

# Agradecimentos

Aos meus orientadores, os Professores José Alberto Rodrigues e Maria Amélia Loja, agradeço todo o constante apoio, acesso aos equipamentos e acima de tudo a disponibilidade para resolver todas as questões através de inúmeras reuniões pessoais e via internet, fora dos horários de trabalho incluindo fins de semana.

Aos meus pais, um obrigado por todo o apoio durante todo este percurso académico.

À SpyBuilding, Lda, agradeço o acesso aos arquivos internos, reprodução de documentos e compreensão por ausências necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.



# Resumo

Ao longo do tempo, as construções típicas como edifícios, obras de arte, infra-estruturas, etc, sofrem danos pelas mais diversas causas, tais como: Acidentes, deformações nos solos, erros construtivos e deterioração dos materiais que compõem os revestimentos. Entre os danos mais comuns, a fissuração tem usualmente duas origens distintas, deformação estrutural ou deterioração/retracção do betão e materiais de revestimentos.

Neste trabalho, a técnica de varrimento laser 3D, já largamente utilizada no ramo da arquitectura, é explorada como ferramenta para detecção e caracterização de fissuras através da modelação de nuvens de pontos. A sua análise foi realizada através do software Mathematica e Meshlab que permitiu o tratamento da informação recolhida, a reconstrução de superfícies 3D e a recolha de informação sobre as fissuras.

Desta forma, pretende-se com este estudo desenvolver novas metodologias, mais rápidas e precisas que irão apoiar o mapeamento e diagnóstico de fissuras visando a sua reabilitação.

**Palavras Chave:** Varrimento Laser 3D, Fissuração, Reconstrução de Superfícies, Nuvens de Pontos, Computação Simbólica, Algoritmos, Reabilitação.



# ABSTRACT

Over time, typical construction such as buildings, bridges, infrastructures, amongst others, are damaged by the most diverse causes, namely: Accidents, deformations in soils and structure, construction errors and deterioration of materials that compose the coatings. Among the most common effects, cracking usually has two distinct origins, structural deformation or deterioration / shrinkage of the concrete and coating materials.

In this study, the 3D laser scanning technique, already widely used in the field of architecture, is explored as a tool for detection and characterization of cracks through point clouds modelling. The analysis was performed using the Mathematica and Meshlab software that allowed the handling of collected data, the reconstruction of 3D surfaces and gathering of information regarding cracks.

With this study it is intended to develop new, faster and more accurate methodologies that will support the mapping and diagnosis of cracks aiming their rehabilitation.

**Key Words:** 3D Laser Scanning, cracks, surface reconstruction, point clouds, symbolic computation, algorithms, rehabilitation.



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Fissuração na Construção</b>	<b>23</b>
2.1	Classificação de fissuras . . . . .	23
2.2	Reabilitação . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Técnica de Varrimento Laser 3D</b>	<b>29</b>
3.1	Nuvens de pontos . . . . .	32
3.2	Reconstrução 3D de superfícies . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Caso de estudo</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>Algoritmos de análise de nuvens de pontos</b>	<b>41</b>
5.1	Redução de densidade de pontos . . . . .	48
5.2	Recolha de características de fissuras . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Conclusões e observações finais</b>	<b>59</b>
6.1	Conclusões . . . . .	59
6.2	Potencialidades de futuro desenvolvimento na área de reabili- tação . . . . .	60
<b>7</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>63</b>

<b>8</b>	<b>Anexos</b>	<b>65</b>
<b>A</b>	<b>Algoritmos Mathematica</b>	<b>67</b>
A.1	Função para detecção de extremos de uma Nuvem de Pontos, (LExterior) . . . . .	67
A.2	Função para selecção de pontos considerando o referencial XY, (selecxy) . . . . .	68
A.3	Função para selecção de pontos considerando a vizinhança de um ponto, (selecpnt) . . . . .	68
A.4	Função para remoção de pontos considerando posicionamento geométrico, (remov) . . . . .	69
A.5	Função para selecção de pontos através de características RGB, (selecRGB) . . . . .	70
A.6	Função para selecção e remoção de pontos através de caracte- rísticas RGB, (selecRGB1) . . . . .	71
A.7	Função para determinação da normal do plano da parede, (NormalPlano) . . . . .	72
A.8	Função para determinação do plano da parede, (PlanoParede)	74
A.9	Função para e, (planoREMOVpts) . . . . .	75





# Lista de Figuras

1.1	Andaime móvel para acesso a fissuras . . . . .	16
2.1	Fissuração por retracção . . . . .	24
2.2	Fissuração por diferenciais térmicos . . . . .	24
2.3	Fissuração motivada por sismo . . . . .	25
2.4	Fissuração por assentamento de fundações . . . . .	25
2.5	Lixagem de parede . . . . .	26
2.6	Reforço de Laje . . . . .	28
3.1	Esquemático de 3D Laser Scanner . . . . .	30
3.2	Laser Scanner - Cyrax 2500 . . . . .	31
3.3	Equipamento de varrimento laser 3D, Faro Focus 3D . . . . .	32
3.4	Reconstrução de superfície em diferentes metodologias . . . . .	34
4.1	Pavilhão de Mecânica (ISEL) . . . . .	35
4.2	Fissuração por assentamento de fundações . . . . .	36
4.3	Fissurómetro para monitorização de fissuras . . . . .	37
4.4	Localização da fissura, Planta do piso 0 . . . . .	38
4.5	Nuvem de Pontos - N°45 . . . . .	38
4.6	Seleccção de pontos de parede - Nuvem de Pontos N°45 . . . . .	39
4.7	Reconstrução de superfície 3D em Mathematica . . . . .	40

5.1	Representação gráfica da nuvem de pontos . . . . .	42
5.2	Representação gráfica de quarto de esfera . . . . .	43
5.3	Reconstrução de superfície . . . . .	44
5.4	União das leituras em MeshLab . . . . .	45
5.5	Esquema do procedimento <code>LExterior</code> - Anexo A.1 . . . . .	46
5.6	Algoritmo para selecção de pontos <code>selectXY</code> - Anexo A.2 . . . . .	47
5.7	Algoritmos para selecção de pontos <code>SelecPoint</code> - Anexo A.3 . . . . .	47
5.8	Reconstrução de superfície de um coelho . . . . .	48
5.9	Esquema do procedimento <code>remov</code> - Anexo A.4 . . . . .	49
5.10	Esquema do procedimento <code>selecRGB</code> - Anexo A.5 . . . . .	51
5.11	Seleccção de pontos RGB (0-245) . . . . .	53
5.12	Esquema do procedimento <code>selecRGB1</code> - Anexo A.6 . . . . .	54
5.13	Reconstrução de superfície da nuvem de pontos inicial . . . . .	54
5.14	Reconstrução de superfície da nuvem de pontos reduzida . . . . .	55
5.15	Seleccção RGB no intervalo [253-255] . . . . .	55
5.16	Análise vectorial da nuvem de pontos . . . . .	56
5.17	Seleccção de pontos da fissura . . . . .	57
5.18	Sobreposição de pontos da fissura sobre a nuvem de pontos original . . . . .	58

# Lista de Tabelas

- 5.1 Resultados da função (remov) em esfera de 2016 pontos . . . . 51
- 5.2 Resultados da função (remov) numa parede de 5000 pontos . . . 52



# Capítulo 1

## Introdução

No contexto socio-económico em que Portugal se encontra, o sector da construção sofreu um grande abrandamento na construção nova. Com a deterioração dos edifícios ao longo do tempo, o sector tem vindo cada vez mais a focar-se na reabilitação dos edifícios existentes inspirando a criação de novas técnicas na área, tanto ao nível da execução como no diagnóstico. Entre os trabalhos mais típicos podem-se referir as impermeabilizações de coberturas, pinturas de fachadas e com maior relevância para este trabalho, tratamentos de fissuras e reabilitação de estruturas. As fissuras surgem nos edifícios pelas mais diversas causas, desde a simples retracção das argamassas à fissuração por assentamentos diferenciais da estrutura. Principalmente neste último caso, a sua análise exige um estudo mais aprofundado para conhecer o seu impacto na estabilidade da estrutura. Estes estudos, por vezes podem, tornar-se dispendiosos e morosos quando as condições de acesso obrigam a instalação de andaimes e plataformas elevatórias, como se observa na figura 1.1.

Em alternativa, aos métodos convencionais de análise de fissuras, neste trabalho estuda-se o potencial da técnica de varrimento laser 3D como uma



Figura 1.1: Andaime móvel para acesso a fissuras

nova perspectiva de análise e diagnóstico.

Esta técnica, baseia-se na emissão de milhares de impulsos laser direccionados e consoante o reflexo do obstáculo encontrado, é calculada a localização espacial de cada ponto. Em cada um, é adicionada informação de intensidade de reflexão que representa o comportamento dos materiais em relação ao comprimento de onda da radiação laser emitida pelo aparelho. Este parâmetro pode variar consoante a distância ao obstáculo, ângulo de incidência e também pelas características de cor e reflectividade da superfície. Quanto

mais escuro for o obstáculo, maior é a dificuldade em analisar a sua reflexão e conseqüentemente, maior o erro na medição ou impossibilidade de a realizar. Além da informação recolhida pelo varrimento laser 3D, pode ainda ser adicionada informação de cor RGB através de imagem fotografica. Alguns aparelhos já executam esta tarefa de forma autonoma onde recolhem e correlacionam a informação fotográfica com cada ponto. Toda esta informação é posteriormente compilada numa base de dados denominada nuvem de pontos que pode ser interpretada com software apropriado como Mathematica® ou MeshLab®.

Esta técnica já sofreu uma larga evolução ao longo do tempo, tanto ao nível da amplitude de aplicações como também ao nível de detalhe e precisão. Entre alguns dos trabalhos influentes podemos referir de Hoppe *et la*, De Rose (1992) [2] que popularizou esta técnica como uma ferramenta de representação gráfica e o método de Carr (2001) [3] pela utilização de funções de base radial.

Resumindo, o estado de arte do desenvolvimento desta técnica na área da construção, podemos destacar alguns trabalhos que vão ao encontro do contexto deste trabalho. Al-Neshawy *et la*. (2009) [5], desenvolveu um estudo com o objectivo de utilizar a técnica de varrimento laser 3D como ferramenta para detecção de patologias em fachadas, nomeadamente deformações geométricas em paredes de alvenaria. Os autores concluíram que esta técnica é viável para detecção e quantificação de deformação de painéis de revestimentos exteriores, à qual denominaram "bow-meter".

Berenyi *et al.* (2010)[6], desenvolveu um trabalho sobre a precisão dos levantamentos de nuvens de pontos. Em laboratório, apoiado de técnicas avançadas de medição, realizou diversos ensaios para análise da precisão de leituras em diferentes tipos de materiais, cores e ângulos de incidência.

Armesto-Gonzalez et al. (2010)[7], desenvolveu uma metodologia que combina a técnica de varrimento laser 3D com processamento de imagem digital para análise de danos em cantaria de pedra de edifícios históricos. Os autores concluíram que a combinação de diferentes técnicas de análise possibilitam o reconhecimento e caracterização de algumas patologias encontradas em edifícios históricos.

Sun et al. (2012)[8], desenvolveu um estudo para detecção de fissuras em pavimentos através da técnica de varrimento laser 3D. Após analisadas as características dos pavimentos e tipologias das fissuras encontradas, concluíram que é possível discriminar áreas escuras não motivadas por danos no pavimento, como sombras, marcas de pneus, oleos, etc. Após alguns ensaios de campo, os autores concluíram que existe um grande potencial para a detecção e localização eficaz de fissuras em pavimentos.

