



Monitorização e Modelação do Património Cultural através da utilização do Modelo BIM

Mestrado em Engenharia Civil e Construções Cíveis

Carina Isabel dos Santos Francisco

Leiria, julho de 2019



Monitorização e Modelação do Património Cultural através da utilização do Modelo BIM

Mestrado em Engenharia Civil e Construções Cívicas

Carina Isabel dos Santos Francisco

Dissertação de Projeto realizada sob a orientação do Professor Doutor Hugo Filipe Pinheiro Rodrigues e do Professor Doutor Gil Rito Gonçalves.

Leiria, julho de 2019

Originalidade e Direitos de Autor

A/O presente dissertação/relatório de projeto é original, elaborada/o unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a/o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado/a o/a Autor/a e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a/o mesma/o foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Civil e construções Civas, no ano letivo 2018/2019, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Dedicatória

“A memória histórica (...) está nos papéis a que chamamos documentos e está nas pedras que denominamos umas vezes fósseis, outras ferramentas ou utensílios, esculturas, anfiteatros, calçadas, fustes, capiteis, templos.”

(Castilla del Pino)

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos de todos aqueles que, de uma forma direta ou indireta contribuíram para a concretização deste documento.

O meu primeiro agradecimento aos meus orientadores, Professor Doutor Hugo Filipe Pinheiro Rodrigues e ao Professor Doutor Gil Rito Gonçalves, pela dedicação e disponibilidade, assim como as orientações, acompanhamento e ensinamentos partilhados.

Agradecer ao Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra pela bolsa de investigação, para licenciado com referência: UI0308-Heritage-3DIM.1/2018 (01/10/2018 a 31/05/2019) do Projecto HERITAGE-3DIM. Aos professores envolvidos no Projecto HERITAGE-3DIM, os meus orientadores, à Professora Doutora Luísa Maria da Silva Gonçalves, Professor Doutor Florindo Gaspar, Professor Doutor Paulo Providência, Professora Doutora Mercedes Solla Carracelas e Professor Doutor Iván Puente Luna.

Quero ainda agradecer ao Professor Doutor Gil Rito Gonçalves pela oportunidade que me proporcionou de assistir às aulas de Deteção Remota e Fotogrametria, o que contribuiu para que o meu trabalho fosse ainda mais motivador.

Um agradecimento especial ao formador e consultor especialista João Dos Santos, pela disponibilidade, pela partilha de conhecimentos e incansável apoio.

Estendo o meu agradecimento a todos os colegas do Mestrado Engenharia Civil e Construções Cíveis, professores e bolsiros de Investigação do Departamento de Engenharia Civil, pelo apoio, incentivo e palavras de coragem nos momentos menos bons nesta fase final.

Aos meus amigos que me apoiaram na realização desta dissertação, que pacientemente me ouviram (mesmo sem perceberem nada do tema) e me incentivaram a focar nos meus objectivos.

À minha família, aos meus pais e em especial à minha irmã, pela paciência e compreensão, carinho e incondicional apoio que sempre demonstraram.

A todos o meu muito obrigada.

Resumo

A presente dissertação apresenta o estudo da monitorização e modelação do património cultural através da utilização do modelo BIM, no Mosteiro da Batalha, elaborado no âmbito de uma bolsa de investigação financiada pelo INESCC, relativa ao projecto interno HERITAGE-3DIM.

A preservação e reabilitação do património histórico é uma preocupação crescente, pois estes têm um valor incalculável e requerem um conhecimento aprofundado dos materiais utilizados na sua construção, das transformações sofridas, dos efeitos das mudanças climáticas e da poluição envolvente, das consequentes patologias, das técnicas de classificação das patologias, entre outros.

Nesse âmbito, e através de imagens da fachada adquiridas com o suporte de um veículo aéreo não tripulado (UAS), foram realizadas através de duas técnicas a classificação das patologias. A análise e interpretação dos classificadores foi realizada a partir da validação das áreas ocupadas por cada patologia. Efetuaram-se ensaios na fachada do Mosteiro recorrendo a Ground Penetrating Radar, com antenas de várias amplitudes e utilizando uma câmara termográfica, obtiveram-se imagens térmicas da mesma zona, que complementaram a análise e interpretação de algumas patologias detetadas e de comportamento das rochas.

O desenvolvimento de um modelo BIM a partir de plantas do mosteiro de uma área de estudo em 3D, recorrendo ao software REVIT, com a criação de paredes e planos para posterior inserção de todos os elementos obtidos, classificações, ensaios e imagens permitiram simular a apresentação dos vários resultados num só modelo de forma a permitir que equipas de restauração possam analisar num só modelo a informação obtida.

Palavras-chave: Patologias, Classificadores KNN, GPR, HBIM, Património

Abstract

The present dissertation presents the monitorization and modelation of cultural patrimonial from the BIM use, in the Monastery of Batalha, elaborated in the scope of research for financial in INESCC relative to the internal project HERITAGE-3DIM.

The preservation and rehabilitation of the historical heritage are growing concerns, because they have an invaluable value and require an in-depth knowledge about the construction materials, the transformations, the effects of climate changes, pollution, pathologies, the classification methods of pathologies, and others.

In this context and through images of the façade captured from an Unmanned Aerial Vehicle (UAV), the classification of pathologies were performed through two methods. The analysis and interpretation of the classifiers were made by the validation of the areas occupied by each pathology. Tests in the façade of the Monastery were performed by using the Ground Penetration Radar, with antennas of several amplitudes and through a thermographic camera it was obtained thermal images of the same zone, which complemented the analysis and interpretation of some detected pathologies and the behavior of the rocks.

The development of a BIM model from plans of a 3D study area of the Monastery, using REVIT software, with the creation of walls and plans for the subsequent insertion of all the elements obtained, classification, tests and images. Allowing to simulate the presentation of the various results together in the same model in order to allow the rehabilitation teams to analyze in a single model the information gathered.

Keywords: Pathologies, Classifiers KNN, GPR, HBIM, Patrimony

Índice

Originalidade e Direitos de Autor.....	iii
Dedicatória.....	iv
Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Lista de Figuras.....	xii
Lista de tabelas.....	xv
Lista de siglas e acrónimos.....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento geral.....	1
1.2. Metodologia.....	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	4
2. Caso de estudo - Mosteiro de Santa Maria da Vitória.....	5
2.1. Enquadramento Geográfico.....	5
2.2. Enquadramento histórico.....	6
2.3. Análise da obra.....	7
2.3.1. Construção e Mestres.....	7
2.3.2. Extração da Pedra.....	9
2.3.3. Alterações e Restausos.....	11
3. Pedra de Paramento e suas Patologias.....	13
3.1. Introdução.....	13
3.2. Rocha Calcária.....	13
3.3. Processo de Degradação da Pedra Calcária.....	14
3.4. Agentes de deterioração.....	14
3.5. Principais Patologias das Pedras utilizadas na Construção do Mosteiro da Batalha.....	15
3.5.1. Patina.....	16
3.5.2. Crostas Negras.....	16

3.5.3. Degradação Granular	17
3.5.4. Alveolização	19
3.5.5. Colonização biológica.....	19
3.5.6. Humidade.....	20
3.5.7. Fendas, fissuras e juntas abertas	21
4. Metodologia, Ensaios realizados, Processamento e análise.....	23
4.1. Obtenção de Imagens UAS.....	23
4.2. Processamento fotogramétrico do bloco de imagens	24
4.3. Classificação do ortomosaico	26
4.3.1. Matriz de erro (ou confusão).....	28
4.3.2. Índice de concordância Kappa	28
4.4. Metodologia de Classificação e Ensaios	28
4.4.1. Nomenclatura Proposta de classificação.....	28
4.4.2. Classificação Manual	30
4.4.3. Classificação Automática.....	31
4.4.4. Classificação Pixel-a-Pixel	32
4.4.5. Classificação Objecto.....	35
4.4.6. Ground-Penetrating Radar	37
4.4.7. Termografia.....	40
5. Resultados Classificadores e Ensaios	45
5.1. Resultados Classificação Manual	45
5.2. Resultados Classificação pixel-a-pixel.....	46
5.3. Resultados Classificação Objecto	51
5.4. Análise de concordância entre os resultados dos classificadores.....	54
5.5. Resultados Ground Penetrating Radar	55
5.6. Resultados Termografia	61
6. Aplicação do BIM em estruturas históricas	63
6.1. Introdução	63
6.2. Aplicação da Metodologia HBIM	64
6.3. Resultados HBIM.....	72
7. Conclusões Finais e Desenvolvimentos Futuros	83
7.1. Conclusões Finais	83

7.2. Desenvolvimentos Futuros.....	84
Bibliografia	87

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Workflow da metodologia	2
Figura 1.2 – Phantom 4 Pro	3
Figura 2.1 - Distrito de Leiria, Município da Batalha	5
Figura 2.2 - a) Zona climática de inverno no continente; b) Zona climática de verão no continente [15]	6
Figura 2.3 - O Mosteiro da Batalha numa gravura publicada em 1852, vendo-se a cobertura piramidal sobre a Capela do Fundador. Nos finais do século XVIII, por James Murphy[9]	7
Figura 2.4 - Fotografia de Vigé & plessix (1849 a 1873)[10]	7
Figura 2.5 - Planta do Mosteiro de Santa Maria da Vitória[10]	12
Figura 3.1 – Exemplo de Patina	16
Figura 3.2 – Exemplo de Crosta Negra.....	17
Figura 3.3 – Exemplo de Degradação Granular.....	18
Figura 3.4 – Exemplo de Alveolização.....	19
Figura 3.5 – Exemplo de Colonização Biológica	20
Figura 3.6 – Exemplo de Manchas de humidade	21
Figura 3.7 –Exemplo de Fissura e Juntas abertas	22
Figura 4.1 –a) Localização dos centros das imagens e densidade de imagens; b) Barras de escala utilizadas no BBA.	25
Figura 4.2 – Ortofo da fachada realizado com o drone	26
Figura 4.3 – Áreas Fachada do Mosteiro Batalha	30
Figura 4.4 – Imagem do QGis – “calculadora de campo”	31
Figura 4.5 – Imagem do QGis – “r.reclass”	34
Figura 4.6 – Imagem do QGis – “r.report”	35
Figura 4.7 – Segmentação Acatama	36
Figura 4.8 – Representação esquemática da relação frequência, comprimento de onda, resolução e alcance do sistema GPR, adaptado de [33]	37
Figura 4.9 –Modo de aquisição (a) e registo de resultados (b), adaptado de [32]	38
Figura 4.10 – Área estudo GPR	40
Figura 4.11 –Código de cores dos termogramas, adaptado de [38].....	41
Figura 4.12 –Imagem visual e térmica da fachada de uma casa, adaptado de [38].....	41

Figura 5.1 – Classificação Manual Mosteiro Batalha	45
Figura 5.2 – Classificação pixel_5Classes_QGis.....	47
Figura 5.3 – Classificação pixel_5Classes_Ecognition	47
Figura 5.4 – 5_Classes – AcaTama_289 Pontos.....	48
Figura 5.5 – Classificação Supervisada Pixel_3Classes_KNN Classifier – Qgis	50
Figura 5.6 – Classificação Supervisada Pixel_3Classes_KNN Classifier – Ecognition.....	50
Figura 5.7 – Classificação Objecto_5Classes	51
Figura 5.8 – 5_Classes – AcaTama_289 Pontos.....	52
Figura 5.9 – Classificação Objecto_3Classes	53
Figura 5.10 – Zonas ensaios GPR	56
Figura 5.11 –Zona 3.1 Horizontal	56
Figura 5.12 – Radargrama e interpretação da zona 3.1 Horizontal – 2300MHz	57
Figura 5.13 –Zona 3.1 Vertical.....	57
Figura 5.14 – Radargrama e interpretação da zona 3.1 Vertical – 800MHz e 2300MHz.....	57
Figura 5.15 –Zona 3.2	58
Figura 5.16 – Radargrama e interpretação da zona 3.2 – 800MHz e 2300MHz	58
Figura 5.17 –Zona 4	59
Figura 5.18 – Radargrama e interpretação da zona 4 – 500MHz esquerda e direita.....	59
Figura 5.19 – Radargrama e interpretação da zona 4 – 800MHz esquerda e direita.....	59
Figura 5.20 – Radargrama e interpretação da zona 4 – 2300MHz esquerda e direita.....	60
Figura 5.21 –Zona 5	60
Figura 5.22 – Radargrama e interpretação da zona5 – 2300MHz.....	61
Figura 5.23 –Área de estudo Termografia	61
Figura 6.1 – Modelo BIM na panificação/construção, adaptado [47]	64
Figura 6.2 – Zona de estudo - Capela do Fundador.....	65
Figura 6.3 – Planta e alçado Capela do Fundador- Autodesk AutoCAD	66
Figura 6.4 – Divisão de paredes para criação de parede no REVIT.	66
Figura 6.5 – Níveis “level” da zona de estudo – REVIT	67
Figura 6.6 – Propriedades da parede/pilar no REVIT.	67
Figura 6.7 – Camadas da parede/pilar no REVIT.	68

Figura 6.8 – Camadas da parede/pilar no REVIT.....	68
Figura 6.9 – Criação revestimentos REVIT.	69
Figura 6.10 – Propriedades do revestimento REVIT.	70
Figura 6.11 – Criação de novo material REVIT.	70
Figura 6.12 – Planta AutoCAD e REVIT	73
Figura 6.13 – Imagem UAS em 3D REVIT	73
Figura 6.14 – Classificação Manual em 3D REVIT.....	74
Figura 6.15 – Classificação Pixel em 3D REVIT.....	74
Figura 6.16 – Classificação Objecto em 3D REVIT.....	75
Figura 6.17 – Termografia em 3D REVIT.....	75
Figura 6.18 – Resultado em 3D REVIT	76
Figura 6.19 – Identificação camadas em 3D REVIT	76

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - As Pedreiras utilizadas na construção do Mosteiro da Batalha [8].....	10
Tabela 4.1 – Nomenclatura classificação manual.....	29
Tabela 4.2 – Nomenclatura classificação automática.....	29
Tabela 4.3 – Nomenclatura de resultados	30
Tabela 4.4 – Amostra visual das classes da classificação manual.....	31
Tabela 4.5 – Amostra visual das classes da classificação automática (amostra 1).....	32
Tabela 4.6 – Amostra visual da Amostra 1 para classificação nos dois softwares.	33
Tabela 4.7 – Amostra visual dos pontos AcaTama	33
Tabela 4.8 – Amostra visual Segmentação Ecognition	36
Tabela 4.9 – Amostra visual pontos GPR	39
Tabela 4.10 – Amostra visual pontos GPR	40
Tabela 4.11 – Amostra visual Termografia	43
Tabela 5.1 – Áreas por Patologia em m2.....	46
Tabela 5.2 – Número de horas por áreas	46
Tabela 5.3 – Matriz de erro e medidas de precisão. UA (%) -Precisão do Usuário; PA (%) – Precisão do Produtor; PC – Precisão geral – Pixel KNN(QGis)	48
Tabela 5.4 – Matriz de erro e medidas de precisão. UA (%) -Precisão do Usuário; PA (%) – Precisão do Produtor; PC – Precisão geral – Pixel KNN (Ecognition Developer)	48
Tabela 5.5 – Áreas por Patologia KNN Pixel em m2 -5Classes- QGis	49
Tabela 5.6 – Áreas por Patologia KNN Pixel em m2 -5Classes- Ecognition.....	49
Tabela 5.7 – Áreas por Patologia KNN Pixel em m2 - QGis	50
Tabela 5.8 – Áreas por Patologia KNN Pixel em m2 - Ecognition.....	51
Tabela 5.9 – Matriz de erro e medidas de precisão. UA (%) -Precisão do Usuário; PA (%) – Precisão do Produtor; PC – Precisão geral – Objecto - KNN	52
Tabela 5.10 – Áreas por Patologia KNN Objecto em m2 -5Classes.....	52
Tabela 5.11 – Áreas por Patologia KNN Object_3Classes em m2.....	53
Tabela 5.12 – Áreas por Patologia dos classificadores em m2 e %.....	54
Tabela 5.13 – Matriz de erro e medidas de precisão. UA (%) -Precisão do Usuário; PA (%) – Precisão do Produtor; PC – Precisão geral	55

Tabela 5.14 – Termografia	62
Tabela 6.1 – Amostra visual Autodesk RECAP e REVIT	65
Tabela 6.2 – Medidas dos Pilares/Paredes	66
Tabela 6.3 – Imagens/ensaios a inserir no REVIT	69
Tabela 6.4 – Imagem por PARTES no REVIT	70
Tabela 6.5 – Sobreposição de paredes no REVIT	71
Tabela 6.6 – Ensaios GPR	71
Tabela 6.7 – Paredes GPR.....	72
Tabela 6.8 – a) Nuvem de pontos RECAP; b) Planta Capela Fundador AutoCAD; c) Parede dupla REVIT; d) Parede alçado Oeste REVIT	72
Tabela 6.9 – a) Posicionamento do ensaio 3D GPR 3.1 Horizontal; b) 3D local ensaio; c) vista 3D dos ensaios GPR; d) Vista em planta da localização do ensaio GPR	77
Tabela 6.10 – a) Posicionamento do ensaio 3D GPR 3.1 Vertical com antena 800MHz e 2.3 GHz; b) 3D local ensaio; c) vista 3D dos ensaios GPR; d) Vista em planta da localização do ensaio GPR	78
Tabela 6.11 – a) Posicionamento do ensaio 3D GPR 3; b) 3D local ensaio; c) vista 3D dos ensaios GPR; d) Vista em planta da localização do ensaio GPR	79
Tabela 6.12 – a) Posicionamento do ensaio 3D GPR 4; b) 3D local ensaio; c) vista 3D dos ensaios GPR; d) Vista em planta da localização do ensaio GPR	80
Tabela 6.13 – a) Posicionamento do ensaio 3D GPR 5; b) 3D local ensaio; c) vista 3D dos ensaios GPR; d) Vista em planta da localização do ensaio GPR	81

Lista de siglas e acrónimos

BBA	Bundle Block Adjustment
BIM	Building Information Modeling
DT	Deteção Remota
GPR	Ground Penetrating Radar
GNSS	Global Navigation Satellite System
HBIM	Heritage Building information modeling
IFC	Industry Foundation Class
INESCC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra
ISODATA	Análise de dados iterativa auto-organizável
KNN	K Nearest Neighbors
UAV	Veículos aéreos não tripulados

1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se o enquadramento do trabalho, descrição da estrutura e conteúdos, a motivação, os principais contributos, os objetivos, onde se menciona a finalidade deste trabalho.

1.1. Enquadramento geral

O presente trabalho enquadra-se no projeto de investigação “Modeling and Monitoring Cultural Heritage with 3D Geospatial Data” do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra (INESCC), que teve como objetivo principal desenvolver uma metodologia inovadora para a criar um modelo 3D, integrando nele dados de diferentes técnicas de monitorização e caracterização do património construído, para posteriormente poderem ser utilizadas por equipas de reabilitação, restauração e conservação.

A importância das condições ambientais amenas de Portugal contribuíram para que os nossos monumentos em pedra chegassem à atualidade em condições razoáveis. Sendo que o aumento da poluição atmosférica, a falta de manutenção e/ou conservação levaram a uma aceleração da degradação dos monumentos nos últimos anos. Este fenómeno verifica-se com maior intensidade nos centros urbanos, onde a quantidade de gases de poluição automóvel é maior [1]. As preocupações inerentes à degradação conduzem a que se olhe para os Monumentos como um todo, fazendo-se estudos complexos que exigem a intervenção de profissionais de varias áreas, nomeadamente arquitetura, história de arte, engenharia civil, geologia, química, biológicas e física [2].

A nível da intervenção em monumentos históricos de valor patrimonial, serão abordados os ensaios dinâmicos não destrutivos, que permitem a recolha de informação não colocando em causa a estrutura do edifício e sem causar danos visíveis no monumento. A primeira intervenção para avaliação será realizada através de inspeções visuais periódicas, em que se observará o estado de conservação e avaliado por um indivíduo, podendo existir limitações da visão humana para o espectro visível. Os classificadores automáticos são utilizados frequentemente na caracterização dos solos, no caso de estudo será adaptado para

identificação de patologias em pedras naturais, outros meios para aprofundar os conhecimentos sobre a pedra que iremos abordar são o GPR e a termografia.

A modelação BIM integrando os resultados dos ensaios realizados, imagens/classificadores na fachada do mosteiro, representa mais um passo no sentido da automatização de tarefas e que introduzidas no modelo facilitam a consulta de vários grupos de pessoas ligadas a um projeto de restauro e reabilitação.

1.2. Metodologia

De seguida, e com base no workflow apresentado na Figura 1.1 que descreve a metodologia utilizada, identificam-se os vários passos seguidos durante a execução de trabalhos.

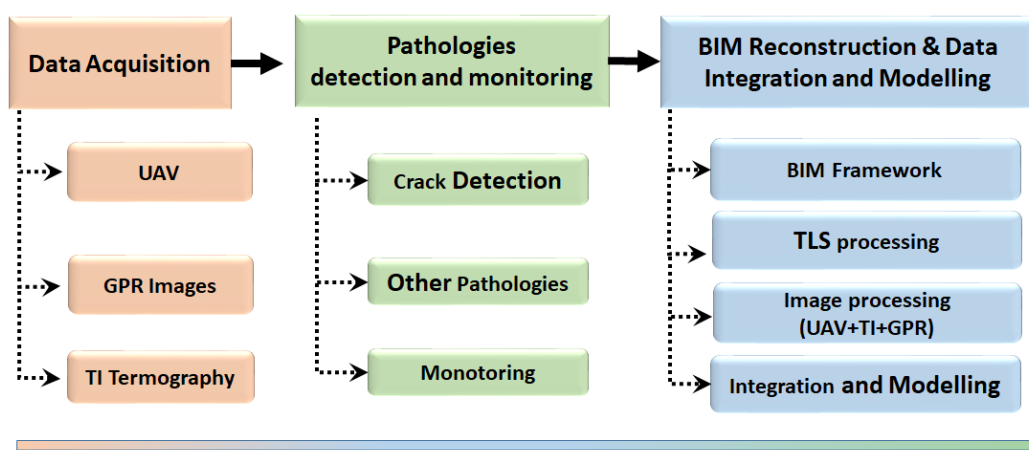


Figura 1.1 – Workflow da metodologia

Aquisição de Dados teve como objetivo compilar todos os dados sobre estudos efetuados sobre o Mosteiro da Batalha, relacionados com dados de varrimento a laser, dados hiper-espectrais e de termografia, assim como definir o procedimento para aquisição de novos dados. A aquisição de dados foi realizada através de voos com um veículo aéreo não tripulado (UAV), um drone DJI Phantom 4 Pro (Figura 1.2).



Figura 1.2 – Phantom 4 Pro

- Através das imagens fotogramétricas adquiridas da fachada do Mosteiro da Batalha, foram identificadas visualmente as patologias mais frequentes em pedras calcárias, com base nos estudos já efectuados que permitem perceber os tipos de patologias e os agentes causadores das mesmas;
- Avaliação das patologias de forma automática através de classificação supervisionada, sendo que os resultados dependem da parte espectral da imagem, no caso em estudo relacionado com as alterações nas pedras;
- A comparação das patologias identificadas visualmente com as obtidas de forma automática, interpretação e validação de possíveis métodos mais eficazes;
- Outros ensaios como levantamento de Ground Penetrating Radar (GPR), recorrendo a antenas com frequência 500MHz, 800MHz e 2300MHz;
- Recolha e interpretação de imagens de termografia para verificar através da deteção de padrões de temperatura nos elementos construtivos, a energia térmica como é difundida sob a superfície para monitorização de sua variação de temperatura superficial durante o aquecimento ou fase de arrefecimento, condução do calor nos elementos sólidos [3][4][5].
- Apresentar a construção de um modelo BIM de uma zona da Capela do Fundador usando suas características georreferenciais.
- O modelo BIM integra todas as classificações realizadas, assim como imagens UAS, termográficas, ensaios de GPR e outras informações relevantes para futuros trabalhos de restauro e conservação.
- Interpretar resultados e tirar conclusões e considerações finais deste estudo.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em 7 capítulos distintos, onde o capítulo 1 (presente capítulo) apresenta a introdução do trabalho, definição dos objetivos e a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 apresenta o caso de estudo – o Mosteiro de Santa Maria da Vitória, mais conhecido como Mosteiro da Batalha, o seu enquadramento histórico, os mestres envolvidos na construção, as pedreiras de extração de pedra utilizada na sua construção e intervenções de restauro realizadas.

O capítulo 3 tem como objectivo apresentar o tipo de pedra de paramento utilizada, os processos patológicos, os agentes de deterioração que provocam as patologias, prosseguindo-se com a apresentação dos tipos de patologias mais comuns em pedras calcárias.

O capítulo 4 apresenta processamento, análise de imagem e ensaios onde, de forma sucinta, se descrevem os vários temas desenvolvidos, a nível do que já foi realizado e/ou outros métodos de abordagem.

No capítulo 5 é exposta a metodologia e resultados dos classificadores de patologias e os ensaios realizados, para avaliação das características estruturais do Mosteiro e possíveis infiltrações, bem como descrição e discussão dos resultados dos vários parâmetros envolvidos.

No capítulo 6 apresenta a modelação HBIM da zona de estudo, da Capela do fundador, as técnicas utilizadas para construir o modelo, os elementos inseridos e os resultados obtidos com o modelo.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões retiradas deste trabalho e possíveis desenvolvimentos futuros.

2. Caso de estudo - Mosteiro de Santa Maria da Vitória

2.1. Enquadramento Geográfico

O Mosteiro de Santa Maria da Vitória, conhecido por Mosteiro da Batalha, situa-se na cidade da Batalha inserida na região centro litoral, pertencendo ao distrito de Leiria, Figura 2.1.



Figura 2.1 - Distrito de Leiria, Município da Batalha

A cidade da Batalha encontra-se numa região de forte influência atlântica, devido à proximidade do Oceano Atlântico. O Mosteiro da Batalha insere-se no centro urbano da Batalha, nomeadamente junto a uma grande via de tráfego rodoviário, o IC2. O local é exposto a elevados índices de poluição atmosférica, consequência da existência de produtos provenientes da combustão de combustíveis fósseis. Uma solução encontrada para minimizar a acção da poluição no Mosteiro foi a colocação de uma barreira entre o Mosteiro e o IC2, estimando-se que na via passem cerca de 15 mil veículos diariamente.[6][7]

As temperaturas médias no Inverno rondam os 10.7°C diurno no mês mais frio, e no Verão as temperaturas rondam os 20.9°C, quanto ao zonamento climático de inverno em Leiria é do tipo I2, zonamento climático de verão V1 e amplitude térmica e 12°C (Figura 2.2). [14].

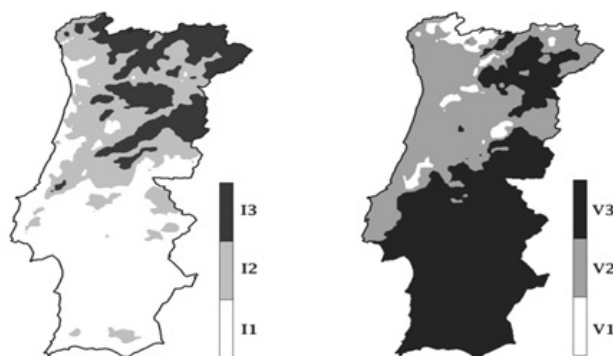


Figura 2.2 - a) Zona climática de inverno no continente; b) Zona climática de verão no continente [15]

2.2. Enquadramento histórico

O Mosteiro de Santa Maria da Vitória, conhecido por Mosteiro da Batalha, foi mandado construir por D. João I, em 1388, no seguimento da vitória da Batalha de Aljubarrota, pois este fez um voto à Virgem que se viesse a ganhar a batalha, iria construir um monumento grandioso em sua honra.

A sua construção iniciou cerca de 1 a 2 anos depois, segundo consta no testamento do monarca, a sensivelmente 4 km do local onde decorreu a batalha contra os Castelhanos, que garantiu a independência de Portugal Castela. A escolha deste local deveu-se às características dos terrenos, à sua localização (perto do rio Lena), à existência de pinhais (madeira) e à localização das pedreiras (calcário oolítico, abundante na zona).

As obras iniciaram em 1388, tendo terminado em 1517. Foi considerado um dos mais belos exemplos de arquitetura gótica tardia ou manuelina de Portugal devido à riqueza de detalhes e símbolos. Logo após o início da sua construção o Rei confiou a sua tutela religiosa à Ordem de São Domingos, esta era uma ordem mendicante, que privilegiava o estudo e faziam voto de pobreza, vivendo de esmolas [8] (Figura 2.3).

O Mosteiro tem um percurso de seis séculos com diferentes funções e alteração da utilização dos espaços para o qual tinham sido inicialmente criados, a nível estrutural houve três grandes eventos históricos que destruíram partes do mosteiro, nomeadamente o terramoto de 1755, as invasões Francesas em 1808 e 1810 e a extinção das Ordens Religiosas em 1834.



