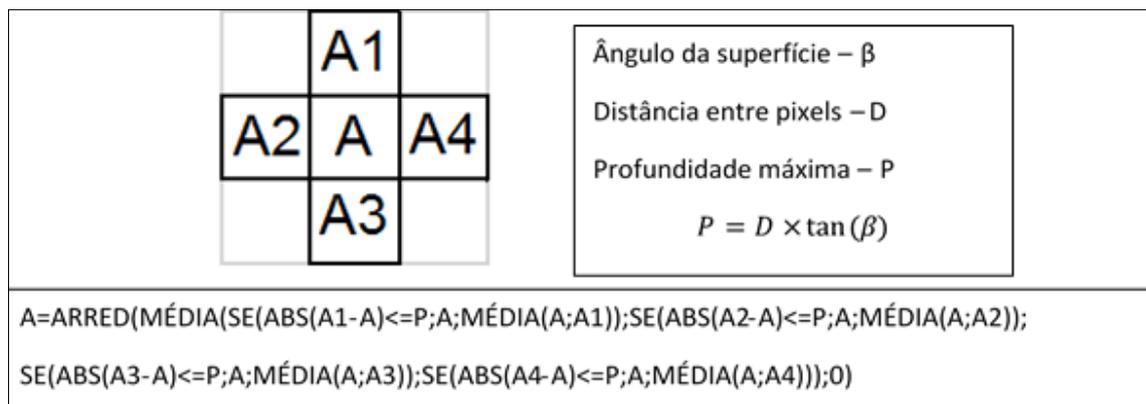


Figura 4.6. Código referente ao algoritmo 2.

### 4.3.2. Algoritmos 3 e 4

Diferentes dos algoritmos anteriores, estes últimos têm por base as diferenças totais entre os pixels adjacentes e o central. Uma vez mais, apenas diferem entre si no número de células vizinhas utilizadas.

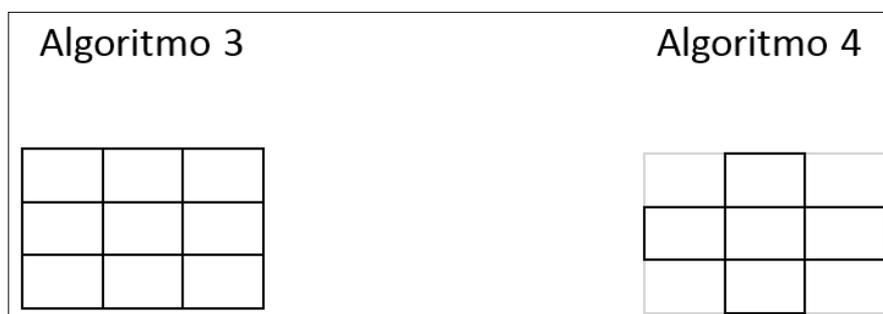


Figura 4.7. Diferenciação das células usadas pelos algoritmos 3 e 4.

Os parâmetros utilizados para a implementação do código são os mesmos descritos em 4.3.1 sendo, no entanto, diferente o valor a comparar. Neste caso, é feito o somatório das diferenças entre a célula central e as adjacentes: caso este seja menor ou igual a 8 vezes o valor de P, o valor não se altera; caso seja superior, a célula toma um novo valor, correspondente à média das 8 células adjacentes. Novamente, o valor obtido é arredondado à unidade. Este raciocínio apenas se aplica ao algoritmo 3, uma vez que no 4 apenas são usadas como termo de comparação 4 células. Assim, neste último, multiplica-se o valor de P por 4 e é feita a média das 4 células vizinhas. Uma vez mais, de modo a proporcionar uma

melhor percepção do código, ilustra-se a Figura 4.8, aplicada ao algoritmo 4, por ser menos complexo.

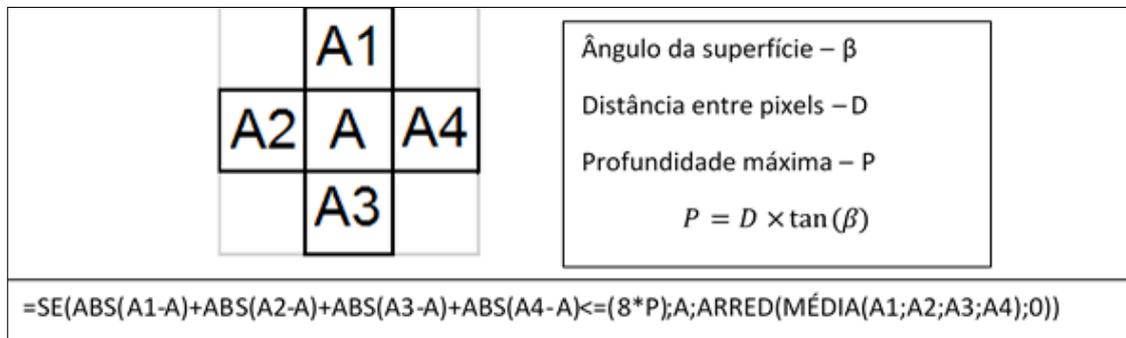


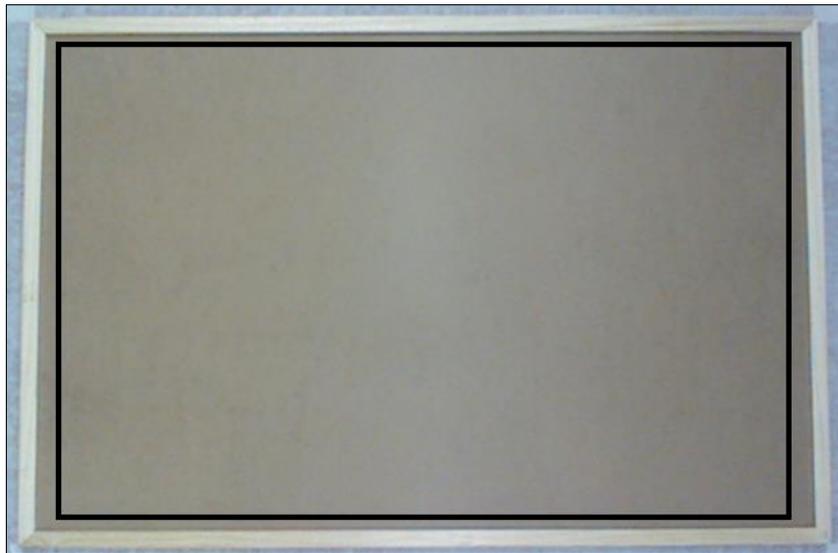
Figura 4.8. Código referente ao algoritmo 4.