Recentemente, Shen-En (2012)[9], propôs a técnica de varrimento laser 3D como uma ferramenta ideal para inspeção de pontes, não só pela natureza sem contacto directo mas também por praticamente não influenciar o tráfego das vias, necessitar de baixos requisitos de mão de obra e por possibilitar a monitorização permanente da estrutura para eventuais movimentos ao longo do tempo. O autor considera que esta técnica possibilita a aquisição de informação essencial que no entanto deverá ser complementada com outras metodologias de inspeção.

Gonzalez-Jorge et al. (2012)[10] desenvolveu uma metodologia que possibilita a utilização da técnica de varrimento laser 3D para recolher informação sobre contaminações biológicas superficiais no betão. O objectivo do método foi a integração de toda a informação disponível, como distância, intensidade e cor na base de análise, considerando inicialmente dois algoritmos. O primeiro foi construído para criar uma ortoimagem através da informação de

intensidade de dois equipamentos diferentes. O segundo analisa a informação e classifica em "K-means" e "Fuzzy C-Means" para extrair automaticamente informação sobre áreas do betão contaminado.

Neste trabalho, para o caso de estudo, foi necessário recolher nuvens de pontos de paredes fissuradas. No ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, foi identificada uma parede fissurada no interior das instalações de Mecânica. Após o levantamento com o equipamento de varrimento laser Faro Focus 3D, num primeiro contacto com as nuvens de pontos logo se percebeu que a grande quantidade de informação que as compõem, requer um desempenho computacional elevado, não acessível através de computadores pessoais comuns. Nesse sentido, a primeira intervenção foi reduzir a nuvem de pontos apenas à parede fissurada através do MeshLab, o que representa cerca de 1% da totalidade da nuvem de pontos original com cerca de 10 milhões de pontos. Focalizada apenas a área da parede fissurada, com o programa Mathematica foram aplicados vários filtros para reduzir e modelar a nuvem. Numa primeira fase foram criados algoritmos que permitem reduzir a densidade da nuvem de pontos, de forma a agilizar o processamento da informação, sem remover informação útil sobre fissuras e mantendo a possibilidade de reconstrução da superfície 3D. Numa segunda fase, foram experimentadas diferentes abordagens de análise, através da criação de algoritmos, para possibilitar a identificação e caracterização de fissuras de forma automática.

Em resumo, com este trabalho pretendeu-se criar uma ferramenta que analisa e modela nuvens de pontos de forma a obter informações úteis sobre fissuras. Na prática, o desenvolvimento desta técnica irá permitir acelerar o processo de levantamento de informação, reduzindo custos e com mais valias ao nível da qualidade de informação.

## Organização do Texto

Este trabalho encontra-se organizado em seis capítulos. De seguida são resumidos os assuntos tratados.

**Capítulo 2 - Fissuração na Construção** Neste capítulo é realizada uma pequena abordagem ao tema da fissuração na construção. De uma forma resumida, estas podem organizar-se em dois grandes grupos, fissuração não estrutural e fissuração estrutural. Este segundo caso merece uma atenção acrescida, pois é aqui que a técnica de varrimento laser 3D pode representar uma mais valia de análise.

**Capítulo 3 - Técnica de Varrimento Laser 3D** Neste capítulo, é apresentada a técnica de varrimento laser 3D com maior detalhe. Em particular, aqui é pormenorizado o método que permite o cálculo das distâncias (Phase-Shift).

Os levantamentos produzem informação que é armazenada em bases de dados denominadas Nuvens de Pontos. Com softwares apropriados, é possível reconstruir as superfícies dos objetos utilizando diferentes tipos de abordagem que se podem globalmente ser subdivididas em análise Poligonal e Paramétrica.

### **Capítulo 4 - Caso de estudo - Pavilhão de Mecânica (ISEL)**

Neste capítulo descreve-se o caso de estudo utilizando a aplicação da técnica de varrimento. No ISEL, o Pavilhão de Mecânica apresenta fissuras graves em paredes interiores ao nível do piso 0. Neste capítulo é registado o levantamento das nuvens de pontos através do equipamento laser 3D incluindo a caracterização da fissura após monitorização.

### **Capítulo 5 - Desenvolvimento de Algoritmos em Mathematica**

Neste capítulo é focada a interação com nuvens de pontos, através do software Mathematica, para recolha de informação sobre fissuras. Inicialmente são apresentados vários testes em objetos simples para o desenvolvimento de ferramentas de interação com nuvens de pontos, incluindo a representação de superfícies. Na fase seguinte, são ensaiados algoritmos para redução da densidade das nuvens de pontos sem afetar a informação necessária para caracterizar fissuras ou a reconstrução das superfícies. As nuvens de pontos resultantes exigem menos capacidade de processamento, acelerando todo o processo de análise. Concluída a fase anterior, procura-se criar algoritmos e sequências de algoritmos que permitem o reconhecimento de fissuras e a sua caracterização de forma automatizada.

### **Capítulo 6 - Conclusões e Desenvolvimentos Futuros**

Neste capítulo, são analisados os resultados obtidos de modo a avaliar o desempenho da metodologia empregue e em que medida esta serve como diagnóstico e metodologia de reabilitação. O desenvolvimento deste trabalho permitiu ainda lançar várias propostas para desenvolvimento de algoritmos na área do levantamento de patologias de cariz estrutural.



# Capítulo 2

## Fissuração na Construção

Nos edifícios correntes pode-se encontrar uma vasta variedade de patologias, cada uma com a sua metodologia de reparação. Entre as compilações técnicas existentes mais completas destaca-se o manual de Vitor Coias [4] que descreve vários métodos de análise e diagnóstico para as patologias mais diversas entre as quais a fissuração. Esta patologia é uma das mais frequentes nos edifícios sendo inevitável ao longo dos anos através da deterioração natural dos materiais. No entanto, os factores que as provocam também podem ser os mais diversos.

### 2.1 Classificação de fissuras

Classificando de uma forma resumida, podemos dividir fissuras em dois grandes grupos:

Fissuras não estruturais - As fissuras mais comuns, motivadas pelos mais diversos factores, entre erros na execução, diferenciais térmicos elevados, retracção de argamassas e até a deterioração natural dos materiais quando a manutenção é insuficiente ou inexistente. A figura 2.1 representa um caso

típico de retração no betão e a figura 2.2 fissuração por diferencial térmico.



Figura 2.1: Fissuração por retracção



Figura 2.2: Fissuração por diferenciais térmicos

Fissuras estruturais - São todas aquelas que surgem motivadas por deformações da estrutura. Entre as causas mais comuns, destacam-se erros construtivos, carregamentos excessivos, deformações nos solos motivados por trabalhos de escavação próximos, entre outras. Na figura 2.3 encontra-se um exemplo de fissuração na estrutura derivada de um sismo e na figura 2.4 um esquemático da fissuração motivada por assentamentos diferenciais.



Figura 2.3: Fissuração motivada por sismo

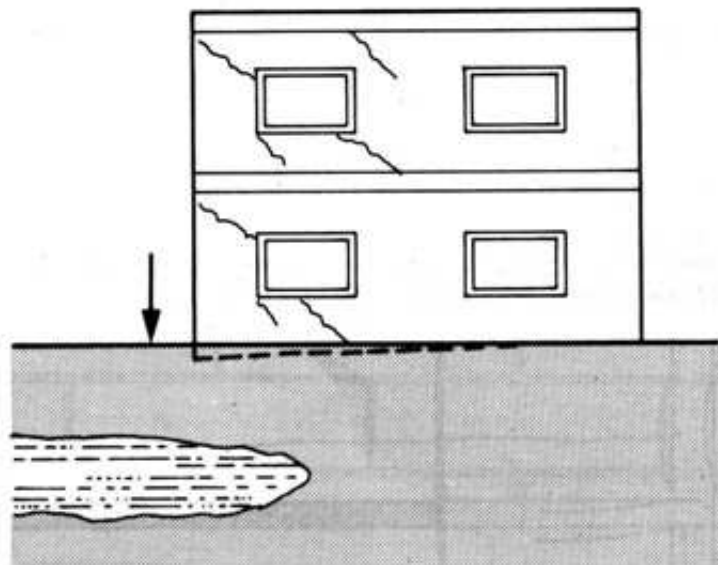


Figura 2.4: Fissuração por assentamento de fundações

Principalmente no caso da fissuração estrutural, é importante conhecer a sua influência na estrutura, sendo necessário conhecer as suas características geométricas, localização do ponto de vista estrutural e o seu comportamento

ao longo de tempo através de monitorização.

Os métodos convencionais de análise baseiam-se no mapeamento de fissuras sobre plantas e medição através de equipamentos como régua de fissuras e fissurómetros quando necessária a monitorização. Em qualquer dos casos, estas leituras obrigam ao contacto directo com as fissuras, o que pode representar um inconveniente quando detectadas em fachadas ou outros locais cujo acesso obriga a operações logísticas mais dispendiosas (ex. andaimes).

## 2.2 Reabilitação

Diagnosticada a origem de uma ou várias fissuras, há que proceder às devidas reparações.

Conforme já referido, as fissuras de origem não estrutural, geralmente têm pouca relevância além de que a sua reparação é relativamente simples.

Num caso de retracção de argamassas, uma situação usual em paredes interiores de edifícios com 2 a 3 anos, a reparação passa por uma simples lixagem do revestimento e posterior pintura (fissuras de 0.1mm a 0.3mm).



Figura 2.5: Lixagem de parede

Quando as fissuras apresentam uma dimensão ligeiramente superior e estão associadas a paredes exteriores, existem factores sazonais (humidade e temperatura) que podem também influenciar fissuração. Nestes casos, deve-se picar as fissuras e "armar" a pintura com uma rede nylon para permitir a absorção de algum movimento posterior.

As fissuras identificadas com origem estrutural, exigem uma análise detalhada, envolvendo normalmente monitorização para conhecer o seu comportamento ao longo do tempo. A vantagem desta análise é permitir saber se a fissura está a reduzir os seus movimentos, ou seja se se encontra em estabilização ou vice-versa. Os métodos de reparação deste tipo de patologias são imensos, consoante a localização e gravidade.

Exemplificando, um prédio com 13 pisos sofreu danos ao nível do piso 8 devido a uma intervenção de um particular que removeu uma parede de alvenaria, incluindo viga. Os danos verificam-se quase de imediato no vizinho do piso superior pelo surgimento de fissuras horizontais largas (2 a 6 mm) no alinhamento da parede removida. Após diagnóstico realiza-se uma intervenção através da instalação de um perfil metálico, figura 2.6, fixado aos pilares para substituir a viga anteriormente removida. Procede-se então, à monitorização da fissura para avaliar se o reforço foi eficaz e caso o resultado seja movimento nulo, finalmente procede-se à reparação das fissuras.



Figura 2.6: Reforço de Laje

## Capítulo 3

# Técnica de Varrimento Laser 3D

A técnica de varrimento laser 3D consiste na emissão de um feixe que é reflectido por um espelho que rapidamente varia em angulo e azimute, permitindo enviar vários feixes em várias direcções num curto espaço de tempo, figura 3.1. Ao atingir um objecto, o feixe é reflectido e parte da luz regressa ao emissor que regista a diferença de fase, anexando o angulo e azimute e características da luz reflectida. Na bibliografia de Saeed Olyae (2006) [1], são analisados e comparados 3 diferentes princípios de medição: *Time-of-Flight*, *frequency modulation continuous wave(FMCW)* e *Phase-Shift*. No presente trabalho, o equipamento utilizado foi o Faro Focus 3D, figura 3.3, que utiliza o principio de *Phase-Shift*.

A informação recolhida pelos aparelhos é armazenada em base de dados conhecida por nuvens de pontos em que cada ponto pode apresentar características de localização espacial  $(x,y,z)$ , normais  $(n_x,n_y,n_z)$ , cor  $(R,G,B)$  e intensidade de reflexão  $(a)$ .