Figura 2.3 - O Mosteiro da Batalha numa gravura publicada em 1852, vendo-se a cobertura piramidal sobre a Capela do Fundador. Nos finais do século XVIII, por James Murphy[9]

O terramoto de 1755 provocou fendas nas abobadas e nos muros que provocaram infiltrações de água, assim como o colapso do coruchéu da Capela do Fundador. Nas Invasões Francesas, o Mosteiro foi pilhado e incendiado, destruindo o terceiro claustro, o Claustro de D. João III. Por fim, com a extinção das Ordens Religiosas de Portugal, o mosteiro ficou abandonado até cerca de 1836, quando ficou aos cuidados do Rei consorte D. Fernando II e do Engenheiro Mouzinho de Albuquerque, estes iniciaram obras de restauro, evitando a degradação total do monumento [8], [10](Figura 2.4).

Em 1907 é considerado Património Nacional, pelo seu valor, e em 1983 entra para a lista dos monumentos classificados como Património Mundial da UNESCO.



Figura 2.4 - Fotografia de Vigé & plessix (1849 a 1873)[10]

2.3. Análise da obra

2.3.1. Construção e Mestres

Actualmente, o Mosteiro é constituído pela Igreja, Claustro Real, Casa do Capítulo, Dormitório ou Adegas dos Frades e o Refeitório, Claustro Afonsino, as Capelas Imperfeitas e a Capela do Fundador.

A obra foi realizada por fases durante cerca de 150 anos, entre os anos 1388 e 1533, podendo verificar-se vários estilos presentes, que são:

- Estilo Gótico;
- Estilo Manuelino;
- Estilo Renascentista.

Estilo Gótico: Nos Reinados de D. João e D. Duarte, entre 1388 e 1438, iniciou-se a construção da Igreja, sacristia, Claustro e anexos, tendo sido atribuídos os projetos e a direção inicial dos trabalhos ao mestre Afonso Domingues, num estilo Gótico Radiante, entre 1388 e 1402, sucedendo a este o mestre Huguet, que introduz um Gótico Flamejante, mais rico.

Nesta fase iniciou-se também a construção da Capela do Fundador e foram idealizadas as Capelas do fundador ou Panteão de D. Duarte, como estando alinhadas com a igreja e a sua estrutura octogonal, constituída por sete capelas radiantes separadas por corpos triangulares [11].

Entre 1438 e 1481, no Reinado de D. Afonso V e Regente Infante D. Pedro, houve um grande avanço nas obras do Mosteiro, tendo sido executados os túmulos na Capela do Fundador e iniciando-se as obras do Claustro D. Afonso V, sendo atribuída a direção dos trabalhos ao Mestre Martim Vasques e após a sua morte foi o seu sobrinho que continuou os trabalhos, Mestre Fernão de Évora.

Estilo Manuelino: O Reinado de D. Manuel foi uma época de conclusões, terminando-se as obras nas Capelas e no Claustro Real, sendo o mestre Mateus Fernandes, entre 1480 e 1515, considerado um «grande animador da obra», trabalhando com o mestre João Castilho, entre 1528 até 1532.

Ao Monumento foram acrescentados novos motivos relacionados com símbolos marítimos e elementos vegetalistas, esferas armilares, cruces de cristo, flores de lótus, entre outros, os arcos ogivais foram mantidos, havendo apenas sido implementados alguns sistemas da cobertura, como as nervuras.

Estilo Renascentista: O mestre Miguel de Arruda era considerado um verdadeiro arquiteto do Renascimento, tendo dirigido os trabalhos desde 1533 não havendo indicação da data final da sua colaboração.

O estilo Renascentista encontra-se presente nas Capelas imperfeitas, nos seus arcos de volta perfeita e nas varandas por cima do portal. Esta ornamentação foi inspirada nas ordens greco-romanas, que dava maior atenção às proporções do corpo humano[8].

2.3.2. Extração da Pedra

A documentação disponível dos séculos XV e XVI possui algumas lacunas no que se refere à origem da pedra utilizada na construção do Mosteiro, não sendo sempre especificada a localização, o seu nome ou o seu proprietário, conforme se pode verificar no seguinte excerto: "...estando elle [alcaide menor de Porto de Mós](...)em nosso serujço per bem de carego que tinha dos quavouqueiros que tirauom a pedra pera Santa maria da ujtoria..."

No ano de 1855 D. António da Costa de Souza de Macedo, dizia que foi da "*pedreira de cantaria branca no val da quebrada*, situada na freguesia de Reguengo do Fetal, que se extraiu a pedra com que se fez o edificio da Batalha, e com que actualmente se concerta"[8].

Em 1904 foi publicado um trabalho de Pereira de Sousa, intitulado "Os Calcários do Distrito de Leiria", onde indica as principais pedreiras que, segundo a tradição oral, foram exploradas para a construção do Mosteiro, indicando a sua localização, a descrição do calcário e a sua aplicação, ver Tabela 2.1.[8]

Tabela 2.1 - As Pedreiras utilizadas na construção do Mosteiro da Batalha [8]

LOCAIS DAS PEDREIRAS	CONCELHOS	FREGUESIAS	DESCRIÇÃO DOS CALCÁRIOS	APLICAÇÃO E OBRAS MAIS IMPORTANTES EM QUE FORAM UTILIZADOS	OBSERVAÇÕES
<i>Pia Diogo</i>	Batalha	Reguengo	Calcário oolítico, de grão fino, duro e branco	Em várias localidades próximas.	
<i>Casal dos Grilos</i>	Batalha	Reguengo	Calcário oolítico, de grão fino, duro e branco	Em várias obras na Batalha, Leiria, etc.	
<i>Casal do Gaio</i>	Batalha	Reguengo	Calcário oolítico, de grão fino, duro e branco	Em várias obras na Batalha, Leiria, etc.	Em exploração.
<i>Valle da Pedreira</i>	Batalha	Reguengo	Calcário oolítico, de grão fino, duro e branco	Em várias obras na Batalha, Leiria, etc.	
<i>Curral dos Nettos</i>	Batalha	Reguengo	Calcário oolítico, de grão fino, duro e branco	Em várias obras na Batalha, Leiria, etc.	Pouca exploração.
<i>Outeiro de Sellada</i>	Batalha	Reguengo	Calcário oolítico, de grão fino, duro e branco	Em várias obras na Batalha, Leiria, etc.	Pouca exploração.

Nota: Este quadro foi feito com base num outro intitulado “*Principaes Pedreiras de calcareos do Dogger dos concelhos de Porto de Mós e Batalha*”, apresentado por Pereira de Sousa no seu trabalho sobre calcários de Leiria.

Apesar do autor não fazer nenhuma referência, sabe-se que foi também largamente explorada a pedreira de Valinho do Rei, freguesia Regueiro do Fetal, verificando tratar-se de um calcário oolítico, com baixos valores de porosidade e permeabilidade.[8]

2.3.3. Alterações e Restauros

As intervenções realizadas inicialmente no Mosteiro eram essencialmente de manutenção e pequenas reparações, para que este permanecesse habitável, havendo uma proteção régia dada pelos monarcas que foi oscilante ao longo das épocas, em forma de renda, prendendo-se pela carga histórica associada ao Mosteiro.

Sabe-se que o Arquiteto James Murphy veio a Portugal para desenhar o Mosteiro em 1788, tendo acompanhado os desenhos com uma introdução teórica onde discutia os fundamentos da arquitetura gótica, “Plans, Elevations, Sections and Views of the Church of Batalha” publicado entre 1792 e 1795, (Figura 2.5).

Nos finais do século XVIII o Mosteiro da Batalha atraía uma grande importância no ambiente internacional, devido a várias publicações de autores ingleses, como James Murphy e Thomas Pitt, e o interesse desses autores pelo estilo gótico. As obras efetuadas no Mosteiro nem sempre foram referenciadas em documentos, ou sequer era feita a sua descrição detalhada, e com a extinção das Ordens religiosas, em 1834, as obras de restauro foram suspensas.

Em 1836 o Rei D. Fernando visitou o Mosteiro, tendo verificado o estado lastimável de ruína e abandono em que se encontrava. Desencadeando, assim, uma inspeção geral das obras públicas do reino, tendo em 1839 sido apresentado um «programa das obras necessárias para a conservação e embelezamento do convento da Batalha», conforme portaria do Ministério do Reino. As primeiras obras mais urgentes realizadas prenderam-se com «*desentupimento do cano real, limpeza, das cantarias e livres de herva que asarruinam, vidraça para as genellas nos lugares onde faltão...e bem assim reparos da cobertura da igreja e mais partes bellas do antigo edificio*» [8]. Entre 1840 e 1900, documentos referentes ao restauro indicam que neste período foram realizadas obras de restauro e reconstrução de elementos danificados, criados novos elementos e adornos [12].

Havendo indicação que até ao final do século os trabalhos se repartiram por três zonas, a saber: Capela do Fundador no seu interior, com restauro dos túmulos; Capelas Imperfeitas e a sua ligação à abside da igreja; e arranjo urbanístico em redor do Mosteiro. As intervenções no final do século prenderam-se como restauro do portal lateral da igreja, substituição de capiteis, de colunas, realização de platibandas, reparação de túmulos e construção da capela batismal entre 1890 e 1892 [8].



Figura 2.5 - Planta do Mosteiro de Santa Maria da Vitória[10]

3. Pedra de Paramento e suas Patologias

Neste capítulo será apresentada uma análise da pedra calcária, os seus problemas de conservação, os agentes responsáveis pelas suas alterações mecânicas e as patologias mais frequentes.

3.1. Introdução

A pedra de paramento começou a ser utilizadas nas pirâmides egípcias. Os egípcios utilizavam blocos calcários e posteriormente o seu uso foi estendido a igrejas, muralhas, templos e edifícios. Com o passar dos tempos e com as mudanças climáticas, os monumentos começaram a necessitar de intervenções de restauro, e segundo Luís Aires-Barros a alteração de uma rocha consiste na *“desagregação e decomposição levadas a cabo por agentes físicos e químicos naturais, que transformam a rocha noutra produto natural, agora em equilíbrio físico-químico com o novo meio”*[13].

A importância de preservar o património edificado originou a criação de um método de intervenção, definido na Carta de Atenas que foi redigida por Le Corbusier em 1931, sendo até aos dias de hoje ainda um importante marco de referência na restauração do património edificado, tendo havido reformulações e tendo sido criadas entidades como o ICOMOS[14]. A Carta de Veneza, elaborada em 1964 por ocasião do 2º Congresso internacional de arquitectos e técnicos de monumentos realizados em Veneza, e que teve por base a Carta de Atenas, revela a importância da avaliação do diagnóstico, que deve ser realizado por equipas especializadas. Havendo uma primeira etapa, que consiste no estudo patológico, no conhecimento da origem do problema, as suas evoluções, e o estado final, diagnosticando-se estas como estruturais ou não estruturais, de modo a adequar a intervenção ao tipo de patologia[1] [14] [15].

3.2. Rocha Calcária

A rocha calcária é um tipo de rocha abundante em Portugal, e é uma rocha sedimentar, constituída essencialmente por carbonato de cálcio sob a forma de calcite [8] [16]. Estas rochas são geralmente porosas, mas não são forçosamente permeáveis. A porosidade é a

percentagem de vazios existentes num dado volume de rocha e a permeabilidade é a capacidade de uma rocha permitir a passagem de fluidos através dela (água ou óleo) [17].

As rochas calcárias podem ter um aspecto variado, como a cor, a composição, assim como o processo de formação, sendo que os grupos de calcários mais conhecidos são: margas; caliche; tufos calcários; calcário conquífero; giz; calcário recifal; calcário dolomítico. Na região de Leiria as pedreiras são de rochas calcários oolítico, sendo consideradas pedras com boas características para a realização de esculturas, adornos e para a construção.

3.3. Processo de Degradação da Pedra Calcária

As condições ambientais amenas de Portugal contribuíram para que os nossos monumentos em pedra chegassem à atualidade em condições razoáveis, sendo que o aumento da poluição atmosférica e a falta de manutenção e/ou conservação levaram a uma aceleração da degradação dos monumentos nos últimos anos. Este fenómeno verifica-se com maior intensidade nos centros urbanos onde a quantidade de gases de poluição automóvel é maior [1]. As preocupações inerentes às alterações das pedras conduzem a que se olhe para os monumentos como um todo, fazendo-se estudos complexos que exigem a intervenção de profissionais de varias áreas, nomeadamente arquitetura, historia de arte, engenharia civil, geologia, química, biologia e física [2][13].

O primeiro passo é a identificação do tipo de degradação, em que se realiza um levantamento através da observação visual, identificando os vários tipos de patologias existente e relacionando estes com os agentes que as causaram. O conhecimento dos agentes que estão na origem das patologias é essencial, pois só assim se consegue fazer uma caracterização fidedigna das suas causas. Outro ponto importante é a caracterização das patologias em termos estruturais e não estruturais, assumindo-se que as patologias estruturais põem em causa o comportamento da estrutura do edifício e as não estruturais são as que afetam a estética ou funcionalidade dos elementos não-estruturais do edifício.

3.4. Agentes de deterioração

A alteração da pedra pode ser causada por agentes de várias naturezas, na superfície da pedra, através de características internas, como a composição, textura, porosidade e a resistência, e

de características externas, fatores biológicos, químicos, ambientais [3] [4]. Os principais agentes existentes em monumentos como o Mosteiro da Batalha, são:

- Mecânicos: Eventos sísmicos, ação do vento, alterações das condições de carga da estrutura;
- Químicos: presença de sais, humidade e alterações a nível freático ou aluimento de terras;
- Físicos: Vento, ciclo gelo-degelo, cristalização, amplitude térmica;
- Microbiológicos: Fungos, Bactérias, microrganismos, vegetação, excrementos de animais(pombos);
- Ambientais: Macroclima (região em que se insere o edifício), microclima (existência ou não de edifícios envolventes que podem fazer sombra ao edifício, proximidade a cursos de água) e nano-clima (arquitetura do edifício), poeiras emitidas pela indústria, chuvas ácidas;

3.5. Principais Patologias das Pedras utilizadas na Construção do Mosteiro da Batalha

O Mosteiro da Batalha tem suscitado o interesse para a realização de vários estudos, a nível das patologias, da extração das pedras, dos vitrais, das gárgulas, entre outros.

Relacionado com o caso em estudo existem documentos que abordam as patologias e que identificam várias técnicas de inspeção não destrutiva deste monumento. O estudo efectuado por Vazão [10] “Levantamento e caracterização das patologias da Capela do Fundador do Mosteiro de Santa Maria da Vitória” mostra, através de ensaios não destrutivos como esclerometro, termografia, ultrasons, inspeção visual, que existem diferenças significativas nos resultados obtidos, necessitando de uma monitorização periódica. A “Monitorização das vibrações ambientais no Mosteiro da Batalha” realizadas para avaliação das vibrações detectadas no monumentos devido à circulação de veículos ligeiros e pesados no itinerário complementar IC2, para tal realizou medições nos vitrais e na base do edifício, e comparou os resultados obtidos com as normas, norma Portuguesa NP2074 e normas internacionais, a italiana UNI 9916, as inglesas BS 7385 e BS 5228, estudo realizado por Pedrosa [18]. A caracterização da pedra natural permite ajustar as medidas de intervenção, prevenção, manutenção, meios de identificação através da análise dos estudos e ensaios realizados, adaptando os meios e equipamentos à execução.

3.5.1. Patina

A patina em ambientes exteriores pode ser de origem ferrosa ou oxalata. A ferrosa encontra-se nos arenitos e são enriquecidas em ferro ou minerais de argila, normalmente de cor negra ou escura. As oxalatas desenvolvem-se em mármore ou pedras calcárias e são camadas enriquecidas com oxalato de cálcio de cor alaranjada e/ou castanhada [5] [6]. Após a extração da pedra da pedreira, esta fica em contacto com o ambiente, começando desde logo a sofrer alterações por processos mecânicos, fluidos exteriores como o ar, a água e poluição. Estas alterações são superficiais, com uma fina película, e têm uma tonalidade alaranjada e castanha, de origem oxalatas, que tendem a agravar-se com o envelhecimento da pedra, sendo que em artigos consultados fazem referência à utilização no passado de produtos orgânicos (ácido sulfúrico diluído, cera e óleos) o que pode ter acelerado o processo patológico [6] (ver Figura 3.1).

A Carta de Restauro de 1972 indica que: *“A patina da pedra deve ser conservada por evidentes razões históricas, estéticas e também técnicas, já que ela desempenha uma função protectora como ficou demonstrado pelas corrosões que se iniciam a partir das lacunas da patina. Podem-se eliminar as matérias acumuladas sobre as pedras - detritos, pó, fuligem, fezes de pombo, etc, usando apenas escovas vegetais ou jactos de ar com pressão moderada. Dever-se-ão evitar, portanto, as escovas metálicas e raspadores, ao mesmo tempo em que se devem excluir, em geral, os jactos de areia, de água e de vapor com forte pressão, sendo, ainda, desaconselháveis as lavações de qualquer natureza.”* [7].



Figura 3.1 – Exemplo de Patina

3.5.2. Crostas Negras

As crostas negras (biogenic crusts) resultam do ataque nas pedras de micro-organismos e poluentes, como o dióxido de carbono, óxido de azoto, ácido clorídrico e cloretos, ácido fluorídrico e fluoretos, ácido sulfúrico, ozono, amónio e poeiras que se incrustam na pedra,

sendo os ventos, a chuva e ciclos de molhagem-secagem favoráveis ao desenvolvimento desta patologia. O fenómeno de incrustação resulta de alterações das propriedades internas das crostas negras, da acumulação de materiais exteriores, e consiste na formação de depósitos espessos que se aglomeram na superfície da pedra. A sua espessura varia entre os 0.05mm e os 10mm, e no caso de zonas protegidas das chuvas a pedra reage com as partículas ácidas, havendo uma ligação das partículas à superfície, adquirindo uma tonalidade entre o cinza claro e o cinza mais escuro, levando ao aparecimento de crostas negras (ver Figura 3.2). Este género de patologia não se desenvolve em pedras que estejam em desagregação, devido à queda constante de material, mas em casos em que o incrustamento das crostas seja avançado este impede a desagregação da pedra, pois age como barreira protetora [3] [6] [8] [9].

Ao longo do desenvolvimento das crostas a pedra vai ficando menos permeável, sendo que o principal mineral presente são os cristais de gesso, cinzas volantes, resultantes de partículas sólidas da atmosfera, como a queima incompleta de combustível fósseis, pólenes e poeiras.

As intervenções para remover as crostas são consideradas uma tarefa delicada, e tal como para a Patina, a Carta de Restauro de 1972 indica que se devem eliminar os elementos acumulados sobre as pedras, como o pó, detritos, dejetos de animais, etc., com escovas de cerda macias e jatos e água de compressão moderada, devendo-se evitar jatos de areia e de vapor com pressão elevada [7]. Em pedras calcárias a limpeza manual ou a colocação de cataplasmas são as mais recomendadas, sendo que qualquer tipo de limpeza requer uma prévia avaliação [3] [6].



Figura 3.2 – Exemplo de Crosta Negra

3.5.3. Degradação Granular

A degradação granular (sanding) é a alteração da superfície da pedra, que se manifesta com a alteração da textura e escamação ou modificação das características interiores da pedra

como o processo de dissolução interna, a deposição de sais e fissuração devido a agentes internos e externos [19]. A alteração de uma rocha consiste na “desagregação e decomposição levadas a cabo por agentes físicos e químicos naturais, que transformam a rocha noutra produto natural, agora em equilíbrio físico-químico com o novo meio” [5].

A causa da degradação granular tem origem na cristalização dos sais solúveis que se encontram na superfície da pedra, provocando um desgaste superficial, podendo ser visível pelas formas arredondadas das arestas, assim como por escamação da pedra que leva ao recuo superficial da mesma. Este género de patologias tem três causas possíveis: a hidratação, expansão e a variação de temperatura e pressão, sendo a pressão de cristalização o mecanismo mais usualmente descrito para a degradação granular. Os cristais de sais presentes em meios porosos devem-se à acumulação de iões solúveis presentes nas rochas e nos solos. Este não são considerados estáveis, devido à existência da possibilidade de se dissolverem novamente, havendo ciclos de cristalização e dissolução, apontando-se a causa ao aumento de temperatura do ar e humidade relativa [3] [10] (ver Figura 3.3).

As experiências relativas à reabilitação de monumentos, em estudos consultados, indicam progressos, mas os estudos nem sempre são conclusivos. O LNEC realizou um estudo em 1990 sobre a necessidade de consolidação para a reabilitação da Igreja de Santa Cruz em Coimbra. A sua fachada é constituída em grande parte por rocha calcária, tal como o Mosteiro da Batalha, tendo-se concluído que o uso de silicato de etilo, atrasa o processo de degradação da pedra calcária [1]. Outros produtos utilizados como consolidantes de acrílico, consolidantes inorgânicos (hidróxido de bário, oxalato de amónio), consolidantes à base de cal (hidróxido de cálcio), entre outros, é importante a realização de ensaios de limpeza, de preferência em locais que não sejam visíveis, para verificar qual o produto que se adequa [3].



Figura 3.3 – Exemplo de Degradação Granular

3.5.4. Alveolização

A alveolização (alveolization) é a deterioração que caracteriza a formação de cavidades na pedra, que ocorrem devido à acumulação de bolsas de sais, apresentando-se na superfície da pedra com diversos tamanhos (máximo 10mm) e geometrias, nomeadamente cilíndricas ou cónicas e com estrutura diferente da envolvente [3] [5] [6]. A erosão caracteriza-se pelo processo de desgaste da pedra sob ação de natureza distinta, podendo ser química, biológica ou mecânica, podendo haver uma ação simultânea dos vários agentes ou individualmente [5]. Os calcários, quando expostos à presença de dióxido de enxofre (chuvas ácidas), sofrem erosão por dissolução, resultante das fracas características das rochas calcárias (ver Figura 3.4).



Figura 3.4 – Exemplo de Alveolização

3.5.5. Colonização biológica

A colonização biológica (biologic colonization) da pedra natural instiga a degradação por processos químicos, por organismos de origem vegetal e animal. A origem vegetal através da proliferação de microorganismo, musgos, fungos, algas, bolores e líquenes que crescem devido a humidade, porosidade e vegetação herbácea, e a colonização biológica, por animais - a ação das suas patas e bicos, os excrementos de pombos, ricos em nitratos e ácidos úricos que reagem e promovem a corrosão, que atacam a pedra e constituintes dos revestimentos e juntas, transportam e acumulam detritos que se depositam na pedra. O desenvolvimento desta patologia é favorável em zonas húmidas, sombrias ou zonas de escorrência de água, em fendas, locais porosos e juntas abertas são locais propícios para o crescimento de vegetação e acumulação de detritos (ver Figura 3.5).

A remoção de musgos, algas, bolores e líquenes deve ser realizada manualmente recorrendo a espátulas de madeira, escova de cerdas e posterior aplicação de biocidas que inibem o crescimento dos organismos vivos, a escolha do biocida deve ter em conta o tipo a eficiência

na eliminação da patologia e que não seja prejudicial para o ser humano nem para a pedra. No caso das plantas, para a sua remoção existem três métodos: mecânico (extração manual da planta e remoção da raiz), biológico (introdução de insetos especializados em caso de plantas infestantes) e químico (herbicidas que impedem crescimento da vegetação, devendo ter em atenção a dosagem, devido aos riscos ambientais e a saúde humana).

O combate à colonização animal pode ser realizada recorrendo a várias opções existentes no mercado como: redes (aplicar na fachada, com tons discretos); gel (o gel aplicado em locais onde as aves costumam permanecer); espigões (alumínio ou aço inoxidável, ao longo da fachada onde as aves tendem a permanecer); fios de baixa tensão (fios colocados nos bordos com pequena descarga elétrica quando as aves tentam pousar); dispositivos metálicos (arames que permitam oscilação que incomoda as aves) [3].



Figura 3.5 – Exemplo de Colonização Biológica

3.5.6. Humidade

As manchas de humidade podem ser originadas por diversas causas e/ou motivos, como a fraca carbonatação, saturação e congelamento de argamassas das juntas, cristalização dos sais devido à humidade ascensional por capilaridade, transportando sais presentes no solo, verificando-se que as manchas de humidade poderão estar ocultas com os efeitos da colonização biológica. A permanência de humidade na pedra, os ventos, as chuvas levam a que a humidade passe do exterior do edifício para o interior, causando infiltrações, fissurações. Estes fenómenos físicos contribuem para uma mais rápida degradação dos materiais devido às variações térmicas, a dilatação e contrações dos materiais, os ventos e o congelamento, que instiga a deteriorações nas superfícies impregnadas com água [3] [6] [10] (ver Figura 3.6).

A espessura da pedra é considerada um fator que influencia o seu comportamento, quanto mais reduzida a espessura maior a vulnerabilidade a manchas e perda da integridade do material, e quanto maior a espessura da parede maior é a ascensão capilar [3] [11].

A humidade é uma consequência da deterioração das juntas, causada pela alteração dos componentes, devido a fatores mencionados anteriormente. Um dos problemas associados a esta patologia é a entrada de água, o que põe em causa a ligação entre os elementos pétreos [12]. O refechamento ou substituição das juntas necessita ter em conta a qualidade da argamassa escolhida, melhores propriedades e maior durabilidade, a nível mecânico a argamassa deve ter baixo módulo de elasticidade e elevada deformabilidade.



Figura 3.6 – Exemplo de Manchas de humidade

3.5.7. Fendas, fissuras e juntas abertas

As fendas, fissuras e junta aberta são em vários casos responsáveis por futuros problemas de humidade. A importância de saber diferenciar fendilhação de fissura é primordial, ambas são resultantes da rotura do material rochoso. As fendas estão associadas em alguns casos a assentamentos diferenciais das fundações do edifício, com inclinações, aberturas longitudinais, que transpõem a peça na totalidade, havendo uma rotura e largura superior a 2mm. As fissuras podem ser microfissuras (são de pequenas dimensões, inferiores a 0.2mm e superficiais), ou fissuras médias (com cerca de 0.2 a 2 mm), caracterizam-se pela descontinuidade da pedra, fina, em estrela, fio de cabelo e visível a olho nu, a sua causa são acumulações de tensões, havendo um esforço de tração num ponto que excede a resistência local na pedra, ou fissura de descompressão, resultante de uma carga elevada a que a pedra foi submetida [3] [2] [13]. A junta aberta associa-se a esforços atuantes e assentamentos das fundações do edifício, podendo ser causadas também por variações de temperatura e sismos, esta patologia favorece a infiltração de humidade (ver Figura 3.7).

Nas fissuras e nas fendas, dependendo do caso de serem finas ou profundas, o procedimento passa por limpar seguindo-se a aplicação de uma cal no fundo até cerca de 3cm da superfície e completar o restante com argamassa; no caso de serem muito profundas, é sugerido uma argamassa inicial mais viscosa [13].

O refechamento ou substituição das juntas necessita ter em conta a qualidade da argamassa escolhida, melhores propriedades e maior durabilidade, a nível mecânico a argamassa deve ter baixo módulo de elasticidade e elevada deformabilidade [3] [13].



Figura 3.7 –Exemplo de Fissura e Juntas abertas

4. Metodologia, Ensaios realizados, Processamento e análise

Será abordado de uma forma sucinta os processos de obtenção de imagens com veículos não tripulados (UAS), tratamento das imagens através do processo fotogramétrico, descrição sucinta de alguns tipos de classificadores de ortomosaicos existentes, como é obtida a matriz confusão, índice de concordância Kappa para verificação e comparação de resultados, como realizar ensaios GPR e aquisição de imagens de termografia [20], [21].

Neste capítulo será apresentada a descrição da metodologia seguida, segundo a ordem de trabalhos desenvolvidos. nomenclatura escolhida, descrição do método de obtenção da classificação manual e da classificação automática, como realizar os ensaios de GPR e como obter as imagens de termografia.

4.1. Obtenção de Imagens UAS

O avanço tecnológico a nível da deteção remota, no que se refere à obtenção de imagens com recurso a veículos não tripulados (UAS), tem sido significativo e cada vez mais usado na classificação dos solos e mais recentemente a nível dos edifícios e coberturas.

A nível internacional o uso de Unmanned Aircraft Systems (UAS) tem sido comum, na inspeção de ferrovias, barragem, pontes, plataformas de petróleo, telhados e edifícios de difícil acesso, possibilitando a inspeção das obras de arte sem intervenção física e de forma segura. Mas este sistema começou por ser usado pela marinha americana para missões de reconhecimento, em contexto da guerra do golfo, na desert storm, e também na operação desert shield [22][23]. Apesar da utilização de veículos aéreos não tripulados ser aparentemente uma tecnologia recente, em 1898 Nicolai Tesla apresentou um projeto chamado Electrical Exposition, no Madison Square Garden, que permitia ser controlado remotamente através de radiofrequência. Depois deste, George de Bothezat desenvolveu o quadcopter, um sistema não tripulado com quatro motores dando estabilidade ao veículo no ar[23], [24].