### 4.3.3. Comparação de algoritmos

De modo a selecionar o algoritmo mais adequado à situação em questão, realizaram-se 2 testes. Às matrizes obtidas em cada um deles foram aplicados os diferentes algoritmos, tendo se realizado uma comparação posterior dos resultados. Analisaram-se alguns parâmetros fundamentais que se irão referir aquando da explicação do procedimento executado. Em todas as situações, cada algoritmo foi aplicado dez vezes. Optou-se por este valor pois, na maioria dos testes, ao fim deste número de operações, a correção matricial já não tinha significado.

#### 4.3.3.1. Teste de algoritmos 1

Este primeiro teste consistiu na colocação de um quadro de cortiça, perante o Kinect: foram tiradas 10 fotografias e feita a média das mesmas, apresentada numa matriz final. Os valores avaliados correspondem à área interna do quadro. A Figura 4.9 evidencia o teste realizado.



**Figura 4.9.** Teste de algoritmos 1.

Posto isto, aplicaram-se os diversos algoritmos à matriz da média das amostras obtidas e também a uma só amostra, isto para entender as alterações ocorridas numa das matrizes originais. Visto que, na realidade, todos os valores desse mesmo plano deveriam ser iguais, analisaram-se as diferenças entre os valores máximos e mínimos do plano do quadro, bem como o desvio padrão associado a todos os valores de cada matriz. Quanto menor esta diferença entre os extremos e o desvio padrão da matriz, melhores serão os resultados. Desta análise resulta a Tabela 4.3.

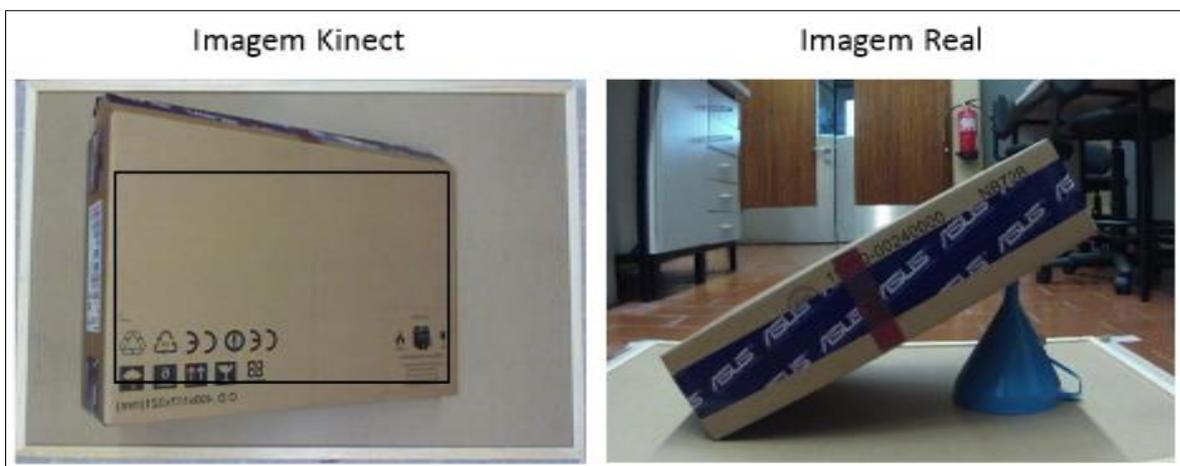
**Tabela 4.3.** Comparação entre matrizes no teste de algoritmos 1.

	Exemplo de uma amostra					Média das amostras				
	Sem Alg	Alg 1	Alg 2	Alg 3	Alg 4	Sem Alg	Alg 1	Alg 2	Alg 3	Alg 4
<b>Diferença ente Máx e Min</b>	22	21	22	18	17	17	16	16	15	15
<b>Desvio Padrão</b>	3.96	3.91	3.92	3.82	3.80	3.64	3.63	3.64	3.57	3.56

Como se pode aferir, os algoritmos que apresentaram melhores resultados, isto é, menor variabilidade, foram o 3 e 4, aplicados à matriz da média dos valores de cada amostra.

#### 4.3.3.2. Teste de algoritmos 2

Para este segundo teste, colocou-se uma caixa perante o Kinect, fazendo  $30^\circ$  com o plano horizontal. Neste caso, o objetivo passou por analisar um plano inclinado com um ângulo próximo do de repouso da areia. Para esta situação, optou-se apenas por capturar 5 matrizes diferentes, todas elas correspondentes à área da caixa inclinada. A Figura 4.10 ilustra-nos o teste realizado. A imagem da esquerda corresponde à visão obtida pelo Kinect, enquanto que a da direita elucida-nos uma perspetiva real do ensaio.



**Figura 4.10.** Configuração usada para teste dos algoritmos.

Os algoritmos foram, mais uma vez, aplicados a uma matriz de uma só amostra e à matriz das médias dos valores de todas as amostras. O tratamento dos dados, neste teste, processou-se de uma maneira um pouco diferente da anterior: sabendo que, na matriz selecionada, identificada com o retângulo mostrado na imagem da esquerda da Figura 4.10, os valores correspondentes à mesma coluna deveriam ser iguais, calculou-se a diferença entre os máximos e os mínimos e o desvio padrão respetivo; após a obtenção destes valores, calculou-se a média de todas as diferenças e dos desvios padrão de todas as colunas. Procedendo desta maneira para os diferentes algoritmos, obteve-se a Tabela 4.4.

