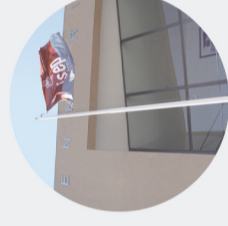




INSPEÇÃO DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM COM AUXÍLIO DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO

HÉLIO RODRIGO RIBEIRO TEIXEIRA

novembro de 2019



INSPEÇÃO DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM COM AUXÍLIO DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO

INSPEÇÃO DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM COM
AUXÍLIO DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO

HÉLIO RODRIGO RIBEIRO TEIXEIRA
Outubro de 2019



INSPEÇÃO DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM COM AUXÍLIO DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO

HÉLIO RODRIGO RIBEIRO TEIXEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE CONSTRUÇÕES

Orientador: Prof. Dr. Diogo Rodrigo Ferreira Ribeiro

Co-Orientador: Prof. Ricardo Manuel Pereira Santos

OUTUBRO DE 2019

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos	xi
Índice de Texto	xv
Índice de Figuras.....	xvii
Índice de Tabelas.....	xxiii
Abreviaturas	xxv
CAPÍTULO 1 Introdução.....	1
CAPÍTULO 2 Patologias e Anomalias em estruturas de betão armado.....	3
CAPÍTULO 3 Técnicas de Inspeção de Estruturas.....	23
CAPÍTULO 4 Desenvolvimento de ferramentas de identificação semiautomática de anomalias em estruturas de betão armado	53
CAPÍTULO 5 Identificação de anomalias no fuste de betão da torre de telecomunicações do Monte da Virgem	71
CAPÍTULO 6 Considerações Finais.....	107
Referências Bibliográficas	109
Anexo I – Ferramenta de deteção de fissuras.....	117
Anexo II – Ferramenta de deteção de colonizações biológicas (Líquenes).....	119
Anexo III – Ferramenta de deteção de eflorescências	121
Anexo IV – Ferramenta de identificação de corrosão e armaduras expostas.....	123
Anexo V – Ferramenta de deteção RGB	125
Anexo VI – Ferramenta “ <i>Overlay</i> ”	127

RESUMO

A presente dissertação, intitulada "Inspeção da torre de telecomunicações do monte da virgem com auxílio de um veículo aéreo não tripulado" surge no âmbito da unidade curricular de DIPRE, para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil – Ramo de Construções do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), com a orientação do Engenheiro Diogo Ribeiro e coorientação do Engenheiro Ricardo Santos, e tem como objetivo a criação de um conjunto de procedimentos para avaliar o estado de conservação do fuste de betão armado da Torre da Altice, situada no Monte da Virgem, Vila Nova de Gaia.

Este trabalho surge de uma parceria técnica entre o ISEP e a ALTICE, que visa a elaboração da inspeção do fuste de betão armado e a criação de procedimentos para a inspeção de infraestruturas similares. Para a realização do presente artigo foi utilizado um veículo aéreo não tripulado (VANT), bem como software avançado de processamento de imagem e fotogrametria.

A presente dissertação visa abordar e utilizar as potencialidades do uso de veículos aéreos não tripulados, para a inspeção e monitorização de obras de engenharia, bem como criar e apresentar metodologias de inspeção e ferramentas para a deteção semiautomática de anomalias e patologias.

Palavras-chave: Inspeção, deteção, patologias, anomalias, torre do monte da virgem, betão armado, drones, fotogrametria, Matlab, processamento de imagens, modelação 3D.

ABSTRACT

The present dissertation, entitled "Inspection of the telecommunication tower of the virgin mount with the aid of an unmanned aerial vehicle" comes within the ambit of the DIPRE course unit, to partially satisfy the requirements of the degree of Master in Civil Engineering, of "Instituto Superior de Engenharia do Porto" (ISEP), with the guidance of Engineer Diogo Ribeiro and with the co-orientation of Engineer Ricardo Santos, and aims to create a set of procedures to assess the conservation status of the Altice Tower reinforced concrete shaft , located in Monte da Virgem, Vila Nova de Gaia.

This work stems from a technical partnership between ISEP and Altice, which aims at the preparation of the reinforced concrete shaft inspection and the creation of procedures for the inspection of similar infrastructures. For the accomplishment of this article an unmanned aerial vehicle (UAV) was used, as well as advanced software of image processing and photogrammetry.

This thesis aims to address and utilize the potential of unmanned aerial vehicle use for the inspection and monitoring of engineering works, as well as to create and present inspection methodologies and tools for semi-automatic detection of anomalies and pathologies.

Keywords: Inspection, detection, pathologies, anomalies, monte da virgem tower, reinforced concrete, drones, photogrammetry, matlab, image processing, 3D modeling.

Aos meus pais e à minha noiva, Joana.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Diogo Ribeiro e Professor Ricardo Santos, por toda a disponibilidade, apoio, orientação e pelos conhecimentos transmitidos no desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus colegas Anderson Shibasaki, Gabriel Saramago, Nuno Topa, Óscar Moreira e Rafael Cabral, por todo o companheirismo, entreaajuda e apoio prestado no desenvolvimento dos trabalhos.

Ao Eng.º Jorge Garcia, da ALTICE, por toda a disponibilidade e suporte prestado na realização das campanhas de inspeção na torre do Monte da Virgem.

Ao Eng.º José Costa, pela compreensão e apoio na conclusão do meu percurso académico.

Aos meus amigos, por todo o apoio e amizade no meu trajeto académico e pessoal.

À minha irmã, por todo o apoio, carinho, amizade e todo o amor que me transmitiu ao longo da minha vida.

Aos meus Pais, pelos seus sacrifícios que permitiram realizar todo o meu percurso académico, pelos seus ensinamentos, apoio e amor em todas as fases da minha vida. Por tornarem tudo possível e terem sempre acreditado em mim, serei eternamente grato.

À Joana, por ter tornado tudo possível, ter acreditado em mim e nunca me ter permitido desistir ou fracassar. Por todo o seu amor, carinho e compreensão em todas as fases da minha vida, serei sempre grato.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

(Charles Chaplin)

ÍNDICE DE TEXTO

1.1	Considerações Iniciais.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Organização do trabalho.....	2
2.1	Ações do Meio Ambiente.....	5
2.1.1	Condições Climatéricas.....	5
2.1.2	Agressividade do meio ambiente	8
2.1.3	Ações biomecânicas.....	15
2.2	Erros de projeto, construtivos ou de utilização	18
2.3	Anomalias em estudo	19
2.3.1	Fissuração	19
2.3.2	Eflorescências	20
2.3.3	Líquenes.....	20
2.3.4	Corrosão de armaduras e delaminação.....	21
3.1	Enquadramento	23
3.2	Estado de arte.....	26
3.2.1	UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAV) AS A SUPPORT TO VISUAL INSPECTIONS OF CONCRETE DAMS - (Henriques, et al., 2015)	26
3.2.2	CrackIT – AN IMAGE PROCESSING TOOLBOX FOR CRACK DETECTION AND CHARACTERIZATION (Oliveira, et al., 2014)	28
3.2.3	UAV-Based Bridge Inspection and Computational Simulations (Duque, 2017)	30
3.2.4	Mapping, modeling and inspecting the UK's tallest tower (Pix4D, 2016)	36
3.2.5	Veículo Aéreo Não Tripulado (Drones).....	38

3.2.6	Câmaras de vídeo.....	44
3.3	Proposta de metodologia.....	45
3.3.1	Pesquisa de projetos e histórico de intervenções.....	46
3.3.2	Pré-inspeção	47
3.3.3	Elaboração de plano de voo	48
3.3.4	Captação de imagens.....	49
3.3.5	Processamento de imagens.....	50
3.3.6	Modelação 3D.....	50
3.3.7	Análise de resultados.....	51
4.1	Enquadramento	53
4.2	Ferramenta de deteção de fissuras	54
4.3	Ferramenta de deteção de colonizações biológicas (Líquenes)	58
4.4	Ferramenta de deteção de eflorescências.....	64
4.5	Ferramenta de identificação de corrosão em armaduras expostas	66
5.1	Introdução.....	71
5.2	Torre do Monte da Virgem	71
5.3	Inspeções realizadas em campo	73
5.4	Fotogrametria aplicada à Torre do Monte da Virgem	80
5.5	Aplicação de ferramentas de deteção de anomalias.....	87
5.5.1	Ferramenta de deteção de fissuras	88
5.5.2	Ferramenta de deteção de colonizações biológicas (Líquenes)	89
5.5.3	Ferramenta de deteção de eflorescências	91
5.5.4	Ferramenta de deteção de corrosão e armaduras expostas.....	93
5.5.5	Modelação e visualização 3D.....	94
5.5.6	Análise de resultados.....	97
6.1	Conclusões	107
6.2	Desenvolvimentos Futuros	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Fatores do meio ambiente que originam patologias no betão armado (adaptado de Brito (2001)).....	4
Figura 2 – Erros ou deficiências que poderão originar anomalias ou patologias no betão (adaptado de Brito (2001)).....	5
Figura 3 – Ações climatéricas no betão armado. (Brito, 2001)	6
Figura 4 – Zonas de depósito ou reentrância de água. (Brito, 2001).....	7
Figura 5 – Relação aumento de volume e número de ciclos gelo-degelo. (Brito, 2001)	7
Figura 6 – Película passiva das armaduras. (Costa, 2011b).....	8
Figura 7 – Despassivação das armaduras. (Costa, 2011b)	9
Figura 8 – Ilustração da relação do preenchimento dos poros com humidade relativa. (Simas, 2007).....	9
Figura 9 – Molhagem e secagem com contaminação de cloretos. (Brito, 2001).....	10
Figura 10 – Relação entre as condições de exposição e os mecanismos de transporte. (Costa, 2011b) ..	11
Figura 11 – Exemplos de ataques por ação de cloretos. (Costa, 2011b)	11
Figura 12 – Esquema representativo do ataque de sulfatos. (Brito, 2001)	12
Figura 13 – Esquema da reação química. (Costa, 2011b)	13
Figura 14 – Representação esquemática dos ataques álcalis no betão. (Brito, 2001).....	13
Figura 15 – Fendilhação decorrente do ataque dos álcalis. (Henriques, 2016)	14
Figura 16 – Fendilhação decorrente do ataque dos álcalis. (Henriques, 2016)	14
Figura 17 – Esquema representativo do ataque de ácidos e sais no betão. (Costa, 2011b)	15
Figura 18 – Elemento de betão com sinais de erosão. (Gomes, 2016).....	16
Figura 19 – Elemento de betão com sinais abrasão. (Costa, 2011b)	16
Figura 20 – Deterioração progressiva das camadas por deterioração. (Henriques, 2016).....	16

Figura 21 – Ação de algas em elemento de betão armado. (Saraiva, 2007)	17
Figura 22 – Ação de moluscos em elemento de betão armado. (Saraiva, 2007)	17
Figura 23 – Ação de raízes em muro de contenção.	18
Figura 24 – Fissuração resultante de erros de dimensionamento. (Costa, 2011b).....	18
Figura 25 – Exemplo de fissuração em viga de betão armado após ensaio de carga. (Andersen, 2016) ..	19
Figura 26 – Exemplo de eflorescências em betão armado. (Hering, 2012).....	20
Figura 27 – Líquenes alojados na superfície de uma rocha. (HHelena, 2014)	21
Figura 28 – Delaminação parcial de camadas de betão. (Silva, 2018)	21
Figura 29 – Esquema representativo da corrosão das armaduras no betão. (Gomes, 2016).....	22
Figura 30 – Plataforma móvel para inspeção a uma ponte em Mirandela. (Alves, 2019)	24
Figura 31 – Inspeção de uma ponte. (Timepress Comunicação Empresarial, 2019).....	24
Figura 32 – Tipos de equipamentos <i>ByBridge</i> . (Brigdebybridge, 2019)	25
Figura 33 – “Alpinismo Industrial” em turbina eólica. (Reis, 2018)	25
Figura 34 – Captação de imagens com recurso a VANT na barragem de Bouçã. (Henriques, et al., 2015)26	26
Figura 35 – Detalhes do drone utilizado e dos seus controladores. (Henriques, et al., 2015).....	26
Figura 36 – Modelação 3D das fotos captadas com recurso ao VANT. (Henriques, et al., 2015)	27
Figura 37 – Georreferenciação da câmara durante o voo. (Henriques, et al., 2015).....	27
Figura 38 – Processamento de imagem. (Henriques, et al., 2015).....	27
Figura 39 – Arquitetura da ferramenta <i>CrackIT</i> . (Oliveira, et al., 2014).....	28
Figura 40 – Exemplo de suavização de imagem através do <i>CrackIT</i> . (Oliveira, et al., 2014).....	29
Figura 41 – Análise comparativa da intensidade dos pixéis da imagem horizontal e a imagem suavizada. (Oliveira, et al., 2014)	29
Figura 42 – Observação da imagem original, deteção de fissura, identificação global de fissura e caracterização da fissura. (Oliveira, et al., 2014)	29
Figura 43 – Caso de estudo. (Duque, 2017).....	31
Figura 44 – Procedimentos recomendados para a inspeção de pontes com recurso a drones. (Duque, 2017)	31
Figura 45 – Caraterização dos elementos da ponte. (Duque, 2017)	32

Figura 46 – Delimitação de áreas críticas. (Duque, 2017)	33
Figura 47 – Vista geral da ponte. (Duque, 2017).....	33
Figura 48 – Destacamento do betão e corrosão das armaduras. (Duque, 2017)	34
Figura 49 – Sinais de eflorescências no betão. (Duque, 2017).....	34
Figura 50 – Localização de anomalias. (Duque, 2017)	34
Figura 51 – Protocolo de quantificação de danos. (Duque, 2017).....	35
Figura 52 – Imagens obtida pela SDDOT. (Duque, 2017)	36
Figura 53 – Imagem obtida com recurso a drone. (Duque, 2017)	36
Figura 54 – Torre “Arquiva”. (Pix4D, 2016)	37
Figura 55 – Drone “DJI Inspire 1”. (SMARTGADGETSHUB, 2015).....	37
Figura 56 – Exemplo de deteção de uma eventual fissura na torre “Arquiva”. (Pix4D, 2016)	38
Figura 57 – Resultado da modelação 3D da Torre “Arquiva”. (Pix4D, 2016)	38
Figura 58 – Esquema do planador construído por Sir George Cayley em 1804. (Monash University, 2002)	39
Figura 60 – VANT criada por Félix de la Croix. (Croix, 1857)	39
Figura 61 – Barco telecomandado de Nikola Tesla. (Stefanović, 2011)	40
Figura 62 – Fotografia do transporte do VANT “V-1”. (Lysiak, 1944).....	40
Figura 63 – Vista pormenorizada do <i>Buzz Bomb</i> . (Heroicrelis, 2017)	40
Figura 64 – Pesquisas no Google pela palavra “drone”. (Google Trends, 2019).....	41
Figura 65 – Mapas de áreas de restrição de voos com VANTs. (ANAC, 2019)	42
Figura 66 – Drone DJI “Matrice 600 Pro”. (DJI, 2019a)	43
Figura 67 – Controlador DJI e monitor <i>Crystal Sky</i>	44
Figura 68 – Câmara <i>Zenmuse X5</i> . (DJI, 2019d)	44
Figura 69 – Principais fases da inspeção.	45
Figura 70 – Metodologia de inspeção genérica.	46
Figura 72 – Exemplo de pré-inspeção, com recurso ao <i>Google Maps</i> (ISEP). (Google, 2019a)	47
Figura 73 – Software de voo automático <i>DJI GS PRO</i> . (Space City Drones, 2017)	48

Figura 74 – Voo e captura de imagens.	49
Figura 75 – Exemplo de modelação 3D através de técnicas de fotogrametria. (Sketchfab, 2016).....	50
Figura 76 – Interface Gráfico do <i>Image Processing Toolbox</i> do programa <i>MATLAB</i>	54
Figura 77 – Fluxograma da ferramenta de Identificação de fissuras.	55
Figura 78 – Exemplo de Aplicação 1 (Fissuras) – Imagem Original.	56
Figura 79 – Exemplo de Aplicação 1 (Fissuras) – Imagem Processada.....	56
Figura 80 – Exemplo de Aplicação 2 (Fissuras) – Imagem Original.	57
Figura 81 – Exemplo de Aplicação 2 (Fissuras) – Imagem Processada.....	57
Figura 82 – Exemplo de Aplicação 3 (Fissuras) – Imagem Original.	58
Figura 83 – Exemplo de Aplicação 3 (Fissuras) – Imagem Processada.....	58
Figura 84 – Fluxograma de identificação de agentes biológicos em estruturas de betão.	59
Figura 85 – Interface com ferramenta de deteção de RGB.....	60
Figura 86 – Exemplo de Aplicação 1 (Líquenes) – Imagem Original.....	61
Figura 87 – Exemplo de Aplicação 1 (Líquenes) – Imagem Processada.	61
Figura 88 – Exemplo de Aplicação 2 (Líquenes) – Imagem Original. (Pxhere, 2017)	62
Figura 89 – Exemplo de Aplicação 2 (Líquenes) – Imagem Processada.	62
Figura 90 – Exemplo de Aplicação 3 (Líquenes) – Imagem Original. (Marsh, 2019)	63
Figura 91 – Exemplo de Aplicação 3 (Líquenes) – Imagem Processada.	63
Figura 92 – Exemplo de Aplicação 1 (Eflorescências) – Imagem Original. (Sabai, 2017)	64
Figura 93 – Exemplo de Aplicação 1 (Eflorescências) – Imagem Processada.....	64
Figura 94 – Exemplo de Aplicação 2 (Eflorescências) – Imagem Original.	65
Figura 95 – Exemplo de Aplicação 2 (Eflorescências) – Imagem Processada.....	65
Figura 96 – Exemplo de Aplicação 3 (Eflorescências) – Imagem Original.	66
Figura 97 – Exemplo de Aplicação 3 (Eflorescências) – Imagem Processada.....	66
Figura 98 – Exemplo de Aplicação 1 (Corrosão) – Imagem Original.....	67
Figura 99 – Exemplo de Aplicação 1 (Corrosão) – Imagem Processada.	67
Figura 100 – Exemplo de Aplicação 2 (Corrosão) – Imagem Original.	68

Figura 101 – Exemplo de Aplicação 2 (Corrosão) – Imagem Processada.....	68
Figura 102 – Exemplo de Aplicação 3 (Corrosão) – Imagem Original.	69
Figura 103 – Exemplo de Aplicação 3 (Corrosão) – Imagem Processada.....	69
Figura 104 - Torre de telecomunicações do Monte da Virgem.....	72
Figura 105 – Pormenores do interior do fuste, com ambos os sistemas de acesso.	72
Figura 106 – Projetos iniciais da torre. (Pauli, 2016).....	73
Figura 107 – DJI Tello. (DJI, 2019a).....	74
Figura 108 – Árvores junto ao fuste de betão da torre.....	75
Figura 109 – Película refletora aplicada sobre o drone.....	75
Figura 110 – Representação do faseamento adotado na inspeção da torre.	76
Figura 111 – Localização do drone em algumas das capturas de imagens na torre.....	77
Figura 112 – Zonas de observação (azul) e de aterragem/descolagem (vermelho).	77
Figura 113 – Drone <i>Parrot Anafi</i> . (Parrot, 2019).....	78
Figura 114 – Imagem térmica do fuste de betão.	78
Figura 115 – Imagem térmica do fuste de betão.	79
Figura 116 – Aves a sobrevoar o drone durante inspeção à torre.....	79
Figura 117 – Interface do software <i>Bulk Rename Utility</i>	80
Figura 118 – Interface do software <i>Pix4D</i> com a localização das capturas.	81
Figura 119 – Modelação 3D do fuste de betão da torre.	82
Figura 120 – Modelação 3D do fuste de betão da torre.	83
Figura 121 – Modelação 3D do fuste de betão da torre.	84
Figura 122 – Análise geométrica da altura com o software <i>Pix4D</i>	85
Figura 123 – Análise geométrica do diâmetro da torre com o software <i>Pix4D</i>	86
Figura 124 – Análise geométrica do diâmetro da torre com o software <i>Pix4D</i>	86
Figura 125 – Análise da área de influência dos líquenes no fuste de betão com o software <i>Pix4D</i>	87
Figura 126 – Deteção de armaduras expostas.	88
Figura 127 – Deteção das irregularidades da superfície do fuste de betão.....	88

Figura 128 – Aplicação da ferramenta de deteção de Líquenes ao caso de estudo – Imagem Original....	89
Figura 129 – Aplicação da ferramenta de deteção de Líquenes ao caso de estudo – Imagem Processada.	89
Figura 130 – Aplicação da ferramenta de deteção de Líquenes ao caso de estudo – Imagem Original....	90
Figura 131 – Aplicação da ferramenta de deteção de Líquenes ao caso de estudo – Imagem Processada.	90
Figura 132 – Aplicação da ferramenta de deteção de eflorescências – Imagem Original.	91
Figura 133 – Aplicação da ferramenta de deteção de eflorescências – Imagem Processada.....	91
Figura 134 – Aplicação da ferramenta de deteção de eflorescências – Imagem Original.	92
Figura 135 – Aplicação da ferramenta de deteção de eflorescências – Imagem Processada.....	92
Figura 136 – Aplicação da ferramenta de deteção de corrosão – Imagem Original.	93
Figura 137 – Aplicação da ferramenta de deteção de corrosão – Imagem Processada.	93
Figura 138 – Aplicação da ferramenta de processamento <i>Overlay</i>	94
Figura 139 – Informações <i>EXIF</i>	95
Figura 140 – Ficheiro <i>EXIF</i>	95
Figura 141 – Modelação 3D das imagens processadas com realce de líquenes no fuste de betão.	96
Figura 142 – Resultado da modelação 3D das imagens processadas de deteção de eflorescências.....	97
Figura 143 – Registo de anomalias.	98
Figura 144 – Registo de anomalias.	99
Figura 145 – Registo de anomalias.	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Especificações técnicas do DJI Matrice 600 Pro. (DJI, 2019c).....	43
Tabela 3.2 – Formulário “modelo”, para registo de anomalias.	51
Tabela 5.1 – Tabela resumo das visitas e imagens capturadas.....	74
Tabela 5.2 – Registo fotográfico de anomalias.	100

ABREVIATURAS

ASP – American Society of Photogrammetry;

EXIF – Exchangeable Image File Format;

GPS –Global Positioning System;

RGB – Red, Green and Blue;

UAV – Unmanned Aerial Vehicle;

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado;

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Todas as obras de engenharia, independentemente da sua dimensão, especificidade ou finalidade, iniciam um processo de degradação natural com o decorrer dos anos. A verificação e monitorização do estado geral das edificações é crucial para a análise e prescrição das demais intervenções, que visam incrementar a sua durabilidade, segurança ou conforto. A realização periódica de inspeções nas obras de engenharia deverá ser, independentemente do tipo de construção, uma constante em toda a sua vida útil. No que se refere a obras de arte, construções de grande dimensão, ou com um grande impacto sociocultural, a inspeção, monitorização e respetiva manutenção tornam-se ainda mais imprescindíveis.

Atualmente, decorrente da degradação natural das construções, é possível observar inúmeras intervenções de inspeção e manutenção em diversas obras de Engenharia Civil em Portugal. Os elevados custos de inspeção a estruturas de grande dimensão, aliados à “instabilidade” económica que se verificou nos últimos anos em Portugal e na Europa, apesar de não ser um fator limitador, são um natural obstáculo para a sua realização.

Dispomos atualmente de ferramentas com inequívocas potencialidades para a segura e correta inspeção de edifícios, obras de arte e demais construções. A redução dos custos, a captação de imagens de grande resolução e a capacidade de proceder à monitorização da evolução de anomalias são apenas algumas das inúmeras vantagens do uso de técnicas de inspeção com recurso a veículos aéreos não tripulados (VANT).

1.2 OBJETIVOS

A presente dissertação tem como principal objetivo realizar uma abordagem à inspeção de estruturas de betão armado, com recurso a tecnologias de captação remota de imagem, processamento e técnicas de fotogrametria. Através da criação de metodologias generalizadas de inspeção com recurso a VANTs,

ferramentas de deteção de anomalias e a aplicação das mesmas a um caso real, pretende-se demonstrar as vantagens e desvantagens da sua aplicação.

Em suma, a presente dissertação tem como objetivos:

- Identificar as possíveis patologias/anomalias de estruturas de betão armado;
- Descrever e apresentar técnicas de inspeção de estruturas com recurso a imagens digitais e VANTS;
- Desenvolver ferramentas computacionais semiautomáticas de identificação de anomalias;
- Identificação de patologias e anomalias no fuste de Betão da torre de telecomunicações do Monte da Virgem;

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação inicia-se com um capítulo introdutório de considerações iniciais, onde se definem os objetivos a alcançar. Os restantes capítulos são de desenvolvimento da temática que é objeto da presente dissertação, e que pode ser sintetizada da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** Patologias e anomalias em estruturas de betão armado. Neste capítulo é realizado um enquadramento às patologias e correspondentes anomalias mais usuais nas estruturas de betão armado.
- **Capítulo 3:** Técnicas de inspeção de estruturas. Neste capítulo é realizado um enquadramento às metodologias tradicionais de inspeção e respetivos equipamentos, e apresentada uma metodologia avançada de inspeção com recurso a drones e imagens digitais.
- **Capítulo 4:** Desenvolvimento de ferramentas de deteção semiautomática de anomalias em estruturas de betão. Neste capítulo é apresentado todo o processo de desenvolvimento de ferramentas computacionais de deteção de anomalias com recurso ao programa *Matlab*.
- **Capítulo 5:** Identificação de anomalias no fuste de betão da torre de telecomunicações do Monte da Virgem. Apresenta-se neste capítulo o caso de estudo, a metodologia adotada, bem como todas as etapas inerentes aos trabalhos de inspeção, processamento, modelação 3D e análise de resultados.
- **Capítulo 6:** Considerações finais. Trata-se do último capítulo, onde são apresentadas as principais conclusões e apresentados os desenvolvimentos futuros a realizar.

CAPÍTULO 2

PATOLOGIAS E ANOMALIAS EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

Decorrente da sua utilização em grande escala, o betão armado é considerado por muitos como o material estrutural dominante da construção nos últimos 50 anos. Apesar de apresentar de forma geral uma elevada durabilidade e capacidade resistente, o betão armado é um material sensível às condições do ambiente onde se insere e ao envelhecimento natural dos seus constituintes. Podemos ter como base de pensamento Cassiano (2017), onde cita Larry Masters, *“Nenhum material é por si próprio durável; é a interação entre o material e o ambiente a que está exposto que determina a sua durabilidade”*.

Como em qualquer outro material, o desenvolvimento de um conjunto de patologias no betão armado é usual e expectável, podendo o seu aparecimento trazer implicações futuras no aparecimento de anomalias que condicionam as condições estéticas e estruturais dos elementos.

Antes de abordarmos em mais detalhe os tipos de patologias e anomalias dos elementos de betão armado, necessitamos de compreender melhor cada um desses termos. O termo “Patologia” tem a sua origem no grego *“Pathos”* = doença e *“Logos”* = estudo, significando em suma, o “estudo da doença”. Segundo Brito (2001), na construção civil o termo patologia designa o conjunto de fenómenos que afetam o comportamento e desempenho de uma construção, com implicações estruturais ou não estruturais. Já as “anomalias” podem ser definidas como tudo aquilo que se desvia do normal, espectável ou da finalidade com que algo foi criado, sendo na generalidade os sinais visíveis da existência de uma patologia.

Apesar de apresentarem uma causa comum, os seus efeitos e gravidades são distintas, como por exemplo as patologias são em regra anomalias, no entanto as anomalias nem sempre são patologias.

De forma genérica e sintetizada, podemos afirmar que existem três tipos de ações que contribuem para o aparecimento de patologias – ações físicas, químicas ou biológicas, tendo cada uma dessas ações como origem o meio ambiente ou erros humanos.

Nas estruturas de betão armado, as patologias usualmente têm a sua origem nas condições do meio ambiente em que se inserem, no entanto, poderão também resultar de erros de projeto, inconformidades na execução ou na solicitação estrutural excessiva dos elementos durante o seu ciclo de vida útil.

CAPÍTULO 2

Conforme podemos observar na Figura 1, os fatores do meio ambiente que poderão originar o surgimento de patologias são as condições climáticas, a agressividade do ambiente e ações biomecânicas.

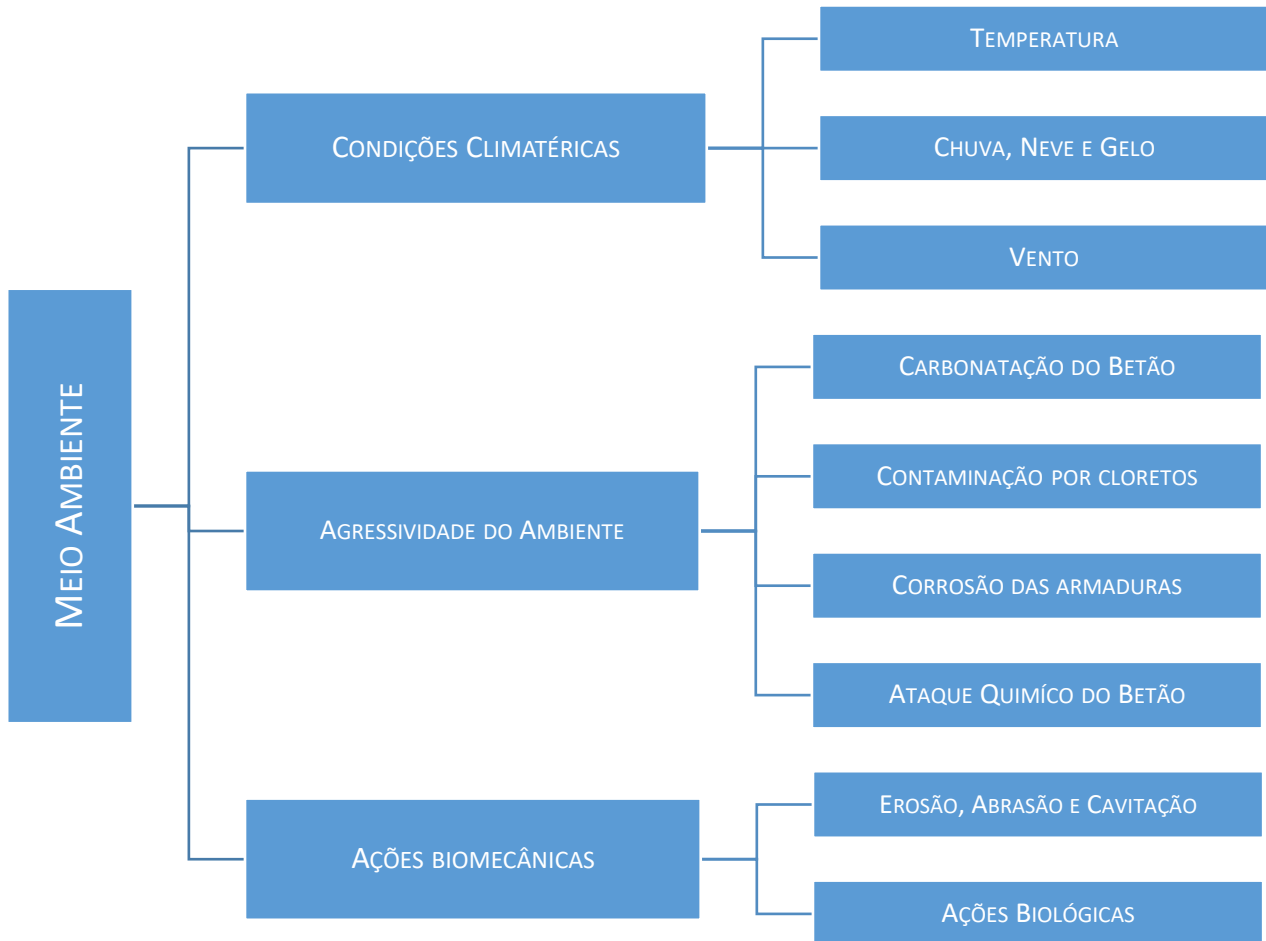


Figura 1 – Fatores do meio ambiente que originam patologias no betão armado (adaptado de Brito (2001))

Na Figura 2, são apresentados os fatores resultantes de erros humanos ou deficiências de projeto, que originam o aparecimento de patologias em elementos de betão.

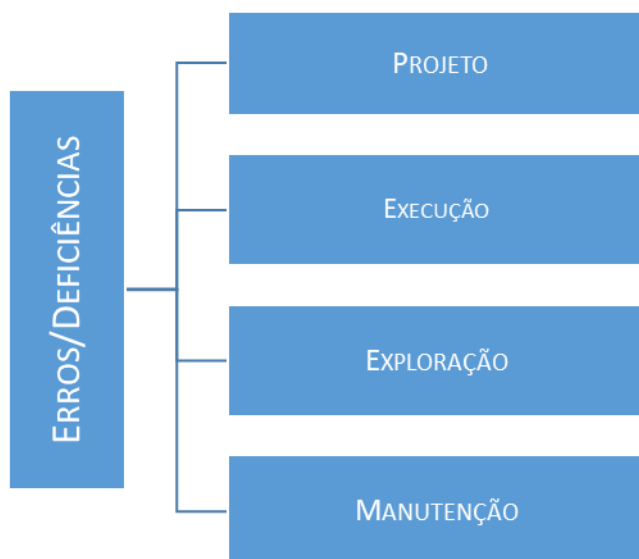


Figura 2 – Erros ou deficiências que poderão originar anomalias ou patologias no betão (adaptado de Brito (2001))

Com vista a uma melhor compreensão de quais as patologias mais usuais em uma estrutura de betão armado, irão ser abordados detalhadamente os fatores que influenciam o surgimento de patologias e anomalias em estruturas de betão armado.

2.1 AÇÕES DO MEIO AMBIENTE

A generalidade das anomalias e patologias existentes nas construções, surgem por ações do meio ambiente onde se encontram inseridos. Serão apresentados de seguida, quais são os principais fatores que originam o seu aparecimento.