A evolução até aos *drones* foi imensa, trazendo um potencial a nível do uso de pequenos equipamentos não tripulados na deteção remota, tanto a nível ambiental como a nível da construção, muitos foram os autores que reconheceram o potencial desta ferramenta, entre

eles Tomlins em 1983, seguindo-se Laliberte, Rango e Herrik (2007), Watts, Ambrosia e Hinkley (2012), Anderson e Gaston (2013) entre outros, sendo que mais recentemente os grandes impulsionadores foram Klemas (2015) e Jensen (2017). Estes lançaram vários desafios, relacionados com as condições ambientais de voo, potência do aparelho, escassez de sensores leves disponíveis no mercado, gestão das imagens recolhidas, peso do aparelho, de forma a cumprirem as normas de segurança durante o tempo de voo. Todo material envolvido estava apenas disponível para projetos com elevado financiamento, o que hoje em dia não se verifica, podendo já encontrar-se «UAS equipados com uma câmara RGB relativamente boa, capaz de captar alta qualidade de imagens estáticas RGB (por exemplo, > 20 megapixel) e vídeos (por exemplo, vídeo > 4k). Quando uma meta do projeto de sensoriamento remoto é captar imagens estáticas de alta resolução para interpretação ou fotogrametria, podem ser empregadas UAS com câmaras RGB integradas. Essas câmaras RGB geralmente incluem áreas CMOS entre 29 mm² e 225 mm² e arrays de pixels de, pelo menos, 12 milhões»[23][25].

4.2. Processamento fotogramétrico do bloco de imagens

O processo utilizado na produção da ortofoto da fachada do mosteiro constou de duas fases: 1) Planeamento e execução de voo; 2) Processamento do bloco de imagens utilizando software baseado em processamento fotogramétrico recorrendo ao método Structure from Motion (neste caso, o Agisoft Photoscan Professional versão 1.4).

No planeamento de voo foi tido em atenção que este iria ser feito de forma manual com um intervalo de disparo fixo e a uma distância de 10m da fachada. No processamento do bloco de imagens (BBA Bundle Block Adjustment) foram utilizadas 18 distâncias cujos valores foram obtidos a partir dum alçado existente em CAD. A exatidão obtida no BBA foi de 0.0275m (ver Figura 4.1).

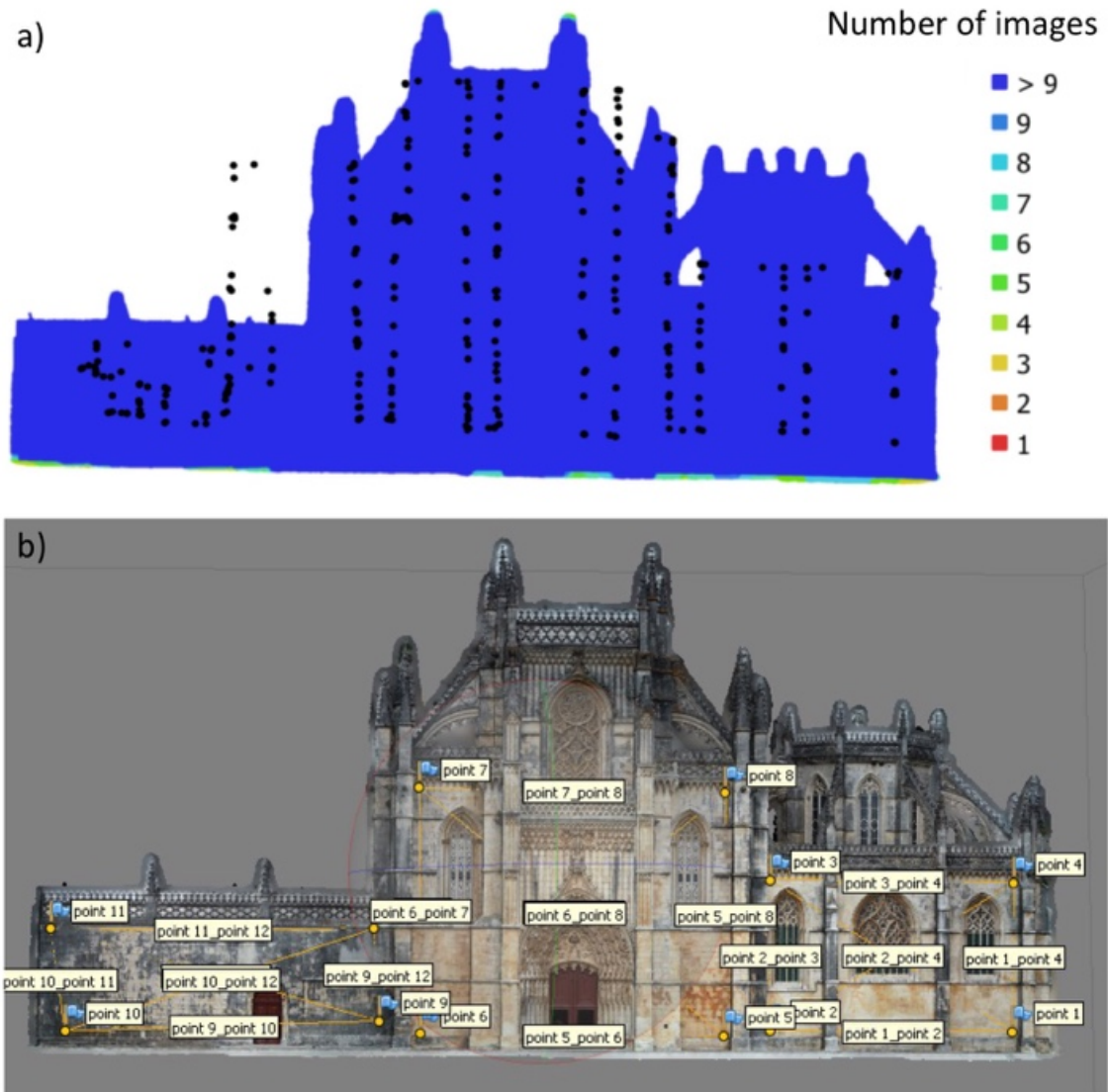


Figura 4.1 –a) Localização dos centros das imagens e densidade de imagens; b) Barras de escala utilizadas no BBA.

O levantamento realizado com câmara RGB, acoplada ao *drone*, permitiu obter uma ortofoto da fachada do Mosteiro da Batalha (Figura 4.2) com uma resolução final (GSD – Ground Sampling Distance) de 3.62 mm/pix.

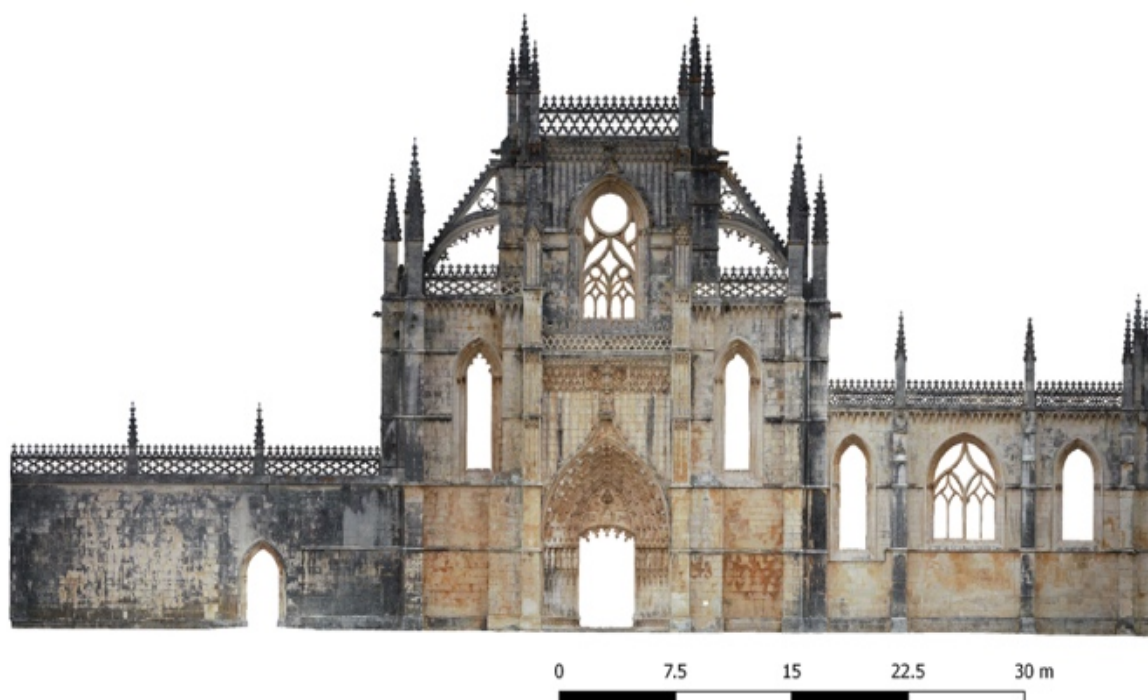


Figura 4.2 – Ortofo da fachada realizado com o drone

4.3. Classificação do ortomosaico

A classificação de imagens é um método de identificação dos tipos de solos, estado de conservação de coberturas, por exemplo, mas que tem vindo a ser usado para outros fins, como em edifícios de valor patrimonial. Existem dois tipos de classificadores de imagem: os classificadores não supervisionados e os classificadores supervisionados [20], [21], [24], [26]–[29].

A classificação não supervisionada é realizada através da identificação de amostras espectrais distintas, sendo os algoritmos mais utilizados os K.means e o Isodata. Estes classificadores agrupam amostras espectrais semelhantes, associando cada pixel da imagem à amostra espectral mais próxima, sendo que quanto maior a diversidade da amostra, maior a certeza de todas as classes estarem representadas[24][28][29]. No método K-means, há um agrupamento de pixéis segundo as suas características espectrais, a que são denominados clusters, são classes espectrais. O processo consiste numa estimativa para verificar o número de interações e no estabelecimento da correspondência entre as classes espectrais obtidas e as classes desejadas.

O método ISODATA é conhecido como uma modificação dos algoritmos clustering dos K-means. É um meio de interpretação de imagens, através da identificação de padrões típicos

ao nível das cores cinza. As áreas de treino permitem agrupar pixéis que determinam a agregação dos dados e têm em conta o número de bandas espectrais. A classificação supervisionada baseia-se na utilização de algoritmos para determinar os pixéis sendo que é considerado um processamento de imagens semiautomático (KNN Classifier) [30].

A classificação supervisada utiliza o número de algoritmos para restringir os pixéis, sendo a primeira tarefa a seleção de áreas de treino, criando áreas de amostragem, devendo as áreas ser de dimensões equivalentes e homogéneas, para garantir a qualidade espectral de cada classe. Por fim, é realizada a classificação da imagem e posterior análise dos resultados obtidos e a matriz de exatidão dos classificadores[24], [27]–[29].

De seguida são apresentados alguns dos métodos de classificação supervisada.

- Método Paralelepípedo

Utilizado para classificar imagens de reduzida variação espectral, sendo as classes definidas por áreas em forma de paralelepípedo que são os limites de decisão. Este método tem desvantagens, tais como o facto de não conseguir classificar pixéis que não pertençam a nenhum rectângulo definido, não associando aos pixéis que pertencem a determinada classe, no caso de haver sobreposição o algoritmo pode ter dificuldades em separar os pixéis da sobreposição[28], [29].

- Método distância mínima

Este método é aplicado a classificações mais simples, não depende do número de pixéis selecionado para cada área de treino, mas da informação espectral das áreas de treino, isto é, apenas necessário calcular médias associadas a cada área de treino[28], [29].

- Método distância Mahalanobis

O classificador de distância Mahalanobis considera que existe semelhança da representação a nível espectral das áreas de treino, assumindo que a co-variância da amostra é igual, sendo considerada mais rápida que o método da distância mínima[28], [29].

- Método Verosimilhança

“[...] usa os dados das áreas teste para estimar as médias e variâncias das classes, que são geralmente utilizadas para estimar probabilidades [...] considerando não só os valores médios, para associar os pixels às classes, mas também a variabilidade dos valores de brilho nessa classe. A regra de decisão da «máxima probabilidade», implementada quantitativamente para considerar classes múltiplas e várias bandas espectrais

simultaneamente, constitui uma poderosa técnica de classificação. Implica cálculo intenso, tendo por isso a desvantagem de requerer mais recursos de computação que a maioria dos outros métodos” [20][24].

- Método K-nearest neighbours

O método KNN calcula a distância euclidiana entre cada objecto da imagem segmentada e todos os objectos das amostras de exemplo, definidas à priori. A distância é medida em várias dimensões, tantas quantos forem os atributos dos objectos das amostras, nomeadamente, os atributos espectrais, de textura e espaciais. Com este algoritmo, o software calcula os atributos para todas as classes definidas e estes detêm o mesmo peso na classificação[24], [28], [29].

4.3.1. Matriz de erro (ou confusão)

Esta matriz avalia de uma forma global os resultados obtidos pelo classificador, a sua avaliação requer um olhar crítico e não só verificar o valor final, mas o resultado obtido em cada classe, interpretando as classes de referência. A exactidão da classificação por parte do utilizador para cada classe do classificador permite obter uma correcta classificação, sendo que o erro vem da percentagem de pixels classificados em classes erradas[28].

4.3.2. Índice de concordância Kappa

“A análise Kappa é uma técnica multivariada discreta de uso na avaliação da precisão. O método foi introduzido para a comunidade de detecção remota em 1981”. Este método permite avaliar a harmonia entre os mapas e mede a diferença entre omissões e pixels classificados correctamente, sendo considerada uma medida de avaliação da exactidão global rigorosa [28].

4.4. Metodologia de Classificação e Ensaios

4.4.1. Nomenclatura Proposta de classificação

A nomenclatura proposta tem por base estudos analisados, partindo das patologias mais comuns e características do tipo de rocha utilizada na construção do Mosteiro, sendo que existem patologias que se vão alterando ao longo dos tempos devido a alterações climáticas, assim como à poluição que envolve o monumento.

Numa primeira fase foram consideradas seis patologias mais frequentes em rochas calcárias, nomeadamente: patina, crostas negras, alveolização, degradação granular, colonização biológica e humidade. Na Tabela 4.1 apresenta as seis patologias, sendo que foi acrescentado uma sétima patologia, apesar de identificada como patologia, esta serve para caracterizar as pedras novas ou limpas, e estas foram identificadas como “No Pathologies” (“Sem Patologias”).

Tabela 4.1 – Nomenclatura classificação manual

Patologias	Designation	Designação	Tipo
1	Patina	Patina	Química
2	Biogenic Crusts	Crostas Negras	Química
3	No Pathologies	Sem Patologias	Física
4	Sanding	Degradação Granular	Física
5	Alveolization	Alveolização	Mecânica
6	Biologic Colonization	Colonização Biológica	Microbiológico
7	Moisture	Humidade	Ambiental

Numa segunda fase, a nível da caracterização automática, a nomenclatura diverge ligeiramente, isto porque a metodologia implementada com os softwares Ecognition e QGis não permite identificar corretamente patologias como alveolização, degradação granular, colonização biológica, humidade.

Note-se que, mesmo visualmente, as tonalidades de cor associadas a estas patologias são muito parecidas ou coincidentes com patologias como a patina e as crostas negras, havendo sobreposição de patologias. Na Tabela 4.2 apresenta a nomenclatura para a classificação automática, focando-se principalmente na patina e biogenic crusts, este resultado obteve-se através de várias simulações no QGis. A possibilidade de separabilidade entre as duas patologias mais frequentes verificou-se, existindo tons de cor com texturas diferentes dentro da mesma classe, na classificação automática.

Tabela 4.2 – Nomenclatura classificação automática

Patologias	Designation	Designação	Tipo
1	Patina 1	Patina	Química
2	Patina 2	Patina	Química
3	Biogenic Crusts 1	Crostas Negras	Química
4	Biogenic Crusts 2	Crostas Negras	Química
5	No Pathologies	Sem Patologias	Física

Numa fase posterior, considerou-se pertinente a junção das classes dentro da classificação automática, para no final ser possível fazer uma comparação de forma equivalente, com a classificação manual, passando assim de 5 classes para 3 classes, Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Nomenclatura de resultados

Patologias	Designation	Designação	Tipo
1	Patina	Patina	Química
2	Biogenic Crusts	Crostas Negras	Química
3	No Pathologies	Sem Patologias	Física

4.4.2. Classificação Manual

A classificação manual consiste numa avaliação tradicional. É a primeira avaliação realizada a qualquer edifício, e realiza-se através da observação e análise dos factores patológicos por inspeção visual requerendo uma avaliação periódica, tornando-se demorada e dispendiosa, assim como baseada na experiência do indivíduo. No caso em estudo, a avaliação das patologias foi realizada através das imagens fotogramétricas (ortomosaicos) fornecidas, tendo-se dividido a fachada do Mosteiro da Batalha em três áreas de treino, para contabilização do tempo despendido para classificação das patologias em cada uma delas (fachada da Igreja – área 1; Capela do Fundador – área 2; restante área – área 3) – Figura 4.3.

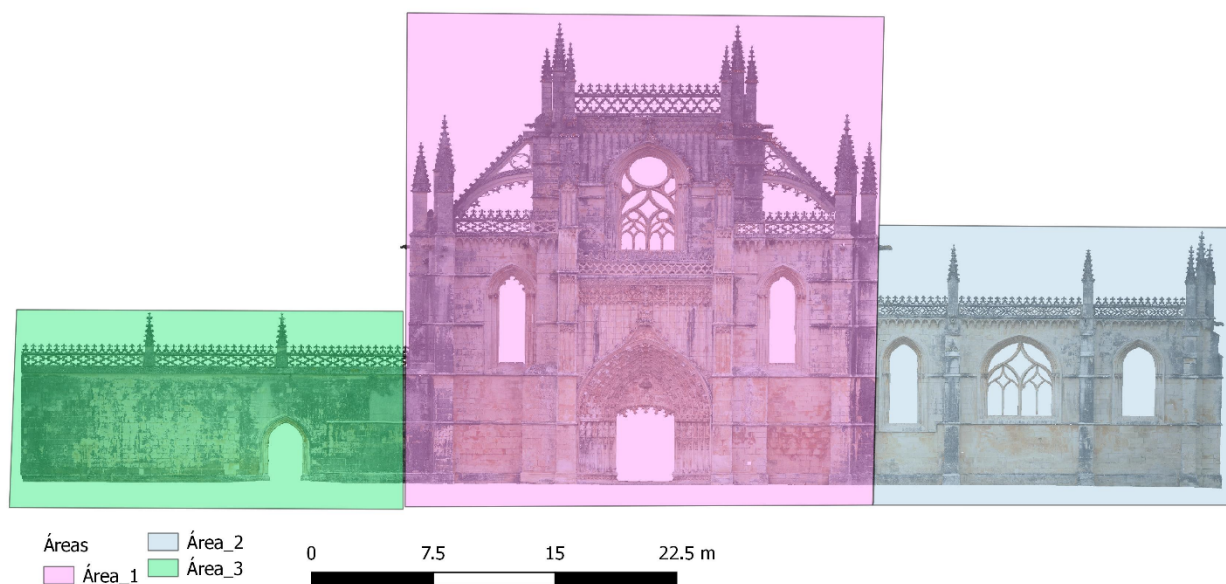









Figura 4.3 – Áreas Fachada do Mosteiro Batalha

Após a definição das várias áreas, iniciou-se no QGis a identificação das patologias, primeiramente criou-se uma shapefile polígono para facilitar a criação das várias áreas de cada patologia, tendo em conta a Tabela 4.4, onde se encontra as amostras visuais de cada classe, assim como a cor que a define em cada shapefile.

Tabela 4.4 – Amostra visual das classes da classificação manual

Patologias	Patina	Biogenic crusts	No Pathologies	Sanding	Alveolization	Biologic colonization	Húmidade
Amostra visual							
Cor	1	2	3	4	5	6	7

Terminada a classificação manual procedeu-se à etapa seguinte que consistiu no cálculo da área ocupada por cada patologia, para tal através da ferramenta “abrir tabela de atributos”, “calculadora de campos”, criar campo virtual, com nome de campo “área_m2”, tipo de campo: número decimal(real) com a expressão “\$area” obtendo uma coluna com o valor de cada área de patologia, ver Figura 4.4.

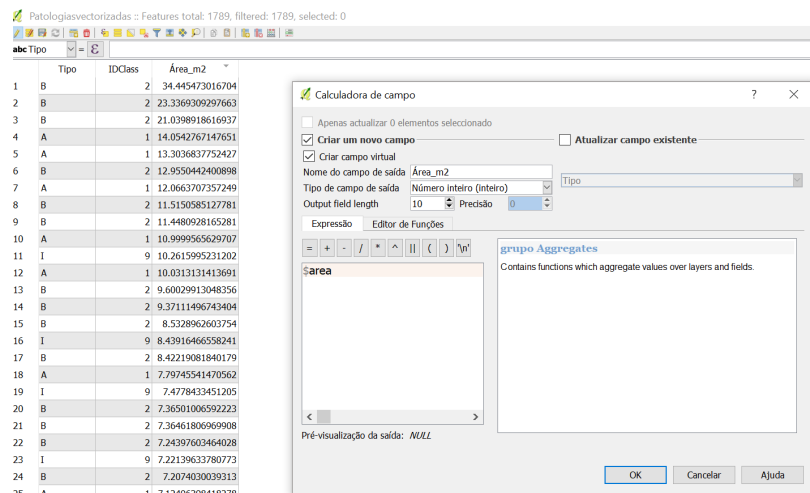


Figura 4.4 – Imagem do QGIS – “calculadora de campo”

A classificação da imagem manual permitiu elaborar duas tabelas, uma associada a informação relativa às áreas em m2 de ocupação de cada patologia e outra do tempo utilizado para caracterização de cada área do Mosteiro da Batalha.

Concluída a abordagem da metodologia baseada na classificação manual, iniciou-se a classificação pixel-a-pixel. Os valores obtidos e o resultado da classificação manual encontram-se no capítulo 5.2, referente aos resultados.

4.4.3. Classificação Automática

Os classificadores automáticos baseiam-se nas propriedades da radiação que a superfície da pedra natural da fachada reflete e nas características que patologias associadas refletem

consoante o comprimento de onda (cores associadas), permitindo consoante o tipo de classificador verificar o nível de exatidão das imagens entre os dois métodos e a avaliação visual, permitindo obter a percentagem de exatidão entre os métodos.

A classificação automática divide-se em dois tempos, a classificação direcionada ao pixel e a classificação direcionada ao objecto. As classificações foram realizadas utilizando o software Ecognition Developer e QGis, para a classificação «KNN.Classifier» e posteriormente o QGis para avaliação do nível de exatidão, recorrendo a ferramenta «AcaTama» seleccionando um número de áreas de treino aleatórias.

O método realizou-se inicialmente com 5 classes, e posteriormente com 3 classes em cada um dos classificadores.

Os classificadores automáticos apresentam um número menor de patologias em relação ao classificador manual, esta situação pode dever-se ao facto dos tons associados a algumas das patologias coincidir com patologias mais visíveis, tal como a patina engloba patologias como a degradação granular e a alveolização, pois estas adquirem na sua superfície a mesma tonalidade.






4.4.4. Classificação Pixel-a-Pixel

A abordagem exposta apresenta apenas os resultados da classificação supervisionada (KNN Classifier), em que o método do paralelepípedo foi utilizado criando as classes que são delimitadas por uma área em forma de paralelepípedo, através da criação de shapefiles do tipo polígono, para cada uma das patologias e é formada um conjunto de amostras dentro de cada classe.

- **AMOSTRA 1- 5 Classes**

Numa fase inicial, foi utilizada uma nomenclatura que difere da utilizada para a classificação manual, Tabela 4.5, tendo esta apenas 5 classes e tendo-se dividido a patologia patina em patina1 e patina 2, assim como a biogenic crusts em biogenic crusts1 e biogenic crusts 2.

Tabela 4.5 – Amostra visual das classes da classificação automática (amostra 1)

Patologias	Patina 1	Patina 2	Biogenic crusts 1	Biogenic crusts 2	No Pathologies
Amostra visual					
Cor	1	2	3	4	5

Para cada classe de ocupação foram criadas em média 15 áreas de teste, tendo em conta a cor, a forma (que deve ser igual ou muito aproximada entre elas), estando distribuídas uniformemente de forma a obter bons resultados na classificação.

Este estudo foi realizado em dois softwares distintos, o QGis e o Ecognition, através do classificador “KNN Classifier” para se realizar uma comparação de qual apresentaria melhores resultados, Tabela 4.6.


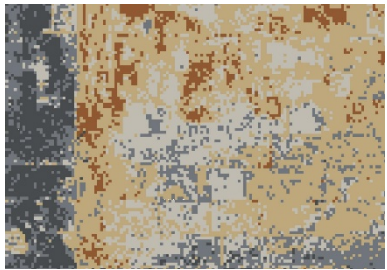
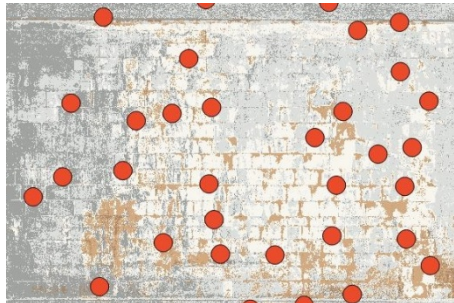
KNN Classifier	QGis	Ecognition Developer
Amostra visual		

Tabela 4.6 – Amostra visual da Amostra 1 para classificação nos dois softwares.

Com os resultados de classificação nos dois softwares, foi introduzido no Qgis para realizar o estudo do nível de exatidão através do *Plug in AcaTama*, que através de amostragem aleatória de combinação de coordenadas x,y, sendo que o tamanho da amostragem é definido previamente, cerca de 57 pontos para cada patologia, num total de 289 pontos aleatórios no conjunto das cinco patologias (o número de pontos foi testado, tendo-se iniciado com cerca de 60 pontos para cada patologia), que são classificados manualmente. O AcaTama calcula o nível de exatidão e apresenta os resultados em cinco tabelas, sendo que para o caso de estudo a tabela mais importante é a “matriz de erro”, que apresenta os valores da avaliação da precisão quanto à estimativa, Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Amostra visual dos pontos AcaTama

	AcaTama
Amostra visual	

Analisando os dois classificadores, visualmente, observa-se muita confusão espectral entre as classes, Tabela 4.6, isto é, a classificação no Ecognition define melhor as áreas de patologias, aproximando-se mais da realidade do terreno.

AMOSTRA 2 - 3 Classes

A classificação pixel-a-pixel de 3 classes obteve-se unindo as patologias Patina1 e Patina 2, assim como Biogenic crusts1 e Biogenic crusts2, esta circunstância devem-se ao facto de na classificação manual não ter sido considerada a divisão destas patologias.

Deste modo, no QGis através das “ferramentas de processamento” e em seguida “r.reclass” escolhendo o “Input raster layer” (ficheiro KNNPixel) e introduzir as variáveis a unir, obtiveram-se assim 3 classes com a união das patinas e das biogenic crusts, Figura 4.5.

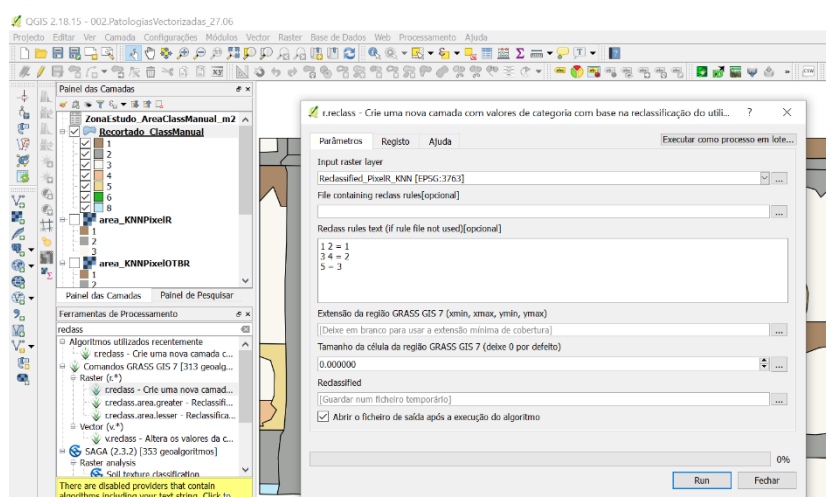


Figura 4.5 – Imagem do QGis – “r.reclass”

Com a junção das patologias foi possível através da “ferramenta de processamento” e “r.report” obter as áreas para cada patologia, assim como a área total da fachada em m² (metros quadrados), Figura 4.6.

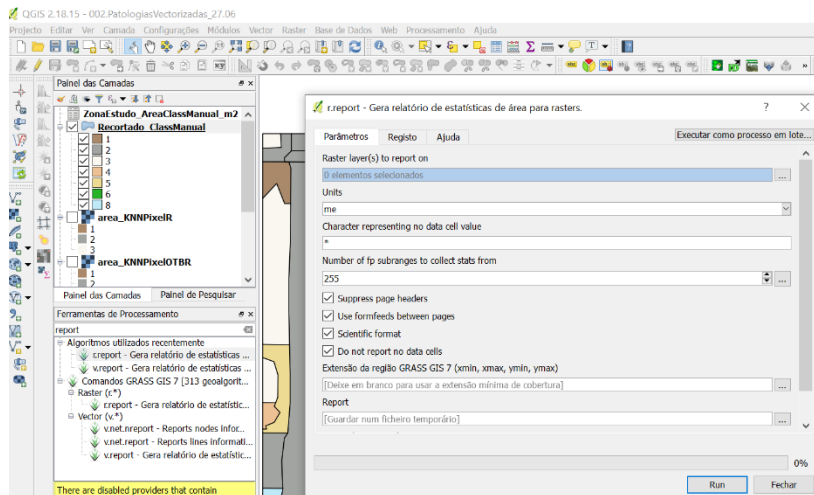


Figura 4.6 – Imagem do QGIS – “r.report”

As imagens resultantes do processo metodológico, assim como as tabelas e descrição encontram-se no capítulo 5.2, referente aos resultados.