**Tabela 4.4.** Comparação entre matrizes no teste de algoritmos 2 (1ª análise).

	Exemplo de uma amostra					Média das amostras				
	Sem Alg	Alg 1	Alg 2	Alg 3	Alg 4	Sem Alg	Alg 1	Alg 2	Alg 3	Alg 4
<b>Média das diferenças ente Máximos e Mínimos</b>	5.01	4.88	4.90	4.76	4.82	4.90	4.85	4.87	4.71	4.78
<b>Média dos desvios padrão</b>	1.17	1.14	1.14	1.13	1.15	1.11	1.10	1.11	1.09	1.10

Uma vez mais, quanto menor a diferença entre máximos e mínimos e menor o desvio padrão, mais exatos serão os resultados. Deste modo, o algoritmo 3 é o que melhor representa a situação em causa.

Para complementar esta informação, fez-se o mesmo procedimento mas apenas aplicado à matriz média da diferença entre a posição inicial, referida na secção 4.3.3.1, e a matriz média da caixa inclinada. Optou-se por realizar também este processo pelo simples facto de, numa situação prática, ser mais relevante analisar as diferentes posições dos grãos de areia quando sujeitos a erosão. A Tabela 4.5 apresenta os dados obtidos.

**Tabela 4.5.** Comparação entre matrizes no teste de algoritmos 2 (2ª análise).

	Sem Alg	Alg 1	Alg 2	Alg 3	Alg 4
<b>Média das diferenças ente Máximos e Mínimos</b>	8.28	8.05	8.12	7.58	7.83
<b>Média dos desvios padrão</b>	1.86	1.83	1.84	1.79	1.82

Concluiu-se, de novo, que o algoritmo 3 é o que apresenta melhores resultados.

Para finalizar o tratamento dos dados relativos a este ensaio, optou-se por analisar a evolução dos valores ao longo da caixa inclinada. Estando a ser analisado um perfil inclinado, pressupõe-se que a diferença entre os valores de profundidade numa mesma linha seja sempre positiva (diferença entre a profundidade maior e a menor), pelo que, estando os valores tão próximos entre si e atendendo ao valor real de cada pixel (D), sabemos também que essa mesma diferença de valores não deveria exceder o valor P, dado pela equação 4.2.

$$P = D \times \tan(30). \quad (4.2)$$

Neste caso, sendo  $D = 1.2$  mm, calculado pela associação de um número de pixels a um comprimento real da caixa, temos  $P = 0.69$  mm. Visto que apenas são apresentados valores inteiros na matriz analisada, o ideal seria então que a diferença entre valores de profundidade fosse 0 ou 1.

Tendo em consideração os pressupostos anteriores, construiu-se a Tabela 4.6, para 3 exemplos diferentes, expostos na Figura 4.11.

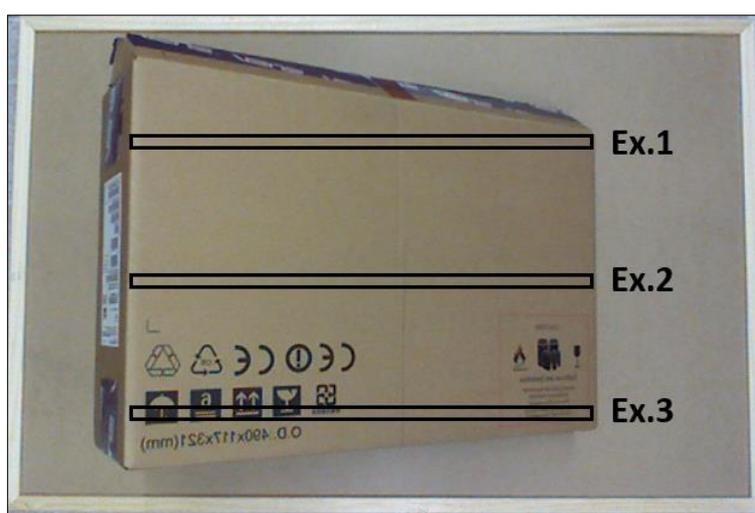


Figura 4.11. Teste de algoritmos 2 (3ª análise).

Tabela 4.6. Comparação entre matrizes no teste de algoritmos 2 (3ª análise).

	Exemplo 1					Exemplo 2					Exemplo 3				
	SA	AI1	AI2	AI3	AI4	SA	AI1	AI2	AI3	AI4	SA	AI1	AI2	AI3	AI4
4	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	10	8	8	0	0	6	8	5	0	0	4	0	2	0	0
2	46	48	45	7	14	53	54	58	4	24	56	52	52	29	48
1	134	135	141	211	198	115	115	119	216	179	132	148	144	176	146
0	129	129	126	131	136	143	142	138	125	139	127	121	121	133	136
-1	30	29	29	0	1	27	27	28	4	7	27	27	29	11	19
-2	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0	3	1	1	0	0
-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Soma</b>	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349

Na coluna da esquerda da Tabela 4.6, encontram-se as diferenças calculadas entre dois valores sucessivos para cada exemplo. A cada valor corresponde um número de situações onde essa diferença foi obtida, variando o exemplo a caracterizar e o algoritmo aplicado. A azul está o somatório de todas as diferenças analisadas, sendo que em todos os casos o resultado da soma deve ser sempre o mesmo, pois o número de células analisadas é constante.

Como descrito anteriormente, as diferenças entre células iguais a valores negativos ou valores superiores a 1, são consideradas incorretas, pelo que, da análise da tabela, concluiu-se que, para todos os exemplos, os algoritmos 3 e 4 são os que melhor satisfazem esta condição.

Tendo ainda em conta a evolução dos valores, calculou-se o valor real de cada célula, através da equação 4.2, assumindo como valor de referência o primeiro valor analisado, a partir do lado direito da Figura 4.11. Posteriormente, calculou-se o erro absoluto entre as células e a respetiva média, assim como o desvio padrão para cada exemplo e algoritmo. Como critério de seleção, o algoritmo que melhor se adequaria seria o que apresentasse menor desvio padrão e menor média do erro absoluto calculado. Os valores adquiridos estão presentes na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7.** Comparação entre matrizes no teste de algoritmos 2 (4ª análise).