2.1.1 Condições Climatéricas

As condições climatéricas apresentam um conjunto de ações que influenciam diretamente o estado dos elementos e seus constituintes, sendo naturalmente um fator determinante no desenvolvimento de anomalias ou patologias.

Podemos observar na Figura 3, uma ilustração da ação das condições climatéricas que poderão afetar ou comprometer o betão armado.

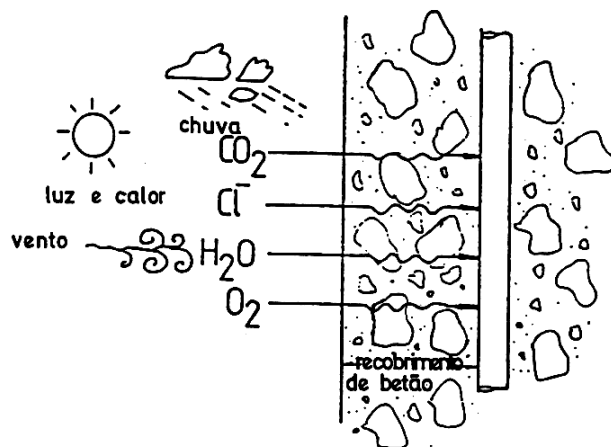


Figura 3 – Ações climáticas no betão armado. (Brito, 2001)

De seguida, são apresentadas e descritas de forma mais detalhada as ações climáticas que condicionam o betão armado:

Temperatura

Uma grande amplitude de temperaturas pode condicionar a execução do betão armado em obra, bem como influenciar o seu comportamento e durabilidade, sendo necessário em fase de projeto conhecer o diferencial de temperatura previsto de forma a proceder a uma seleção mais adequada de materiais, técnicas de compactação e cura do betão. Se por um lado, o frio excessivo poderá afetar o endurecimento do betão em fase de execução, o calor excessivo também não é favorável uma vez que origina a desidratação do betão, podendo resultar no surgimento de patologias como por exemplo a formação de etringite retardada.

Chuva, neve e gelo

A chuva, neve e gelo poderão contribuir para o aparecimento de patologias nas diversas fases, seja construtiva ou de utilização. Na fase de execução da estrutura, a chuva sobre áreas recentemente betonadas, o depósito dessas mesmas águas nas estruturas, a molhagem dos materiais e a exposição das armaduras às intempéries alteram a relação de água/cimento existente e saturação dos poros capilares do betão com água. Na fase de utilização, geralmente em paramentos expostos ao vento e superfícies de inclinação reduzida com insuficiente ou deficiente drenagem poderão originar a penetração de agentes agressivos.

Na Figura 4, é possível observar alguns exemplos de soluções construtivas de edifícios que evitam o depósito e a reentrância de água.

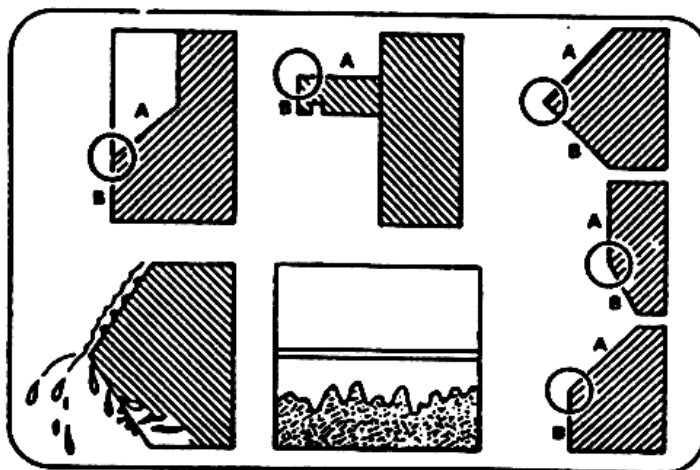


Figura 4 – Zonas de depósito ou reentrância de água. (Brito, 2001)

Apesar de mais prejudicial numa fase de betão jovem, a neve e o gelo apresentam um avultado risco no surgimento de patologias em qualquer uma das suas fases de endurecimento. Caso a temperatura se encontre abaixo dos 0°C, a água presente nos poros do betão poderá originar a deterioração mecânica do betão ao mudar o seu estado de líquido para sólido, através do aumento de volume (cerca de 9%). O fenómeno expansivo da água origina um natural aumento das tensões internas, resultando em fendilhação. Na fase de betonagem e cura do betão, este risco é ainda maior e com maiores consequências para a resistência do betão, podendo originar espaços “ocos” ou mal compactados no interior do elemento que comprometem naturalmente a sua capacidade resistente.

Na Figura 5, é possível observar um gráfico com a relação entre o número de ciclos gelo-degelo e o aumento do volume no betão.

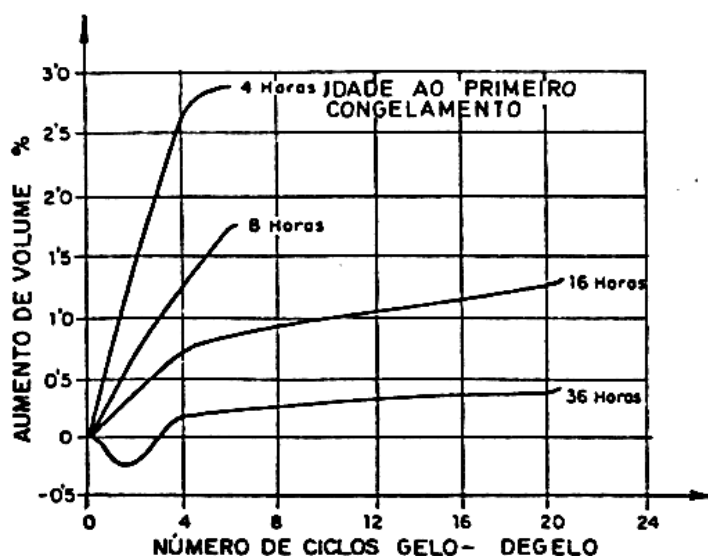


Figura 5 – Relação aumento de volume e número de ciclos gelo-degelo. (Brito, 2001)

Vento

Na generalidade, o vento apenas é referenciado como um fator relevante para o cálculo de estruturas, não sendo normalmente tido como um fator decisivo para o aparecimento de patologias numa estrutura de betão. No entanto, contrariamente ao que seria esperado, o vento desempenha funções determinantes para o surgimento de patologias. No clima quente, em fase de cura do betão, o vento poderá originar a total desidratação superficial do betão com aberturas de fendas expressivas decorrentes de retração plástica. No clima frio, também durante a fase de cura, poderá contribuir para a aceleração da perda de calor do betão, resultando conseqüentemente na ocorrência de gelo no interior do betão.

Além do anteriormente referido, em todas as fases da vida útil do betão, o vento serve de transporte migratório de agentes agressivos para a estrutura (cloretos, poeiras, etc.) que poderão comprometer a sua durabilidade com o surgimento de patologias e anomalias.

2.1.2 Agressividade do meio ambiente

A agressividade do meio ambiente do local onde se insere é a causa mais usual para o surgimento de patologias em quaisquer elementos. Decorrente do meio ambiente em que se insere, uma estrutura ou elemento de betão armado pode incorrer em diversos tipos de deterioração ou patologias, nomeadamente a despassivação e posterior corrosão das armaduras, além do ataque químico do betão por intermédio de ácidos, sulfatos ou álcalis.

2.1.2.1 Carbonatação do Betão

Genericamente, no betão não contaminado, a proteção das armaduras do betão armado é garantida pela elevada alcalinidade do betão que permite a criação de uma camada oxidada em volta da superfície exterior das armaduras e que impede a dissolução do aço, denominada de película passiva (Figura 6).

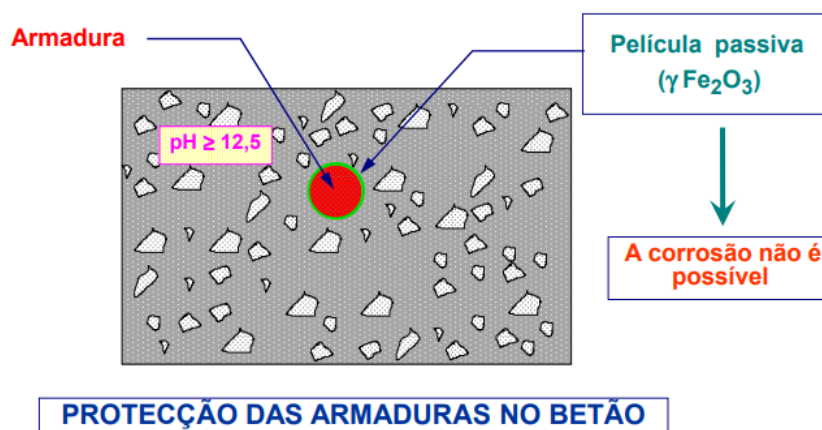


Figura 6 – Película passiva das armaduras. (Costa, 2011b)

No entanto, o valor do pH não é contante e pode alterar-se em diversas zonas por fatores externos tais como a carbonatação, ação de cloretos e lixiviação dos álcalis. Nos casos em que essa mesma alteração do pH atinja valores inferiores a 9 ($\text{pH} \leq 9$) ou possa existir um aumento do teor de cloretos para valores superiores ao crítico, a película passiva é destruída, e caso se encontrem em contacto com humidade relativa e ar, é iniciado o processo de corrosão das armaduras (Figura 7).

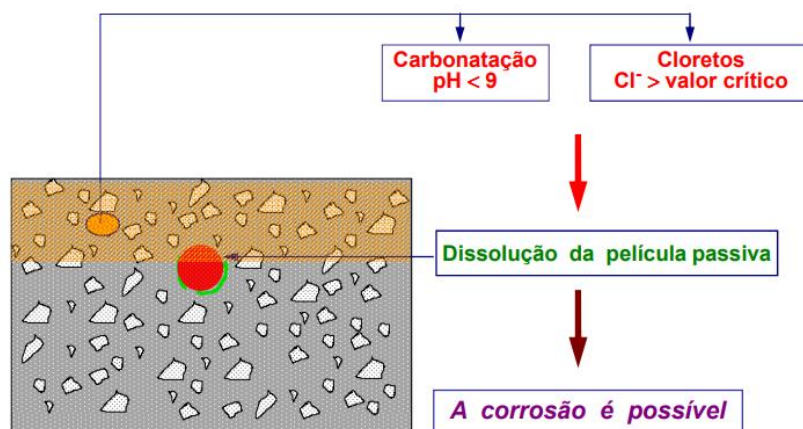


Figura 7 – Despassivação das armaduras. (Costa, 2011b)

No caso da carbonatação, o processo consiste na reação entre o dióxido de carbono existente na atmosfera que penetra entre os poros do betão e reage com o hidróxido de cálcio dissolvido, que conseqüentemente causa a diminuição dos seus valores de pH. Apesar de ser necessário a existência de humidade relativa para a ocorrência de carbonatação, também é necessário que existam poros cheios de ar para que seja possível estabelecer a sua reação. Caso o betão se encontre totalmente saturado de água, contrariamente ao que poderia ser espectável, o betão não inicia o seu processo de carbonatação. Podemos observar na Figura 8, uma ilustração do preenchimento desses mesmos poros, ou espaços vazios, com relação direta à humidade relativa do ar.

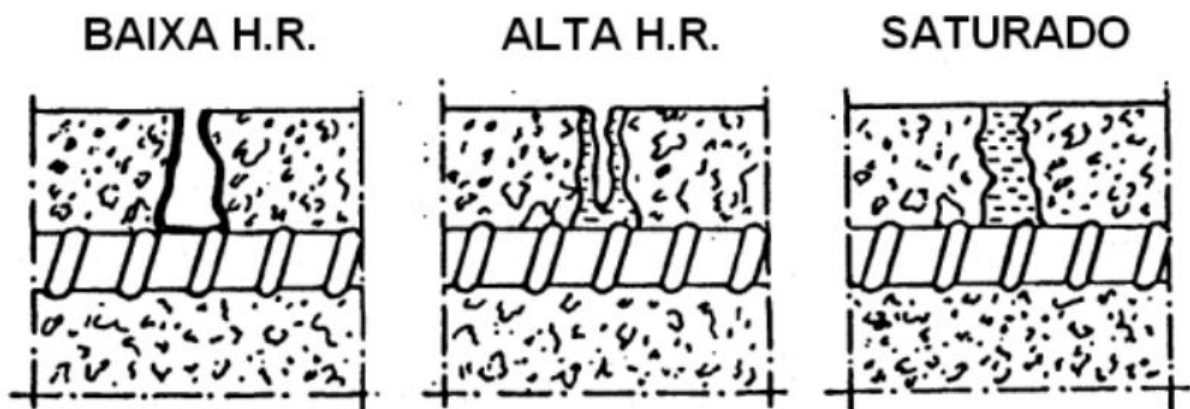


Figura 8 – Ilustração da relação do preenchimento dos poros com humidade relativa. (Simas, 2007)

A velocidade do processo de carbonatação é influenciada por parâmetros como a composição do betão, compactação e cura, bem como as condições de exposição. Quanto maior for o teor de humidade no betão, menor será a velocidade de carbonatação.

2.1.2.2 Contaminação por cloretos

A contaminação por cloretos, à semelhança da carbonatação, resulta na corrosão das armaduras existentes no betão armado. Porém, ao contrário do que se sucede com a carbonatação, é um processo que se dá parcial ou totalmente preenchidos por água que serve de meio condutor para a propagação dos cloretos.

Este tipo de contaminação pode ser introduzido nas diversas fases da sua vida útil, nomeadamente nos materiais ou durante o seu ciclo de vida, com a exposição a ambientes agressivos. Este tipo de contaminação é mais usual junto à orla costeira, onde a exposição a cloretos é maior, e poderão ter “infiltrado” na mistura a partir da água utilizada em fase de construção. A presença deste tipo de contaminação em ambientes muito frios também é frequente, resultante da utilização desses mesmos sais para derreter a neve.

O enriquecimento da ação dos cloretos no betão ocorre durante situações alternadas de molhagem e secagem, permitindo a entrada desses sais no betão através de capilaridade (Figura 9).

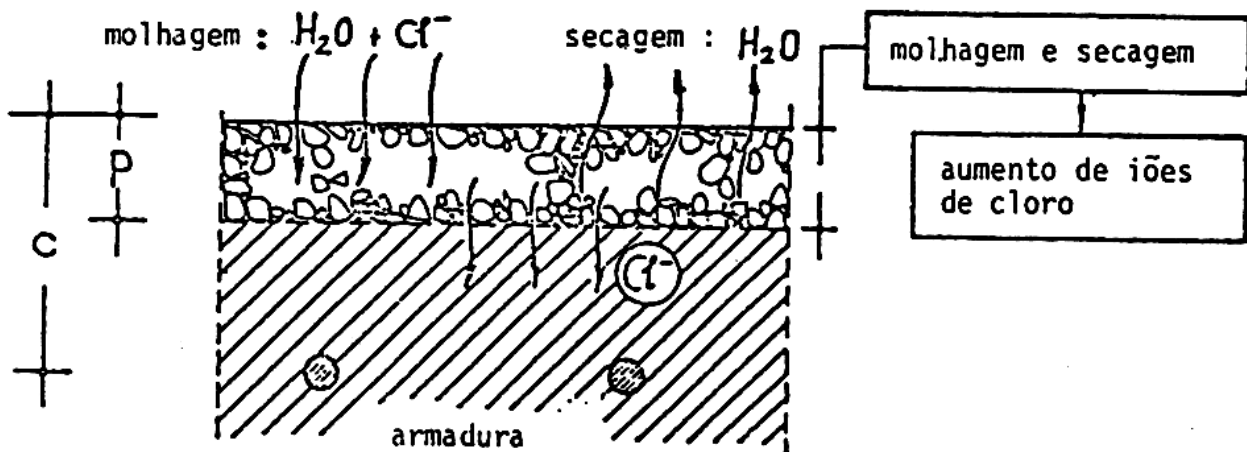


Figura 9 – Molhagem e secagem com contaminação de cloretos. (Brito, 2001)

Na Figura 10 é apresentado um esquema com os tipos de penetração dos cloretos associados aos diversos mecanismos de transporte.

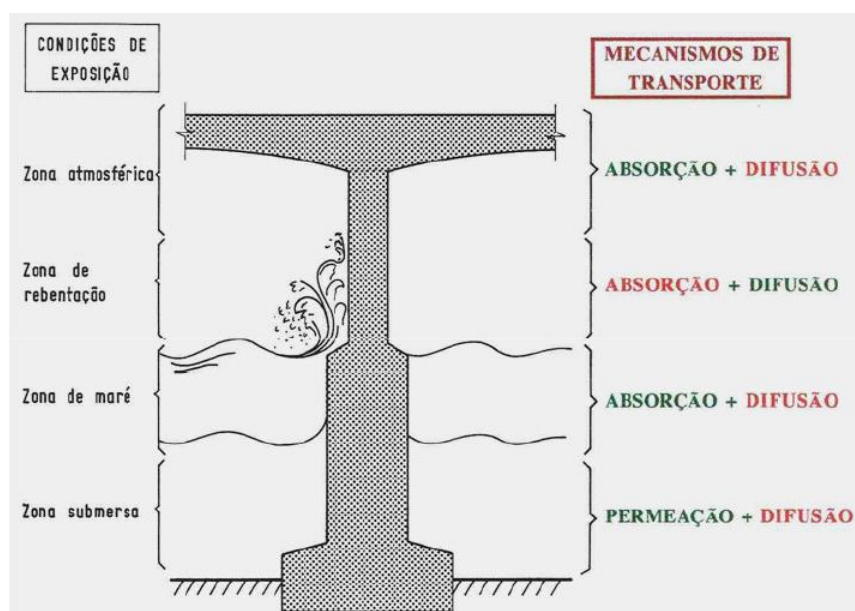


Figura 10 – Relação entre as condições de exposição e os mecanismos de transporte. (Costa, 2011b)

Assim, o ataque do betão por ação dos cloretos resulta na destruição da película passiva e consequente corrosão da armadura. Podemos observar na figura 11, alguns casos reais de degradação por ação de cloretos.



Figura 11 – Exemplos de ataques por ação de cloretos. (Costa, 2011b)

2.1.2.3 Ataque químico

Apesar de se tratar do espaço envolvente como um só meio, existem diversos microclimas localizados nas proximidades e até mesmo em contacto com os elementos de betão armado. Um exemplo disso é o solo, que poderá servir como meio de propagação e transmissão de substâncias agressivas para o betão.

No entanto é importante salientar e esclarecer que para que se verifique a degradação com origem em reações químicas, é necessário a presença de uma substância reagente em contacto com uma substância reativa.

Algumas das reações químicas com maior expressão na degradação do betão são:

2.1.2.3.1 Ataque de sulfatos

O ataque dos sulfatos (Figura 12) dá-se através da reação química do ião de sulfato com a componente aluminosa do cimento Portland, a transformação do hidróxido de cálcio em gesso ou o ataque de sulfato magnésio sobre a gel hidratada do silicato de cálcio e poderá deteriorar o betão através de uma expansão do betão ou por perda progressiva da sua resistência.

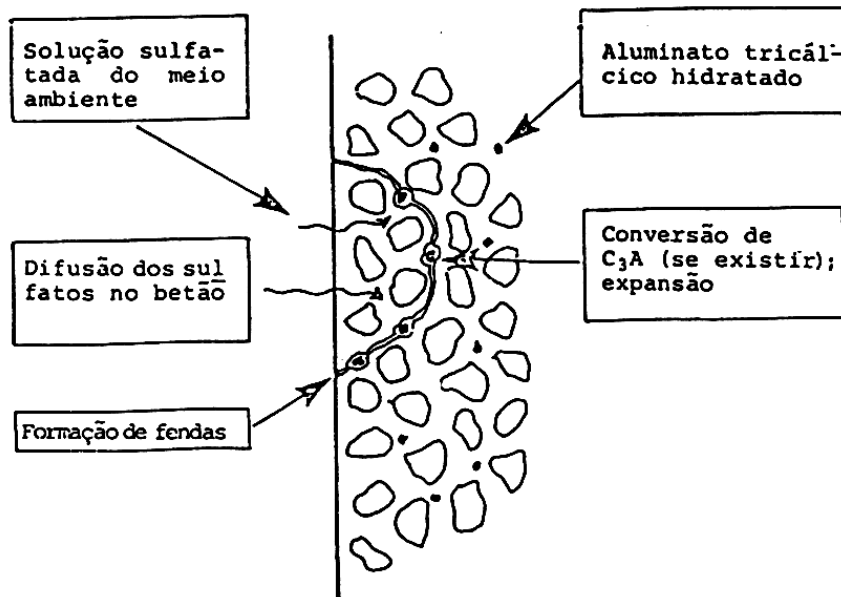


Figura 12 – Esquema representativo do ataque de sulfatos. (Brito, 2001)

2.1.2.3.2 Ataque dos álcalis

O ataque dos álcalis, ou por outras palavras reações álcalis-sílica, álcalis-silicato ou álcalis-carbonato, resultam da reação entre os metais alcalinos existentes no betão (K_2O e Na_2O) com os agregados reativos, que à semelhança do ataque de sulfatos anteriormente referido, resulta na formação de um gel que, em contacto com a água, permite uma reação expansiva. Conforme podemos observar no seguinte esquema da figura 13:

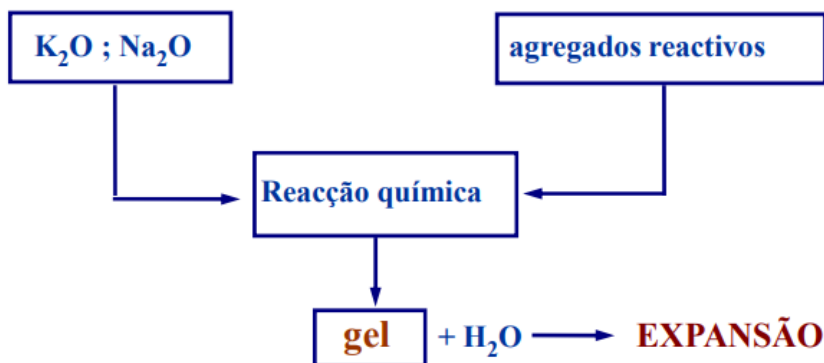


Figura 13 – Esquema da reacção química. (Costa, 2011b)

Apesar de ser usual o aparecimento de fissuras decorrentes do aumento das pressões internas causadas pelas propriedades expansivas do gel, essa mesma fissuração poderá não ocorrer nos casos em que os elementos apresentem uma elevada porosidade, que consequentemente permita a redução das pressões interiores através do preenchimento de espaços vazios do betão. É possível observar na figura 14, uma representação esquemática dos ataques álcalis no betão.

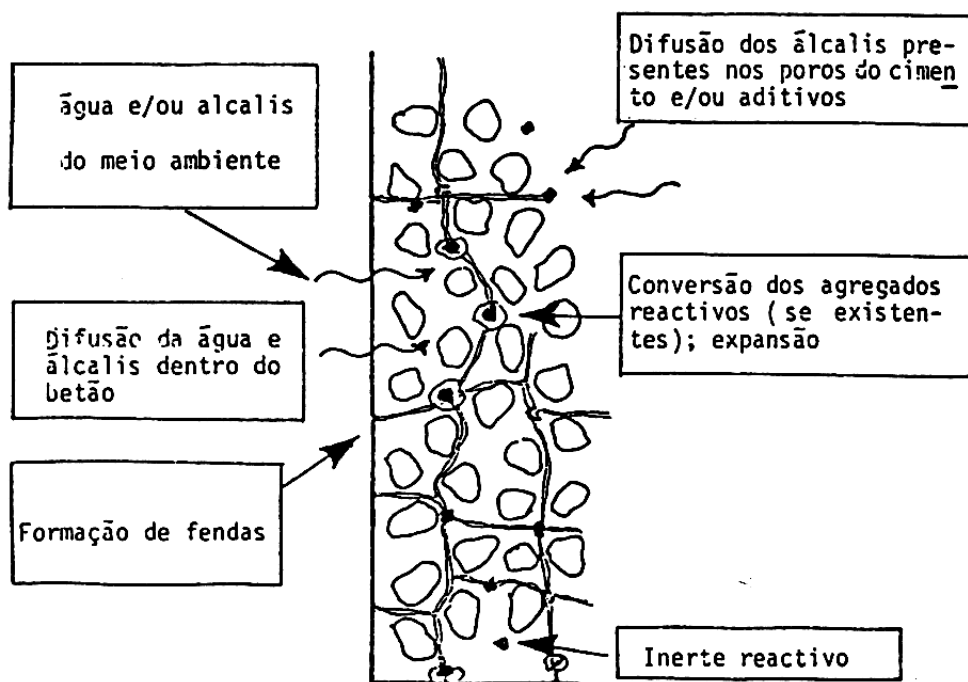


Figura 14 – Representação esquemática dos ataques álcalis no betão. (Brito, 2001)

De forma a melhor compreender a identificação desta patologia, apresentamos nas figuras 15 e 16 alguns exemplos de fendilhação devido ao ataque álcalis.



Figura 15 – Fendilhação decorrente do ataque dos álcalis. (Henriques, 2016)



Figura 16 – Fendilhação decorrente do ataque dos álcalis. (Henriques, 2016)

2.1.2.3.3 Ataque de ácidos, sais e águas puras

Resultante da sua elevada alcalinidade, o betão apresenta uma enorme suscetibilidade aos ataques de qualquer tipo de ácido. Naturalmente, como em qualquer outro tipo de deterioração, para o surgimento desta patologia é necessária a exposição dos elementos a um ambiente rico em ácidos, nomeadamente ambientes industriais, esgotos ou em sistemas de escoamento que apresentem grandes quantidades de ácidos.

A reação dos ácidos e sais com a pasta de cimento, pode ser traduzida na conversão do composto de cálcio em sais de cálcio solúveis, originando uma maior permeabilidade do betão (Figura 17).

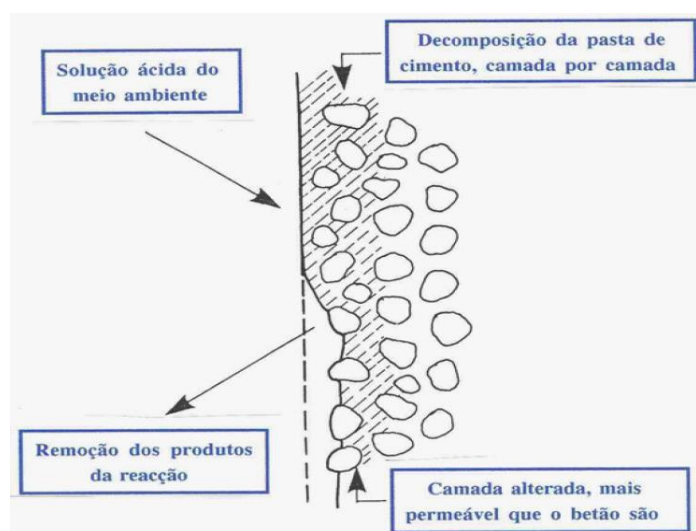


Figura 17 – Esquema representativo do ataque de ácidos e sais no betão. (Costa, 2011b)

Já as águas puras apresentam um poder dissolvente elevado, causando a dissolução do hidróxido de cálcio e originando a sua lixiviação, que se manifesta através do aparecimento de eflorescências.

2.1.3 Ações biomecânicas

Segundo Hall (2015), a biomecânica define-se no “estudo da estrutura e da função dos sistemas biológicos utilizando métodos da mecânica”, por outras palavras podemos definir como o estudo da mecânica dos organismos vivos.

De seguida serão referidas e descritas algumas das ações biomecânicas que deterioram os elementos em betão.

2.1.3.1 Erosão, Abrasão e Cavitação

A erosão, abração e cavitação são provocados por ações abrasivas que, em meios distintos, deterioram ou fragilizam os elementos a que tais ações são aplicadas.

A erosão é geralmente provocada pela circulação de ar (vento) com partículas sólidas (poeiras) ou água com sedimentos que causam a remoção parcial e pontual do material existente na superfície do betão.

Na figura 18, podemos observar uma peça de betão com sinais de erosão.



Figura 18 – Elemento de betão com sinais de erosão. (Gomes, 2016)

A abrasão, visível na Figura 19, resulta da sucessividade de ações como o impacto, esfregamento ou a fricção de objetos na superfície do betão.



Figura 19 – Elemento de betão com sinais abrasão. (Costa, 2011b)

A Cavitação, à semelhança das patologias anteriormente abordadas no presente capítulo, consiste na deterioração da camada superficial de zonas sujeitas a fluxos de água de grande velocidade aliadas a pressões negativas decorrentes de uma mudança rápida do sentido do escoamento (Figura 20).



Figura 20 – Deterioração progressiva das camadas por deterioração. (Henriques, 2016)

2.1.3.2 Ações Biológicas

As ações biológicas em elementos ou estruturas de betão armado, resultam de atividades de micro-organismos (fungos, algas, líquenes, etc.). Os tipos de ataques biológicos mais comuns são:

- Algas, líquenes e musgo (Figura 21);
- Moluscos (Figura 22);
- Raízes de plantas (Figura 23);



Figura 21 – Ação de algas em elemento de betão armado. (Saraiva, 2007)



Figura 22 – Ação de moluscos em elemento de betão armado. (Saraiva, 2007)



Figura 23 – Ação de raízes em muro de contenção.

2.2 ERROS DE PROJETO, CONSTRUTIVOS OU DE UTILIZAÇÃO

Além das patologias com origem no meio ambiente onde se inserem, existem diversos tipos de patologias com origem em erros humanos, nas mais variadas fases do ciclo de vida de uma estrutura ou elementos de betão armado e que são apresentados seguidamente.

Na fase de projeto a falta preparação ou de estudo prévio das condições do meio ambiente, a inadequação das diferentes soluções construtivas às condições existentes em local de obra e o deficiente cálculo estrutural/dimensionamento, poderão naturalmente originar o surgimento de patologias. Na Figura 24, a título exemplificativo, pode observar-se uma patologia com origem em erros de projeto, nomeadamente a fissuração estrutural de uma ponte resultante da deficiente avaliação das ações/esforços atuantes.



Figura 24 – Fissuração resultante de erros de dimensionamento. (Costa, 2011b)

Na fase de execução, é também necessário um estudo prévio do meio e das condições de implementação do projeto. A inadequada seleção dos materiais, cofragens inadequadas, mau posicionamento das armaduras e espaçadores, a insuficiente compactação do betão ou até mesmo a remoção prematura do escoramento da cofragem, são alguns dos exemplos de situações que comprometem a durabilidade dos elementos estruturais.

Outras das causas mais usuais para o surgimento de patologias ou anomalias é o uso indevido de uma estrutura para outras funções que não as para qual foi projetado ou as insuficientes medidas de manutenção.

2.3 ANOMALIAS EM ESTUDO

Conforme se constata nos subcapítulos anteriores, existem diversos tipos de patologias com origens bastante distintas. No entanto, as patologias geralmente manifestam-se através do surgimento de anomalias bastante específicas como a fissuração, eflorescências, fungos, líquenes e corrosão e que serão o alvo específico do presente trabalho

Apresentam-se de seguida uma breve descrição destas anomalias assim como a definição das principais causas que levam ao seu aparecimento.

2.3.1 Fissuração

O aparecimento de fissuração é bastante usual na construção, seja em elementos estruturais ou elementos não estruturais. Os principais motivos para o seu surgimento são fatores como variações de temperatura externa, retrações térmicas, hidráulicas ou por secagem, assentamento plástico, corrosão de armaduras, ataque químico, cargas excessivas e deformação estrutural (Figura 25).

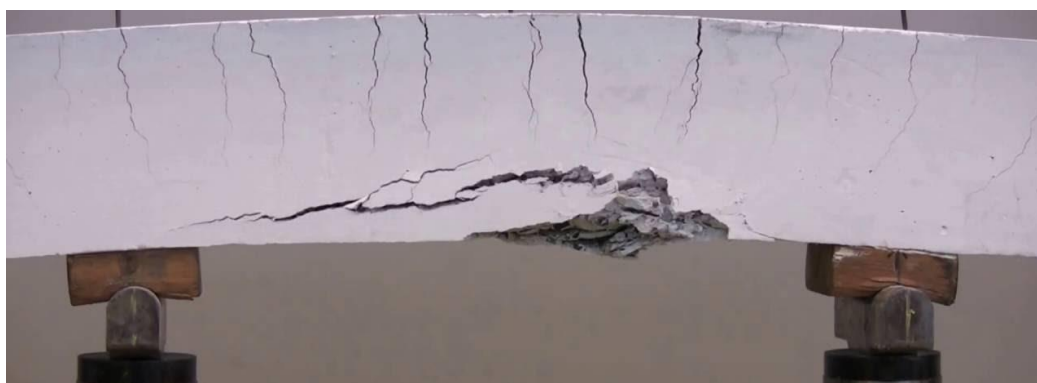


Figura 25 – Exemplo de fissuração em viga de betão armado após ensaio de carga. (Andersen, 2016)

Segundo Ferreira (2010), a classificação de fendas e fissuras é feita de acordo com fatores como a sua localização, extensão, profundidade, largura e o estado de degradação do elemento ou zona.

2.3.2 Eflorescências

O surgimento de eflorescências também é uma anomalia usual na construção e resulta de uma migração e depósito de sais através de fenômenos de evaporação. Esta anomalia é geralmente caracterizada com o surgimento de manchas espessas de cor branca (Figura 26).

