

# **Aplicação da digitalização 3D na preservação de patrimônio histórico**

**Antonio Costa**

Trabalho realizado sob a orientação de

**Professor Doutor João da Rocha e Silva**

**Professor Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro**

**Bragança**

**2023**

# **Aplicação da digitalização 3D na preservação de patrimônio histórico**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial no âmbito da Dupla Diplomação com a Universidade Evangélica de Goiás.

Antonio Costa

2023

---

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me guiar pelos caminhos necessários. Agradeço também a minha família pelo apoio ao meu crescimento profissional. Também um agradecimento especial para os orientadores deste trabalho Prof. Dr. João Rocha e Prof. Dr. João Ribeiro pela disponibilidade e disposição de apoiar este trabalho. Ao Prof. Mestre Jorge Santos, um forte agradecimento, por todo o suporte dado durante a parte prática do trabalho.

---

---

---

---

## Resumo

Ao longo dos anos, é observado que estruturas históricas tendem a se degradar e correr o risco de desaparecerem. Com isso, é identificada a necessidade de se preservar bens e lugares com carga histórica, levando em consideração a existência de métodos para isso. Este trabalho de mestrado tem como objetivo adquirir dados geométricos em *point cloud* de uma sala de moagem numa fábrica de grãos, bem como a visualização em vídeo do ambiente. O *scanner* FARO S150 foi utilizado para capturar os detalhes do ambiente, e os *softwares* FARO Scene e ReCap Pro foram empregados no processamento e refinamento dos dados obtidos. A captura dos dados geométricos da sala foi feita em várias visitas ao próprio local. A validação dos resultados foi feita por meio da comparação dos dados obtidos em nuvem de pontos com o *scanning* em fotos da sala, capturadas pelo próprio sensor, bem como a verificação da acuidade do processo pelo relatório gerado. Os resultados obtidos demonstram a eficácia da metodologia proposta e a precisão geométrica do equipamento utilizado. Por fim, são mostradas propostas de continuações do estudo, que podem ser desenvolvidas com a nuvem de pontos obtida.

**Palavras-chave:** Scanner 3D, FARO, Patrimônio histórico, Preservação, Point Cloud

---

---

---

---

# Abstract

Over the years, it has been observed that historic structures tend to degrade and are in danger of disappearing. With this, the need to preserve historically charged assets and places is identified, taking into consideration the existence of methods for this. This master's work aims to acquire geometric point cloud data of a grinding room in a grain mill, as well as video visualization of the environment. The FARO S150 scanner was used to capture the details of the environment, and FARO Scene and ReCap Pro software were employed in processing and refining the obtained data. The capture of the geometric data of the room was done in several visits to the site itself. The validation of the results was done by comparing the data obtained in the point cloud with the scanning in photos of the room, captured by the sensor itself, as well as verifying the accuracy of the process by the generated report. The results obtained demonstrate the effectiveness of the proposed methodology and the geometric accuracy of the equipment used. Finally, proposals are shown for continuations of the study, which can be developed with the obtained point cloud.

**Keywords:** 3D Scanner, FARO, Heritage, Preservation, Point Cloud

---

---

---

---

# Conteúdo

Agradecimentos .....	3
Resumo. ....	5
Abstract .....	7
Conteúdo .....	9
Lista de Tabelas .....	12
Lista de Figura .....	14
<b>1. Introdução .....</b>	<b>16</b>
1.1    Enquadramento .....	17
1.2    Objetivos.....	17
1.2.1    Objetivo Geral.....	17
1.2.2    Objetivos Específicos.....	18
1.3    Estrutura da dissertação .....	18
<b>2. Estado da Arte.....</b>	<b>20</b>
2.1    Digitalização 3D .....	20
2.2    Tecnologias de Digitalização 3D.....	21
2.3    Sensores Óticos .....	22
2.3.1    História dos Sensores Óticos .....	23
2.3.2    Sensores Óticos Ativos .....	23
2.3.3    Sensores Óticos Passivos .....	24
2.3.4    Captação de Imagem.....	25
2.4    Nuvem de Pontos.....	34

---

---

2.5	Aplicação do Sensoriamento Remoto .....	36
<b>3.</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>38</b>
3.1	Softwares Utilizados.....	38
3.2	Coleta de Dados.....	40
3.3	Equipamentos Utilizados.....	41
3.4	Tratamento de Dados.....	42
3.5	Visualização do Ambiente 3D.....	45
3.6	Discussão de Método Utilizado.....	46
<b>4.</b>	<b>Resultados e Discussões .....</b>	<b>48</b>
4.1	Leitura e Processamento dos Dados .....	48
4.1.1	Validação dos Dados Coletados.....	49
4.1.2	Relatório de Registro .....	50
4.1.3	Limpeza da Nuvem de Pontos .....	51
4.2	Demonstração em Vídeo .....	52
4.3	Desempenho do Método Utilizado.....	53
<b>5.</b>	<b>Conclusão e Trabalhos Futuros.....</b>	<b>56</b>
5.1	Trabalhos futuros.....	57
	<b>Referências .....</b>	<b>58</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>63</b>

---

---

---

---

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Exemplos de tecnologias de Sensoriamento Remoto .....	21
Tabela 2 - Relação de diferentes tipos de informações comumente necessárias em estudos de sensoriamento remoto, seus respectivos tipos de sensores aplicados e alguns exemplos de equipamentos .....	22
Tabela 3 - Comparação de características de alguns espectrorradiômetros .....	29
Tabela 4 - Comparação de sistemas LiDAR montados em plataformas diferentes .....	36
Tabela 5 - Especificações de performance do scanner FARO S150.....	42
Tabela 6 - Estatísticas de cada ponto de varredura feito no Scene .....	51

---

---

---

# Lista de Figura

Figura 1 - Exemplo de um sensor físico de um sensor ótico ativo (AOS).....	24
Figura 2 – Funcionamento de sensores óticos passivos e ativos.....	25
Figura 3 - Ilustração esquemática de um satélite .....	26
Figura 4 - Ângulo de inclinação de órbita de satélites .....	27
Figura 5 - Aplicações de RPAs com ênfase no setor civil .....	28
Figura 6 - Resolução espectral dos sensores imageadores .....	30
Figura 7 - Resoluções espaciais de um sensor imageador .....	31
Figura 8 - Exibição esquematizada do sistema de cores RGB, princípio da espectroscopia, imagens multiespectrais e hiperespectrais .....	32
Figura 9 - Demonstração de características de bandas RGB, NIR, e RDG-RedEdge em uma câmara multiespectral .....	33
Figura 10 - Câmara multiespectral Tetracam, que possui bandas red, green e NIR. ....	33
Figura 11 - Comparação de quantidade e largura de bandas entre exemplo multiespectral (A) e hiperespectral (B) .....	34
Figura 12 - Demonstração do software FARO Scene .....	39
Figura 13 - Demonstração do software Recap Pro.....	39
Figura 14 - Disposição das leituras feitas na sala demonstradas no Scene .....	40
Figura 15 - Painel de parâmetros do scanner Faro Focus X130 (mesmas configurações e velocidades que o FARO S150).....	41
Figura 16 - Scanner FARO S150 .....	41
Figura 17 - Resumo de tela inicial do projeto no Scene.....	43
Figura 18 - Varreduras processadas .....	43
Figura 19 - Nuvem de pontos do ambiente virtual gerado no Scene .....	43
Figura 20 - Ferramenta clipping box de corte no Scene .....	44
Figura 21 - Ambiente virtual com nuvem de pontos limpa para visualização do sistema no software ReCap.....	45
Figura 22 - Visualização 3D da sala capturada por fotos pelo scanner e demonstrada no software ReCap.....	45
Figura 23 - Esferas de simetria no ReCap.....	46
Figura 24 - Região de vidros das máquinas na sala (regiões onde ocorre a reflexão do laser e geração	

---

---

de ruído) .....	48
Figura 25 - Ruídos gerados na nuvem de pontos por superfícies reflexivas.....	49
Figura 26 - Região de falta de dados na nuvem de pontos.....	50
Figura 27 - Erro máximo, média de erro e sobreposição mínima dos pontos lidos .....	50
Figura 28 - Perspectivas de exibição geradas no Scene .....	52
Figura 29 - Ferramenta de medição de distância disponível no ReCap.....	53
Figura 30 – Distância de alcance mínimo do scanner FARO S150 .....	54
Figura 31 - Captura sem cor não completa do scanner .....	54

---

# Capítulo 1

## 1. Introdução

Imaginar que a memória humana não seja suficiente para guardar dados complexos não é algo difícil. A mente humana ainda possui grande capacidade, de forma geral, de recordar momentos em forma de imagem, porém, quando se trata de coisas mais complexas, não é suficiente.

Nos últimos anos, foi possível presenciar o aumento da procura por informações precisas e claras de se entender nos setores de engenharia. Mesmo que ainda exista um acomodamento de grande parte da indústria com relação às inovações e avanços de tecnologia. Soluções para monitoramentos de projeto, avaliação de ciclo de vida e coleta e análise de dados de ambientes, em geral, tem sido encontradas através de aparelhos *scanner* (Dinis, Sanhudo, Martins & Ramos, 2020), bem como tem ajudado na fabricação de madeira bruta com sistemas de rastreamento de movimento (Larsen & Aagaard, 2019). A digitalização a laser tem se mostrado cada vez mais favorável na contribuição para a solução de problemas de informação e otimização de espaços em diversos setores profissionais. Essa tecnologia tem manifestado características como medição altamente precisa e não invasiva e uma grande quantidade de informações providenciadas que contribuem, por exemplo, para aplicações forenses em ambientes (Wang, et al., 2019).

Em geral, a importância da tecnologia de digitalização a laser tem aumentado cada vez mais nos últimos anos nas indústrias de arquitetura, engenharia e construção. Como exemplo de uso dessa tecnologia em ambientes, é possível utilizar em situações onde se é necessário monitoramento de construção e avaliação de dano em prédios com o auxílio da plataforma BIM (*Building Information Modeling*) (Sanhudo, et al., 2020).

Nesse sentido, a proposta deste trabalho é realizar a digitalização e demonstração do ambiente virtual 3D de uma sala de fábrica de moagem de grãos onde se possa preservar, ao longo dos anos, o patrimônio histórico antigo do lugar com a ajuda do sensoriamento remoto.

## 1.1 Enquadramento

É notória a necessidade de um meio de armazenar e demonstrar, de forma clara e fiável, dados complexos que se possam tornar de grande valor para gerar novos conhecimentos, e até momentos valiosos para as pessoas. De facto, o desenvolvimento de um registo em base de dados da geometria de um património histórico é, sem dúvida, algo a ser levado em consideração quando o assunto é preservação histórica. Esse tipo de demonstração de dados complexos deve acompanhar o que a tecnologia atual tem a oferecer, possibilitando, até mesmo, representações geométricas de objetos em 3D, podendo, assim, contribuir para uma experiência mais completa de visualização da forma dos objetos e ambientes, até mesmo em realidade virtual.

Este trabalho foi motivado pela necessidade de preservar bens e lugares históricos que possam sofrer degradação e correr o risco de desaparecerem ao longo dos próximos anos. Foi identificado que, pela digitalização em 3D, seria possível guardar e representar toda a geometria de lugares assim, até mesmo em realidade virtual.

Houve motivação em desenvolver esse tema também pela aquisição do equipamento de *scanning* FARO S150 por parte do Instituto Politécnico de Bragança. Um equipamento extremamente técnico e competente que foi obtido com interesse em agregar em trabalhos dessa forma.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem o objetivo de adquirir medidas e dados geométricos, integrados em *point cloud*, de uma sala localizada em uma fábrica de moagem de grãos, através da digitalização do ambiente e das máquinas presentes com o uso de um sensor LiDAR FARO S150. Como objetivo secundário o trabalho pretende desenvolver uma demonstração do ambiente em vídeo, para que se possa ter mais contato com a nuvem de pontos gerada e se visualize os detalhes e as particularidades de se coletar esse tipo de dado com esse método. O principal intuito do trabalho é a preservação do património histórico ao longo do tempo.

## 1.2.2 Objetivos Específicos

Para a realização do objetivo geral, existe a necessidade dos seguintes objetivos específicos:

- Leitura e aquisição de dados 3D da sala da fábrica de moagem de grãos.
- Obtenção de licenças e instalação do software de tratamento dos dados geométricos adquiridos.
- Registo e processamento em software da nuvem de pontos gerada.
- Análise e limpeza da nuvem de pontos, no ReCap, para clareza de demonstração do ambiente.
- Validação dos dados adquiridos pelo *scanner* através do relatório gerado pelo *software* e de comparação com fotos tiradas pelo sensor.
- Geração do vídeo demonstrativo da nuvem de pontos captada e registada no *software* FARO SCENE.
- Geração do vídeo de visualização do *scanning* feito por fotos pelo sensor, através do *software* ReCap PRO.

## 1.3 Estrutura da dissertação

O trabalho é desenvolvido em cinco capítulos. No primeiro, é mostrada a introdução do trabalho, expondo toda a contextualização da importância da digitalização a laser no meio científico e ideia primária sobre o objetivo do trabalho.

No capítulo 2 é descrito todo o referencial teórico a respeito da diferenciação de função da digitalização 3D e as tecnologias existentes que envolvem essa modalidade. Também é abordada uma maior contextualização histórica e caracterização dos sensores pelo tipo de uso, além de uma breve olhada sobre interpretação de dados de sensores remotos junto a sua diferenciação por plataformas e

resoluções e a explicação dos tipos de câmaras que existem, realçando a vasta gama de opções que se tem nesse meio de captação de imagens. Por fim, é tratada discussão sobre nuvem de pontos e toda especificidade e relevância sobre este importante tipo de dado geográfico, além da exemplificação de aplicação da prática do sensoriamento remoto no mercado, abordando o valor que esta modalidade de aquisição de dados geométricos agrega em diferentes áreas existentes.

No capítulo 3 é descrito todo o processo metodológico necessário para a realização do trabalho. Desde a obtenção de dados e todos os equipamentos usados até ao tratamento pós-aquisição dos dados e os softwares usados para refinamento.

Os resultados obtidos são expostos no capítulo 4. Nesta parte são referidos toda a caracterização dos dados coletados, além do detalhamento de precisão da coleta de acordo com o equipamento utilizado, que é gerado no relatório do próprio equipamento.

Por fim, no capítulo 5 são discutidos pensamentos conclusivos a respeito dos resultados que este trabalho gerou, além de sugestões e propostas para trabalhos futuros, com base em práticas não concluídas no presente trabalho, por motivos de tempo e disponibilidade de hardware apropriado para tratar a base de dados em seu tamanho original de coleta.

## Capítulo 2

### 2. Estado da Arte

#### 2.1 Digitalização 3D

As aplicações de realidade virtual podem ser utilizadas para criar espaços virtuais tridimensionais, a partir de estruturas existentes, bem como utilizar o espaço de realidade virtual em simulações informáticas de várias atividades necessárias. Tais atividades podem incluir simulações de fluxo de trabalho ou de linha de montagem (Bangsow, 2010).