	Exemplo 1					Exemplo 2					Exemplo 3				
	SA	AI1	AI2	AI3	AI4	SA	AI1	AI2	AI3	AI4	SA	AI1	AI2	AI3	AI4
<b>Média do erro</b>	-2.98	-2.99	-3.00	-3.10	-3.08	-8.21	-8.21	-8.22	-8.08	-8.09	-5.22	-5.24	-5.24	-5.22	-5.21
<b>Desvio Padrão</b>	8.376	8.377	8.378	8.373	8.38	7.986	7.983	7.972	7.974	7.97	8.01	8.02	8.021	8.00	8.01

Neste caso não se obteve nenhuma tendência para qualquer dos algoritmos, para além de que as diferenças de valores entre algoritmos são mínimas, razão pela qual nada se pode concluir da análise desta tabela.

Atendendo aos resultados obtidos pelos ensaios realizados e pelas diferentes análises dos dados adquiridos, concluiu-se que o **ALGORTIMO 3** é o mais apropriado ao objetivo pretendido, ou seja, o que melhor minimiza o erro de aquisição de dados pelo Kinect.

## 5. APLICAÇÃO DO KINECT NO REGISTO DE UMA PILHA DE AREIA

Como o próprio nome indica, este capítulo visa fazer a avaliação final do equipamento em estudo, aplicando-o na caracterização tridimensional de uma pilha de areia. Este procedimento foi efetuado no Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI), onde se encontra um túnel aerodinâmico cujo sistema de medição é a tecnologia laser, referida no início desta dissertação.

Uma vez destacadas as vantagens e desvantagens, tanto do Kinect como do sistema laser, faz-se aqui uma comparação entre os valores obtidos pelas diferentes tecnologias através de uma experiência simples. Por último, realizou-se um ensaio onde foi analisada a evolução da erosão de uma pilha de areia por ação do vento. Os resultados do mesmo foram obtidos pelo Kinect.

### 5.1. Kinect vs Laser

Sendo a tecnologia laser o sistema de referência na medição de valores de profundidade, faz todo o sentido comparar o Kinect com a mesma. Confrontando depois, para uma mesma situação, os valores obtidos pelos diferentes equipamentos, é possível entender quão longe estamos da possibilidade de substituir a tecnologia laser pelo Kinect.

Para melhor compreender as grandes diferenças entre estas duas tecnologias, construiu-se a Tabela 5.1.

**Tabela 5.1.** Laser vs Kinect - Desvantagens e Vantagens.

	<b>LASER</b>	<b>KINECT</b>
<b>PRECISÃO/EXATIDÃO</b>	Muito Boa	Razoável
<b>RAPIDEZ NA AQUISIÇÃO DE RESULTADOS</b>	Muito Lento	Quase Instantânea
<b>FACILIDADE NA UTILIZAÇÃO</b>	FÁCIL	FÁCIL
<b>PREÇO</b>	Elevado	Reduzido

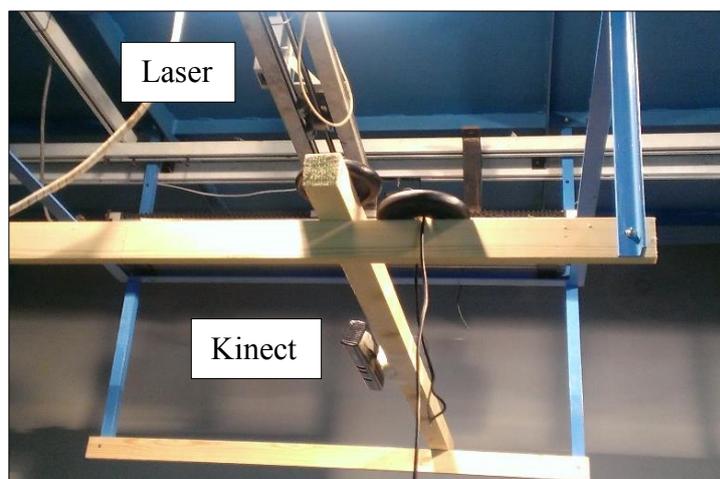
Enfatizando agora cada parâmetro individualmente, o sistema laser tem uma precisão na ordem do milímetro enquanto que, pelos testes realizados anteriormente, a precisão do Kinect está na casa dos centímetros. Outra desvantagem associada ao Kinect é a imprecisão na aquisição de dados.

Por outro lado, é possível adquirir o Kinect por um preço sensivelmente 10 vezes inferior ao do sistema laser e a caracterização de superfícies tridimensionais é bastante rápida. Se compararmos os dois equipamentos, e sabendo que o sistema laser demora cerca de 5 segundos para medir um ponto, no caso de quisermos mensurar uma grelha (640x480), este processo levaria cerca de 426 horas (quase 18 dias), enquanto que com o Kinect bastariam 30 segundos.

O baixo preço e a rapidez na aquisição das imagens são os grandes trunfos que tornam este novo equipamento tão aliciente.

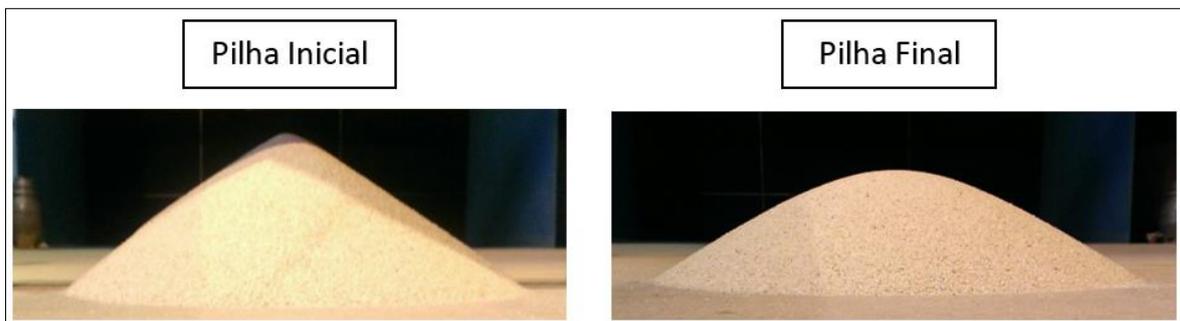
### 5.1.1. Teste de Comparação

Neste teste, posicionou-se o Kinect junto do equipamento laser (Figura 5.1), regulando o eixo motorizado, de modo a que o plano em frente do mesmo fosse paralelo, e igualando o centro de aquisição das imagens (câmara de infravermelhos) com o centro de referência do laser. Este posicionamento foi realizado para facilitar a comparação dos valores adquiridos entre as 2 tecnologias.