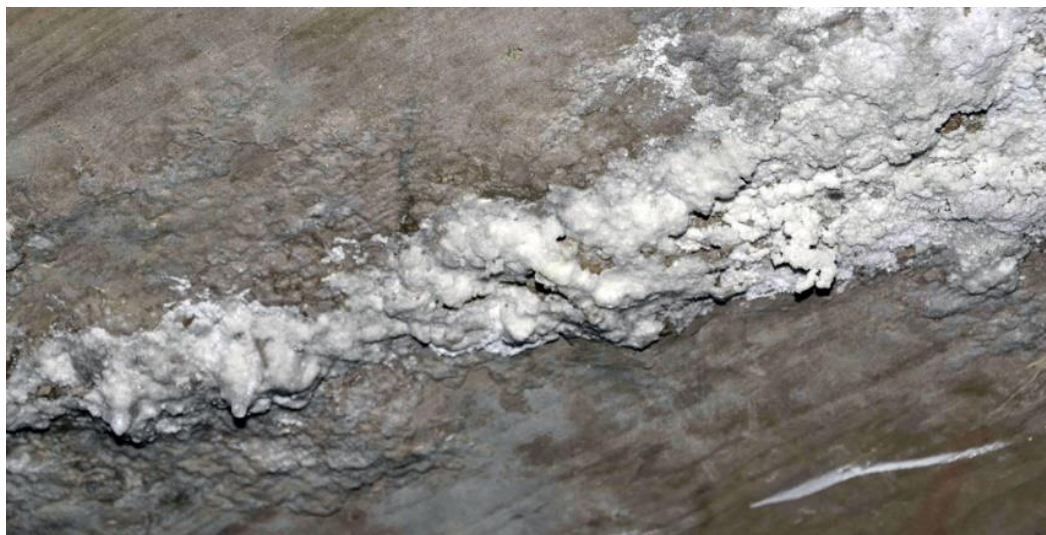


Figura 26 – Exemplo de eflorescências em betão armado. (Hering, 2012)

Os principais motivos para o surgimento de eflorescências em elementos de betão armado são a ascensão de humidades por capilaridade de águas provenientes de solos, infiltrações, transporte e respetivo depósito de iões resultantes da proximidade com a zona costeira e o depósito de partículas de poluição.

O aparecimento de eflorescências, apesar do prejuízo estético dos elementos de betão armado, não é um acontecimento que coloca obrigatoriamente em causa a integridade das estruturas afetadas.

2.3.3 Líquenes

Os líquenes (Figura 27), são organismos vivos que resultam da interação entre um fungo e uma alga, que através da fotossíntese e aliados a uma superfície com características rugosas, dispõe de condições para se desenvolver. Este tipo de anomalia resulta do transporte e depósito de poeiras e outros agentes, que se desenvolvem em elementos rugosos como é o caso do betão armado.



Figura 27 – Líquenes alojados na superfície de uma rocha. (HHelena, 2014)

Assim, como qualquer outro ataque biológico, o seu desenvolvimento pode comprometer a integridade superficial do betão e originar a criação de microfissuras.

2.3.4 Corrosão de armaduras e delaminação

Em inspeções a elementos de betão armado, é bastante comum a ocorrência de corrosão, especialmente em estruturas que se encontrem expostas permanentemente a meios ambientes agressivos, como é o caso de elementos expostos a brisas marítimas.

O processo de corrosão de armaduras pode ser caracterizado como um processo eletroquímico, constituído por um ânodo, um cátodo, condutor elétrico e um eletrólito. Em suma, a corrosão pode ser definida como a perda de partículas superficiais das armaduras, geradas pelas reações químicas que ocorrem nos materiais.

Como foi referido anteriormente, o processo de corrosão apenas é iniciado após a destruição da película passiva das armaduras. A ocorrência de corrosão, além de comprometer a resistência das armaduras, poderá originar o destacamento ou delaminação parcial de camadas superficiais de betão (Figura 28).

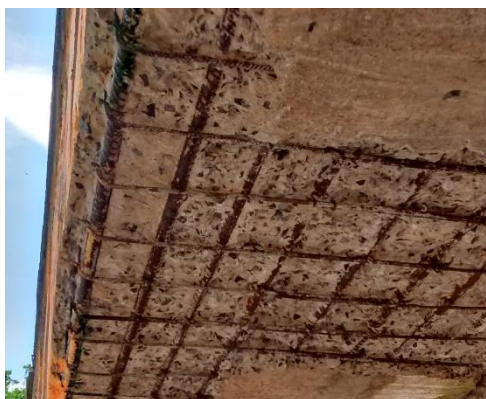


Figura 28 – Delaminação parcial de camadas de betão. (Silva, 2018)

CAPÍTULO 2

De uma forma simplificada e esquemática, podemos observar o processo de corrosão de uma armadura na figura 29.

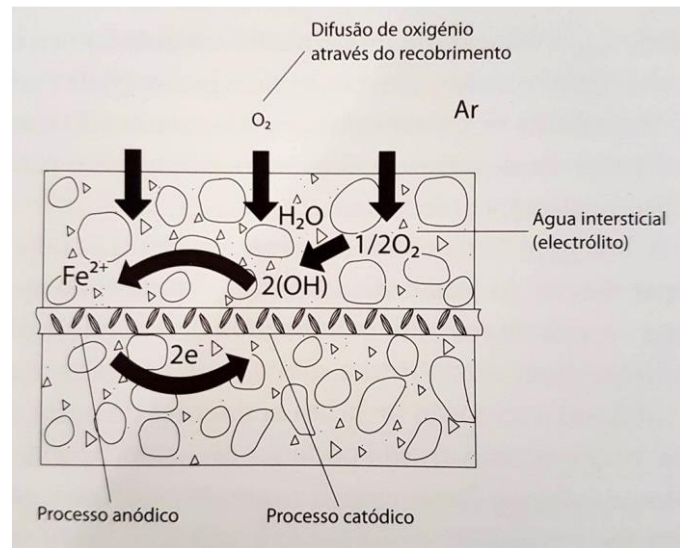


Figura 29 – Esquema representativo da corrosão das armaduras no betão. (Gomes, 2016)

Este tipo de anomalia pode ter diversas causas, nomeadamente erros de execução, deformações estruturais (fissuras) e exposição a meios ambientes agressivos.

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS DE INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS

3.1 ENQUADRAMENTO

A inspeção de estruturas é um processo de observação, análise e diagnóstico, que depende essencialmente de um correto planeamento e da criação de um conjunto de medidas específicas, que permitam constatar a integridade e durabilidade dos elementos em estudo. O principal desafio da inspeção de estruturas, sejam elas de betão armado, metálicas, ou até mesmo em madeira, são a adaptação de metodologias de intervenção, criação de acessibilidades e o correto processamento de informações.

Todas as estruturas possuem diferentes dimensões e características, que naturalmente implicam uma adaptação e especificação de meios, técnicas e metodologias distintas para a realização de inspeções. Podemos ter como comparação direta, as evidentes diferenças nas metodologias de inspeção adotadas entre estruturas distintas como um edifício, uma torre, uma barragem ou até mesmo de uma ponte. Mesmo ignoradas as diferentes finalidades, dimensões e orientações, cada tipo de estrutura possui diferentes características, que naturalmente requerem uma diferente abordagem e análise, uma vez que poderão apresentar patologias e anomalias muito distintas.

No entanto, e apesar de toda a complexidade da realização de uma inspeção, pode-se afirmar que o obstáculo mais impeditivo para a realização periódica de algumas inspeções a estruturas são os elevados custos associados, o risco a que se colocam os técnicos na realização das inspeções e a complexidade das acessibilidades aos locais.

Algumas das inspeções mais desafiantes para os técnicos são as pontes e viadutos, que requerem um conjunto de equipamentos especializados, muitas vezes de alguma envergadura e complexidade. Na Figura 30, ilustra-se, a título exemplificativo, uma plataforma móvel do tipo *ByBridge* sobre reboque, que possibilita o acesso à parte inferior do tabuleiro de uma ponte.



Figura 30 – Plataforma móvel para inspeção a uma ponte em Mirandela. (Alves, 2019)

Este tipo de plataforma é o meio mais utilizado para a realização de inspeções e reparações pontuais sob tabuleiros de pontes, no entanto existem outros tipos de meios similares. Na figura 31, pode-se também observar a utilização de um sistema *byBridge* com cesto articulado, também para a inspeção visual da parte inferior do tabuleiro de uma ponte.



Figura 31 – Inspeção de uma ponte. (Timepress Comunicação Empresarial, 2019)

Podemos observar na figura 32, os diferentes tipos de plataformas existentes no mercado para acessibilidades a zonas inferiores de pontes ou viadutos.



Bybridge em Camião



Bybridge Sobre Reboque



Bybridge Cesto Articulado

Figura 32 – Tipos de equipamentos *ByBridge*. (Brigdebybridge, 2019)

Apesar de existir uma vasta variedade de plataformas, existem naturalmente limitações de alcance para a inspeção de estruturas de elevada altura, nomeadamente torres de telecomunicações, barragens e turbinas eólicas.

Existem diversas estruturas que se encontram dotadas de soluções de projeto que garantem o correto e seguro acesso a todos os técnicos e trabalhadores para inspeções e reparações pontuais em zonas estratégicas. No caso de estruturas de grande porte em que, em fase de projeto e conceção, não tenham sido asseguradas as acessibilidades para a realização de inspeções e reparações periódicas, são geralmente utilizadas técnicas de “alpinismo industrial” (Figura 33).



Figura 33 – “Alpinismo Industrial” em turbina eólica. (Reis, 2018)

Este tipo de inspeção, além de necessitar de técnicos habilitados ao uso de cordas, incrementa um risco adicional e desnecessário às pessoas envolvidas.

Com o desenvolvimento das tecnologias de captação remota de imagens através do uso de veículos aéreos não tripulados (drones), a utilização de técnicas baseadas em drones e tecnologias de vídeo tem sido cada vez mais utilizada em todo o mundo para ultrapassar as limitações das técnicas mais tradicionais.

3.2 ESTADO DE ARTE

A inspeção visual de estruturas, foi desde sempre uma verificação crucial na garantia da segurança e funcionalidade das obras de engenharia, como edifícios, estruturas especiais e vias de comunicação. Com o desenvolvimento de aparelhos como os drones e o aperfeiçoamento dos softwares de análise e processamento de imagem, torna-se quase inevitável o estudo das suas funcionalidades para aplicação na área da Engenharia Civil. Neste subcapítulo é apresentado um levantamento de casos semelhantes ao proposto neste trabalho no âmbito da inspeção de estruturas com recurso a VANTs e assentes em técnicas de análise e processamento de imagens.

3.2.1 UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAV) AS A SUPPORT TO VISUAL INSPECTIONS OF CONCRETE DAMS - (Henriques, et al., 2015)

No ano de 2015 as investigadoras Maria João Henriques e Dora Roque, ambas do LNEC, realizaram a inspeção visual da barragem de Bouçã (Figura 34), situada no rio Zêzere com recurso a um VANT equipado com uma câmara de alta definição e software de modelação 3D. As barragens são estruturas que normalmente apresentam riscos mais elevados, e por isso são frequentemente objeto de inspeções visuais de forma a assegurar a sua segurança e funcionalidade.



Figura 34 – Captação de imagens com recurso a VANT na barragem de Bouçã. (Henriques, et al., 2015)

O VANT utilizado para a captação das imagens é caracterizado como um octocoptero equipado com recetor de GPS, *Inertial Measurement Unit* (IMU), sistema *gimbal* e câmara (Figura 35).



Figura 35 – Detalhes do drone utilizado e dos seus controladores. (Henriques, et al., 2015)

Após recolha de fotografias de alta definição em pontos estratégicos, por intermédio de diferentes voos, e recorrendo ao software de fotogrametria *Micmac* (técnica que permite efetuar medições rigorosas a partir de fotografias) e a uma ferramenta de modelação 3D *VisualSFM*, foi possível obter a modelação apresentada na Figura 36. Na Figura 37, podemos observar a georreferenciação obtida durante o voo.



Figura 36 – Modelação 3D das fotos captadas com recurso ao VANT. (Henriques, et al., 2015)

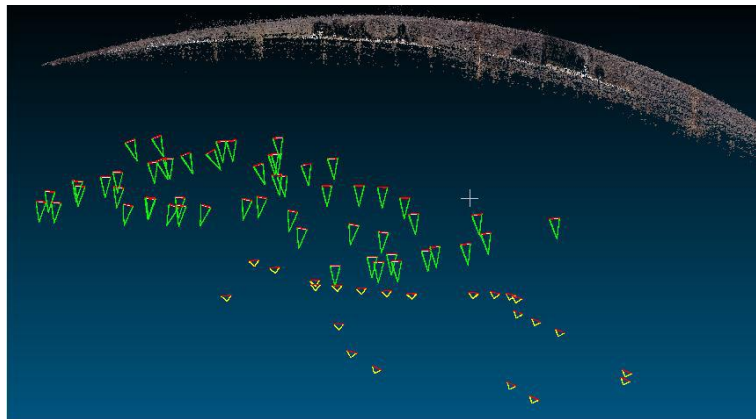


Figura 37 – Georreferenciação da câmara durante o voo. (Henriques, et al., 2015)

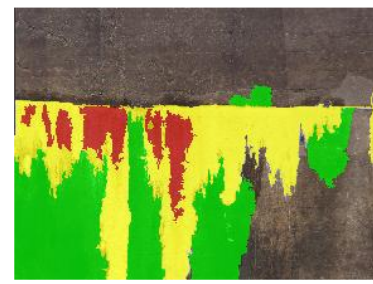
Com o software de processamento de imagem *eCognition* e de forma a melhor compreender uma das principais anomalias detetadas, neste caso eflorações, foi realizada a segmentação da imagem e processamento das cores de cada pixel de forma a ser possível realizar a classificação das áreas, conforme podemos observar na figura 38.



a) Recolha da imagem.



b) Segmentação da imagem



c) Classificação de áreas.

Figura 38 – Processamento de imagem. (Henriques, et al., 2015)

O estudo demonstrou as potencialidades dos drones equipados com câmaras fotográficas na inspeção visual de barragens. Após o processamento adequado as imagens, podem-se produzir dados cartográficos ou modelos 3D com propriedades métricas, sendo possível calcular distâncias e áreas. No entanto, o uso de drones tem limitações associadas à falta de resistência a fatores como a chuva, o vento que podem originar a perda de controlo do drone. Outros factores limitativos no uso de drones são as interferências eletromagnéticas de cabos de alta tensão ou da central elétrica que podem ser fatores de risco e causadores de erros de medição. Nestas circunstâncias é de especial importância a realização de um meticoloso planeamento do voo de forma a evitar a influência perniciosa destes fatores.

3.2.2 CrackIT – AN IMAGE PROCESSING TOOLBOX FOR CRACK DETECTION AND CHARACTERIZATION (Oliveira, et al., 2014)

Henrique Oliveira e Paulo Correia, desenvolveram um *Toolbox* de deteção e caracterização de fissuras em pavimentos betuminosos, denominado de *CrackIT*, cuja arquitetura genérica se encontra definida na figura 39 e que envolve as fases de pré-processamento, deteção de fissuras e caracterização de fissuras.

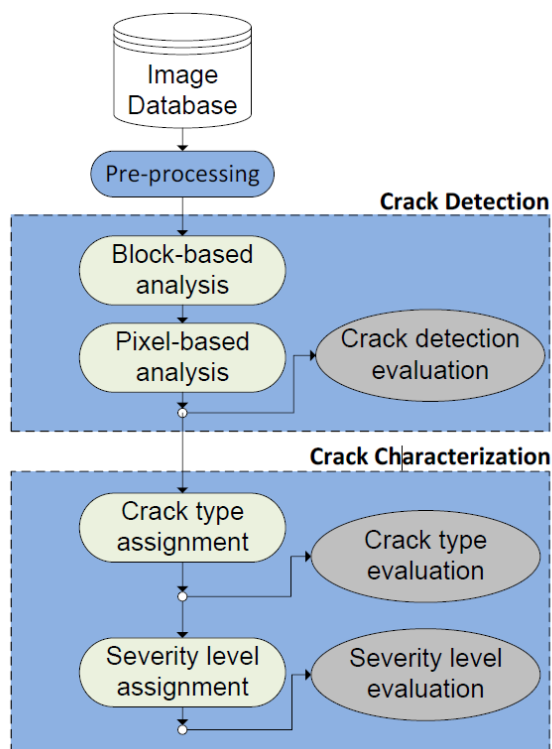


Figura 39 – Arquitetura da ferramenta *CrackIT*. (Oliveira, et al., 2014)

Na fase de pré-processamento, é efetuada uma suavização da imagem, conforme exemplo observado na Figura 40, de forma a reduzir a variação de intensidade de pixéis em *background* sem afetar a intensidade das linhas abrangidas por fissuras, conforme podemos contatar na Figura 41. Seguidamente é realizada a identificação de marcações brancas (tipicamente associadas a marcações rodoviárias), a seleção preliminar

de blocos de fissuras e para concluir a normalização e saturação da imagem. Após a fase de pré-processamento, é efetuada a deteção e caracterização das fissuras com recurso à *Toolbox*.

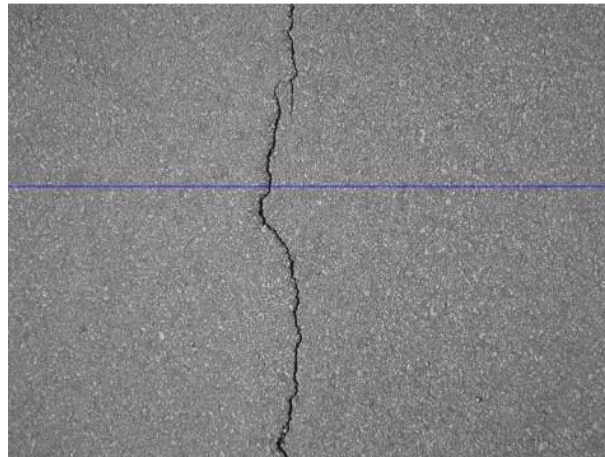


Figura 40 – Exemplo de suavização de imagem através do *CrackIT*. (Oliveira, et al., 2014)

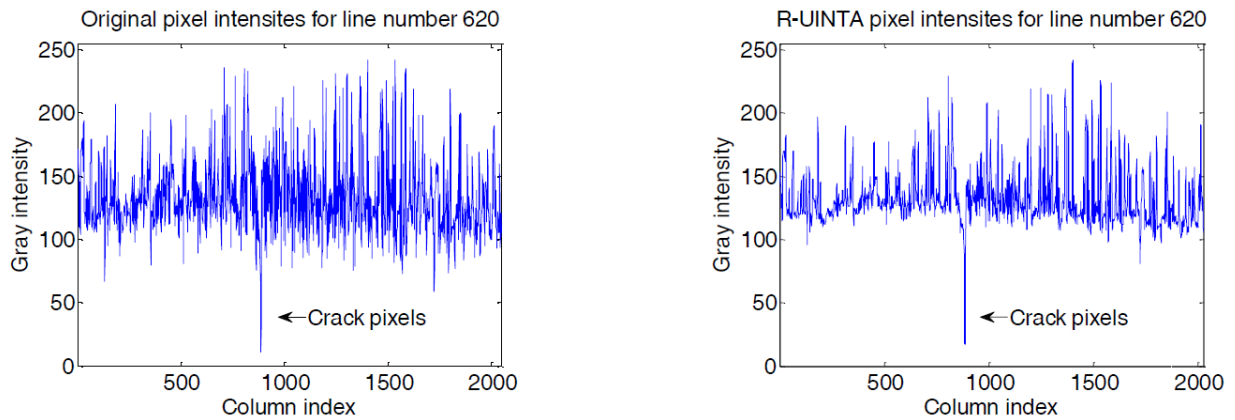


Figura 41 – Análise comparativa da intensidade dos pixéis da imagem horizontal e a imagem suavizada. (Oliveira, et al., 2014)

Nas imagens da Figura 42 é possível observar-se, de forma sucinta, as várias etapas do processamento da imagem recorrendo à *Toolbox*.

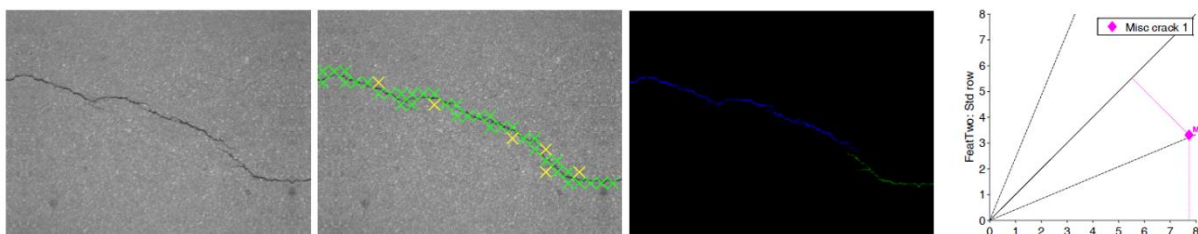


Figura 42 – Observação da imagem original, deteção de fissura, identificação global de fissura e caracterização da fissura. (Oliveira, et al., 2014)

Os autores concluíram, que a *Toolbox* permite alcançar bons resultados ao nível da deteção e caracterização de fissuras, contribuindo para o desenvolvimento do uso de imagens digitais na deteção automática de anomalias. Porém, em fissuras com menos que 2 mm de espessura, poderão surgir falsos positivos o que irá requerer no futuro a implementação de análises de fiabilidade dos resultados obtidos.

3.2.3 UAV-Based Bridge Inspection and Computational Simulations (Duque, 2017)

Luis Duque, estudante de Mestrado em Engenharia Civil na *South Dakota State University*, publicou a tese de investigação "*UAV-Based Bridge Inspection and Computational Simulations*", onde abordou a situação atual das infraestruturas nos Estados Unidos da América (EUA), e onde referencia um relatório da *American Society of Civil Engineers (ASCE)* que reporta a existência de mais de 9,1% das pontes nos EUA com deficiência estrutural e necessidade de cuidados especiais de manutenção para assegurar o seu adequado desempenho estrutural. Neste enquadramento, investigou o uso de drones no âmbito da inspeção de pontes, de forma a minimizar tanto o risco dos técnicos como os custos elevados. Atualmente, as inspeções mais usuais são realizadas com recurso a uma grua e cordas, o que coloca em situação de risco o técnico que a realiza.

Na sua tese, o autor identificou alguns tipos de estruturas que beneficiaram com o uso desta tecnologia, nomeadamente pontes, edifícios, parques fotovoltaicos, barragens, postes de iluminação e edifícios industriais.

Para a escolha do drone para as inspeções, o autor, teve como consideração fatores como o tempo de voo, alcance e a capacidade de carga do drone, a possibilidade de aplicar uma segunda câmara no topo do drone, o desempenho da câmara utilizada em gravações com pouca luminosidade, a resolução da camara, e a existência de luzes de led capazes de assegurar uma fonte luminosa extra para captação de imagens, sobretudo no caso da parte inferior de tabuleiros de pontes.

O caso de estudo foi a ponte ilustrada na figura 43 perto da cidade em *Pennington County*, EUA, composta por tabuleiro em betão e vigas principais e pilares em madeira. A ponte tem um desenvolvimento de 51.8m e 7.9m de largura e insere-se num alinhamento em curva com 116.4m de raio. Devido à inexistência de uma sequência de procedimentos para a inspeção de pontes com recurso a drones, o autor elaborou o protocolo ilustrado na Figura 44, onde recomenda a realização da inspeção em 5 fases.



Figura 43 – Caso de estudo. (Duque, 2017)

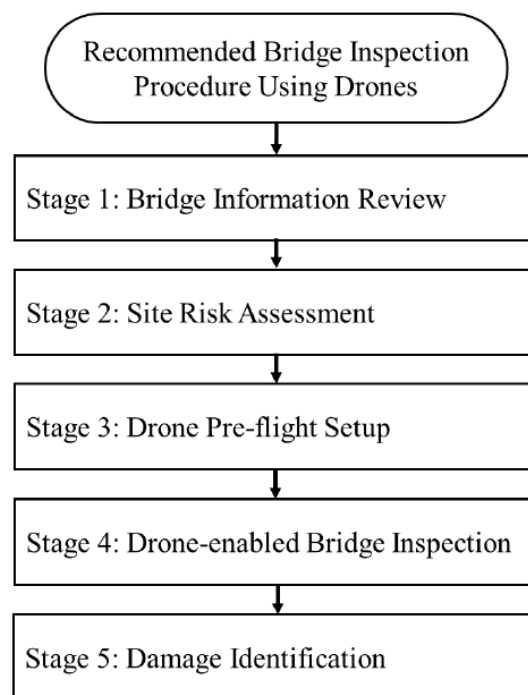


Figura 44 – Procedimentos recomendados para a inspeção de pontes com recurso a drones. (Duque, 2017)

A primeira fase, *“Bridge Information Review”*, consiste na revisão de todos os elementos sobre a ponte tais como, telas finais, relatórios de inspeção e outros documentos de igual relevância que sejam necessários para assegurar o conhecimento necessário sobre a estrutura.

A Figura 45 ilustra a aplicação da primeira fase do protocolo, onde o autor realiza a caracterização dos elementos constituintes da ponte.

A segunda fase do procedimento proposto, consiste em executar um rigoroso *“Site Risk Assessment”*, ou seja, a identificação dos riscos existentes nas imediações do local a inspecionar. O planeamento do voo, encontra-se condicionado pela realização desta fase, uma vez que é necessário conhecer previamente eventuais

condicionalismos e zonas críticas, além de definir zonas de passagem. Outra vantagem de se realizar esta etapa, é a identificação de locais de descolagem e aterragem do drone.

Na Figura 46 são delimitadas duas áreas potencialmente críticas para a inspeção com o drone, neste caso devido à existência de uma ponte adjacente e de árvores.

A terceira fase, consiste na execução do “*Drone Pre-flight Setup*”, que por outras palavras consiste na verificação de todos os componentes do drone antes da descolagem. Podemos equiparar esta fase, à sequência de verificações realizada em aviões tripulados, onde se assegura o bom funcionamento de todo o sistema antes do voo.

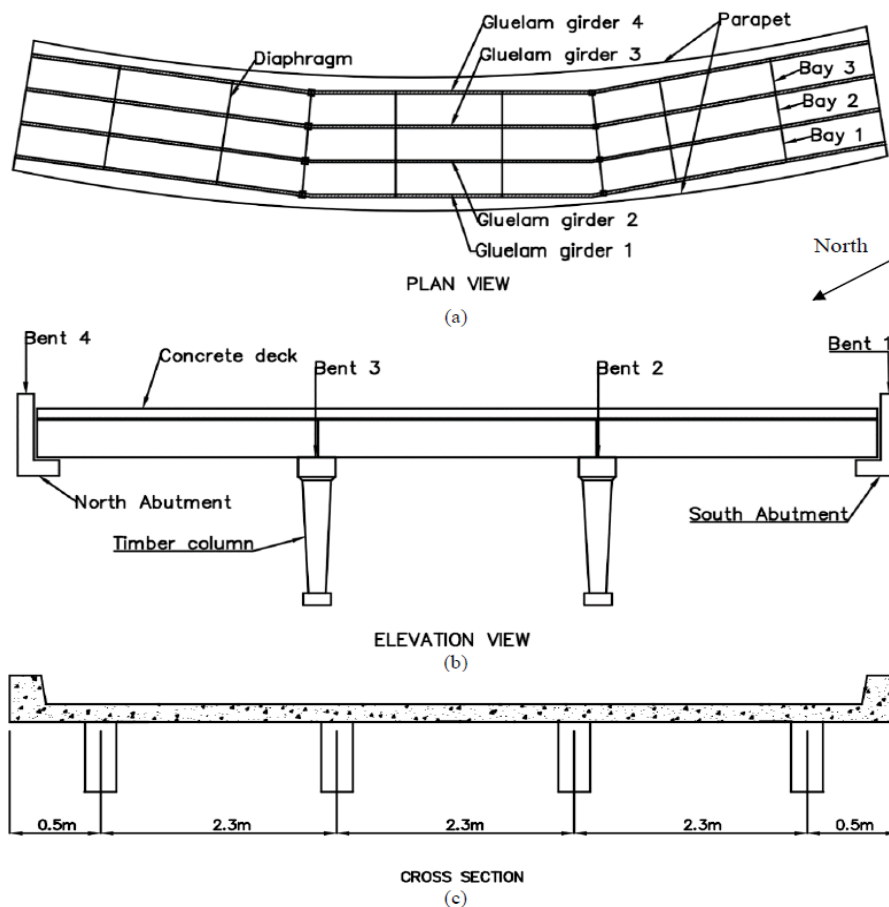


Figura 45 – Caraterização dos elementos da ponte. (Duque, 2017)

A quarta fase denomina-se “*Drone-Enable Bridge Inspection*”, ou seja, a partir do momento em que a recolha de toda a informação preliminar é reunida é possível proceder ao início da inspeção. Durante esta fase, é necessário ter em consideração as condicionantes relativamente às condições meteorológicas como a chuva ou vento, que podem condicionar a normal operação e controlo do drone. Nesta fase, recomenda-se a captura de imagens da estrutura de carácter mais geral, e só depois a recolha de imagens de pormenor de zonas mais restritas.

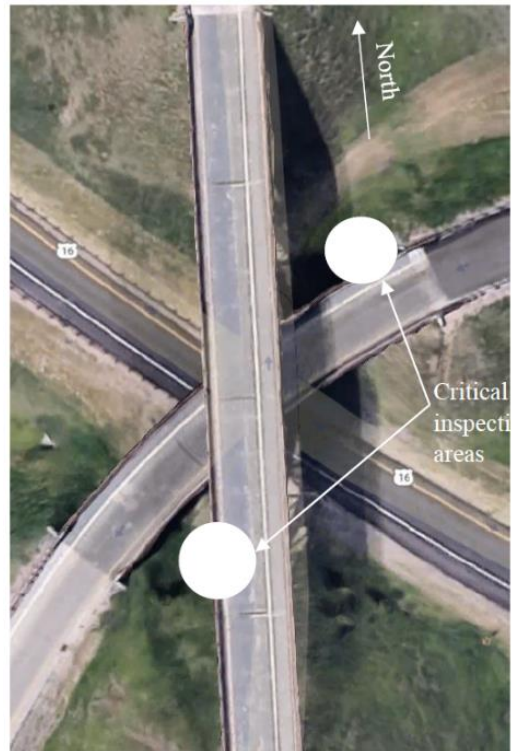


Figura 46 – Delimitação de áreas críticas. (Duque, 2017)

Pode-se observar, na Figura 47, uma imagem capturada da ponte na fase quatro do protocolo. As imagens captadas pelo drone em algumas situações detetadas, nomeadamente, destacamento do betão e corrosão das armaduras, e eflorescências, são apresentadas nas Figuras 48 e 49 respetivamente.



Figura 47 – Vista geral da ponte. (Duque, 2017)



Figura 48 – Destacamento do betão e corrosão das armaduras. (Duque, 2017)

Figura 49 – Sinais de eflorescências no betão. (Duque, 2017)

A quinta e última fase do protocolo denomina-se “*Damage Identification*”, e traduz-se na identificação dos danos a partir das imagens adquiridas. Nesta fase, as imagens recolhidas servem de base para a posterior análise com recurso a programas automáticos ou semiautomáticos de análise e processamento de imagens. Após identificação das anomalias, o autor apresenta o esquema da Figura 50, onde identifica todas as anomalias dignas de registo.

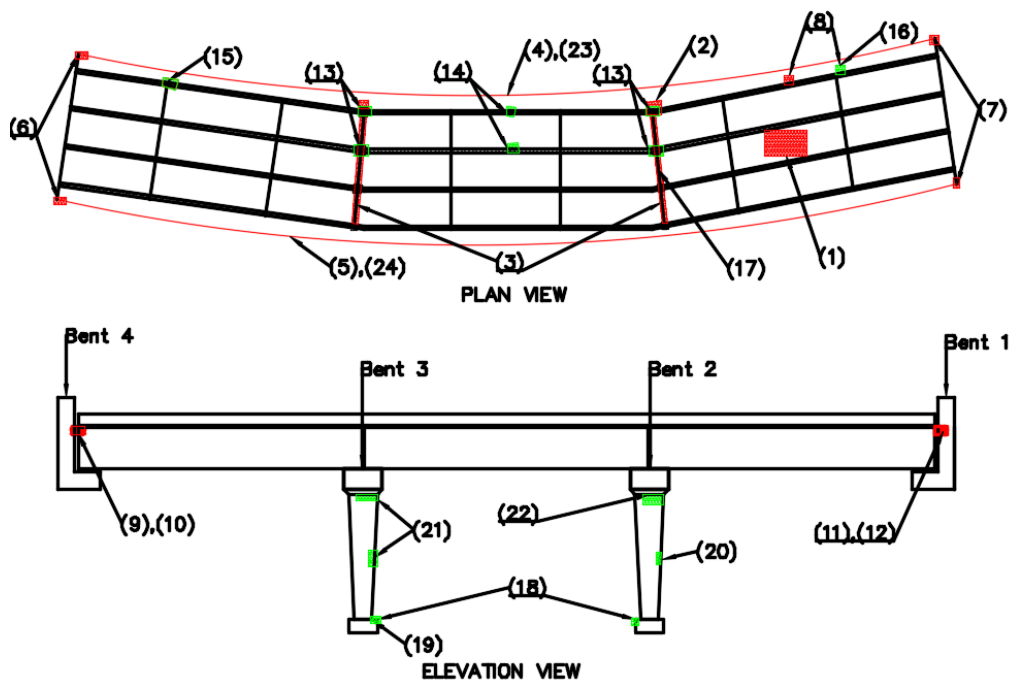


Figura 50 – Localização de anomalias. (Duque, 2017)

No âmbito da identificação das áreas afetadas, o autor definiu um protocolo que consistindo em quatro etapas conforme mostra a Figura 51.

