

# WALKBOT – DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA INFRA-ESTRUTURA PEDONAL COM RECURSO A PROCESSAMENTO DE IMAGEM TRIDIMENSIONAL

Paulo Cambra<sup>1</sup>, Miguel Costa<sup>2</sup>, Manuel Marques<sup>3</sup> e Filipe Moura<sup>4</sup>

<sup>1</sup> CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal.

E-mail: [paulo.cambra@tecnico.ulisboa.pt](mailto:paulo.cambra@tecnico.ulisboa.pt)

<sup>2</sup> ISR, Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa,

Portugal, E-mail: [mncosta@isr.ist.utl.pt](mailto:mncosta@isr.ist.utl.pt)

<sup>3</sup> ISR, Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa,

Portugal, E-mail: [manuel@isr.ist.utl.pt](mailto:manuel@isr.ist.utl.pt)

<sup>4</sup> CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal.

E-mail: [fmoura@tecnico.ulisboa.pt](mailto:fmoura@tecnico.ulisboa.pt)

---

## Sumário

*A qualidade do pavimento é um factor crítico para a circulação quer de veículos quer de pessoas. O mau estado do pavimento da infra-estrutura pedonal pode condicionar a circulação de pessoas e representar um risco para a sua segurança. No projeto WalkBot desenvolvemos um dispositivo de avaliação da qualidade da infra-estrutura pedonal com recurso a processamento de imagem tridimensional que constitui uma solução para a avaliação do estado do pavimento da infra-estrutura pedonal a larga escala. Os primeiros ensaios demonstraram o potencial desta solução na identificação automatizada de irregularidades à escala milimétrica.*

---

**Palavras-chave:** Acessibilidade pedonal; Pavimento; Gestão de infra-estrutura; Aplicação tecnológica; Passeio

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade do pavimento rodoviário é um factor da maior importância para a circulação de veículos, providenciando condições de segurança e conforto. Da mesma forma a qualidade dos passeios é um factor crítico para a circulação de pessoas. Enquanto por um lado a boa qualidade dos passeios proporciona condições de acessibilidade, atratividade e segurança para andar a pé, encorajando o caminhar enquanto modo de transporte e meio de realizar actividade física salutar [1][2], por outro lado, o mau estado do pavimento da infra-estrutura pedonal pode condicionar ou mesmo impedir a circulação de pessoas com necessidades específicas de mobilidade, limitando-as no acesso a actividades e funções quotidianas [3]. As limitações físicas à mobilidade pedonal são uma consequência natural do processo de envelhecimento, e as quedas resultantes do mau estado dos pavimentos representam ainda um factor de risco acrescido para uma população cada vez mais envelhecida [4].

A avaliação da qualidade rede pedonal é um passo crítico para assegurar condições de acessibilidade para todos. Apesar da existência de quadros regulamentares sobre as condições de acessibilidade dos passeios (no contexto nacional o Decreto-Lei 163/2006 de 8 de Agosto), a inventariação do estado dos pavimentos da rede pedonal, que possa apoiar a gestão e manutenção desta infra-estrutura, é ainda incipiente. No caso da infra-estrutura rodoviária, tem sido propostos vários métodos de avaliação para o estudo do estado do pavimento utilizando técnicas de sensorização remotas [5]. Contudo, no caso da avaliação do estado do pavimento da infra-estrutura pedonal, os métodos propostos centram-se na observação, medição e registo in situ [6][7]. O método [6], por exemplo, estabelece um indicador de qualidade do passeio (*Sidewalk Condition Index*) com base na severidade das irregularidades do pavimento presentes. A determinação da severidade requer a inspeção visual de buracos e depressões, sendo medida a sua profundidade e o seu diâmetro. Para além destes métodos incorporarem alguma

subjectividade associada à interpretação do observador, são morosos e pouco eficientes para aplicação a larga escala, e.g. para uma cidade. Para possibilitar o levantamento mais objectivo e célere das condições da infra-estrutura pedonal, têm sido sugeridas alternativas de base tecnológica, com recurso a automatismos. Estas soluções tem passado pelo uso de acelerómetros [2], perfilómetros [8] e laser LIDAR [9], tendo o seu âmbito de aplicação sido maioritariamente focado na verificação dos declives transversais e longitudinais dos passeios e rampas face às normativas para a acessibilidade de pessoas em cadeiras de rodas. A caracterização da qualidade do pavimento por seu lado tem sido relativamente secundarizada.