**Figura 5.1.** Posicionamento do equipamento laser e do Kinect.

Para compararmos o desempenho dos diferentes dois equipamentos, obtiveram-se os valores da diferença de profundidades em 3 situações distintas, isto porque, como se verifica na Figura 5.1, os equipamentos não se encontram à mesma distância da superfície a caracterizar. A primeira situação corresponde à colocação de uma placa de cortiça, semelhante à da Figura 4.9, em frente dos dois equipamentos. As duas situações restantes estão ilustradas na Figura 5.2 e referem-se à colocação de uma pilha de areia sobre a placa.



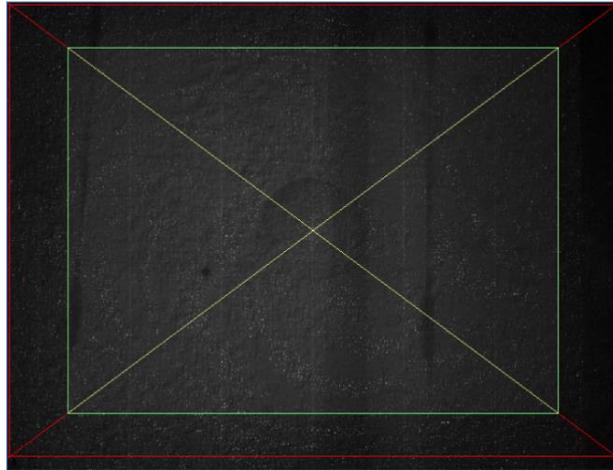
**Figura 5.2.** Cones de areia para comparação entre o Kinect e a tecnologia laser na sua caracterização.

A cada situação atribuiu-se um nome para se tornar mais fácil a perceção da Figura 5.4. Então, à primeira deu-se o nome de posição inicial (PI) e à segunda e terceira, pilha de areia inicial (PAI) e pilha de areia erodida (PAF), respetivamente. As matrizes obtidas foram então as diferenças entre PI e PAI e PAF e PAI.

Para a caracterização das superfícies com o sistema laser, definiu-se uma grelha com 441 pontos (21x21), desfasados 10 mm entre si, sendo o ponto central da matriz correspondente ao ponto definido como a origem do sistema laser e a distância máxima entre extremos de 400 mm. Deste modo, a cada coordenada (x,y) corresponderia um valor de profundidade.

Quanto à identificação das coordenadas reais dos valores medidos com o Kinect, dadas as dificuldades já descritas em 3.4, calculou-se primeiro o valor médio de cada pixel, colocando diferentes objetos em frente da câmara, de modo a associar um número de pixels a cada comprimento. Deste processo compreendeu-se que, à distância a que o Kinect se encontrava da pilha de areia, cada pixel correspondia a 3.75 mm no plano horizontal na situação referida como PI. Tendo esta informação e sabendo que o centro do Kinect coincidia com o ponto definido como a origem do sistema laser, facilmente se identificaram os pontos a comparar.

A construção da pilha de areia foi feita também de modo a que o centro da pilha coincidissem com o centro dos equipamentos, como se verifica na Figura 5.3



**Figura 5.3.** Coincidência entre o centro da pilha de areia e o centro da imagem obtida com o Kinect.

Após a obtenção das diferenças das matrizes dos valores de profundidade adquiridos com o laser e com o Kinect, compararam-se os valores em pontos de igual coordenada. De notar que foram aplicados os algoritmos anteriormente apresentados para minimizar o erro às matrizes obtidas com o Kinect, e que as mesmas foram alteradas simetricamente segundo o eixo vertical por causa da forma de identificação das imagens pela câmara, referida na secção 3.2. Segue então a Figura 5.4, que ilustra as diferenças entre matrizes.