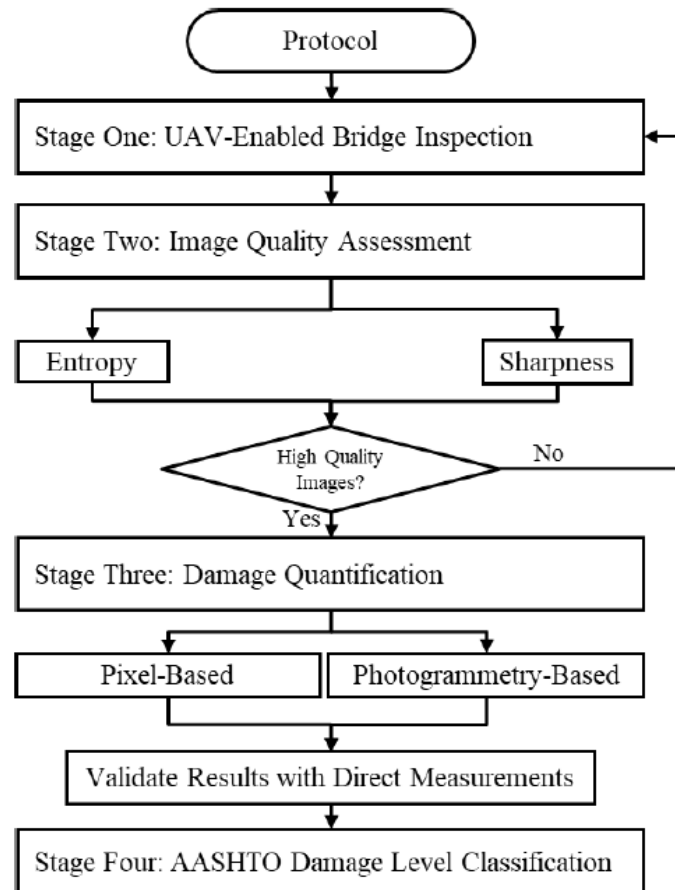


Figura 51 – Protocolo de quantificação de danos. (Duque, 2017)

A primeira fase, à semelhança do protocolo anteriormente referido, trata-se da inspeção da ponte com recurso a um drone.

Na segunda fase, após a conclusão da captura de imagens com o drone, é realizada a “*Image Quality Assessment*”, com base na avaliação de parâmetros de qualidade das imagens com recurso a programas como o *Matlab*.

A terceira fase traduz-se na quantificação de danos, esta fase tanto pode ser realizada com base em medidas de pixéis, como por fotogrametria. Por último, propõe-se a realização de uma classificação dos danos com base nas indicações das normas AASHTO.

Após a realização do trabalho o autor concluiu que a recolha de imagens com câmaras de alta resolução combinadas com programas adequados de processamento de imagens, provaram ser ferramentas eficazes para a identificação de danos nos diferentes componentes da ponte, tendo demonstrado eficiência na

deteção de uma grande variedade de fissuras, destacamentos e humidades do betão e corrosões nas armaduras.

Em comparação com as imagens fornecidas pela *South Dakota Department of Transportation (SDDOT)*, o autor confirma a eficiência do método utilizado. Nas Figuras 52 e 53, ilustra-se um exemplo de comparação direta entre as imagens capturadas pelo drone e as imagens resultantes da inspeção realizada pela SDDOT com base em técnicas tradicionais.

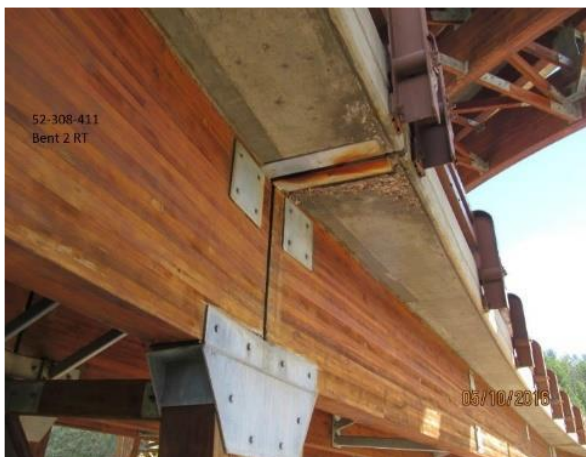


Figura 52 – Imagens obtida pela SDDOT.
(Duque, 2017)



Figura 53 – Imagem obtida com recurso a drone.
(Duque, 2017)

O autor concluiu ainda que o uso de drones tem algumas limitações devido a fatores meteorológicos, como o vento, e a iluminação limitada de algumas zonas. Os métodos de quantificação de danos foram eficientes, existindo apenas um desvio de 12% para o método por pixéis e entre 3,5 a 14,9% no método de fotogrametria.

3.2.4 Mapping, modeling and inspecting the UK's tallest tower (Pix4D, 2016)

Pix4D (2016) apresenta um caso real de mapeamento, modelação e inspeção de uma torre de telecomunicações com recurso a drones e análise e processamento de imagens. A torre, originalmente denominada de “Emley Moor”, é atualmente chamada de torre “Arqiva” (Figura 54) e é a torre de transmissão mais alta do género no Reino Unido, que tem a função de distribuir diversos canais televisivos e de rádio por uma área superior a 10,000 km², alcançando um número estimado de 5 milhões de habitações.

Segundo Pix4D (2016), em Junho de 2016, a proprietária da torre contratou a empresa “RSK Orbital” para a realização de uma inspeção ao exterior do paramento em betão da torre. O equipamento utilizado para a realização da inspeção foi o *DJI Inspire 1* (Figura 55), tendo capturado 3210 imagens para a construção da modelação 3D.



Figura 54 – Torre “Arquiva”. (Pix4D, 2016)



Figura 55 – Drone “DJI Inspire 1”. (SMARTGADGETSHUB, 2015)

O autor realça que para a realização de uma inspeção através do método tradicional, em estruturas de levada altura, como é o caso da torre (330 m), seria necessário realizar o registo fotográfico a partir do solo ou uma inspeção mais aproximada através da utilização de técnicas de alpinismo para a captura de imagens das anomalias com o registo da sua localização. As desvantagens do recurso às técnicas tradicionais na inspeção de estruturas com estas características são as possíveis falhas na deteção de zonas problemáticas, o elevado tempo de execução e as implicações de segurança resultantes dos trabalhos de inspeção a elevadas alturas.

Na figura 56 ilustra-se um exemplo de deteção de uma eventual fissura que se encontra visível na torre, a uma altura de 185m.

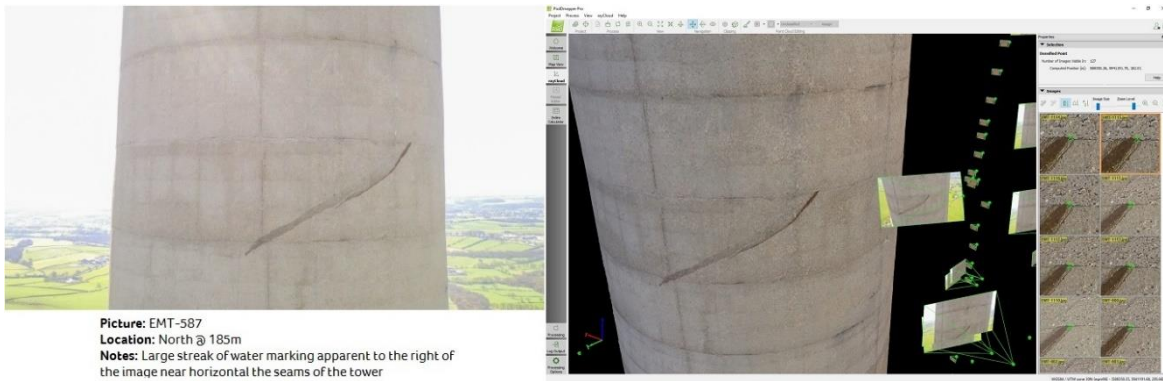


Figura 56 – Exemplo de deteção de uma eventual fissura na torre “Arqiva”. (Pix4D, 2016)

Em estruturas com estas características, garantir uma cobertura total de inspeção é usualmente bastante difícil e poderá resultar na impossibilidade de deteção de zonas com pequenos danos que em fases posteriores poderão significar um aumento significativo dos custos de reparação. A utilização de técnicas com recurso a drones e modelação 3D, permite ao utilizador localizar as coordenadas exatas de eventuais anomalias presentes qualquer zona da torre.

O autor afirma que no decorrer do processo de captura de imagens, as situações que despertaram mais dificuldade foram os ventos fortes e a interferência de ondas de rádio. Na Figura 57 é apresentado o resultado da modelação 3D da torre.



Figura 57 – Resultado da modelação 3D da Torre “Arqiva”. (Pix4D, 2016)

3.2.5 Veículo Aéreo Não Tripulado (Drones)

Veículo Aéreo Não Tripulado, também conhecido como *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), é todo e qualquer tipo de aeronave que não necessita de piloto para ser dirigido. Nestas aeronaves o voo é controlado automaticamente por computadores a bordo do avião, por navegador de controlo remoto ou ainda por um piloto localizado em terra ou noutra veículo. (OERN, 2012)

3.2.5.1 História e Atualidade

A história dos VANTs surge em 1804 quando Sir George Cayley, considerado o primeiro engenheiro aeronáutico, realizou o primeiro voo de um planador não tripulado de asa fixa, cujo esquema é possível observar na Figura 58.

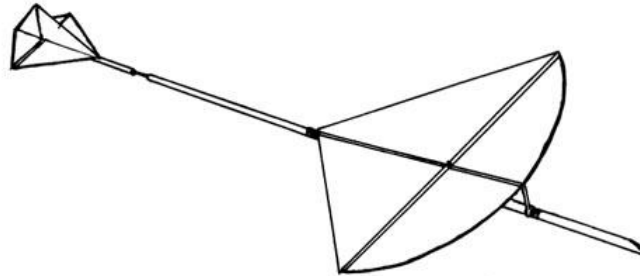


Figura 58 – Esquema do planador construído por Sir George Cayley em 1804. (Monash University, 2002)

Em 1848, ocorreu o primeiro voo de uma aeronave alimentada não tripulada, obra de John Stringfellow através do seu modelo movido a vapor de 3,66 metros de envergadura. (Newcome, 2004)

Em 1857, foi criado o primeiro VANT francês construído por Félix de la Croix. Um modelo movido a vapor de 16,8 metros de envergadura de asa e com trem de aterragem retráctil e em diedro. Este modelo, representado na Figura 59, foi o primeiro avião alimentado, a voar com êxito (Newcome, 2004).

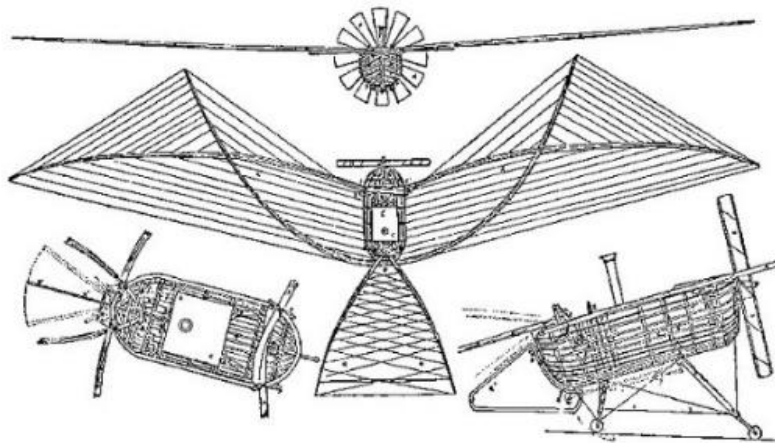


Figura 59 – VANT criada por Félix de la Croix. (Croix, 1857)

Em 1898, o cientista Nikola Tesla apresentou uma descoberta que influenciou o desenvolvimento das gerações futuras dos VANTs, nomeadamente o controlo de um barco através das ondas radio (Figura 60).



Figura 60 – Barco telecomandado de Nikola Tesla. (Stefanović, 2011)

Em 1922, foi lançada em Inglaterra a primeira aeronave não tripulada de nome *RAE 1921 Target* a partir de um porta-aviões.

No decorrer da 2ª guerra mundial surgiu um maior desenvolvimento desta tecnologia, com a criação da aeronave V-1 intitulada de *Buzz Bomb* pela força aérea alemã, e ilustrada nas Figuras 61 e 62. O bombardeiro não tripulado, encontrava-se dotado de um sofisticado sistema de orientação composto por giroscópios e barómetros.



Figura 61 – Fotografia do transporte do VANT “V-1”. (Lysiak, 1944)

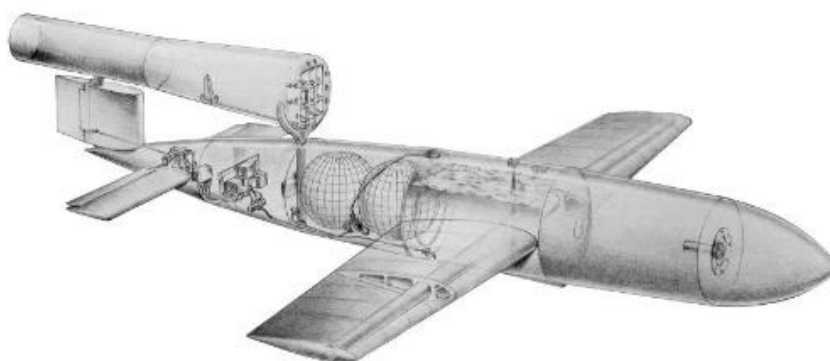


Figura 62 – Vista pormenorizada do *Buzz Bomb*. (Heroicrelis, 2017)

Em 2006, o chinês Frank Wang cria a *SZ DJI Technology Co, Ltd.*, comercialmente conhecida como DJI, impulsionando a disponibilização desta tecnologia no mercado global por intermédio de diversos equipamentos capazes de desempenhar as mais diversas funções, sejam elas recreativas ou profissionais.

Atualmente esta tecnologia é procurada de forma crescente e sustentada ao nível global, como comprovam as estatísticas encontradas no *Google Trends* (2019), e que podem ser observadas na Figura 63.



Figura 63 – Pesquisas no Google pela palavra “drone”. (Google Trends, 2019)

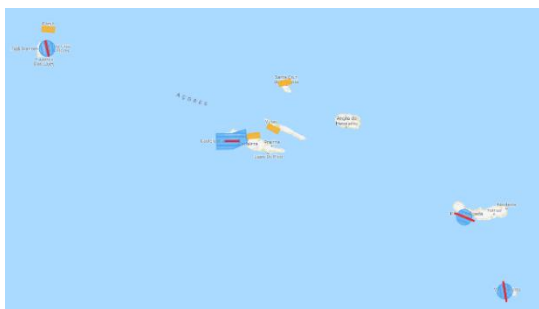
3.2.5.2 Legislação de VANT em Portugal

Em Portugal, após a ocorrência de alguns incidentes com o uso de VANT por civis, e pela falta de legislação europeia ou internacional que regulamenta o seu uso, existiu a necessidade de criar legislação para o território nacional levando ao surgimento do Regulamento n.º 1093/2016.

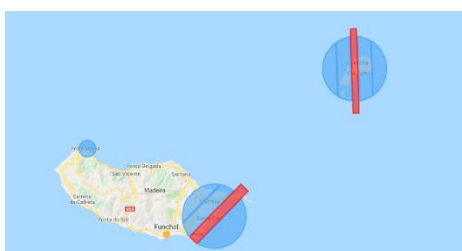
De forma a facilitar a consulta da legislação por parte dos cidadãos, a Associação Nacional de Aviação Civil (ANAC) criou o website “<https://www.voanaboa.pt/>” (ANAC, 2019), onde se encontra disponível a legislação e informações necessárias e acessórias ao manuseamento de drones. Na Figura 64 apresenta-se o mapa de restrições de voo para Portugal Continental e ilhas dos Açores e Madeira e disponível no website.

Recentemente, a legislação em vigor sofreu alterações com a publicação do Decreto-Lei n.º 58/2018 de 23 de Julho, que define novas regras para a utilização em Portugal de sistemas de aeronaves civis não tripuladas. Com o objetivo de garantir a segurança do espaço aéreo português e evitar eventuais prejuízos causados por drones, passará a ser necessário:

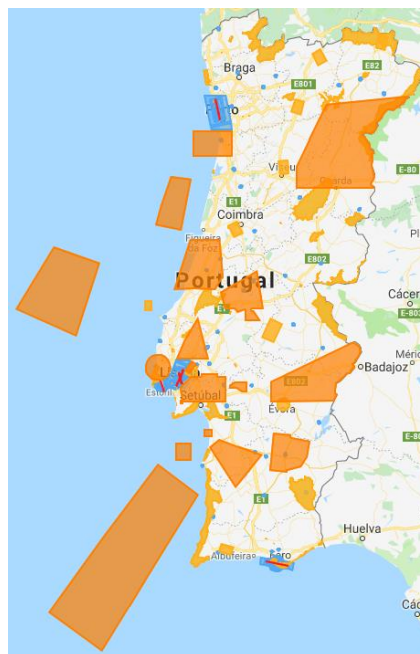
- Registo do proprietário/operador do drone junto da Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC), para operar drones com um peso superior a 250 gramas;
- Seguro de Responsabilidade Civil para o uso de drones com um peso superior a 900 gramas.



a) Açores



c) Madeira



b) Portugal Continental

Figura 64 – Mapas de áreas de restrição de voos com VANTs. (ANAC, 2019)

3.2.5.3 Drone

Para a inspeção visual de estruturas de grande dimensão com vista a deteção de anomalias/patologias é necessária a utilização de veículo aéreo não tripulado com um conjunto de especificações essenciais, nomeadamente:

- Grande alcance de controlo e operabilidade;
- Resistência à ação do vento;
- Capacidade de estabilização;
- Sensor de proximidade de obstáculos;
- Precisão de posicionamento por intermédio de sistema RTK (*Real Time Kinematics*);
- Capacidade de adaptar diferentes câmaras ou equipamentos;
- Elevada autonomia.

Para desempenhar essas funções no caso de estudo da presente dissertação, foi utilizado um drone profissional da marca DJI, modelo Matrice 600 Pro, apresentado na Figura 65.



Figura 65 – Drone DJI “Matrice 600 Pro”. (DJI, 2019a)

Conforme é possível observar nas especificações técnicas do drone, apresentadas na Tabela 3.1, trata-se de um hexacóptero com um peso entre 9,5 Kg e 10 Kg, com capacidade de assegurar um peso máximo de voo de 15,5 Kg, atingir velocidades de 65 km/h e alturas de 2500 m, com autonomia de voo estimada de cerca de 30 minutos (por cada conjunto de baterias).

Além do uso de um drone com as especificações anteriormente referidas, é recomendável o uso de um monitor tátil de elevada resolução, compatível com o controlador remoto, que possibilite uma melhor leitura em tempo real das imagens captadas. Na realização do caso de estudo foi utilizado um monitor tátil do tipo *Crystal Sky*, visível na Figura 66, com capacidade de armazenamento interna das imagens captadas.

Tabela 3.1 – Especificações técnicas do DJI Matrice 600 Pro. (DJI, 2019c)

Aircraft	
Structure	
Diagonal Wheelbase	1133 mm
Dimensions	1668 mm × 1518 mm × 727 mm with propellers, frame arms and GPS mount unfolded (including landing gear)
	437 mm × 402 mm × 553 mm with propellers, frame arms and GPS mount folded (excluding landing gear)
Package Dimensions	520 mm × 480 mm × 640 mm (L × W × H)
Intelligent Flight Battery Quantity	6
Weight (with six TB47S batteries)	9.5 kg
Weight (with six TB48S batteries)	10 kg
Max Takeoff Weight	15.5 kg
Performance	
Hovering Accuracy (P-mode with GPS)	Vertical: ±0.5 m, Horizontal: ±1.5 m
Max Angular Velocity	Pitch: 300°/s, Yaw: 150°/s
Max Pitch Angle	25°
Max Speed of Ascent	5 m/s
Max Speed of Descent	3 m/s
Max Wind Resistance	8 m/s
Max Service Ceiling Above Sea Level	2500 m
Max Speed	40 mph / 65 kph (no wind)
Hovering Time* (with six TB47S batteries)	No payload: 32 min, 6 kg payload: 16 min
Hovering Time* (with six TB48S batteries)	No payload: 38 min, 5.5 kg payload: 18 min



Figura 66 – Controlador DJI e monitor *Crystal Sky*.

3.2.6 Câmaras de vídeo

A principal ferramenta de qualquer inspeção tradicional é a visão, e o mesmo se passa com as inspeções com recurso a drones, onde a câmara é a principal ferramenta de inspeção para a identificação e caracterização de eventuais anomalias e patologias.

Assim como o drone, as câmaras também necessitam de cumprir alguns requisitos mínimos, nomeadamente:

- Estabilização de imagem (*gimbal*);
- Zoom ótico;
- Armazenamento de imagens;
- Elevada resolução.

No caso de estudo, foi seleccionada uma câmara de alta definição capaz de capturar imagem em 4K com estabilização de imagem com recurso a um *gimbal* que confere estabilização em 3 eixos, conforme podemos observar na Figura 67, do tipo *Zenmuse X5* da DJI para a estabilização de imagem.



Figura 67 – Câmara *Zenmuse X5*. (DJI, 2019d)

3.3 PROPOSTA DE METODOLOGIA

No presente subcapítulo será apresentada e justificada uma proposta de metodologia generalizada para a inspeção de estruturas, com recurso a um veículo aéreo não tripulado e assente no processamento e análise automatizada de imagens digitais.

Antes de se apresentar detalhadamente a metodologia, é importante compreender e reconhecer a existência de quatro fases distintas na realização deste tipo de inspeções, visíveis na Figura 68.

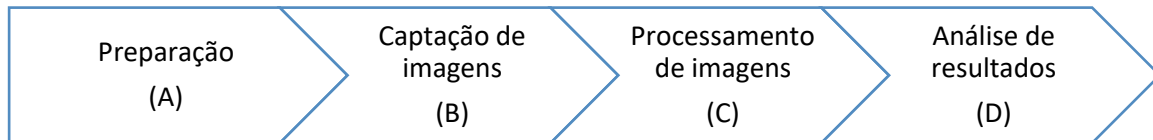


Figura 68 – Principais fases da inspeção.

A fase da preparação é a primeira fase de todo o processo, e é fundamentada na necessidade de proceder à recolha de informações relevantes do objeto alvo da inspeção, nomeadamente:

- Pesquisa de projetos;
- Pesquisa prévia dos materiais existentes;
- Consultar o historial de anteriores intervenções;
- Análise prévia das condições do local;
- Elaboração do plano de voo;
- Estudo das condições climatéricas;

A captação de imagens é, como o próprio nome indica, a fase em que é realizado o levantamento fotográfico de toda a estrutura. Esta fase é das mais vulneráveis de todo o processo devido aos diversos fatores externos e variáveis que podem comprometer a sua correta execução.

No final da recolha de imagens dá-se início à etapa de processamento de imagens e posterior modelação 3D, de forma a possibilitar a análise dos resultados obtidos.

Assim, com vista à correta realização de inspeções, propõe-se que seja seguida a metodologia apresentada na Figura 69.

A metodologia de inspeção apresentada baseia-se na ordem de fases anteriormente referida e que irá ser abordada de seguida, mais detalhadamente.

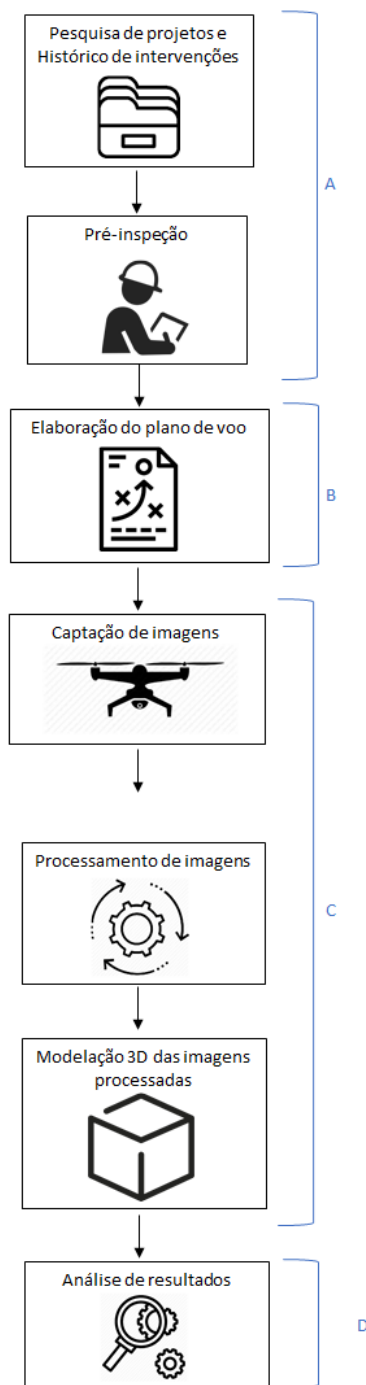


Figura 69 – Metodologia de inspeção genérica.

3.3.1 Pesquisa de projetos e histórico de intervenções

Em qualquer tipo de inspeção, seja ela com recurso a técnicas tradicionais, ou através de técnicas de captação remota e processamento de imagens através de software avançado, são necessários elementos de projeto ou, caso exista ou seja possível averiguar, um histórico de anteriores intervenções de reabilitação para uma melhor avaliação das características do objeto alvo de inspeção.

A falta de algumas informações de projeto, incluindo a conceção estrutural, dimensões e materiais poderão condicionar ou dificultar a análise de alguns tipos de patologias, ou detetar a sua origem. Da mesma forma, a ausência de informação sobre anteriores intervenções de reabilitação/reparação, origina a que áreas intervencionadas possam ser erradamente interpretadas como anomalias ou patologias.

Pelos motivos anteriormente referidos, a falta de tal documentação poderá comprometer a eficiência de todas as demais etapas de inspeção, sendo por isso uma etapa essencial ao sucesso da metodologia proposta.

3.3.2 Pré-inspeção

A pré-inspeção engloba todos os processos preparativos de visita e inspeção visual ao objeto em estudo, bem como a todas as suas zonas circundantes. O estudo prévio visual da estrutura, apesar do levantamento integral da estrutura previsto na metodologia, poderá originar uma maior incidência ou proximidade em “pontos chave” que aparentem sinais de anomalias ou patologias.

A visita prévia ao terreno circundante é um fator preparatório crucial, uma vez que será nessa mesma visita que deverá ser analisada a presença de quaisquer elementos que poderão não se encontrar constantes nas peças desenhadas ou em mapas, como vegetação, árvores, postes ou quaisquer outros elementos que possam condicionar a trajetória ou eficácia do drone na captação de imagens. Atualmente, os mapas virtuais encontram-se dotados de ferramentas 3D, que permitem retirar uma leitura muito aproximada do objeto de estudo e da sua envolvente. Na Figura 70, apresenta-se um exemplo das capacidades da ferramenta *Google Maps* na perceção dimensional de elementos e meio envolvente, aplicado ao campus do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).



Figura 70 – Exemplo de pré-inspeção, com recurso ao *Google Maps* (ISEP). (Google, 2019a)

Deverá também ser analisada a existência de eventuais antenas ou demais equipamentos, capazes de interferir ou condicionar as frequências de rádio que permitem a comunicação entre o controlador e o drone.

Além da análise de elementos circundantes, o estudo das acessibilidades às diversas frentes, bem como a verificação de zonas com terreno nivelado e áreas favoráveis para a descolagem e decolagem do equipamento deverão ser realizados nesta fase.

3.3.3 Elaboração de plano de voo

O plano de voo consiste na definição do método de controlo e captação de imagens, bem como todo o planeamento, faseamento ou calendarização do mesmo.

Conforme foi anteriormente abordado, existe legislação em Portugal onde são definidos um conjunto de obrigações e condicionantes legais para a utilização de drones. A obrigatoriedade de registo, a obrigação de seguro em alguns equipamentos e a existência de zonas proibidas ou condicionadas são algumas das obrigações constantes nessa mesma legislação e que deverão ser analisadas nesta fase.

Após verificação da conformidade legal, deverá ser elaborado o plano de voo, sendo que para tal poderão ser adotados dois métodos bastante distintos, o controlo e captação de imagens manual ou automático.

Para a captação de imagens de estruturas em zonas onde se verifique a ausência de áreas circundantes limitadoras ou de especial cuidado ao voo, o método mais rápido e eficaz passará pela automatização do voo e captura de imagens com recurso a softwares como *DJI GS PRO* (Figura 71), *Pix4DMapper*, entre outros.



Figura 71 – Software de voo automático *DJI GS PRO*. (Space City Drones, 2017)

O método manual pode-se considerar mais conservativo, uma vez que o drone e a captação das imagens são inteiramente controlados pelo operador. Este método é mais moroso e tratando-se de um método não

automatizado apresenta um maior risco de erro humano do que o anteriormente referido, carece também de uma maior preparação por parte dos utilizadores com a necessidade de proceder ao estudo prévio de algumas técnicas de fotogrametria essenciais para a fase de modelação 3D como o ângulo da câmara, distância ao objeto e altura de captura de imagem (recobrimento/sobreposição).

As condições climatéricas como chuvas e a existência de vento forte impossibilitam a utilização de drones, sendo por isso fatores determinantes no faseamento e calendarização dos voos. Apesar de não trazerem qualquer tipo de impedimento, a recolha de imagens dentro do mesmo horário permitirá um maior controlo do ângulo de incidência do sol, para a obtenção de um resultado geral mais uniforme.

3.3.4 Captação de imagens

Após a conclusão do plano de voo e constatação de todas as condições necessárias, deverá ser iniciada a captura de imagens no local, onde se colocará em prática todo o planeamento e trabalhos preparatórios prévios. Antes de iniciar a captura de imagens, é recomendada a calibração de todos os sensores do drone e averiguação de conformidade de todos os sinais entre o controlo e o drone, nomeadamente sinal *GPS*, sinal de recetor, etc.

Na Figura 72, pode observar-se o exemplo de um processo de voo e captura de imagens com recurso a um drone.



Figura 72 – Voo e captura de imagens.

Durante a captura de imagens o operador deverá proceder em tempo real, à análise visual das possíveis anomalias para que, caso seja necessário, proceda a uma captura de imagens mais detalhada e/ou aproximada da zona afetada. Essa análise e posterior pormenorização auxilia a identificação da patologia ou anomalia e da sua origem, na fase de análise de resultados.

3.3.5 Processamento de imagens

Com a captura de imagens concluída, deverá ser analisada e filtrada a existência de quaisquer imagens indesejáveis, involuntárias, com desfoque ou até mesmo duplicadas. A utilização de imagens com essas características causa um evidente aumento do tempo de processamento, podendo também comprometer a viabilidade dos resultados na fase de modelação 3D.

De forma a evitar possíveis conflitos de nomeação dos ficheiros e eliminar o risco de uma seleção aleatória das imagens pelo software na fase de processamento, deverão ser renomeadas todas as imagens com um número em série. Para tal, deverá ser utilizado um software como o *Bulk Rename Utility*, que possibilita a renomeação dos diversos ficheiros a partir de parâmetros definidos pelo utilizador.

Após filtragem e renomeação das imagens, com recurso a software como o *Matlab* procede-se à análise e ao processamento de cada uma das imagens, pixel a pixel, com as ferramentas de identificação de patologias/anomalias.

3.3.6 Modelação 3D

Com recurso a ferramentas de software avançado de modelação 3D como o *Pix4D*, que utiliza técnicas de fotogrametria e dados de georreferenciação contidos nas imagens capturadas, é realizada a modelação das imagens originais e processadas. A constituição da imagem 3D com base nas várias imagens recolhidas é baseada numa técnica heurística de nuvem de pontos (*point cloud*).

Na Figura 73 apresenta-se um exemplo de modelação de uma ponte, com recurso a técnicas de captura remota de imagens.



Figura 73 – Exemplo de modelação 3D através de técnicas de fotogrametria. (Sketchfab, 2016)

Através da criação de um modelo 3D é possível localizar anomalias, definir zonas de risco, realizar uma inspeção virtual a todos os elementos do objeto de estudo e monitorizar a propagação/evolução de patologias através de inspeções periódicas.

3.3.7 Análise de resultados

Após a conclusão das etapas anteriores, deverá ser realizada a análise das anomalias detetadas e das suas possíveis causas ou origens. De forma a possibilitar uma melhor análise e diagnóstico das anomalias detetadas, deverá ser preenchida uma tabela de formulário (Tabela 3.2) com indicação de todas as informações necessárias.

Este tipo de análise com recurso ao registo de todas as informações das anomalias, permite não só localizar e diagnosticar as anomalias, mas também confere informações cruciais para a monitorização das mesmas. Em fase de planeamento de futuras intervenções, a realização deste mesmo processo aliado ao modelo 3D e às técnicas de fotogrametria adotadas, poderá servir de base orçamental, permitindo uma melhor análise dos custos envolvidos na correção dessas mesmas anomalias.

Tabela 3.2 – Formulário “modelo”, para registo de anomalias.

REGISTO DE ANOMALIAS													
Cliente: _____ Alvo da Inspeção: _____ Morada: _____ Técnico: _____										LOGO			
Nr.	Anomalia	Prováveis causas (Origem)	Fotografia		Localização Aproximada da Anomalia				Orientação				Observações
			Nome	Data	Coordenadas GPS			N	S	E	O		
					Latitude	Longitude	Altitude						
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS DE IDENTIFICAÇÃO SEMIAUTOMÁTICA DE ANOMALIAS EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

4.1 ENQUADRAMENTO

O presente capítulo visa apresentar e explicar as ferramentas e metodologias criadas para a deteção semiautomática de algumas das patologias mais recorrentes em estruturas de betão armado. As ferramentas de identificação semiautomática são capazes de detetar fissuras, colonizações biológicas (líquenes), eflorescências e sinais de corrosão/armaduras expostas.

Para o desenvolvimento destas ferramentas foi utilizado o software MATLAB®, um programa elaborado em linguagem de computação de alto-nível que permite o desenvolvimento de algoritmos, análise, visualização de dados e computação numérica. Este programa pode ser utilizado para: programação, desenvolvimento de algoritmos, aquisição de dados, simulação e modelação, análise de dados e visualização; entre outros (Faria, 2010)

Através da criação de linguagem de programação e do uso de algumas das funcionalidades do *Image Processing Toolbox* (Figura 74) é possível realizar um variado leque de operações para processamento avançado de imagens tais como:

- Transformações espaciais;
- Operações Morfológicas;
- Operações em bloco ou pontuais;
- Filtragem de imagem linear e desenvolvimento de filtros;
- Transformadas de imagem;
- Registo de imagem;
- Segmentação.

Apresenta assim diversas funcionalidades fundamentais para a inspeção visual de edifícios ou estruturas, como a criação de algoritmos que permitem detetar, identificar, classificar, reconhecer e rastrear determinadas características de imagens ou vídeos.