O objetivo de um *scanner* 3D é, geralmente, criar uma nuvem de pontos de uma amostra geométrica na superfície de um objeto. Esses pontos podem então ser usados para inferir a forma do objeto (um processo chamado reconstrução). Se as informações de cor forem coletadas em cada ponto, a cor da superfície do objeto também poderá ser determinada (Edl, Mizerák & Trojan, 2018).

É comum ser confundido o termo “digitalização a laser” na engenharia pois existem dois significados para esta demarcação. Existe a deflexão de feixes de laser que é, frequentemente, usada, por exemplo, em máquinas de estereolitografia, sistemas laser oftalmológicos, impressoras a laser e leitores de código de barra. O outro âmbito para digitalização a laser é realizar a direção controlada dos feixes laser onde se executa uma medição da distância em cada direção que se aponta os feixes (Edl, Mizerák & Trojan, 2018).

## 2.2 Tecnologias de Digitalização 3D

Como já é sabido as tecnologias de Sensoriamento Remoto tem sido cada vez mais importante em diversas áreas da ciência conhecidas como: geologia, ecologia e geografia, contribuindo bastante também para inteligência militar (Heavy.ai, 2015). Basicamente, a prática do Sensoriamento Remoto utiliza as relações de energia eletromagnética unindo objetos elétricos e o magnetismo (Amorim & Silva, 2012). Consistindo na aquisição de dados de superfície de objetos sem a necessidade de contato com os mesmos, esse tipo de tecnologia pode ser tanto ativo quanto passiva (Kogut, 2020). Na Tabela 1 são mostrados alguns exemplos de tecnologias de Sensoriamento Remoto.

Tabela 1 - Exemplos de tecnologias de Sensoriamento Remoto

Tipo de tecnologia	Funcionamento	Aplicações
Radar	Geralmente, dispositivos que usam essa tecnologia utilizam ondas de rádio para medição de distâncias e detecção de objetos, diferentemente da luz.	Esse tipo de tecnologia é amplamente utilizado, em radares de tráfego, navegação aérea e detecção de obstáculos em veículos autônomos.
LiDAR	Determina a distância com a luz. O sensoriamento remoto com lidar envolve a transmissão de pulsos de luz e a verificação da quantidade recuperada. É possível saber a localização e a distância do alvo multiplicando o tempo pela velocidade da luz.	Contribui para as áreas de Topografia e mapeamento, agricultura, mineração, gestão ambiental etc. Possibilita obter modelos digitais de terreno (MDTs), modelos digitais de superfície (MDSs), linhas de contorno, modelos digitais de elevação (MDEs), fazer vídeos de recursos e outros trabalhos que exigem muita precisão.
ToF (Time of Flight)	Mede a distância entre o sensor e um objeto calculando o tempo que a luz leva para viajar até o objeto e retornar ao sensor.	Tecnologia empregada em câmaras 3D para rastreamento de movimento e em sistemas de controle de acesso baseados em reconhecimento facial.
Sonar	O Sonar ( <i>Sound Navigation and Ranging</i> ) faz uso de ondas sonoras, em vez de luz, para medir distâncias e detectar objetos.	Comumente utilizado em aplicações subaquáticas, como mapeamento do fundo do mar, detecção de cardumes de peixes e localização de objetos submersos.
Stereo Vision	A estereovisão utiliza duas câmaras posicionadas em diferentes ângulos para criar uma imagem em 3D e medir a distância entre o objeto e o sensor.	Amplamente utilizado em aplicações robóticas, como navegação autônoma e inspeção de qualidade.

De modo geral, a necessidade de possuir o equipamento correto para cada tipo de serviço que é necessário ser feito merece atenção. Conhecer com o que se está trabalhando e qual o tipo de tecnologia e equipamento correspondente a esta tecnologia que terá função para a tarefa é de extrema

importância em uma aplicação de obtenção de dados de imagem. A Tabela 2 mostra exemplos de tipos de sensores e sistemas existentes no mercado para diferentes tipos de tarefas no meio do sensoriamento remoto.

Tabela 2 - Relação de diferentes tipos de informações comumente necessárias em estudos de sensoriamento remoto, seus respectivos tipos de sensores aplicados e alguns exemplos de equipamentos

Tipo de informação necessária	Tipo de Sensor	Exemplo de Sistemas
Alta resolução espacial e amplo recobrimento do terreno	Sensores imageadores e câmeras	Large Format Câmera, radar imageador do satélite JERS-1
Alta resolução espectral sobre áreas limitadas	Espectrômetro e espectro radiômetros	Shuttle Imaging Spectrometer
Resolução espectral limitada com alta resolução espacial	Mapeadores multiespectrais	TM/Landsat, HRV/Spot, RADARSAT
Alta resolução espectral e alta resolução espacial	Espectrômetros imageadores	AVIRIS, MODIS, ASTER
Alta precisão de medidas de intensidade ao longo de linhas ou faixas	Radiômetros e Difusômetros	ERS-1 difusômetro
Alta precisão de medidas de intensidade com resolução espacial moderada	Radiômetros imageadores	SMMR/AVHRR
Alta precisão de localização e perfil	Altímetros e sondas	Altímetro TOPEX/Poseidon
Mapeamento Tridimensional do Terreno	Altímetros	Shuttle High Resolution Altimeter

Fonte: (Novo & Ponzoni, *Introdução ao sensoriamento remoto*, 2001)

## 2.3 Sensores Óticos

O sensoriamento remoto é o oposto do sensoriamento proximal, que mede propriedades espectrais obtidas por dispositivos portáteis ou de contato (Fahey, et al., 2020). Os sensores podem ser sensores pontuais (como espectrorradiômetros ou sensores térmicos) ou sensores de imagem que fornecem informações sobre a distribuição espacial da propriedade detetada. Em comparação com os sensores sem imagem, os sensores de imagem são mais amplamente utilizados porque permitem o delineamento preciso de áreas de medição em desenhos e a possível eliminação de áreas de fundo em imagens, embora haja uma requisição significativa para um software sofisticado de análise de imagens para conseguir isso (Deery, Jimenez-Berni, Jones, Sirault, & Furbank, 2014).

### 2.3.1 História dos Sensores Óticos

O desenvolvimento de sensores de imagem 3D foi realizado, principalmente, em laboratórios de investigação durante as décadas de 70 e 80. O seu desenvolvimento possuía o objetivo de gerar novas tecnologias que utilizam feixes de luz em vez de sondas de contacto, com vista a aplicações na indústria da construção de máquinas, tais como aplicações de medição e controlo de qualidade (Sansoni, Trebeschi & Docchio, 2009). Desde então, tem sido aplicada uma constante melhoria do hardware a estes produtos considerando estrutura mecânica, componentes, tamanho etc. Porém, a manipulação e armazenamento dos dados adquiridos por esses sensores era um problema que influenciava na necessidade de criação de programas que importassem e tratassem os arquivos de dados e, também, exportassem em formatos padronizados (Sansoni, Trebeschi & Docchio, 2009). De modo geral, *scanners* 3D participaram de uma grande evolução durante os anos finais do século 20. Constantemente o equipamento foi passando por melhorias em digitalização de objetos mais detalhados, capacidade de captura de cor, capacidade de uso de mais graus de liberdade, introdução de digitalizadores baixo custo na indústria dos *scanners* e digitalização de objetos com cor (Edl, Mizerák & Trojan, 2018). Algumas das principais mudanças recentes feitas em sensores óticos incluem a miniaturização dos mesmos, tornando-os mais acessíveis e portáteis (Kadidal, Kerstens & Ghent, 2022). Além disso, sensores óticos estão sendo integrados em plataformas de *drones* e satélites, permitindo a captura de imagens de alta resolução e em larga escala (Marghany, 2022). Com todos os avanços essa tecnologia conseguiu, com o passar dos anos, agir cooperativamente com inteligência artificial no intuito de melhorar a análise dos dados capturados e possibilitar um desenvolvimento de novas aplicações, como deteção automática de objetos e análise de imagens de satélite para prever mudanças ambientais (Huang, Li, Li, Li & Zhang, 2021).

Com a crescente procura por informações precisas e em tempo real, a tecnologia de sensores óticos continua a evoluir e expandir suas aplicações. Espera-se que novos avanços na tecnologia de sensores óticos permitam a obtenção de dados mais precisos, em maior escala e com menor custo, abrindo portas para novas descobertas e soluções em diversas áreas.

### 2.3.2 Sensores Óticos Ativos

Os sensores óticos são, frequentemente, distinguidos entre ativos e passivos com base em se o dispositivo emite energia ou não (Fahey, et al., 2020). Sensores óticos ativos (AOS) (Figura 1) são instrumentos especializados que iluminam um alvo com radiação e medem o que está espalhado de volta ao fotodetector incorporado no sensor. A principal vantagem é que esse tipo de sensor pode

realizar suas medidas em qualquer condição de iluminação no ambiente em que se encontra (Holland, Lamb & Schepers, 2012). Estes equipamentos captam diretamente a geometria 3D de uma superfície e geram uma representação digital 3D quantitativa, geralmente, por nuvem de pontos, num campo de visão específico com incertezas de medição definidas (Remondino, 2011). Esse tipo de equipamento tem sido muito útil para atividades de monitoramento de necessidades nutricionais de plantações (Inman, Khosla & Mayfield, 2005) e, por exemplo, para medição de biomassa em pastagens (Trotter, Lamb, Donald & Schneider, 2010).

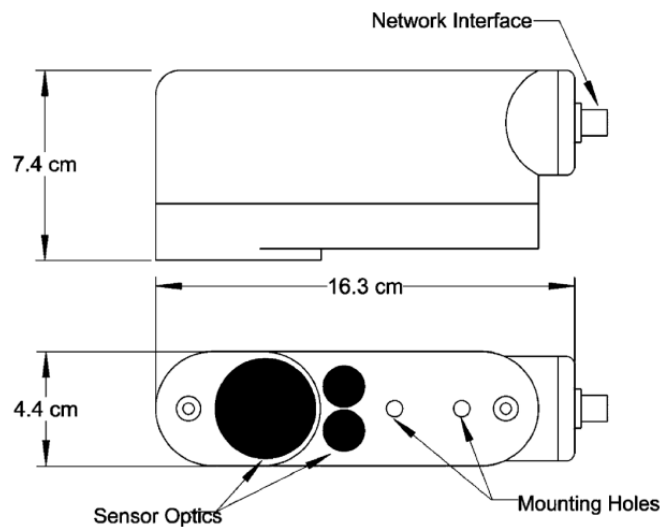


Figura 1 - Exemplo de um sensor físico de um sensor ótico ativo (AOS)

Fonte: (Holland, Lamb, & Schepers, 2012)

### 2.3.3 Sensores Óticos Passivos

Sensores óticos passivos capturam imagens da luz refletida ou emitida pelos objetos em estudo, sem emitir nenhum sinal próprio. Com base no funcionamento é possível perceber a principal diferença entre sensores ativos e passivos (Figura 2). A luz capturada é usada para criar imagens que podem ser usadas para monitorar mudanças ambientais e detetar eventos específicos. Este tipo de sensor opera em diferentes faixas espectrais, como a luz visível, infravermelho próximo e médio, e micro-ondas e os dados adquiridos podem ser pós processados e extraídas informações com técnicas como filtragem de ruído e a correção radiométrica (Kadidal, Kerstens & Ghent, 2022).

Há relatos de uso de sensores óticos passivos na detecção de estradas através da análise de imagens de satélite e, também, na captura de informações sobre a cobertura do solo, além da capacidade destes equipamentos em serem usados em conjunto com sensores ativos, como o LiDAR, para uma melhor precisão na identificação de características da superfície terrestre (Jia, et al., 2021).

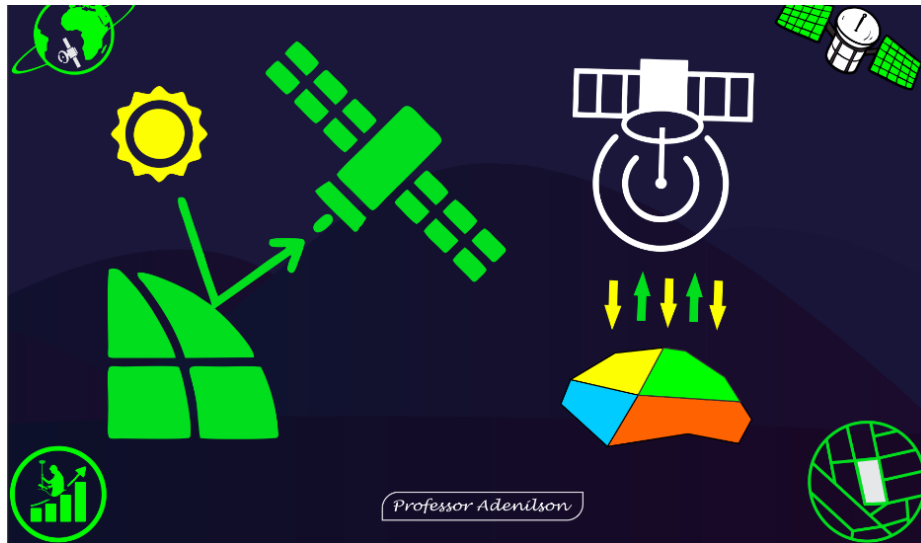


Figura 2 – Funcionamento de sensores óticos passivos e ativos

Fonte: (Giovanini, 2021)

### 2.3.4 Captação de Imagem

Até há pouco tempo, o que era obtido como resultado dos sensores remotos, eram adquiridos de forma analógica, ao contrário dos tempos atuais onde mecanismos digitais trouxeram avanço a isso. É possível classificar os sensores através do tipo de transformação que a energia captada sofre, podendo ser imageadores ou não-imageadores (Novo, Sensoriamento remoto: princípios e aplicações (4ª ed.), 2010).

Sensores imageadores tem capacidade de obter imagens em forma de resultado da área que foi captada. Já os não-imageadores não conseguem obter imagens, mas sim um conjunto de dados em forma numérica ou assinaturas espectrais (Quartaroli, Vicente & Araujo, 2014). Um exemplo para sensores imageadores e não-imageadores seriam as câmaras digitais e os espectrorradiômetros, respetivamente. É importante destacar que, embora as imagens digitais contenham informações importantes, seu uso pode resultar na perda de informações valiosas e em conclusões equivocadas. Por isso, é fundamental contar com o auxílio de programas computacionais para extrair informações, uma vez que eles ampliam as possibilidades de análise (Barbosa, Consalter, Pauletti & Motta, 2016).

### 2.3.4.1 Plataformas de Sensores de Imagens

Cada tipo de sensor possui conjuntos de suporte que auxiliam no posicionamento do equipamento para que haja uma captura mais adequada para a aplicação que se deseja. Essas plataformas podem ser classificadas de acordo com a altitude e posicionamento que se emprega ao sensor. Podem ser satélites (nível de órbita), ARP (nível subaéreo), espectrorradiômetro (nível de campo), sensor de índice de vegetação (nível proximal) e clorofilômetro (nível de contato) (Vareiro, 2022).

