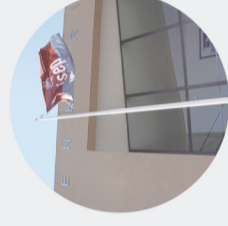




INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO COM BASE EM VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS E PROCESSAMENTO SUPERVISIONADO DE IMAGENS

EURICO MIGUEL DE OLIVEIRA CAROLA

agosto de 2021



INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO COM BASE EM VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS E PROCESSAMENTO SUPERVISIONADO DE IMAGENS

EURICO MIGUEL DE OLIVEIRA CAROLA
Julho de 2021



**INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO COM BASE EM VEÍCULOS AÉREOS
NÃO TRIPULADOS E PROCESSAMENTO SUPERVISIONADO DE IMAGENS**

EURICO MIGUEL DE OLIVEIRA CAROLA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE CONSTRUÇÕES

Orientador: Prof. Diogo Rodrigo Ferreira Ribeiro (ISEP-IPP)

Co-Orientador: Prof. Ricardo Manuel Pereira Santos (ISEP-IPP)

JULHO DE 2021

Eu, Eurico Miguel de Oliveira Carola, estudante nº 1151086, do Mestrado em Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto, declaro que não fiz plágio nem auto-plágio, pelo que o trabalho intitulado “Inspeção de estruturas de betão armado com base em veículos aéreos não tripulados e processamento supervisionado de imagens” é original e da minha autoria, não tendo sido usado previamente para qualquer outro fim. Mais declaro que todas as fontes usadas estão citadas, no texto e na bibliografia final, segundo as regras de referência adotadas na instituição.

Porto e ISEP, 2021/07/01

Eurico Miguel de Oliveira Carola

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xix
Abreviaturas	xxi
CAPÍTULO 1 Introdução.....	1
CAPÍTULO 2 Estruturas de Betão Armado.....	5
CAPÍTULO 3 Processamento de Imagens	25
CAPÍTULO 4 Detecção de Fissuras	39
CAPÍTULO 5 Caracterização Automática de Fissuras	47
CAPÍTULO 6 Caso de Estudo.....	69
CAPÍTULO 7 Considerações Finais.....	97
Referências Bibliográficas	99

RESUMO

A inspeção e monitorização de estruturas de betão armado ainda implica atualmente tempos de execução alargados e um número considerável de meios humanos e mecânicos, os quais acarretam custos consideráveis para as entidades que têm a seu cargo estas estruturas. Com o intuito de automatizar este processo e torná-lo mais célere e económico, pretende-se aperfeiçoar ferramentas baseadas em redes neuronais convolucionais associadas ao processamento de imagens captadas por intermédio de veículos aéreos não tripulados, permitindo que este método seja uma mais-valia e uma nova forma de pensar e executar a inspeção e monitorização de estruturas em betão armado.

Esta dissertação tem como objetivo a identificação e caracterização de uma das anomalias de estruturas de betão armado, as fissuras. No decorrer deste estudo foram efetuados diversos testes de validação da metodologia aplicada e os resultados obtidos permitem concluir que as ferramentas desenvolvidas garantem uma abordagem robusta e resultados com elevado grau de fiabilidade. No futuro pretender-se-á alargar e adaptar a metodologia apresentada a outras anomalias e patologias comuns nas estruturas de betão armado.

Palavras-chave: Inspeção, Monitorização, Betão armado, Estruturas, Redes Neuronais Convolucionais (RNC), Unmanned aerial vehicles (UAV), Anomalias, Patologias, Fissuras.

ABSTRACT

The inspection and monitoring of reinforced concrete structures currently still imply extended execution times and considerable human and mechanical resources, which translate into considerable costs for the entities in charge of these structures. In order to automate these processes and make them faster and more economical, a processing tool for drone captured images based on convolutional neural networks is presented, allowing this method to be an asset and a new way of envisioning and carrying out inspection and monitoring of concrete structures.