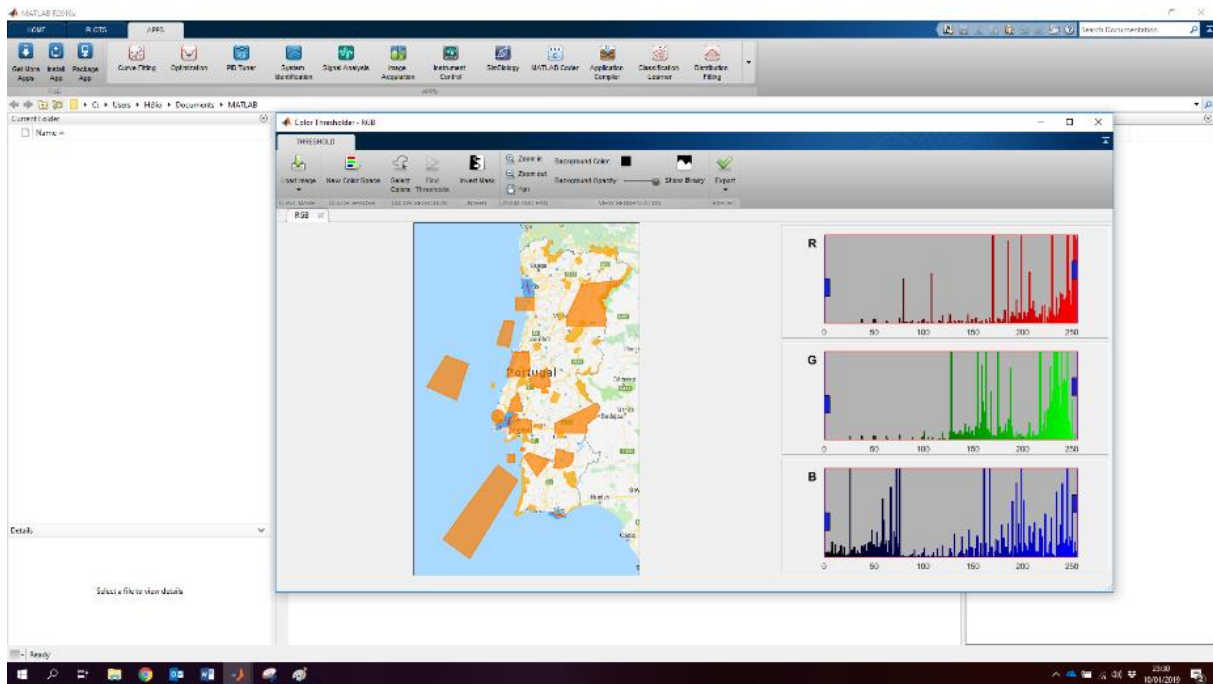


Figura 74 – Interface Gráfica do *Image Processing Toolbox* do programa *MATLAB*.

Apesar das diversas ferramentas disponibilizadas na interface do *MATLAB*®, o desenvolvimento das ferramentas de deteção foi elaborado através da utilização e adaptação de funções do *Image Processing Toolbox*.

4.2 FERRAMENTA DE DETEÇÃO DE FISSURAS

A ferramenta de deteção semiautomática de fissuras em estruturas de betão, presente no Anexo I, tem como base operacional o fluxograma da Figura 75.

A ferramenta de deteção de fissuras detém de uma linha de comandos que define como *input* os ficheiros existentes em determinada pasta a identificar pelo utilizador, com a extensão de ficheiro “.jpg”. Este tipo de programação, aliado à utilização de linguagem de programação com rotinas (em ciclo), permite ao utilizador a liberdade de processar e conseqüentemente gravar um número indefinido de imagens.

Conforme é possível observar no fluxograma, o processamento é realizado através da filtragem da imagem em 4 etapas, o ajuste do contraste, conversão da imagem a cores para tons escala de cinza, remoção do ruído da imagem e posterior realce da fissura.

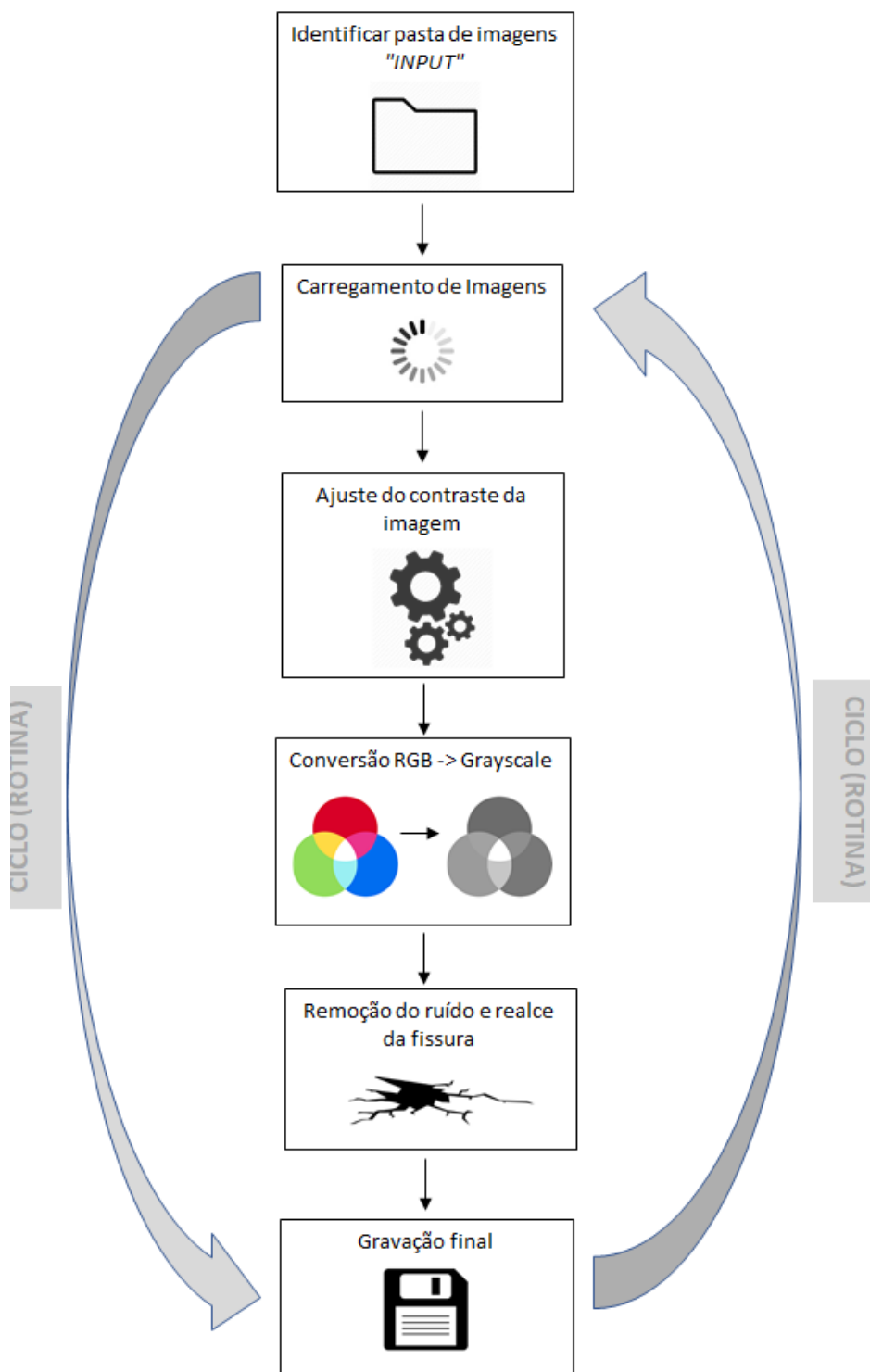


Figura 75 – Fluxograma da ferramenta de Identificação de fissuras.

São apresentados de seguida alguns exemplos de aplicação da ferramenta, para a deteção de fissuras, com a apresentação da imagem original e da imagem processada.



Figura 76 – Exemplo de Aplicação 1 (Fissuras) – Imagem Original.



Figura 77 – Exemplo de Aplicação 1 (Fissuras) – Imagem Processada.



Figura 78 – Exemplo de Aplicação 2 (Fissuras) – Imagem Original.

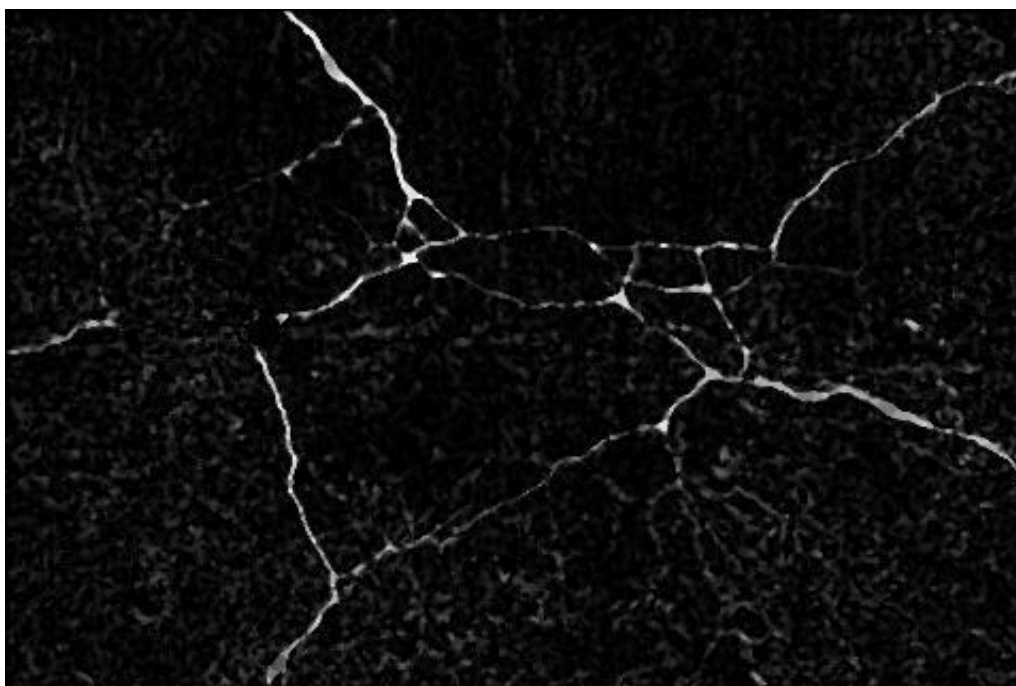


Figura 79 – Exemplo de Aplicação 2 (Fissuras) – Imagem Processada.



Figura 80 – Exemplo de Aplicação 3 (Fissuras) – Imagem Original.

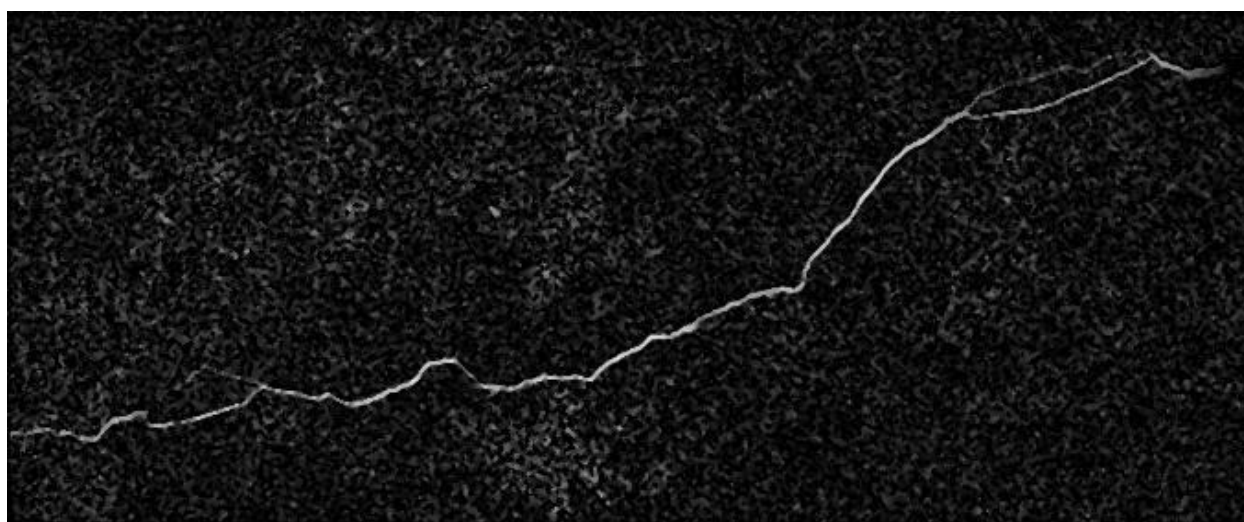


Figura 81 – Exemplo de Aplicação 3 (Fissuras) – Imagem Processada.

4.3 FERRAMENTA DE DETEÇÃO DE COLONIZAÇÕES BIOLÓGICAS (LÍQUENES)

O betão é um material que apresenta uma coloração e textura uniformes, o que permite uma abordagem mais simplificada à identificação de anomalias que se manifestem com cores predominantes. As colonizações biológicas, nomeadamente os líquenes, apresentam uma coloração distinta com tons verdes/amarelados, que naturalmente se destacam dos usuais padrões monocromáticos do betão armado.

A presente ferramenta, cujo código se apresenta no Anexo II, visa utilizar as variações de RGB como elemento de filtragem da imagem, através do estabelecido no fluxograma da Figura 82.

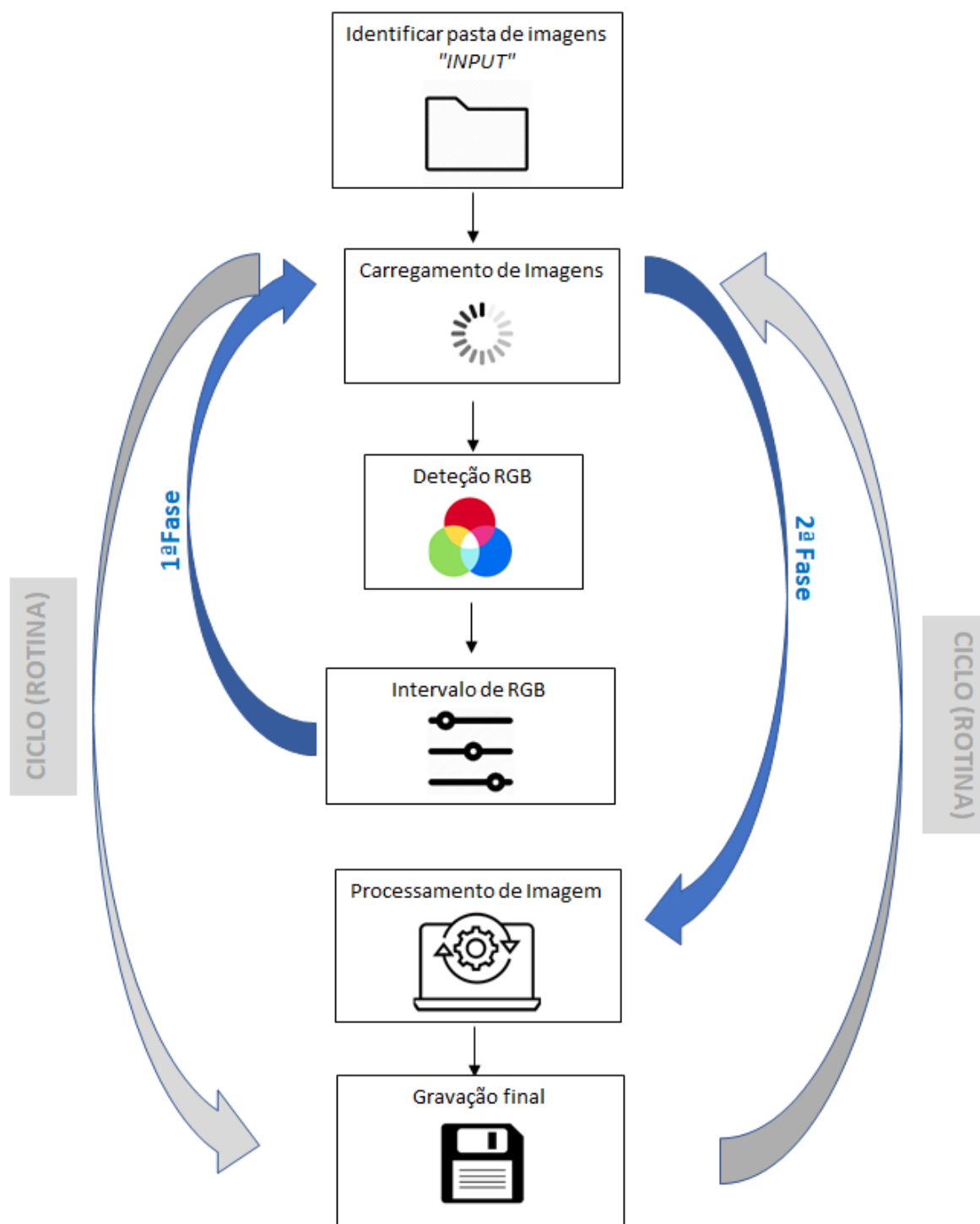


Figura 82 – Fluxograma de identificação de agentes biológicos em estruturas de betão.

O procedimento das imagens decorre em duas fases, uma fase de deteção e definição do intervalo dos parâmetros RGB da imagem e outra fase onde aplica esses mesmos parâmetros para a deteção dos líquenes.

A detecção dos parâmetros RGB é definida pela utilização de uma ferramenta independente denominada de “Detecção RGB” (Figura 83), presente no Anexo V da presente dissertação, onde através de uma pré-identificação e seleção de uma zona com líquenes por parte do utilizador é gerada uma tabela com intervalos RGB.

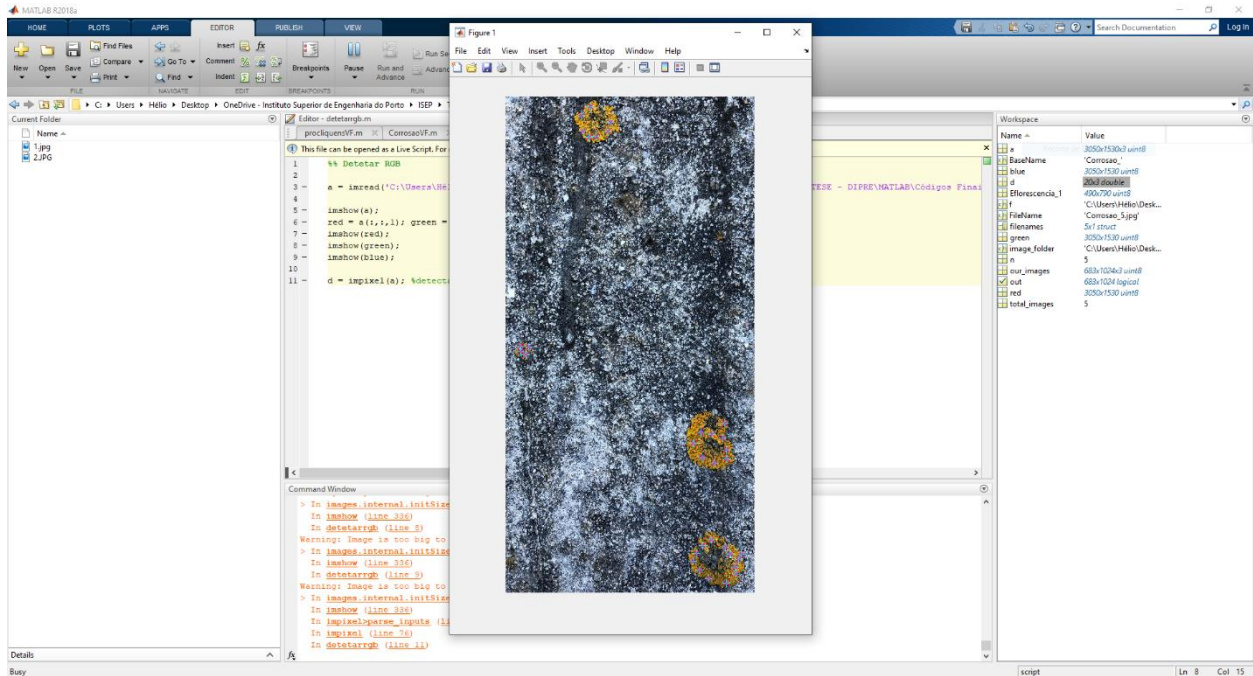


Figura 83 – Interface com ferramenta de detecção de RGB.

Após concluída a definição dos parâmetros RGB, é realizado o processamento de imagem através dos intervalos anteriormente estipulados. Este tipo de processamento resulta num *output* à escala de preto e branco, onde assinalado a branco se encontra a anomalia/patologia, à semelhança do que havia sido apresentado na ferramenta anterior.

Seguidamente serão apresentados três exemplos do uso da ferramenta de detecção semiautomática de anomalias, em imagens genéricas. Os exemplos de aplicação não obtiveram qualquer tipo de falsa detecção, sendo possível afirmar que a ferramenta detetou a generalidade das patologias.



Figura 84 – Exemplo de Aplicação 1 (Líquenes) – Imagem Original.

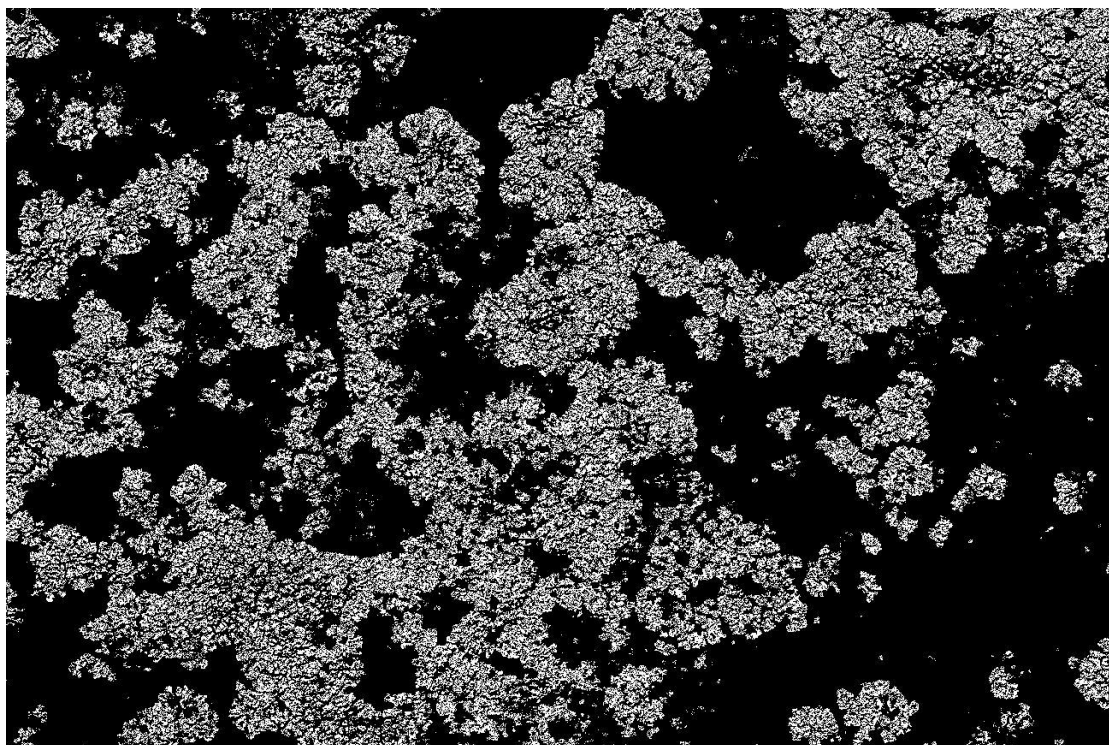


Figura 85 – Exemplo de Aplicação 1 (Líquenes) – Imagem Processada.



Figura 86 – Exemplo de Aplicação 2 (Líquenes) – Imagem Original. (Pxhere, 2017)

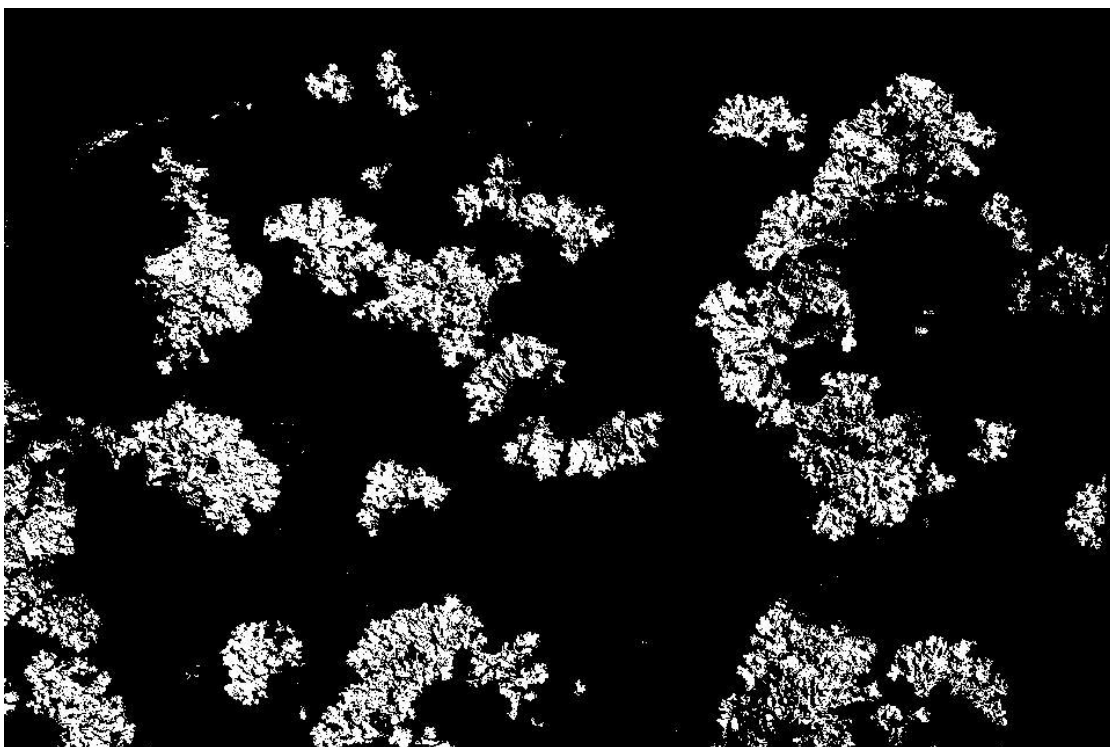


Figura 87 – Exemplo de Aplicação 2 (Líquenes) – Imagem Processada.

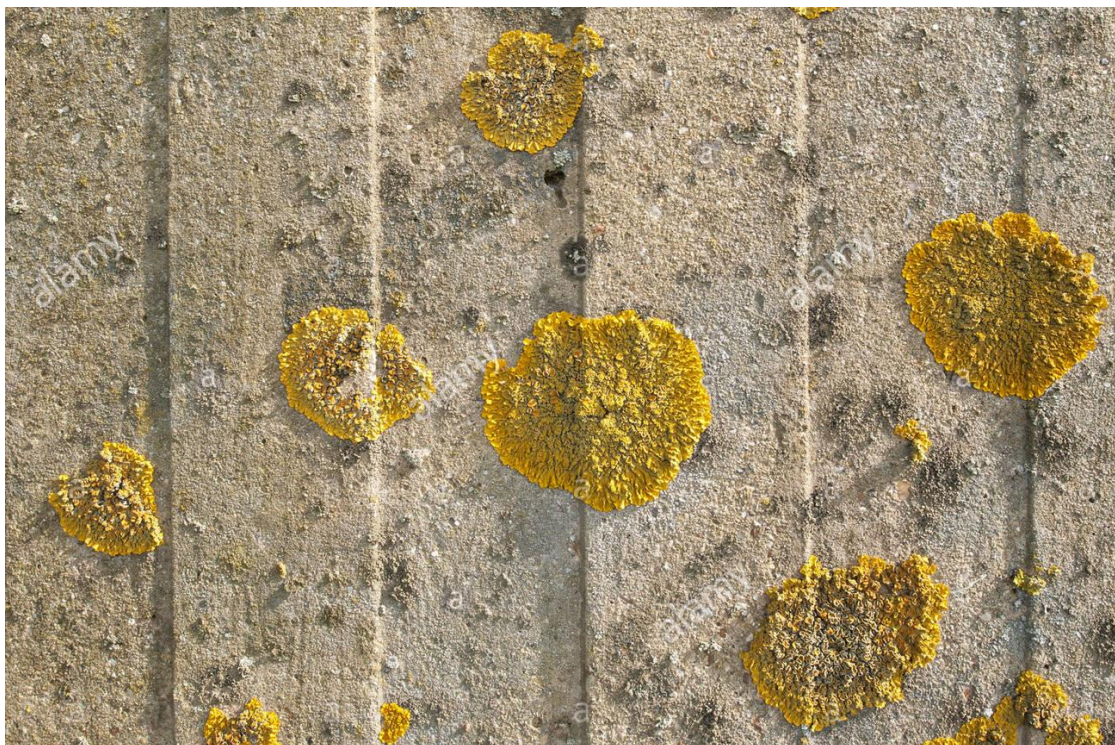


Figura 88 – Exemplo de Aplicação 3 (Líquenes) – Imagem Original. (Marsh, 2019)

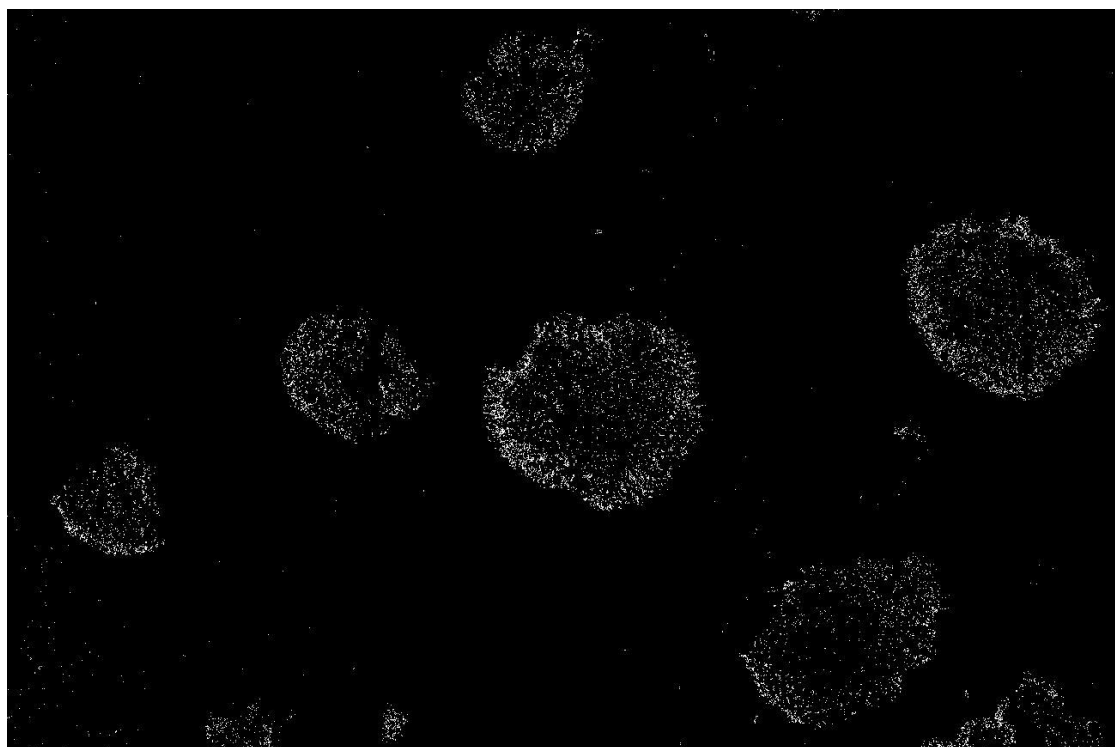


Figura 89 – Exemplo de Aplicação 3 (Líquenes) – Imagem Processada.

4.4 FERRAMENTA DE DETEÇÃO DE EFLORESCÊNCIAS

À semelhança da ferramenta de detecção de líquenes, a detecção de eflorescências (Anexo III) utiliza a mesma metodologia de processamento, partilhando o fluxograma apresentado na Figura 82.

O processamento deverá ser dividido em duas fases distintas, sendo uma a detecção do RGB da anomalia e o outro a detecção com recurso ao algoritmo criado.

Serão de seguida apresentados 3 exemplos de aplicação da ferramenta de detecção de eflorescências, através do processamento das imagens.



Figura 90 – Exemplo de Aplicação 1 (Eflorescências) – Imagem Original. (Sabai, 2017)



Figura 91 – Exemplo de Aplicação 1 (Eflorescências) – Imagem Processada.



Figura 92 – Exemplo de Aplicação 2 (Eflorescências) – Imagem Original.

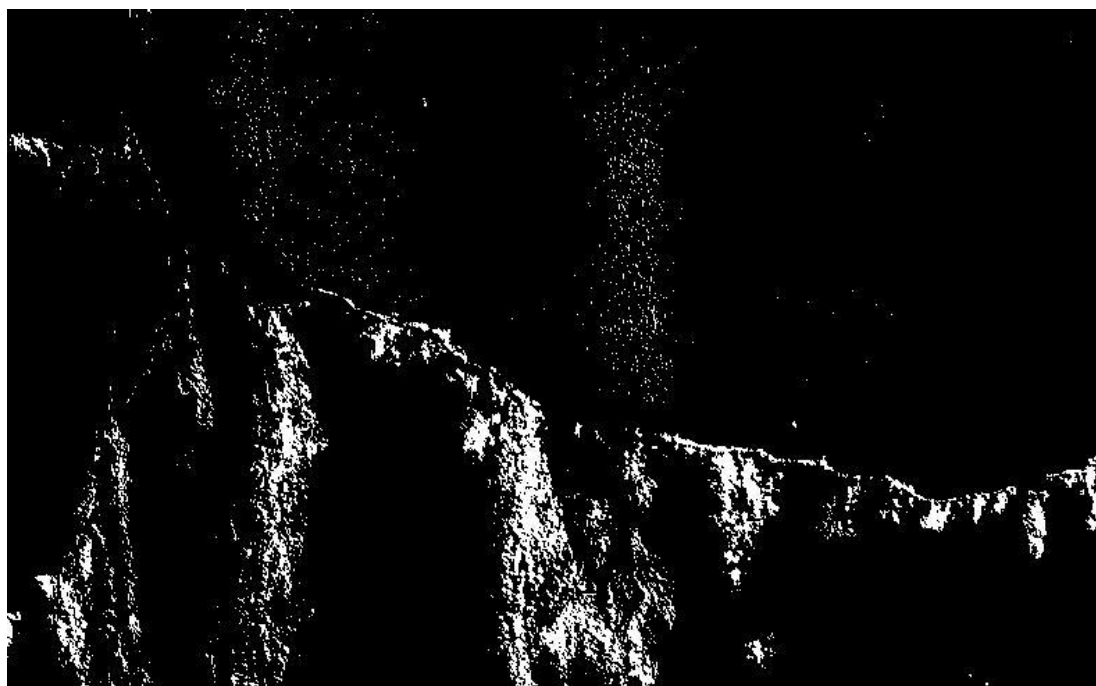


Figura 93 – Exemplo de Aplicação 2 (Eflorescências) – Imagem Processada.