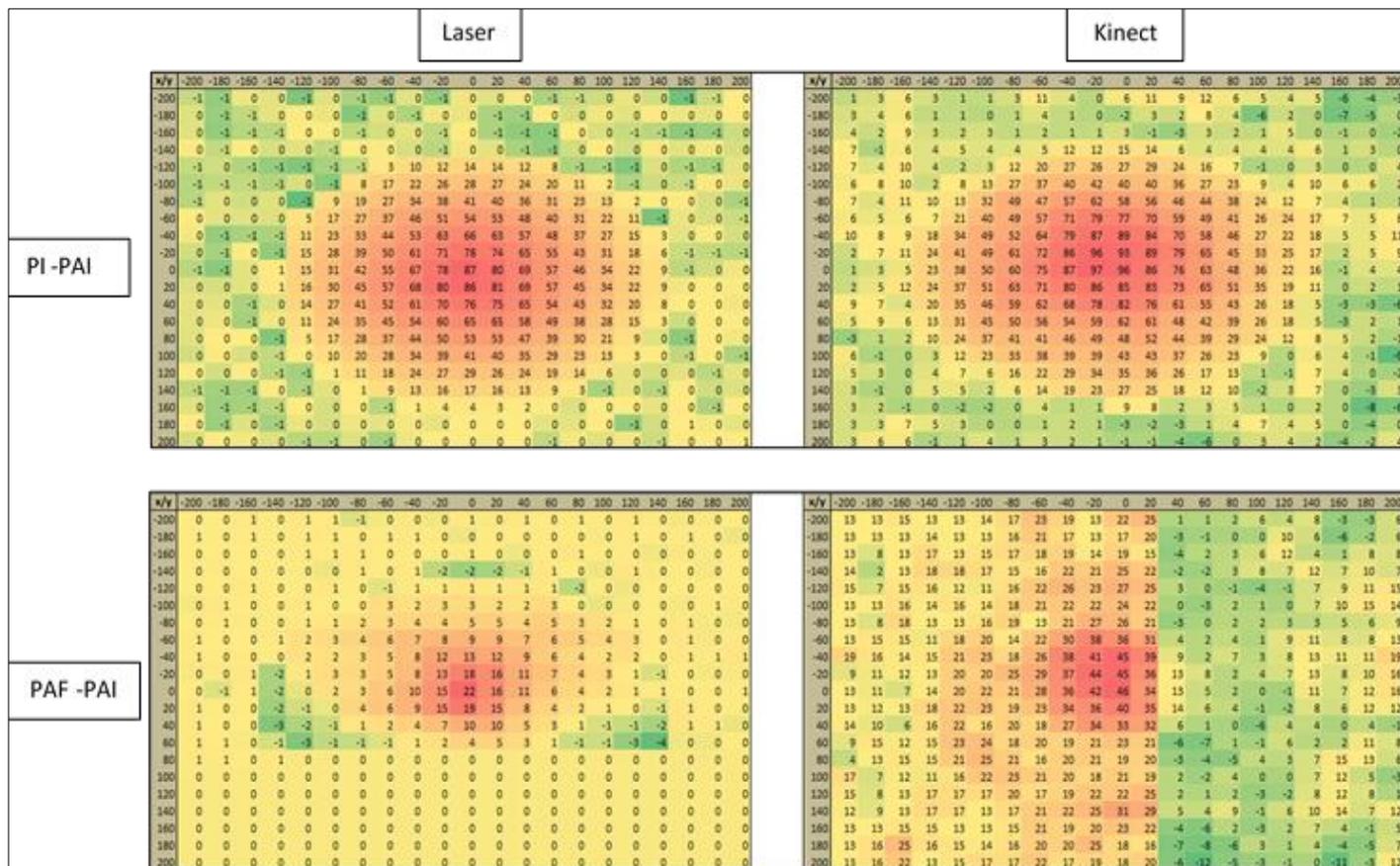


Figura 5.4. Comparação de matrizes entre o Laser e o Kinect.

Tomando como referência os valores medidos com o laser, calculou-se o erro absoluto entre as matrizes obtidas com o Kinect e o laser, representadas na Figura 5.4. Após a obtenção dessas mesmas matrizes, calcularam-se o máximo, a média e o desvio-padrão da respectiva matriz. De modo a identificar as correções realizadas pelo algoritmo 3, comparou-se ainda com a matriz original, sem aplicação de nenhum algoritmo. A Tabela 5.2 resume esses valores.

Tabela 5.2. Erro do Kinect.

	KINECT			
	PI-PAI		PAF-PAI	
	Sem Alg	Alg 3	Sem Alg	Alg 3
<b>Erro absoluto máximo [mm]</b>	33	30	38	33
<b>Média [mm]</b>	7.26	7.07	12.57	12.30
<b>Desvio Padrão [mm]</b>	6.79	6.60	8.17	7.69

Analisando a influência do algoritmo nas matrizes, nota-se, de facto, uma ligeira melhoria dos resultados.

Observando agora o erro calculado entre as matrizes, quer do Kinect quer do laser, comprova-se o que era já esperado, pelos resultados dos testes da precisão do Kinect iniciais. Um erro médio de aproximadamente 1 cm com valores extremos de até 3 cm e um desvio padrão elevado.

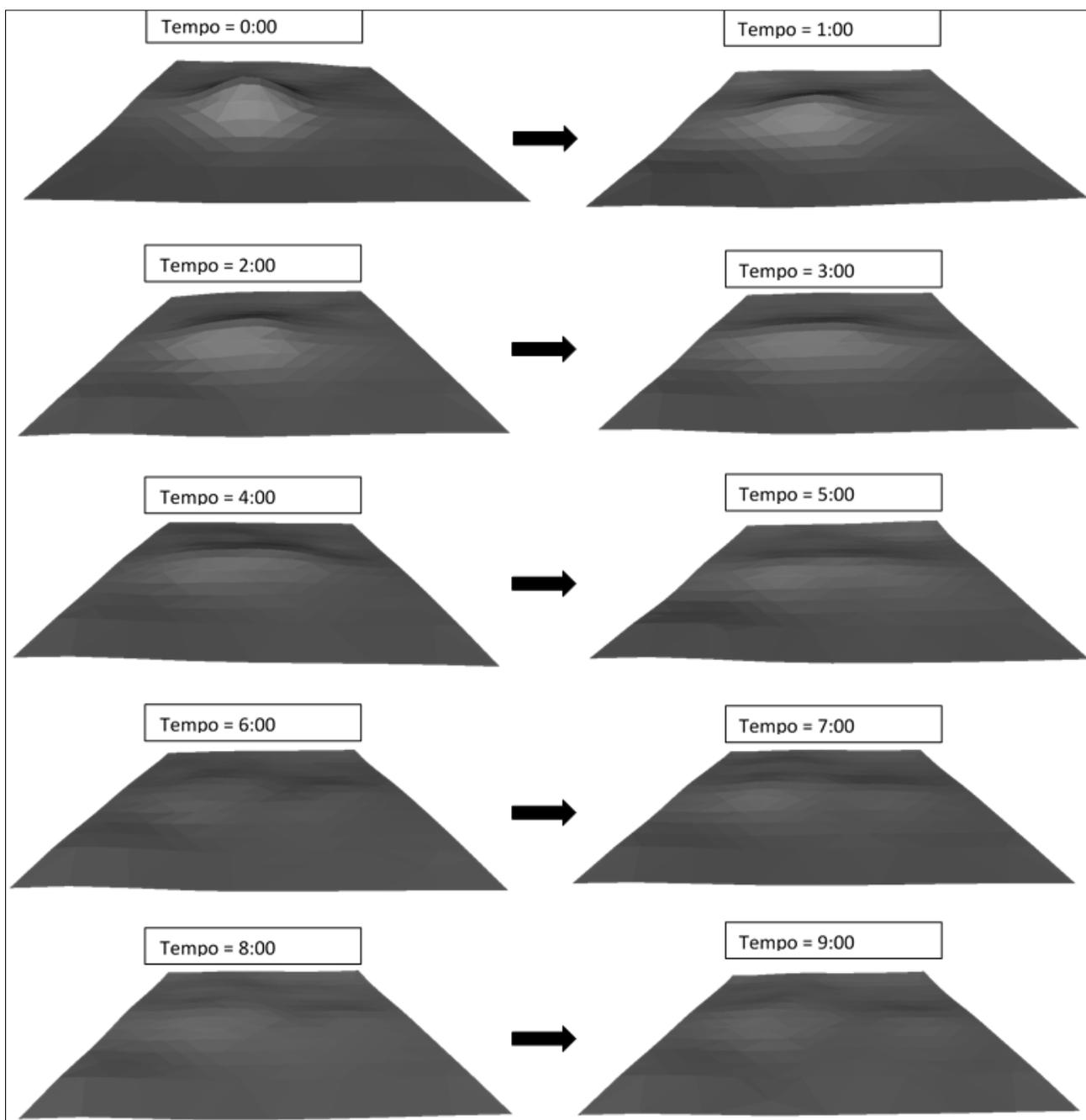
## **5.2. Registo da evolução da erosão de uma pilha de areia por ação do vento**