4.4.5. Classificação Objecto

A Classificação direcionada ao objecto não classifica os pixéis individualmente, mas sim um conjunto de pixéis. Este método de classificação realizou-se no Ecognition Developer, tendo como ponto de partida a segmentação da imagem, cujo processo passa pela construção de uma rede de objectos e posterior classificação com base nos critérios como a relação entre objectos, através da informação espectral e espacial, considerando não apenas as características dos pixels, mas também propriedades como a cor, a forma, a área, a textura, entre outras.

As etapas desta classificação, são:

- ✓ A primeira etapa - segmentação da imagem em objectos, Figura 4.7;
- ✓ A segunda etapa - seleção das amostras, para cada classe patológica, definida anteriormente;
- ✓ A terceira etapa - cálculo dos atributos espectrais, cor, Tabela 4.8;
- ✓ Por fim, a aplicação do algoritmo de classificação o KNN Classifier.

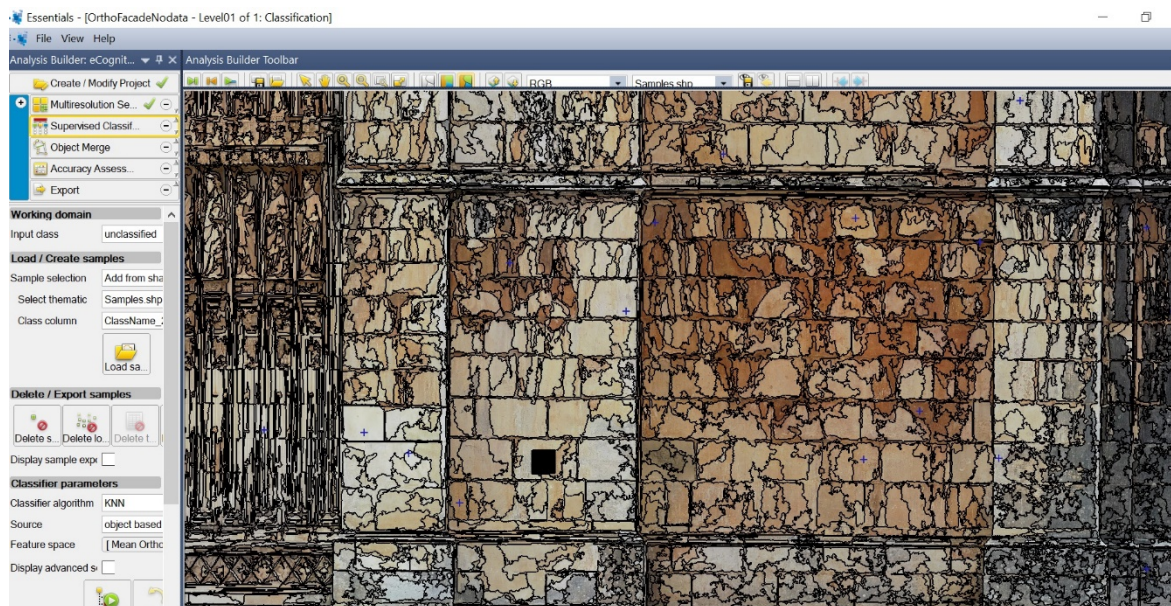




Figura 4.7 – Segmentação Acatama

Tabela 4.8 – Amostra visual Segmentação Ecognition

	Segmentação
Amostra visual	
	

Após obter a classificação KNN direccionada ao objecto, inseriu-se o resultado no QGis para verificar o nível de exatidão, através da ferramenta AcaTama da mesma forma que se fez para a classificação pixel-a-pixel e que são classificados manualmente. Com o mesmo número de pontos e tendo em atenção o tipo de classificação, isto é, os pontos identificados

como patina na classificação pixel-a-pixel têm de ser identificados da mesma forma na classificação direcionada ao objecto, para que não haja discrepância.

No capítulo 5, resultados, serão apresentadas as imagens e tabelas associadas à análise da classificação direcionada ao objecto, para amostras com 5 classes e amostras com 3 classes. Por fim, realizar-se-á uma comparação com os valores obtidos na classificação pixel-a-pixel de forma a observar o desempenho de classificação de imagem nos dois classificadores.

4.4.6. Ground-Penetrating Radar

O método Ground Penetrating Radar (GPR) tornou-se mais popular através das teorias eletromagnéticas de Maxwell em 1864, posteriormente Hulsmeier, 1904 e Daniels em 1996 utilizaram os sinais eletromagnéticos para identificação de objectos metálicos[31].

A aquisição de dados através de antenas de GPR pode ser utilizado para levantamentos geológicos, de estruturas ou de vias de comunicação. Este método baseia-se na transmissão eletromagnética de ondas rádio de baixa frequência (<1000Hz) ou alta frequência (10 MHz a 2.5GHz), em que a baixa frequência é utilizada para estudos em escalas profundas e as altas frequências permitem analisar superficialmente, Figura 4.8[32][33][34].

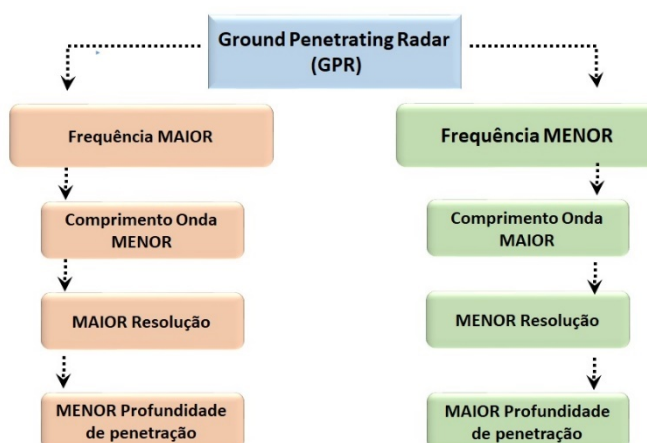


Figura 4.8 – Representação esquemática da relação frequência, comprimento de onda, resolução e alcance do sistema GPR, adaptado de [33]

As antenas são transmissoras de sinal GPR que permitem medir o tempo que leva a energia eletromagnética para viajar da antena para a interface e de volta, normalmente, GPR produz um registro de tempo-distância do subsolo. Os resultados apresentam-se em radagramas, que é uma imagem bidimensional onde se identificam as variações detectadas pelo GPR (Figura 4.9) [35].

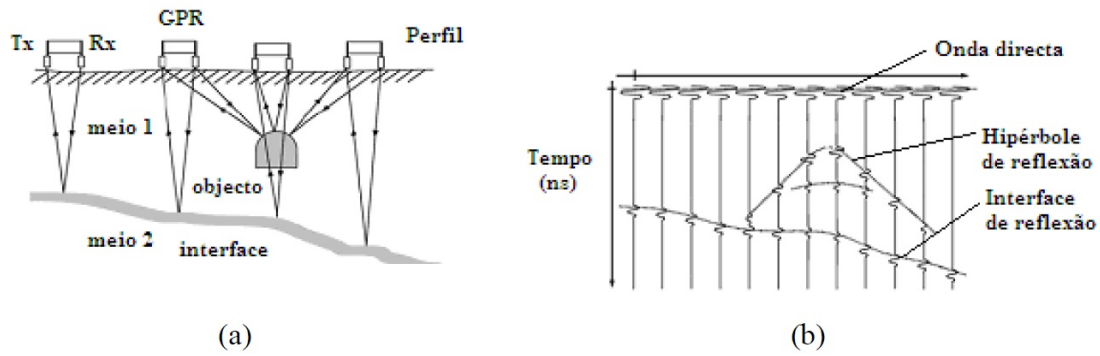


Figura 4.9 –Modo de aquisição (a) e registo de resultados (b), adaptado de [32]

Os radargramas são constituídos por um eixo horizontal que representa a extensão da zona de ensaio e identifica a variação lateral da intensidade, no eixo vertical mostra o tempo da trajetória da onda que indica o intervalo de tempo entre a emissão do sinal de radar, a interação com o meio (reflexão, refração, atenuação, etc) e a recepção do sinal gerado[32]–[34].

O processamento dos dados obtidos permite melhorar os dados, facilitando assim a interpretação dos resultados, este é realizado através de filtros que possibilitam melhorar os radargramas que consiste em multiplicar os traços por uma função de ganho[32].

As vantagens do GPR[32]:

- Ensaio não-destrutivo;
- Rápida aquisição dos dados;
- Flexibilidade no posicionamento e direção do ensaio (dependendo da antena utilizada);
- Ensaio permite deteção de objectos metálicos, armaduras, canalização, entre outros;
- Pré-visualização dos dados no momento da inspeção;

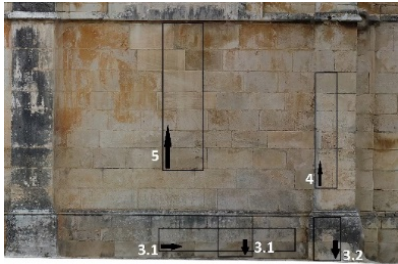

As desvantagens do GPR [32]:

- Influência da rugosidade da superfície exterior;
- Presença de vegetação e de outras obstruções;
- Elementos metálicos refletem grande parte da radiação emitida;
- Não permite determinar diâmetros de varões ou tubagens;
- Processamento de dados (ter de ser realizado por técnicos qualificados);
- Custo do equipamento.

A estrutura interna das paredes do mosteiro tem ao longo dos tempos suscitado várias dúvidas quanto à sua constituição, a teoria mais defendida é que as paredes são constituídas por 50cm de pedra calcária, 50cm de enchimento e por fim 50 cm de pedra calcária. Para tal foram identificadas vários zonas para efectuar o levantamento com GPR, ver Tabela 4.9.

A utilização GPR permite obter imagens de alta resolução, os resultados obtidos através do levantamento das antenas apresentam-se através de radargramas. Neste estudo, foram utilizadas as antenas com frequência 500MHz, 800MHz e 2.3 GHz afim de obter várias resoluções de imagem, estando indicadas da que tem maior penetração de sinal para a menor, Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Amostra visual pontos GPR

	GPR	Material
Amostra visual		
	Identificação pontos e sentido do ensaio	Antenas utilizadas: 500MHz, 800MHz e 2.3 GHz

O local escolhido como área de estudo foi a fachada Capela do Fundador, mais precisamente a última janela mais à esquerda, este local apresenta várias patologias e suscitou interesse a nível da sua constituição, Figura 4.10.



Figura 4.10 – Área estudo GPR

Os ensaios iniciaram-se com a antena de 500MHz, de seguida de 800MHz e por fim com a antena de 2.3GHz, em alguns locais o ensaio foi realizado na zona adjacente, para posterior avaliação das leituras, os ensaios foram realizados por tempos e outros, em relação à distância percorrida na fachada. A Tabela 4.10 apresenta a profundidade de penetração das antenas utilizadas neste trabalho e a resolução de cada antena.

Tabela 4.10 – Amostra visual pontos GPR

Frequência Antena MHz	Profundidade de penetração (m)	Resolução
500	1 a 4	Média/Alta
800	0.5 a 2	Média/Alta
2300	0 a 0.3	Alta

No Capítulo 5, resultados, serão apresentados os radargramas e a interpretação destes, comparando a imagem original com a interpretação efectuada

4.4.7. Termografia

A análise termográfica de um edifício consiste no estudo do mesmo através da deteção de padrões de temperatura dos elementos construtivos, em que a energia térmica é difundida sob a superfície para monitorização da sua variação de temperatura superficial [3].

Este processo requer condições de levantamento específicas, que são [10], [36]:

- Se o objectivo do estudo a realizar for aprofundar a influência das patologias na termografia, a captação de imagens deve realizar-se durante o tempo de secagem, dinâmica e arrefecimento deve realizar-se no período da tarde;
- Se o estudo consistir na deteção de patologias, durante a fase de aquecimento da pedra, para verificar diferenças de temperatura da pedra (período da manhã).

Segundo um estudo realizado no mosteiro de Molybdoskepastos, situado na Grécia, a termografia foi utilizada para avaliar os danos, utilizando termografia infravermelha, possibilitando a identificação de fissuras superficiais, deteção de fugas de água, deteção de fugas estruturais, análise térmica, tendo como meio de análise um código de cores, Figura 4.11 [37][38]. Este método é também utilizado para avaliação de riscos sísmicos, identificação de potenciais pontos fracos, como separação das camadas ou fissuras estruturais que são uma ameaça em caso de terramoto [10], [39].

Os termogramas são constituídos por imagens de várias cores que variam conforme a temperatura a que os elementos foram captados, para tal a sua análise é realizada através da interpretação e comparação com o código de cores, Figura 4.11, [38]. A Figura 4.12 mostra um exemplo do levantamento termográfico de uma casa.

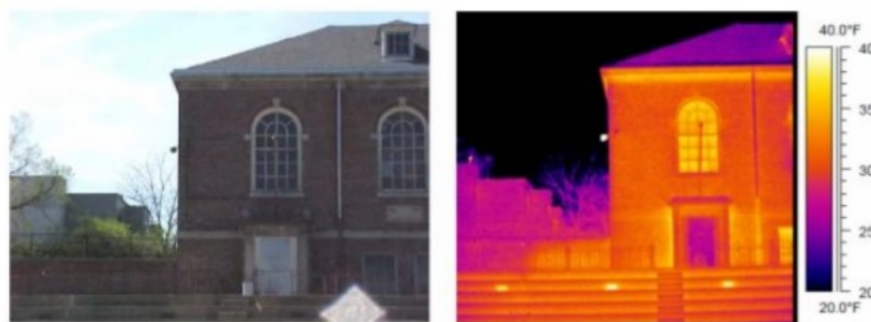


Figura 4.12 –Imagem visual e térmica da fachada de uma casa, adaptado de [38]

As vantagens da termografia [10]:

- Ensaio não-destrutivo, sem contacto físico com objecto a ser inspecionado;
- Execução rápida, inspeção de grandes áreas num espaço de tempo reduzido;

- Eficácia e precisão, obtenção de mapas de temperaturas da superfície e valores reais da temperatura (caso seja seleccionada a emissividade correta);
- Pré-análise no momento da inspeção;

As desvantagens da termografia[10]:

- Capta apenas a temperatura superficial da pedra;
- Necessita de informação de valores como a emissividade (que depende do comprimento de onda, da temperatura, do acabamento da superfície dos materiais e do ângulo de observação) e temperatura de plano de fundo;
- Necessita de operador qualificado;
- Custo do equipamento.

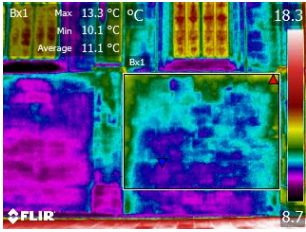

A utilização desta técnica ainda suscita muitas questões como, se termografia de infravermelhos é eficaz para avaliar materiais específicos, se detecta uma patologia com característica específica dentro de um determinado material, questões nem sempre fáceis de responder, para as quais a tecnologia tem sabido encontrar respostas[40][41][42].

A termografia é uma importante ferramenta na identificação de patologias que põem em causa o desempenho energético dos edifícios, no caso dos edifícios históricos de valor patrimonial este método permite efectuar um diagnóstico para avaliar e permitir identificar medidas de reabilitação a serem adotadas.

Para uma medição de termografia é importante que o dia se encontre integralmente nublado, nestas condições a temperatura do céu é igual à do ar, não havendo tantos fatores exteriores a influenciarem as medições [40].

As imagens de termografia foram obtidas através do levantamento com a camara Flir T335, sendo que se verificou a importância de captar imagens o mais paralelo possível à fachada do mosteiro e em condições meteorológicas adequadas, Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Amostra visual Termografia

	Termografia	Material
Amostra visual		
		Flir T335 Câmera térmica

A interpretação das imagens foi realizada recorrendo a estudos consultados e ao software da marca da camera “Flir Tools”, tendo sido possível recortar a imagem apresentando-se assim apenas a zona de estudo. No Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e a sua interpretação.

5. Resultados Classificadores e Ensaio

Neste capítulo, serão apresentados todos os resultados provenientes dos procedimentos metodológicos, bem como as respectivas tabelas de análise dos resultados obtidos na classificação “pixel a pixel”, com classificador “KNN classifier”, os resultados da classificação orientada ao objecto com o mesmo classificador e a classificação manual, assim como a interpretação dos resultados dos ensaios GPR e análise das imagens de termografia.

5.1. Resultados Classificação Manual

Na Figura 5.1, apresenta-se o resultado final da classificação manual realizada no QGis, sobre o ortomosaico inserido, observando a imagem final obtida, verifica-se visualmente que a patologia mais frequente são as crostas negras.

Na Tabela 5.1 obtida no QGis apresenta a área total ocupada por cada patologia e a percentagem das mesmas.

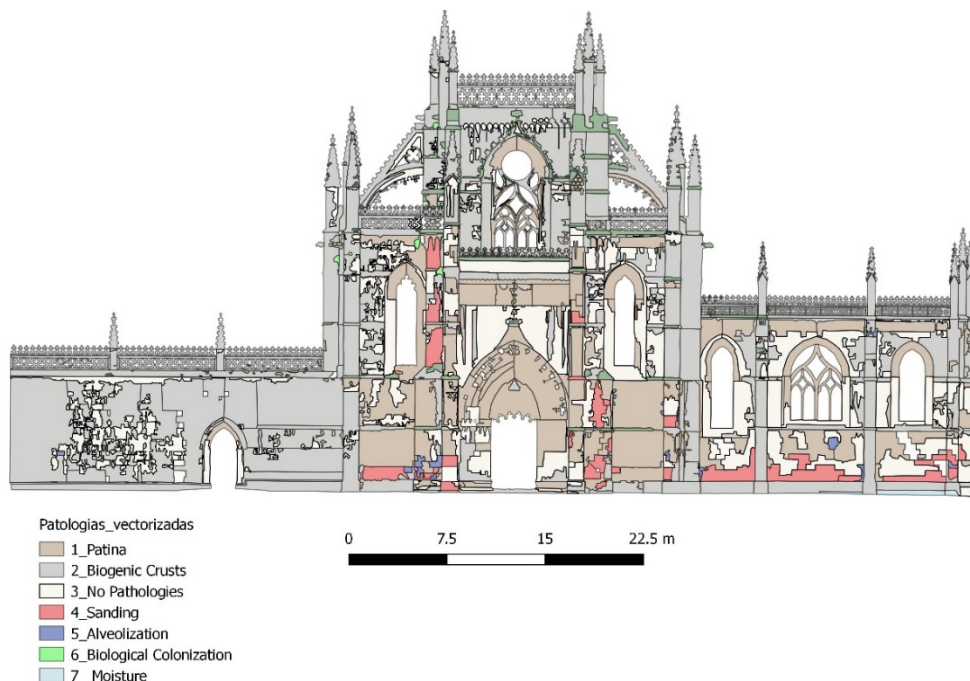


Figura 5.1 – Classificação Manual Mosteiro Batalha

Analisando a Tabela 5.1 verifica-se o observado visualmente, a patologia que apresenta maior área são as crostas negras, com área ocupada de 658.66 m² o que equivale a cerca de 51.29 % da área total da fachada do Mosteiro da Batalha. A patologia patina e sem patologias apresentam áreas ocupadas muito próximas, com percentagens de 21.65% e 20.56%

respetivamente. Quanto às restantes patologias identificadas, verifica-se que a área ocupada tem valores muito reduzidos, numa percentagem total das 6.5%, cerca de 83.34 m², numa área total de fachada de 1284.13 m².

Tabela 5.1 – Áreas por Patologia em m2

Nomenclatura	Designação	Área_m ²	Percentagem
1	Patina	278.05	21.65
2	Crostas Negras	658.66	51.29
3	Sem Patologias	264.08	20.56
4	Degradação Granular	39.16	3.05
5	Alveolização	4.71	0.37
6	Colonização Biológica	36.83	2.87
7	Humidade	2.64	0.21
	Total	1284.13	

Por fim, na Tabela 5.2, apresenta-se o tempo dedicado para identificação de cada área definida inicialmente, obtendo-se um total de 105 horas, no total das três áreas.

Tabela 5.2 – Número de horas por áreas

Área	Horas_(h)
1	65
2	24
3	16
Total	105

5.2. Resultados Classificação pixel-a-pixel

Nesta secção apresenta-se o resultado da classificação supervisionada ao nível do pixel, pelo classificador KNN, no software Qgis e Ecognition, com 5 classes e com 3 classes.

▪ 5 Classes

A classificação pixel-a-pixel de 5 classes, obtida com o classificador “KNNClassifier” no software Qgis, Figura 5.2 e Ecognition, Figura 5.3.

A análise obtida através dos dois classificadores com base no ortomosaico permitem-nos verificar numa primeira análise visual que os classificadores apresentam uma imagem muito pixelizada, mas com diferenças significativas entre os dois softwares com o mesmo classificador “KNN Classifier”. A classificação obtida no Ecognition é a que mais se aproxima da realidade, contornando melhor as patologias, definindo assim melhor as áreas cobertas pelas patologias.

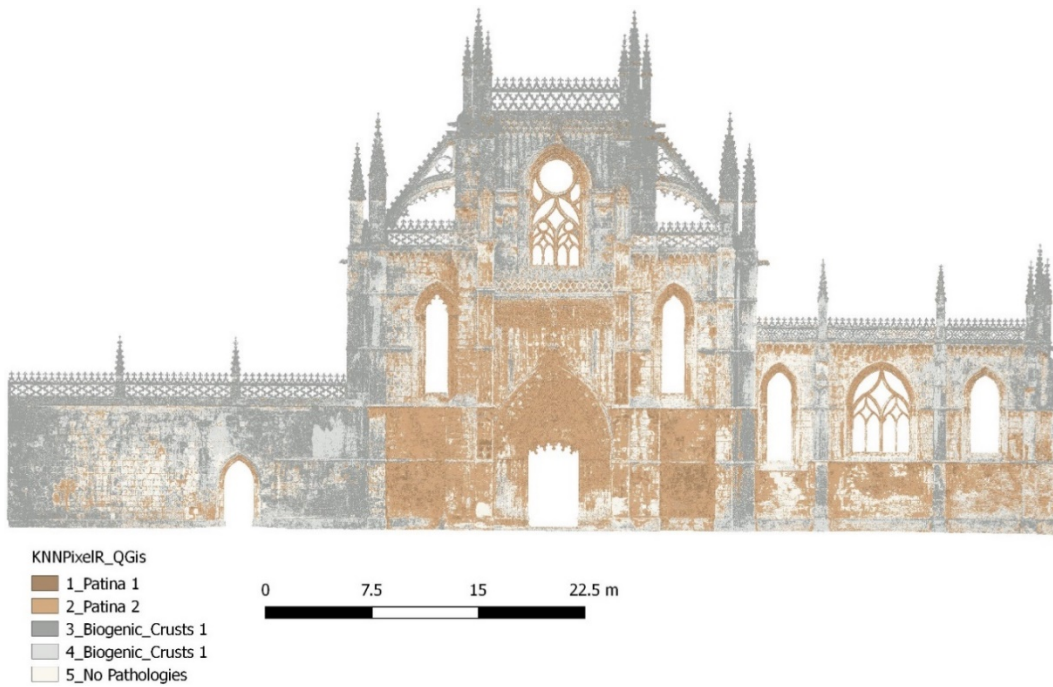


Figura 5.2 – Classificação pixel_5Classes_QGis

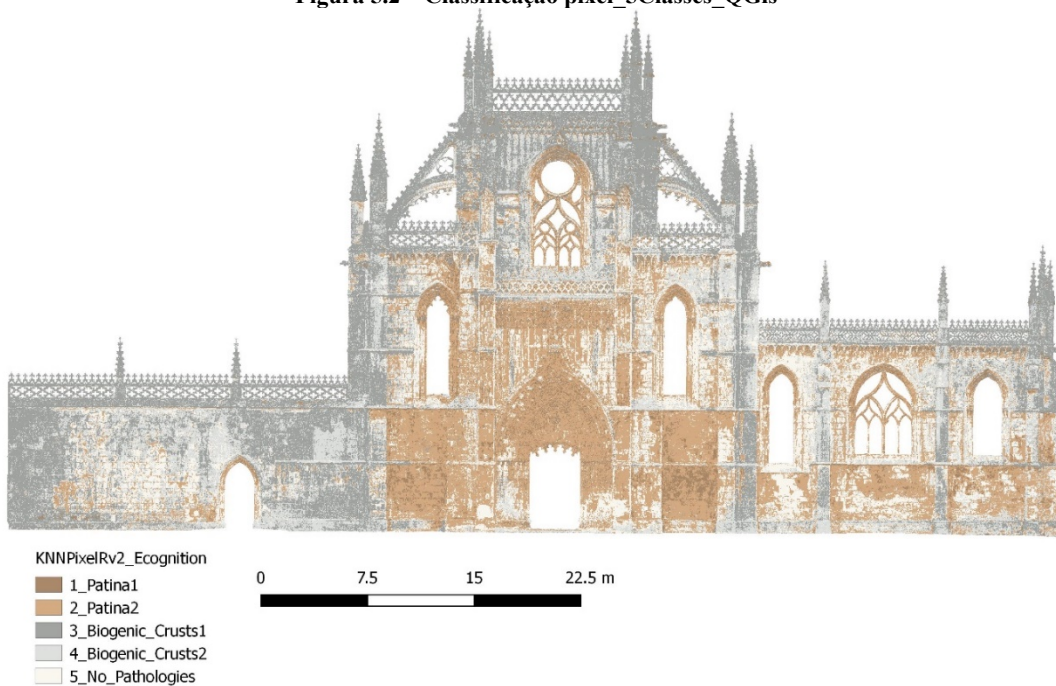
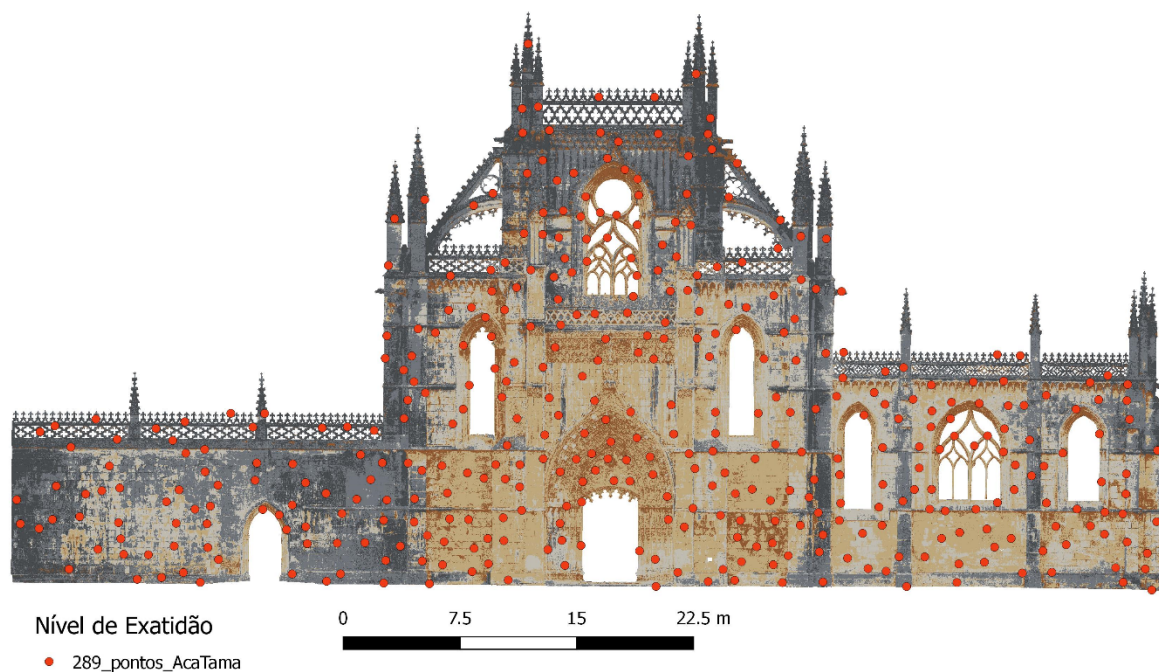


Figura 5.3 – Classificação pixel_5Classes_Ecognition

De seguida apresentamos, na Figura 5.4, a distribuição dos 289 pontos no ortomosaico obtido no AcaTama, que foram classificados manualmente tendo-se calculado o nível de exatidão e apresenta os resultados em cinco tabelas.



1

Figura 5.4 – 5_Classes – AcaTama_289 Pontos.

Os resultados da classificação pixel-a-pixel obtidos através do AcaTama com os classificadores do software QGis, Tabela 5.3 e do software Ecognition Developer Tabela 5.4.