Os satélites são sensores que se localizam em órbita do planeta, captando sinais de imagem para análise e estudos da perspectiva de cima. Podem ser usados para tanto para previsões meteorológicas e de furacões quanto para áreas como: astronomia, comunicação global, navegação e determinação de posição (Lubojemski, 2019). A Figura 3 apresenta um exemplo ilustrativo do básico de um sistema de satélite. Este equipamento pode variar muito de tamanho, podendo estar em configurações de comprimento de até 48 metros como o satélite de comunicação Boeing 702 ou também ter corpos menores como o satélite SNAP “nano” construído pela empresa *Surrey Satellite Technology* que possui apenas 0.33 metros de comprimento (Wright, Grego, & Gronlund, 2005). A Figura 4 demonstra a órbita de um satélite junto a sua angulação em relação ao planeta que ele orbita.

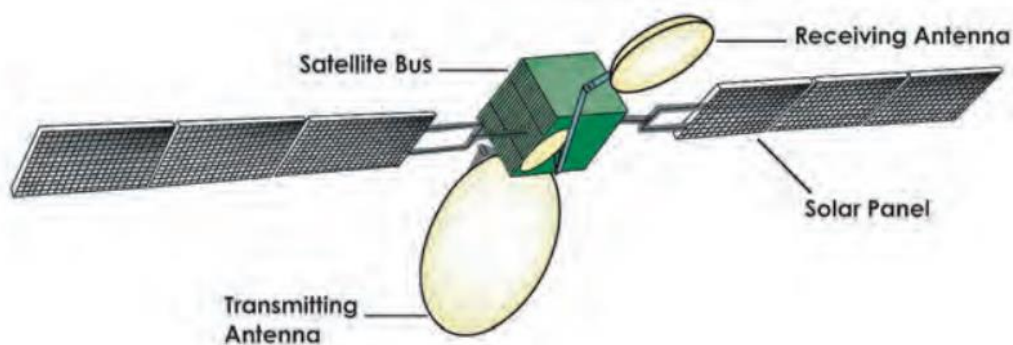


Figura 3 - Ilustração esquemática de um satélite

Fonte: (Wright, Grego, & Gronlund, 2005)

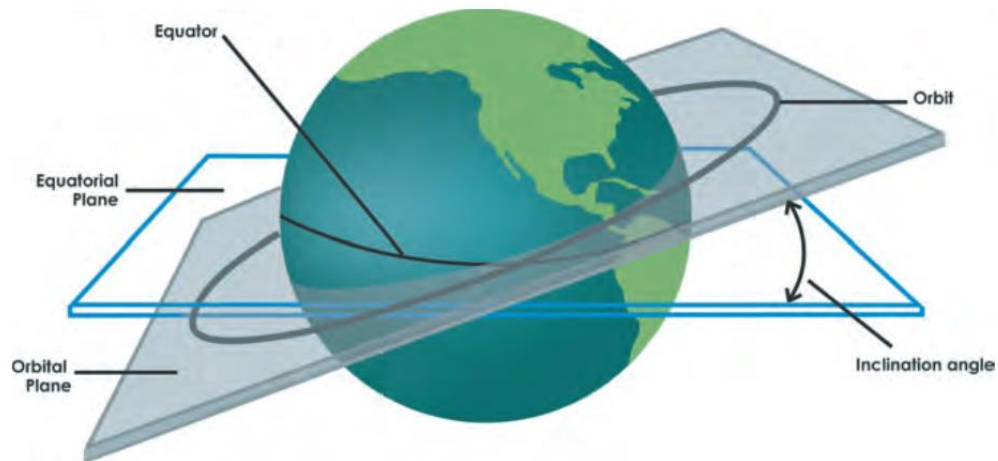


Figura 4 - Ângulo de inclinação de órbita de satélites

Fonte: (Wright, Grego, & Gronlund, 2005)

As Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) são equipamentos não tripulados que são comandados remotamente a partir de uma estação de pilotagem. Se trata de uma tecnologia que tem proporcionado desenvolvimento de algumas áreas que estavam necessitando de um novo recurso tecnológico. Grande parte dos sensores existentes no mercado são versões mais baratas e em miniatura de tecnologias mais caras já existentes, como câmaras multiespectrais, LiDAR entre outros (Cândido, et al., 2021). O principal intuito das RPA's é a recolha e processamento de dados, gerar relatório de informação, planejamento de voos etc. Existem softwares que servem como estação de controle terrestre para gerenciamento do equipamento, como o *QGroundControl* que é um software *open-source*. Graças às características da tecnologia, RPAs conseguem desenvolver melhores resoluções e flexibilidade sobre imagens de satélites. Algumas áreas de aplicações estão presentes para o uso desse equipamento, tais como, a irrigação, a fertilização, a análise de solo, a segurança de colheitas, entre outros (Martos, Ahmad, Cartujo & Ordoñez, 2021). A Figura 5 mostra alguns outros exemplos de aplicabilidade das RPAs.

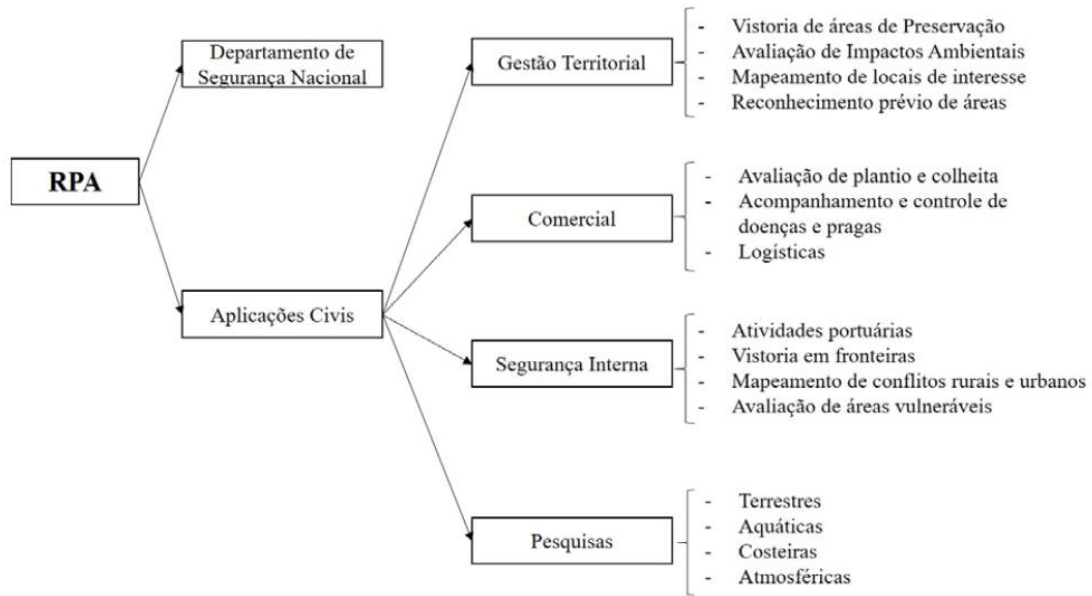


Figura 5 - Aplicações de RPAs com ênfase no setor civil

Fonte: (Cândido, et al., 2021)

Um espectrorradiômetro, também conhecido como sensor remoto hiper-espectral, funciona, normalmente, cobrindo a refletância de espectros visíveis, infravermelhos próximos e infravermelhos de ondas curtas. É um tipo de plataforma para sensores que é usado, por exemplo, para estimar nutrientes e propriedades bioquímicas em geral em espécies de plantas (Amirruddin, Muharam, Tan & Ismail, 2022). Espectrorradiômetros podem oferecer uma amostragem com alta resolução espectral e espacial (Gautam, Lucieer, Watson & McCoull, 2019). Alguns exemplos desse tipo de plataforma de sensoriamento de imagem são: *Ocean Optics HR4000 narrow range* (alcance espectral de 670–857 nm), *Ocean Optics QE Pro* (alcance espectral de 645–810 nm), entre outros (Julitta, et al., 2016). A Tabela 3 expõe outros exemplos de espectrorradiômetros e os compara com respeito a algumas de suas características como: alcance espectral, resolução espectral (FWHM), intervalo de amostragem espectral (SSI), relação sinal/ruído (SNR) e profundidade percentual das duas faixas telúricas de absorção de oxigênio.

Tabela 3 - Comparação de características de alguns espectrorradiômetros

Spectroradiometer	Spectral Range [nm]	FWHM [nm]	SSI [nm]	SNR [-]	O <sub>2</sub> -B Depth [%]	O <sub>2</sub> -A Depth [%]
<i>HRNR</i>	670–857	0.2	0.05	250	42	81
<i>QE</i>	645–810	0.5	0.17	1080	35	80
<i>HRFR</i>	197–1115	1	0.3	590	27	77
<i>ASD</i>	350–2500	5.5	1	1780	12	49

Fonte: (Julitta, et al., 2016)

Sensores a níveis proximais de campo são muito utilizados em avaliação de atributos vegetativos pois podem ser aplicados ali mesmo no local do plantio. Alguns sensores que integram esse tipo de plataforma de sensoriamento são: GreenSeeker – Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, CA, EUA e o Crop Circle – Holland Scientific, Lincoln, NE, EUA (Costa, Oldoni, Silva & Bassoi, 2019).

Os Clorofilômetros fazem parte de uma plataforma de sensoriamento onde, por exemplo, é possível fazer uma avaliação instantânea, rápida e não destrutiva do teor de clorofila de uma cultura de plantio e do estado de nitrogênio. Essas medições podem permitir que quem for tomar as decisões sobre o plantio refine ainda mais as recomendações de nitrogênio para diferentes condições de solo e clima (Melash, Bytyqi, Nyandi, Vad & Ábrahám, 2023).

### 2.3.4.2 Resoluções de Sensores de Imagem

Referenciar sensores de imagem sem falar sobre sua capacidade de obter detalhamento em medidas das capturas feitas é quase impossível. Cada sensor existente possui sua resolução, que é a capacidade de diferenciar objetos próximos espacialmente ou distinguir, também, de respostas espectrais idênticas (Vareiro, 2022). Existem diferentes tipos de resoluções: radiométrica, temporal, espectral e espacial. A resolução radiométrica se caracteriza como uma capacidade do sensor em encontrar variações na intensidade da energia capturada através de níveis de cinza dissemelhantes. Está ligada ao número de divisões de profundidade de bits se aliando a capacidade de sensibilidade do sensor a refletância de entrada (Verde, Mallinis, Tsakiri-Strati, Georgiadis & Patias, 2018).

Com relação a resolução temporal, sabe-se que é referente ao intervalo de tempo entre as coletas de dados do sensor em um mesmo local na superfície terrestre, ou seja, quanto menor for o intervalo entre as coletas no mesmo local melhor a resolução temporal. É sabido que esse tipo de resolução é usado para acompanhar mudanças na superfície terrestres em estudos relacionados a ciclo fenológicos de zonas de plantio, por exemplo (Vareiro, 2022).

Uma resolução espectral se baseia na largura de espectro em que o sensor trabalha, sendo responsável por definir o intervalo espectral onde são realizadas as medições. De forma sucinta, quanto menor a largura da banda espectral e quanto maior o número de bandas que existem, melhor será a resolução espectral (Vareiro, 2022). Esse tipo de resolução possui grande importância para a extração de informação e precisão de classificação dos dados obtidos pelo sensor (Verde, Mallinis, Tsakiri-Strati, Georgiadis & Patias, 2018). A Figura 6 ilustra a resolução espectral de sensores imageadores.

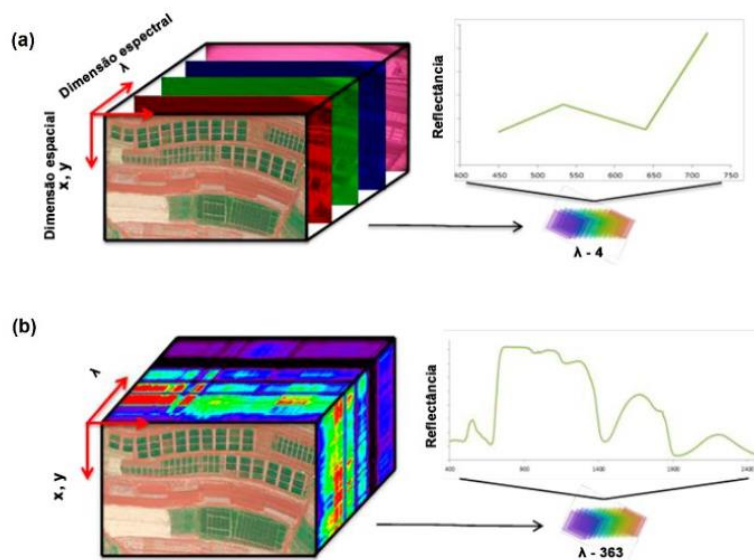


Figura 6 - Resolução espectral dos sensores imageadores

Fonte: (Vareiro, 2022)

A resolução espacial é a distância mais curta entre dois objetos visíveis na imagem. Geralmente, se classifica como uma relação de proporção onde o que é analisado é o tamanho do objeto presente na superfície e o elemento de resolução da área. Essa tecnologia se relaciona com o campo de visão do sensor (FOV), ou seja, quanto maior a distância focal do sensor menor o FOV, e assim, menor será o pixel. Um pixel sendo menor é algo bom pois a relação entre pixel e resolução espacial é inversa, ou seja, se o pixel reduz a resolução aumenta (Vareiro, 2022). Assim como a resolução espectral, a espacial se torna mais importante que a outra quando é em relação a extração de detalhamento de informação e precisão de classificação (Verde, Mallinis, Tsakiri-Strati, Georgiadis & Patias, 2018). A Figura 7 mostra exemplos de resoluções espaciais de um sensor.

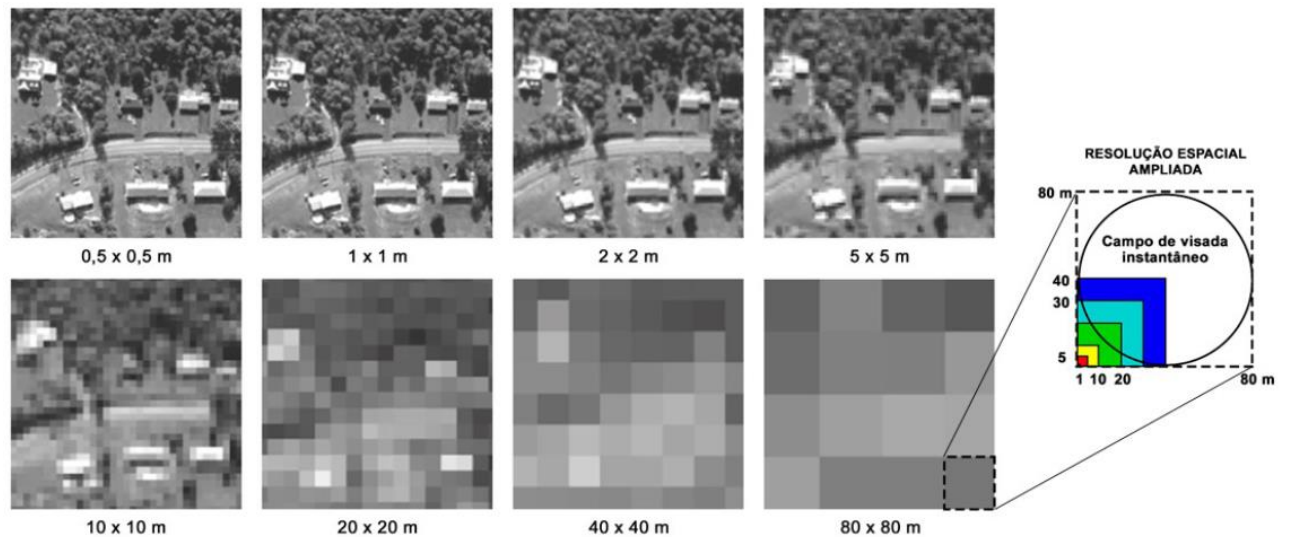


Figura 7 - Resoluções espaciais de um sensor imageador

Fonte: (Vareiro, 2022)

### 2.3.4.3 Tipos de Câmaras

A aquisição de dados de imagem é uma atividade facilitada pela existência de diferentes tipos de câmaras que fazem essa captura, tanto para estudo quanto para lazer. O olho humano é capaz de detetar luz com comprimento de onda entre 400 e 700nm da qual é refletida de objetos, porém, existem sensores que conseguem detetar outros espectros e trazer mais detalhes em maior quantidade de imagens através da obtenção de mais pixéis dependendo da capacidade fotossensível do sensor da câmara (Barbosa, Consalter, Pauletti & Motta, 2016). Uma esquematização ilustrativa sobre diferentes espectros capturados por câmaras é demonstrada na Figura 8.