No projeto WalkBot desenvolvemos um dispositivo de avaliação da qualidade da infra-estrutura pedonal com recurso a processamento de imagem tridimensional, constituindo uma solução inovadora para a avaliação do estado do pavimento da infra-estrutura pedonal a larga escala. Deste modo, após esta secção introdutória, na Secção 2 detalhamos o dispositivo (WalkBot) criado. A Secção 3 demonstra os resultados obtidos através da recolha de dados em ambiente real e é seguida da Secção 4, onde são apresentados comentários finais sobre o trabalho desenvolvido.

## 2 ARQUITECTURA E FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO

### 2.1 Arquitectura

O WalkBot consiste num equipamento portátil, dirigível, capaz de efectuar o levantamento automatizado das condições de acessibilidade da rede pedonal, procurando dar resposta à verificação do regime da acessibilidade aos edifícios e estabelecimentos que recebem público, via pública e edifícios habitacionais [10]. Em particular, o objectivo seria obter dados de forma automatizada de forma a determinar, após processamento, a largura dos passeios bem como a densidade e intensidade das irregularidades do pavimento (como buracos ou depressões). A arquitetura do equipamento foi desenvolvida em torno de soluções tecnológicas “*commercial off-the-shelf*” que possibilitassem medir as características dos passeios de forma rigorosa. A solução adoptada passou pela construção de um dispositivo de recolha de imagem tridimensional e posterior processamento de imagem. As Figuras 1 e 2 ilustram o equipamento. O dispositivo de recolha de imagem consiste numa câmara de vídeo 3D Asus Xtion Pro Live (que permite um detalhe até à ordem do 1mm) e numa unidade de processamento UpBoard SingleBoardProcessor. A este dispositivo foram ligados um sensor de GPS, um écran táctil e uma bateria para alimentação do sistema.

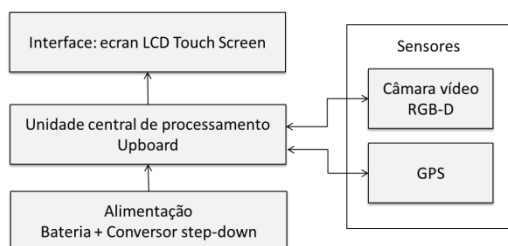


Figura 1: Arquitectura do equipamento



Figura 2: Vista frontal e traseira do equipamento

## 2.2 Aquisição e Processamento de Dados

O levantamento típico abrange uma frente de quarteirão (segmento de rua). O equipamento é portátil, podendo ser acoplado a veículos simples (por exemplo, odômetros ou carros de compras). A interface gráfica visível no ecrã apresenta os comandos de iniciar e terminar a aquisição de dados. O trabalho do auditor consiste em iniciar a aquisição de dados, percorrer o passeio ao longo do segmento de rua, em cadência normal, e terminar a aquisição de dados no final do segmento. Enquanto o passeio é percorrido, é recolhido e armazenado um vídeo, que consiste num conjunto de fotografias ou *frames* com informação de imagem a cores, imagem de profundidade e *timestamp*, ou instante de tempo, de captura de cada *frame*. Deste modo, os dados obtidos permitem, na prática, obter uma representação digital da infra-estrutura pedonal, indexada no tempo e no espaço geográfico. Os dados recolhidos são sujeitos a um processo de compressão, sendo em seguida transmitidos para um servidor.