Tabela 5.3 – Matriz de erro e medidas de precisão. UA (%) -Precisão do Usuário; PA (%) – Precisão do Produtor; PC – Precisão geral – Pixel KNN(QGis)

KNN pixel-based						
	1	2	3	4	5	UA (%)
1	25	13	0	1	0	39
2	33	59	5	5	15	119
3	5	3	76	13	0	97
4	4	6	18	45	5	78
5	0	13	4	19	33	69
PA (%)	67	94	103	83	53	
Pc = 60.8%						

Tabela 5.4 – Matriz de erro e medidas de precisão. UA (%) -Precisão do Usuário; PA (%) – Precisão do Produtor; PC – Precisão geral – Pixel KNN (Ecognition Developer)

KNN pixel-based						
	1	2	3	4	5	UA (%)
1	18	11	1	0	0	60
2	20	56	0	5	17	57
3	4	1	48	9	0	77
4	1	1	8	43	6	73
5	0	5	0	12	23	58
PA (%)	42	76	84	62	50	
Pc = 65.0%						

A interpretação dos valores obtidos, na classificação Pixel no software Qgis apresenta um valor de exatidão menor que no software Ecognition, 60.8% e 65%, respetivamente, o que nos permite concluir que o classificador KNN no software Ecognition apresenta melhores resultados.

Em seguida apresentamos a área ocupada por cada patologia identificada, Tabela 5.5(Qgis) e Tabela 5.6(Ecognition).

Tabela 5.5 – Áreas por Patologia KNN Pixel em m2 -5Classes- QGis

Nomenclatura	Designação	Área_m ²
1	Patina1	121.17
2	Patina2	331.54
3	Biogenic Crusts1	246.56
4	Biogenic Crusts2	323.89
5	No Pathologies	258.80
	Total	1281.94

Tabela 5.6 – Áreas por Patologia KNN Pixel em m2 -5Classes- Ecognition

Nomenclatura	Designação	Área_m ²
1	Patina1	67.69
2	Patina2	352.19
3	Biogenic Crusts1	384.20
4	Biogenic Crusts2	275.75
5	No Pathologies	201.49
	Total	1281.31

Analisando as tabelas verificamos que as crostas negras 1 e crostas negras 2 ocupam uma área de 570,45 m²(QGIS) e 659,95 m² (Ecognition), muito superior às restantes patologias, continua a ser a patologia mais presente na fachada do Mosteiro.

▪ 3 Classes

A classificação pixel-a-pixel de 3 classes vai permitir comparar com a classificação manual, pois nesta não se considerou a divisão das patologias, a classificação obtida no Qgis na Figura 5.5 e classificação obtida no Ecognition Figura 5.6.

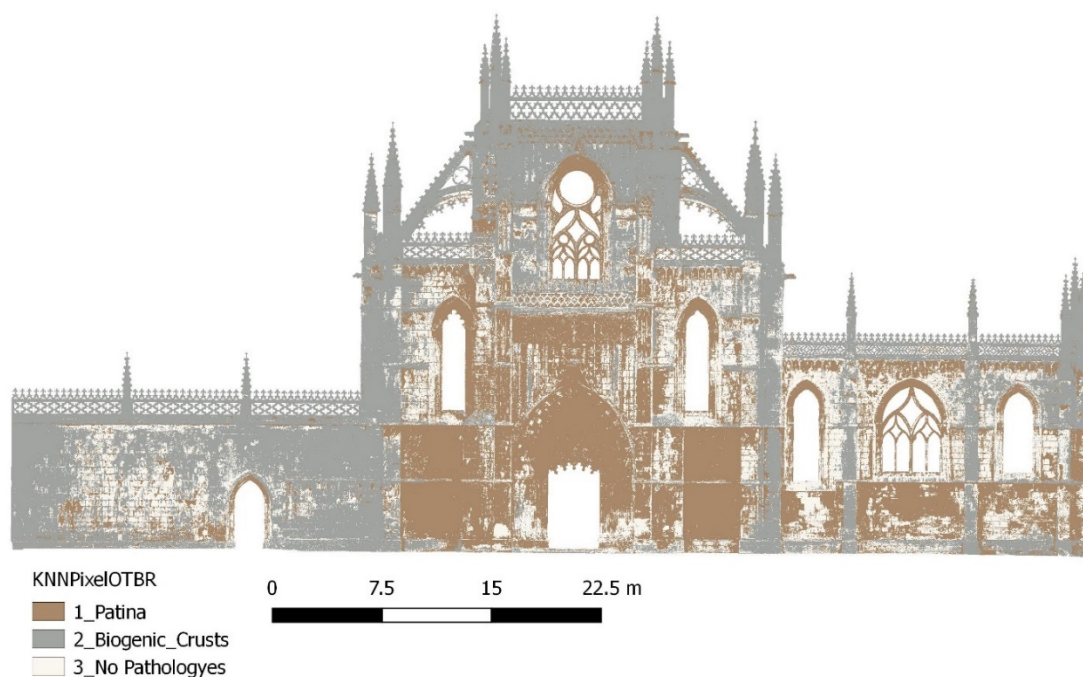


Figura 5.5 – Classificação Supervisada Pixel_3Classes_ KNN Classifier – Qgis

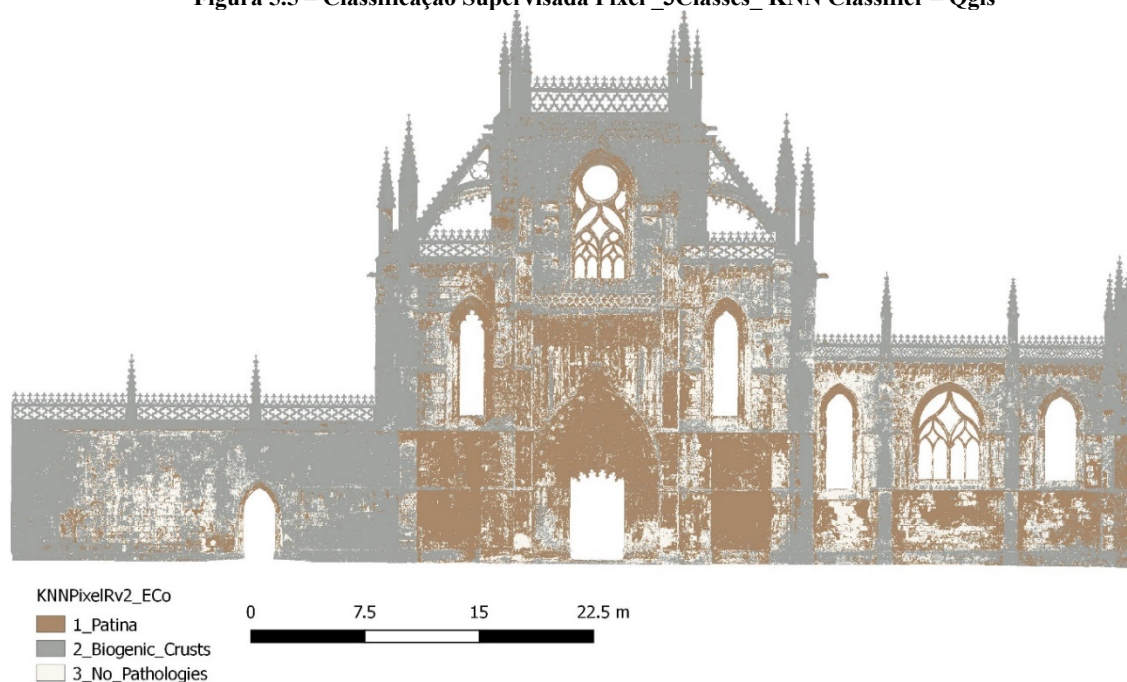


Figura 5.6 – Classificação Supervisada Pixel_3Classes_ KNN Classifier – Ecognition

A área ocupada por cada patologia identificada, exposta nas Tabelas 5.7 e Tabela 5.8.

Tabela 5.7 – Áreas por Patologia KNN Pixel em m2 - QGis

Nomenclatura	Designação	Área_m ²
1	Patina	452.7
2	Biogenic Crusts	570.45
3	No Pathologies	258.8
	Total	1281.95

Tabela 5.8 – Áreas por Patologia KNN Pixel em m2 - Ecognition

Nomenclatura	Designação	Área_m ²
1	Patina	419.88
2	Biogenic Crusts	659.95
3	No Pathologies	201.49
	Total	1281.31

As conclusões a retirar na classificação com 3 (três) classes é idêntica à classificação a 5 (cinco) classes, pois a diferença encontra-se na junção da patina 1 e patina 2, tal como das crostas negras 1 e crostas negras 2.

5.3. Resultados Classificação Objecto

Seguidamente apresentam-se o resultado da classificação supervisionada ao nível do objecto, pelo classificador KNN, no software Ecognition, com 5 classes e com 3 classes.

- **5 Classes**

A Figura 5.7, apresenta a classificação orientada ao objecto, com 5 classes, obtida com o classificador “KNN classifier”, podendo verificar através da análise visual que as patologias identificadas definem melhor as áreas de cada patologia.

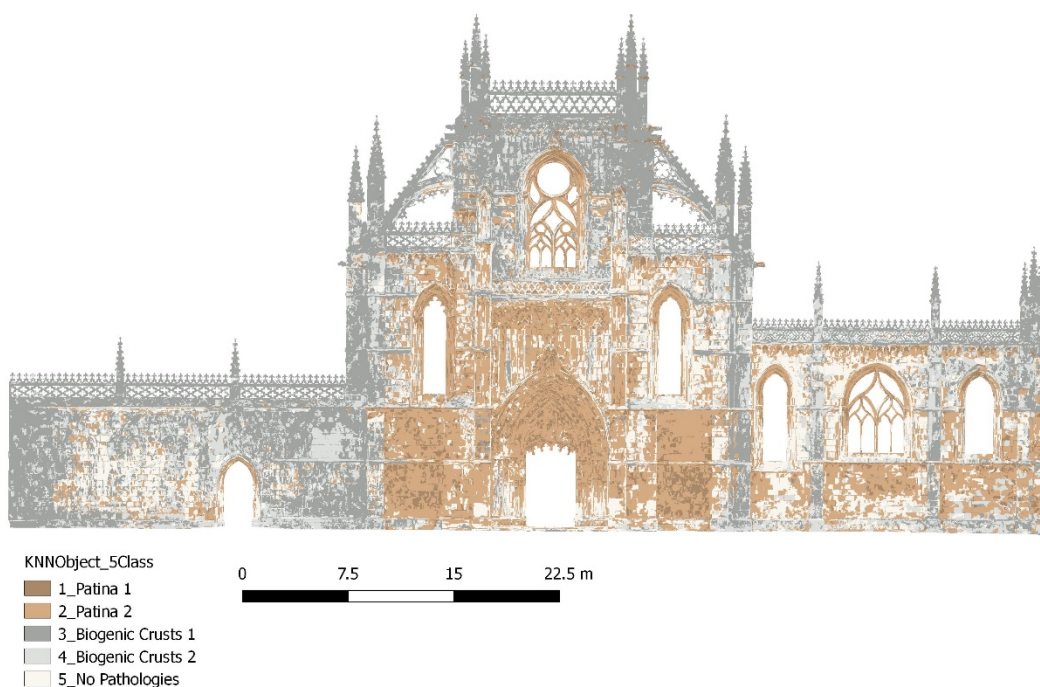


Figura 5.7 – Classificação Objecto_5Classes

Os resultados da classificação objecto obtidos através do AcaTama, software do QGis, Figura 5.8, com o classificador do software Ecognition Developer Tabela 5.9 e as áreas ocupadas por cada uma das patologias em m², Tabela 5.10.

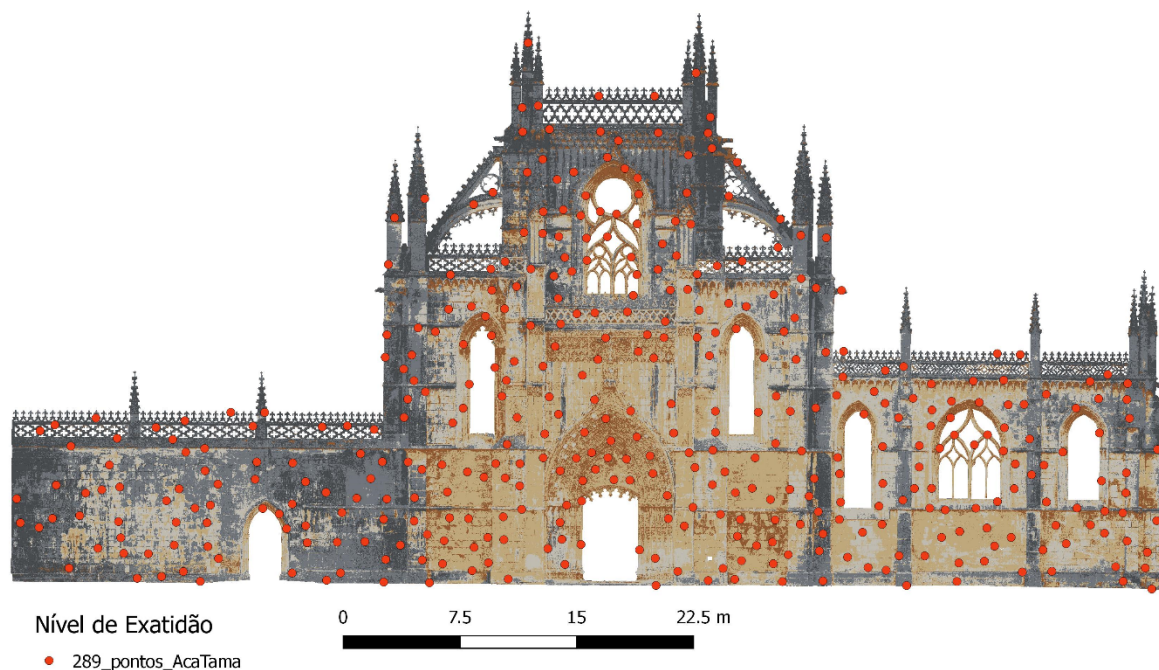


Figura 5.8 – 5_Classes – AcaTama_289 Pontos.

Tabela 5.9 – Matriz de erro e medidas de precisão. UA (%) -Precisão do Usuário; PA (%) – Precisão do Produtor; PC – Precisão geral – Objecto - KNN

KNN object-based						
	1	2	3	4	5	UA (%)
1	38	24	2	0	0	59
2	5	44	0	5	5	75
3	0	1	47	3	0	92
4	0	2	7	52	1	84
5	0	3	1	9	40	75
PA (%)	88	59	82	75	87	
Pc = 76.5%						

Tabela 5.10 – Áreas por Patologia KNN Objecto em m2 -5Classes

Nomenclatura	Designação	Área_m ²
1	Patina1	74.94
2	Patina2	354.52
3	Biogenic Crusts1	421.17
4	Biogenic Crusts2	239.34
5	No Pathologies	191.34
	Total	1281.31

O classificador orientado ao objecto apresenta valores de matriz erro com valor $P_c=76.5\%$, continuando a ser as crostas negras a patologia com maior destaque em termos de área ocupada, seguindo-se as patinas.

▪ 3 Classes

A Figura 5.9, apresenta a classificação orientada ao objecto, com 3 classes, obtida com o classificador “KNN classifier”, no software Ecognition Developer. As manchas de patologias são mais densas devido à junção das patologias, unificando mais a imagem e permitindo assim uma comparação mais realista em relação à classificação manual obtida anteriormente.

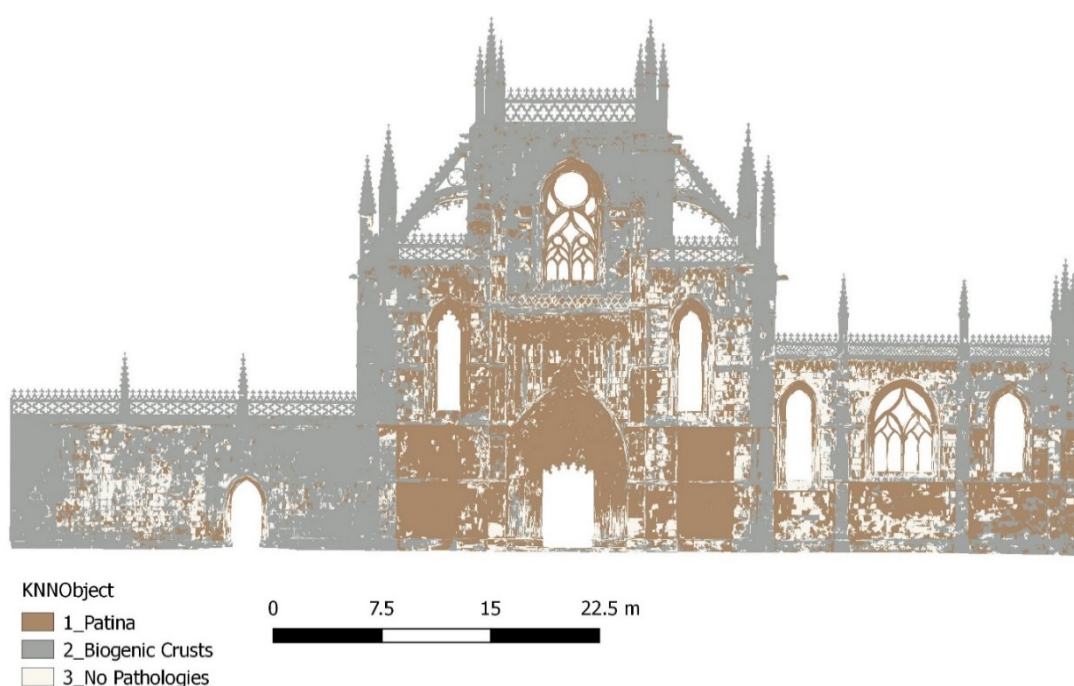


Figura 5.9 – Classificação Objecto_3Classes

A Tabela 5.11 apresenta as áreas ocupadas por cada uma das patologias em m^2 , os valores obtidos são equivalentes aos obtidos anteriormente na classificação pixel-a-pixel e na classificação manual.

Tabela 5.11 – Áreas por Patologia KNN Object 3Classes em m^2

Nomenclatura	Designação	Área_ m^2
1	Patina	429.46
2	Biogenic Crusts	660.51
3	No Pathologies	191.34
	Total	1281.31

5.4. Análise de concordância entre os resultados dos classificadores

Para quantificar a informação resultante das diferentes classificações, elaborou-se uma tabela com base nos valores das áreas resultantes, ou seja, o total de área ocupada por cada patologia, Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Áreas por Patologia dos classificadores em m2 e %

	Designação	Classificação Manual		Classificação Pixel Qgis		Classificação Pixel Ecognition		Classificação Objecto	
		m ²	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%
1	Patina	278.05	21.65	452.7	35.31	419.88	32.77	429.46	33.52
2	Biogenic Crusts	658.66	51.29	570.45	44.50	659.95	51.51	660.51	51.55
3	No Pathologies	264.08	20.56	258.8	20.19	201.49	15.73	191.34	14.93
4	Sanding	39.16	3.05	-	-	-	-	-	-
5	Alveolization	4.71	0.37	-	-	-	-	-	-
6	Biologic Colonization	36.83	2.87	-	-	-	-	-	-
7	Moisture	2.64	0.21	-	-	-	-	-	-
	Total	1284.13		1281.95		1281.31		1281.31	

Numa primeira análise da Tabela 5.12, observa-se que os classificadores automáticos apresentam um número menor de patologias em relação ao classificador manual. Este facto pode dever-se ao facto dos tons associados a algumas das patologias coincidir com patologias mais visíveis, e sobreposição de patologias, tal como a patina engloba patologias como a degradação granular e a alveolização, pois estas adquirem na sua superfície o mesmo tom. Verificando-se que a patina nos classificadores automáticos “absorve” uma grande parte das patologias não detectadas, constatando-se pela análise da percentagem da área de ocupação dessa patologia, a percentagem de patina na classificação manual é de 21.65%, nos classificadores automáticos os valores são acima dos 30%.

A Tabela 5.13, apresenta os valores da matriz de erro obtidos no classificador pixel (do Ecognition) e no classificador objecto e as medidas de precisão, verifica-se que a precisão geral no classificador objecto é 76.5%, logo substancialmente melhor que no classificador pixel que é de 65%, como podemos analisar na tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Matriz de erro e medidas de precisão. UA (%) -Precisão do Usuário; PA (%) – Precisão do Produtor; PC – Precisão geral

	KNN pixel-based							KNN object-based					
	1	2	3	4	5	UA (%)		1	2	3	4	5	UA (%)
1	18	11	1	0	0	60	1	38	24	2	0	0	59
2	20	56	0	5	17	57	2	5	44	0	5	5	75
3	4	1	48	9	0	77	3	0	1	47	3	0	92
4	1	1	8	43	6	73	4	0	2	7	52	1	84
5	0	5	0	12	23	58	5	0	3	1	9	40	75
PA (%)	42	76	84	62	50		PA (%)	88	59	82	75	87	
	Pc = 65.0%; K = 0.55							Pc = 76.5%; K = 0.71					

Desta análise, conclui-se que os resultados baseados na classificação orientada ao objecto são em geral melhores que na outra classificação orientada ao pixel, apesar do classificador ser o mesmo, “KNN classifier”.

Por fim pode concluir-se que em relação à classificação manual versus classificação automática, os valores em termos de áreas e percentagens são bastante idênticos de uma forma geral. A classificação manual precisaria ter em conta a subdivisão da patina e das crostas negras, para uma precisão maior nas áreas de cada patologia e quanto aos classificadores automáticos a utilização de outros classificadores seria vantajosa pois permitiria uma ter um leque de resultados mais variado, e havendo uma afinação nos algoritmos poderia ter sido possível identificar outras patologias.

5.5. Resultados Ground Penetrating Radar

A Figura 5.10, apresenta as zonas de ensaio na fachada da capela do Fundador, o sentido da realização dos ensaios. Os radagramas obtidos, para cada zona, encontram-se no lado esquerdo e a sua interpretação do lado direito. É necessário ter em atenção que existem ensaios realizados por tempos e outros em relação à distância percorrida na fachada [43].

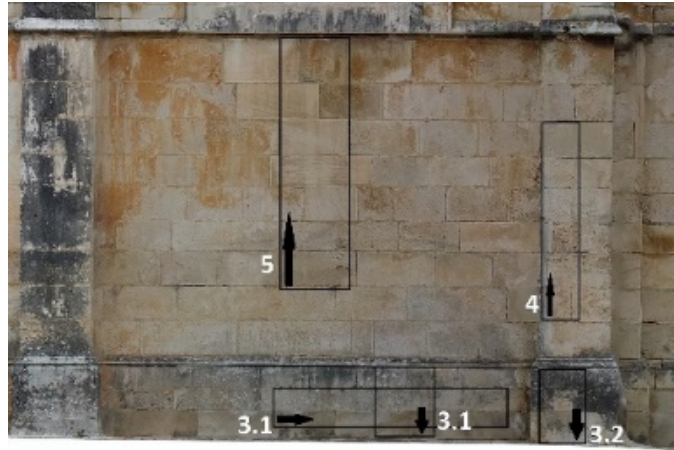


Figura 5.10 – Zonas ensaios GPR

Zona 3.1 Horizontal

Na Figura 5.11 é apresentada a localização do ensaio GPR e na Figura 5.12 o resultado da simulação da zona 3.1 horizontal, obtidos com a antena de 2300 MHz.

A interpretação do radargrama obtido observa-se que a escala horizontal representa a distância do ponto inicial (máximo de cerca de 1,15 cm). A escala vertical representa o tempo que as ondas eletromagnéticas levam para se deslocar da superfície refletora para a antena receptora. O valor máximo de cerca de 12 ns deve ser calibrado em função do material a ser traduzido em uma determinada profundidade. O vértice hiperbólico representa as articulações entre blocos: um é claramente visto a 50 cm à esquerda do ponto inicial. Verificam-se sinais mais profundos de difícil interpretação, mas que pelas características serão de enchimento irregular.



Figura 5.11 – Zona 3.1 Horizontal

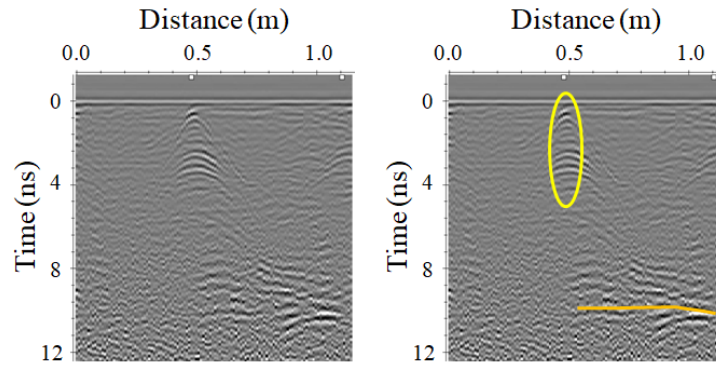


Figura 5.12 – Radargrama e interpretação da zona 3.1 Horizontal – 2300MHz

Zona 3.1 Vertical

Na Figura 5.13 identifica-se o local dos ensaios com as antenas de 800MHz e 2300MHz.

Observa-se na Figuras 5.14, o radargrama obtido com a antena de 800 MHz à esquerda e com a 2300 MHz à direita, no sentido descendente, com o ponto inicial (a borda superior do plinto) de cerca de 25 cm no primeiro radar e 32 cm com o segundo, o sinal representa uma irregularidade que corresponde à variação da profundidade dos blocos. Isso pode ser confirmado pela observação local, pois os blocos próximos do solo parecem ser mais recentes, tendo sido provavelmente aplicados durante trabalhos de restauro.

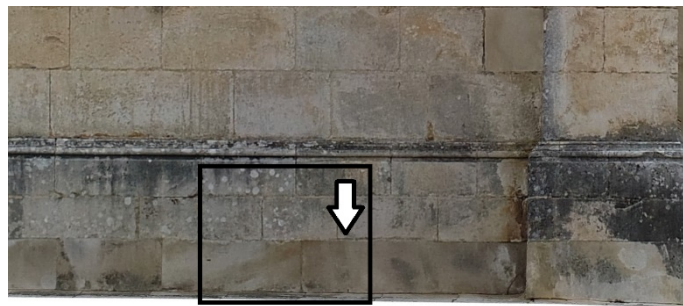


Figura 5.13 –Zona 3.1 Vertical

a) 800 MHz

b) 2300 MHz

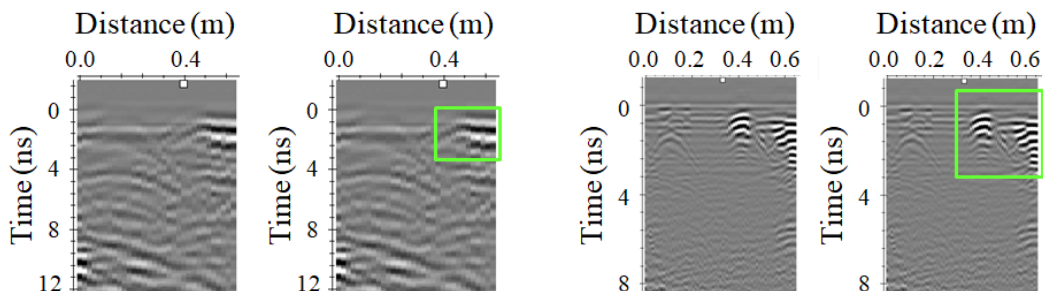


Figura 5.14 – Radargrama e interpretação da zona 3.1 Vertical – 800MHz e 2300MHz

Zona 3.2

Na Figura 5.15 identifica-se o local dos ensaios com as antenas de 800MHz e 2300MHz.

A Figura 5.16 mostra o radargrama determinado com a antena de 800 MHz à esquerda e com a antena 2300 MHz à direita. Perto do final do caminho GPR, há uma redução repentina da profundidade dos blocos de calcário, a visualização in loco permite verificar pela sua aparência diferente que esta é a causa de trabalhos anteriores de restauro. A interpretação dos sinais adicionais observados em uma profundidade maior não é tão fácil, mas eles podem ser causados pelo preenchimento irregular da parede.

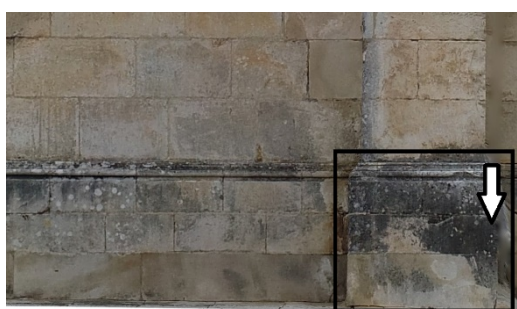


Figura 5.15 –Zona 3.2

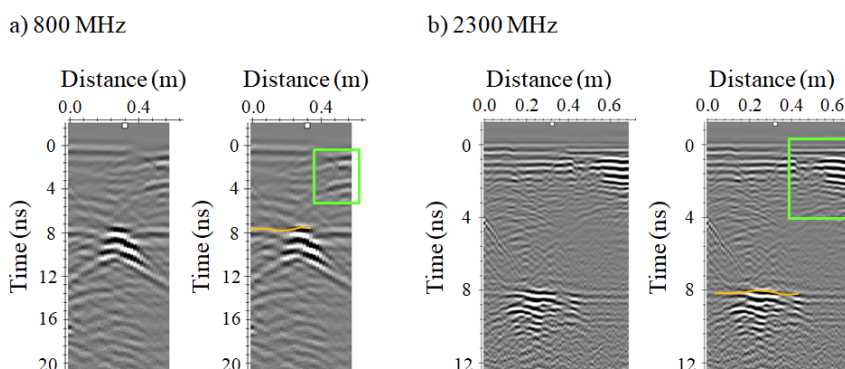


Figura 5.16 – Radargrama e interpretação da zona 3.2 – 800MHz e 2300MHz

Zona 4

Na Figura 5. identifica-se o local dos ensaios com as antenas de 500MHz, 800MHz e 2300MHz.