Uma vez analisado e testado o Kinect à pilha não erodida, compreendendo as vantagens e desvantagens do mesmo, realizou-se um ensaio em túnel aerodinâmico, tendo em vista o registo da evolução da erosão de uma pilha de areia quando sujeita à erosão por ação do vento. Este registo só foi possível graças à rapidez de aquisição dos valores de profundidade do equipamento. Caso se optasse por utilizar o sistema laser, devido à morosidade da obtenção desses dados, não seria possível realizar este ensaio nas condições desejadas.

Formou-se, portanto, uma pilha de areia com cerca de 10 cm de altura e pôs-se em funcionamento o túnel de vento, com velocidade do escoamento não perturbado de 9.9 m/s. O registo da evolução da pilha de areia foi feito de minuto em minuto, durante 9 minutos. Ao fim deste tempo, a areia já tinha sido quase toda erodida, pelo que se interrompeu o ensaio ao fim daquele tempo.

As matrizes obtidas em cada minuto não sofreram nenhuma alteração porque não foi possível aplicar os métodos de minimização do erro desenvolvidos.

Para melhor visualizar os dados adquiridos pelo Kinect ao longo do ensaio, utilizou-se o programa Meshlab, que permitiu a transformação dos pontos obtidos, coordenadas (x, y, z), numa imagem a 3 dimensões. A Figura 5.5 é o resultado disso mesmo.



**Figura 5.5.** Evolução 3D computacional da pilha de areia.

Ao analisar-se esta evolução, denota-se que, quando as superfícies a caracterizar possuem um relevo acentuado, os pontos obtidos correspondem melhor à realidade do que na situação em que esse relevo passa a ser quase inexistente. É, de facto, possível observar a evolução da deformação da areia ao longo do tempo, embora a precisão dos resultados seja bastante baixa.



## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu no estudo da aplicabilidade do Kinect na medição da forma de superfícies tridimensionais em detrimento de um sistema laser, uma vez que este é bastante mais económico e permite uma medição quase imediata de uma enorme gama de valores. Realizaram-se diversos testes para avaliar a precisão do Kinect e desenvolveram-se alguns algoritmos de forma a minimizar o erro associado ao mesmo. Por fim, compararam-se os valores dados pelo Kinect com aqueles medidos com a tecnologia laser, de modo a compreender as diferenças entre estas duas tecnologias ao nível da caracterização da forma de superfícies tridimensionais.

### 6.1. Avaliação dos resultados obtidos

Ao longo dos testes realizados, concluiu-se que a precisão do Kinect é da ordem dos centímetros (até  $\pm 4$ cm). Em todos os testes da precisão do Kinect (1, 2 e 3), a diferença entre os valores medidos e os valores reais era inferiores aos 40 milímetros. Notou-se também uma elevada imprecisão na aquisição dos dados de uma mesma imagem e a dificuldade do equipamento em adquirir uma maior gama de valores, uma vez que o mesmo apenas apresenta 11 bits de precisão (2048 valores) numa escala que poderá ir de 0.4 a 8 metros.

Relativamente à caracterização de superfícies planas e inclinadas, o Kinect apresentou melhores resultados para as segundas, para ângulos compreendidos entre 20° e 30°.

Estudou-se também o efeito das condições de luminosidade e reflexos dos materiais, concluindo-se que, para um material não refletor, os valores obtidos são mais corretos.

Após o reconhecimento das limitações associadas ao Kinect, desenvolveram-se vários métodos e algoritmos, de forma a minimizar o erro do equipamento. O teste da análise

da regularidade da aquisição de imagens, que consistiu na aquisição de diversas imagens para uma mesma situação, permitiu aumentar a gama dos valores disponíveis da matriz calculada. Finalmente, aplicaram-se diversos algoritmos às matrizes obtidas, baseados nas relações de distâncias entre pixéis, tendo em conta a inclinação da superfície, com o intuito de corrigir alguns valores que, na realidade, estariam incorretos.

Em suma, os métodos e algoritmos utilizados para minimização do erro associado ao Kinect aumentaram a sua precisão, embora não a tenham corrigido significativamente.

Atendendo agora a aplicabilidade deste equipamento à situação de estudo desejada (caraterização da erosão de uma pilha de areia), concluiu-se que, apesar de todas as vantagens já enumeradas, o Kinect não possui precisão e exatidão suficientes, como seria de esperar após a análise dos ensaios anteriormente realizados.

No entanto, se o objetivo se prender na análise de situações em que a precisão desejada seja de decímetros, o Kinect é capaz de as caracterizar impecavelmente. Isto é, para objetos grandes e com baixo nível de detalhe, o Kinect substitui, sem qualquer problema, a tecnologia laser. Exemplo disso seria o registo da evolução de uma pilha de areia, sujeita a erosão por ação do vento, mas que possuísse uma altura significativamente elevada, onde o erro de alguns centímetros entre os valores adquiridos não fosse significativo.

Outro exemplo da aplicabilidade desta tecnologia é usando-a como sensor de movimento, uma vez que, novamente, o detalhe e a precisão dos valores obtidos não são fundamentais.

Posto isto, conclui-se que este equipamento pode ter uma grande variedade de aplicações, não possuindo no entanto precisão suficiente em situações onde seja exigido elevado rigor e precisão na caracterização de objetos tridimensionais.