The development of this dissertation pretends to give a contribution on the identification and characterization of one of such anomalies present on reinforced concrete structures, namely the cracking. During this study, many tests were conducted, hinting on the robustness and reliability of the results. So future improvement of these tools will include extending this method to other anomalies which can be included in this method

Keywords: Inspection, Monitoring, Reinforced concrete, Structures, Convolutional Neural Networks (CNN), Unmanned aerial vehicles (UAV), Anomalies, Pathologies, Cracks.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial à minha mulher Elisabete Correia e aos meus filhos Pedro Gabriel, Maria Rita e Pedro Miguel um muito obrigado por todo o sacrifício que foi necessário e por me terem dado a força e o incentivo para conseguir alcançar mais este objetivo.

Aos Engenheiros Diogo Ribeiro e Ricardo Santos pela forma como sempre estiveram disponíveis para me apoiar e estimular no desenvolvimento desta dissertação.

Ao Gustavo Nina por todo o apoio e ajuda no desenvolvimento do algoritmo.

A todos que estiveram presentes no meu percurso académico desde o seu início e a todos os amigos que fui fazendo pelo caminho e que hoje são parte da minha vida.

ÍNDICE DE TEXTO

1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do Trabalho	2
2.1	Breve História.....	5
2.2	Betão Armado em Portugal	8
2.3	Durabilidade do Betão Armado	9
2.4	Anomalias e Patologias do Betão Armado.....	9
2.5	Fissuração	11
2.5.1	Cura do Betão	11
2.5.2	Assentamento Plástico do Betão.....	12
2.5.3	Variação da Temperatura	12
2.5.4	Retração do Betão	13
2.5.5	Fluência do Betão	14
2.5.6	Assentamentos Diferenciais dos Apoios.....	14
2.5.7	Corrosão das Armaduras	15
2.5.8	Colocação Incorreta de Armaduras e Cabos de Pré-esforço	16
2.5.9	Cargas Mecânicas	17
2.5.10	Cristalização de sais	18
2.5.11	Ciclo gelo-degelo	18
2.5.12	Ações Sísmicas	19
2.5.13	Reação alcalis-sílica.....	19
2.5.14	Ação do Fogo	19

2.6	Inspeção e Monitorização de Estruturas de Betão Armado	20
2.6.1	Tempo de Vida Útil	20
2.6.2	Monitorização	21
2.6.3	Inspeção	22
2.6.4	Utilização de UAV	24
3.1	Machine Learning.....	25
3.2	Convolutional Neural Networks – CNN.....	27
3.3	Treino da Rede	30
3.3.1	Base de Dados.....	31
3.3.2	<i>Scripts</i> de Apoio à Criação da Base de Dados	31
3.3.3	Dimensão da Base de Dados e Fiabilidade do Treino.....	35
4.1	Processo	39
4.2	Análise de Dados.....	41
5.1	Processo	48
5.1.1	Identificação da Espessura da Fissura	49
5.1.2	Identificação do Desenvolvimento da Fissura	51
5.1.3	Valor do Pixel	52
5.2	Validação do Algoritmo.....	54
5.2.1	Deteção de fissuras.....	57
5.2.2	Medição Automática	58
6.1	Introdução.....	69
6.2	Ensaio	70
7.1	Conclusões	97
7.2	Desenvolvimentos Futuros	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 - Plataforma Bybridge Autopropulsionada (BridgeByBridge, 2021)	1
Figura 2-1 – Dois dos principais intervenientes na evolução do cimento.....	5
Figura 2-2 – Construtor Inglês Joseph Aspdin	6
Figura 2-3 – Rochas - Ilha de Portland.....	6
Figura 2-4 – O inventor da barca e o documento de patente.....	7
Figura 2-5 – François Hennebique e o seu sistema.....	7
Figura 2-6 – Construção da Fábrica de Moagem do Caramujo (José-Maria da Silva).....	8
Figura 2-7 – Duas fotografias da Ponte do Boco ou de Parada (CM Vieira do Minho, 2021)	8
Figura 2-8 – Exemplos de deterioração das estruturas de betão (António Costa – IST).....	10
Figura 2-9 - Exemplo de três fissuras em muros de suporte (Eurico Carola, 2021)	11
Figura 2-10 - Fissuras por deficiente cura do betão.....	12
Figura 2-11 – Fissuras devido ao assentamento plástico do betão (Leila Meneghetti, s.d.)	12
Figura 2-12 – Fissuras por retração do betão.....	13
Figura 2-13 – Fissuras devidas a assentamentos diferenciais dos apoios.....	14
Figura 2-14 – Fissuras por corrosão da armadura.....	15
Figura 2-15 – Progressão da corrosão de armaduras.....	16
Figura 2-16 – Fissuras por mau posicionamento de armaduras	16
Figura 2-17 – Cabo de pré-esforço mal posicionado.....	17
Figura 2-18 – Fissuras devidas a cargas mecânicas (Souza, 1998)	18
Figura 2-19 - Ciclo gelo-degelo (adaptado de RainGuard, 2017)	18
Figura 2-20 - Fissuras e Colapso de Estruturas devido à Ações Sísmicas (ADBC, 2018).....	19
Figura 2-21 – Colapso da Ponte Hintze Ribeiro (Observador, 2021).....	20