Esta técnica já é utilizada nas mais diversas aplicações: Industrial, Topografia, Engenharia de Minas, Engenharia Inversa, Engenharia Mecânica,

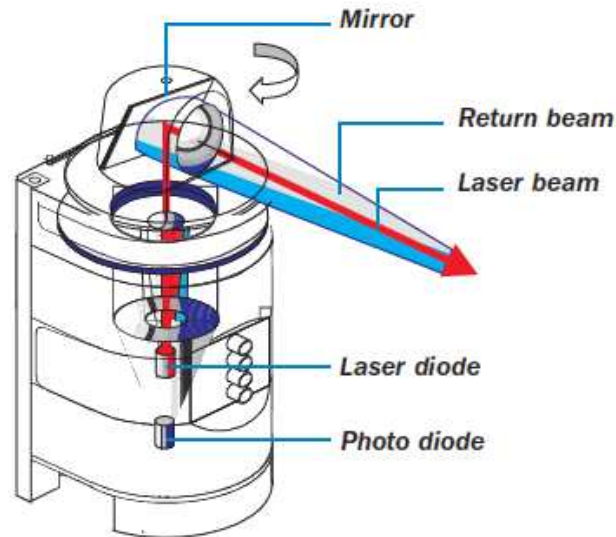


Figura 3.1: Esquemático de 3D Laser Scanner

Medicina Dentária, Arqueologia, onde se pode também realçar Arquitectura.

Nesta área, os levantamentos dos edifícios históricos são ainda registados através de medição directa com ou sem apoio topográfico para avaliação da geometria dos elementos construtivos/decorativos. Estes processos apesar de fiáveis, têm um grande peso ao nível de custos e tempo de execução. Com o surgimento da Fotogrametria Digital, já foi possível agilizar todo o processo e reduzir custos. No entanto, esta técnica é mais apropriada para superfícies predominantemente planas. A entrada dos equipamentos de varrimento laser 3D nesta área, veio suprimir as lacunas das anteriores metodologias, tornando-se assim, uma técnica promissora para a documentação rigorosa de edifícios e centros históricos.

Os primeiros equipamentos, figura 3.2, surgiram em meados de 1997, sendo de grande dimensão, dependentes de energia e base de armazenamentos externas. A frequência de leituras podia variar entre os mil e 5 mil pontos

por segundo. O prisma de posicionamento do laser era limitado a uma janela uma vez que o corpo do equipamento era fixo, sendo necessário girar o equipamento manualmente para se obter uma nuvem mais abrangente. O alcance destes equipamentos era no máximo de 200 metros.



Figura 3.2: Laser Scanner - Cyrax 2500

Nos anos 2000, foram lançados novos equipamentos, ainda de grandes dimensões, mas com servo-motores capazes de girar 360 graus horizontalmente. A frequência de leitura evoluiu permitindo a leitura de cerca de 100 mil pontos por segundo e um alcance que atingia os 600 metros. As fotografias começaram a ser associadas às nuvens de pontos.

Desde 2010, os equipamentos são capazes de medir até 4 quilômetros, figura 3.3, com frequências que atingem 1 milhão de pontos por segundo, de uma forma totalmente autónoma. Com a crescente utilização, o desenvolvimento de software já permite a união de várias nuvens de pontos com fotografias e através de complexos algoritmos, recolher informações úteis de forma automática, onde este trabalho se insere.



Figura 3.3: Equipamento de varrimento laser 3D, Faro Focus 3D

### 3.1 Nuvens de pontos

Conforme já referido, as nuvens de pontos representam uma base de dados onde é armazenada a informação recolhida pelo equipamento de varrimento laser 3D. Estas podem armazenar não só informação relativamente ao posicionamento espacial e intensidade de reflexão como também características de cor RGB quando o equipamento o permite.

No equipamento Faro Focus 3D, inicialmente a informação gerada é armazenada num formato nativo (\*.fls). Através do software Faro Scene, as nuvens de pontos são então exportadas em formato editável (\*.ptx), já possível utilizar com MeshLab. Neste software podem ser aplicados vários tipos de processamentos na nuvem de pontos, como reconstruir superfícies, dizimar pontos através de algoritmos pre-definidos, etc. Utilizando as ferramentas de selecção, pode ser identificada uma área específica a analisar e exportar a mesma em formato (\*.ply), encontrando-se em condições para ser analisada e editada com o software Mathematica.

Num primeiro contacto utilizamos o MeshLab para importar os dados gerados pelo equipamento Faro 3D, em formato \*.PTX que se encontra em formato ASCII e na escala métrica. Neste formato, não é possível abrir

directamente os ficheiros em Mathematica, portanto utilizamos o MeshLab para importar os dados, visualizar e exportar num formato conhecido \*.PLY (Poligon File Format).

Utilizando um software "open source" como o NotePad++, é possível abrir estes ficheiros onde vamos encontrar no cabeçalho toda a informação necessária sobre a organização dos dados. No seguinte exemplo, podemos identificar o formato de ficheiro ASCII, o número de pontos (108411), as coordenadas de cada ponto, e o número de faces geradas pelos pontos (214852).

```
ply
format ascii 1.0
comment VCGLIB generated
element vertex 108411
property float x
property float y
property float z
property float nx
property float ny
property float nz
property uchar red
property uchar green
property uchar blue
property uchar alpha
element face 214852
property list uchar int vertex_indices
end_header
5.17742 -0.0223246 -0.338097 -3.13008 -0.0782711 -0.0487686 252 252 252 255
...
```

## 3.2 Reconstrução 3D de superfícies

As nuvens de pontos, representadas graficamente podem assemelhar-se a uma superfície quando a densidade de pontos é muito elevada, no entanto, não são representações de superfícies. A reconstrução 3D, na sua essência representa um método que analisa a informação disponível e constrói superfícies, desde um simples plano entre 3 pontos próximos à complexa análise de nuvens de pontos e geração de superfícies curvas aproximadas através de algoritmos mais complexos. Na generalidade, a reconstrução de superfícies pode ser gerada através de algoritmos de análise Poligonal. Um exemplo de análise Poligonal é a técnica "3D Delaunay triangulation" que gera regiões triangulares irregulares baseados na interpolação linear entre pontos no espaço. Exemplos de técnicas paramétricas são "NURBS - Non-Uniform Rational B-Splines) ou Fast (Radial Basis Functions), que usam funções paramétricas para definir superfícies. As técnicas paramétricas usualmente conseguem produzir superfícies mais realistas e correctas, principalmente em áreas onde existe pouca informação. No entanto, estas técnicas requerem um poder de processamento superior às técnicas poligonais. Na figura 3.4, à esquerda encontra-se um exemplo de superfície reconstruída através de triangulação, enquanto que à direita, em base paramétrica.

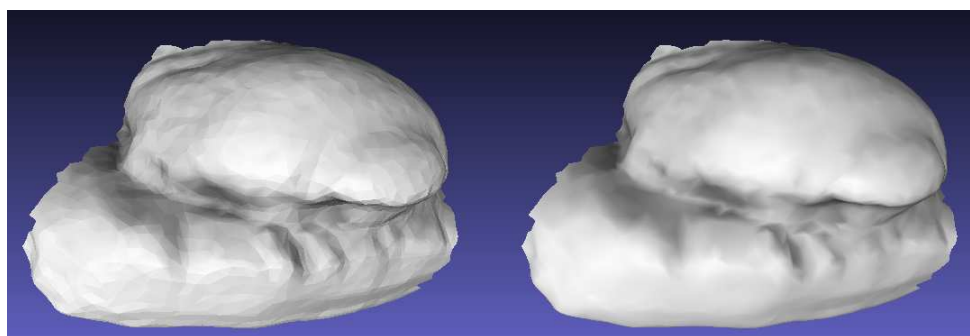


Figura 3.4: Reconstrução de superfície em diferentes metodologias

# Capítulo 4

## Caso de estudo

Neste trabalho, procurou-se a identificação de situações de fissuração em paredes com alguma relevância para base de desenvolvimento da análise. No ISEL, o pavilhão de mecânica, figura 4.1, apresenta fissuras de grande dimensão que afectam várias salas.



Figura 4.1: Pavilhão de Mecânica (ISEL)

As paredes em causa são constituídas por panos simples de alvenaria de tijolo de 15 cm rebocadas em ambos os lados. Estas encontram-se ao nível do piso terreo, no canto Sul do edifício, não existindo pisos inferiores. As fissuras em si apresentam uma abertura média de 5 a 8 mm, sendo por isso consideradas graves, demonstrando indícios de assentamento de fundações.



Figura 4.2: Fissuração por assentamento de fundações

No decorrer deste trabalho foram instalados 3 fissurómetros, figura 4.3, nas áreas fissuradas para perceber se ainda existem movimentos nas fissuras e assim complementar o diagnóstico das causas da fissuração. Os fissurómetros utilizam uma escala de nónio que permitiram detectar movimentos à escala do décimo de milímetro.



Figura 4.3: Fissurómetro para monitorização de fissuras

Durante um período de 6 meses, desde a instalação dos equipamentos não foi detectado qualquer movimento, o que aponta para um assentamento com indícios de estabilização, embora para se tornar um estudo conclusivo deverão ser considerados pelo menos 12 meses.

Procedendo ao levantamento com o equipamento de varrimento laser, foram consideradas 12 estações de varrimento laser, em ambos os lados das áreas fissuradas não só para maximizar a informação digitalizada mas também permitir a interligação das várias nuvens numa posterior montagem do modelo 3D. Cada nuvem corresponde a um levantamento de aproximadamente 10 milhões de pontos, num ângulo horizontal de 360° e vertical de 270° ficando apenas oculta a base de suporte do aparelho.

Neste trabalho, dado a exigência de um elevado potencial de processamento, foram realizados ensaios em apenas uma nuvem de pontos onde se

verifica uma fissura, conforme indicado na figura 4.4. Note-se que é vantajosa a utilização de várias nuvens de pontos pela possibilidade de produzir um modelo com menos lacunas de informação na medida em que integra pontos de vista complementares. No caso de estudo, toda a zona de interesse encontrava-se visível para uma única estação de varrimento laser.

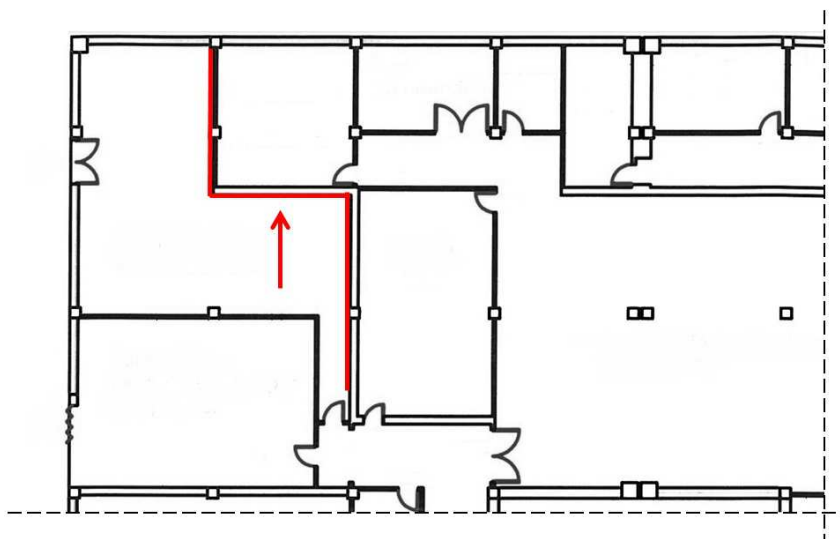


Figura 4.4: Localização da fissura, Planta do piso 0

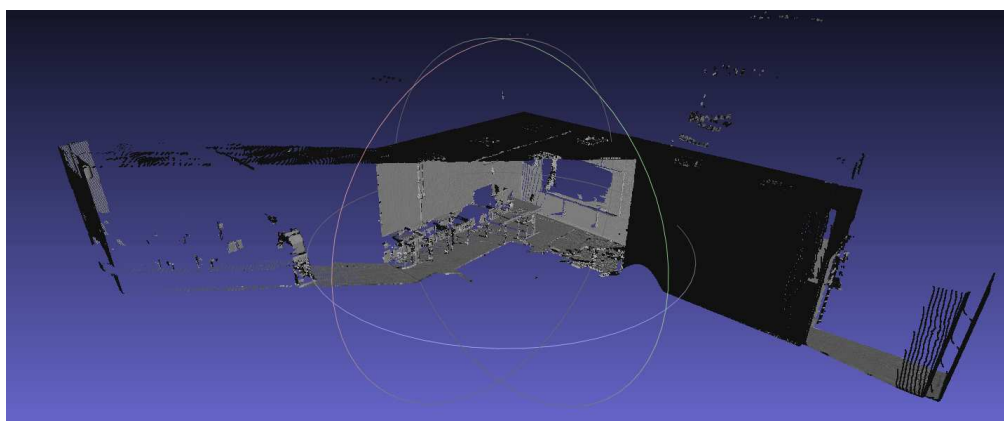


Figura 4.5: Nuvem de Pontos - N°45

O trabalho foi desenvolvido com uma nuvem de pontos. Apenas a representação espacial dos pontos em MeshLab é um processo de grande exigência computacional e conseqüentemente moroso . Uma vez que o trabalho incide em fissuração, foram utilizadas as ferramentas de selecção do software para focar apenas a parede fissurada, reduzindo o número de pontos para cerca de 100 mil, figura 4.6.