Figura 94 – Exemplo de Aplicação 3 (Eflorescências) – Imagem Original.



Figura 95 – Exemplo de Aplicação 3 (Eflorescências) – Imagem Processada.

4.5 FERRAMENTA DE IDENTIFICAÇÃO DE CORROSÃO EM ARMADURAS EXPOSTAS

O destacamento de armaduras é um fenómeno genericamente mais localizado e de menor impacto visual quando comparado com o surgimento de líquenes ou eflorescências, no entanto, a sua deteção pode ser realizada a partir dos mesmos princípios e metodologia apresentada na Figura 82.

O código da ferramenta de identificação de corrosão encontra-se no Anexo IV da presente dissertação, sendo possível constatar a semelhança às ferramentas anteriormente referenciadas.

Serão apresentados de seguida 3 exemplos da deteção de armaduras expostas através do algoritmo criado, onde é possível observar a sua elevada eficiência e robustez.



Figura 96 – Exemplo de Aplicação 1 (Corrosão) – Imagem Original.

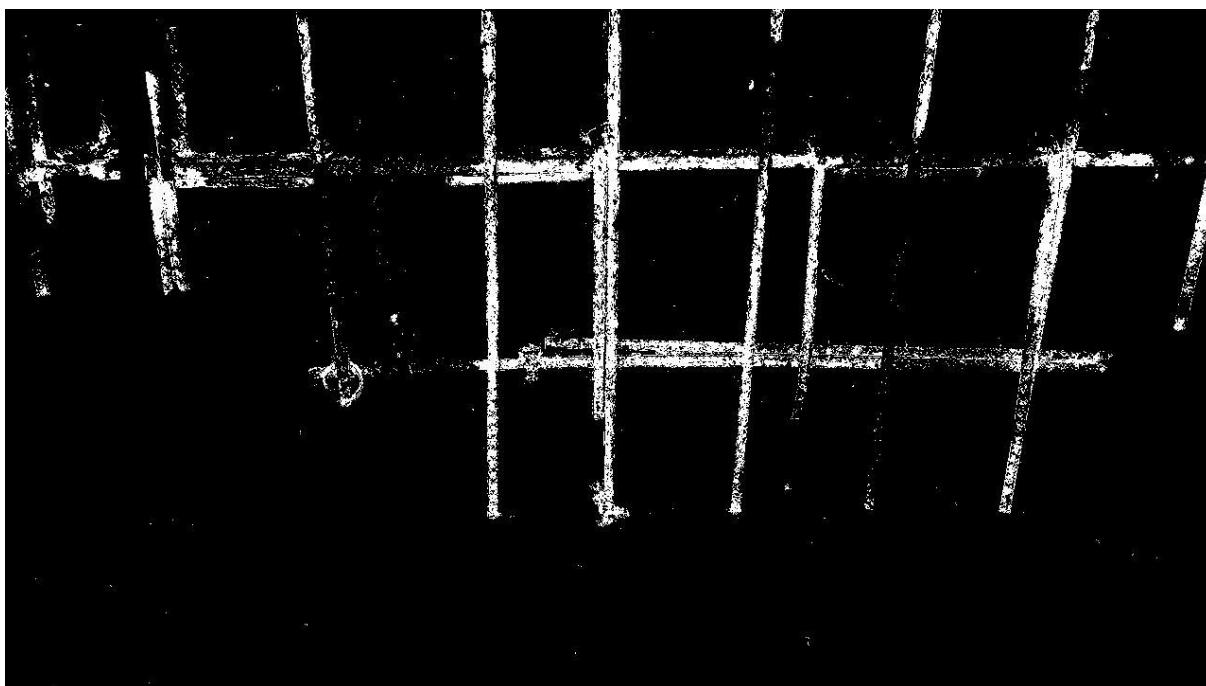


Figura 97 – Exemplo de Aplicação 1 (Corrosão) – Imagem Processada.



Figura 98 – Exemplo de Aplicação 2 (Corrosão) – Imagem Original.



Figura 99 – Exemplo de Aplicação 2 (Corrosão) – Imagem Processada.



Figura 100 – Exemplo de Aplicação 3 (Corrosão) – Imagem Original.

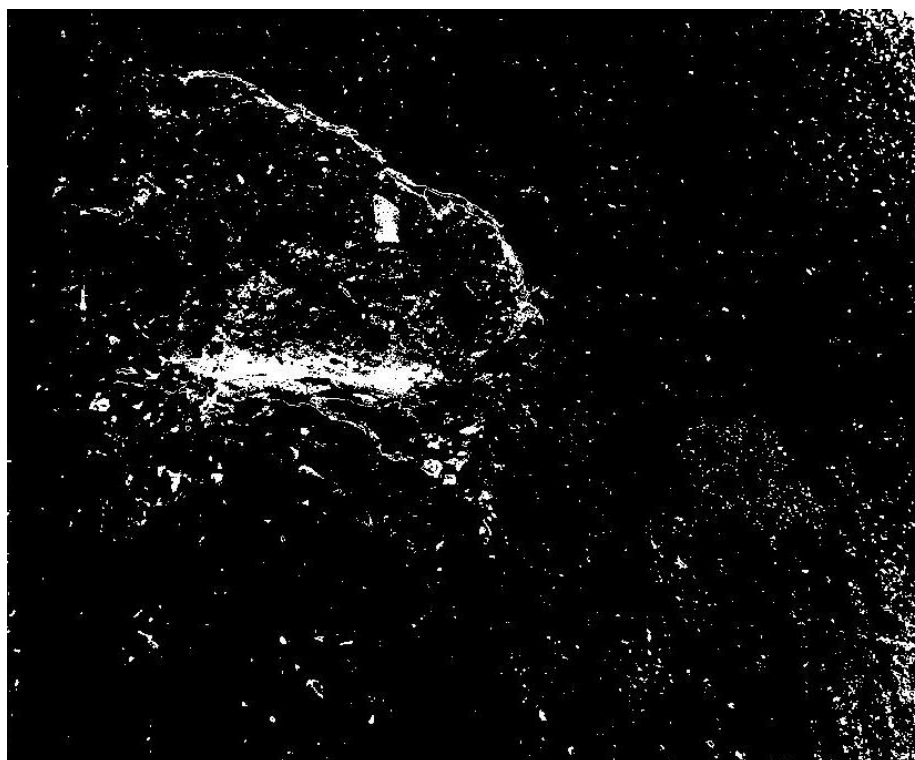


Figura 101 – Exemplo de Aplicação 3 (Corrosão) – Imagem Processada.

CAPÍTULO 5

IDENTIFICAÇÃO DE ANOMALIAS NO FUSTE DE BETÃO DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será demonstrada a aplicação e adaptação de todas as técnicas, ferramentas e metodologias anteriormente apresentadas, à torre de telecomunicações do Monte da Virgem, situada em Vila Nova de Gaia.

5.2 TORRE DO MONTE DA VIRGEM

A torre do Centro Emissor do Monte da Virgem, também denominada atualmente como torre ALTICE, visível na Figura 102, foi construída entre os anos de 1993 e 1995, e é da autoria do Arquiteto António da Silva Botelho e do Engenheiro João Pires da Fonseca.

A torre é a estrutura mais alta do género em Portugal, sendo composta por um fuste em betão armado com cerca de 125m e que apresenta um diâmetro variável de 14,3 m na base até 7,7 m no topo do fuste, medidos pela face exterior. Possui um total de 5 pisos técnicos entre as cotas de 94,9 m e 112 m a partir da sua base, dois cobertos e três ao ar livre, dotados de guarda corpos em todo o seu perímetro. O acesso aos pisos superiores é efetuado por elevador ou escadas metálicas, apoiados numa estrutura metálica, conforme é visível na Figura 103.

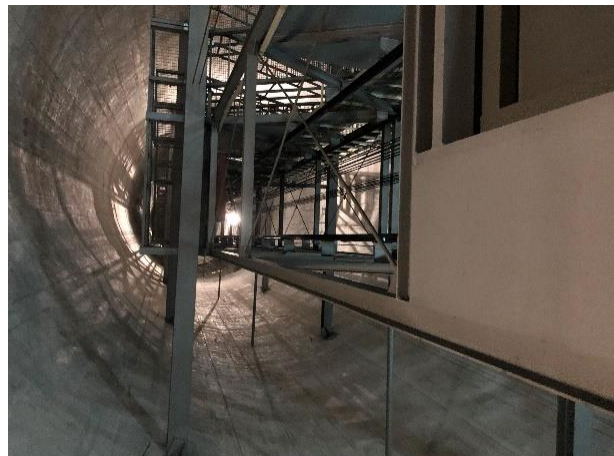
Acima do fuste de betão, encontra-se o mastro metálico que apoia todos os sistemas de telecomunicações da torre (UHF, VHF e FM) com uma altura total de 52m, sendo constituída por dois troços cuja continuidade se estabelece através de ligações aparafusadas dos seus perfis metálicos. Os perfis metálicos são constituídos por perfis do tipo HE e encontram-se travados por diagonais em U. (Pauli, 2016)



Figura 102 - Torre de telecomunicações do Monte da Virgem.



a) Escadas



b) Elevador

Figura 103 – Pormenores do interior do fuste, com ambos os sistemas de acesso.

IDENTIFICAÇÃO DE ANOMALIAS NO FUSTE DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

Inicialmente, encontrava-se prevista a execução de mais dois pisos, conforme é possível observar na Figura 104, aproximadamente entre as cotas 120 m e 125 m, destinados a um restaurante panorâmico e respetivo piso de apoio. A estrutura encontra-se preparada para a construção destes pisos, encontrando-se em estudo a possibilidade de instalação do restaurante panorâmico.

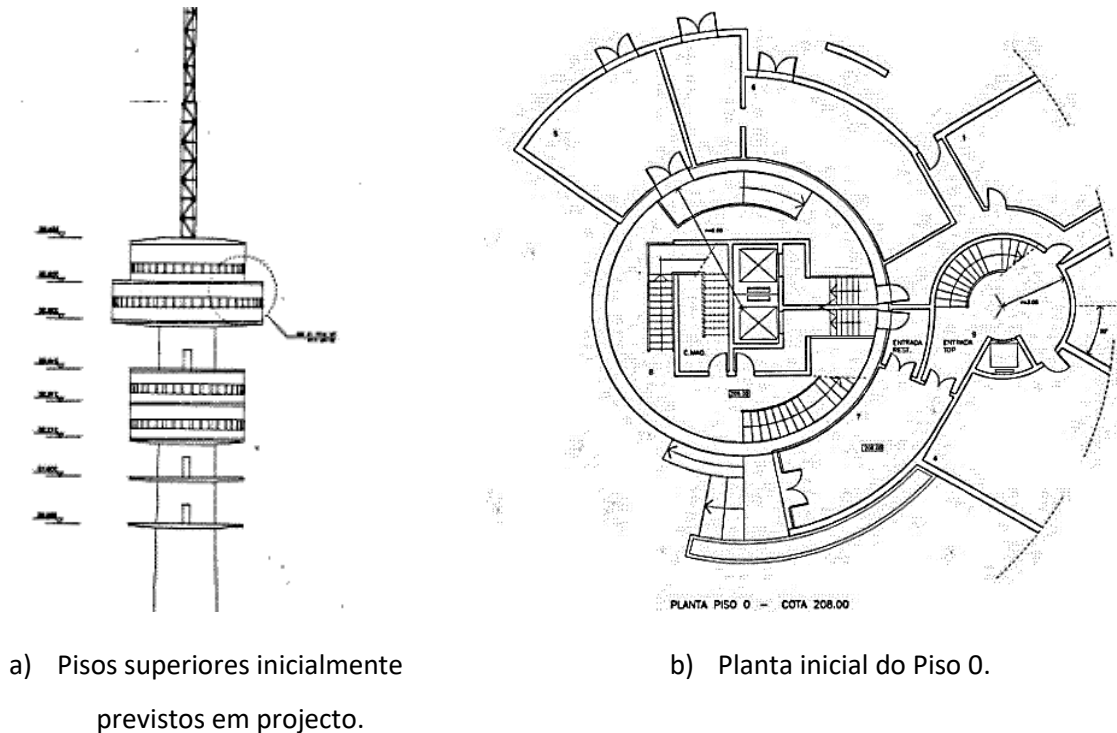


Figura 104 – Projetos iniciais da torre. (Pauli, 2016)

Ao longo dos anos, a torre desempenhou um papel muito importante para a difusão do sinal dos canais de televisão e rádio por diversos operadores, albergando também diversos sistemas de transmissão por Feixes Hertzianos. Atualmente, encontra-se dotado de um emissor de Televisão Digital Terrestre (TDT), que difunde sinais de televisão.

5.3 INSPEÇÕES REALIZADAS EM CAMPO

As inspeções realizadas em campo seguiram a metodologia proposta no Capítulo 3, no entanto, a falta de experiência no manuseamento de drones, as características da torre e as condicionantes do meio no qual se insere a estrutura obrigaram à adaptação de alguns dos seus procedimentos. Apesar de existir um edifício de apoio e de acesso ao interior da torre, a inspeção realizada apenas incide e analisa as patologias/anomalias existentes na envolvente exterior do fuste de betão da torre de telecomunicações do Monte da Virgem.

No total foram realizadas cerca de dez visitas à torre, tendo sido capturadas cerca de 6364 fotografias (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Tabela resumo das visitas e imagens capturadas.

Data (Visita)	Nº de Imagens
13/02/2019	338
24/03/2019	488
30/03/2019	1020
01/06/2019	1417
08/06/2019	790
22/06/2019	295
29/07/2019	800
30/07/2019	259
28/09/2019	447
05/10/2019	510
Total	10 Dias
	6364 Fotos

Como preparação e com vista à familiarização do manuseamento de drones, foram realizados treinos *indoor* com recurso a um equipamento de dimensões reduzidas da marca *DJI* modelo *Tello* (Figura 105), que partilha uma configuração de controlo e manuseamento bastante semelhante ao drone profissional utilizado na torre (*DJI Matrice 600 Pro*).



Figura 105 – DJI Tello. (DJI, 2019a)

Após a realização dos treinos com o *DJI Tello*, foram iniciadas as visitas de inspeção à torre com recurso ao drone profissional.

Em pré-inspeção ao meio circundante à torre, foi possível verificar a existência de diversas árvores (Figura 106) que condicionariam a obtenção de imagens, que aliada às possíveis interferências de sinal oriundas dos equipamentos transmissores existentes na torre levaram a que, de forma preventiva, não fossem aplicadas técnicas de voo automático.



Figura 106 – Árvores junto ao fuste de betão da torre.

Encontrando-se situado numa zona com relativa proximidade ao mar, verifica-se a existência de várias aves marinhas na torre do monte da virgem, tornando-se um fator importante a ter em conta na preparação e planeamento das inspeções com recurso a drones.

As aves, como qualquer outro animal territorial, podem se sentir ameaçados pela presença do drone e realizar ataques que comprometam a segurança do voo. Com vista à prevenção desses mesmos ataques, foram instaladas películas refletoras sobre o drone (Figura 107).



Figura 107 – Película refletora aplicada sobre o drone.

Resultante das características da estrutura em estudo e das condicionantes do local de inspeção, foi definida uma abordagem faseada, compreendida na captação de imagens em intervalos de 30 m de altura. Este tipo de abordagem resulta em 4 fases de captura de imagens, encontrando-se a 1ª fase compreendida entre os 0 m aos 30 m, a 2ª fase dos 30 m aos 60m, a 3ª fase dos 60 m aos 90 m e uma 4ª fase dos 90 m aos 125m (topo do fuste de betão), conforme ilustrado na Figura 108.



Figura 108 – Representação do faseamento adotado na inspeção da torre.

Com vista à obtenção de imagens compatíveis com a posterior aplicação de técnicas de fotogrametria e modelação 3D, ficou também definido um plano de voo caracterizado pela realização de varrimentos ao paramento do fuste de betão, com captação de imagens a cada 20 cm de altura. Na Figura 109 podemos observar as localizações de algumas das capturas de imagem realizadas na torre, onde é possível observar de forma clara o padrão anteriormente referido.

Foram definidas zonas de observação, monitorização e de apoio, bem como zonas de aterragem/descolagem que conferem as condições necessárias para a realização da inspeção, assinalada na Figura 110.

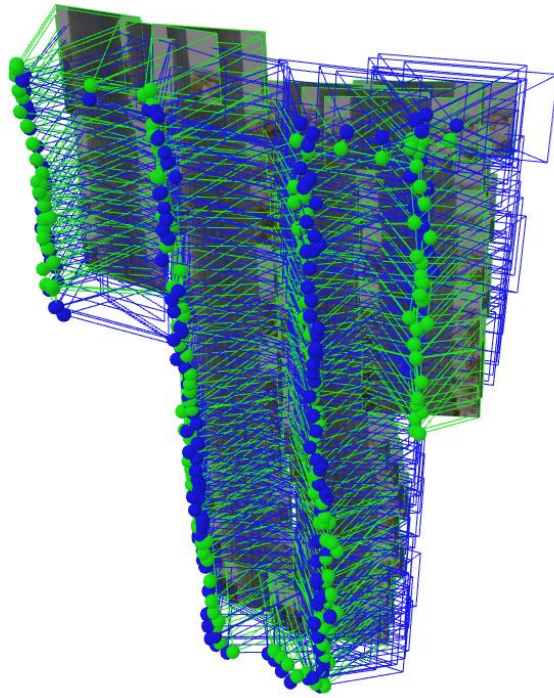


Figura 109 – Localização do drone em algumas das capturas de imagens na torre.



Figura 110 – Zonas de observação (azul) e de aterragem/descolagem (vermelho).

Após a conclusão de todos os trabalhos preparatórios, foram iniciados os trabalhos de captura de imagem seguindo o planeamento previsto. No entanto, contrariamente ao referido na metodologia de inspeção apresentada no Capítulo 3, tratando-se de uma estrutura de grande dimensão em que as campanhas de

inspeção não foram diárias, os trabalhos de captura e de processamento decorreram em simultâneo. Esta mesma simultaneidade de trabalhos, resultou no aperfeiçoamento das técnicas de captura e na constante verificação da conformidade das fotos capturadas (filtros, focagem, etc.).

No decorrer dos trabalhos de inspeção da torre, foi também utilizado um drone de pequenas dimensões da marca e modelo *Parrot Anafi* (Figura 111), equipado com uma câmara térmica, de forma a testar a possibilidade de deteção de zonas afetadas por fenómenos como a delaminação ou colonizações biológicas.



Figura 111 – Drone *Parrot Anafi*. (Parrot, 2019)

No entanto, como podemos observar nas fotografias recolhidas (Figura 112 e Figura 113), não foi possível detetar qualquer tipo de alteração térmica evidente que indicasse com clareza qualquer tipo de anomalia ou patologia. Este resultado seria em certa medida expectável uma vez que a estrutura tem uma elevada inércia térmica e a câmara térmica possui uma baixa resolução no que toca ao perfil de temperaturas identificadas.

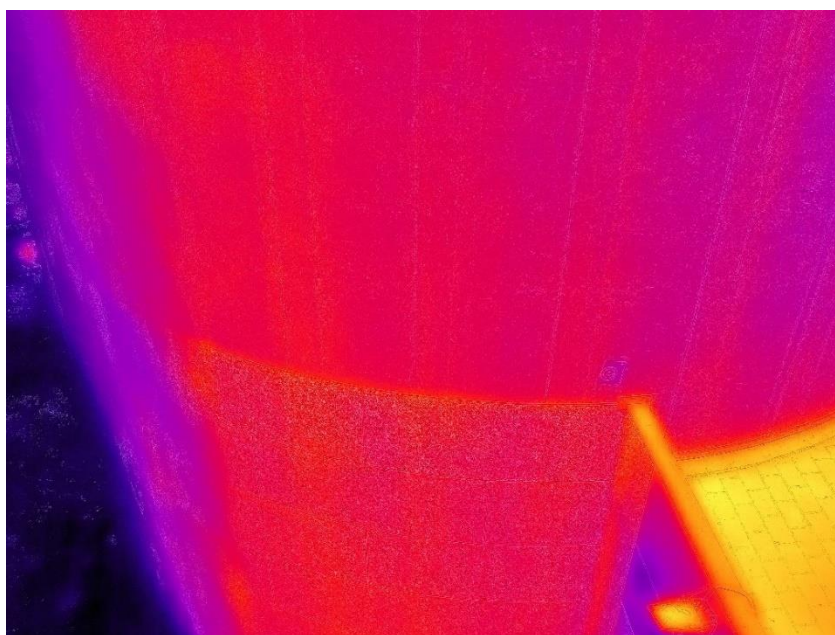


Figura 112 – Imagem térmica do fuste de betão.



Figura 113 – Imagem térmica do fuste de betão.

Apesar do trabalho preparatório de instalação da película refletora no topo do drone (Figura 109), em dias de baixas temperaturas e céu nublado verificaram-se tentativas de ataque pontuais por parte de gaivotas, que naturalmente condicionaram os voos (Figura 114).



Figura 114 – Aves a sobrevoar o drone durante inspeção à torre.

A incapacidade de reflexão solar da película em dias nublados e as baixas temperaturas sentidas, foram os principais motivos desta ocorrência. Nos restantes dias, com a ocorrência de sol e temperaturas altas não foi registado qualquer tipo de condicionamento deste tipo. Verificaram-se também algumas dificuldades pontuais resultantes de interferências de sinal, que condicionavam brevemente a

visualização das imagens a partir do drone, sem nunca perder o contacto. Os fatores meteorológicos foram naturalmente uma condicionante à realização dos trabalhos, tendo ocorrido também o cancelamento de inúmeras visitas devido a chuvas ou aguaceiros. O vento apesar de conferir pontualmente um acréscimo de dificuldade no manuseamento do drone, não apresentou qualquer limitação ao decorrer dos trabalhos.

Após captura das imagens, verificou-se a necessidade de proceder a uma pré-inspeção para a remoção de imagens indesejadas e posteriormente proceder à organização e renomeação em série dos ficheiros, antes de iniciar qualquer tipo de processamento. O programa utilizado foi o *Bulk Rename Utility* (Figura 115) que é capaz de renomear e alterar as definições base de vários ficheiros de imagem em simultâneo.

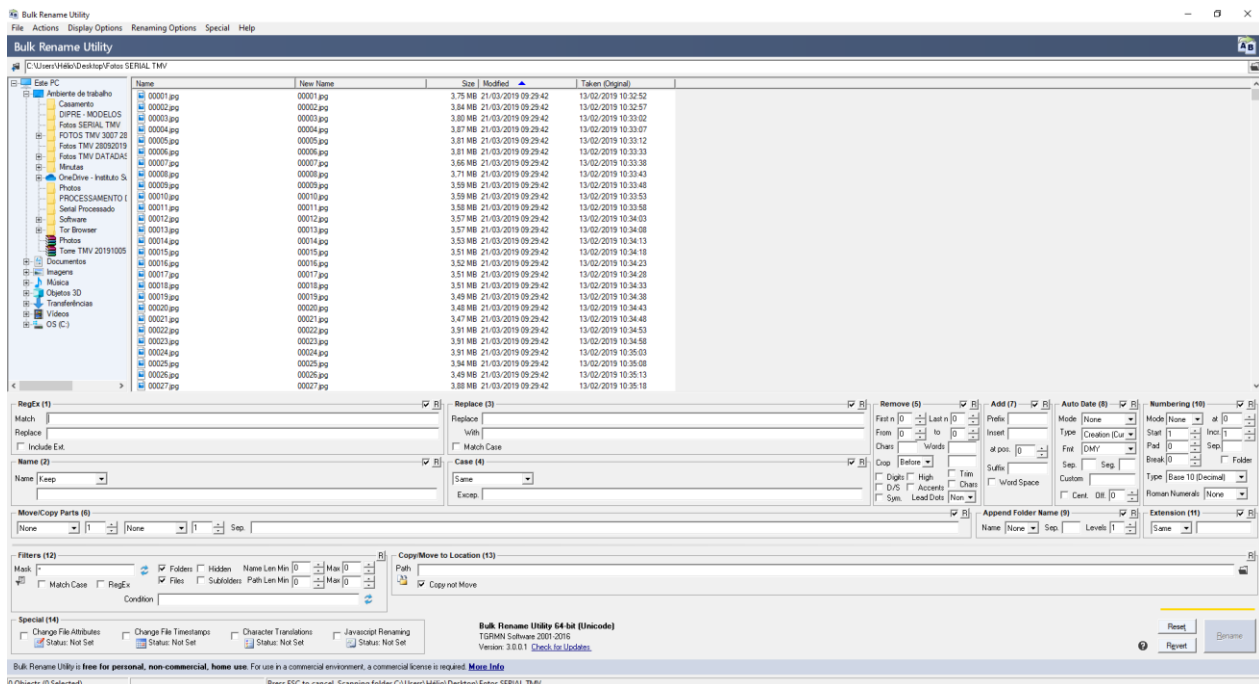


Figura 115 – Interface do software *Bulk Rename Utility*.

Através do software é criada uma numeração em série, após definição de alguns parâmetros, que previne a duplicação de nome nas imagens capturadas, garantindo ainda a conformidade da ordem de seleção no processamento das imagens. A utilização deste método garante a correspondência direta entre a nomeação das imagens originais e processadas, facilitando a análise e verificação da conformidade dos trabalhos.

5.4 FOTOGRAMETRIA APLICADA À TORRE DO MONTE DA VIRGEM

A palavra fotogrametria tem origem nas palavras gregas “*photos*” (luz), “*gamma*” (descrição) e “*metron*” (medir), que segundo Silva (2016), foi definida pela ASP, em 1980, como “*uma técnica que torna possível*

IDENTIFICAÇÃO DE ANOMALIAS NO FUSTE DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

através da fotografia, retirar informações como formas, dimensões e posições de objetos que nela esteja contida”.

A aplicação deste tipo de técnicas confere ao seu utilizador capacidades de medição de elementos através de imagens capturadas, que associado às necessidades de inspeção e deteção de anomalias, confere uma importante ferramenta de controlo e monitorização. A capacidade de realizar um modelo 3D do elemento em estudo, que possibilita a contabilização de dimensões e áreas de influência de uma determinada anomalia, naturalmente aumenta a capacidade de monitorizar ou caracterizar quaisquer elementos.

Após captura, filtragem e organização das imagens capturadas, o número de imagens capturadas ficou limitada a 4426. Apesar do elevado número de imagens, verifica-se que não foi possível concluir a totalidade da superfície do fuste de betão, tendo ficado genericamente concluído o levantamento fotográfico entre 0 m e 60 m de altura, correspondendo a cerca de metade da altura do fuste.

Na Figura 116 podemos observar a interface de modelação do programa *Pix4D*, com a localização de todas as imagens utilizadas.

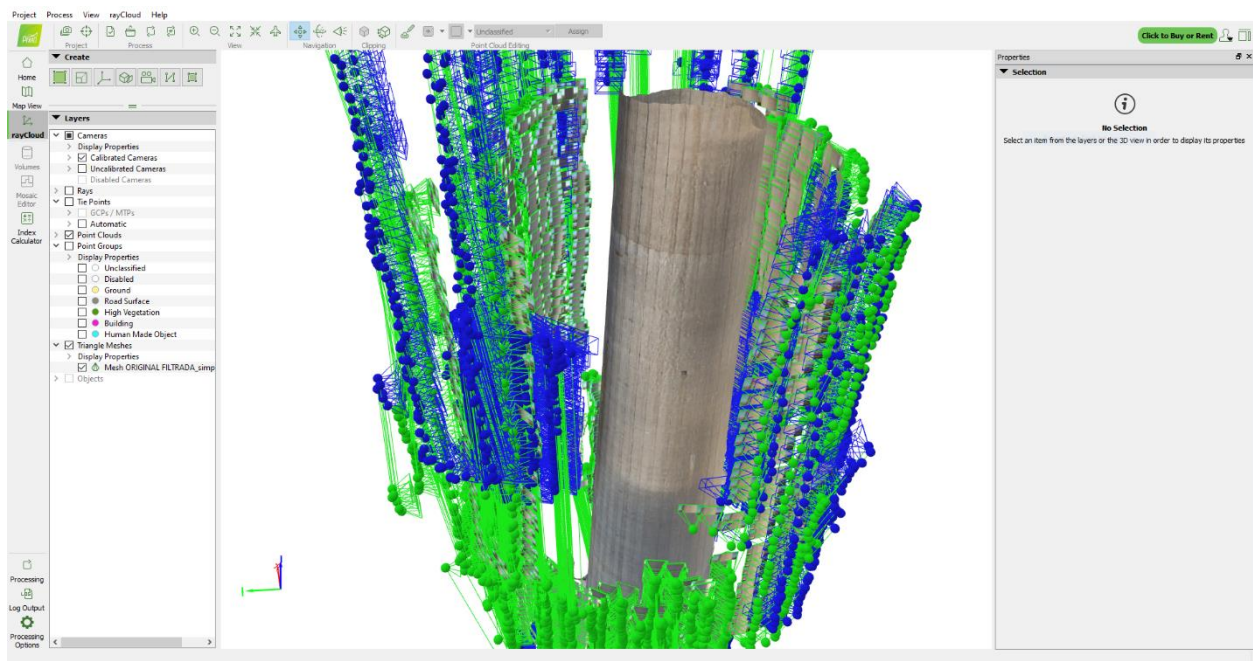


Figura 116 – Interface do software *Pix4D* com a localização das capturas.

O software de modelação 3D *Pix4D* utiliza técnicas de fotogrametria através da utilização de um algoritmo que acede a um conjunto de informações existentes nas propriedades das imagens, como as especificações da câmara, localização para a criação de um modelo virtual. Além dessas informações, o software utiliza os pontos comuns entre imagens de forma a possibilitar a construção do modelo 3D.

Durante o processo de modelação, constatou-se a necessidade de remover algumas imagens capturadas que estariam a realizar algumas anomalias na criação do modelo 3D. Apresentamos nas seguintes Figuras, os resultados obtidos após otimização dos ficheiros.



Figura 117 – Modelação 3D do fuste de betão da torre.



Figura 118 – Modelação 3D do fuste de betão da torre.

Apesar dos ótimos resultados obtidos na generalidade dos 60 m de fuste de betão armado, na Figura 119 é possível verificar a impossibilidade de “fecho” da base do fuste de betão. Este facto justifica-se pela

existência de árvores junto do fuste de betão armado que, como já seria espectável, impossibilitou a modelação nessa zona.



Figura 119 – Modelação 3D do fuste de betão da torre.

Além da capacidade de criar modelos 3D com recurso à aplicação de técnicas de fotogrametria, o software *Pix4D* dispõe de diversas ferramentas que permitem ao utilizador a realização de diversas operações de

IDENTIFICAÇÃO DE ANOMALIAS NO FUSTE DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

análise volumétrica dos elementos. Através dessas mesmas ferramentas, foi possível concluir que foi gerada uma modelação correspondente a 56,18 m do fuste (Figura 120). Além da área de influência da modelação, foi possível analisar as dimensões do elemento, onde se constatou que segundo o software a base do fuste de betão (sobre o edifício) apresenta um diâmetro de 13,42m (Figura 121), enquanto que a à cota dos 56,18 m (Figura 122) o diâmetro será de 9,7m.