Neste caso, devido a ser um pilar de grande profundidade, foram utilizadas as três antenas, para ter vários radargramas, Figura 5.18, 5.19, 5.20, logo uma quantidade maior de informação para analisar. Os blocos de pedra que constituem o pilar têm mais ou menos as mesmas propriedades (como porosidade e composição), neste caso é possível medir lateralmente a profundidade dos blocos. De fato, o registro de frequência mais alta mostra

que existem blocos de duas profundidades diferentes, alternadamente colocadas (como na construção de alvenaria), sinalizadas com uma linha laranja. As vibrações identificadas mais próximas da superfície, podem identificar uma intervenção de restauro, observa-se também, nos registros de frequências mais baixas, uma terceira interface dos blocos originais.

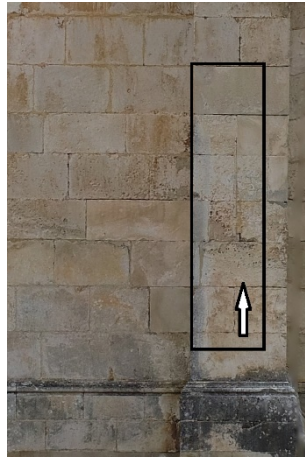


Figura 5.17 –Zona 4

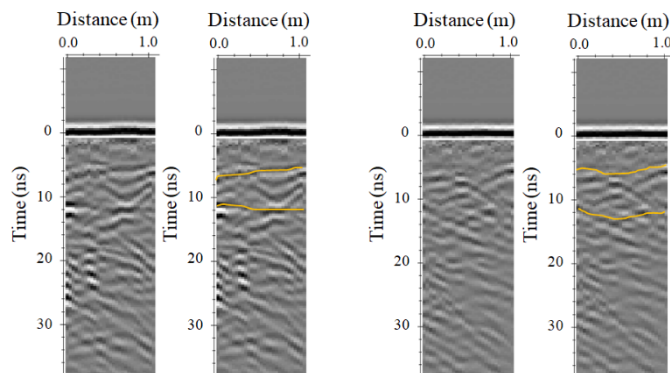


Figura 5.18 – Radargrama e interpretação da zona 4 – 500MHZ esquerda e direita.

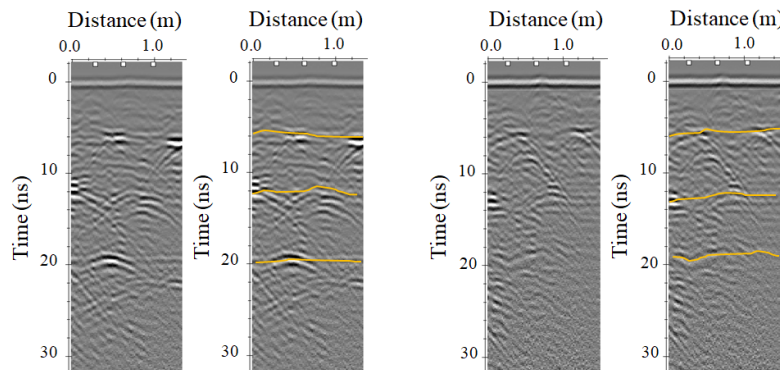


Figura 5.19 – Radargrama e interpretação da zona 4 – 800MHZ esquerda e direita.

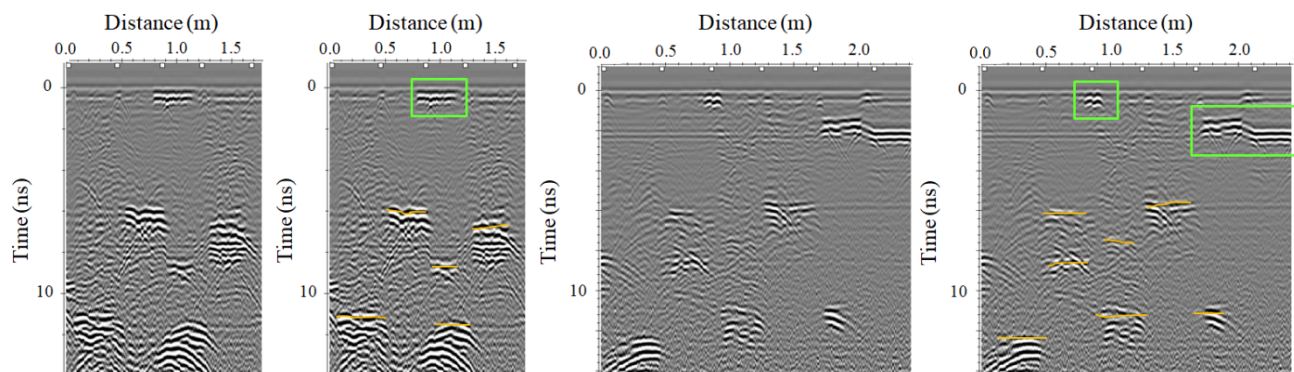


Figura 5.20 – Radargrama e interpretação da zona 4 – 2300MHZ esquerda e direita.

Zona 5

Na Figura 5.21 identifica-se o local dos ensaios com as antenas de 500MHz, 800MHz e 2300MHz.

As características das pedras calcárias da zona 500MHz e 800MHz são muito semelhantes, havendo a uma profundidade idêntica o mesmo género de comportamento. É possível que haja uma zona com enchimento ou pedras de características variadas, a linha laranja marca o que pode ser a interface entre os blocos sólidos e o preenchimento da parede. O retângulo verde identifica mais uma vez um bloco mais fino que poderia ter sido aplicado durante uma intervenção de restauro anterior, provavelmente devido a desgaste, sendo as recentes de espessura variável (ver Figura 5.22).

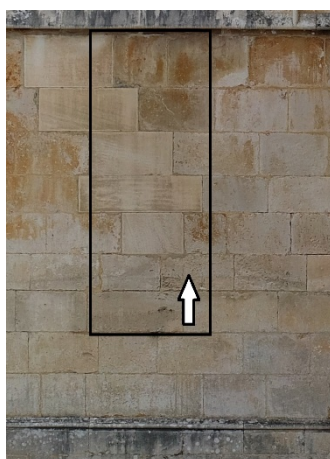


Figura 5.21 –Zona 5

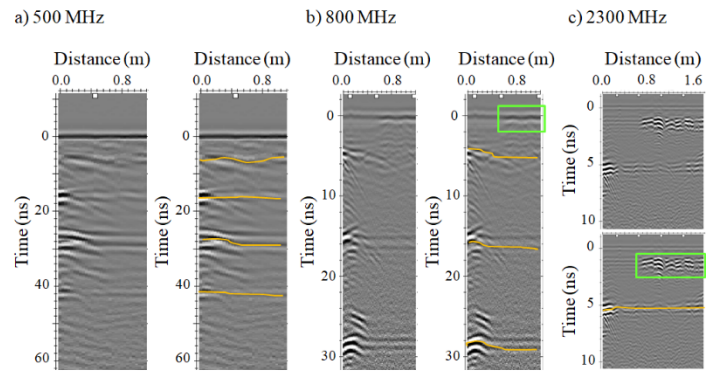


Figura 5.22 – Radargrama e interpretação da zona5 – 2300MHz.

Com os resultados obtidos, verificou-se a eficácia do GPR na determinação de profundidades de camadas, com as várias antenas utilizadas, este método é muito importante tanto mais que são ensaios não destrutivos e permitiram verificar a constituição das paredes e as mudanças de espessura de algumas pedras exteriores.

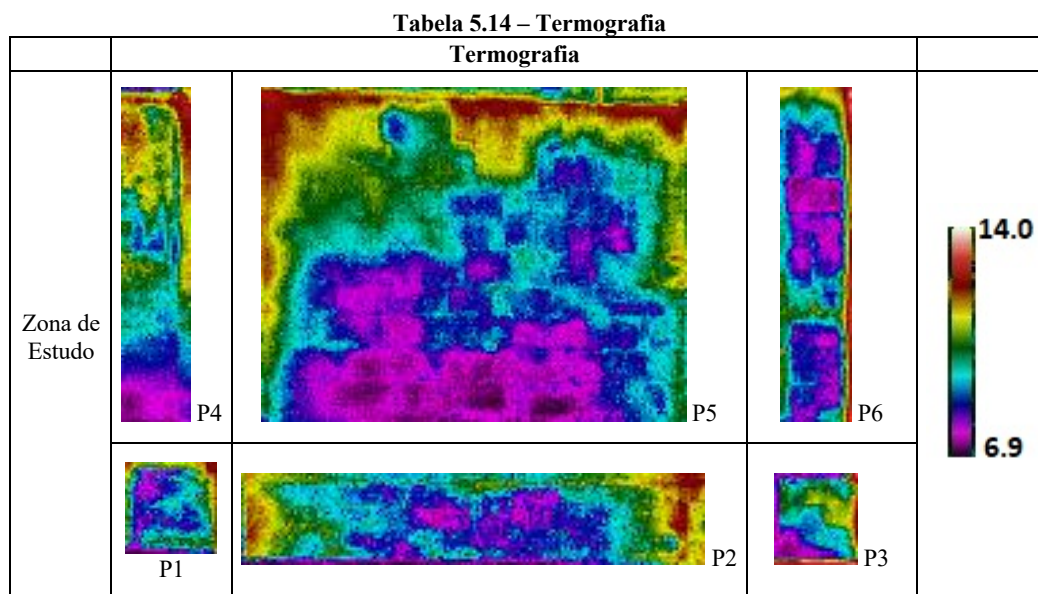
5.6. Resultados Termografia

Os ensaios foram efetuados na fachada da Capela do Fundador, na área de estudo definida, Figura 5.23, as imagens foram captadas no período da manhã, sendo este mais favorável devido a ser a fase de aquecimento da pedra. A temperatura máxima observada na imagem captada é de 13.3°C e a mínima 10.1°C.



Figura 5.23 –Área de estudo Termografia

A Tabela 5.14 apresenta a imagem captada com a câmara termográfica, FLIR T335, pode-se observar que existe absorção/infiltração na fachada nas zonas mais próximas do pavimento P1, P2 e P3, pela sua tonalidade roxa e azulada, o que se confirma pela classificação manual efetuada anteriormente. Pode-se também verificar que em P5 também existe a mesma tonalidade de cor, apesar de no local não ser visível com inspeção visual.



A diferença de absorção da radiação solar através da pedra calcária também influencia na análise das imagens de termografia, pois existem pedras com diferentes espessuras, logo têm comportamentos distintos. Outro fator que se teve em conta foi a exposição solar e o tempo na hora da captação das imagens, Tabela 5.14. As zonas mais salientes, zona P5 nível superior, verifica-se que a temperatura nessa zona é superior, tendo adquirido uma cor mais avermelhada.

Podemos assim concluir que a termografia deve ser considerada como uma ferramenta de avaliação de valor para a preservação e proteção do património cultural, sendo que a realização de ensaios a vários períodos do dia permite obter informação variada sobre o comportamento da pedra face às mudanças de temperatura.

6. Aplicação do BIM em estruturas históricas

6.1. Introdução

O *Building Information Modeling* é um processo evolutivo, um método de trabalho que permite acompanhar o ciclo de vida de um edifício, seja uma nova edificação ou uma reconstrução, incluindo os processos construtivos e as fases de execução.

Possibilitando a uma vasta equipa trabalhar no mesmo modelo, existir uma verificação de conflitos entre os vários intervenientes num projeto, como arquitetos, engenheiros, instalações, entre outros, que permitem ao responsável pelo projecto (BIM Manager) verificar se existem colisões e/ou erros entre os vários projectos, antes mesmo de se entrar em fase de execução evitando desta forma perdas de tempo e redução de custos (associados a erros de projeto), por outro lado é possível obter uma visão 3D, sendo possível obter de forma imediata quantidades, pormenores arquitetónicos ou estruturais, cortes, vistas, alçados, características dos materiais e custos, agendar futuras manutenções e/ou intervenções (ver Figura 6.1) e a realização de vídeos 3D (*BIM Hooliwood*), nos novos edifícios e dos edifícios existentes[44].[25], [45].

Hoje em dia este conceito aplica-se também a edifícios históricos, sendo designado de HBIM (Heritage Building information modeling), este novo conceito pode estar ligado à deteção remota, devido ao potencial tecnológico de alta resolução, através da qual se realizam levantamentos com laser scanning (ou nuvem de pontos), levantamentos com câmaras de alta resolução são acopladas a UAS, que permitem captar dados relacionados com o estado de preservação do edificado [46] e a conhecer melhor a estrutura, comparando o levantamento com plantas existentes, obtendo informações quanto às características físicas do monumento, sem a necessidade de ensaios destrutivos.

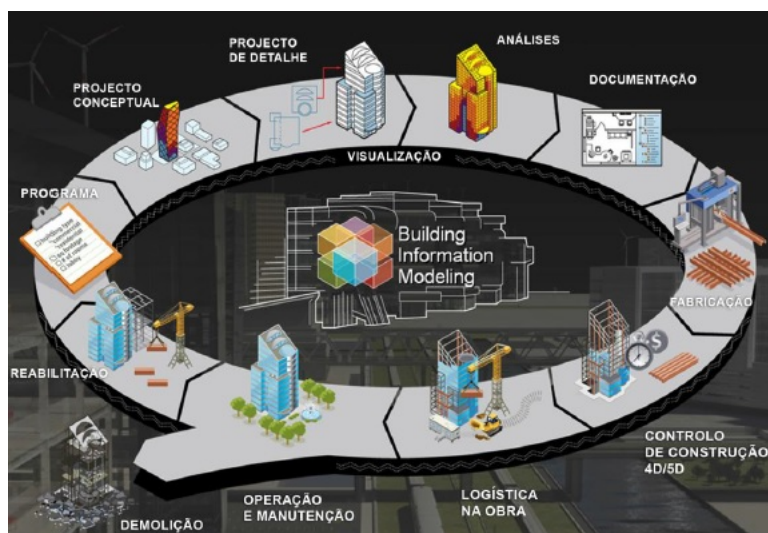


Figura 6.1 – Modelo BIM na panificação/construção, adaptado [47]

Estes estudos já vem sendo realizado em vários países a nível europeu, como em Granada (Espanha) no Corral del Carbón [48], assim como em Aquila (Italia) na Basilica di Collemaggio, depois do terramoto [46][49]. Os projetos desenvolvidos possibilitaram preparar ferramentas para uma posterior planificação de restauros e conservação de monumentos, no caso de L’Aquila actualmente as ferramentas são utilizadas no apoio de projectos de conservação das partes danificadas pelo terramoto.

Os estudos consultados são unânimes quanto aos softwares, como o REVIT, mencionando que o software tem ainda algumas limitações no que se refere ao tratamento das nuvens de pontos e aspectos estruturais, como na realização de paredes que não sejam verticais, isto é, a criação de paredes que sofreram deformações ou inclinações, tal como a falta de famílias de objectos que caracterizem os pormenores arquitetónicos e na troca de IFC’s, devido a perda de informação, sendo primordial uma boa definição de parâmetros [46], [48]. A criação de bibliotecas de objectos paramétricos interactivos com dados de arquitetura históricos com base nos levantamentos de varrimento laser (*laser scanning*) e levantamento de imagens, requer tempo e conhecimento aprofundado dos softwares. No entanto, este processo irá permitir obter de forma automática seções de corte, alçados, detalhes e vista 3D dos objectos [50].

6.2. Aplicação da Metodologia HBIM

A variedade de informação recolhida dentro da área de estudo seleccionada ao longo deste estudo permite ter um vasto leque de informação, desde a classificação manual, a

classificação automática (pixel e objecto), vários ensaios de GPR, imagens de termografia e principalmente as imagens de UAV, a zona assinalada na Figure 6.2.



Figura 6.2 – Zona de estudo - Capela do Fundador

A recriação da área de estudo no modelo BIM, recorrendo ao Software REVIT e utilizando as plantas de AutoCAD fornecidas, Figura 6.3. Para inserir as plantas no Revit usou-se a ferramenta “Link CAD” e a planta foi colocada no sistema de referências “Sun Settings”, Batalha.

O levantamento de pontos efetuado com o drone, foi inserido no software RECAP da Autodesk e depois de tratar a imagem passou para o REVIT, Tabela 6.1, possibilitando assim a comparação entre os dois modelos inseridos, tendo-se verificado algumas diferenças. Quando colocamos a nuvem de pontos sobre a planta AutoCAD esta tem dimensões ligeiramente diferente, logo optou-se por utilizar apenas as plantas, para se poder utilizar a nuvem de pontos teríamos de ter a união entre o levantamento exterior e interior.

Tabela 6.1 – Amostra visual Autodesk RECAP e REVIT

	RECAP	REVIT 2019
Amostra visual		

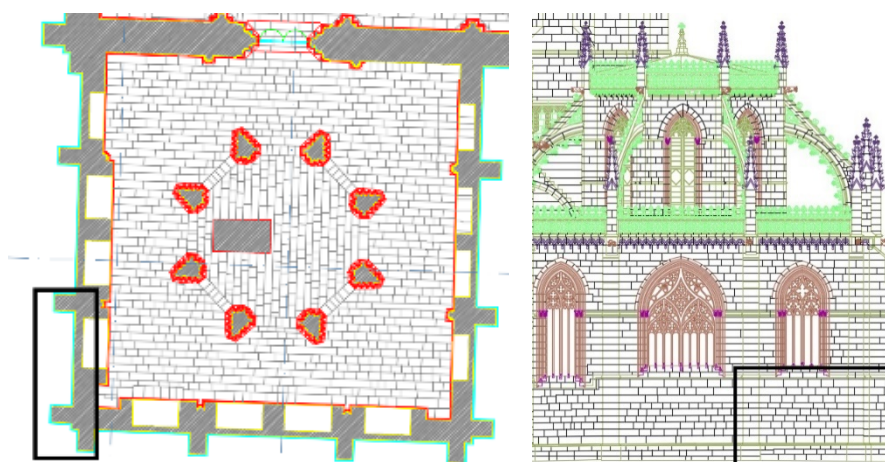


Figura 6.3 – Planta e alçado Capela do Fundador- Autodesk AutoCAD

As informações quanto à constituição das paredes tem por base estudos realizados com georadar, que indicam que algumas paredes do Mosteiro têm uma estrutura constituída por duas camadas ou faces de, aproximadamente, 0,50 m de pedra e um miolo de cerca de 1,60 de enchimento [43]. Analisando as plantas verifica-se que a espessura das paredes é variável e que as camadas de pedra, tendo vindo de pedreiras, terão as mesmas dimensões. O que varia é o enchimento entre as mesmas.

Para facilitar a criação das paredes segundo as várias dimensões, a zona de estudo foi dividida em várias subpartes: P1, P2, P3, P4, P5 e P6, com base nas plantas. Na Figura 6.4 e na Tabela 6.2 encontramos as dimensões das paredes e pilares definidos.



Figura 6.4 – Divisão de paredes para criação de parede no REVIT.

Tabela 6.2 – Medidas dos Pilares/Paredes

Paredes/Pilares	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Dimensões(m)	1.12 x 3.23	5.22 x 2.08	1.11x 3.31	0.927 x 3.0	5.27 x 1.87	0.923 x 3.05

Um dos parâmetros a definir para auxiliar na “montagem” das paredes/pilares foi a criação dos vários níveis, recorrendo aos alçados AutoCAD para verificar as dimensões, Figura 6.5.

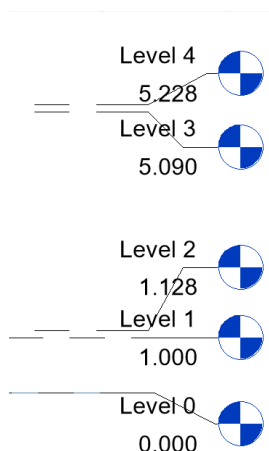


Figura 6.5 – Níveis “level” da zona de estudo – REVIT

A criação da estrutura das paredes e pilares foi ajustada nas propriedades do tipo de parede, isto é, utilizou-se uma parede tipo e duplicando-a e criando assim uma parede com as dimensões pretendidas, inserindo parede de pedra “StoneMB_Pilar_int”, caixa térmica “air” e por fim parede pedra Natural “PedraNaturalPilar”, Figura 6.6 e Figura 6.7.

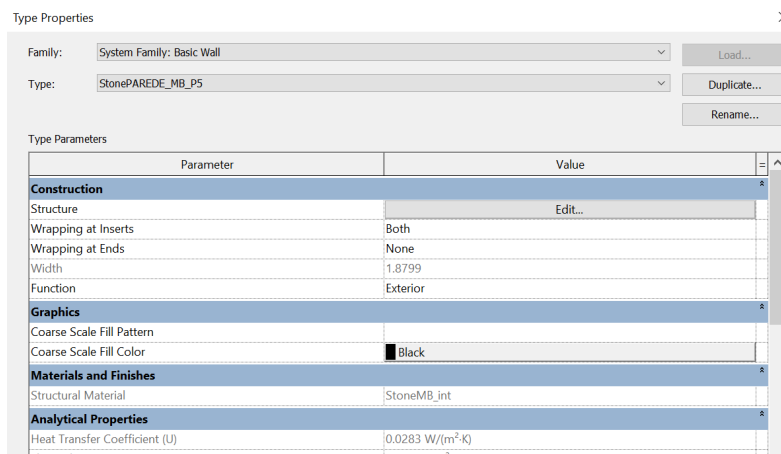


Figura 6.6 – Propriedades da parede/pilar no REVIT.

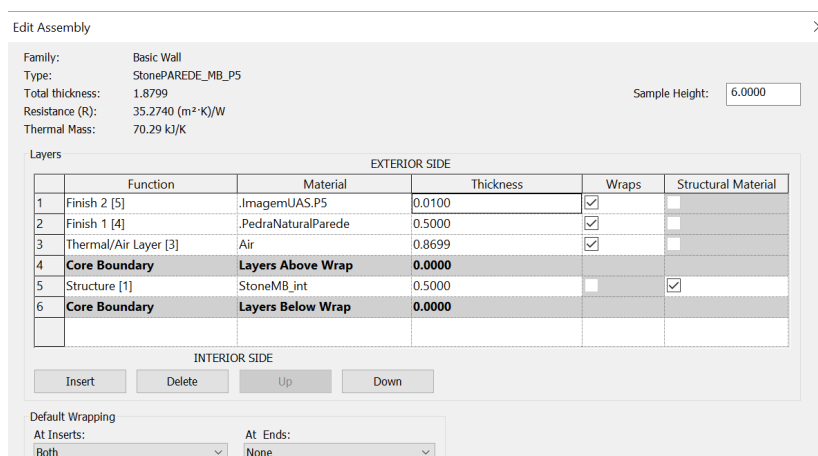


Figura 6.7 – Camadas da parede/pilar no REVIT.

Entre o nível 1 e o nível 2 existe um “friso”, este “friso” é criado da mesma forma que as paredes e os pormenores utilizando a ferramenta “Sweep”, Figura 6.8.

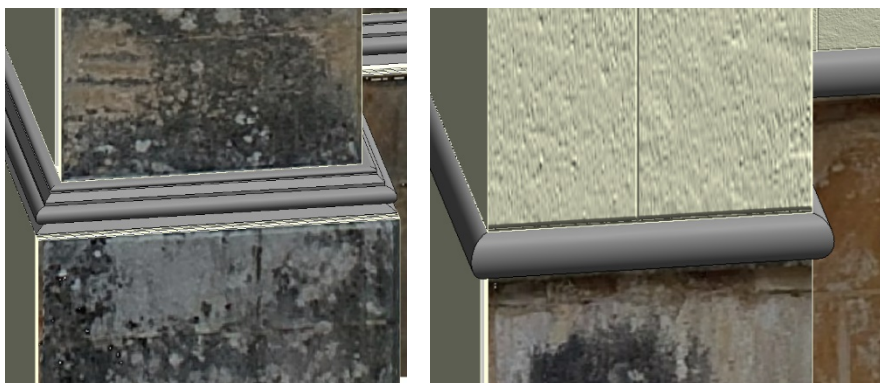

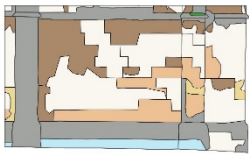

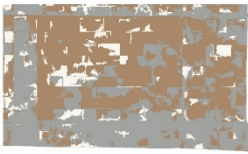
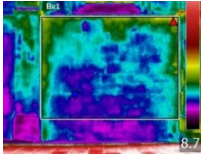


Figura 6.8 – Camadas da parede/pilar no REVIT.

Na Tabela 6.3, após a construção da zona de estudo, seleccionaram-se as imagens a inserir no modelo, as imagens obtidas com recurso ao UAS, a classificação Manual, as classificações automáticas, direcionada ao Pixel e direcionada ao Objecto e as imagens de termografia, e procedeu-se ao tratamento da imagens e ajuste das mesmas.

Tabela 6.3 – Imagens/ensaios a inserir no REVIT

	Imagem UAS	Class. Manual	Class. Automática Pixel KNN
Amostra visual			
	Class. Automática Objecto KNN	Termografia	
			

Inicialmente realizaram-se vários revestimentos na mesma parede dando prioridade segundo a importância, mas verificou-se que nestas situações teríamos de seleccionar partes a “demolir”, “a construir”, o que sendo apenas revestimentos requeria outras ferramentas, Figura 6.9.

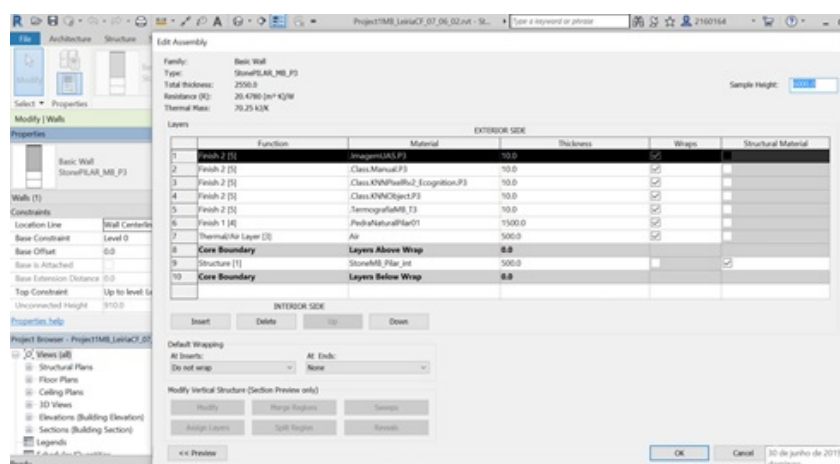


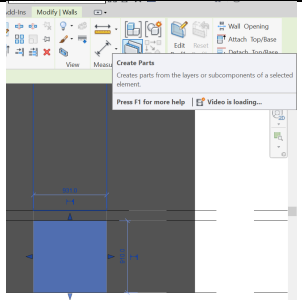


Figura 6.9 – Criação revestimentos REVIT.

Numa segunda fase, optou-se por colocar os revestimentos todos na mesma parede dividir a parede em partes recorrendo a ferramenta “Create Parts”, mas quando se divide a parede em partes a imagem associada ao revestimento multiplica-se, como mostra a Tabela 6.4, logo este método não era viável.

Tabela 6.4 – Imagem por PARTES no REVIT

	Imagem UAS	Imagem Por Partes	Ferramenta “Create Parts”
Amostra visual			

Por fim, o método que melhor se adaptou ao resultado pretendido foi com a criação de paredes paralelas à parede principal do Mosteiro, havendo uma sucessão de paredes, num total de cinco paredes, uma para cada imagem a inserir, dando uma espessura e criando um novo tipo de material, Figura 6.10 e 6.11.

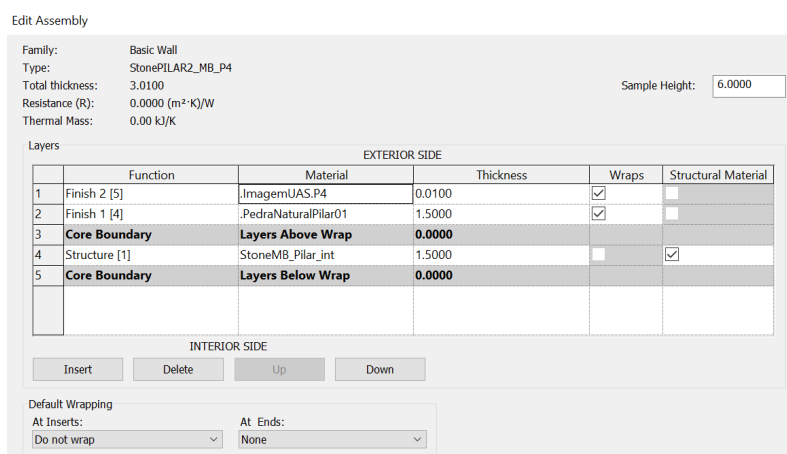


Figura 6.10 – Propriedades do revestimento REVIT.