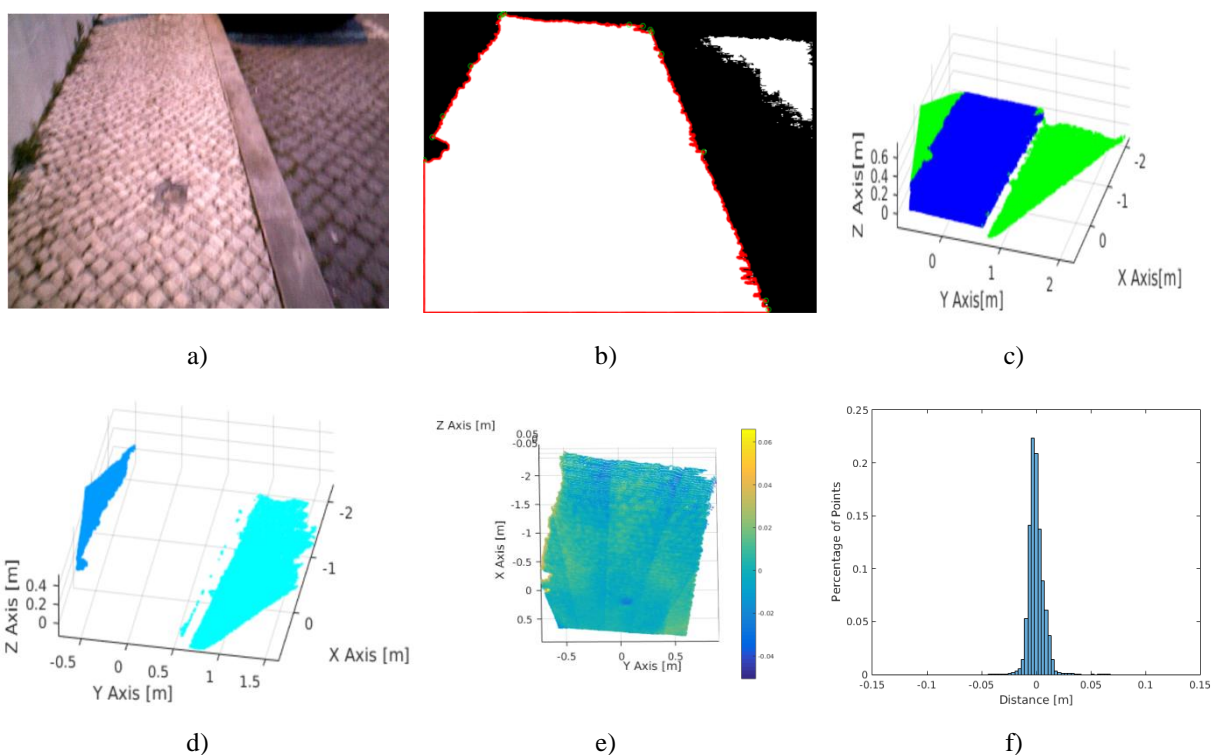


Figura 3 – Processo de extração de dados do passeio.

O processamento das imagens processamento compreende vários passos e é feito de forma *offline* devido à limitada capacidade de processamento do computador presente no WalkBot. De forma sumária, os passos efectuados são:

1. É criada uma nuvem de pontos tridimensional representativa do espaço físico real, utilizando os dados de profundidade.
2. São extraídas superfícies (planos) na nuvem de pontos, com vista à identificação dos planos de interesse para a análise: o plano do chão, horizontal, correspondente ao passeio, e os planos correspondentes aos elementos de delimitação do canal pedonal – paredes de edifícios, lancil, obstáculos.
3. A partir desta definição de planos torna-se possível identificar características físicas do plano do chão, nomeadamente presença de irregularidades, bem como estimar a largura útil de passagem obtida através da distância medida entre planos verticais.

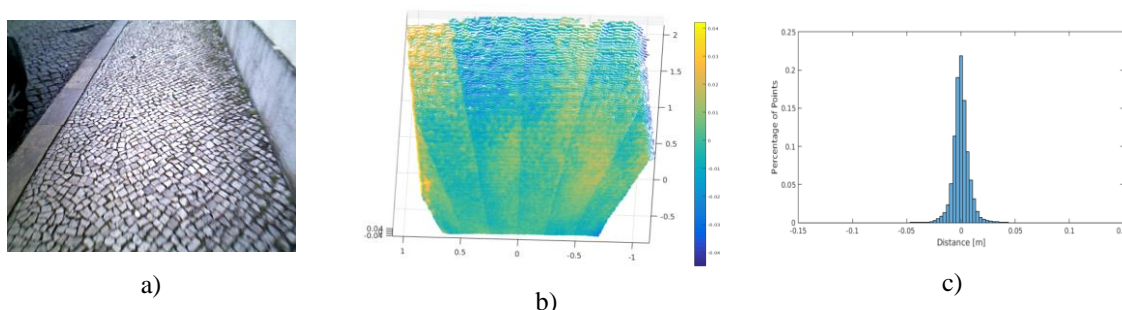
A Figura 3 ilustra as várias fases do processo de extração dos dados de interesse para análise: através da interpretação das imagens a cores convencionais capturadas (a), é realizado um processo de segmentação, consistindo na separação do passeio dos restantes elementos da imagem (b). Seguidamente é encontrado o plano horizontal que define o chão (neste caso o passeio, ilustrado a cor azul), bem como os restantes planos que compõem a imagem (o pavimento da faixa rodoviária e o plano vertical da parede, ilustrados a cor verde) (c). O plano de interesse é isolado, sendo os restantes objetos da imagem separados (parede, ilustrada a azul escuro; e pavimento da faixa rodoviária, ilustrada a ciano) (d). Finalmente, cada ponto da superfície do passeio é analisado em relação ao plano do chão (e), obtendo-se a medida da distância de cada ponto da superfície e o plano do chão. O conjunto de medições obtidas, na ordem dos 3.000 pontos por *frame*, permite criar um histograma da distribuição das distâncias entre cada ponto e o plano do chão (f), ou seja, uma representação da irregularidade do pavimento.