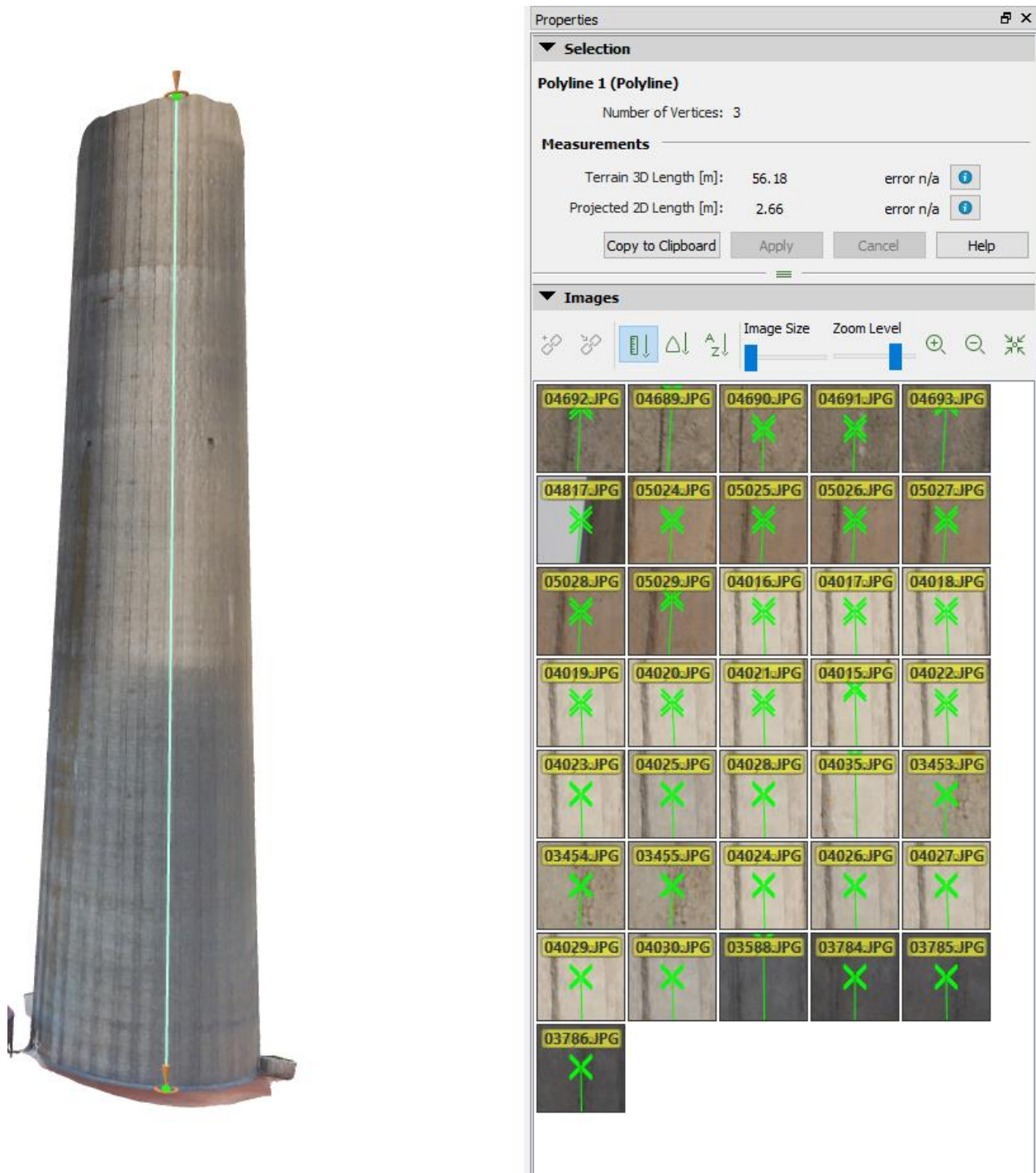


Figura 120 – Análise geométrica da altura com o software Pix4D.

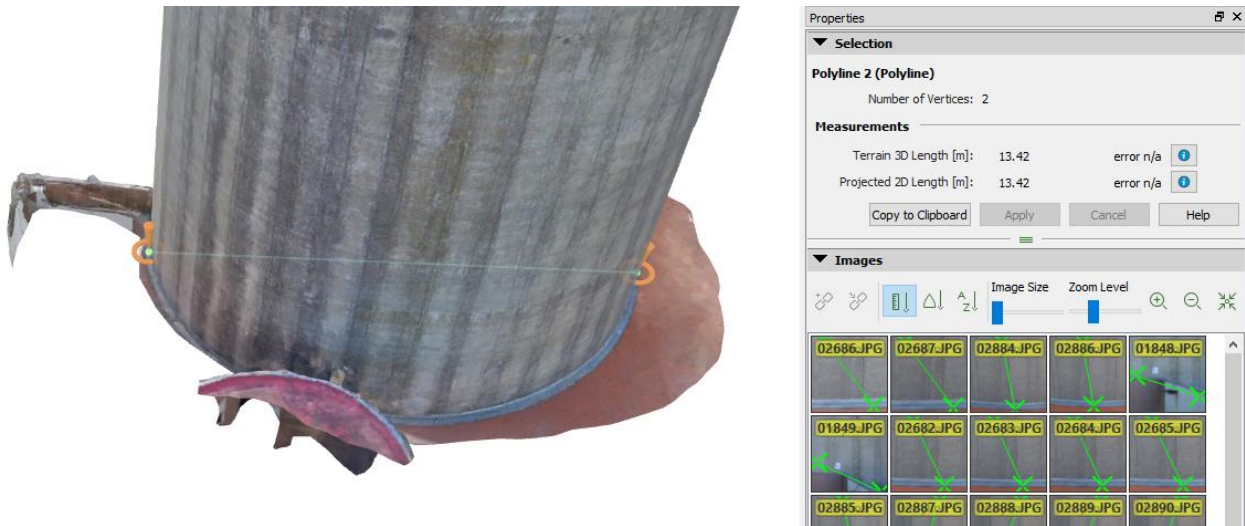


Figura 121 – Análise geométrica do diâmetro da torre com o software Pix4D.

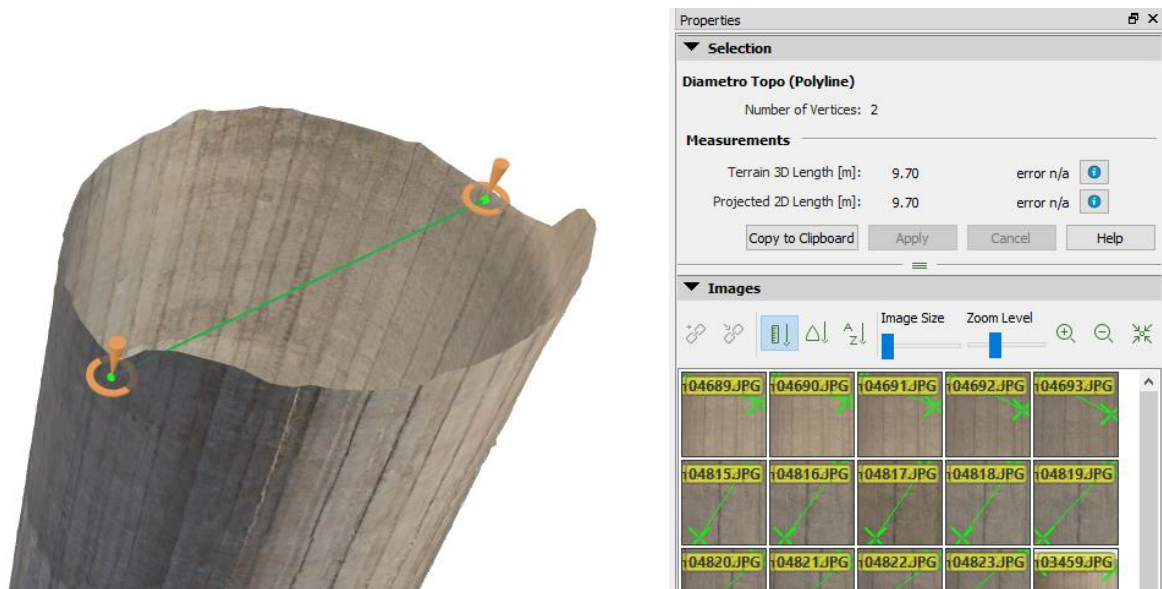


Figura 122 – Análise geométrica do diâmetro da torre com o software Pix4D.

O software permite também o cálculo de áreas e volumes das superfícies através de uma seleção manual dos limites por parte do utilizadores. Através desta ferramenta foi realizada a limitação de uma zona afetada por líquenes (Figura 123) que está voltada para a direção Este, justamente a zona do fuste com menor exposição solar. As ferramentas de fotogrametria anteriormente referidas, mais do que uma análise das áreas afetadas, permitem a monitorização dos elementos em diferentes espaços temporais.

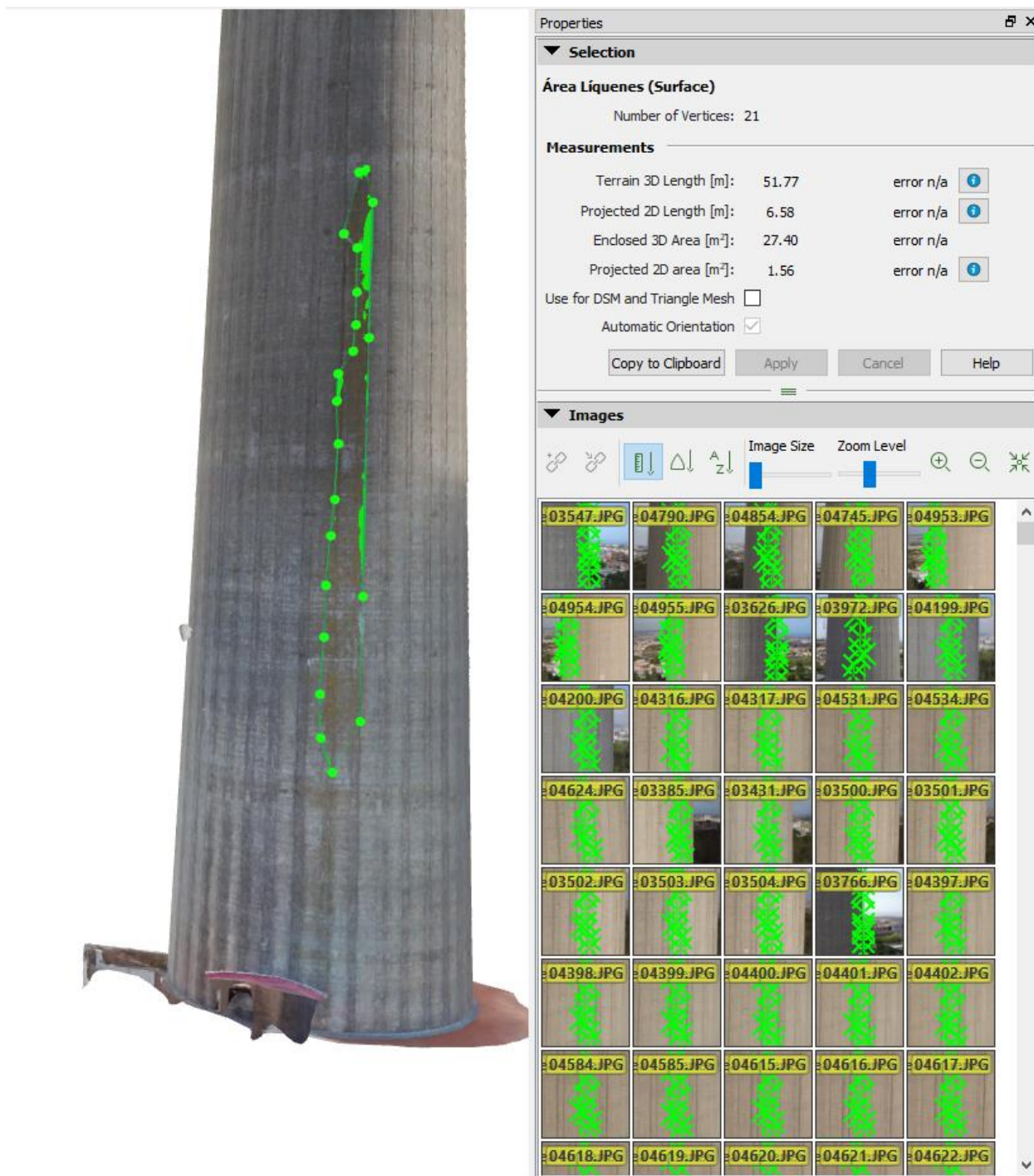


Figura 123 – Análise da área de influência dos líquenes no fuste de betão com o software Pix4D.

5.5 APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE DETEÇÃO DE ANOMALIAS

Após verificação da conformidade do modelo 3D, procedeu-se à aplicação das ferramentas apresentadas no Capítulo 4, de forma a iniciar a deteção semiautomática de anomalias, em particular da fissuração, dos líquenes, das eflorescências e da corrosão de armaduras no fuste de betão da torre.

5.5.1 Ferramenta de detecção de fissuras

Através da aplicação da ferramenta de detecção de fissuras às imagens capturadas da torre, verifica-se que não foram detetadas quaisquer fissuras no fuste de betão armado. O processamento das imagens apenas resultou na detecção de zonas de armaduras expostas (Figura 124).



Figura 124 – Detecção de armaduras expostas.

Verificou-se ainda que a existência de superfícies irregulares, resultantes da cofragem aplicada no processo construtivo do fuste de betão, que em alguns casos foram identificadas pela ferramenta de detecção de fissuras (Figura 125).



Figura 125 – Detecção das irregularidades da superfície do fuste de betão.

5.5.2 Ferramenta de deteção de colonizações biológicas (Líquenes)

Os resultados obtidos na ferramenta de deteção de colonizações biológicas foram bastante satisfatórios, tendo sido possível verificar a eficácia do algoritmo criado, através da correta deteção de diversas zonas do fuste de betão afetadas pela presença de líquenes.

Podemos observar nas Figuras seguintes, alguns exemplos da correta deteção dos líquenes no fuste de betão da torre.



Figura 126 – Aplicação da ferramenta de deteção de Líquenes ao caso de estudo – Imagem Original.



Figura 127 – Aplicação da ferramenta de deteção de Líquenes ao caso de estudo – Imagem Processada.



Figura 128 – Aplicação da ferramenta de detecção de Líquenes ao caso de estudo – Imagem Original.

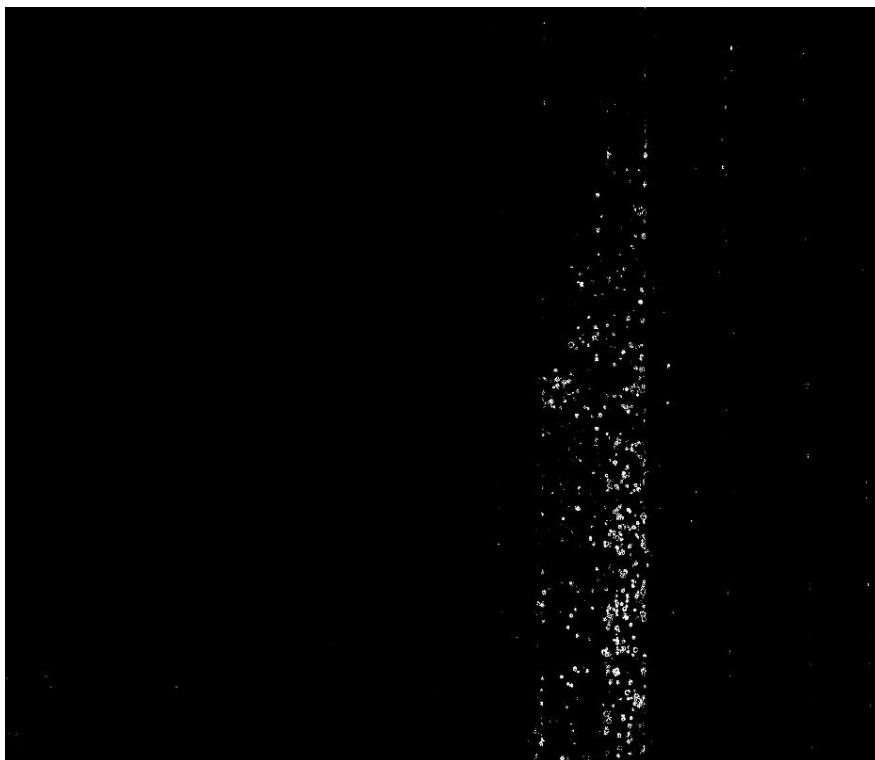


Figura 129 – Aplicação da ferramenta de detecção de Líquenes ao caso de estudo – Imagem Processada.

5.5.3 Ferramenta de detecção de eflorescências

A ferramenta de detecção de eflorescências também demonstrou resultados muito favoráveis. No entanto, devido à diferente incidência solar que altera os parâmetros de cor, foi necessária a realização de dois procedimentos RGB distintos. Regista-se também, que o algoritmo de processamento definiu excessivamente uma parte da zona junto à eflorescência, por proximidade dos parâmetros.

Nas seguintes Figuras são apresentados alguns exemplos de aplicação do algoritmo de detecção de eflorescências no fuste de betão da torre.



Figura 130 – Aplicação da ferramenta de detecção de eflorescências – Imagem Original.

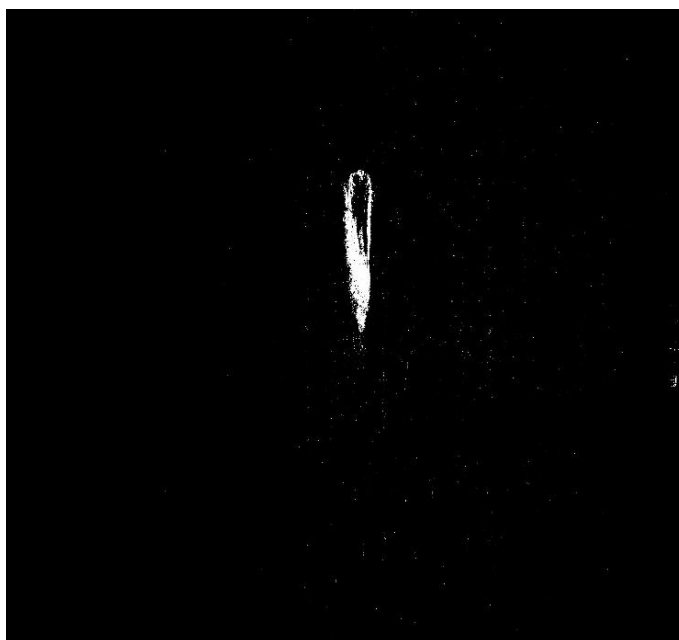


Figura 131 – Aplicação da ferramenta de detecção de eflorescências – Imagem Processada.



Figura 132 – Aplicação da ferramenta de detecção de eflorescências – Imagem Original.



Figura 133 – Aplicação da ferramenta de detecção de eflorescências – Imagem Processada.

5.5.4 Ferramenta de detecção de corrosão e armaduras expostas

Através da aplicação da ferramenta de detecção de corrosão e armaduras expostas, foi possível verificar a existência pontual de armaduras expostas com corrosão. Os fenómenos detetados podem ser caracterizados como pontuais, sem qualquer padrão visível.

Pode observar-se nas Figuras 134 e 135, a deteção de armaduras expostas, com aparentes sinais de corrosão.



Figura 134 – Aplicação da ferramenta de deteção de corrosão – Imagem Original.



Figura 135 – Aplicação da ferramenta de deteção de corrosão – Imagem Processada.

5.5.5 Modelação e visualização 3D

As ferramentas criadas realizam uma filtragem das anomalias, através da criação de um *output* em tons preto e branco. Na aplicação do software de modelação 3D, verifica-se que as características de preto e branco do *output* originam um insuficiente número de pontos coincidentes entre as diferentes imagens, que impossibilitam a criação do modelo.

De forma a permitir a modelação e visualização 3D das imagens, mantendo as características de deteção e definição das anomalias, foi criada uma ferramenta de sobreposição de imagens denominada de *Overlay* (Anexo VI).

Na Figura 136, é possível observar-se a aplicação dessa mesma ferramenta às Figuras 126 e 127, referentes à deteção de líquenes, onde é gerado um conjunto de pontos comuns necessários à modelação, mantendo o conseqüente realce das anomalias.

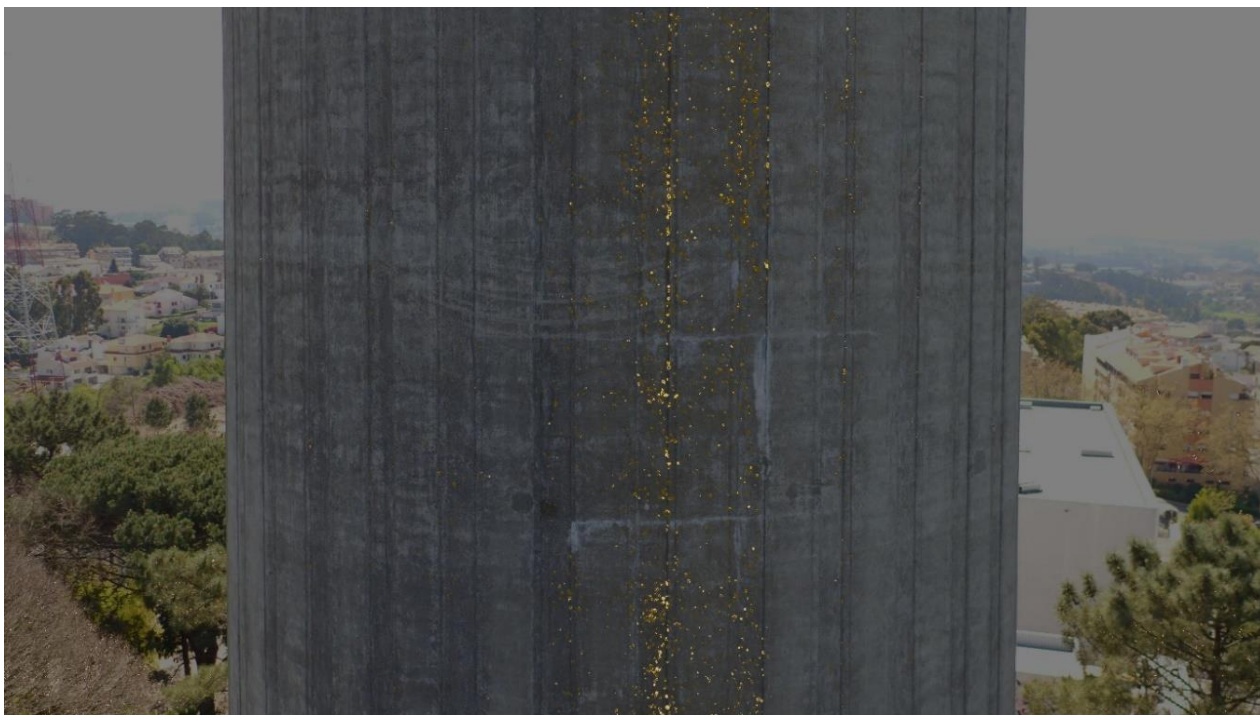


Figura 136 – Aplicação da ferramenta de processamento *Overlay*.

Apesar de terem sido garantidos os pontos de concordância entre imagens, constatou-se que após processamento, as imagens geradas (*output*) não mantinham as informações *EXIF* (Figura 137) dos ficheiros originais. As informações como a localização, características do equipamento de captura, são essenciais para que o software *Pix4D* implemente as técnicas e algoritmos de fotogrametria necessários.

IDENTIFICAÇÃO DE ANOMALIAS NO FUSTE DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

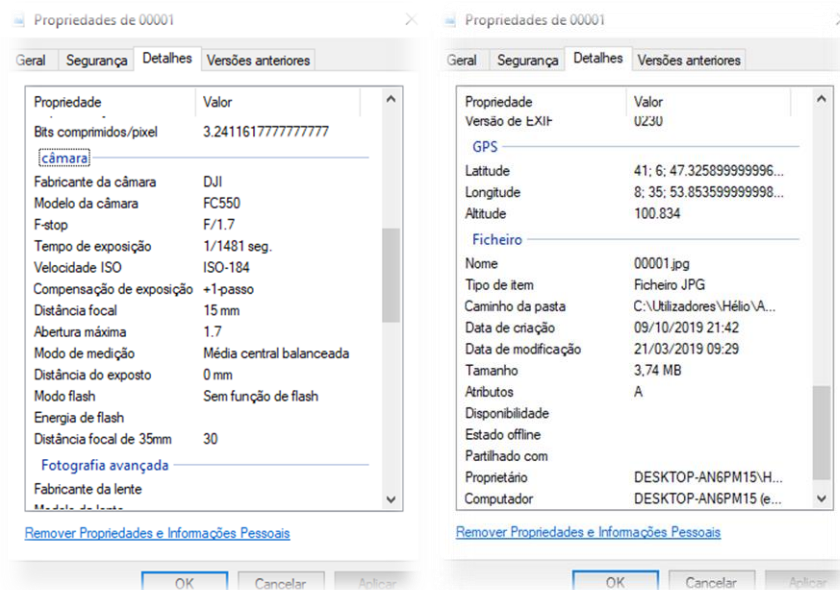


Figura 137 – Informações EXIF.

O programa *Pix4D* dispõe de uma funcionalidade que permite ultrapassar o problema, através da extração e importação dos dados originais EXIF das imagens. Esse mesmo procedimento, prévio ao início da modelação 3D, permite ao utilizador extrair todas as informações originais necessárias para posterior migração dos dados para as imagens processadas. Para a realização deste método é necessário manter uma conformidade de nomeação, de forma a que a informação seja transferida para a imagem correspondente. O ficheiro exportado trata-se de um ficheiro de formato *.txt*, visível na Figura 138.

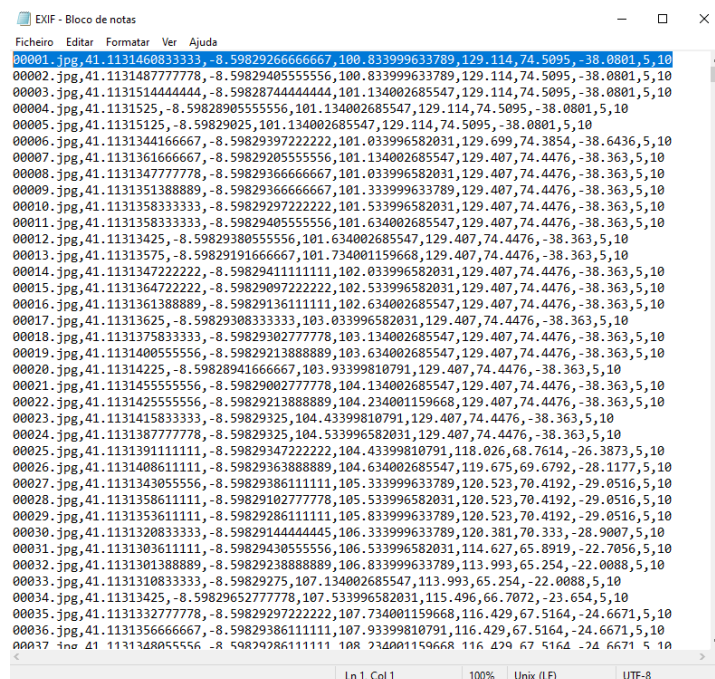


Figura 138 – Ficheiro EXIF.

Uma vez que a existência de anomalias não é generalizada e encontra-se bastante localizada, serão apresentados de seguida os resultados obtidos da modelação 3D das imagens processadas apenas nas zonas onde se verifica essa mesma anomalia.

Na Figura 139, ilustra-se, a título exemplificativo, o resultado obtido a partir da modelação de imagens processadas com o algoritmo de deteção de líquenes no fuste de betão.

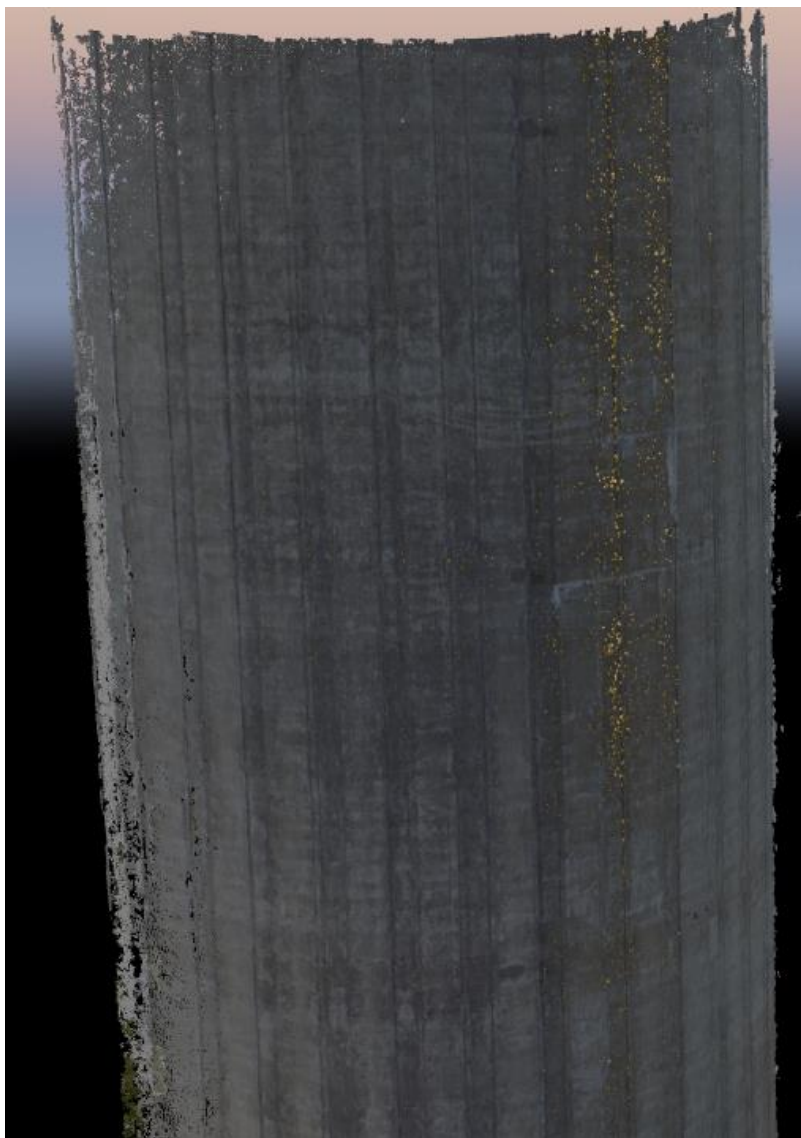


Figura 139 – Modelação 3D das imagens processadas com realce de líquenes no fuste de betão.

Os resultados obtidos na modelação através das imagens processadas pela ferramenta de deteção de líquenes são na generalidade muito satisfatórios, sendo possível identificar claramente o realce das zonas afetadas por líquenes.

Na Figura 140, observar demonstra-se o resultado da aplicação desta mesma ferramenta à modelação de imagens processadas com recurso à ferramenta de deteção de eflorescências.

Podemos concluir, que à semelhança do resultado obtido anteriormente, a eflorescência apresenta um resultado bastante satisfatório, onde é possível observar de forma clara a presença de duas eflorescências distintas nesta zona do fuste de betão.



Figura 140 – Resultado da modelação 3D das imagens processadas de deteção de eflorescências.

Apesar de se ter verificado que a ferramenta de deteção de corrosão funciona, a aplicação das imagens processadas na modelação 3D não apresentou quaisquer resultados dignos de registo. A reduzida dimensão da anomalia e o seu surgimento pontual na estrutura, não conferem as condições necessárias para que possibilite o seu realce no modelo 3D. Não foram também detetadas quaisquer fissuras no fuste de betão, não sendo por isso possível demonstrar a aplicação das ferramentas de modelação 3D.

5.5.6 Análise de resultados

De forma a possibilitar a análise dos resultados obtidos, foi realizada uma inspeção visual à modelação 3D e às imagens capturadas de todo o fuste de betão da torre, onde foi possível detetar anomalias presentes no fuste de betão, que não haviam sido anteriormente referenciadas. Situações como perfurações do

fuste de betão, intervenções pouco cuidadas ou pouco eficientes e erros de conceção da torre são alguns dos exemplos de situações verificadas.

Com vista ao registo, caracterização e análise das anomalias, foi realizado o preenchimento de um formulário (Figuras 141, 142 e 143), onde foram registadas todas as informações dessas anomalias.

REGISTO DE ANOMALIAS								
<p>Ciente: Altice Portugal Alvo da Inspeção: Torre de Telecomunicações do Monte da Virgem (Fuste de Betão) Morada: Rua Conceição Fernandes n.º 755, 4434-510 Vila Nova de Gaia Técnico: Hélio Teixeira</p>								
Nr.	Anomalia	Prováveis causas (Origem)	Fotografia		Localização Aproximada da Anomalia			Observações
			Nome	Data	Latitude	Longitude	Altitude	
1	Eflorescências	Ambiente agressivo e deficiente intervenção de reparação.	75	13/02/2019	41.113151	-8.598278	116.134002685547	
2	Ancoragem intervencionada	Resultante do processo construtivo	173	13/02/2019	41.1133152777778	-8.59840541666667	112.292999267578	
3	Eflorescências	Resultante do ambiente agressivo, próximo do mar.	197	13/02/2019	41.1133133055556	-8.59840511111111	118.892997741699	
4	Anteriores reparações	Resultante de anteriores intervenções correctivas	210	13/02/2019	41.1133205277778	-8.59841063888889	123.193000793457	
5	Armadura exposta	Ambiente agressivo.	284	13/02/2019	41.1131607777778	-8.5986425	120.45899633789	Área afectada bastante reduzida.
6	Eflorescências	Ambiente agressivo e deficiente intervenção de reparação.	299	13/02/2019	41.1131600555556	-8.59864352777778	125.45899633789	
7	Eflorescências	Ambiente agressivo e deficiente intervenção de reparação.	876	23/03/2019	41.1131676111111	-8.59824591666667	134.061996459961	
8	Anteriores reparações	Resultante de anteriores intervenções correctivas, ou do processo construtivo.	1100	23/03/2019	41.1133079722222	-8.59834008333333	131.792999267578	
9	Eflorescências	Ambiente agressivo.	01129 e 01252	23/03/2019	41.1133075833333	-8.59834091666667	138.593002319336	
10	Elemento de ancoragem no fuste	Resultante do processo construtivo	1306	23/03/2019	41.1132736944444	-8.59843225	134.49299621582	Verifica-se a existência de um elemento contido no betão, provavelmente de apoio à amarração.
11	Anteriores reparações	Resultante de anteriores intervenções correctivas, ou do processo construtivo.	1490	30/03/2019	41.1133261666667	-8.59852772222222	186.923004150391	
12	Armadura exposta	Ambiente agressivo.	1641	30/03/2019	41.1132846666667	-8.59856458333333	189.416000366211	
13	Anterior reparação	Resultante de anteriores intervenções correctivas, ou do processo construtivo.	1641	30/03/2019	41.1132846666667	-8.59856458333333	189.416000366211	
14	Eflorescência	Ambiente agressivo e deficiente intervenção de reparação.	1943	01/06/2019	41.1131364722222	-8.59827691666667	183.595001220703	
15	Eflorescência	Ambiente agressivo e deficiente intervenção de reparação.	3118	22/06/2019	41.1132124166667	-8.59829069444445	218.207992553711	
16	Ancoragens por selar e Liqueens	Perfurações no fuste de betão por regularizar decorrentes do processo construtivo.	3365	29/07/2019	41.1131387222222	-8.59828911111111	222.445007324219	
17	Anterior reparação com eflorescência	Ambiente agressivo e deficiente intervenção de reparação.	3395	29/07/2019	41.1131398611111	-8.59829072222222	202.544998168945	
18	Armaduras Expostas e anteriores reparações	Ambiente agressivo.	3466	29/07/2019	41.1130828611111	-8.59834180555556	226.145004272461	
19	Anterior reparação	Resultante de anteriores intervenções correctivas, ou do processo construtivo.	3421	29/07/2019	41.113113	-8.598306	201.345	
20	Armadura Exposta	Ambiente agressivo.	3478	29/07/2019	41.113080	-8.598341	218.745	

Figura 141 – Registo de anomalias.