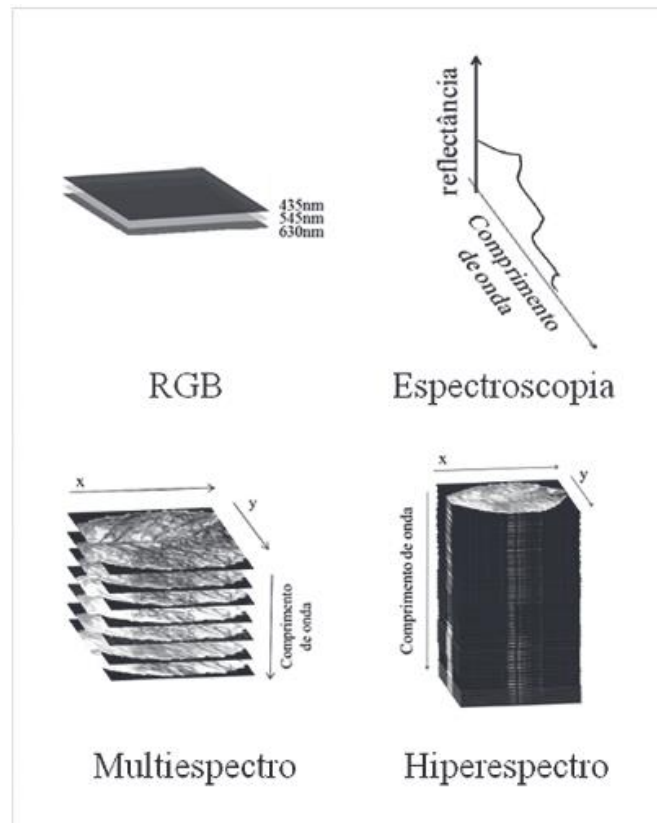


Figura 8 - Exibição esquematizada do sistema de cores RGB, princípio da espectroscopia, imagens multiespectrais e hiperespectrais

Fonte: (Barbosa, Consalter, Pauletti, & Motta, 2016)

Usualmente, em *smartphones* e outros aparelhos mais comuns do dia a dia, é possível encontrar câmaras do tipo RGB que capturam a luz no espectro visível para seres humanos, se caracterizando por obter cada pixel como sendo um espaço tridimensional que contenha as três cores primárias (red, green, blue) (Barbosa, Consalter, Pauletti & Motta, 2016). Geralmente, esse tipo de câmara, presente nos mais comuns aparelhos tecnológicos, é usada para registrar imagens de objetos que humanos enxergam, porém, também são capazes de detetar outros comprimentos de ondas. Contudo, elas vêm de fábrica com filtros que impedem essa detecção pois para o simples caso de registro de imagens comuns para seres humanos só iria poluir a qualidade dos registros (Barbosa, Consalter, Pauletti & Motta, 2016).

Câmaras RGB são úteis, mas possuem sua capacidade limitada para outros fins de captura de outros espectros. Para isso, existem outras alternativas como: câmaras multiespectrais e hiperespectrais, as quais conseguem interpretar outras bandas além do espectro visível (Bolfe, Barbedo, Massruhá, Souza & Assad, 2020).

Câmaras multiespectrais, geralmente, são muito vistas com uso em análise de vegetação devido às suas características de interpretação de faixas de borda vermelha e infravermelho próximo. É uma

tecnologia que possui uma maior resolução espacial e, além da radiação vermelha, azul e verde, é capaz de capturar comprimentos de onda mais intermediários e ainda mais curtos e longos, pertencentes aos espectros ultravioleta e infravermelho (Cândido, et al., 2021). A Figura 9 demonstra uma comparação de faixas de banda em uma mesma câmara multiespectral.

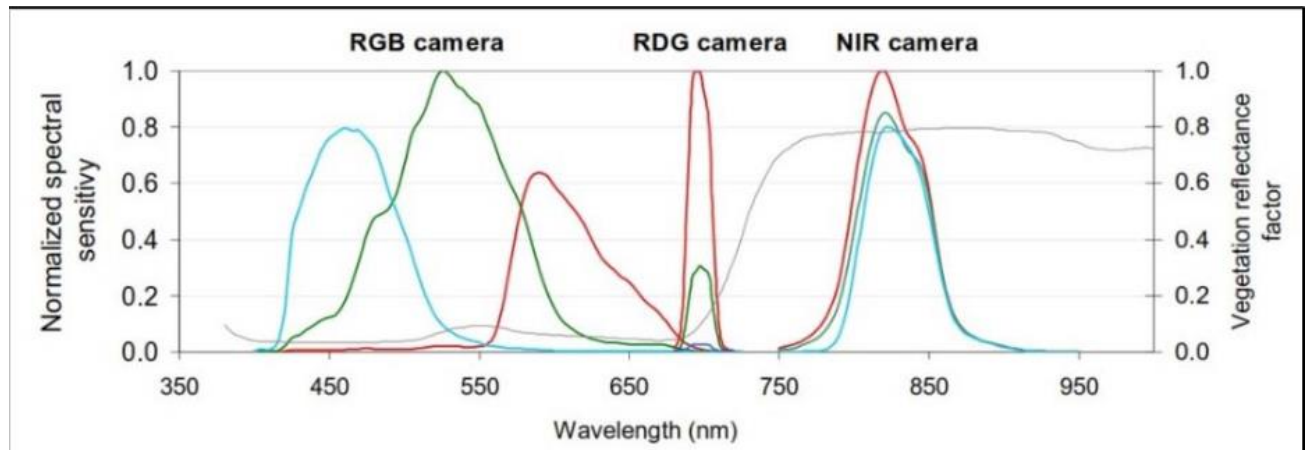


Figura 9 - Demonstração de características de bandas RGB, NIR, e RDG-RedEdge em uma câmara multiespectral

Fonte: (Cândido, et al., 2021)

O mercado conta com alguns modelos multiespectrais disponíveis como: a RedEdge-MX, da MicaSense, que possui cinco bandas: blue, green, red, red-edge e NIR e a Tetracam, que utiliza as bandas red, green e NIR (RG NIR) (Figura 10).



Figura 10 - Câmera multiespectral Tetracam, que possui bandas red, green e NIR.

Fonte: (Pessi, Belin, Junior, & Silva, 2020)

Sensores hiperespectrais coletam dados em muitas faixas de banda muito estreitas. São sensores mais precisos que os multiespectrais devido ao facto de terem essa capacidade de captura com bandas mais

estreitas e numerosas (Figura 11). Um exemplo de sensor hiperespectral é AVIRIS, que consegue recolher, aproximadamente, 224 bandas entre 0,4 e 2,5 $\mu\text{m}$  em intervalos de 10 nm (Cowley, 2010). Esse tipo de tecnologia pode ser usado em áreas como biotecnologia (estudo de corais, células, análises de bactérias), monitoramento ambiental para emissões de CO<sub>2</sub> na superfície e mapeamento de formações hidrológicas (Cândido, et al., 2021).

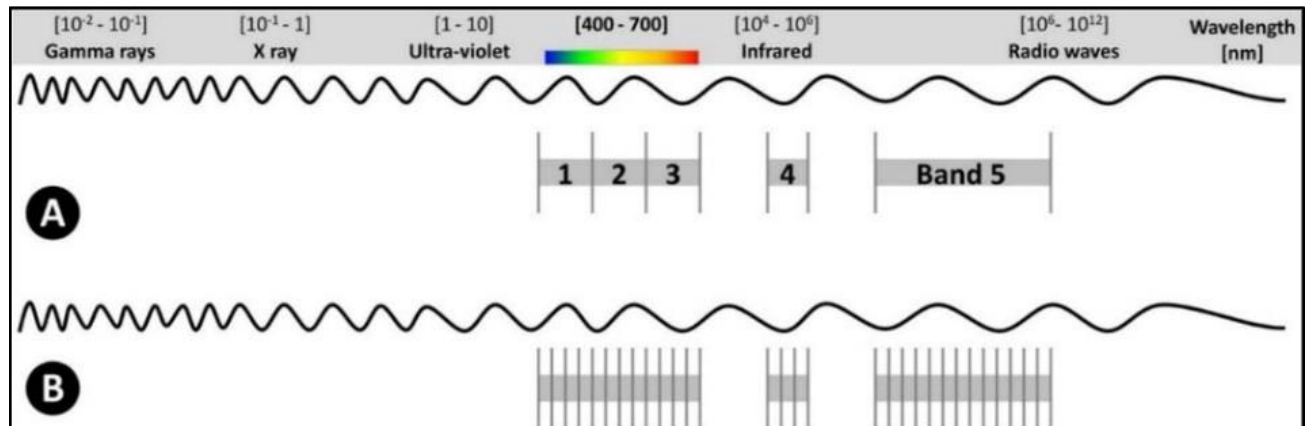


Figura 11 - Comparação de quantidade e largura de bandas entre exemplo multiespectral (A) e hiperespectral (B)

Fonte: (Cândido, et al., 2021)

Como resultado da obtenção de dados de ambas as tecnologias, tanto câmaras multiespectrais quanto hiperespectrais, é possível obter uma matriz  $M \times N \times W$  onde  $M$  e  $N$  são dados de posição e  $W$  representa simplesmente o valor de faixa de onda (Ramirez, et al., 2022).

O que é possível concluir sobre câmaras multi e hiperespectrais é que são dois sistemas onde existem diferenças e preferência no que se diz respeito ao mercado. Sistemas multiespectrais projetados até o momento acabaram se tornando não tão viáveis de se implementar em linhas de produção comparados aos sistemas hiperespectrais, pois a miniaturização e barateamento da tecnologia hiperespectral, junto ao que ela tem a oferecer a mais, faz com que seja mais viável a comercialização desse equipamento (Bolfe, Barbedo, Massruhá, Souza & Assad, 2020; Ramirez, et al., 2022).

## 2.4 Nuvem de Pontos

A tecnologia de sensores tem se desenvolvido muito e com ela as nuvens de pontos aparecem como resultado da obtenção de dados destes dispositivos e, cada vez mais, tem provado sua importância no que diz respeito a dados geográficos, podendo ser consideradas o terceiro tipo de dados geográficos ao lado dos mapas e imagens (Hu & Yang, 2020). O principal uso das Nuvens de Pontos é *renderizar*

o mundo real em modelos 3D digitais armazenando e disponibilizando expressiva estrutura de representação de dados geométricos de objetos obtidos por sensores de captura que inserem dados em forma de série de pontos nessas nuvens (Zhang, Zhao, Chen & Lu, 2019). Dados tridimensionais providenciados de Nuvens de Pontos não só conseguem resolver questões relacionadas com a iluminação e postura como em imagens 2D, mas também provê rica informação espacial para cenas complexas (Zhang, Zhao, Chen & Lu, 2019). Com a extensa aplicação desse conjunto de pontos 3D, as Nuvens de Pontos tem contribuindo, junto a sistemas de sensoriamento LiDAR para trabalhos como estimativa de parâmetros de florestas, monitoramento de desastres naturais e estimativa de potencial de energia solar em certos locais (Cheng, et al., 2018). Em âmbito geral, outras colaborações para a pesquisa científica focam em navegações internas, conduções de veículos não tripulados, análise de morfologia urbana, entre outros estudos (Zhang, Zhao, Chen & Lu, 2019). Porém, mesmo com tantas vantagens e contribuições, a nuvem de pontos tem características de limitação como aleatoriedade, esparsidade e ausência de estrutura que colocam desafio em sua interpretação (Zhang, Zhao, Chen & Lu, 2019).

Com relação ao tratamento de dados obtidos a partir das Nuvens de Pontos possuem três desafios necessários de se ultrapassar: a alta variação de densidade de pontos em medições de longa distância, o alto número de dados de ruído que se tornam presentes em cenas complexas de digitalização e o grande montante de dados, como foi dito anteriormente (Ge & Wu, 2019). Um exemplo de situação desafiadora é o da digitalização a laser terrestre feito em ambientes urbanos, onde são necessários várias digitalizações de diferentes perspectivas do mesmo local para que se obtenha o máximo de detalhes possível da cena devido à oclusão por obstáculos e presença de densidades de pontos variados, sendo essa uma situação onde se gera um montante grande de dados em quadros coincidentes que precisam depois ser registrados como referência comum, muitas vezes manualmente, devido à dificuldade dos softwares em lidar com a alevada quantidade de dados repetidos, para que não haja repetição de menção de quadros (Yang, Dong, Dai & Liu, 2015).

A avaliação de nuvens de pontos pode ser dividida em alguns métodos. O método do ponto de controle, por exemplo, envolve a seleção manual de dois pontos de controle para rotular pontos ou objetos dentro de uma única nuvem de pontos A, calculando a distância euclidiana entre esses pontos e, em seguida, realizando a mesma operação na nuvem de pontos, que pode ser chamada de B, C, D. Por fim, comparando as distâncias obtidas dessas diferentes nuvens de pontos (A, B, C, D). Para três pontos, isso resultará em uma triangulação semi-manual. Em princípio, os pontos de controle podem ser obtidos automaticamente. Esses pontos são chamados de funções. No entanto, a mineração automática de recursos é baseada na suposição de que as nuvens de pontos são devidamente registradas internamente para que a geometria local dos pontos seja bem definida (Lehtola, et al., 2017).

O mundo está repleto de sensores de imagem ativos que conseguem gerar *point clouds*. Essa tecnologia de aquisição de dados sem contato traz as vantagens de ser rápida e ter boa penetração, densidade e eficiência, sendo um exemplo o Velodyne LiDAR usado no desafio de circuito subterrâneo DARPA (Rusu & Cousins, 2011; Maynard, 2021).