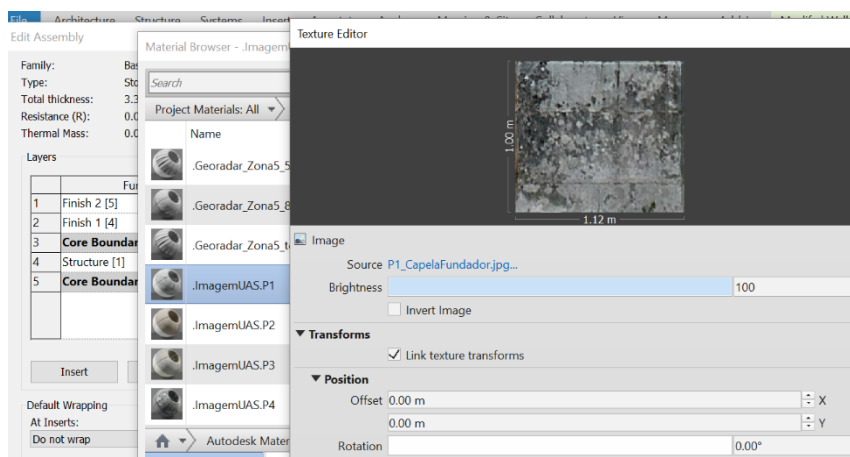
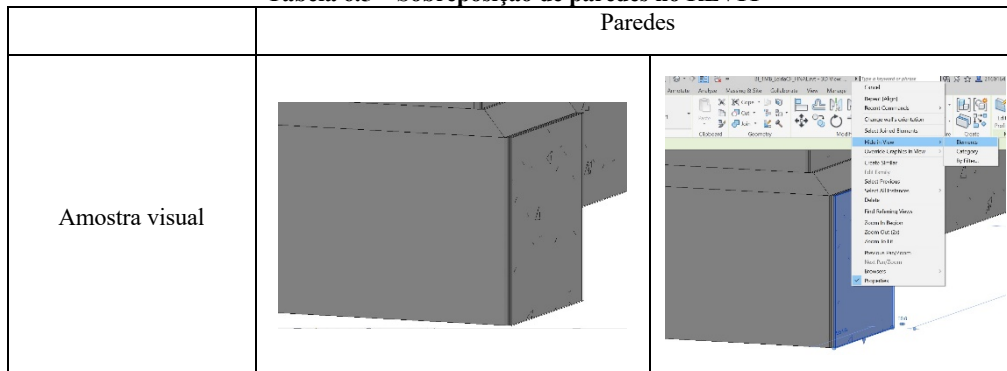


Figura 6.11 – Criação de novo material REVIT.

A Tabela 6.5 apresenta o método utilizado para se conseguir ver cada ensaio individualmente, ocultando a parede precedente, clicando na parede a ocultar e com o botão do lado direito selecionar “Hide in view” e em seguida “Elements”.

Tabela 6.5 – Sobreposição de paredes no REVIT



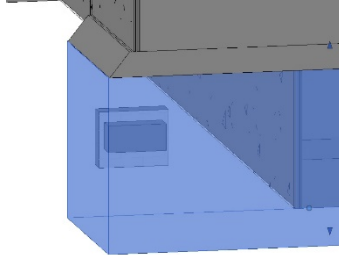
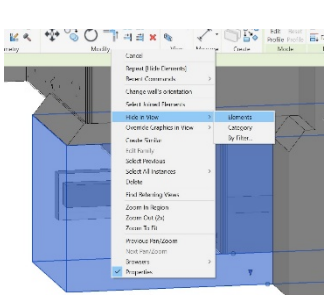
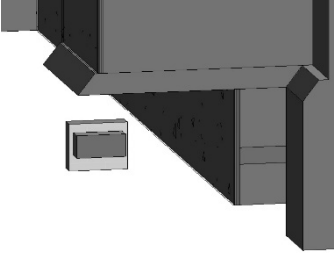
Para inserir os radargramas GPR no Revit com a mesma direção e posição em que foram executados, foi necessário criar paredes de objetos, com a dimensão dos radargramas, e depois revesti-los com os radargramas. Na Tabela 6.6 podemos ver os ensaios que foram realizados, segundo a antena utilizada e o sentido de cada ensaio.

Tabela 6.6 – Ensaios GPR

	Ensaios GPR						
		500 MHz		800 MHz		2.3 GHz	
Zona 3.1 - Vertical	↓	*	*	209		223	
Zona 3.1 - Horizontal	→	*	*	*	*	225	
Zona 3.2	↓	*	*	211		222	
Zona 4	↑ ↑	169	171	203	204	216	219
Zona 5	↑	173		201		229	

Para se visualizar os radargramas, é necessário “esconder” as paredes principal do mosteiro, o método utilizado para se conseguir ver cada ensaio individualmente, ocultando a parede precedente, clicando na parede a ocultar e com o botão do lado direito selecionar “Hide in view” e em seguida “Elements”, Tabela 6.7.


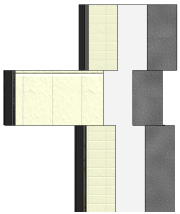
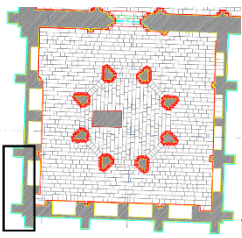

Tabela 6.7 – Paredes GPR

		Paredes GPR	
Amostra visual			

6.3. Resultados HBIM

Na Tabela 6.8, apresenta a passagem da nuvem de pontos e das plantas AutoCAD para o REVIT, softwares da Autodesk. A Figura 6.12 mostra a fase de construção das paredes no Revit sobre a planta importada através de “link CAD”.

Tabela 6.8 – a) Nuvem de pontos RECAP; b) Planta Capela Fundador AutoCAD; c) Parede dupla REVIT; d) Parede alçado Oeste REVIT

		RECAP - AutoCAD - REVIT 2019	
Zona de estudo			
			

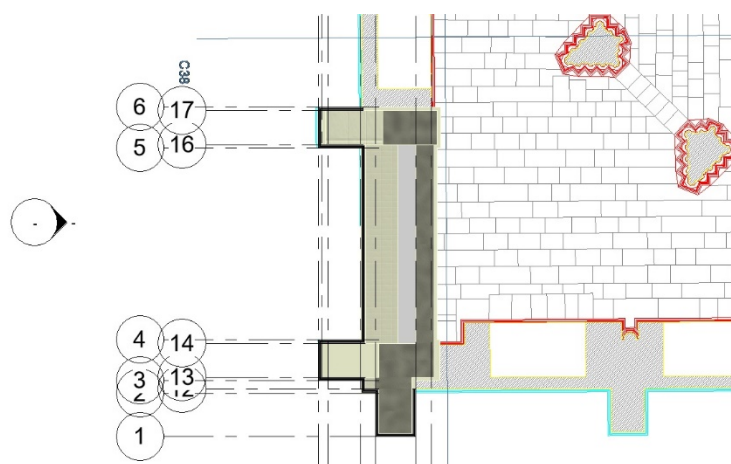


Figura 6.12 – Planta AutoCAD e REVIT

Após a construção do modelo da zona de estudo, iniciou-se a inserção dos vários ensaios e resultado dos classificadores. Numa primeira fase, imagem obtida com UAS, inserida como revestimento sobre a pedra natural da fachada da Capela do fundador, Figura 6.13.



Figura 6.13 – Imagem UAS em 3D REVIT

Nas próximas fases foi criada uma parede paralela à original para cada um dos ensaios/classificadores/imagens a inserir. Segunda fase, na figura 6.13 exhibe a classificação manual, inserida como revestimento da parede.

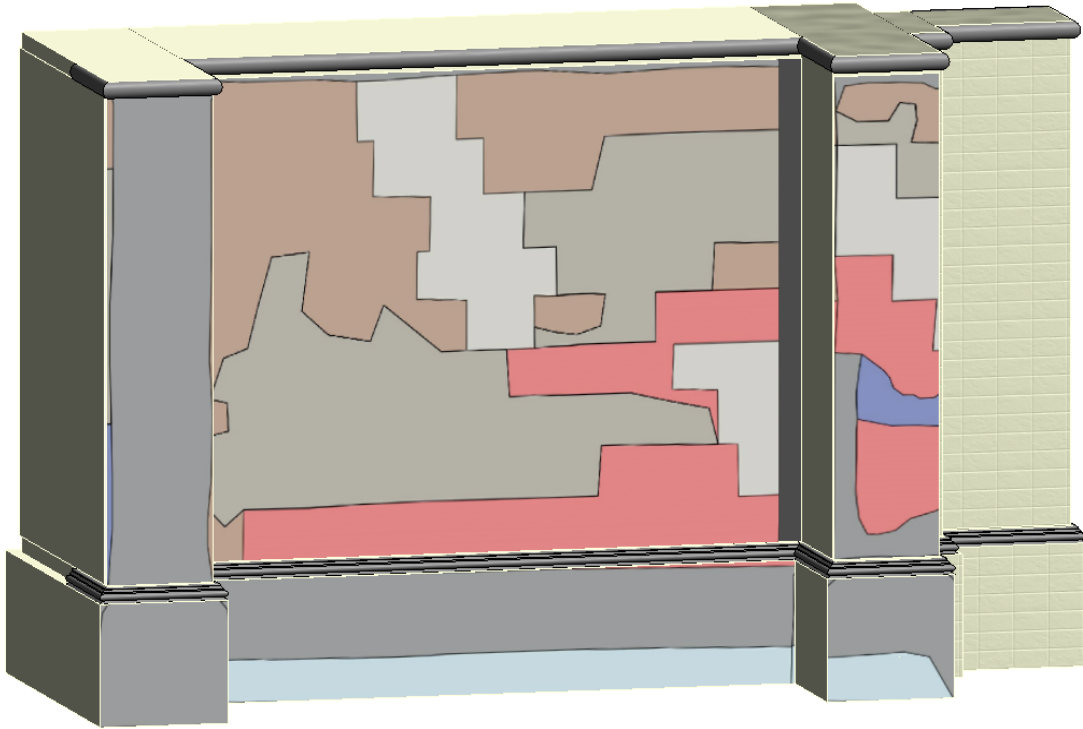


Figura 6.14 – Classificação Manual em 3D REVIT

Terceira fase, a Figura 6.15 mostra a classificação pixel (Ecognition), inserida da mesma forma que na fase anterior.

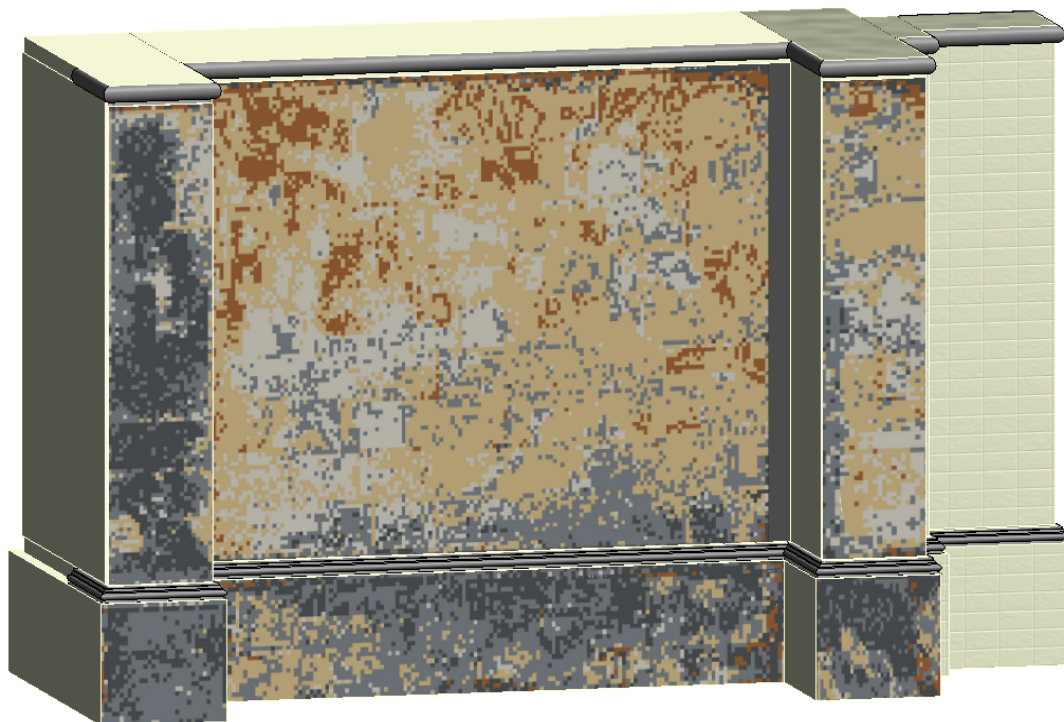


Figura 6.15 – Classificação Pixel em 3D REVIT

Fase quatro, Figura 6.16, classificação objecto, considerada a classificação com melhores resultados.

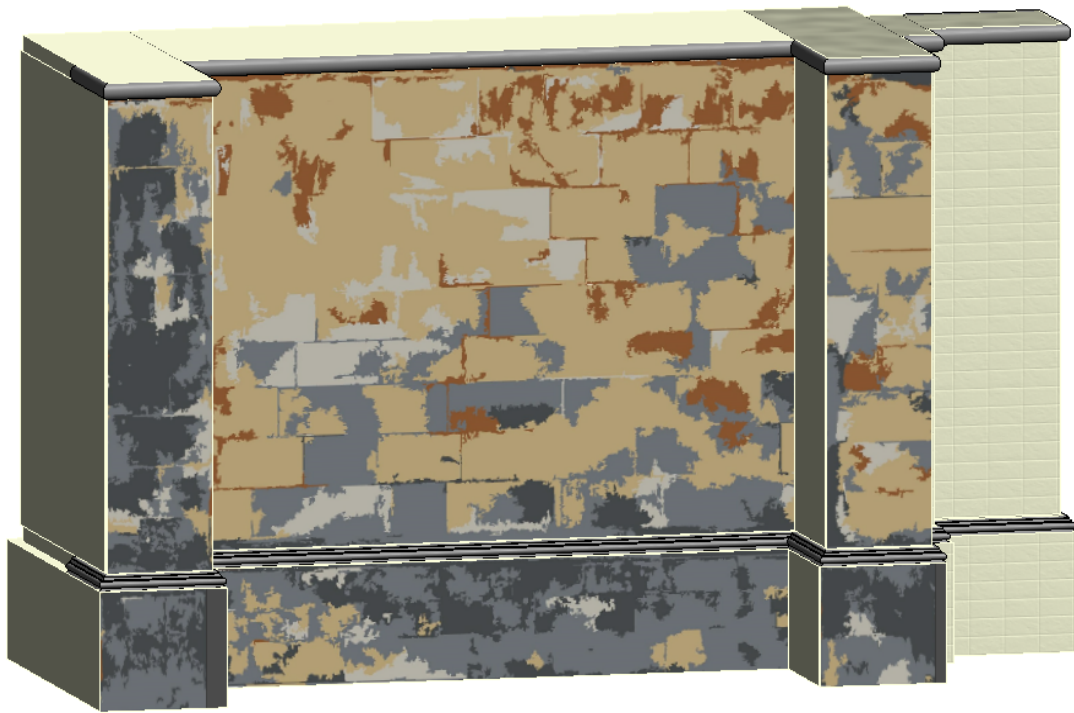


Figura 6.16 – Classificação Objecto em 3D REVIT

Fase cinco, as imagens de termografia obtidas com a câmara Flir, inserida como revestimento, Figura 6.17.

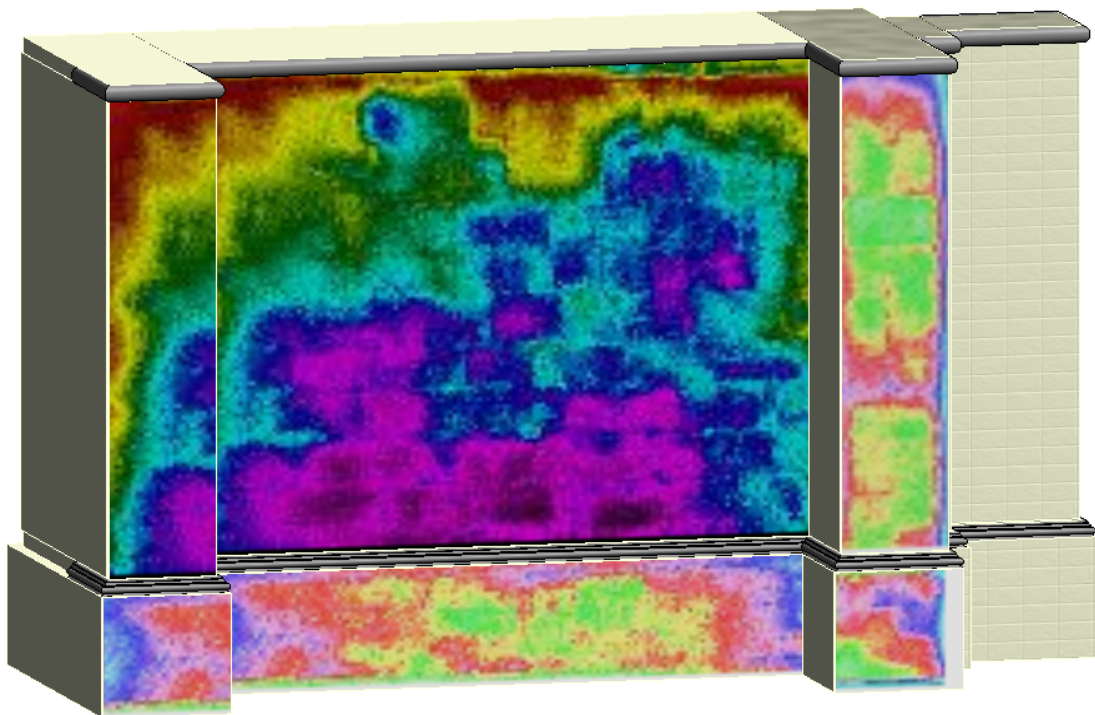


Figura 6.17 – Termografia em 3D REVIT

Por fim apresentamos uma vista geral de todas as fases, nas Figuras 6.18 e 6.19.

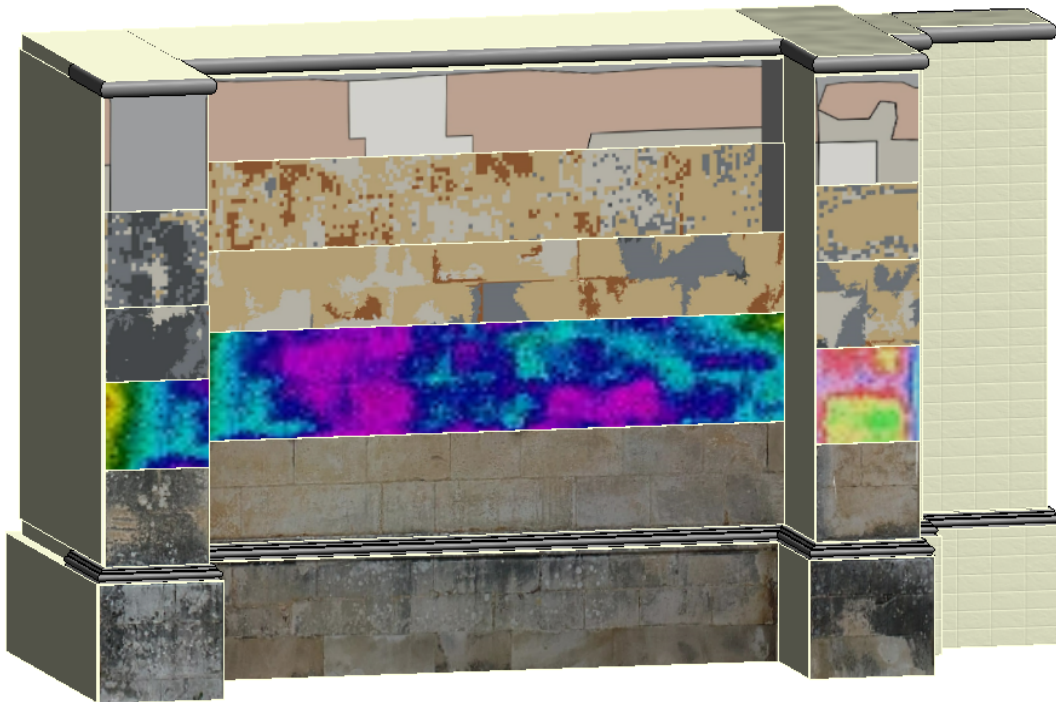


Figura 6.18 – Resultado em 3D REVIT

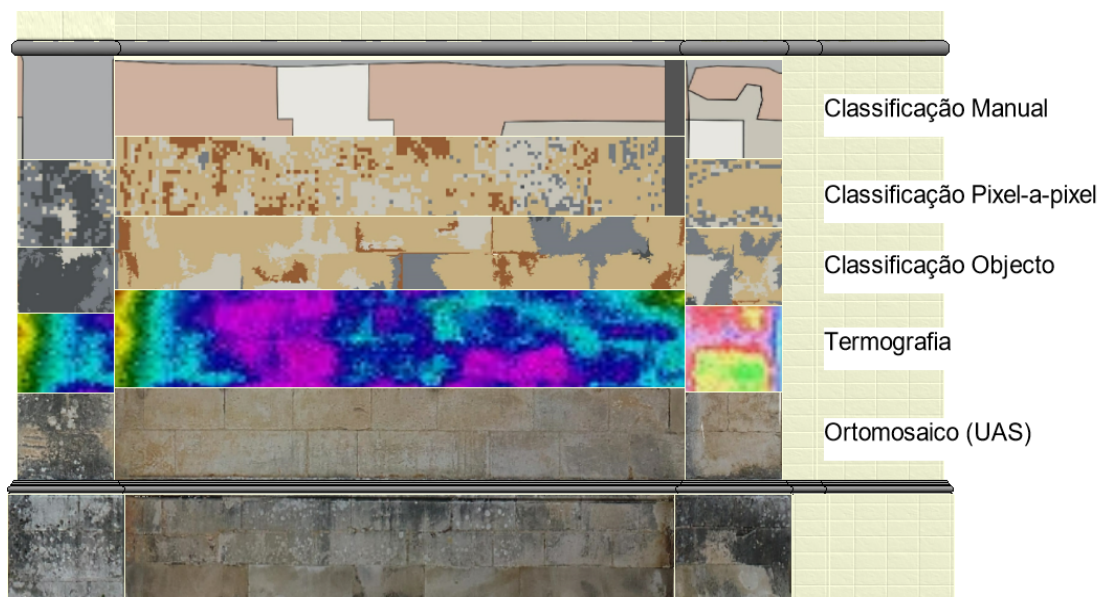


Figura 6.19 – Identificação camadas em 3D REVIT

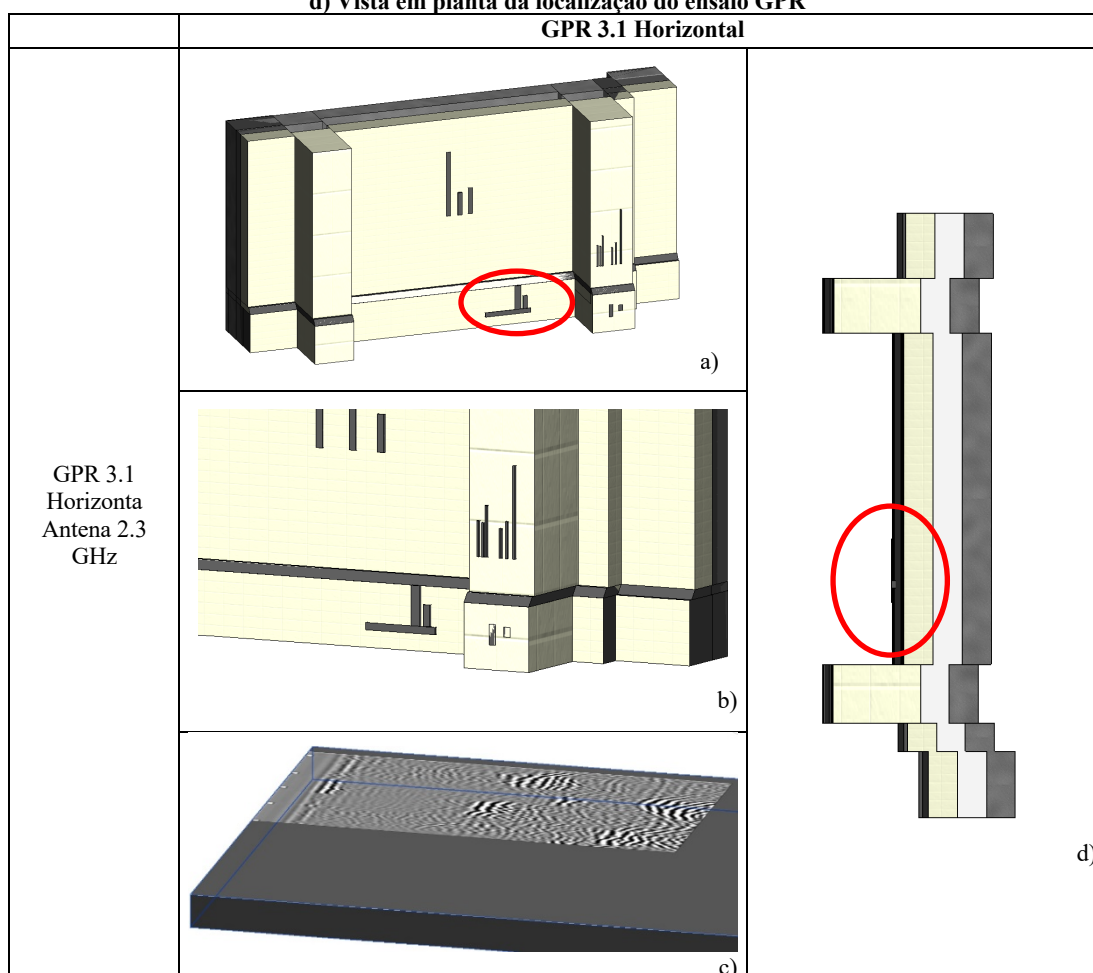
A metodologia seguida requereu investigação de várias ferramentas do Revit, possibilitando explorar e analisar a melhor forma de obter o resultado pretendido.

A integração das imagens/Classificações na fachada do mosteiro no modelo BIM representa mais um passo no sentido da automatização de tarefas morosas e que sendo introduzidas no modelo facilitam a consulta de vários grupos de pessoas ligadas a um projeto de restauro. O resultado obtido permite-nos identificar de forma clara os vários ensaios e classificadores inseridos, as imagens não perderam qualidade na passagem para o modelo e é possível serem consultadas aleatoriamente.

Em seguida são apresentados os resultados da inserção dos ensaios GPR, nas paredes do mosteiro.

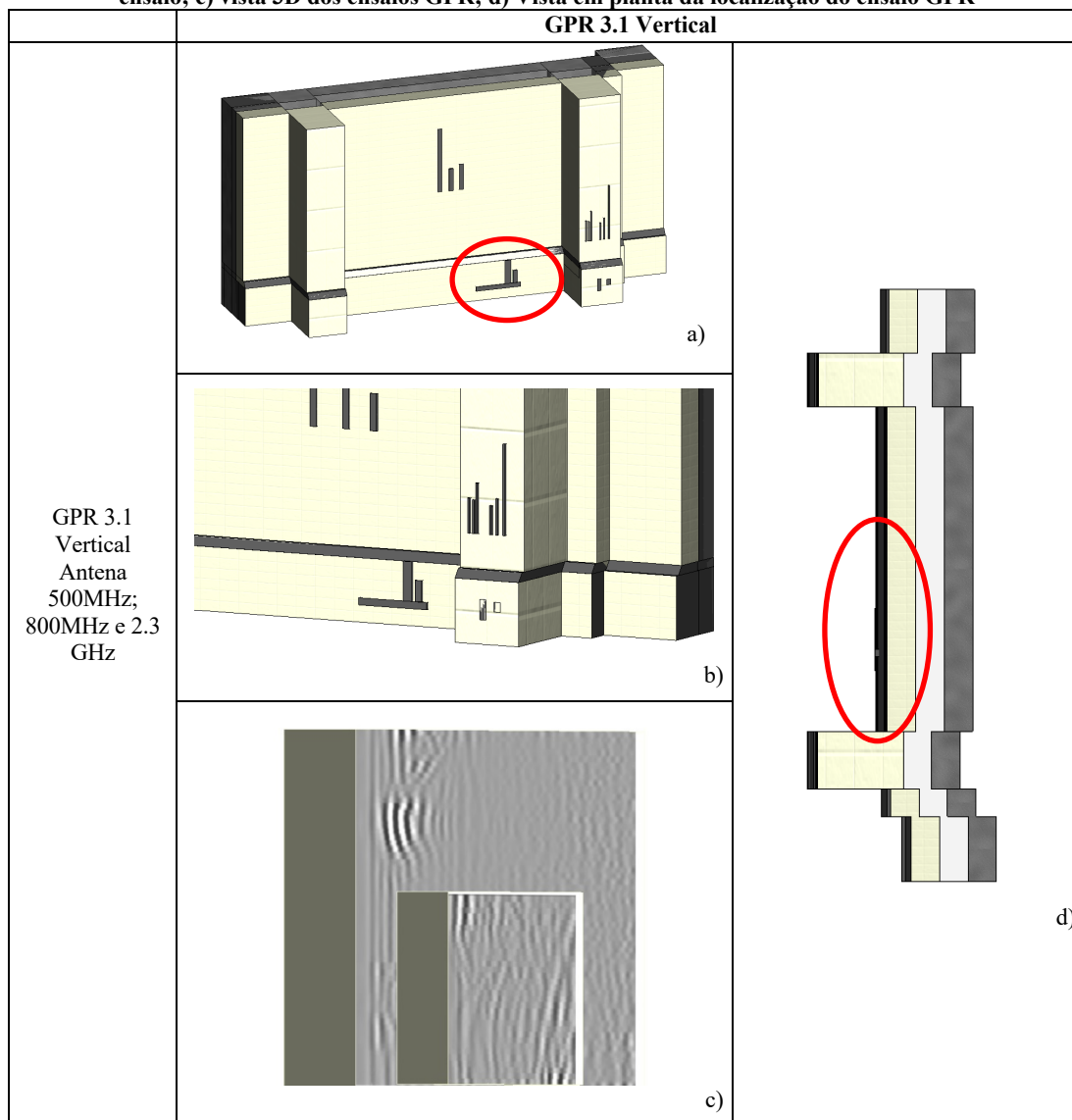
Zona 3.1 Horizontal – A Tabela 6.9 mostra a vista dos ensaios de GPR realizados na parede P2, no sentido horizontal da esquerda para a direita, num ensaio realizado com a antena 2.3GHz.