IDENTIFICAÇÃO DE ANOMALIAS NO FUSTE DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

REGISTO DE ANOMALIAS

Ciente: Altice Portugal

Alvo da Inspeção: Torre de Telecomunicações do Monte da Virgem (Fuste de Betão)

Morada: Rua Conceição Fernandes n.º 755, 4434-510 Vila Nova de Gaia

Técnico: Hélio Teixeira



Nr.	Anomalia	Prováveis causas (Origem)	Localização Aproximada da Anomalia					Observações
			Fotografia		Coordenadas GPS			
			Nome	Data	Latitude	Longitude	Altitude	
21	Anterior reparação com eflorescência	Ambiente agressivo e deficiente intervenção de reparação.	3509	29/07/2019	41.113080	8.598337	207.545	
22	Anterior reparação	Resultante de anteriores intervenções correctivas, ou do processo construtivo.	3518	29/07/2019	41.1130797777778	-8.59833713888889	207.544998168945	
23	Anterior reparação com eflorescência	Ambiente agressivo e deficiente intervenção de reparação.	3548	29/07/2019	41.1130805555556	-8.5983447777778	203.945007324219	
24	Armaduras Expostas e anteriores reparações	Ambiente agressivo.	3573	29/07/2019	41.1132466388889	-8.59824269444445	215.934005737305	
25	Anterior reparação	Resultante de anteriores intervenções correctivas, ou do processo construtivo.	3601	29/07/2019	41.1132748888889	-8.59827194444444	216.833999633789	
26	Anterior reparação com eflorescência	Ambiente agressivo e deficiente intervenção de reparação.	3628	29/07/2019	41.1132714444444	-8.5982725	200.833999633789	
27	Armadura Exposta	Ambiente agressivo.	3711	29/07/2019	41.1133065277778	-8.59835416666667	219.333999633789	
28	Anterior reparação com eflorescência	Ambiente agressivo e deficiente intervenção de reparação.	3744	29/07/2019	41.1133035555556	-8.59835861111111	195.533996582031	
29	Anterior reparação	Resultante de anteriores intervenções correctivas, ou do processo construtivo.	3868	29/07/2019	41.1133032222222	-8.59839575	183.14599609375	
30	Anterior reparação com eflorescência e Armadura exposta	Ambiente agressivo e deficiente intervenção de reparação.	3880	29/07/2019	41.1133139166667	-8.59836025	210.945999145508	
31	Armadura Exposta	Ambiente agressivo.	3884	29/07/2019	41.1133040833333	-8.59839425	196.445999145508	
32	Anterior reparação e Armadura exposta	Ambiente agressivo.	3888	29/07/2019	41.1133045	-8.59839166666667	201.64599609375	
33	Anterior reparação	Resultante de anteriores intervenções correctivas, ou do processo construtivo.	3895	29/07/2019	41.1133049722222	-8.59839266666667	208.546005249023	
34	Líquenes	Depósito de matéria orgânica pelo ar na superfície rugosa do betão e seu posterior desenvolvimento.	3927	29/07/2019	41.1133212222222	-8.59843497222222	196.845993041992	
35	Anterior reparação	Resultante de anteriores intervenções correctivas, ou do processo construtivo.	3953	29/07/2019	41.1133756666667	-8.59850155555556	183.063995361328	
36	Anterior reparação	Resultante de anteriores intervenções correctivas, ou do processo construtivo.	3970	29/07/2019	41.1133546944444	-8.59850627777778	190.863998413086	
37	Líquenes e anterior reparação	Depósito de matéria orgânica pelo ar na superfície rugosa do betão e seu posterior desenvolvimento.	4004	29/07/2019	41.1133472222222	-8.59851869444445	205.464004516602	
38	Armadura exposta e líquenes	Ambiente agressivo. Depósito de matéria orgânica pelo ar na superfície rugosa do betão e seu posterior desenvolvimento.	4008	29/07/2019	41.1133458888889	-8.59851783333333	208.264007568359	
39	Anterior reparação	Resultante de anteriores intervenções correctivas, ou do processo construtivo.	4120	29/07/2019	41.1133041666667	-8.59859386111111	194.764007568359	
40	Anterior reparação	Resultante de anteriores intervenções correctivas, ou do processo construtivo.	4127	29/07/2019	41.1133036944444	-8.59859266666667	201.063995361328	

Figura 142 – Registo de anomalias.

REGISTO DE ANOMALIAS

Ciente: Altice Portugal
Alvo da Inspeção: Torre de Telecomunicações do Monte da Virgem (Fuste de Betão)
Morada: Rua Conceição Fernandes n.º 755, 4434-510 Vila Nova de Gaia
Técnico: Hélio Teixeira

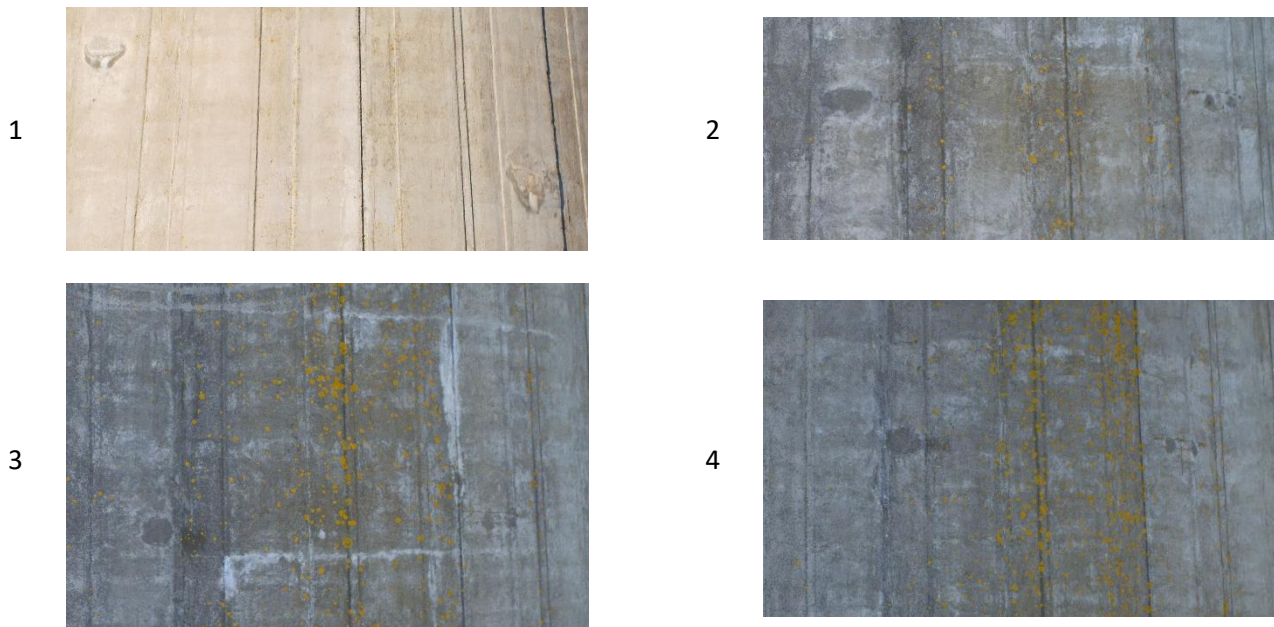


Nr.	Anomalia	Prováveis causas (Origem)	Localização Aproximada da Anomalia					Observações
			Fotografia		Coordenadas GPS			
			Nome	Data	Latitude	Longitude	Altitude	
41	Anterior reparação	Resultante de anteriores intervenções correctivas, ou do processo construtivo.	4136	29/07/2019	41.1133021388889	-8.59859380555556	207.464004516602	
42	Armadura exposta e anterior reparação	Ambiente agressivo.	4249	28/09/2019	41.1131423055556	-8.59834158333333	177.195007324219	
43	Armadura exposta	Ambiente agressivo.	4294	28/09/2019	41.11311475	-8.59835377777778	169.994995117188	
44	Superfície rugosa	Erro humano de construção.	4680	05/10/2019	41.1130726388889	-8.59842541666667	192.029006958008	
45	Armadura exposta	Ambiente agressivo.	4920	05/10/2019	41.11310625	-8.59857672222222	196.397003173828	
46	Eflorescências	Ambiente agressivo.	4966	05/10/2019	41.1131111111111	-8.59864730555556	177.462997436523	

Figura 143 – Registo de anomalias.

Apresentamos de seguida a Tabela 5.2, onde podemos observar o registo fotográfico das anomalias anteriormente descritas e que foram alvo de análise.

Tabela 5.2 – Registo fotográfico de anomalias.



IDENTIFICAÇÃO DE ANOMALIAS NO FUSTE DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

5



6



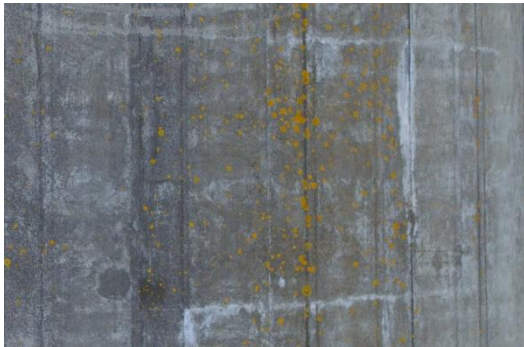
7



8



9



10



11



12

e

13



14



15



16



17



18



19



20



21



22



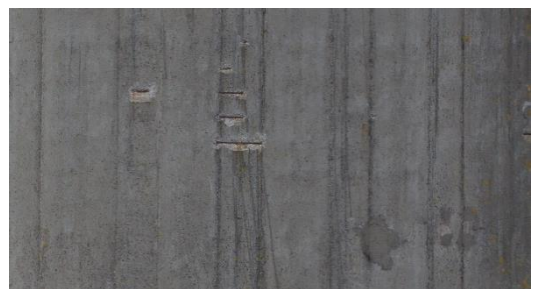
23



24



25



IDENTIFICAÇÃO DE ANOMALIAS NO FUSTE DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

26



27



28



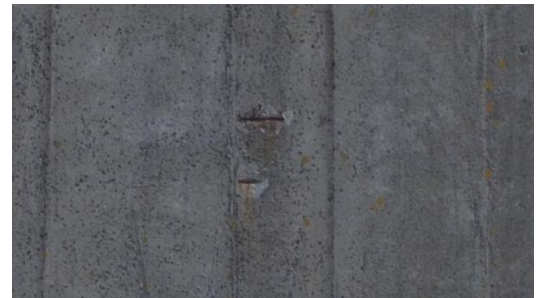
29



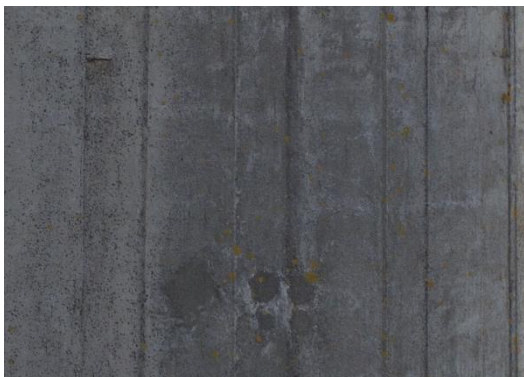
30



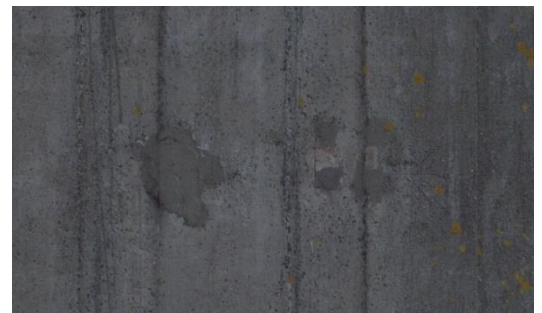
31



32



33



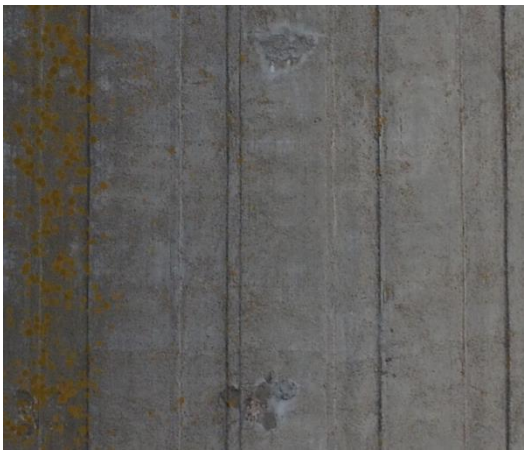
34



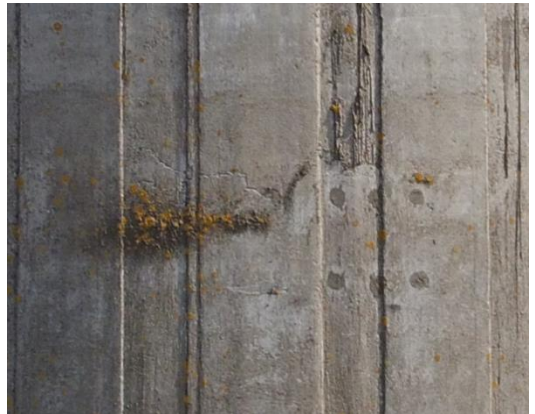
35



36



37



38



39



40



41



IDENTIFICAÇÃO DE ANOMALIAS NO FUSTE DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

42



43



44



45



46



CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A presente dissertação abordou a temática das patologias e anomalias em elementos de betão armado, o desenvolvimento de ferramentas de deteção semiautomáticas e metodologias de intervenção para a inspeção a estruturas de betão armado com recurso a VANTs, com a sua aplicação na torre de telecomunicações do Monte da Virgem.

O processo de desenvolvimento da metodologia de inspeção (Capítulo 3), foi realizado de forma faseada e no decorrer das atividades de inspeção, encontrando-se baseada em técnicas de aprendizagem por tentativa e erro.

O desenvolvimento das ferramentas de deteção semiautomática foi o processo de maior complexidade de toda a dissertação, decorrente da falta de conhecimentos da linguagem de programação do *Matlab* e a inexistência de ferramentas pré-definidas de apoio à deteção de anomalias. Todos esses fatores, resultaram num processo moroso de pesquisa, análise e conseqüente criação dessas mesmas ferramentas. Apesar disso, foi possível demonstrar e concluir que os algoritmos criados permitem a deteção semiautomática das anomalias com uma elevada taxa de sucesso.

O processo de inspeção da torre, referenciado no Capítulo 5, decorreu sem quaisquer problemas, existindo apenas o registo de pontuais condicionamentos de planeamento e inspeção como condições climatéricas adversas e pontuais ataques de aves.

Apesar de terem sido realizadas diversas visitas à torre para a captação de imagens, a falta de conhecimento prático no manuseamento de drones e a utilização de técnicas conservadoras para a captação das imagens, originaram um natural constrangimento ao ritmo dos trabalhos, tendo resultado num aumento substancial do tempo de inspeção e causando a impossibilidade de conclusão dos trabalhos da totalidade do fuste de betão.

A aplicação das ferramentas à torre do monte da virgem decorreu com sucesso, no entanto, alguns fatores externos variáveis como as diferenças de luminosidade e diferentes incidências solares, implicaram a necessidade de rever mais de que uma vez os parâmetros RGB para a deteção das anomalias.

Após análise dos elementos capturados e processados, pode-se concluir que a torre apresenta um bom estado geral de conservação, apenas com necessidade de intervenções pontuais. Através da aplicação das ferramentas anteriormente criadas, foi possível detetar a presença de algumas anomalias no fuste de betão, como é o caso de líquenes, eflorescências e corrosão das armaduras de aço com inerente destacamento de betão.

Foi também realizada uma inspeção visual ao registo fotográfico da torre, juntamente com a pesquisa na modelação 3D, onde foi possível constatar a existência de alguns erros de construção como a ocorrência de agregados indevidamente acoplados ao fuste de betão, zonas de amarração expostas e anteriores intervenções pouco cuidadas.

Após a análise do decorrer de todo o processo e com base nos resultados obtidos, foi possível confirmar que a utilização de VANTs na inspeção de edificações e a utilização de software para processamento de imagens, são atividades que conferem ao utilizador todas as ferramentas necessárias para a averiguação do estado geral de qualquer edificação ou obra de arte.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como desenvolvimentos futuros da presente dissertação, deverá ser realizada a restante inspeção da torre entre as cotas 60 m e 125 m, de forma a permitir o encerramento do estudo e a possibilitar o aperfeiçoamento das metodologias propostas. Uma vez que ainda se verificam algumas falsas deteções e existe ainda alguma complexidade na definição de alguns parâmetros, deverão também ser aperfeiçoados os algoritmos, por exemplo com base em algoritmos de aprendizagem supervisionada (*Machine Learning*).

De forma a possibilitar uma melhor e mais breve captura de imagens, ou obter um maior detalhe e definição na modelação, deverão ser implementadas novas medidas de voo automático com recurso a software especializado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A

ALMEIDA, Sara Freitas Novais Ferreira de - Sistematização dos padrões de fissuração correntes em edifícios. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2015. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

ALVES, Carina - *Jornal Nordeste*. [Online] 29 de Maio de 2019. Disponível em <http://jornalnordeste.com/noticia/estado-das-pontes-de-mirandela-esta-ser-alvo-de-inspeccao>.

ANAC - Voa na boa. [Online] 2019. Disponível em <https://voanabo.pt/>.

ANDERSEN, Pernille - Concrete Beam Cracking. [registo vídeo] 03 de Outubro de 2016. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=MHude3wLxcE>.

B

BRIDGEBYBRIDGE - Equipamentos. [Online] 2019. Disponível em <http://www.bridgebybridge.com/pt-PT/catalogo/248/equipamentos>.

BRITO, Jorge de - Patologias em Construções em Betão, Dezembro de 2001. Apontamentos da Cadeira de Inspeção e Reabilitação de Construções em Betão.

Bulk Rename Utility - Software "*Bulk Rename Utility*". [Online] 2019. Disponível em <https://www.bulkrenameutility.co.uk/>.

BUZZO, Lucas - História dos Drones: do início aos dias de hoje. *O Drones*. [Online] 2015. Disponível em <https://odrones.com.br/historia-dos-drones/>.

C

CASSIANO, Roberto Jesus - Reabilitação do Entrepasto Frigorífico do Funchal. Madeira: Universidade da Madeira, 2017. Dissertação de Mestrado.

CHIOTE, Diogo - Requisitos Operacionais para os Veículos Aéreos Não Tripulados (UAV) na Guarda Nacional Republicana. Lisboa: 2012. Relatório Científico Final do Trabalho de Investigação Aplicada.

COSTA, António - Patologia do Betão armado [Online]: Diploma de Formação Avançada em Engenharia de Estruturas: Instituto Superior Técnico, 2011a. Disponível em <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/EBAP/ReabReforcoPontes/modulo2-1.pdf>.

COSTA, António - Corrosão do aço e deterioração do betão [Online]: Apontamentos de aula de Reabilitação e Reforço de Estruturas: Instituto Superior Técnico, 2011b. Disponível em http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/RREst/Aulas_Apresentacoes/Aula_07.1_Tipos_deterioracao.pdf.

CROIX, Félix du Temple de la - Bibliografia de Félix du Temple de la Croix. *Wikipédia*. [Online] 1857. Disponível em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1857_patent_drawing_of_Du_Temple_monoplane.png.

D

DJI - Website oficial da DJI. [Online] 2019a. Disponível em <https://www.dji.com/pt>.

DJI - Manual do utilizador: Crystal Sky. 2019b.

DJI - Manual do utilizador: DJI MATRICE 600. 2019c.

DJI - Manual do utilizador: Zenmuse X5. 2019d.

DRE - *Diário da República Eletrónico*. [Online] 2019. Disponível em <https://dre.pt/>.

DUQUE, Luis - UAV-Based Bridge Inspection and Computational. South Dakota: South Dakota University, 2017. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

F

FCUP - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto - Fotogrametria. [Online] 2019. Disponível em http://www.fc.up.pt/lic_eg/fotogrametria.html.

FARIA, Diogo - Análise e Processamento de Imagem. *Análise e Processamento de Imagem*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010. Mestrado em Engenharia Biomédica - Trabalho Prático.

FERREIRA, Joana Alexandra de Almeida - Técnicas de Diagnóstico de Patologias em Edifícios. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

FERREIRA, Pablo Ramon Rodrigues - Análise da Indução da Corrosão por Cloretos em Concretos Armados com Adição de Resíduos de Tijolo Moído a Partir de Ensaio Acelerados. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2015. Tese de Mestrado.

FILIFE, Mário João do Carmo - A Fotogrametria Aérea como Ferramenta na Restituição de Paisagens Submersas por Albufeiras: O Caso da Barragem da Venda Nova. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2013. Tese de Mestrado em Engenharia Geográfica.

G

GILLINS, Matthew N - Unmanned Aircraft Systems for Bridge Inspection: Testing and Developing End-to-End Operational Workflow. Oregon: Oregon State University, 2017. Tese de Mestrado.

GOMES, Isabela Soraia Costa - Deterioração do Betão: Técnicas de Avaliação e Prevenção. Coimbra: Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2016. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

GOOGLE - Google Maps. [Online] 2019a. Disponível em <https://www.google.pt/maps>.

GOOGLE - Google Trends. [Online] 2019b. Disponível em <https://trends.google.pt/>.

GRAÇA, João Pedro de Oliveira. 2017. Inspeção de Um Conjunto de Pontes: Contribuição para o Sistema de Gestão Municipal. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2017. Tese de Mestrado em Reabilitação de Edifícios.

H

HALL, Susan J. 2015. *BASIC BIOMECHANICS*. s.l. : EDITORA GUANABARA KOOGAN LTDA, 2015.

HENRIQUES, Maria João; ROQUE, Dora - Unmanned Aerial Vehicles (UAV) as a Support to Visual Inspections of Concrete Dams. 2015. Publicação do LNEC.

HENRIQUES, Sara - Procedimentos de Reparação de Estruturas de Betão: Normas e Recomendações. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2016. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

HERING, Achim - Wikimedia Commons. [Online] 2012. Disponível em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2ndary_efflorescence_09.jpg.

HEROICRELIS - V-1 "BUZZ BOMB" CUT-AWAYS. [Online] 2017. Disponível em <http://heroicrelics.org/info/v-1/v-1-cut-away.html>.

HHelena - Depositphotos. [Online] 2014. Disponível em <https://pt.depositphotos.com/44642949/stock-photo-xantoria-lichen-on-rock.html>.

HØGLUND, Sondre - Autonomous Inspection of Wind Turbines. June of 2014. Master of Science in Engineering Cybernetics.

I

ISEP - Moodle ISEP. [Online] 2019. Disponível em <https://moodle.isep.ipp.pt/>.

L

LOPES, Beatriz Simões Guerreiro Monteiro - Protecção Superficial do Betão: Influência da base no comportamento de produtos de impregnação. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2011. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

LYSIAK - Wikipédia. [Online] 1944. Disponível em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bundesarchiv_Bild_146-1975-117-26,_Marschflugk%C3%B6rper_V1_vor_Start.jpg.

M

Mapa da Obra - [Online] 2019. Disponível em <https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/eflorescencia/>.

MARSH, Yon - *Alamy*. [Online] 2019. Disponível em <https://www.alamy.com/stock-photo-yellow-lichen-on-concrete-wall-xanthoria-parietina-common-orange-lichen-35253715.html>.

MATHWORKS - Software "Matlab". [Online] 2019. Disponível em <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.

MEDAS, Leonel Filipe Gonçalves - Inspeção, Diagnóstico e Reparação de Estruturas de Betão Armado. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

Monash University - Biografia de Sir George Cayley: The Pioneers - Aviation and Aeromodelling. [Online] 2002. Disponível em <http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/cayley.html>.

N

NEVES, José Miguel Marinho - Reacções Alcalis-Sílica e Resistência aos Sulfatos em Betão: Ensaios. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010. Tese de Mestrado

NEWCOME, Laurence R - Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Aviation. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2004. ISBN 978-1-56347-644-0

O

OERN - *Ordem dos Engenheiros Região Norte*. [Online] 5 de Maio de 2012. Disponível em <http://www.oern.pt/evento/684/veiculos-aereos-nao-tripulados-vant>.

OLIVEIRA, Henrique; CORREIA, Paulo Lobato - CrackIT: An Image Processing Toolbox for Crack Detection and Characterization. 2014.

P

PARROT - Website oficial da Parrot [Online] 2019. Disponível em <https://www.parrot.com/global/drones/anafi-thermal>.

PAULI, Rafael Augusto de - Avaliação Experimental dos Efeitos Dinâmicos da Ação do Vento na Torre de Telecomunicações do Monte da Virgem. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

PEREIRA, Ana Catarina Teixeira - Metodologia de Diagnóstico de Anomalias em Edifícios Residenciais com o Envolvimento dos seus Utilizadores. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2017. Tese de Mestrado

Pix4D - Mapping, modeling and inspecting the UK's tallest tower. *Pix4D*. [Online] 05 de Julho de 2016. Disponível em <https://www.pix4d.com/blog/drone-inspections-tallest-tower-uk>.

PORTARIA n.º 140/2018. D.R. I Série. (2018-07-23) 3679 - 3684.

PORTARIA n.º 238/2016. D.R. II Série. 167 (2016-12-14) 36613 - 36622.

PXHERE - [Online] 2017. Disponível em <https://pxhere.com/en/photo/1057396>.

R

RCAAP - Repositórios Científico de Acesso Aberto de Portugal. [Online] 2019. Disponível em <https://www.rcaap.pt/>.

REIS, Pedro - *Portal Energia*. [Online] 06 de Novembro de 2018. Disponível em <https://www.portal-energia.com/emprego-alpinista-inspecao-pas-turbinas-eolicas-brasil/>.

S

SABAI, Andrew. 2017. Mapa da Obra. [Online] 2017. Disponível em <https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/os-problemas-causados-pela-lixiviacao-do-concreto/>.

SARAIVA, João Gustavo Raminhos Pavia - Técnicas de Protecção e Reparação de Estruturas de Betão Armado . Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2007. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

SERRA, Armindo Henrique Garrido Ferreira - Análise de Patologias em Estruturas Construídas em Ambiente Marítimo. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

SILVA, Daniel Henrique - Revista Científica. Recuperação de estruturas de concreto – Corrosão das Armaduras – Estudo levantado no Centro Oeste de Minas Gerais. 10, 2018, Vol. 2.

SILVA, David Lino Azevedo da - Aplicação de Métodos Avançados de Processamento de Imagem a Ensaios de Tirantes de Betão Armado. Coimbra: Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2016. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

SILVA, Felipe Moura da - Inspeção de Rotina de Obras de Arte Especiais: Pontes e Viadutos. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016. Tese de Mestrado.

SILVA, Sarah Santos e - Diagnóstico de Estruturas de Concreto em Ambientes Marinhos: Estudo de Caso de uma Plataforma de Pesca. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2017. Monografia.

SIMAS, Marcos da Silva Lopes - Sistemas de protecção do betão face à carbonatação. Novembro de Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2007. Tese de Mestrado.

SKETCHFAB - [Online] 2016. Disponível em <https://sketchfab.com/3d-models/bridge-from-one-side-292f2333c22a4932a775e5d3dbb98b06>.

SMARTGADGETSHUB. 2015. [Online] 2015. <http://smartgadgetshub.com/dji-inspire-1-creativity-unleashed/>.

SOUSA, José Albano Martins de - Inspeção e Reabilitação de Estruturas Segundo a NP EN 1504: Caso de Obra. FEUP, 2011. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

Space City Drones - *Space City Drones*. [Online] 2017. Disponível em <https://www.spacecitydrones.com/blogs/product-review/dji-gs-gs-pro-review-of-the-dji-ground-station-app>.

STEFANOVIĆ, Katarina - Telautomaton: Tesla's 1898 radio controlled boat. [Online] 09 de Setembro de 2011. Disponível em <https://www.flickr.com/photos/jup3nep/6147103188>.

T

Timepress Comunicação Empresarial - *Brasil Engenharia*. [Online] 2019. Disponível em <http://www.brasilengenharia.com/portal/noticias/destaque/8456-tecnologias-facilitam-as-inspecoes-de-pontes-e-viadutos>.

TRIGO, José d'Assunção Teixeira - Reparação de Estruturas de Betão Armado Afetado pela Carbonatação do Betão e Corrosão das Armaduras. Lisboa: Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, 2013. Tese de Mestrado.

TUNA, José Miguel Rodrigues - Caracterização in-situ de eflorescências e de outros compostos salinos em paramentos. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2011. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

ANEXO I – FERRAMENTA DE DETEÇÃO DE FISSURAS

```
%%Ferramenta Semiautomatica para deteção de fissuras

image_folder = 'C:\Users\Hélio\Desktop\MATLAB\Códigos Finais\Fissuras; %
Indicação da pasta de imagens a processar (INPUT)

filenames = dir(fullfile(image_folder, '*.jpg')); %Seleção apenas dos
ficheiros ".jpg" existentes na pasta
total_images = numel(filenames);
BaseName='Fissura_% Definição de constante na nomeação dos ficheiros
processados. (Exemplo: Fissuras_01234.jpg)

for n = 1:total_images %Ciclo
    FileName=[BaseName,num2str(n),'.jpg'];

    f= fullfile(image_folder, filenames(n).name);

%% Carregamento das Imagens
I = imread(f);

%% Ajuste do contraste da Imagem
Istrech = imadjust(I,stretchlim(I));

%% Conversão de RGB para Grayscale
Igray_s = rgb2gray(Istrech);

%% Aplicação de Filtro para remoção do "ruído" da imagem e definição da
fissura
K = medfilt2(Igray_s);

se = strel('disk', 4);

bothatimg = imbothat(K, se);

%% Gravação final
imwrite(bothatimg,FileName,'jpg');

end
```


ANEXO II – FERRAMENTA DE DETEÇÃO DE COLONIZAÇÕES BIOLÓGICAS (LÍQUENES)

```
%% Ferramenta semiautomática para detecção de Líquenes

image_folder = 'C:\Users\Hélio\Desktop\MATLAB\Códigos Finais\Liquens';

filenames = dir(fullfile(image_folder, '*.jpg'));
total_images = numel(filenames);
BaseName='Liquens_'

for n = 1:total_images
    FileName=[BaseName,num2str(n),'.jpg'];

    f= fullfile(image_folder, filenames(n).name);
    our_images = imread(f);

    red = our_images(:,:,1); green = our_images(:,:,2); blue = our_images(:,:,3);

    out = red>205 & red<255 & green>116 & green<249 & blue<124; %Define os
    limites RGB

    imwrite(out,FileName,'jpg');

end
```


ANEXO III – FERRAMENTA DE DETEÇÃO DE EFLORESCÊNCIAS

```
%% Ferramenta semiautomática para detecção de Eflorescências

image_folder = 'C:\Users\Hélio\Desktop\MATLAB\Códigos Finais\Eflorescencias';
filenames = dir(fullfile(image_folder, '*.jpg'));
total_images = numel(filenames);
BaseName='Eflorescencia_'

for n = 1:total_images
    FileName=[BaseName,num2str(n),'.jpg'];
    f= fullfile(image_folder, filenames(n).name);
    our_images = imread(f);

    red = our_images(:,:,1); green = our_images(:,:,2); blue = our_images(:,:,3);

    out = red>145 & red<185 & green>160 & green<190 & blue>175 & blue<215 ;
    %Define os limites RGB

    imwrite(out,FileName,'jpg');

end
```


ANEXO IV – FERRAMENTA DE IDENTIFICAÇÃO DE CORROSÃO E ARMADURAS

EXPOSTAS

```
% Ferramenta semiautomática para detecção de Corrosão

image_folder = 'C:\Users\Hélio\Desktop\ORIGINAL FILTRADAS';

filenames = dir(fullfile(image_folder, '*.jpg'));
total_images = numel(filenames);
BaseName='Corrosao_'

for n = 1:total_images
    FileName=[BaseName,num2str(n),'.jpg'];
    f= fullfile(image_folder, filenames(n).name);
    our_images = imread(f);

    red = our_images(:,:,1); green = our_images(:,:,2); blue = our_images(:,:,3);

    out = red>40 & red<102 & green>28 & green<88 & blue>25 & blue<87; %Define os
    limites RGB

    imwrite(out,FileName,'jpg');

end
```


ANEXO V – FERRAMENTA DE DETEÇÃO RGB

```
%Ferramenta de Detecção de RGB

a = imread('C:\Users\HTeixeira\Documents\MATLAB\Detecao\Exemplo.jpg'); %
Selecionar a imagem "tipo"
imshow(a);
red = a(:,:,1); green = a(:,:,2); blue = a(:,:,3);
imshow(red);
imshow(green);
imshow(blue);
d = impixel(a); %Output
```


ANEXO VI – FERRAMENTA “OVERLAY”

```
%Ferramenta de Sobreposição Overlay

image_folder1 = 'C:\Users\Hélio\Desktop\ORIGINAL FILTRADAS Serial'; % Pasta
n°1

filenames = dir(fullfile(image_folder1, '*.jpg'));
total_images = numel(filenames);

image_folder2 = 'C:\Users\Hélio\Desktop\Fissuras Processadas';
filenames2 = dir(fullfile(image_folder2, '*.jpg')); % Pasta n°2
total_images = numel(filenames);
BaseName='Overlay_';

for n = 1:total_images;
    FileName=[BaseName,num2str(n),'.jpg']; %String para nome

    f= fullfile(image_folder1, filenames(n).name);
    g= fullfile(image_folder2, filenames2(n).name);

    A = imread(f);
    B = imread(g);

    C = imfuse(A,B,'blend','Scaling','joint'); %Output

    imwrite(C,FileName,'jpg');
end
```