O primeiro passo passa pela extração do plano do chão. Este passo é fundamental pois visa separar todos os pontos da nuvem inicial em duas categorias: pontos pertencentes ao plano do chão e os restantes não pertencentes a esse plano do chão. Assumindo que grande parte da imagem captura o chão, visto ser esse o objetivo da recolha de dados, é possível retirar o plano do passeio utilizando um processo de “RANSAC” [11]. Este processo iterativo calcula qual o plano que melhor defina um grande conjunto de pontos. Desta forma, não sendo um procedimento determinístico no sentido de descobrir sempre o plano do chão, sendo o chão o maior plano existente na imagem, o processo de RANSAC retornará o plano composto pelo maior número de pontos, ou seja, o plano no chão.

Retirados os pontos pertencentes ao chão, é então possível, fazer uma análise sobre a qualidade do pavimento através destes pontos. Descoberto o plano do chão e os pontos que lhe pertencem, é possível calcular qual a distância física entre cada ponto e o plano em si, com vista a identificar qual o grau de irregularidade ou suavidade existente no passeio. Sabendo esta distância entre cada ponto e o plano, é calculado um histograma de modo a caracterizar o estado do pavimento. Deste modo, no final é possível obter a distribuição da distância entre os pontos do chão e o plano do chão. Desta forma, caso existam muitos pontos distantes do plano, esta distância aumenta, aumentando a distribuição de pontos junto das “caudas” do histograma, obtendo-se uma distribuição mais platicúrtica. Caso contrário, caso o pavimento seja suave, então o histograma será mais delgado, ou leptocúrtica.

Neste sentido, entende-se que a regularidade (quanto mais suave ou liso um passeio for) representa maior qualidade para o peão. No caso oposto, quanto mais irregular este for, ou caso apresente buracos, depressões e desníveis, maior o transtorno e menor o conforto que o peão sentirá. Deste modo, destacamos dois casos extremos de qualidade do pavimento, traduzidos pela regularidade ou irregularidade do revestimento usado.

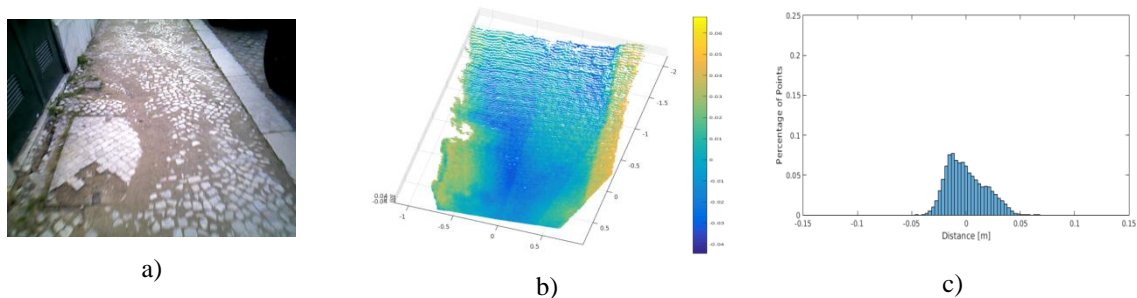
O primeiro caso, apresentado na Figura 4, ilustra um passeio em condições satisfatórias. A observação da imagem a) sugere uma superfície relativamente homogénea, sem deformidades aparentes no revestimento. De facto, em b) não são identificáveis variações significativas na escala cromática, o que corresponde a uma grande distribuição de pontos junto do plano do chão, evidente na forma do histograma c).