Sistemas desse tipo conseguem capturar diferentes densidades de pontos em seus dados dependendo do tipo de plataforma em que é montado. A Tabela 4 mostra alguns sistemas de sensoriamento LiDAR montados em diferentes plataformas e suas respectivas densidades de nuvens de ponto.

Tabela 4 - Comparação de sistemas LiDAR montados em plataformas diferentes

Plataformas	Abreviação do sistema	Perspectiva do digitalização	Alcance do digitalização	Desindade de Nuvem de Pontos	Áreas de aplicação
Aertransportado	ALS	Vista superior	Forma de superfície	Relativamente escasso	Mapeamento terrestre, pesquisas de florestais, áreas urbanas 3D
Veículos	MLS	Vista lateral	Forma de listras	Denso	Mapeamento de rodovias, áreas urbanas 3D ,
Tripé	TLS	Vista lateral	Forma de pontos	Denso	Monitoramento de deformação, Engenharia reversa
Satélite	SLS	Vista superior	Forma de superfície	Tamanho de ponto grande, densidade baixa	Pesquisas florestais, Medições atmosféricas, monitoramento de neve

Fonte: (Cheng, et al., 2018)

## 2.5 Aplicação do Sensoriamento Remoto

Mesmo conhecendo toda a tecnologia por trás do sensoriamento remoto, é necessário saber aonde tudo isso se aplica e qual o valor que agrega ao mercado. Diversos estudos tem sido desenvolvidos onde demonstram a relevância e utilidade desses sistemas para atividades em fábricas, onde, por exemplo,

a digitalização tem sido parte da quarta revolução industrial junto à indústria 4.0. Recolher dados 3D de uma fábrica pode trazer alguns benefícios para o monitoramento de detecção de colisões, integração com simulações discretas e otimizações LEAN, por exemplo (Nielsen, Malik, Hansen & Bilberg, 2019).

No contexto industrial, é possível observar que a leitura de dados geométricos pode se aplicar a otimização de padrão de cortes de árvores em tábua, identificação de madeira morta e nós. Um processo que rastreia a idade, espécie e local de onde a madeira é retirada, utilizando banco de dados que não são aproveitados em uso de projetos (Vestartas & Weinand, 2020).

Uma série de soluções estão sendo desenvolvidas para que o sensoriamento remoto seja mais acessível. Um grupo desenvolveu uma opção de *scanner* 3D mais barata com o aparelho Kinect da Microsoft e testaram na digitalização de uma fábrica inteligente. Descobriu-se que era possível realizar a aquisição de dados geométricos do que se pretendia de forma contundente. A solução objetiva uma aplicação em áreas onde o que importe mais seja o preço, em vez de precisão de detalhes, como, por exemplo, em áreas de educação, onde a demonstração com menos detalhes do objeto lido seja suficiente para concluir a tarefa pretendida (Nielsen, Malik, Hansen & Bilberg, 2019).

Diante da gama de opções que são possíveis de se realizar, pesquisadores tem tentado descobrir novas maneiras de lidar com os dispositivos de digitalização de forma mais inteligente. Um grupo gerou um estudo comparativo onde utilizava a mistura de dados capturados por sistemas de *scanning* terrestres e aéreos de um mesmo objeto para que se obtivesse uma melhor precisão do modelo 3D comparado aos dados coletados por apenas um dispositivo. A comparação foi feita pelo método M3C2 e o resultado mostrou que a combinação dos dados de dois dispositivos gerou uma *point cloud* mais precisa e completa (Abdelazeem , Elamin , Afifi & El-Rabbany , 2021)

## Capítulo 3

### 3. Metodologia

Neste trabalho é mostrado o desenvolvimento da digitalização física e virtualização 3D da *point cloud* em *software* de um ambiente antigo de uma fábrica de moagem com máquinas históricas, com a visão de preservação do patrimônio histórico.

#### 3.1 Softwares Utilizados

Durante o tratamento de dados, um dos *softwares* utilizados foi o FARO Scene (Figura 12). O programa é propriamente recomendado para trabalhar com sensores FARO, devido à compatibilidade de *hardware* e *software* da própria empresa. Para a proposta deste trabalho, as ferramentas de visualização 3D e tratamento dos dados geométricos mostraram-se úteis e intuitivas. O *software* conta com integração completa com o serviço SCENE WebShare Cloud, onde é possível compartilhar os dados trabalhados. É possível ter a possibilidade de se ter recursos estendidos com outros aplicativos FARO ou até mesmo de outros desenvolvedores.



Figura 12 - Demonstração do software FARO Scene

Fonte: (Faro, 2023)

Para prosseguir com a etapa de lidar com os dados, também foi utilizado o *software* ReCap Pro (Figura 13). Esse programa fornece uma gama de ferramentas para capturar e reproduzir modelos 3D de alta qualidade, ajudando na área da engenharia e *design*. Tratamento de nuvens de ponto e malhas, também, são uma proposta do programa, possibilitando o auxílio na área de trabalho BIM (*Building Information Modeling*). Para este trabalho, o *software* se mostrou importante para um manuseio mais simples e fluido da nuvem de pontos gerada no projeto, tanto na parte de limpeza de ruídos, quanto na parte de visualização do ambiente.

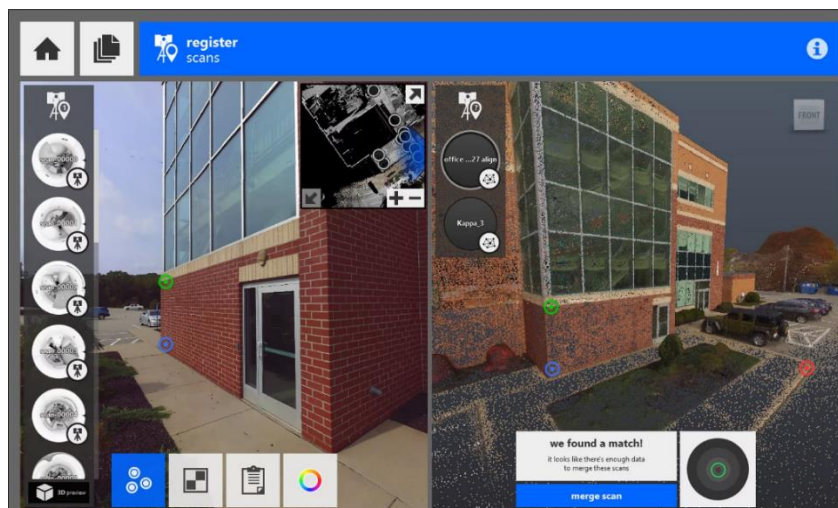


Figura 13 - Demonstração do software Recap Pro

Fonte: (Autodesk, 2020)

## 3.2 Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada por meio de visitas à sala de moagem de uma empresa localizada em Bragança, Portugal.

Durante cada visita, o *scanner* foi posicionado estrategicamente em diferentes locais da sala, garantindo a captura do máximo de detalhes e sobreposições de dados possíveis. Ao todo, foram realizadas 10 leituras em todo o ambiente, sendo 8 digitalizações altas e 2 baixas em relação a altura. Tudo isso, foi dividido em três visitas no local. Na Figura 14 é possível ver a disposição das digitalizações feitas no mapa da sala.

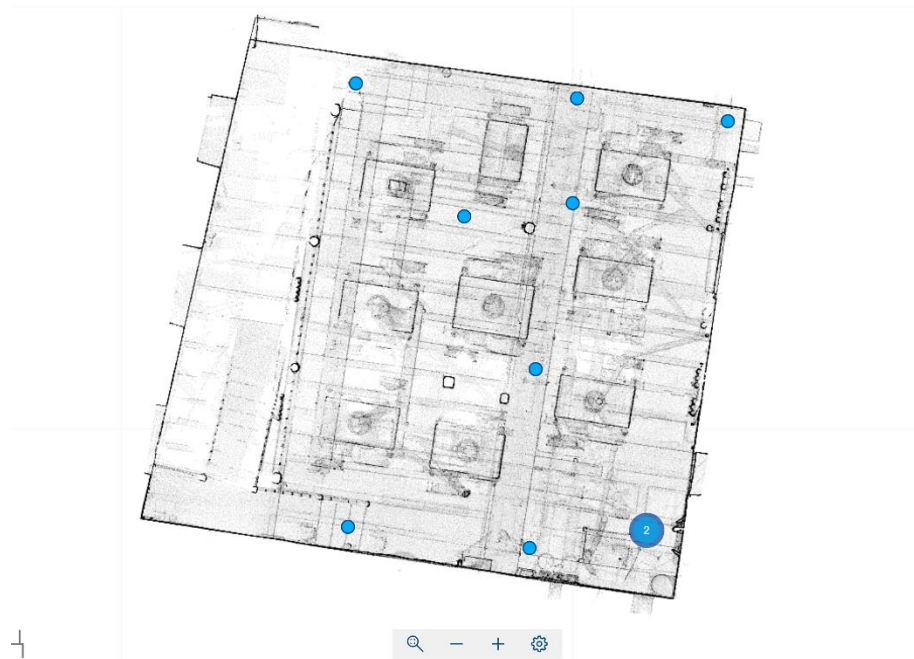


Figura 14 - Disposição das leituras feitas na sala demonstradas no Scene

A maioria das leituras foram feitas durante a época de inverno e o ambiente em que a sala se localizava na fábrica não possuía bom isolamento. Sendo assim, entre uma leitura e outra, a equipe entrava e permanecia no local apenas para configurar o equipamento para a próxima digitalização, logo depois saía.

Antes de cada digitalização, foi feito um ajuste e regulagem do *scanner* (Figura 15), assegurando uma leitura correta dos dados.

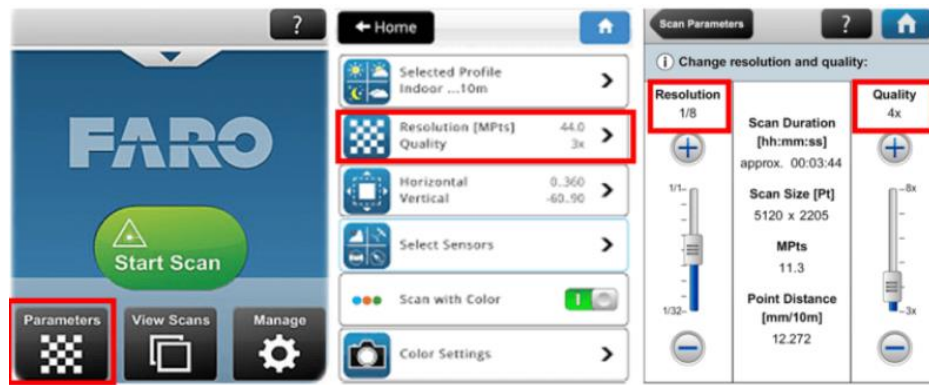


Figura 15 - Painel de parâmetros do *scanner* Faro Focus X130 (mesmas configurações e velocidades que o FARO S150)

Fonte: (Chris, 2020)

Os parâmetros que se podem configurar no aparelho foram diversos: resolução, inclinômetro, HDR, luz, alcance do raio, posição zero etc. A resolução foi posicionada em 1/1 3x, onde obtem-se uma ótima qualidade da digitalização. Porém, quanto mais qualidade, maior a quantidade de dados e, conseqüentemente, mais difíceis de tratar no futuro. A recolha de dados aproveitou o modo HDR (*High Dynamic Range*) ativado para uma melhor captura de detalhes. Antes de cada recolha em cada posição foi sempre verificado se o inclinômetro estava sinalizando o nível correto e foi ajustada a posição 0 de acordo com quantos graus se pretendia para cada leitura.

### 3.3 Equipamentos Utilizados

Para se conseguir obter os dados, foi utilizado o *scanner* FARO S150 (Figura 16), conhecido por sua capacidade de digitalização de alta precisão e alcance máximo de 150 metros e mínimo de 1 metro (Tabela 5). Esse *scanner* sempre trabalha com rotação em sentido horário enquanto distribui o laser.



Figura 16 - Scanner FARO S150

Fonte: (Faro, Focus Laser Scanners, 2023)

Tabela 5 - Especificações de performance do scanner FARO S150

Specifications	Values
Field of View	300°vertical <sup>6</sup> / 360° horizontal
Color Resolution	Up to 165-megapixel color
Ranging Error <sup>3</sup> (mm)	±1
Max. Scan Speed	97Hz (vertical)
Wavelength	1550nm
Laser Class	Laser Class 1

Fonte: (Faro, Focus Laser Scanners, 2023)

Assim como o Faro S70 e S350, este *scanner* é capaz de capturar mais de 1 milhão de pontos por segundo. Além disso, devido ao seu manuseio exigir um conhecimento mais técnico, existem alguns fóruns que mostram alguns detalhes de como configurar estes equipamentos. Como exemplo, é ensinado que a melhor forma de se registrar as digitalizações realizadas é com a ferramenta de registo automático do *software*. Porém, não é possível utilizar esta ferramenta se as digitalizações realizadas não tiverem sido capturadas em posições onde houvesse a existência de sobreposição das leituras, obtendo assim uma espécie de ligação entre digitalizações (Chris, 2020). Esse tipo de situação ajuda o software a reconhecer todos os dados como pertencentes a um só objeto e uni-los para o ambiente virtual.

Para este trabalho, o alcance de leitura deste equipamento é mais que suficiente para ler a sala de moagem utilizada, se mostrando totalmente competente para a proposta.

### 3.4 Tratamento de Dados

Os dados brutos obtidos foram exportados para o software FARO SCENE, onde foram submetidos a um processo de tratamento. Primeiramente, foi realizado o registo e processamento dos dados obtidos em campo (Figura 17; Figura 18). Quando o processamento é feito, é gerado o ambiente virtual no *software* (Figura 19), onde é possível navegar na nuvem de pontos gerada.

Teste k

Número de varreduras	10
Período de gravação	25/01/2023 16:31:47 - 30/05/2023 17:58:21
Modificado	06/06/2023 12:15:39
Localização	Adicione uma localização.
Caminho	C:\Users\jroch\OneDrive\Ambiente de Trabalho\Sala moagem Antonio\Originais\Teste k\

**Processamento**

10 Varreduras

Todas as varreduras neste projeto foram processadas.

[Varreduras do processo](#)

**Registro**

2 Grupos 1.8 mm

Todos os clusters estão registrados.

[Mostrar relatório](#)

**Nuvem de Pontos de Projeto**

Não foi criada uma Nuvem de pontos de projeto.

[Criar](#)

Figura 17 - Resumo de tela inicial do projeto no Scene

Teste k		
Scans		
FARO_Scan_150		Processamento completo
FARO_Scan_151		Processamento completo
FARO_Scan_149		Processamento completo
FARO_Scan_072		Processamento completo
FARO_Scan_073		Processamento completo
FARO_Scan_067		Processamento completo
FARO_Scan_068		Processamento completo
FARO_Scan_069		Processamento completo
FARO_Scan_070		Processamento completo
FARO_Scan_071		Processamento completo

Figura 18 - Varreduras processadas



Figura 19 - Nuvem de pontos do ambiente virtual gerado no Scene

Com o ambiente virtual gerado, intuitivamente o foco seria, a partir daí, a limpeza dos pontos indesejados da *point cloud* para que se pudesse, então, visualizar de forma mais limpa, os corredores

e máquinas da sala. A limpeza pode ser feita com ferramentas de recorte como a *clipping box* (Figura 20), que ajuda a isolar pontos que não se deseja, e apagá-los.