Figura 2-22 – Exemplo de dois equipamentos de monitorização	22
Figura 2-23 – Exemplo de dois equipamentos usados na inspeção de estruturas	23
Figura 2-24 – Outros métodos de inspeção visual	23
Figura 2-25 – Inspeção de obra na fase de construção com UAV (Salleto, 2021).....	24
Figura 3-1 – Modelo de aprendizagem de algoritmo de SPAM	26
Figura 3-2 – Avaliação do modelo	26
Figura 3-3 – Modelo computacional de um neurónio.....	27
Figura 3-4 – Arquitetura da Rede LeNet (Yann LeCun et al, 1989).....	27
Figura 3-5 - Redes neuronais convolucionais para classificação de imagens e reconhecimento de objetos	28
Figura 3-6 – Arquitetura da AlexNet (Lapix, 2020)	29
Figura 3-7 – Processo de treino da Rede.....	30
Figura 3-8 – Parte do <i>Script</i> Auto-Image-Splitter	31
Figura 3-9 – Processo de divisão com Auto_Image_Splitter	32
Figura 3-10 – Exemplo de utilização de Data Augmentation	33
Figura 3-11 – Parte do <i>Script</i> Data Augmentation.....	33
Figura 3-12 – <i>Output</i> da utilização do <i>script</i> Data Augmentation	34
Figura 3-13 – Etapas de treino recorrendo à ALEXNet	36
Figura 3-14 – Parte do <i>Script</i> de treino das Redes	36
Figura 3-15 – Amostra das imagens com fissuras da rede 1	37
Figura 3-16 – Amostra das imagens com fissuras da rede 4	37
Figura 4-1 – Processo de deteção de fissura	40
Figura 4-2 – <i>Stride</i> na deteção das fissuras (ISEP, 2020)	41
Figura 4-3 – Máquina Fotográfica NIKON D80 Equipada com Objetiva SIGMA	41
Figura 4-4 – Fotografias de muro de suporte usadas na avaliação das redes treinadas	42
Figura 4-5 – Resultado da deteção usando rede treinada 1	43
Figura 4-6 – Resultado da deteção usando rede treinada 2	44

Figura 4-7 – Resultado da detecção usando rede treinada 3	45
Figura 4-8 – Resultado da detecção usando rede treinada 4	46
Figura 5-1 – Detecção de fissuras usando a rede 4 e melhorias do algoritmo	47
Figura 5-2 – Processo de Identificação Automática de Fissuras	48
Figura 5-3 – Processamento das imagens da <i>ROI store</i>	48
Figura 5-4 – Processo de Identificação da Espessura da Fissura (ISEP, 2020).....	49
Figura 5-5 – Horizontalização da Fissura e Medição da Espessura	50
Figura 5-6 – Exemplo de apresentação da medição da espessura numa imagem	50
Figura 5-7 – Processo de Identificação do Desenvolvimento da Fissura (ISEP, 2020)	51
Figura 5-8 – Obtenção do desenvolvimento em cada ROI.....	52
Figura 5-9 – Forma de obtenção da dimensão real em milímetros correspondente a um pixel da fotografia (ISEP, 2020)	53
Figura 5-10 – Fissuras 1 e 2 criadas em AutoCAD	54
Figura 5-11 – Fissuras 3 e 4 criadas em AutoCAD	55
Figura 5-12 – Fissuras 5 e 6 criadas em AutoCAD	55
Figura 5-13 – Fissuras 7 e 8 criadas em AutoCAD	56
Figura 5-14 - Exemplo da fissura 3 fotografada em dois locais diferentes	57
Figura 5-15 – Detecção de quatro das fissuras desenhadas em AutoCAD	58
Figura 5-16 – Metadados de fotografia captada com Nikon D80	59
Figura 5-17 – Resultado da Medição Automática da Fissura 2	60
Figura 5-18 – Resultado da Medição Automática da Fissura 3	61
Figura 5-19 – Resultado da Medição Automática da Fissura 7	61
Figura 5-20 – UAS DJI Mavic Mini e Dados do Equipamento	62
Figura 5-21 – Resultados obtidos Fissura 1 Captada com UAV.....	63
Figura 5-22 – Resultados obtidos Fissura 2 Captada com UAV.....	63
Figura 5-23 – Resultados obtidos Fissura 3 Captada com UAV.....	64
Figura 5-24 – Resultados obtidos Fissura 4 Captada com UAV.....	64