Tabela 6.9 – a) Posicionamento do ensaio 3D GPR 3.1 Horizontal; b) 3D local ensaio; c) vista 3D dos ensaios GPR; d) Vista em planta da localização do ensaio GPR



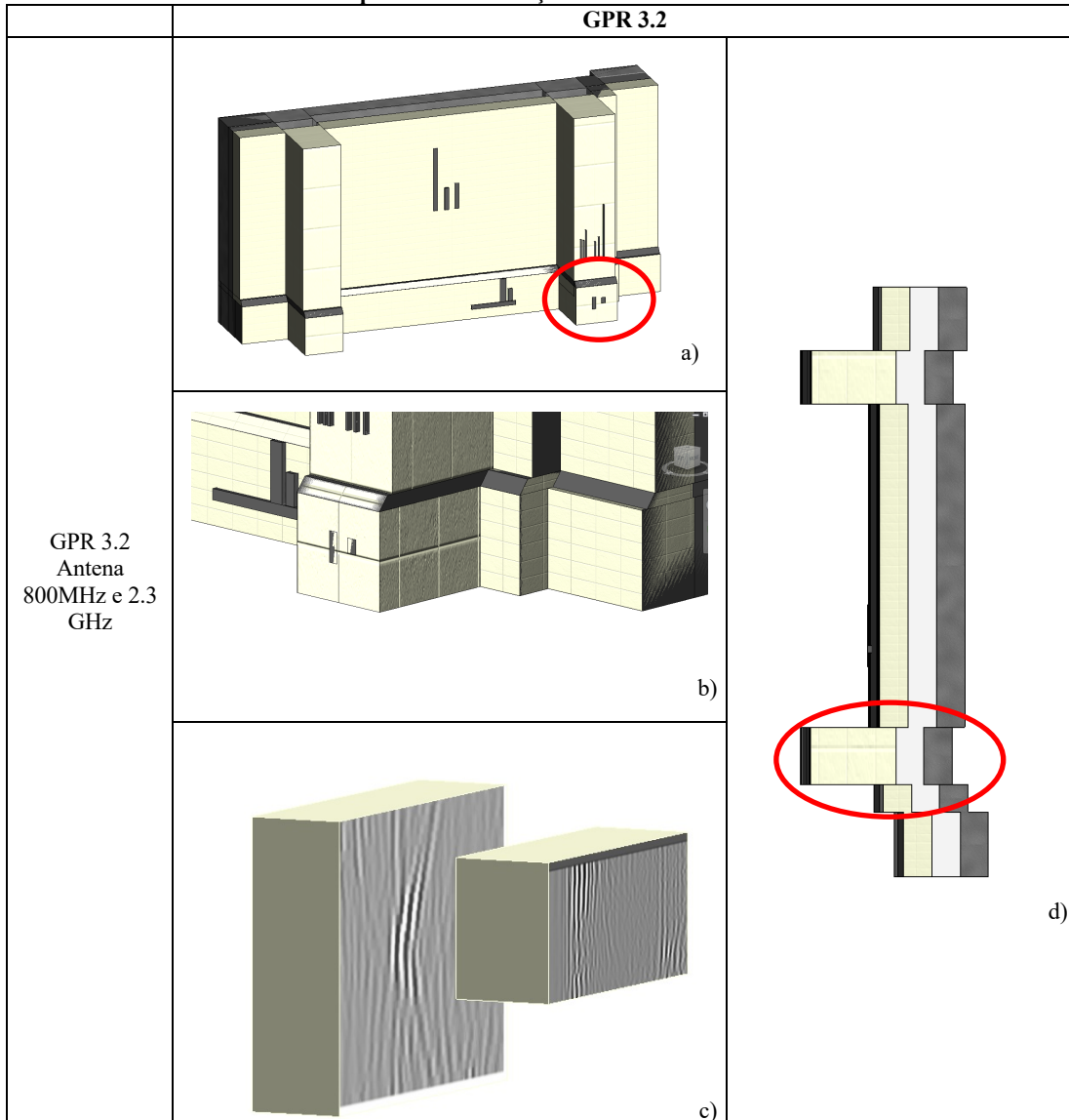
Zona 3.1 Vertical – A Tabela 6.10 mostra a vista dos ensaios de GPR realizados na parede P2, no sentido descendente, num total de dois ensaios, um com antena 800MHz e outro com antena 2.3GHz.

Tabela 6.10 – a) Posicionamento do ensaio 3D GPR 3.1 Vertical com antena 800MHz e 2.3 GHz; b) 3D local ensaio; c) vista 3D dos ensaios GPR; d) Vista em planta da localização do ensaio GPR



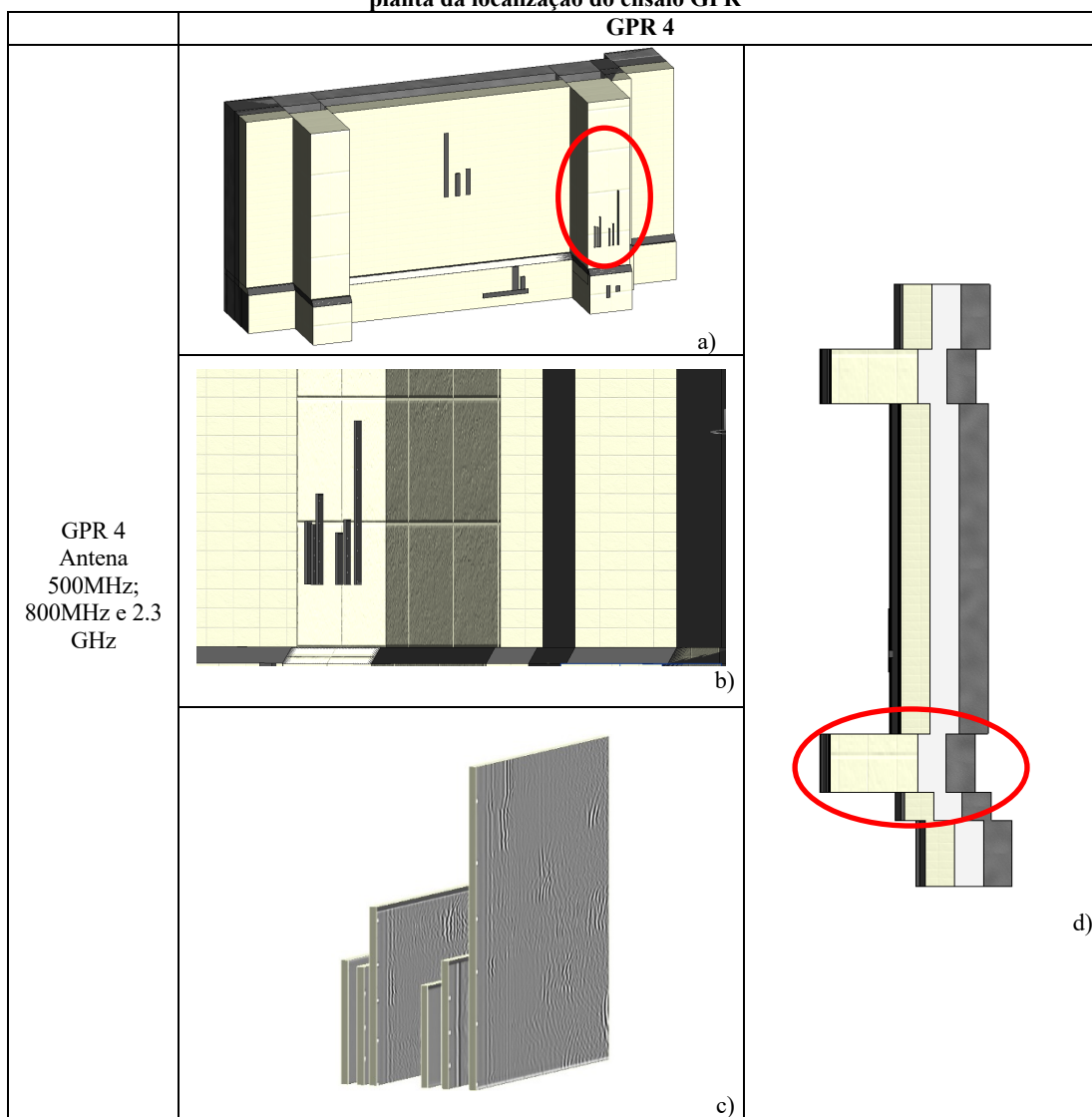
Zona 3.2 – A Tabela 6.11 mostra a vista dos ensaios de GPR realizados no Pilar P3, no sentido descendente, num total de dois ensaios, um com antena 800MHz e outro com antena 2.3GHz.

Tabela 6.11 – a) Posicionamento do ensaio 3D GPR 3; b) 3D local ensaio; c) vista 3D dos ensaios GPR; d) Vista em planta da localização do ensaio GPR



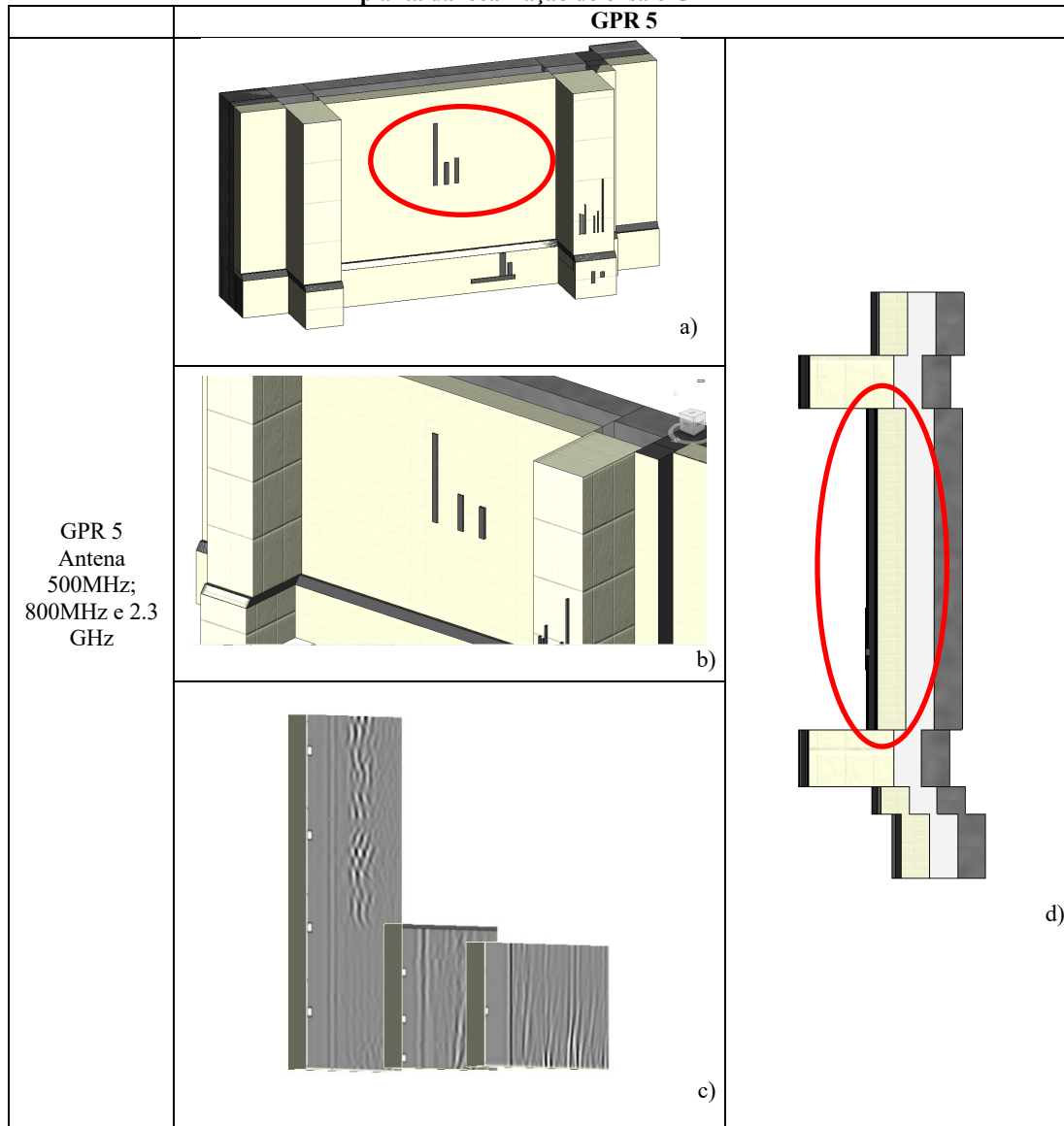
Zona 4 – A Tabela 6.12 apresenta a vista dos ensaios de GPR realizados no Pilar P6, em duas filas no sentido ascendente, num total de seis ensaios realizados, dois com antena 500MHz, dois com antena 800MHz e dois com antena 2.3GHz.

Tabela 6.12 – a) Posicionamento do ensaio 3D GPR 4; b) 3D local ensaio; c) vista 3D dos ensaios GPR; d) Vista em planta da localização do ensaio GPR



ZONA 5 – A Tabela 6.13 exhibe a vista dos ensaios de GPR realizados na parede P5, no sentido ascendente, num total de três ensaios um de cada tipo de antena.

Tabela 6.13 – a) Posicionamento do ensaio 3D GPR 5; b) 3D local ensaio; c) vista 3D dos ensaios GPR; d) Vista em planta da localização do ensaio GPR



O desafio de inserir paredes de dimensões reduzidas perpendicularmente às paredes do mosteiro mostrou a necessidade de criar subníveis para auxiliar, que serviram como base de apoio das paredes. O resultado obtido no REVIT demonstra de forma clara o local onde foram realizados os ensaios, e a imagem inserida como revestimento mostra com clareza o ensaio de GPR. Nas tabelas dos ensaios GPR identificou-se na zona de estudo o local do ensaio, a posição (vertical ou horizontal) e a parede com o ensaio GPR. Este género de imagem poderá vir a ser útil a equipas de investigação que necessitem de saber mais sobre a constituição da parede.

7. Conclusões Finais e Desenvolvimentos Futuros

7.1. Conclusões Finais

O trabalho desenvolvido apresenta uma contribuição para a aplicação da modelação BIM ao património histórico. A implementação de um modelo BIM é demorada e requer uma equipa interdisciplinar, pois a capacidade desta ferramenta é uma mais valia para acelerar a relação entre desenvolvimento, sustentabilidade e eficiência de recursos.

Com as classificações das patologias, verificou-se a eficácia da classificação automática em relação a uma classificação manual, pelo tempo em que se obtém resultados. No entanto, estes métodos também têm desvantagens, como o facto de certas patologias não serem detetáveis.

A eficácia dos ensaios GPR na determinação da profundidade da camada, na deteção de obstáculos, possíveis fendas, mudanças de espessura dos materiais e vazios existentes. Constatou-se que a variedade de ensaios realizados com antenas de vários alcances foi fundamental.

No caso da termografia, os dados obtidos permitiram verificar a existência de algumas infiltrações, que ao nível do pavimento são mais visíveis, podem dever-se à fragilidade do material que foi utilizado num restauro na zona considerada.

O HBIM é uma ferramenta colaborativa, logo as vantagens são imensas, como permitir desenvolver um projecto de restauro com base em levantamentos de laser scanning em 3D, pois com a nuvem de pontos inserida no software a criação de paredes torna-se mais rápida. O mesmo acontece com plantas de projecto em formato CAD. Permite a quantificação automática de elementos construtivos, transformando todos os dados inseridos no projeto em quantidades de materiais e mão de obra. Esse método permite ser muito mais eficaz do que a quantificação em projetos 2D, pois há certos locais que não são facilmente identificados em duas dimensões, exigindo o levantamento de áreas para que depois transforme os dados em número de peças, logo três etapas do usuário para quantificar, que são: desenhar, levantar e converter; enquanto que no BIM necessita somente do desenho para que, automaticamente, se obtenha os dados e os converta, tornando o processo mais ágil e sem riscos de erros humano. A possibilidade de realizar alterações no projeto durante a

fase de obra, de forma mais rápida e eficaz. O modelo HBIM é cada vez mais utilizado nas obras de reabilitação e também em novas construções pois permite ganhar tempo e poupar recursos.

As desvantagens da criação de um modelo HBIM reside no investimento inicial, requer muito tempo para criação de templates e famílias, logo uma vasta equipa de profissionais qualificados para a troca de informações. O custo dos softwares também pode ser considerado por algumas empresas uma desvantagem, tal como a formação das equipas de trabalho. Outra desvantagem é na criação de famílias de pormenores arquitectónicos, estes são muito detalhados e difíceis de realizar, por isso muitas vezes veem-se imagens criadas no software sem detalhes e apenas linhas direitas.

O objecto deste trabalho era desenvolver um modelo 3D, integrando nele dados de diferentes técnicas de monitorização e caracterização do património construído, para posteriormente poderem ser utilizadas por equipas de reabilitação, restauração e conservação. É possível concluir que o objectivo foi concluído com sucesso, apesar de haver sempre mais a desenvolver para melhorar técnicas e possibilitar a integração de mais elementos para as equipas de intervenção.

Pode-se concluir neste trabalho que uma das grandes contribuições da metodologia BIM reside na automatização de tarefas, com a junção num modelo de várias características e ensaios que vão possibilitar a equipas de restauro e/ou reabilitação a análise deste material, sem ser necessário consultar várias plataformas.

7.2. Desenvolvimentos Futuros

No seguimento deste trabalho existem várias sugestões de desenvolvimentos futuros, pois em todos os setores desenvolvidos existem enormes potencialidades a explorar.

Nos monumentos de valor patrimonial devem realizar-se ensaios não destrutivos frequentemente, para ser possível avaliar as propriedades dos materiais e as variações de comportamentos ao longo do tempo.

A nível da classificação manual seria interessante que as patologias identificadas fossem mais minuciosas, subdividindo mais as classes mais presentes, que são a patina e as crostas negras, pois assim a comparação com a classificação automática aproximar-se-ia mais da realidade do terreno.

A potencialidade dos classificadores automáticos é imensa, e existem outros métodos de classificação que seriam interessantes de explorar, como o método da distância mínima ou o método da verosimilhança, dando assim a possibilidade de testar vários algoritmos e haver uma maior diversidade de resultados.

A termografia tem imenso potencial, que não foi totalmente explorado, como realizar levantamentos em vários horários do dia e em vários dias, para assim realizar um meio de comparação entre as horas de aquecimento e as horas de arrefecimento da pedra. A avaliação com camaras de maior capacidade, e a comparação das imagens obtidas com os vários equipamentos.

A construção do modelo HBIM através de um levantamento de nuvens de pontos do interior e exterior permitiria detetar um maior número de pormenores e facilitar a construção do modelo mais detalhado.

A necessidade de explorar outras formas de integrar a informação no modelo, a troca de informações entre equipas de várias áreas permite permutação de informações e a verificação da importância de detalhes na construção de modelos. A criação de uma plataforma de troca/venda de famílias de pormenores arquitectónicos seria uma mais valia, pois estes requerem tempo e vasta experiência na sua conceção.

Bibliografia

- [1] R. Sousa, “Técnicas de Reabilitação, Conservação e Restauro em Paramentos de Alvenaria de Pedra – Aplicação ao alçado principal da Igreja do Carmo de Coimbra,” *Diss. apresentada para a obtenção do grau Mestre em Eng. Civ. na Espec. Construções- FCTUC*, p. 153, 2014.
- [2] V. P. de Freitas, *Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos*, Ordem dos. Porto: Ordem dos Engenheiros da Região Norte, 2012.
- [3] N. P. Avdelidis and A. Moropoulou, “Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures,” *J. Cult. Herit.*, vol. 5, no. 1, pp. 119–127, 2004.
- [4] C. Meola, “A new approach for estimation of defects detection with infrared thermography,” *Mater. Lett.*, vol. 61, no. 3, pp. 747–750, 2007.
- [5] D. D. S. Silva, “Diagnóstico de patologias em fachadas utilizando termografia,” *Diss. submetida para Satisf. parcial dos requisitos do grau MESTRE EM Eng. Civ. — Espec. EM CONSTRUÇÕES- FEUP*, p. 132, 2012.
- [6] Assembleia da República, “Recomenda ao Governo a concretização de medidas que minimizem os impactos ambientais do ruído gerado pelo tráfego de veículos sobre o MOSTEIRO DA BATALHA,” *Diário da República*, pp. 17–19.
- [7] F. Pedro, “Descontentamento com ‘muro da vergonha’ em frente ao Mosteiro da Batalha,” *www.jn.pt*. .
- [8] C. Moura Soares, *O Restauro do Mosteiro da Batalha*, Magno Ediç. Leiria: Magno Edições, 2001.
- [9] S. A. Gomes, “Anais Leirienses – estudos & documentos – Mosteiro da Batalha. Notas e imagens. 1,” 2019.
- [10] F. Vazão, “Levantamento e caracterização das patologias da Capela do Fundador do Mosteiro da Santa Maria da Vitória,” *Inst. Politécnico Leir.*, p. 126, 2015.
- [11] P. M. Miranda Rodrigues, “O poder da cor na Idade Média: policromia na Capela do Fundador do Mosteiro da Batalha,” 2018.

- [12] M. Pamplona, M. J. Melo, L. A. Aires-Barros, and A. Dionísio, “Documentar para melhor conservar: o uso de produtos consolidantes e hidrófugos em intervenções de conservação em monumentos portugueses construídos em pedra TT - Documenting for a better conservation: the use of consolidants and water repellents in conse,” *Conserv. património*, no. 6, pp. 11–20, 2007.
- [13] L. Aires-Barros, *As rochas dos monumentos portugueses (tipologias e patologias)*, IPPAR. Lisboa: Instituto Português do Património Arquitectónico, 2001.
- [14] ICOMOS, *ICOMOS Illustrated glossary on stone deterioration patterns*, Comité sci. ICOMOS International Scientific Committee for Stone (ISCS), 2008.
- [15] A. J. Tomás, “CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO,” *Fac. Arquit. da Univ. Lisboa*, p. 403, 2014.
- [16] C. V. S. BARROS, “Mosteiro da Batalha,” p. 3, 1980.
- [17] G. Pappalardo, S. Mineo, and C. Monaco, “Geotechnical characterization of limestones employed for the reconstruction of a UNESCO world heritage Baroque monument in southeastern Sicily (Italy),” *Eng. Geol.*, vol. 212, pp. 86–97, 2016.
- [18] Micael da Silva Pedroso, “Monitorização das Vibrações Ambientais no Mosteiro da Batalha,” 2016.
- [19] H. Varum *et al.*, “Levantamento Das Patologias E Monitorização Do Arco-Cruzeiro Da Igreja Da Misericórdia De Aveiro,” vol. 17, pp. 65–73, 2009.
- [20] P. J. C. C. Casimiro, “Uso do solo, teledetecção e estrutura da paisagem. Ensaio metodológico-Concelho de Mértola,” pp. 1–585, 2002.
- [21] G. Gonçalves, “Características dos dados imagem e sua avaliação Conteúdo.”
- [22] M. R. Feital, “Uso de VANT (Veículo Aéreo não Tripulado) para inspeção de Projetos de Construção Civil,” 2017.
- [23] P. J. Hardin, V. Lulla, R. R. Jensen, and J. R. Jensen, “Small Unmanned Aerial Systems (sUAS) for environmental remote sensing: challenges and opportunities revisited,” *GIScience Remote Sens.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–14, 2018.
- [24] John R. Jensen, *Introductory Digital Image Processing A Remote Sensing*

Perspective, vol. 91. 2017.

- [25] M. Russo, L. Carnevali, V. Russo, D. Savastano, and Y. Taddia, “Modeling and deterioration mapping of façades in historical urban context by close-range ultra-lightweight UAVs photogrammetry,” *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–20, 2018.
- [26] Gil Gonçalves, “Detecção Remota Aplicada 1.”
- [27] G. Gonçalves, “Detec, Remota Cursos, Remota Aplicada Geogr, Engenharia Lectivo, Ano,” pp. 131–152.
- [28] N. M. N. Martins, “Utilização de imagens de satélite de alta resolução para a extracção de elementos em ambiente urbano,” vol. 5, pp. 13–15, 2012.
- [29] J. Piçarra, “Trabalho de Projecto de mestrado em Gestao do territorio - deteção remota.” p. 45, 2014.
- [30] Eastman, J. R., “Multi-criteria evaluation and GIS.,” *Geogr. Inf. Syst.*, pp. 493-502., 1999.
- [31] A. P. Annan, “Ground Penetrating Radar Applications Principles, Procedures & PLEASE FILL OUT AND FAX BACK METHOD OF PAYMENT Do Not Send Cash By Mail,” 2003.
- [32] Dulce Alexandra Lourenço Franco, “Avaliação das potencialidades do georadar em Engenharia Civil,” 2010.
- [33] O. A. Lopes, “Uso do GPR (Ground Penetration Radar) em trechos de pavimentos da cidade UNIVERSITÁRIA DA UFRJ.,” 2009.
- [34] S. Court, “GPR – TRENDS, HISTORY, AND FUTURE DEVELOPMENTS A. P. Annan,” no. 905, 2001.
- [35] A. C. Pinheiro *et al.*, “Limestone biodeterioration: A review on the Portuguese cultural heritage scenario,” *J. Cult. Herit.*, 2018.
- [36] E. Grinzato, V. Vavilov, and T. Kauppinen, “Quantitative infrared thermography in buildings,” *Energy Build.*, vol. 29, no. 1, pp. 1–9, 1998.

- [37] E. Z. Kordatos, D. A. Exarchos, C. Stavrakos, A. Moropoulou, and T. E. Matikas, “Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 1261–1265, 2013.
- [38] G. F. P. DE OLIVEIRA, *Potencialidades da termografia para o diagnóstico de patologias associadas à humidade*. Porto, 2013.
- [39] E. Grinzato, C. Bressan, S. Marinetti, P. G. Bison, and C. Bonacina, “Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 43, no. 3–5, pp. 165–169, 2002.
- [40] F. N. Santos, D. Ant, B. Tadeu, D. Nuno, and A. Vieira, “Uso da termografia para a caracterizar qualitativamente fachadas e edificios,” 2014.
- [41] C. A. Balaras and A. A. Argiriou, “Infrared thermography for building diagnostics,” *Energy Build.*, vol. 34, no. 2, pp. 171–183, 2002.
- [42] T. S. Curry, J. E. Dowdey, and R. E. Murry, “Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges,” *NDT E Int.*, vol. 36, p. 505, 1990.
- [43] M. M. S. A. F. R. J. M. R. R. J. Barraca, *Anatomia de um Mosteiro - Estudo geofísico de Mosteiro da Batalha*, Projecto f. Batalha, 2013.
- [44] S. Del Pozo *et al.*, “Multispectral imaging in cultural heritage conservation,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 42, no. 2W5, pp. 155–162, 2017.
- [45] J. Corso, J. Roca, and F. Buill, “Geometric Analysis on Stone Façades with Terrestrial Laser Scanner Technology,” *Geosciences*, vol. 7, no. 4, p. 103, 2017.
- [46] D. Oreni, R. Brumana, S. Della Torre, F. Banfi, L. Barazzetti, and M. Previtali, “Survey turned into HBIM: The restoration and the work involved concerning the Basilica di Collemaggio after the earthquake (L’Aquila),” *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 2, no. 5, pp. 267–273, 2014.
- [47] A. J. C. Marinho, “Aplicação do Building Information Modeling na gestão de projetos de construção,” 2014.

- [48] J. F. Reinoso-Gordo, C. Rodríguez-Moreno, A. J. Gómez-Blanco, and C. León-Robles, “Cultural Heritage conservation and sustainability based on surveying and modeling: The case of the 14th century building Corral del Carbón (Granada, Spain),” *Sustain.*, vol. 10, no. 5, 2018.
- [49] “<https://doi.org/10.1155/2019/9872736>.” .
- [50] T. Academy *et al.*, “Historic building information modelling (HBIM),” *Struct. Surv.*, vol. 27, no. 4, pp. 311–327, 2009.