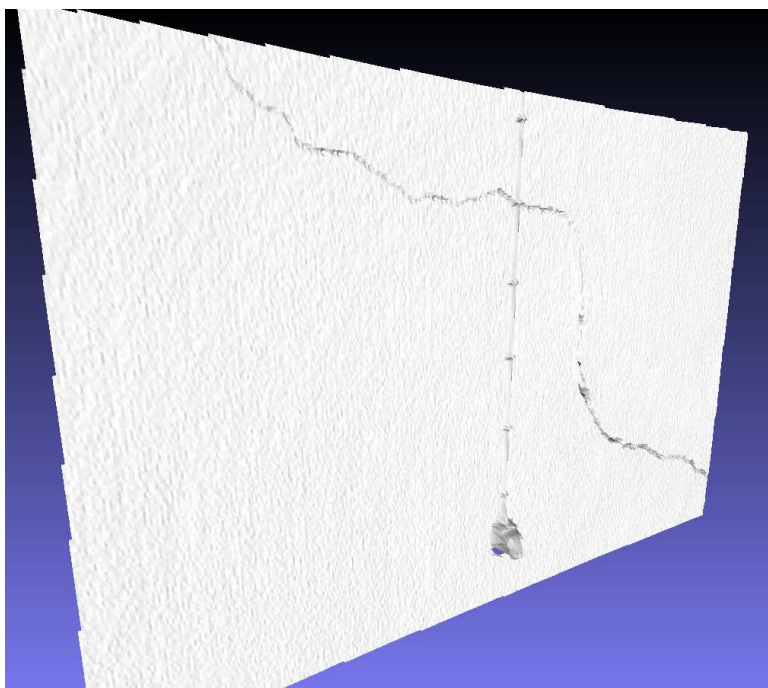


Figura 4.6: Selecção de pontos de parede - Nuvem de Pontos N°45

A reconstrução da superfície de objectos pode ser efectuada com diferentes técnicas. Neste trabalho utilizamos uma função já existente no Mathematica que permite construção de superfícies através da interpolação triangular de pontos "ListSurfacePlot3D". Aplicada esta função à nuvem de pontos resultante, obtemos a superfície representada na figura 4.7.

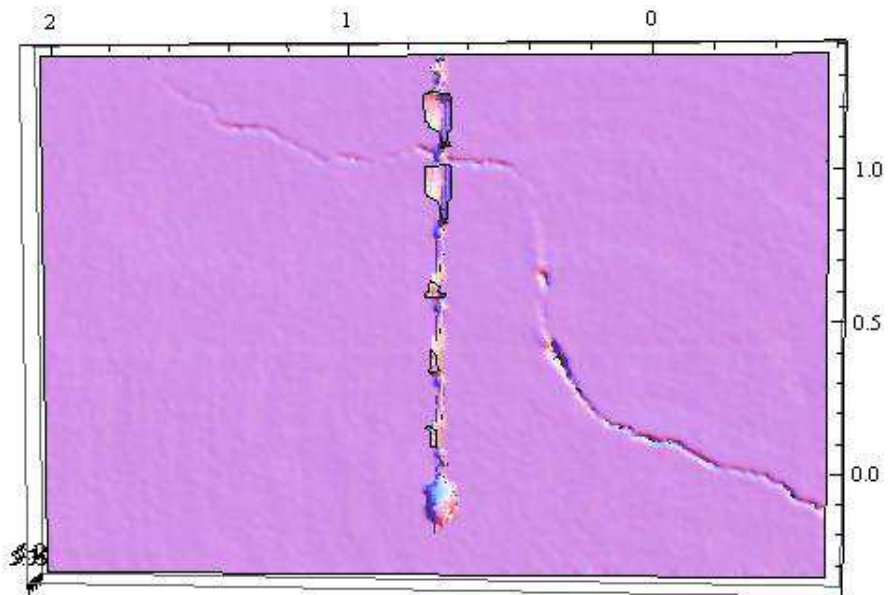


Figura 4.7: Reconstrução de superfície 3D em Mathematica

# Capítulo 5

## Algoritmos de análise de nuvens de pontos

Uma vez que as nuvens de pontos resultantes de um levantamento com laser scanner podem atingir vários milhões de pontos, é necessário recorrer a processos automáticos que permitam manipular e interpretar a informação aí retida. Neste capítulo foram desenvolvidos e analisados diferentes algoritmos, visando a identificação e caracterização de fissuras. Estes ensaios foram realizados usando o software Mathematica devido à sua versalidade para gerar instruções e interagir com as nuvens de pontos.

Os softwares, MeshLab v 1.3.2 (64bit) e Mathematica v 9.0, foram utilizados num computador portátil cujas características principais são: Disco rígido 7200rpm, 8Gb Ram, processador Core i7 740QM e processamento gráfico NVIDIA GeForce GT 425M.

Numa primeira abordagem, foi realizado um teste utilizando uma esfera como exemplo. No Mathematica foi criada uma tabela de pontos, semelhante a uma nuvem de pontos, com a função "Table", considerando a equação de uma esfera. Em ambiente Mathematica, apresenta-se da seguinte forma:

## 42CAPÍTULO 5. ALGORITMOS DE ANÁLISE DE NUVENS DE PONTOS

```
esfera1 = Table[{Cos[x]*Sin[y], Sin[x]*Sin[y], Cos[y]},  
{x, 0, 2*Pi, .2}, {y, 0, Pi, .2}]
```

Os resultados surgem em formato de tabela:

```
{{0., 0., 1.}, {0.198669, 0., 0.980067}, {0.389418, 0., 0.921061},  
..., {0.140632, -0.0117256, -0.989992}}
```

Gerada a tabela de pontos, esta pode ser representada graficamente através da função "ListPointPlot3D". Na figura 5.1, é possível distinguir a forma de uma esfera. Note-se que quanto maior é a densidade de pontos, maior é a definição e semelhança com o objecto original.

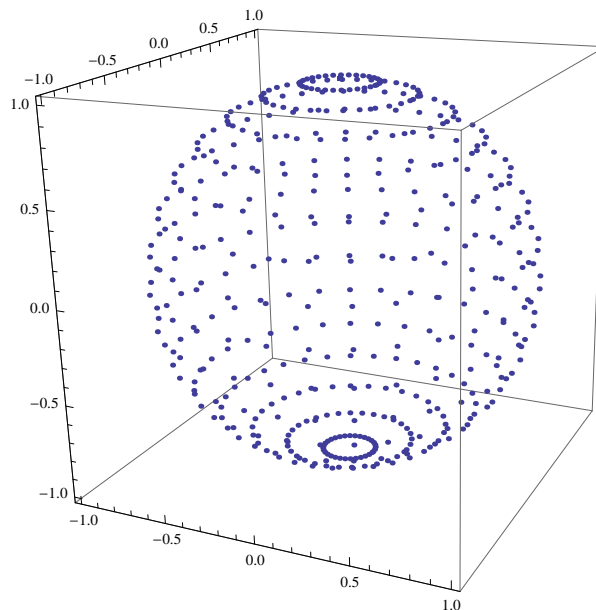


Figura 5.1: Representação gráfica da nuvem de pontos

Ao aumentar a densidade de pontos para se assemelhar ao volume de pontos nos levantamentos realizados, o tempo de processamento é gravemente

afectado, tornando-se impraticável a sua análise (2.30 h). Dada esta limitação, reduziu-se a tabela através da função "Partition" que divide a tabela em partes iguais, permitindo desta forma trabalhar partes da tabela separadamente. Neste caso foi dividida uma tabela representativa da esfera em 4 partes, resultando num quarto de esfera, conforme a seguinte figura 5.2.

```
Length[esfera2]=512
```

```
part = Partition[esfera2, 128];
```

```
ListPointPlot3D[part[[1]], BoxRatios -> {1, 1, 2}]
```

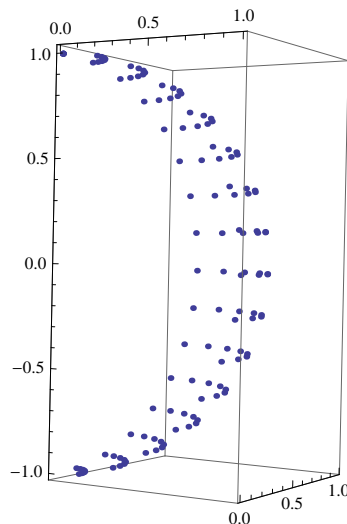


Figura 5.2: Representação gráfica de quarto de esfera

Dada a nuvem representativa da esfera, a sua superfície pode ser reconstruída através da aproximação de pontos utilizando a função "ListSurfacePlot3D". A ideia subjacente a esta função é que cada 3 pontos próximos formam uma superfície plana e no conjunto a superfície do objecto. A reconstrução torna-se mais próxima da superfície original quanto maior é a densidade de pontos utilizada.

```
ListSurfacePlot3D[part[[1]]];
```

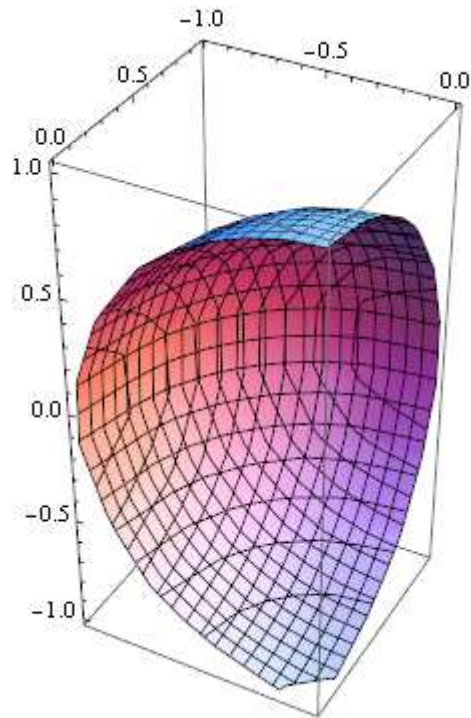


Figura 5.3: Reconstrução de superfície

Considerando o objectivo de visualização do objecto utilizando o software Meshlab, os resultados podem ser exportados no formato (.ply), com a função "Export" que inclui as coordenadas dos pontos e as normais dos vectores de cada superfície triangular utilizada para a representação da superfície da esfera. Neste formato, a informação já pode ser manipulada com o MeshLab, ou com outro software que utilize este formato. Na figura 5.4 encontra-se a reconstrução da esfera a partir da importação das 4 partes da esfera resultando na esfera inicialmente utilizada.