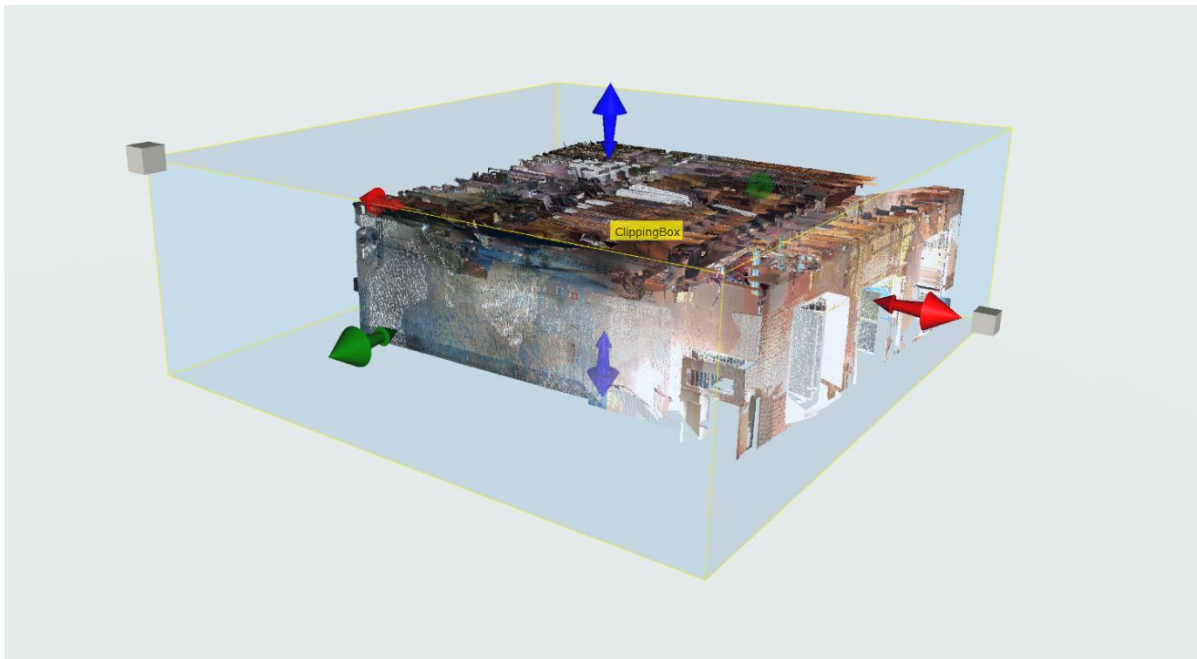


Figura 20 - Ferramenta clipping box de corte no Scene

Como passos seguintes, também foi feita a exportação da nuvem de pontos para o *software* Autodesk ReCap, onde seria possível uma visualização do ambiente através das fotos tiradas pelo *scanner*. Foi feita a limpeza de alguns pontos como paredes e outros elementos, para que se obtivesse uma melhor visualização das máquinas e todo o sistema que envolve o funcionamento da moagem de grãos (Figura 21). A limpeza foi feita por ferramentas de seleção por janela, presentes no *software*. Com a ferramenta *RealView*, foi possível visualizar o ambiente de forma realista com as fotos tiradas após cada digitalização (Figura 22).

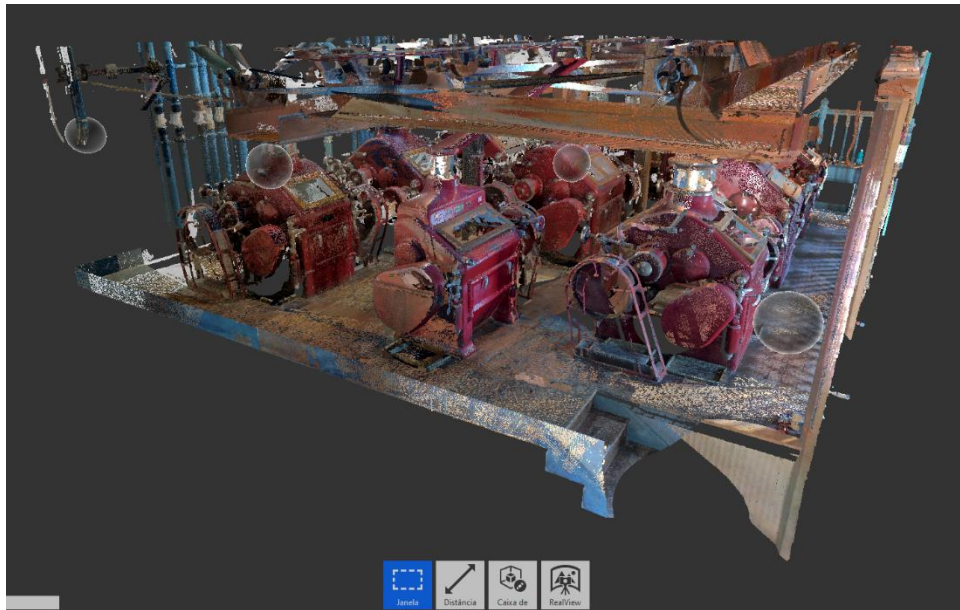


Figura 21 - Ambiente virtual com nuvem de pontos limpa para visualização do sistema no *software* ReCap



Figura 22 - Visualização 3D da sala capturada por fotos pelo scanner e demonstrada no *software* ReCap

### 3.5 Visualização do Ambiente 3D

Com o intuito de promover uma observação compreensível sobre a *point cloud* capturada no ambiente da fábrica, foram gravados vídeos que mostrassem os detalhes do ambiente no *software* Scene. Foram criados então 14 pontos de visualização com a própria ferramenta do *software* e, em seguida, com a ajuda da própria ferramenta de captura de tela do Windows 11, realizada a captura do vídeo

*tour* por esses pontos de visualização pré-definidos.

Como a visualização da *point cloud* possuía partículas indesejadas de se ver no Scene, optou-se, também, por demonstrar o ambiente através da ferramenta *RealView* do *software* ReCap. Com essa representação mais real, foi também gravado um vídeo *tour* através das esferas de simetria, disponíveis na sala dentro do ReCap (Figura 23).



Figura 23 - Esferas de simetria no ReCap

O objetivo de se conseguir demonstrar de forma mais clara e inclusiva como ficou a digitalização do ambiente e das máquinas históricas por dentro foi alcançado, levando em consideração a qualidade das imagens.

### 3.6 Discussão de Método Utilizado

Por fim, os resultados obtidos foram discutidos. Essa discussão incluiu a análise dos benefícios e limitações da metodologia utilizada, bem como a reflexão sobre as possibilidades de uso futuro da virtualização do ambiente de moagem no contexto da preservação do patrimônio histórico.

Com base nos resultados e nas conclusões obtidas, espera-se contribuir para a área de preservação do patrimônio histórico, fornecendo uma metodologia sólida, eficaz e prática para a virtualização de ambientes históricos utilizando digitalização 3D e *point cloud*. Sugestões para trabalhos futuros e

possíveis aprimoramentos da metodologia também foram apresentadas, visando a contínua evolução nesse campo de estudo.

## Capítulo 4

### 4. Resultados e Discussões

#### 4.1 Leitura e Processamento dos Dados

Quanto à leitura de dados em campo, o equipamento utilizado mostrou-se fiel à proposta executada. É importante destacar algumas dificuldades que existiram durante essa etapa.

Como o sensor utilizado é um sensor LiDAR, sendo assim, criando seu próprio feixe de laser para medições, as regiões de vidro das máquinas dispostas na sala (Figura 24) se mostraram prejudiciais para a leitura. Essas regiões refletem o laser e acabam criando ruídos na nuvem de pontos (Figura 25), que são vistos depois do processamento de dados em *software*. Foi necessário retirar esse ruído, manualmente, logo depois, com as ferramentas de seleção.

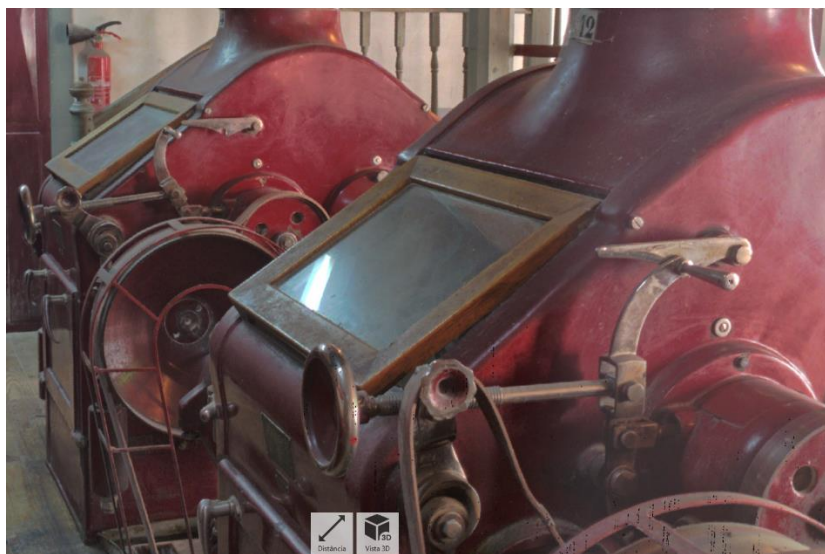


Figura 24 - Região de vidros das máquinas na sala (regiões onde ocorre a reflexão do laser e geração de ruído)



Figura 25 - Ruídos gerados na nuvem de pontos por superfícies reflexivas

Outro ponto que foi necessário ter atenção foi a circulação de pessoas no ambiente enquanto as digitalizações eram feitas. As máquinas e o sistema de moagem disponível na sala em uso não eram mais ativos. Porém, o ambiente ainda ocupa uma região de circulação de pessoas na fábrica. Devido a isso, algumas vezes, o movimento de pessoas merecia atenção e cuidado.

O facto de terem sido feitas mais de uma visita à sala, para leitura de dados, mostrou efeito no que diz respeito ao preenchimento de regiões que ainda faltavam. Porém, é importante deixar claro que não foram cobertas todas as regiões possíveis da sala e das máquinas. Para esta limitação, uma solução seria realizar cada digitalização em cada posição de sobreposição da sala configurado em três alturas diferentes. Isso traria uma base de dados mais completa e detalhada sobre o ambiente. Porém, com isso, o banco de dados se tornaria muito mais pesado, o que exigiria máquinas de pós-processamento muito mais potentes para tratar os dados.

### 4.1.1 Validação dos Dados Coletados

Após o tratamento dos dados, foi realizada uma etapa de validação e verificação dos resultados. Isso envolveu a comparação dos dados obtidos em nuvem de pontos com a captura do ambiente por fotos pelo próprio *scanner*, a fim de avaliar a fidelidade da virtualização. Dessa forma, foram identificadas as imperfeições e falta de pontos na nuvem em certas partes (Figura 26). Através dessa identificação de falhas que se motivou a realizar novas digitalizações na sala, para que se fizesse a leitura desses dados que faltavam. Sendo assim, foram feitas novas visitas à sala de moagem, com o objetivo de capturar novos ângulos e detalhes que não haviam sido capturados.

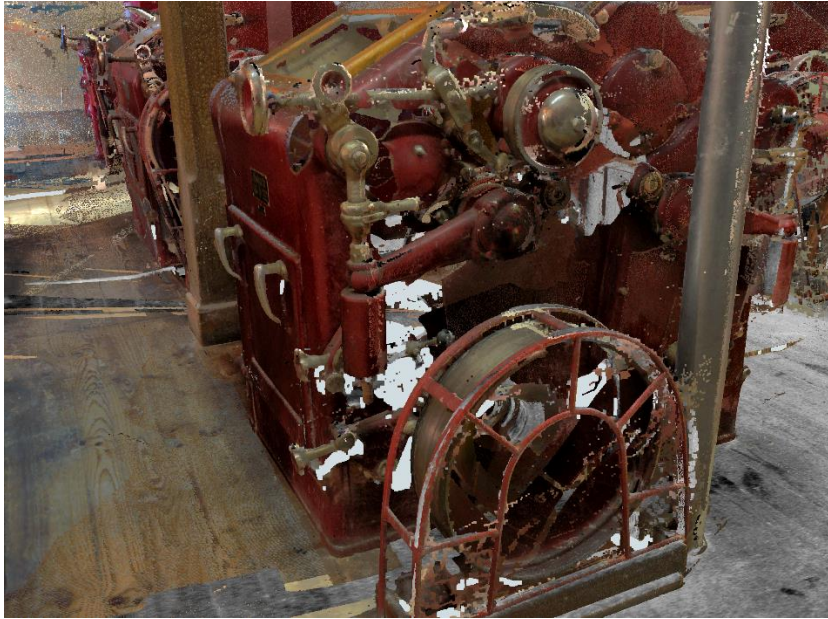


Figura 26 - Região de falta de dados na nuvem de pontos

Também foi gerado o relatório de precisão e margem de erro de medidas pelo próprio *software* FARO Scene, a fim de mostrar mais detalhes sobre as digitalizações que tinham sido realizadas.

### 4.1.2 Relatório de Registro

Do relatório gerado no Scene, é possível obter a conclusão das leituras feitas. Os detalhes referentes à precisão de medidas dos objetos são apresentados. Na Figura 27 é possível analisar alguns dados relacionados ao erro de pontos lidos:

#### Estatísticas do ponto de varredura

Erro de ponto máximo	5.0 mm
Média de erro de ponto	1.8 mm
Sobreposição mínima	20.9 %

Figura 27 - Erro máximo, média de erro e sobreposição mínima dos pontos lidos

Cada ponto de varrimento realizado possui seu resultado baseado no desempenho do *scanner* naquela posição juntamente com as configurações colocadas naquele momento. Na Tabela 6 são apresentados os dados de precisão individuais de cada *cluster*.

Tabela 6 - Estatísticas de cada ponto de varredura feito no Scene

Cluster/Varrimento	Conexões	Máx. Erro de ponto[mm]	Média de erro De ponto[mm]	Mín. Sobreposição
FARO_Scan_150	7	2.0	1.3	25.5 %
FARO_Scan_151	5	5.0	4.2	20.9 %
FARO_Scan_149	8	3.5	1.7	25.5 %
FARO_Scan_072	8	5.0	2.0	22.9 %
FARO_Scan_073	8	2.3	1.3	34.8 %
FARO_Scan_067	6	1.4	1.2	29.2 %
FARO_Scan_068	9	4.8	1.6	20.9 %
FARO_Scan_069	8	1.9	1.5	22.9 %
FARO_Scan_070	8	3.6	2.5	26.6 %
FARO_Scan_071	9	4.1	1.6	29.2 %

### 4.1.3 Limpeza da Nuvem de Pontos

No que diz respeito ao processamento de dados, após o registo da nuvem de pontos, era esperada a execução da limpeza da mesma. Porém, no *software* Scene não foi possível realizar devido ao peso do banco de dados em relação à capacidade do *hardware* disponível. Após a terceira visita de recolha ao local, foi notado que os dados ficaram muito pesados, provavelmente, devido à nova definição da resolução feita em 1/1 3x. Durante os procedimentos de limpeza, o *software* simplesmente fechava sozinho. Isto, junto ao tempo escasso, ocasionou na não conclusão do processo de limpeza, que possibilitaria mais tarde a execução da renderização da malha no modelo limpo e simplificado.