Figura 5-25 – Resultados obtidos Fissura 5 Captada com UAV	65
Figura 5-26 – Resultados obtidos Fissura 6 Captada com UAV	65
Figura 5-27 – Resultados obtidos Fissura 7 Captada com UAV	66
Figura 5-28 - UAV DJI MATRICE 600 Pro Equipado com Laser	68
Figura 6-1 – Campus do ISEP (ISEP, 2021)	69
Figura 6-2 – Fachada do Edifício F alvo do ensaio	70
Figura 6-3 – Fotografias do ensaio captadas com o UAV DJI Mavic Mini.....	71
Figura 6-4 – Localização das fissuras 1 e 2	72
Figura 6-5 – Localização das fissuras 3 e 4	72
Figura 6-6 – Marcação e Fissura 1	73
Figura 6-7 – Marcação e Fissura 2	73
Figura 6-8 – Marcação e Fissura 3	74
Figura 6-9 – Marcação e Fissura 4	74
Figura 6-10 – Digitalização da Fissura 3 com a marcação de 2 cm.....	75
Figura 6-11 – Modelação Fissura 1.....	75
Figura 6-12 – Modelação Fissura 2.....	76
Figura 6-13 – Modelação Fissura 3.....	76
Figura 6-14 – Modelação Fissura 4.....	76
Figura 6-15 – Detecção e caracterização da Fissura 1	77
Figura 6-16 – Detecção e caracterização da Fissura 2	77
Figura 6-17 – Detecção e caracterização da Fissura 3	78
Figura 6-18 – Detecção e caracterização da Fissura 4	78
Figura 6-19 – Zonas de Fissura (Z.F.) da fachada em estudo.....	79
Figura 6-20 – Fotografia Zona Z.F.01	80
Figura 6-21 – Detecção Fissura Z.F.01.....	80
Figura 6-22 – Fotografia Zona Z.F.02.....	81
Figura 6-23 – Detecção Fissura Z.F.02.....	81