**Figura 4 – Exemplo de um passeio em condições satisfatórias.**

A Figura 5 apresenta o segundo caso, sendo apresentado um passeio em condições insatisfatórias. É possível observar em a) a ausência de algumas pedras de calçada, bem como a ligeira elevação da tampa em relação ao passeio. Estas condições, para além de serem percecionadas como desconfortáveis podem dar origem a quedas

por parte de transeuntes menos atentos ou por parte do grupo de peões mais vulneráveis – idosos e pessoas com mobilidade condicionada. As depressões no passeio são facilmente identificáveis na variação cromática em b). Também a forma do histograma c) revela as condições menos satisfatórias de qualidade do passeio, caracterizadas por uma distribuição mais larga e achatada em torno do ponto central.



**Figura 5 – Exemplo de um passeio em condições insatisfatórias.**

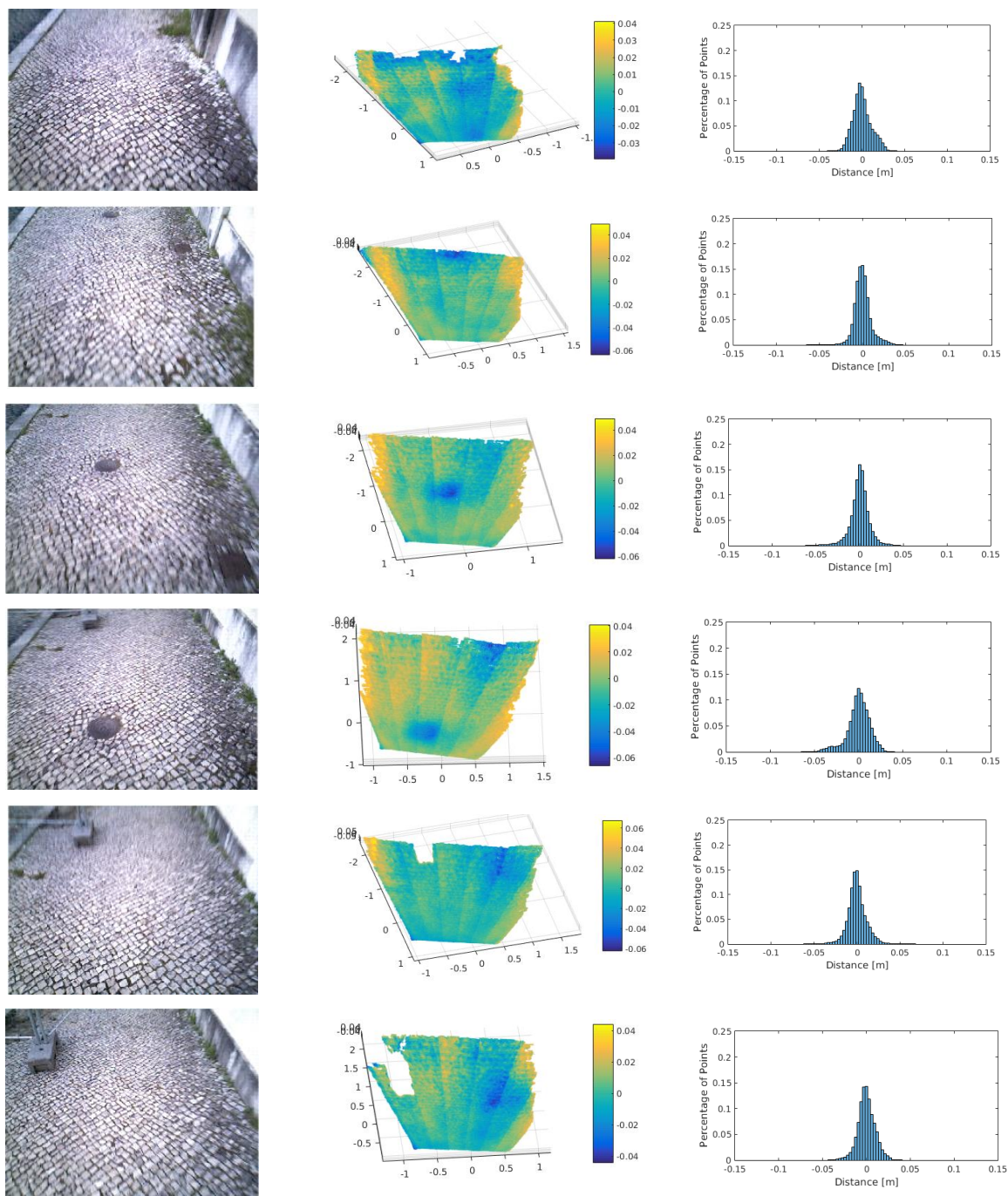
### 3 RESULTADOS

De modo a validar o nosso dispositivo e obter dados sobre a qualidade do passeio, procedemos à gravação de aproximadamente 700m em torno do Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, como ilustrado na Figura 6. O ensaio realizado gerou cerca de 8750 *frames* referentes a 15.7 minutos de gravação. Foram adquiridas fotografias do passeio a um ritmo de 8 *frames* por segundo.