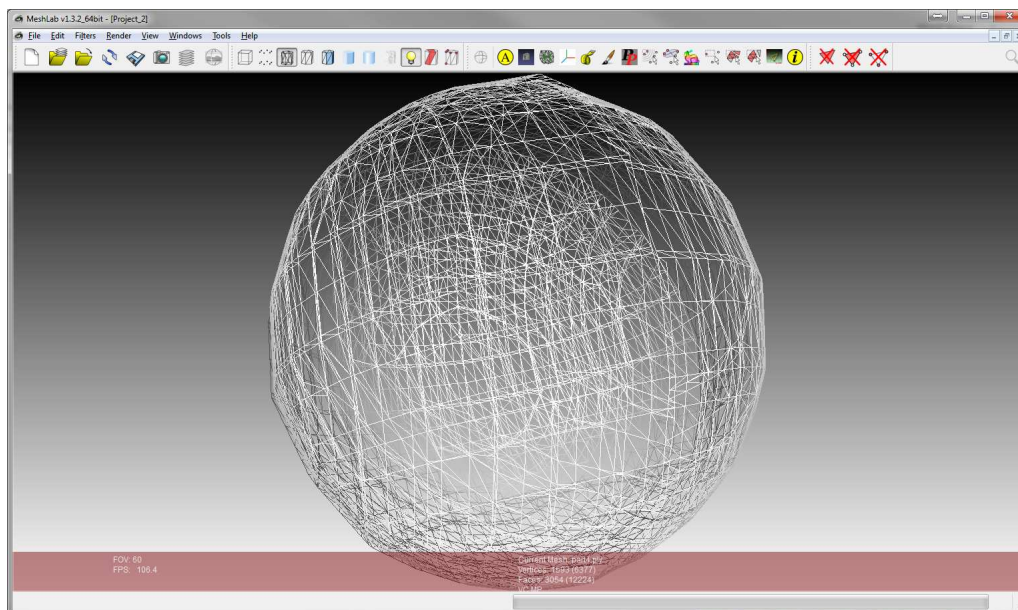


Figura 5.4: União das leituras em MeshLab

As funções até agora utilizadas já permitem uma interação básica com as nuvens de pontos, no entanto são limitativas considerando os objectivos deste trabalho, razão pela qual iremos usar a versatilidade do software Mathematica na elaboração de funções procedimentais para manipular a nuvem de pontos. Começou-se por efectuar um pequeno exercício que consiste na determinação dos limites da nuvem de pontos, considerando o seu referencial. Para este efeito, é necessário verificar todos os pontos para identificar os que apresentam as coordenadas máximas ou mínimas. A função procedimental `LExterior`, (Anexo A.1), lê a informação correspondente à nuvem de pontos "L", nomeadamente as coordenadas dos pontos. Para a deteção dos máximos e mínimos em cada coordenada, utilizaram-se as funções "`Max[x]`" e "`Min[y]`", armazenando os resultados em novas variáveis, `x1` e `x2`. Após repetição deste procedimento nas três coordenadas, imprimiu-se os resultados com a função "`Print`". Na figura 5.5, apresentamos o esquema do procedi-

mento de determinação dos extremos das coordenadas. demonstra como a informação se processa.

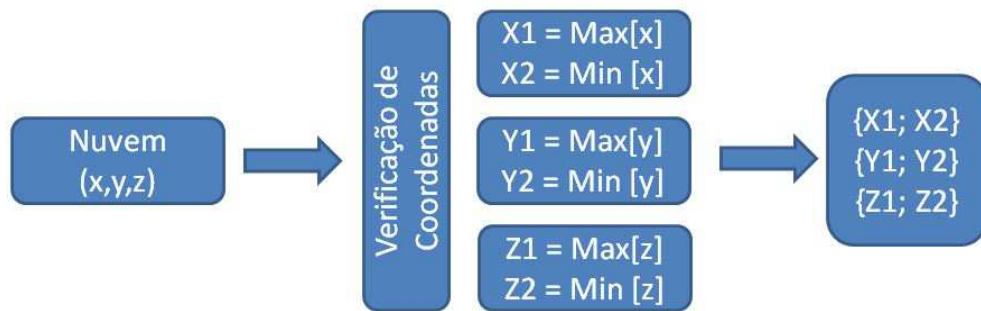


Figura 5.5: Esquema do procedimento `LExterior` - Anexo A.1

Ao aplicar esta função na tabela de pontos "esfera2", resultam os valores máximo e mínimo de cada coordenada. Em Mathematica, o resultado apresenta-se da seguinte forma:

```

LExterior[esfera2]
-0.99746  0.997495;  -0.995554  0.994996;  -0.989992  1.
  
```

Para selecção de pontos, várias abordagens podem ser consideradas. Um exemplo é a limitação das coordenadas X e Y num intervalo definido pela função `selectXY`, (Anexo A.2.), cujo resultado se apresenta na figura 5.6. Outra possibilidade é de identificar um ponto específico e seleccionar todos os pontos num raio definido, `Selecpoint` (Anexo A.3.), como se apresenta na figura 5.7.

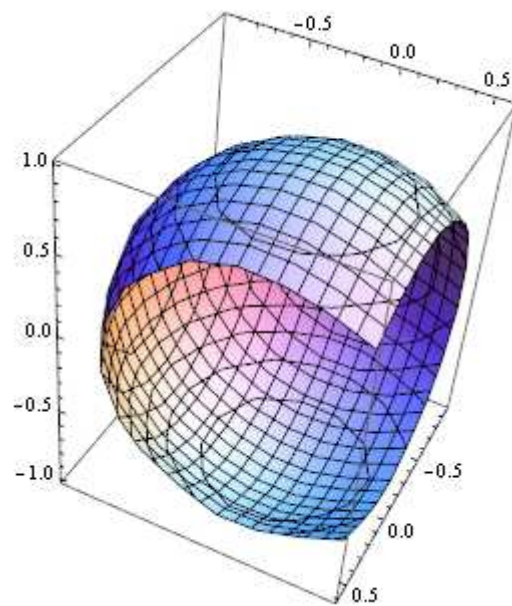


Figura 5.6: Algoritmo para selecção de pontos `selectXY` - Anexo A.2

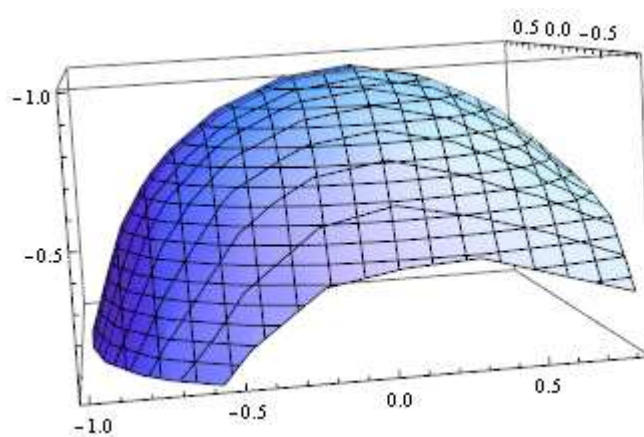


Figura 5.7: Algoritmos para selecção de pontos `SelecPoint` - Anexo A.3

## 5.1 Redução de densidade de pontos

O número de pontos de uma nuvem afecta diretamente o tempo de processamento. Utilizando o Mathematica, cedo se percebeu que mesmo com uma nuvem reduzida a 100k, a aplicação de algoritmos continua a produzir respostas demoradas (1 a 2 h). Assim, neste capítulo analisam-se formas de reduzir a densidade das nuvens tanto quanto possível sem afectar as áreas relevantes ou a reconstrução tridimensional no usando a função `SurfacePlot3D` do Mathematica.

O próximo teste foi efectuado a uma nuvem de pontos representativa de um coelho, incluída na biblioteca do software Mathematica. Esta forma apresenta características geométricas mais complexas, pontenciando resultados mais diversificados, figura 5.8.

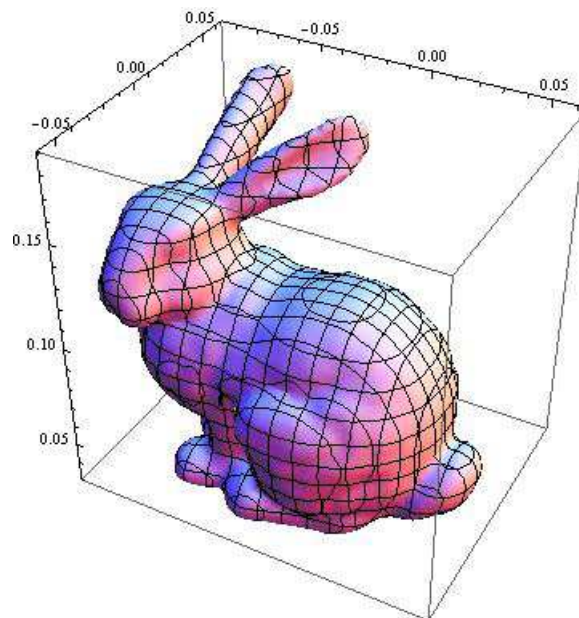


Figura 5.8: Reconstrução de superfície de um coelho

Na função, `remov` (Anexo A.4), o objetivo foi reduzir a densidade da nuvem de pontos, considerando a localização geométrica. Escolhido um ponto numa superfície, os pontos próximos deste são removidos quando se encontram "próximos" (segundo um erro previamente determinado e guardado no variável "e") dum dos planos ordenados ( $xOy$ ,  $yOz$ , ou  $xOz$ ). Este procedimento é útil porque consideramos a fissura de uma parede que à partida se localiza num dos planos coordenados. O seguinte esquema, figura 5.9, simplifica a leitura deste procedimento.

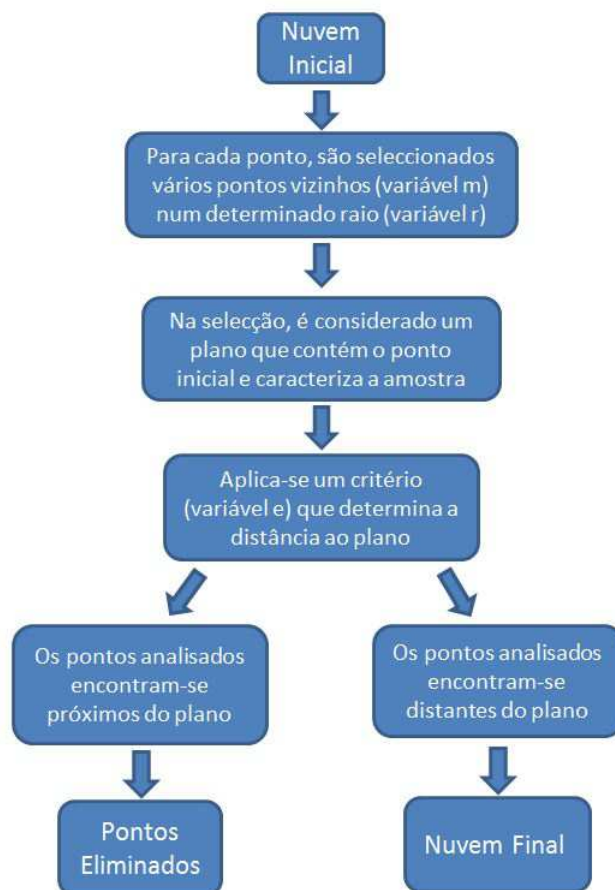


Figura 5.9: Esquema do procedimento `remov` - Anexo A.4

Numa primeira abordagem, o algoritmo foi ensaiado com uma nuvem de pontos representativa de uma esfera, totalizando 2016 pontos. O objectivo era obter resultados e perceber a sua eficácia, variando os parâmetros de número de pontos considerados "m", raio de análise "r" e o critério de limitação angular "e".