Figura 6-24 – Fotografia Zona Z.F.03.....	81
Figura 6-25 – Detecção Fissura Z.F.03.....	81
Figura 6-26 – Fotografia Zona Z.F.04.....	82
Figura 6-27 - Detecção Fissura Z.F.04	82
Figura 6-28 – Fotografia Zona Z.F.05.....	82
Figura 6-29 – Detecção Fissura Z.F.05.....	82
Figura 6-30 – Fotografia Zona Z.F.06.....	83
Figura 6-31 – Detecção Fissura Z.F.06.....	83
Figura 6-32 – Fotografia Zona Z.F.07.....	83
Figura 6-33 – Detecção Fissura Z.F.07.....	84
Figura 6-34 – Fotografia Zona Z.F.08.....	84
Figura 6-35 – Detecção Fissura Z.F.08.....	85
Figura 6-36 – Fotografia Zona Z.F.09.....	85
Figura 6-37 – Detecção Fissura Z.F.09.....	86
Figura 6-38 – Fotografia Zona Z.F.10.....	86
Figura 6-39 – Detecção Fissura Z.F.10.....	87
Figura 6-40 – Fotografia Zona Z.F.11.....	87
Figura 6-41 – Detecção Fissura Z.F.11.....	88
Figura 6-42 – Fotografia Zona Z.F.12.....	88
Figura 6-43 – Detecção Fissura Z.F.12.....	89
Figura 6-44 – Fotografia Zona Z.F.13.....	89
Figura 6-45 – Detecção Fissura Z.F.13.....	90
Figura 6-46 – Fotografia Zona Z.F.14.....	90
Figura 6-47 – Detecção Fissura Z.F.14.....	91
Figura 6-48 – Zonas de outras anomalias na fachada	91
Figura 6-49 – Dados Caracterização Fissura Z.F.02	92
Figura 6-50 – Dados Caracterização Fissura Z.F.03	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 6-51 – Dados Caracterização Fissura Z.F.09	93
Figura 6-52 – Dados Caracterização Fissura Z.F.10	93
Figura 6-53 – Dados Caracterização Fissura Z.F.11	94
Figura 6-54 - Dados Caracterização Fissura Z.F.14	94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 – Valores indicativos do tempo de vida útil de projeto	21
Tabela 3-1 – Dados do treino das quatro redes criadas.....	35
Tabela 4-1 – Identificação das redes e dos ficheiros criados	39
Tabela 5-1 – Análise do fator distância nos resultados obtidos.....	67
Tabela 5-2 – Análise dos valores obtidos em percentagem.....	67

ABREVIATURAS

AECO – *Arquitetura, Engenharia Construção e Operação*

BIM – *Building Information Modeling*

CNN – *Convolutional Neural Network*

EXIF – *Exchange Image File Format*

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

GPS – *Global Positioning System*

ISEP – *Instituto Superior de Engenharia do Porto*

IST – *Instituto Superior Técnico*

REBAP – *Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado*

RGB – *Red, Green and Blue*

RNC – *Rede Neuronal Convolucional*

ROI – *Region of Interest*

SPAM – *Sending and Posting Advertisement in Mass*

UAS – *Unmanned Aircraft Systems*

UAV – *Unmanned Aerial Vehicles*

ZF – *Zona de Fissura*

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização de Unmanned Aerial Vehicles (UAV) já se encontra enraizada na sociedade, e tornou-se evidente a forma como estes foram aceites e entendidos como uma ferramenta essencial em muitos setores. A sua utilização na construção tem ganho uma grande aceitação o que se traduz numa crescente solicitação para novas utilizações e soluções. A presente dissertação, enquadra-se nesta visão, a do uso desta ferramenta num novo tipo de utilização a qual será no futuro um dos novos serviços em que os UAV serão uma mais-valia a considerar quando se pretender efetuar inspeções ou monitorizações de estruturas de betão armado.

A crescente digitalização no sector da AECO (Arquitetura, Engenharia Construção e Operação) verificada nos últimos anos tem impulsionado a crescente utilização de equipamentos e ferramentas digitais. Neste cenário faz todo o sentido que a evolução de técnicas de processamento de imagem aliadas ao desenvolvimento de equipamentos UAV, os quais estão cada vez mais avançados quer ao nível dos materiais quer ao nível do seu uso, sejam vistos como uma solução para um serviço de inspeção e monitorização que continua a exigir um grande número de técnicos e equipamentos como por exemplo o presente na Figura 1-1, os quais têm rendimentos baixos e ainda se baseiam em técnicas um pouco rudimentares (equipamentos de medição manual, papel vegetal, fotografias etc.) e como tal são serviços dispendiosos.



Figura 1-1 - Plataforma Bybridge Autopropulsionada (BridgeByBridge, 2021)

Abordando este assunto também pela ótica da segurança, verifica-se que os meios necessários e a necessidade dos técnicos de aceder a todas as zonas da estrutura acarreta problemas de segurança. Assim, a possibilidade de reduzir ou quase anular os riscos associados a esta atividade corresponde a uma mais-valia importante, pelo que, o investimento na solução de utilização de UAV não só é lógica como imperativa.

Um dos principais constrangimentos à utilização de soluções baseadas na inspeção remota com drones prende-se com a inexistência, até ao momento, de uma solução completa, que consiste na produção de *software* que aliado ao respetivo equipamento consiga produzir dados fiáveis para o devido efeito.