**Figura 6 – Rede pedonal gravada em redor do Instituto Superior Técnico.**

Ao longo do percurso gravado foram identificadas, por inspeção visual e percepção sentida de conforto, diferentes categorias de passeios tendo em conta a sua qualidade. Os exemplos apresentados anteriormente relativos à qualidade do pavimento correspondem a *frames* isoladas, sendo admissível que exista alguma variabilidade nas condições do pavimento ao longo do passeio. Ou seja, uma longa extensão de passeio regular poderá ser perturbada apenas ocasionalmente por algum tipo de irregularidade. No entanto, a ocorrência de uma irregularidade apenas poderá ser suficiente para condicionar a passagem de peões ao longo de um percurso. A desejável classificação de passeios em termos das suas condições de acessibilidade pressupõe a análise de toda a sua superfície. A Figura 7 ilustra o processo de análise sequencial de um segmento de passeio, decompondo uma porção do caminho percorrido no levantamento de campo em várias *frames*.



**Figura 7 - Análise sequencial de um segmento de passeio.**

Nesta, é possível identificar visualmente a existência de uma depressão resultante de uma tampa de água. Observa-se, nas imagens a cores (à esquerda), a aproximação progressiva da tampa de água, até que o peão (neste caso, o auditor) a ultrapasse. A informação 3D capturada pela câmera RGBD (apresentada na coluna do meio) mostra claramente a diferença das alturas entre a zona que contém a depressão resultante da tampa de água (mancha azul escura) e a restante área passável.

A progressiva alteração na regularidade do pavimento é evidenciada nos histogramas referentes à distribuição da diferença de altura entre cada ponto gravado e o plano do chão (coluna da direita). É possível observar uma variação na altura do intervalo central do histograma, que representa a percentagem de pontos complanares, bem como uma ligeira variação na simetria do histograma, que demonstra a presença de pontos com cotas negativas (buracos, depressões) ou positivas (saliências, elevações). A regularidade do pavimento pode assim ser analisada através das medidas de forma da distribuição dos pontos do passeio em torno da média: enviesamento (“Assimetria ou Obliquidade”) e coeficiente de achatamento (“Curtose”) [12]

Uma distribuição simétrica apresenta um valor de enviesamento nulo. Quando a medida de enviesamento toma valores negativos, isso corresponde a uma concentração de valores no lado esquerdo do histograma, sinalizando neste caso a existência de um conjunto de pontos com cota negativa – buracos, depressões. Respectivamente, uma concentração de valores no lado direito corresponde a uma medida de enviesamento positiva, neste caso a existência de um conjunto de pontos com cota positiva – saliências, elevações, degraus. No caso da análise da regularidade do pavimento, será desejável que os valores de enviesamento sejam próximos de zero.

No caso do coeficiente de achatamento, valores menores que zero correspondem a uma distribuição achatada (dita “platicúrtica”) enquanto valores acima de zero correspondem a uma distribuição pontiaguda (dita “leptocúrtica”). Em termos de análise da regularidade do pavimento, valores elevados e negativos do coeficiente de curtose corresponderão a um plano muito irregular, com a existência de depressões e elevações. Ao contrário, valores elevados e positivos do coeficiente de curtose corresponderão a um plano muito regular.

Apresenta-se no Quadro 1 uma caracterização da qualidade do pavimento obtido de uma amostra de 27 pontos do percurso de ensaio. Todos os elementos da amostra correspondem a porções de passeio em “calçada à portuguesa”, que, de acordo com [13] pode ser definida como “um pavimento empedrado, cujos componentes são de pedra natural, com base em calcários, assentes e dispostos no solo de forma mais ou menos homogénea”.