A criação da malha no modelo virtual do ambiente, feita no *software* Scene, possibilitaria, posteriormente, trabalhar com a impressão 3D da sala, para exposição ou estudos.

Foi identificado que se poderia exportar o ficheiro para o *software* ReCap, onde ali também seria possível um processo de limpeza da *point cloud*. Porém, após o processo ser realizado, foi percebido que não haveria como exportar o ficheiro de volta para o Scene para criar a malha e criar a malha no ReCap ficaria inviável por ser pago, deixando, assim, essa alternativa inútil para essa finalidade. Porém, mesmo assim, a limpeza da nuvem no ReCap foi feita, para que fosse possível uma melhor

visualização do modelo.

## 4.2 Demonstração em Vídeo

A captura dos vídeos trouxe uma segurança extra para a comprovação de captura da *point cloud* do ambiente, caso ocorra perda dos dados. O objetivo maior era promover a inclusão de visualização do modelo 3D capturado, para pessoas que não conseguem ter acesso aos *softwares* utilizados neste trabalho.

Com relação ao Scene, o uso dos pontos de visualização gerados (Figura 28) contribuiu para uma navegação precisa, mostrando o máximo de detalhes possível da sala durante o *tour*.

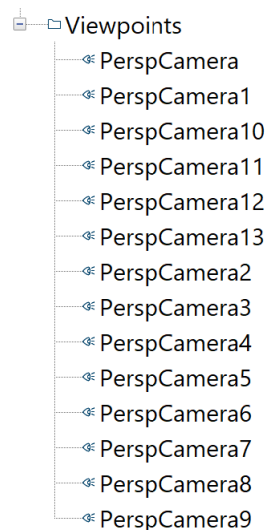


Figura 28 - Perspectivas de exibição geradas no Scene

No ReCap, a gravação do ambiente com a ajuda da ferramenta *RealView* mostrou-se promissora, em termos de clareza. O programa também possibilitava verificar as medidas reais dos objetos lidos dentro do *software* (Figura 29), estando assim disponível mais uma oportunidade de validação dos dados adquiridos. Com este *tour*, a visualização ficou mais confortável de se ver que a gravação da própria nuvem de pontos no Scene.

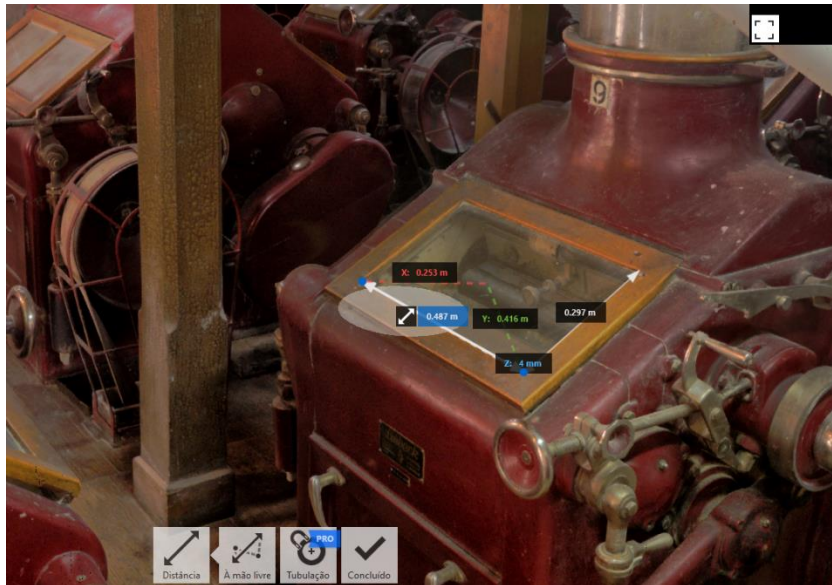


Figura 29 - Ferramenta de medição de distância disponível no ReCap

### 4.3 Desempenho do Método Utilizado

Após a análise da metodologia utilizada neste trabalho, conclui-se que a escolha de fazer a digitalização de um ambiente com o tipo de equipamento utilizado foi uma boa escolha.

Ocorreram algumas dificuldades relacionadas ao espaço disponível para posicionar o equipamento entre as máquinas, corredores e paredes da sala. Devido à distância mínima de alcance de 60 cm e seu limite de angulação em 60° na vertical (Figura 30), muitas vezes, se perderam detalhes e pontos do ambiente que tiveram que ser resgatados em outra posição e ângulo. Esse é um dos motivos de não se ter conseguido alcançar uma cobertura 100% da sala de moagem.

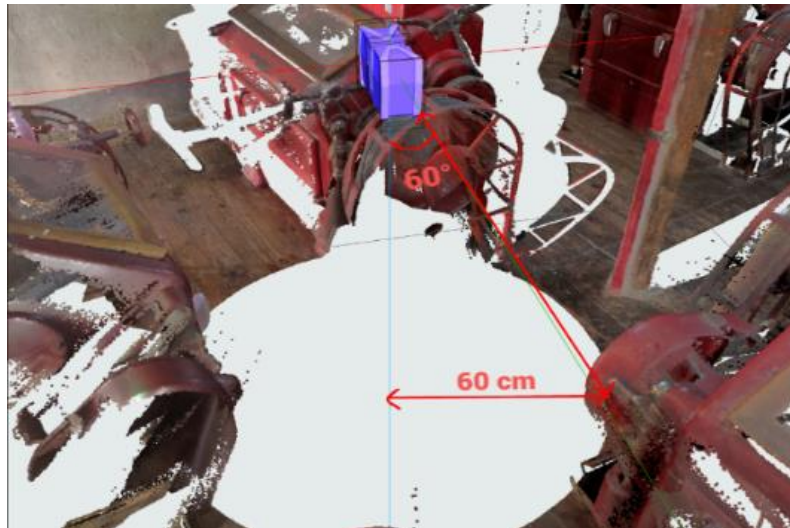


Figura 30 – Distância de alcance mínimo do scanner FARO S150

O *scanner* utilizado se mostrou um equipamento que necessita de atenção e bastante cuidado. Algumas vezes, durante as recolhas de dados, foram perdidos andamentos de leituras. Isso ocorreu devido à falta de atenção da equipe com bateria e armazenamento do equipamento. Em algumas leituras, após a coleta e processamento dos dados, era observado que ficavam sem cor, mesmo com a configuração de cor ativada (Figura 31). O motivo de ter acontecido isto é o facto de o equipamento ter desligado sozinho algumas vezes pelas razões citadas anteriormente.

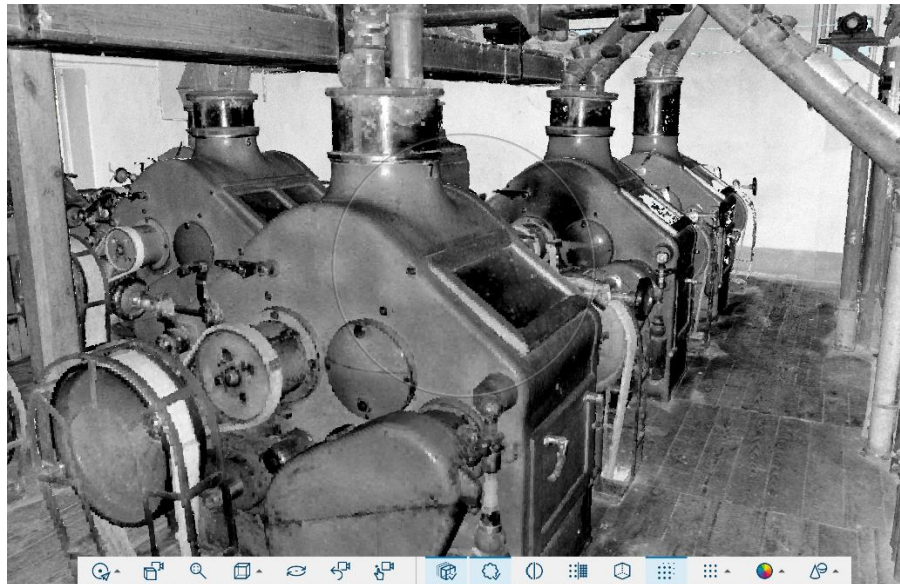


Figura 31 - Captura sem cor não completa do scanner

De facto, o uso mais adequado do FARO S150 seria para obtenção de dados de ambientes maiores,

devido ao seu alcance máximo de raio. Porém, a leitura efetuada se mostrou de extrema qualidade graças ao equipamento. Sendo assim, quanto a qualidade, não há dúvidas que a escolha do método foi a correta.

## Capítulo 5

### 5. Conclusão e Trabalhos Futuros

O principal objetivo deste trabalho foi assegurar a aquisição de dados geométricos em *point cloud* de uma sala de moagem em uma fábrica de grãos. Como objetivo secundário foi realizada a captura do ambiente em forma de vídeos *tour*, através de pontos de visualização criados no Scene e esferas de simetria de posição, existentes no ReCap. O objetivo do trabalho foi assegurado, pois a nuvem de pontos da sala de moagem foi guardada e pronta para outras iniciativas com esses dados.

O procedimento começou com a verificação de especificações do sensor utilizado, para assegurar que ele poderia atender às exigências do trabalho. Mesmo suprindo as necessidades do projeto, o equipamento se mostrou adequado à aplicação em ambiente maiores, devido ao seu elevado alcance. De qualquer forma, apesar de desafios como espaço e reflexo de superfícies na sala, o equipamento mostrou total capacidade de cumprir a tarefa.

Com relação à limpeza da nuvem de pontos, a etapa desenvolvida no ReCap mostrou mais fluidez e dinamismo, obtendo-se êxito na melhora de visualização do modelo em nuvem de pontos e *RealView*. No *Software Scene*, a limpeza não foi possível para se prosseguir com a geração de malha do ambiente, devido a limitações do hardware. Foi notada uma certa incompatibilidade nos arquivos de *scan* após a terceira visita ao local, devido a como o equipamento foi configurado. Uma possível solução seria refazer as digitalizações na mesma posição, porém, tendo atenção que o sensor não vá desligar ou parar o procedimento por falta de bateria ou de armazenamento.

Na etapa de preparação dos vídeos, o processo realizado no ReCap se mostrou efetivo, dado que foram utilizadas as esferas de posição gerados pelo *software*, para que se navegasse pela sala em diferentes

perspetivas. O resultado ficou satisfatório com boa clareza para quem visualizasse o ambiente. Na etapa desenvolvida no Scene, a demonstração baseada no *tour* pelos pontos de visualização criados se mostrou suficiente para visualizar os ruídos e pontos que ainda faltam na nuvem de pontos do modelo. Nessa visualização, é possível ter noção dos pontos que ainda faltam ser capturados, dando oportunidade a uma possível solução, que seria a digitalização em cada posição de sobreposição da sala em três alturas diferentes, em cada posição.

## 5.1 Trabalhos futuros

Como proposta de continuação deste trabalho e futuros trabalhos, é sugerida a limpeza da nuvem de pontos coletada do ambiente, no *software* Scene, tanto em parte interna da sala quanto em parte externa. A limpeza teria o intuito de que se possa, com esse banco de dados, ser criada a malha em cima do modelo existente com textura, e então ser feita aplicação em equipamentos de realidade virtual. Também seria possível a impressão 3D do ambiente. Isso contribuiria para uma experiência imersiva tanto para estudos quanto para visita apreciativa ao ambiente, complementando ainda mais no objetivo do trabalho: preservar o patrimônio histórico.

É proposto também a melhor captura de dados geométricos da sala, realizando digitalizações com três alturas diferentes em cada posição, para uma captura muito mais precisa. Essa solução traria uma desvantagem: o tamanho do ficheiro ser muito maior. Devido a isso, é importante estar preparado com máquinas que suportem o tratamento de dados dessa magnitude.

## Referências

- Abdelazeem , M., Elamin , A., Afifi , A., & El-Rabbany , A. (2021). Multi-sensor point cloud data fusion for precise 3D mapping. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 835–844 <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.06.002>.
- Amirruddin, A., Muharam, F., Tan, N., & Ismail, M. (2022). Synthetic Minority Over-sampling TEchnique (SMOTE) and Logistic Model Tree (LMT)-Adaptive Boosting algorithms for classifying imbalanced datasets of nutrient and chlorophyll sufficiency levels of oil palm (*Elaeis guineensis*) using spectroradiometers and u. *Computers and Electronics in Agriculture* , 106646–106646.
- Amorim , D., & Silva, P. (2012). O sensoriamento remoto e suas técnicas de análise: uma comparação entre novas e velhas tecnologias, um estudo de caso sobre a tecnologia lidar (o mapeamento de território através das árvores). *XXI Encontro nacional de geografia agrária*, [http://www.lagea.ig.ufu.br/xx1enga/anais\\_enga\\_2012/eixos/1376\\_1.pdf](http://www.lagea.ig.ufu.br/xx1enga/anais_enga_2012/eixos/1376_1.pdf).
- Autodesk. (30 de novembro de 2020). *ReCap Pro| [2024] Features* . Fonte: Autodesk: <https://www.autodesk.com/products/recap/features>
- BANGSOW, S. (2010). *Manufacturing simulation with plant simulation and simtalk: Usage and programming with examples and solutions*. Zwickau, Germany: Springer Berlin.
- Barbosa, J., Consalter, R., Pauletti, V., & Motta, A. (2016). Uso de imagens digitais obtidas com câmeras para analisar plantas. *Revista de Ciências Agrárias*, 15–24 <https://doi.org/10.19084/rca15006> .
- Bolfe, E., Barbedo, J., Massruhá, S., Souza, K., & Assad, E. (2020). Desafios, tendências e oportunidades em agricultura digital no Brasil. *Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas*, 380-406.
- Cândido, A., Schlichting, A., Silva, N., Filho, A., Haupenthal, M., Pessi, D., . . . Junior, P. (2021). Aeronaves Remotamente Pilotadas -RPA. *GEOTECNOLOGIAS PARA APLICAÇÕES AMBIENTAIS* , 351-373 [https://www.researchgate.net/publication/348330925\\_Aeronaves\\_Remotamente\\_Pilotadas\\_-RPA](https://www.researchgate.net/publication/348330925_Aeronaves_Remotamente_Pilotadas_-RPA).
- Cheng, L., Chen, S., Liu, X., Xu, H., Wu, Y., Li, M., & Chen, Y. (2018). Registration of Laser Scanning Point Clouds: A Review. *Sensors*, 1641.
- CHRIS. (14 de setembro de 2020). *3D Laser Scanning - Faro ( Tips & Tricks )*. Fonte: Measured Surveys in London: <https://measuredsurvey365.co.uk/improve-speed-in-3d-laser-scanning/>