## **6.2. Dificuldades encontradas**

Na fase inicial da dissertação, a principal dificuldade esteve na instalação correta dos drivers associados ao Kinect, uma vez que estes exigiam uma boa placa gráfica. Ultrapassado este problema, o desafio centrou-se na forma como seriam traduzidas as imagens capturadas para um conjunto de valores. Atualmente existem muitos programas que

o fazem automaticamente, mas que não permitem chegar aos valores sem o recurso a códigos de programação. Felizmente, o MatLab possui uma aplicação que o faz diretamente, o que facilitou bastante esta tarefa.

Por último, as dificuldades encontradas centraram-se nas limitações que o Kinect possui e na maneira como se haveria de contornar as mesmas. De todas estas, a que mais desconforto causou foi a dificuldade de associar a um pixel adquirido uma coordenada real.

### **6.3. Propostas para trabalhos futuros**

Para trabalho futuro, sugere-se que se realize o mesmo tipo de trabalho aqui abordado, mas testando o equipamento que veio substituir este modelo do Kinect. Designado por Kinect 2 é o sensor que acompanha a nova consola, XBOX ONE. A versão para Windows tem o seu lançamento previsto para o verão de 2014 [14].

As diferenças no novo Kinect são muitas e o sensor de profundidade parece ter sido bastante melhorado. Neste âmbito, em vários blogs [15,16,17,18] é descrito que a precisão e detalhe do Kinect 2 é muito superior e que isso se deve, em parte, ao facto do sensor utilizar a técnica *time of flight*, adaptada pela Microsoft. É também referido que as condições de luminosidade já não são problema e que este sensor funciona na perfeição em qualquer ambiente.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dimetix USA (2009), “DLS-B15 Laser distance sensor”. Acedido a 10 de Maio de 2014, em: [http://www.dimetix-usa.com/catalog/product\\_info.php?cPath=22\\_23&products\\_id=30](http://www.dimetix-usa.com/catalog/product_info.php?cPath=22_23&products_id=30).
2. Ferreira, A., D. e Fino, M., R., M. (2011), “A wind tunnel study of wind erosion and profile reshaping of transverse sand piles in tandem”, *Geomorphology* 139-140 (2012) 230-241.
3. Ferreira, A., D. e Lambert, R., J. (2010), “Numerical and wind tunnel modeling on the windbreak effectiveness to control de aeolian erosion of conical stockpiles”, *Environ Fluid Mech* (2011) 61-76
4. Bello, G. S. (2010, 10 de Dezembro), “Kinect: a análise completa do Baixaki com vídeo e infográfico”. Acedido a 9 de Novembro de 2013, em: <http://www.tecmundo.com.br/xbox-360/7021-kinect-a-analise-completa-do-baixaki-com-video-e-infografico.htm>.
5. Ultra Downloads (2012, 13 de Janeiro), “Como funciona o Kinect”. Acedido a 9 de Novembro de 2013, em: <http://canaltech.com.br/o-que-e/kinect/Como-funciona-o-Kinect/>.
6. Morgul, M. (2010, 11 de Novembro), “Kinect: Como funciona?”. Acedido a 9 de Novembro de 2013, em: <http://www.minasmorgul.com.br/blog/kinect-como-funciona/>.
7. Microsoft, “Get started building Kinect for Windows apps and experiences”. Acedido a 17 de Novembro de 2013, em: <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindowsdev/Start.aspx>.
8. Microsoft, “Kinect for Windows Sensor”. Acedido a 10 de Novembro de 2013, em: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh855355.aspx>.
9. Ttg, Diego (2010, 9 de Novembro), “Um Cientista Explica o Microsoft Kinect”. Acedido a 9 de Novembro de 2013, em: <http://webholic.com.br/um-cientista-explica-o-microsoft-kinect/>.
10. Ars technica (2013, 21 de Maio), “Watch us flail in front of the Microsoft Xbox One Kinect”. Acedido a 20 de Maio de 2014, em: <http://link.brightcove.com/services/player/bcpid2196096102001?bckey=AQ~~.AAAI DCBGhk~,VcmqiTAuekrwPweJ20LLt7jwm8LxmhCE&bctid=2402185160001>.
11. Curious Inventor (2013, 16 de Fevereiro), “How the Kinect Depth Sensor Works in 2 Minutes”. Acedido a 10 de Fevereiro de 2014, em: <https://www.youtube.com/watch?v=uq9SEJxZiUg>.
12. Costa, P.J.M. (2012). “Operação de *Pick and Place* adaptativa”. Tese de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica na especialidade de Automação (Robótica)

- e Sistemas), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. Acedido a 15 de Janeiro de 2014, em: <http://paginas.fe.up.pt/~ee07159/doku.php?id=home>.
13. Crock, N. (2011, 2 de Março), “Kinect Depth vs. Actual Distance”. Acedido a 15 de Janeiro de 2014, em: <http://mathnathan.com/2011/02/depthvsdistance/>.
  14. Schwartz, J. (2014, 21 de Janeiro), “Microsoft To Release Kinect 2 for Windows in Summer”. Acedido a 20 de Maio de 2014, em: <http://rcpmag.com/articles/2014/01/21/kinect-2-for-windows-in-summer.aspx>.
  15. Calçada, F. (2013, 25 de Maio), “Kinect 2: muito mais do que simples detecção de movimentos”. Acedido a 20 de Maio de 2014, em: <http://www.revolucaodigital.net/2013/05/25/kinect-2-opiniao-62633/>.
  16. Kim, P. (2013, 22 de Maio), “New Kinect Gets Closer to Your Body”. Acedido a 20 de Maio de 2014, em: <http://createdigitalmotion.com/2013/05/new-kinect-gets-closer-to-your-body-videos-links/>.
  17. Pixinine, J. (2014, 27 de Março), “Testamos o Kinect 2 para Windows, que permite controlar PC através de gestos”. Acedido a 20 de Maio de 2014, em: <http://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2014/03/testamos-o-modelo-do-kinect-2-para-windows.html>.
  18. Walmsley, K. (2013, 27 de Novembro), “First impressions of Kinect for Windows 2.0 pre-release”. Acedido a 20 de Maio de 2014, em: [http://through-the-interface.typepad.com/through\\_the\\_interface/2013/11/first-impressions-of-kinect-for-windows-20-pre-release.html](http://through-the-interface.typepad.com/through_the_interface/2013/11/first-impressions-of-kinect-for-windows-20-pre-release.html).