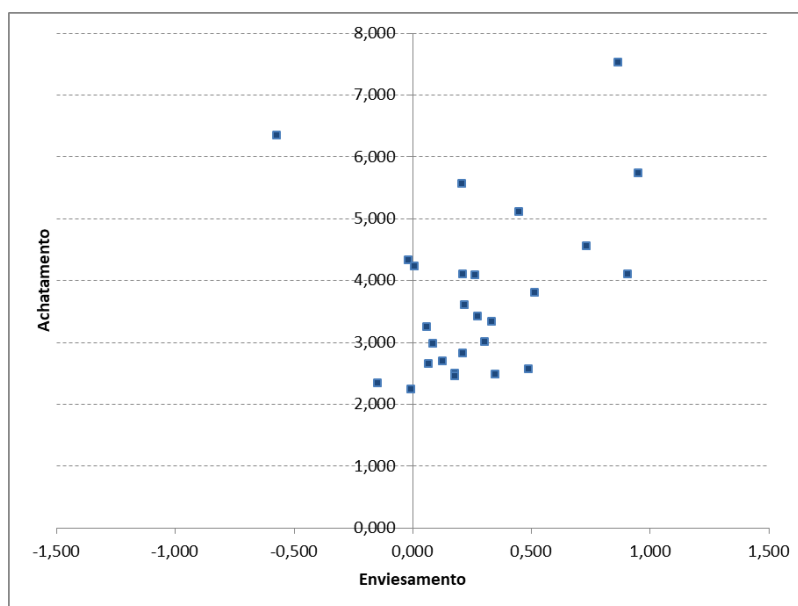
Verifica-se que todas as secções de passeio analisadas apresentam deformidades. Foram detectadas depressões com 75 mm de profundidade e elevações com 117 mm. Observou-se que os valores médios de profundidade e elevação das irregularidades do passeio se situam entre os -41 mm e os 48 mm, face ao plano do chão (tal como definido segundo o método descrito na secção anterior). Tendo em consideração que uma diferença súbita de cotas superior a 13 mm constitui já risco de queda [14][15], em particular para idosos, verifica-se que os pavimentos analisados apresentam um nível de risco significativo. Por outro lado, é possível que os valores máximos e mínimos medidos digam respeito a elementos presentes no plano do chão, como detritos ou resíduos. É admissível também que as irregularidades detectadas não constituam um risco real de queda devido à sua distribuição espacial. Por exemplo, a existência de sulcos nas juntas do empedrado ou deformações nas extremidades dos passeios – junto ao lancil ou aos edifícios – não constituem à partida um obstáculo à circulação pedonal no eixo do passeio.

**Quadro 1: Caracterização da qualidade do pavimento, amostra de 27 pontos do percurso de ensaio.**

Amostra de <i>frames</i> (n=27)	Cota mínima relativa: profundidade (mm)	Cota máxima relativa: elevação (mm)	Enviesamento ("Assimetria")	Coeficiente de achatamento ("Curtose")
Max	-32,882	117,495	0,950	7,528
Mín	-75,043	34,001	-0,572	2,236
Média	-41,119	48,467	0,268	3,773
Desvio Padrão	9,348	16,486	0,332	1,346

A Figura 8 ilustra a relação entre os valores de enviesamento e achatamento da amostra. Observa-se que a maioria das secções de passeio analisadas apresenta valores de enviesamento positivos (M=0,268), ou seja, foi detectada uma maior proporção de pontos localizados a uma cota mais elevada face ao plano do chão do que pontos numa cota negativa. Por outras palavras, os passeios analisados apresentam mais lombas do que depressões.

Este resultado demonstra o potencial de aplicação deste método face à observação e medição manual *in situ*. Enquanto depressões e buracos nos passeios são relativamente simples de identificar por um observador, a existência de lombas ou pequenas elevações não é facilmente discernível. No entanto, o risco de queda associado a elevações poderá ser superior ao risco associado a buracos no pavimento dado que os buracos conseguem ser mais facilmente vistos e evitados.



**Figura 8: Medidas de enviesamento e achatamento da amostra**

## 4 CONCLUSÕES

O Walkbot insere-se num projecto mais abrangente que pretende analisar e caracterizar as condições de acessibilidade da rede pedonal urbana, constituída maioritariamente por passeios. A caracterização de cada componente da rede, de cada passeio, é passível de ser obtida através do processamento em contínuo das várias *frames* que compõem vídeos de levantamento de campo. Com base nas medidas geradas e na interpretação de variáveis chave, tais como a curtose e a assimetria torna-se possível identificar, de forma automatizada, situações críticas de irregularidades, de buracos ou obstáculos em grandes volumes de dados.