No seguinte quadro, são apresentados os resultados dos ensaios. Consoante a variação dos parâmetros do algoritmo é obtida: uma percentagem de redução de pontos, a qualidade da representação 3D do objecto inicial comparativamente com o final e o tempo necessário para cada ensaio.

O algoritmo foi posteriormente aplicado a uma nuvem de pontos com cerca de 5000 Pontos, representativa de uma parte de uma parede fissurada. Desta forma pretendem-se obter resultados mais próximos de uma situação real.

Consoante os resultados, rapidamente se percebe a morosidade de cada ensaio para uma amostra com 5000 pontos. No entanto, os resultados são eficazes e permitem uma redução aproximada de 20 % dos pontos da nuvem, sem afectar áreas fissuradas. Note-se que esta nuvem representa apenas parte da amostra de 100 mil pontos.

Até agora consideraram-se apenas as coordenadas espaciais de objectos. Como já referimos, as nuvens de pontos do levantamento efectuado também apresenta informação relativa à cor (RGB) em que cada tom é definido com uma escala de 0 a 255. Na nuvem de pontos levantada, as coordenadas relativas a cor correspondem às 7, 8 e 9 posições. A função `selecRGB` (Anexo A.5), identifica os pontos da nuvem num intervalo de padrões de cor.

Esfera 2016 Pts	m	r	e	% Redução	Repres. 3D	Tempo (min)
1.1	5	0,2	0,01	28,77	Bom	8
1.2	5	0,2	0,02	47,32	Médio	8
1.3	5	0,2	0,03	61,76	Fraco	8
1.4	5	0,2	0,04	73,96	Fraco	8
1.5	5	0,2	0,05	83,68	Fraco	8
2.1	2	0,2	0,02	28,77	Bom	7
2.2	5	0,2	0,02	28,77	Bom	9
2.3	10	0,2	0,02	28,77	Bom	14
2.4	20	0,2	0,02	28,77	Bom	32
3.1	5	0,01	0,02	18,20	Bom	7
3.2	5	0,15	0,02	28,37	Médio	8
3.3	5	0,5	0,02	40,23	Fraco	8
3.4	5	1	0,02	77,55	Fraco	8

Tabela 5.1: Resultados da função (remov) em esfera de 2016 pontos



Figura 5.10: Esquema do procedimento selecRGB - Anexo A.5

Parede 5000 Pts	m	r	e	% Redução	Repres. 3D	Tempo (min)
1.1	5	0,2	0,0005	7,23	Bom	27
1.2	5	0,2	0,001	22,16	Médio	27
1.3	5	0,2	0,0015	36,11	Fraco	27
1.4	5	0,2	0,002	50,76	Fraco	27
1.5	5	0,2	0,005	77,43	Fraco	27
2.1	2	0,2	0,001	22,16	Bom	22
2.2	5	0,2	0,001	22,16	Bom	27
2.3	10	0,2	0,001	22,16	Bom	38
3.1	5	0,01	0,001	2,80	Bom	27
3.2	5	0,1	0,001	21,89	Médio	27
3.3	5	0,3	0,001	22,37	Fraco	27
3.4	5	0,4	0,001	22,37	Fraco	27
3.5	5	0,5	0,001	22,37	Fraco	27

Tabela 5.2: Resultados da função (remov) numa parede de 5000 pontos

Após alguns ensaios, evidencia-se o facto da maioria dos pontos se encontrar num padrão de cor próximo do branco, ou seja, cor da parede. No entanto, restringindo o padrão para tons mais escuros, são realçados todos os objectos que não apresentam a cor da parede. Na figura 5.11 foi restrito o padrão em todos os tons de forma a apresentar apenas pontos que se encontrem no seguinte intervalo (0-245). Este intervalo apresenta apenas 2% da totalidade da nuvem de pontos.

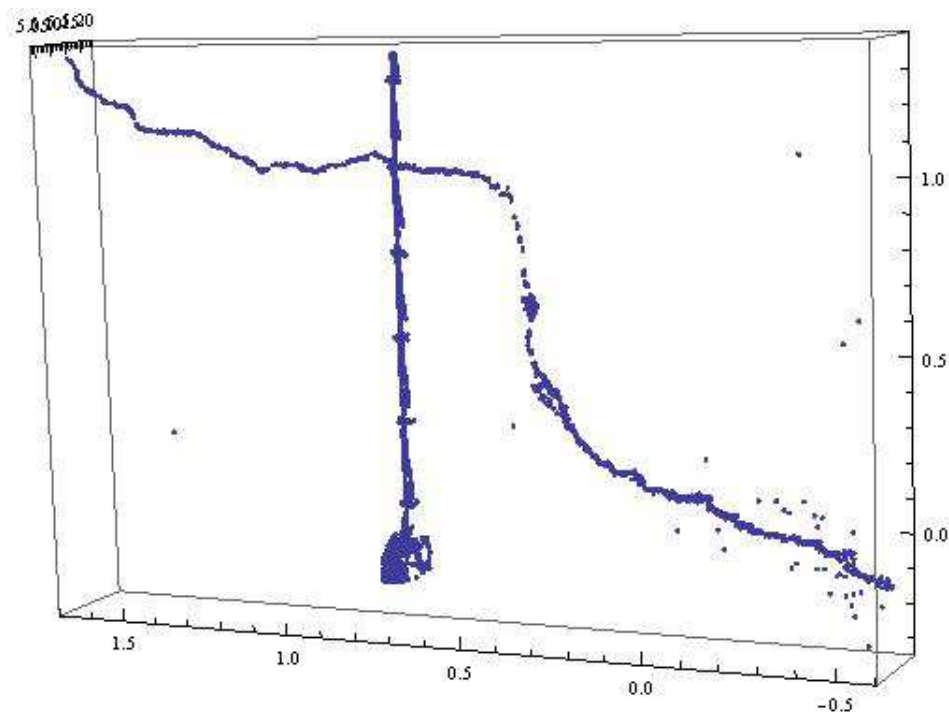


Figura 5.11: Seleção de pontos RGB (0-245)

Considerando que apenas se pretende informação relativa à fissura, de imediato se percebe que a redução da densidade de pontos com tonalidades claras irá aliviar o esforço computacional, no entanto, ao remover pontos de tons claros pode-se também retirar informação próxima da fissura que mais tarde poderá ser útil. Para evitar este risco, foi criada uma nova função com uma exceção que consiste na exclusão de todas as áreas dentro de uma vizinhança esférica onde a densidade de pontos de tonalidade escura é superior a uma taxa definida, `selecRGB1` (Anexo A.6). O resultado da aplicação desta função é uma nuvem de pontos cuja densidade de pontos de tons claros é reduzida, à exceção das áreas que se consideram críticas para análise.

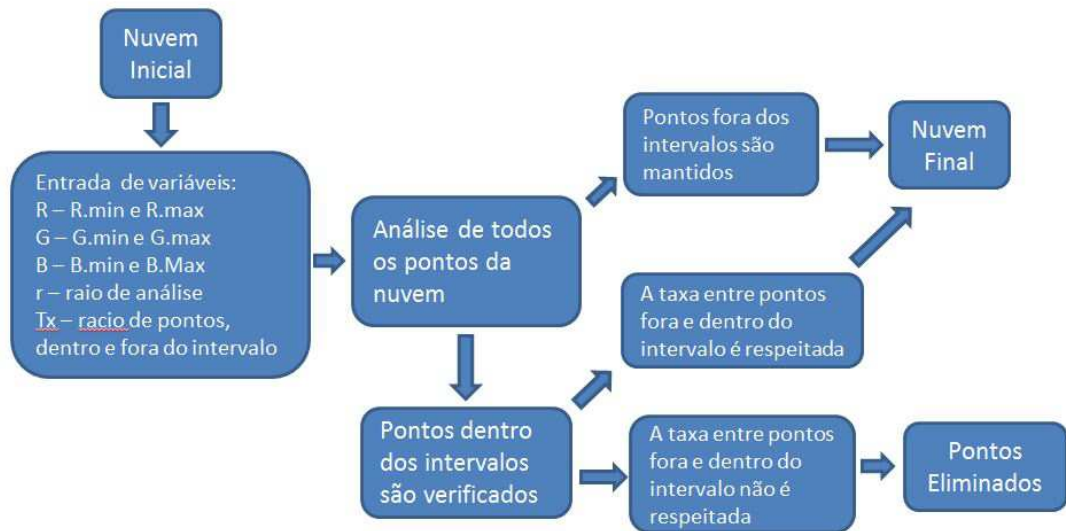


Figura 5.12: Esquema do procedimento `selecRGB1` - Anexo A.6

Nas figuras seguintes, é apresentada a comparação entre a reconstrução da nuvem de pontos original (Figura 5.13 ) e a sua versão filtrada (Figura 5.14) com cerca de 20% menos pontos. O resultado é uma superfície reconstruída praticamente idêntica sem perda de informação relevante.

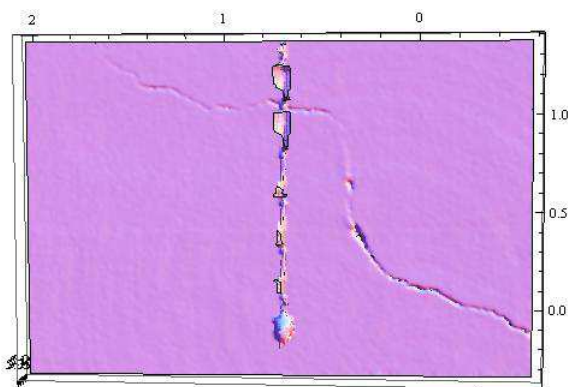


Figura 5.13: Reconstrução de superfície da nuvem de pontos inicial

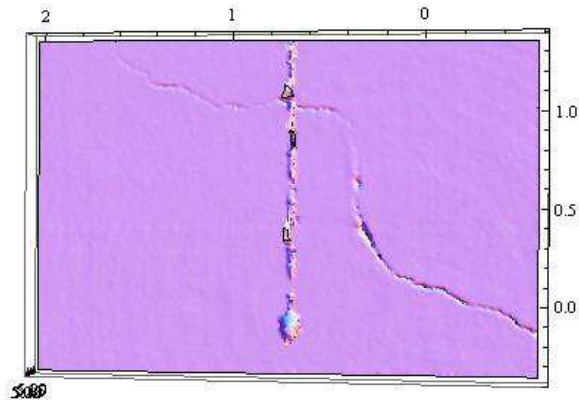
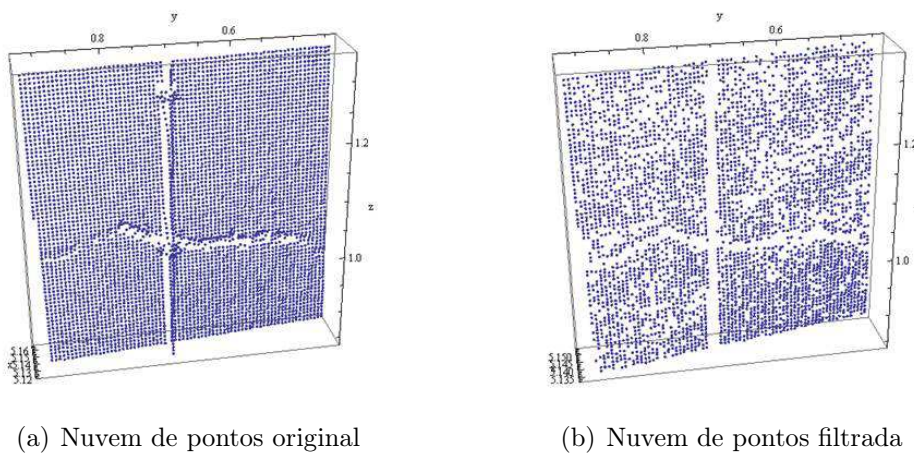


Figura 5.14: Reconstrução de superfície da nuvem de pontos reduzida

## 5.2 Recolha de características de fissuras

Uma característica relevante nas fissuras, é que todas se encontram no interior da parede, ao contrário de todos os objectos que se encontrem à superfície. Para isolar a fissura, será então necessário encontrar o plano da parede e seleccionar os pontos além do plano. Em primeiro lugar, é necessário isolar um padrão de cor RGB que apenas inclui os tons claros da pintura, ou seja, o plano da parede, através do algoritmo já criado para selecção RGB.