- Costa, B., Oldoni, H., Silva, T., & Bassoi, L. (2019). Desempenho de métodos para estimativa do índice de vegetação por diferença normalizada em videiras mediante sensoramento proximal. *Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária*.
- Cowley, D. (2010). *Remote Sensing for Archaeological Heritage Management*. Reykjavík, Iceland: EAC Occasional Paper No. 5.
- Deery, D., Jimenez-Berni, J., Jones, H., Sirault, X., & Furbank, R. (2014). Proximal Remote Sensing Buggies and Potential Applications for Field-Based Phenotyping. *Agronomy*, 349–379 <https://doi.org/10.3390/agronomy4030349>.
- Dinis, F. M., Sanhudo, L., Martins, J. P., & Ramos, N. M. (2020). Improving project communication in the architecture, engineering and construction industry: Coupling virtual reality and laser scanning. *Journal of Building Engineering*, 101287.
- Edl , M., Mizerák, M., & Trojan, J. (2018). 3D LASER SCANNERS: HISTORY AND APPLICATIONS. *Acta Simulatio - International Scientific Journal about Simulation*, 1-5.
- Fahey, T., Pham, H., Gardi, A., Sabatini, R., Stefanelli, D., Goodwin, I., & Lamb, D. (2020). Active and Passive Electro-Optical Sensors for Health Assessment in Food Crops. *Sensors*, 171 <https://doi.org/10.3390/s21010171>.
- Faro. (2023). *Focus Laser Scanners*. Fonte: Faro: <https://www.faro.com/en/Resource-Library/Tech-Sheet/techsheet-faro-focus-laser-scanners>
- Faro. (2023). *SCENE Software*. Fonte: Faro: <https://www.faro.com/pt-BR/Resource-Library/Tech-Sheet/techsheet-faro-scene>
- Gautam, D., Lucieer, A., Watson, C., & McCoull, C. (2019 ). Lever-arm and boresight correction, and field of view determination of a spectroradiometer mounted on an unmanned aircraft system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 25–36 <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.06.016> .
- Ge, X., & Wu, B. (2019). Contextual Global Registration of Point Clouds in Urban Scenes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 559–571 <https://doi.org/10.14358/pers.85.8.559> .
- Giovanini, A. (3 de Dezembro de 2021). *Sensores Ativos e Passivos?* Fonte: adenilsongiovanini: <https://adenilsongiovanini.com.br/blog/sensores-ativos-e-passivos/>
- Heavy.ai. (2015). *What is Remote Sensing? Definition and FAQs*. Fonte: Remote Sensing: <https://www.heavy.ai/technical-glossary/remote-sensing>
- Holland, K., Lamb , D., & Schepers, J. (2012). Radiometry of Proximal Active Optical Sensors (AOS) for Agricultural Sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1793–1802 <https://doi.org/10.1109/jstars.2012.2198049>.
- Hu, P., & Yang, B. (2020). Visual perception driven 3D building structure representation from airborne laser scanning point cloud. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 261–275 <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2020.05.004>.

- Huang, K., Li, G., Li, J., Li, W., & Zhang, Z. (2021). Object detection for optical remote sensing images: A comprehensive review. *Remote Sensing*, 1568 <https://doi.org/10.3390/rs13081568>.
- Inman, D., Khosla, R., & Mayfield, T. (2005). On the go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. *Sensor Review vol. 25*, 209–214.
- Jia, J., Sun, H., Jiang, C., Karila, K., Karjalainen, M., Ahokas, E., . . . Hyypä, J. (2021). Review on Active and Passive Remote Sensing Techniques for Road Extraction. *Remote Sensing*, 4235.
- Julitta, T., Corp, L., Rossini, M., Burkart, A., Cogliati, S., Davies, N., . . . Colombo, R. (2016). Comparison of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence Estimates Obtained from Four Portable Field Spectroradiometers. *Remote Sensing*, 122–122.
- Kadidal, R., Kerstens, S., & Ghent, D. (2022). Recent developments in passive optical sensor technology for remote sensing applications. *Remote Sensing*, 431.
- Kadidal, V., Kerstens, P., & Ghent, R. (2022). The role of optics in precision agriculture: A review. *Applied Sciences*, 464 <https://doi.org/10.3390/app12020464>.
- Kogut, P. (18 de Novembro de 2020). *Types Of Remote Sensing: Technology Changing The World*. Fonte: EOS Data Analytics: <https://eos.com/blog/types-of-remote-sensing/>
- Larsen, N. M., & Aagaard, A. K. (2019). Exploring Natural Wood. *Acadia*, 500–509.
- Lehtola, V., Kaartinen, H., Nüchter, A., Kaijaluoto, R., Kukko, A., Litkey, P., . . . Hyypä, J. (2017). Comparison of the Selected State-Of-The-Art 3D Indoor Scanning and Point Cloud Generation Methods. *Remote Sensing*, 796 <https://doi.org/10.3390/rs9080796>.
- Lubojemski, A. (2019). Satellites and the Security Dilemma. *Astropolitics*, 127-140 DOI: 10.1080/14777622.2019.1641689.
- Marghany, M. (2022). Recent trends in remote sensing using unmanned aerial vehicles (UAVs) and artificial intelligence (AI) techniques. *Journal of Sensors*, 1-24 <https://doi.org/10.1155/2022/1903149>.
- Martos, V., Ahmad, A., Cartujo, P., & Ordoñez, J. (2021). Ensuring Agricultural Sustainability through Remote Sensing in the Era of Agriculture 5.0. *Applied Sciences*, 5911 <https://doi.org/10.3390/app11135911>.
- Maynard, J. (5 de October de 2021). *DARPA Subterranean Challenge and Team CSIRO*. Fonte: Velodyne Lidar: <https://velodynelidar.com/blog/darpa-subterranean-challenge-team-csiro-data61/>
- Melash, A., Bytyqi, B., Nyandi, M., Vad, A., & Ábrahám, E. (2023). Chlorophyll Meter: A Precision Agricultural Decision-Making Tool for Nutrient Supply in Durum Wheat (*Triticum turgidum* L.) Cultivation under Drought Conditions. *Life*, 824 <https://www.mdpi.com/2075-1729/13/3/824/pdf>.
- Nielsen, C., Malik, A., Hansen, D., & Bilberg, A. (2019). Low-Cost 3D Scanning in a Smart Learning Factory. *Procedia Manufacturing*, 824–831 <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.163>.
- Novo, E. (2010). *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações (4ª ed.)*. São Paulo: Blucher.

- Novo, E., & Ponzoni, F. (2001). *Introdução ao sensoriamento remoto*. São José dos Campos: INPE.
- Pessi, D., Belin, R., Junior, P., & Silva, N. (2020). Aeronaves remotamente pilotadas e suas aplicações no manejo agrícola e ambiental. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, 26605 <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/26605/14738> .
- Quartaroli, C., Vicente, L., & Araujo, L. (2014). Sensoriamento remoto. Em S. Tôsto, C. Rodrigues, E. Bolfe, & M. Batistella , *Geotecnologias e geoinformação* (pp. 61-79). Brasília: Embrapa.
- Ramirez, W., Mishra, G., Panda, B., Jung, H., Lee, S., Lee, I., & Singh, C. (2022). Multispectral camera system design for replacement of hyperspectral cameras for detection of aflatoxin B1. *Computers and Electronics in Agriculture*, 107078–107078 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107078> .
- REMONDINO, F. (2011). Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. *Remote sensing*, 1104-1138 <https://doi.org/10.3390/rs3061104>.
- Rusu, R., & Cousins, S. (2011). 3D is here: Point Cloud Library (PCL). *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1-4 <https://doi.org/10.1109/icra.2011.5980567> .
- Sanhudo, L., Ramos, N. M., Martins, J. P., Almeida , R., Barreira, E., Simões , M., & Cardoso, V. (2020). A framework for in-situ geometric data acquisition using laser scanning for BIM modelling. *Journal of Building Engineering*, 101073 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101073> .
- Sansoni, G., Trebeschi, M., & Docchio, F. (2009). State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation. *Sensors*, 568-601. <https://doi.org/10.3390/s90100568>.
- Trotter, M. G., Lamb , D. W., Donald , G. E., & Schneider, D. A. (2010). Active optical sensors for quantifying and mapping pasture biomass: A case study using red and near infrared waveband combinations from a Crop Circle™ in Tall Fescue (*Festuca arundinacea*) pastures. *Crop and Pasture Science*, vol. 61, 389–398.
- Vareiro, R. (2022). Avaliação de características agronômicas em soja por sensor ativo de vegetação e câmera multiespectral embarcada em aeronave remotamente pilotada. <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/23561?show=full>.
- Verde, N., Mallinis , G., Tsakiri-Strati , M., Georgiadis, C., & Patias , P. (2018). Assessment of Radiometric Resolution Impact on Remote Sensing Data Classification Accuracy. *Remote Sensing*, 1267–1267 <https://doi.org/10.3390/rs10081267> .
- Vestartas, P., & Weinand, Y. (2020). Laser Scanning with Industrial Robot Arm for Raw-wood Fabrication. *ISARC 2020*, 773-780 <https://doi.org/10.22260/ISARC2020/0107>.
- Wang, J., Li, Z., Hu, W., Shao, Y., Wang, L., Wu, R., . . . Chen, Y. (2019). Virtual reality and integrated crime scene scanning for immersive and heterogeneous crime scene reconstruction. *Forensic Science International*, 109943 <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.109943> .
- Wright, D., Grego, L., & Gronlund, L. (2005). *The Physics of Space Security* . Cambridge: A Reference Manual.

- Yang, B., Dong, Z., Dai, W., & Liu, Y. (2015). Automatic registration of multi-view terrestrial laser scanning point clouds in complex urban environments. *2015 2nd IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services (ICSDM)*, 141-146 <https://doi.org/10.1109/icsdm.2015.7298041> .
- Zhang, J., Zhao, X., Chen, Z., & Lu, Z. (2019). A Review of Deep Learning-Based Semantic Segmentation for Point Cloud. *IEEE Access*, 179118–179133 <https://doi.org/10.1109/access.2019.2958671> .

# Anexos

# Relatório de registro

Projeto	Teste k
Grupo	Scans
Período de gravação	25/01/2023 16:31:47 - 30/05/2023 17:58:21
Localização	
Data do relatório	13/06/2023 10:00:26

## Codificação por cores

Erro de ponto	< 8 mm	> 20 mm
Sobreposição	> 25.0 %	< 10.0 %

# Visão geral

## Estatísticas do ponto de varredura

Erro de ponto máximo	5.0 mm
Média de erro de ponto	1.8 mm
Sobreposição mínima	20.9 %

# Erros da varredura

## Estatísticas do ponto de varredura

Cluster/Varredura	Conexões	Máx. Erro de ponto [mm]	Média de erro de ponto [mm]	Mín. Sobreposição
FARO_Scan_150	7	2.0	1.3	25.5 %
FARO_Scan_151	5	5.0	4.2	20.9 %
FARO_Scan_149	8	3.5	1.7	25.5 %
FARO_Scan_072	8	5.0	2.0	22.9 %
FARO_Scan_073	8	2.3	1.3	34.8 %
FARO_Scan_067	6	1.4	1.2	29.2 %
FARO_Scan_068	9	4.8	1.6	20.9 %
FARO_Scan_069	8	1.9	1.5	22.9 %
FARO_Scan_070	8	3.6	2.5	26.6 %
FARO_Scan_071	9	4.1	1.6	29.2 %

# Erros detalhados

## Estatísticas do ponto de varredura

Cluster/Varredura 1	Cluster/Varredura 2	Erro de ponto [mm]	Sobreposição
FARO_Scan_150	FARO_Scan_073	0.9	47.1 %
FARO_Scan_150	FARO_Scan_067	1.1	36.4 %
FARO_Scan_150	FARO_Scan_071	1.0	30.8 %
FARO_Scan_150	FARO_Scan_070	2.0	26.6 %
FARO_Scan_150	FARO_Scan_149	1.3	25.5 %
FARO_Scan_151	FARO_Scan_070	3.6	43.5 %
FARO_Scan_151	FARO_Scan_071	4.1	53.7 %
FARO_Scan_151	FARO_Scan_072	5.0	29.0 %
FARO_Scan_149	FARO_Scan_151	3.5	46.3 %
FARO_Scan_149	FARO_Scan_070	1.8	92.7 %
FARO_Scan_149	FARO_Scan_071	1.1	62.3 %
FARO_Scan_149	FARO_Scan_072	1.6	41.3 %
FARO_Scan_149	FARO_Scan_073	1.6	34.8 %
FARO_Scan_072	FARO_Scan_070	3.6	38.1 %
FARO_Scan_072	FARO_Scan_073	1.0	44.8 %
FARO_Scan_067	FARO_Scan_072	1.4	34.0 %
FARO_Scan_067	FARO_Scan_073	0.9	61.2 %
FARO_Scan_067	FARO_Scan_071	1.3	29.2 %
FARO_Scan_068	FARO_Scan_150	0.9	40.6 %
FARO_Scan_068	FARO_Scan_151	4.8	20.9 %
FARO_Scan_068	FARO_Scan_149	1.5	38.2 %
FARO_Scan_068	FARO_Scan_072	1.0	32.9 %
FARO_Scan_068	FARO_Scan_073	0.9	59.6 %
FARO_Scan_068	FARO_Scan_067	1.1	46.9 %
FARO_Scan_068	FARO_Scan_069	1.1	58.6 %
FARO_Scan_068	FARO_Scan_070	2.3	37.6 %
FARO_Scan_068	FARO_Scan_071	1.2	43.7 %
FARO_Scan_069	FARO_Scan_150	1.5	38.4 %
FARO_Scan_069	FARO_Scan_149	1.5	44.0 %
FARO_Scan_069	FARO_Scan_072	1.8	22.9 %
FARO_Scan_069	FARO_Scan_073	1.5	48.6 %
FARO_Scan_069	FARO_Scan_067	1.2	30.8 %
FARO_Scan_069	FARO_Scan_070	1.9	44.9 %
FARO_Scan_069	FARO_Scan_071	1.4	32.7 %
FARO_Scan_070	FARO_Scan_073	2.3	35.1 %
FARO_Scan_071	FARO_Scan_072	0.9	54.5 %
FARO_Scan_071	FARO_Scan_073	1.1	40.5 %
FARO_Scan_071	FARO_Scan_070	2.5	59.5 %

## Incompatibilidades de inclinômetro

Cluster/Varredura	Varredura	Incompatibilidade [deg]
FARO_Scan_068	FARO_Scan_068	0.0076
FARO_Scan_069	FARO_Scan_069	0.0176
FARO_Scan_150	FARO_Scan_150	0.0197
FARO_Scan_149	FARO_Scan_149	0.0480
FARO_Scan_151	FARO_Scan_151	-
FARO_Scan_067	FARO_Scan_067	0.0292
FARO_Scan_071	FARO_Scan_071	0.0084
FARO_Scan_072	FARO_Scan_072	0.0163
FARO_Scan_070	FARO_Scan_070	-
FARO_Scan_073	FARO_Scan_073	0.0046