O equipamento e a metodologia de análise desenvolvida demonstraram ser uma solução inovadora com grande utilidade para o levantamento das condições de qualidade dos passeios. Obtiveram-se resultados muito satisfatórios em termos de precisão na medição, sendo a representação tridimensional do passeio obtida a uma escala milimétrica.

O desenvolvimento do projeto passará pela identificação e caracterização mais detalhada de cada irregularidade, com vista ao mapeamento e classificação das situações críticas para a acessibilidade pedonal. A análise das condições de acessibilidade será também alargada à verificação da largura livre de passagem. Serão também de considerar outros casos de aplicação prática da solução desenvolvida, noutro tipo de pavimentos, p.e., ciclovias.

## 5 AGRADECIMENTOS

Este projeto foi desenvolvido com o apoio do Núcleo de Parcerias Empresariais do Instituto Superior Técnico ao abrigo do concurso de ideias inovadoras TecInnov Thales, 1ª Edição 2016.



## 6 REFERÊNCIAS

- [1] M. Aghaabbasi, M. Moeinaddini, M. Zaly Shah, Z. Asadi-Shekari, and M. Arjomand Kermani, “Evaluating the capability of walkability audit tools for assessing sidewalks,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 37, no. November 2017, pp. 475–484, 2018.
- [2] A. Frackelton, A. Grossman, E. Palinginis, F. Castrillon, V. Elango, and R. Guensler, “Measuring walkability: Development of an automated sidewalk quality assessment tool,” *Suburb. Sustain. Vol. 1*, vol. 1, no. 1, 2013.
- [3] F. Moura, P. Cambra, and A. B. Gonçalves, “Measuring walkability for distinct pedestrian groups with a participatory assessment method: A case study in Lisbon,” *Landsc. Urban Plan.*, vol. 157, 2017.
- [4] R. Methorst, P. Schepers, N. Christie, M. Dijst, R. Risser, D. Sauter, and B. van Wee, “Pedestrian falls’ as necessary addition to the current definition of traffic crashes for improved public health policies,” *J. Transp. Heal.*, vol. 6, pp. 10–12, 2017.
- [5] E. Schnebele, B. F. Tanyu, G. Cervone, and N. Waters, “Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment,” *Eur. Transp. Res. Rev.*, vol. 7, no. 2, 2015.
- [6] M. V. Corazza, P. Di Mascio, and L. Moretti, “Managing sidewalk pavement maintenance : A case study to increase pedestrian safety,” *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 3, no. 3, pp. 203–214, 2016.
- [7] N. Sousa, J. Coutinho-Rodrigues, and E. Natividade-Jesus, “Sidewalk Infrastructure Assessment Using a Multicriteria Methodology for Maintenance Planning,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 23, no. 4, p. Content ID 05017002, 2017.
- [8] N. Gagarin and J. Mekemson, “Assessment of sidewalk system for ADAAG compliance usinf a sensor-based data collection system integrated with GIS,” in *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, 2015.
- [9] C. Ai and Y. (James) Tsai, “Automated Sidewalk Assessment Method for Americans with Disabilities Act Compliance Using Three-Dimensional Mobile Lidar,” *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2542, pp. 25–32, 2016.
- [10] Ministério do Trabalho e da Solidariedade Social, *Decreto-Lei nº 163/2006 de 8 de Agosto*. 2006, pp. 5670–5689.
- [11] D. A. Forsyth and J. Ponce, “Ransac,” in *Computer Vision: A Modern Approach*, Prentice Hall Professional Technical Reference, 2002, pp. 480–483.
- [12] J. Marôco, *Análise estatística com o SPSS Statistics*, 6ª Edição. Pêro Pinheiro: ReportNumber, Portugal, 2014.
- [13] A. Henriques, A. Moura, and F. Santos, *Manual da Calçada Portuguesa*. Lisboa: Direção Geral de Energia e Geologia, 2009.
- [14] A. Kwasniak, J. Cuadrado, M. Kuzel, and J. Sinocruz, “Evaluating public awareness of trip hazards on outdoor walkways,” *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc.*, pp. 639–642, 2012.
- [15] A. G. Byju, M. A. Nussbaum, and M. L. Madigan, “Alternative measures of toe trajectory more accurately predict the probability of tripping than minimum toe clearance,” *J. Biomech.*, vol. 49, no. 16, pp. 4016–4021, 2016.