(a) Nuvem de pontos original

(b) Nuvem de pontos filtrada

Figura 5.15: Selecção RGB no intervalo [253-255]

Isolados os pontos da parede, obtêm-se apenas aqueles pertencentes ao plano e em condições para estimar o seu vector normal. A função procedural `NormalPlano` (Anexo A.7) permite, para cada ponto, calcular os maiores vectores com início nesse ponto e fim num ponto da nuvem. Esta metodologia, permite determinar a forma global da nuvem (eliminando rugosidades ou imperfeições locais detectadas na parede). Conseguimos, desta forma, determinar um plano próximo da nuvem de pontos (Figura 5.16). A determinação do plano é realizada através da função `PlanoParede` (Anexo A.8).

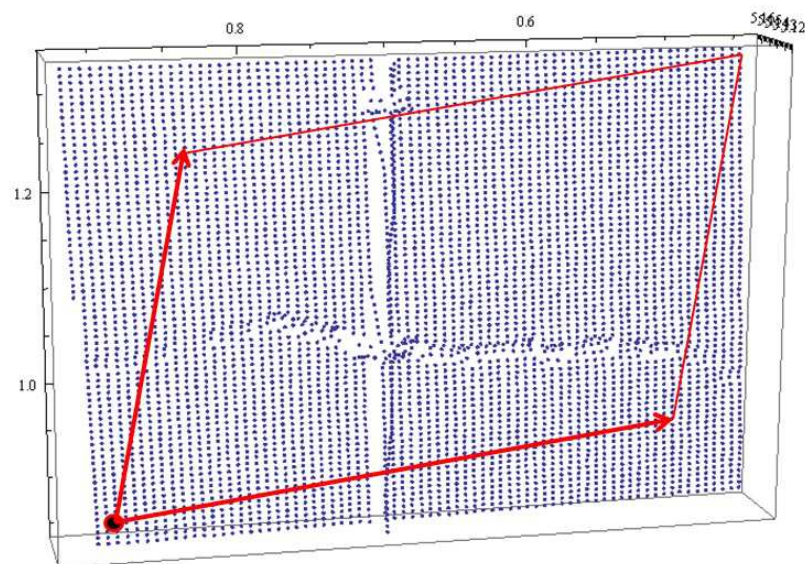


Figura 5.16: Análise vectorial da nuvem de pontos

Conhecida a equação do plano da parede já é possível seleccionar e remover os pontos que se encontram à face da parede, como o cabo de energia e interruptor. Considerando o valor *dist* fixo e suficientemente pequeno, eliminam-se todos os pontos da nuvem que se encontram a uma distância ao plano superior a *dist*. Sabendo que a distância de qualquer ponto de

coordenadas  $(a, b, c)$  ao plano da parede de equação

$$NP[i, 1]x + NP[i, 2]y + NP[i, 3]z + d = 0$$

pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$\frac{a * NP[i, 1] + b * NP[i, 2] + c * NP[i, 3] + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

Esta expressão foi implementada na função `planoREMOVpts` (Anexo A.9). Com estas ferramentas torna-se possível diferenciar os pontos da fissura dos restantes pontos da nuvem, figura 5.17.

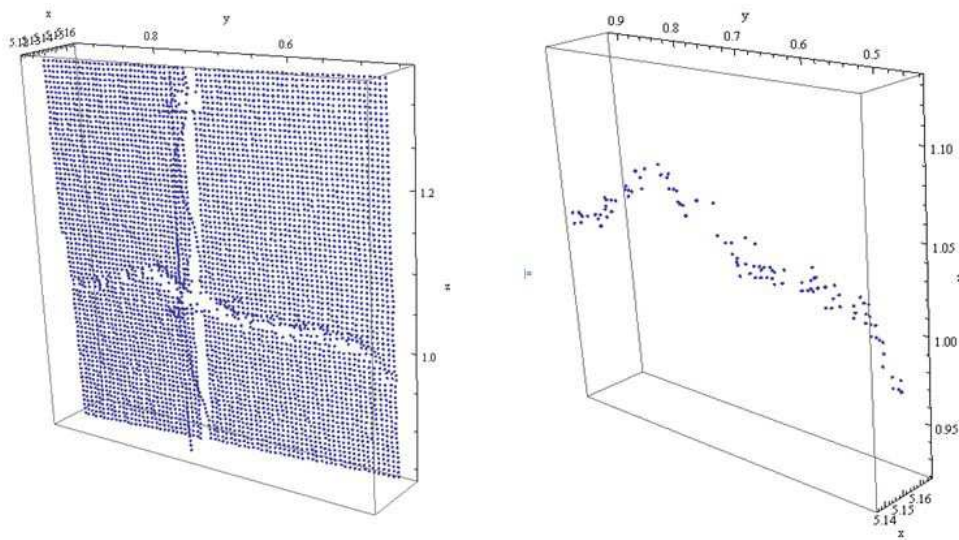


Figura 5.17: Selecção de pontos da fissura

Ao evidenciar os pontos da fissura na nuvem de pontos original, obtemos uma nuvem de pontos onde facilmente se identificam as fissuras na parede. Embora a limitação ao nível de processamento só tenha permitido a análise de uma pequena área, as funções procedimentais elaboradas podem ser aplicadas na nuvem com 100 mil pontos. A figura 5.18 compara a nuvem de pontos modelada com uma foto da mesma localização.

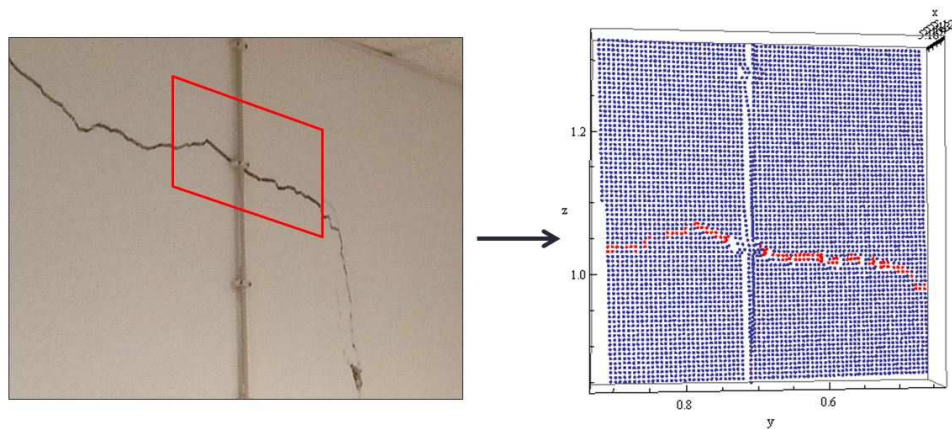


Figura 5.18: Sobreposição de pontos da fissura sobre a nuvem de pontos original

Finalmente, depois de localizada a fissura podemos medi-la. O comprimento pode ser estimado através do cálculo da distância maior entre dois pontos da fissura mais distantes dentro da amostra. Subdividindo uma grande região (uma fachada) em pequenas subregiões de, por exemplo,  $15 \times 15$  cm, e aplicando este procedimento a cada região. O somatório de todas as distâncias dará uma estimativa grosseira do comprimento total da fissura. Nesta fase podemos também avaliar o volume do menor paralelepípedo (do tipo apresentado na Figura 5.17) que contem os pontos da fissura, obtendo-se as seguintes dimensões:

$$\text{medida em } x = \text{Max}[\text{sf1}[[A11, 1]]] - \text{Min}[\text{sf1}[[A11, 1]]]$$

$$0.02981$$

$$\text{medida em } y = \text{Max}[\text{sf1}[[A11, 2]]] - \text{Min}[\text{sf1}[[A11, 2]]]$$

$$0.463947$$

$$\text{medida em } z = \text{Max}[\text{sf1}[[A11, 3]]] - \text{Min}[\text{sf1}[[A11, 3]]]$$

$$0.445293$$

# Capítulo 6

## Conclusões e observações finais

### 6.1 Conclusões

Os avanços tecnológicos na área do varrimento Laser 3D têm vindo a evoluir em termos de precisão, velocidade de recolha de dados e portabilidade, surgindo por isso a possibilidade de detecção de fissuras. A representação gráfica das nuvens de pontos em MeshLab, sem a reconstrução da superfície já permite a identificação das fissuras, demonstrando aqui o seu potencial de recolher informação.

Ainda numa fase inicial do trabalho, notou-se a grande versatilidade das ferramentas do Mathematica na aplicação de algoritmos nas nuvens de pontos exemplificativas. Estas permitiram um primeiro contacto e interacção com nuvens de pontos embora se tenha também notado o grande peso que isso representa em processamento. Por este motivo, uma das prioridades foi a redução da densidade de pontos, tendo motivado a criação dos primeiros algoritmos de redução. O resultado foi um algoritmo capaz de reduzir em cerca de 20% a densidade de pontos, evitando todas as áreas que apresentam variações de tonalidades sem afectar a reconstrução da superfície no Mathe-

matica. Posteriormente foram desenvolvidos algoritmos capazes de calcular a função do plano da parede. Com isto foi possível separar todos os elementos que se encontram fora da parede dos que se encontram dentro, ou seja, fissuras.

As fissuras detectadas no Pavilhão de Mecânica do ISEL, não registaram qualquer movimento num período de seis meses entre Março e Setembro. Embora esta informação indique que as fissuras se encontram estabilizadas, nos períodos de Verão, as fissuras motivadas por assentamentos dos solos têm tendência a estabilizar. Um período acrescido de mais 6 meses durante os períodos de chuva é aconselhado para se concluir se as fissuras estão definitivamente estabilizadas. Uma intervenção posterior irá depender deste resultado. No caso de se verificar a estabilização, as fissuras podem ser tratadas de imediato, através da picagem de fissuras, aplicação de argamassas e pintura final. Detectados movimentos nas fissuras durante estes períodos, poderá concluir-se que ainda existem movimentos nos solos sendo necessário tomar medidas de intervenção no sentido de os estabilizar, seja através de micro estacas, injeção de caldas, etc.

## 6.2 Potencialidades de futuro desenvolvimento na área de reabilitação

O desenvolvimento do trabalho em Mathematica permitiu abrir novos horizontes no que concerne a interação com nuvens de pontos, em especial a informação que se pode recolher. De seguida ficam algumas propostas de desenvolvimento deste trabalho que considero úteis e com mais valias para o mercado de trabalho:

## 6.2. POTENCIALIDADES DE FUTURO DESENVOLVIMENTO NA ÁREA DE REABILITAÇÃO

**Desenvolvimento do trabalho existente** - Embora o trabalho aqui realizado já permita a detecção semi-automatizada de fissuras, não se trata ainda de um produto final. Este carece de vários ensaios com diferentes condicionantes, como o reconhecimento de múltiplos planos, identificação a cores das fissuras detectadas sobrepostas à nuvem de pontos original para facilitar leitura, etc.

**Quantificação de trabalho** - Considerando que a detecção de fissuras não é apenas por amostragem mas sim uma análise rigorosa de todas as superfícies visíveis, os algoritmos poderão ser adaptados para detectar o tipo de reparação a executar (dependendo da largura da fissura) e quantificar as áreas de reparação de forma automática.

**Detecção de deformações em elementos estruturais** - O rigor que estes equipamentos de hoje em dia apresentam, é possível conceber algoritmos que detectem planos de laje, vigas, pilares e calculem deformações de forma automática. Casos práticos são as flechas em lajes/vigas ou perdas de verticalidade em pilares, etc.

**Monitorização** - No seguimento da anterior sugestão, a possibilidade de detecção de deformações numa estrutura, à partida também permite a sua monitorização. A comparação ao longo do tempo de várias leituras irá permitir detectar diferenças de movimentos muitas vezes não abrangidos pela aplicação de sensores por amostragem.



# Bibliografia

- [1] Olyae, S. (2006) - Comparison of TOF, FMCW and Phase-Shift Laser Range-Finding Methods by Simulation and Measurement; Quarterly Journal of Technology & Education, Vol. 1, No.1 Autumn.
- [2] Hoppe, H.; De Rose, T.; Duchamp, T.; Mc-Donald, J.; Stuetzle, W. (1992) - Surface reconstruction from unorganized points; Proceedings of SIGGRAPH, pp. 71 a 78.
- [3] Carr, J. C.; Beatson, R. K.; Cherrie, J. B.; Mitchell, T. J.; Fright, W. R.; McCallum, B. C.; Evans, T. R. (2001) - Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions; Proceedings of SIGGRAPH, pp. 67 a 76.
- [4] Coias, V. (2008) - Inspeções e Ensaaios na Reabilitação de Edifícios
- [5] Al-Neshawy, F.; Piironen, J.; Peltola, S.; Puttonen, J. (2009) - The potential of the terrestrial laser scanning for geometrical building facades inspection; Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics), Vol. 42, No 4, pp. 235-245.
- [6] Berenyi, A.; Lovas T.; Barsi, A. (2010) - Terrestrial laser scanning - Civil engineering applications; International Archives of Photogram-

- metry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXX-VIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK..
- [7] Armesto-Gonzalez, J.; Riveiro-Rodriguez, B.; Gonzalez-Aguilera, D.; Rivas-Brea, M.T. (2010) - Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings; *Journal of Archaeological Science* 37, 3037-3047.
- [8] Sun, X.; Huang, J.; Liu, W.; Xu, M. (2012) - Pavement crack characteristic detection based on sparse representation; *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2012:191.
- [9] Shen-En, C. (2012) - Laser Scanning Technology for bridge monitoring; Chapter 5, *Laser Scanner Technology*, Ed. By J. Apolinar Munoz Rodriguez, ISBN 978-953-51-0280-9, March.
- [10] Gonzalez-Jorge, H.; Gonzalez-Aguilera, D.; Rodriguez-Gonzalvez, P.; Arias, P. (2012) - Monitoring biological crusts in civil engineering structures using intensity data from terrestrial laser scanners; *Construction and Building Materials* 31, 119-128.

# Anexos



# Anexo A

## Algoritmos Mathematica

### A.1 Função para detecção de extremos de uma Nuvem de Pontos, (LExterior)

```
LExterior = Function[L, Module[{x, y, z, x1, y1, z1, x2, y2, z2},
  x = L[[All, 1]];
  y = L[[All, 2]];
  z = L[[All, 3]];

  x2 = Max[x]; x1 = Min[x];
  y2 = Max[y]; y1 = Min[y];
  z2 = Max[z]; z1 = Min[z];
  Print[x1, " ", x2, "; ", y1, " ", y2, "; ", z1, " ", z2]]];

LExterior[esfera2]
-0.99746 0.997495; -0.995554 0.994996; -0.989992 1.
```

## A.2 Função para selecção de pontos considerando o referencial XY, (selecxy)

```

selecxy = Function[{L, x1, x2, y1, y2}, Module[{nL, kL, w, j},
  nL = Length[L];
  w = Select[
  L, (x1 <= #[[1]] && #[[1]] <= x2) && (y1 <= #[[2]] && #[[2]] <= y2) &];
  w]];

sup1 = selecxy[sup, -1, .6, -1, .6];
ListSurfacePlot3D[sup1]

```

## A.3 Função para selecção de pontos considerando a vizinhança de um ponto, (selecpoint)

```

selecpoint = Function[{L, x, y, z, r}, Module[{}],
  w = Select[ L, Abs#[[1]] - x] < r && Abs#[[2]] - y] < r && Abs#[[3]]
  - z] < r &];
  w]];

superficie2 = selecpoint[superficie1, -0.03756', -0.33287', -0.94222, 1.7];

```

## A.4 Função para remoção de pontos considerando posicionamento geométrico, (remov)

```

remov = Function[{L, m, r, e}, Module[{nL, W, V, iL, j, k, a, b, c},
  nL = Length[L]; V = Array[1 &, {nL}]; W = {};
  Do[
    If[Mod[iL, 500] == 0, Print["Ponto ", iL], Indeterminate]
    Do[
      If[ V[[j]] == 1 ,
        k = 0;
        While[ k <= m,
          a = Abs[L[[iL, 1]] - L[[j, 1]] ];
          b = Abs[L[[iL, 2]] - L[[j, 2]] ];
          c = Abs[L[[iL, 3]] - L[[j, 3]] ];
          If[
            Max[a, b, c] < r ,
            Which[
              a < e,
                If[ c < e*b , V[[j]] = 0, Indeterminate] ,
              b < e,
                If[ c < e*a , V[[j]] = 0, Indeterminate] ,
              c < e,
                If[ b < e*a , V[[j]] = 0, Indeterminate]
            ];
          , Indeterminate
        ];
      ];
  ];

```

```

      k++ ] , Indeterminate]

      , {j, iL + 1, nL} , {iL, 1, nL}];

Do[
  If[ V[[iL]] == 1 , AppendTo[W, L[[iL, All]] ] , Indeterminate]
  , {iL, 1, nL}];

W
]];

```

## A.5 Função para selecção de pontos através de características RGB, (selecRGB)

```

selecRGB = Function[{L, r1, r2, g1, g2, b1, b2}, Module[{nL, kL, w, j},
  nL = Length[L];
  w = Select[
    L, (r1 <= #[[7]] && #[[7]] <= r2) && (g1 <= #[[8]] &&
      #[[8]] <= g2) && (b1 <= #[[9]] && #[[9]] <= b2) &];
  w
]];

```

## A.6 Função para selecção e remoção de pontos através de características RGB, (selecção RGB1)

```
filtroRGB1 =  
Function[{L, rr, tx, r1, r2, g1, g2, b1, b2},  
Module[{nL, kL, V, W, j, i, k, n, a, b, c},  
nL = Length[L]; V = Array[0 &, {nL}]; W = {};  
  
Do[  
If[(r1 <= L[[j, 7]] && L[[j, 7]] <= r2) && (g1 <= L[[j, 8]] &&  
L[[j, 8]] <= g2) && (b1 <= L[[j, 9]] && L[[j, 9]] <= b2) &,  
V[[j]] = 1, Indeterminate]  
, {j, 1, nL}];  
;  
Do[  
If[V[[j]] == 0,  
k = 0;  
n = 0;  
Do[  
a = Abs[L[[i, 1]] - L[[j, 1]] ];  
b = Abs[L[[i, 2]] - L[[j, 2]] ];  
c = Abs[L[[i, 3]] - L[[j, 3]] ];  
  
If[( Max[a, b, c] < rr ), k++, Indeterminate];  
If[( Max[a, b, c] < rr && V[[i]] == 1), n++, Indeterminate]
```

```

    , {i, 1, nL}]; If[n > tx*k, V[[j]] = 1, Indeterminate],
    Indeterminate]
    , {j, 1, nL}];
W
]];

```

## A.7 Função para determinação da normal do plano da parede, (NormalPlano)

```

NormalPlano = Function[{L, imp},
  Module[{nL, i, j, k, r, rx, VN, VNN, V, W, VP, NVP, A, B, pin },
    nL = Length[L]; V = Array[0 &, {nL, 2}]; VN = Array[0 &, {nL, 3}];
    VP = Array[0 &, {3}]; NVP = Array[0 &, {3}];
    W = Array[0 &, {6}];
    A = Array[0 &, {3}]; B = Array[0 &, {3}];

    Do[
      If[Mod[j, imp] == 0, Print["Escolha nbs ponto ", j]];

      r = 0.;

      Do[
        rx = Norm[L[[i, All]] - L[[j, All]]];

        If[ (rx > r) ,
          V[[j, 1]] = i; r = rx ;
          A = L[[i, All]] - L[[j, All]] ];
      ]
    ]
  ]

```

A.7. FUNÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DA NORMAL DO PLANO DA PAREDE, (NORMALPL)

```

        , {i, nL}];

r = 0.;
Do[
    B = (L[[i, A11]] - L[[j, A11]]); rx = Norm[B];
    pin = A.B;

    If[ (rx > r) && (V[[j, 1]] != i) && ( pin < .2) ,
        V[[j, 2]] = i; r = rx ];

    , {i, nL}];

, {j, nL}];

r = 0;
Do[
    A[[A11]] = L[[V[[j, 1]], A11]] - L[[j, A11]];
    B[[A11]] = L[[V[[j, 2]], A11]] - L[[j, A11]];
    VN[[j, A11]] = Cross[A, B];
    rx = Norm[ VN[[j, A11]] ];
    If[ rx > r, r = rx; k = j ];

    , {j, nL}];

NVP = Normalize[ VN[[k, A11]] ];

```

```
W[[1 ;; 3]] = NVP ; W[[4 ;; 6]] = L[[k, 1 ;; 3]];
```

```
W
]];
```

## A.8 Função para determinação do plano da parede, (PlanoParede)

```
PlanoParede = Function[{L, V}, Module[{X, Y, Z, x1, x2, y1, y2, z1, z2, W},
  W = Abs[V[[1 ;; 3]]];
  X = L[[A11, 1]]; x2 = Max[X]; x1 = Min[X];
  Y = L[[A11, 2]]; y2 = Max[Y]; y1 = Min[Y];
  Z = L[[A11, 3]]; z2 = Max[Z]; z1 = Min[Z];

  Which[W[[1]] == Max[W],

  ParametricPlot3D[
    { V[[4]] - (V[[2]]/V[[1]])*(y - V[[5]])
      - (V[[3]]/V[[1]])*(z - V[[6]], y, z},
    {y, y1, y2}, {z, z1, z2},

  BoxRatios -> {x2 - x1, y2 - y1, z2 - z1},
  AxesLabel -> {"x", "y", "z"}],
  W[[2]] == Max[W],
```

```

ParametricPlot3D[
{x, V[[5]] - (V[[1]]/V[[2]])*(x - V[[4]])
- (V[[3]]/V[[2]])*(z - V[[6]]), z},
{x, x1, x2}, {z, z1, z2},

BoxRatios -> {x2 - x1, y2 - y1, z2 - z1},
AxesLabel -> {"x", "y", "z"}],
W[[3]] == Max[W],

ParametricPlot3D[
{ x, y, V[[6]] - (V[[1]]/V[[3]])*(x - V[[4]])
- (V[[2]]/V[[3]])*(y - V[[5]])},
{x, x1, x2}, {y, y1, y2},

BoxRatios -> {x2 - x1, y2 - y1, z2 - z1},
AxesLabel -> {"x", "y", "z"} ]

]];

```

## A.9 Função para e, (planoREMOVpts)

```

planoREMOVpts =
Function[{NP, dist}, Module[{a, b, c, x0, y0, z0, nL, d, W, valor},
nL = Length[NP]; W = {};

a = normalplano[[1]];
b = normalplano[[2]];

```

```
c = normalplano[[3]];

x0 = normalplano[[4]];
y0 = normalplano[[5]];
z0 = normalplano[[6]];

d = -(a*x0 + b*y0 + c*z0);

valor = dist * Sqrt[a^2 + b^2 + c^2]*(-1);

Do[
  If[ (a*NP[[i, 1]] + b*NP[[i, 2]] + c*NP[[i, 3]] + d ) > valor,
    AppendTo[W, NP[[i, All]] ], {i, nL}];
W
```