Neste contexto os dados obtidos com a elaboração desta dissertação pretendem ser mais um contributo que possibilite num futuro muito próximo a obtenção dessa solução integrada que permita que estes serviços possam passar a ser uma realidade.

1.2 OBJETIVOS

A presente dissertação surge no seguimento de outros trabalhos apresentados no ISEP, sendo que o objetivo definido passou pelo desenvolvimento e teste de uma ferramenta de deteção de fissuras e com a mesma obter dados fidedignos relativos ao desenvolvimento e espessura das fissuras através de um processo automático. Este salto qualitativo apesar de muito ambicioso faz todo o sentido atendendo aos dados que são fundamentais quando se trata de inspeção/monitorização de fissuras.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação encontra-se organizada da seguinte forma:

- Capítulo 2 – Estruturas de Betão Armado – Neste capítulo é abordada a história do cimento e do betão armado e as anomalias e patologias que a este poderão estar associadas, os meios e métodos utilizados nas inspeções e monitorizações de estruturas de betão armado;
- Capítulo 3 – Processamento de Imagens – Neste capítulo são abordados os métodos utilizados e o conceito que permitiu a elaboração de um algoritmo capaz de conduzir a um método automático de reconhecimento e medição de fissuras;
- Capítulo 4 – Deteção de Fissuras – Neste capítulo é abordado o processo de deteção de fissuras sendo ainda realizada uma análise dos resultados do processamento efetuado;

- Capítulo 5 – Identificação Automática de Fissuras – Neste capítulo além da abordagem do processo é explicada a forma encontrada para efetuar a validação do algoritmo e é feita uma análise dos dados obtidos;
- Capítulo 6 – Caso de Estudo – Neste capítulo é feita uma identificação da estrutura alvo do ensaio e validação dos dados obtidos;
- Capítulo 7 – Considerações Finais.

CAPÍTULO 2

ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

2.1 BREVE HISTÓRIA

A utilização do betão armado em estruturas está intimamente ligada a evolução do cimento. É de consenso geral que a palavra cimento provém da palavra em latim *cæmentum*, a qual está associada a uma espécie de pedra natural de rochedos assim designada na Roma antiga. A origem do cimento como material de ligação de alvenaria de pedra remonta há cerca de 4.500 anos, sendo que foi identificada uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado em alguns dos mais imponentes monumentos do Egipto antigo. A utilização de solos de origem vulcânica que possuíam propriedades de endurecimento com a água da ilha grega de Thera a atual Santorini ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli foi encontrada em obras gregas e romanas tais como o Panteão e o Coliseu incluindo Tongóbriga (cidade romana nas proximidades de Marco de Canavezes).

O inglês John Smeaton identificado na figura 2-1 conseguiu obter um produto de alta resistência por meio da calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1817 Louis Vicat, identificado na figura 2-1 faz estudos com cal hidráulica e descobre o clínquer mas nunca deposita qualquer patente.



a) John Smeaton



b) Louis Vicat

Figura 2-1 – Dois dos principais intervenientes na evolução do cimento

Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin, figura 2-2, considerado como o grande precursor da utilização do cimento e inventor do cimento Portland, queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino.

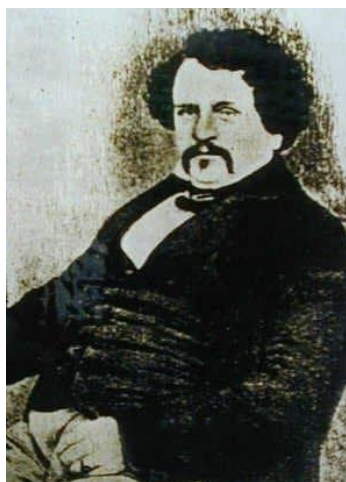


Figura 2-2 – Construtor Inglês Joseph Aspdin

Percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras utilizadas nas construções. Percebendo que essa mistura não se dissolvia em água, a mesma foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland identificadas na figura 2-3. Estavam assim reunidas as condições do cimento para o desenvolvimento que permitiu a utilização do betão nas construções.



Figura 2-3 – Rochas - Ilha de Portland

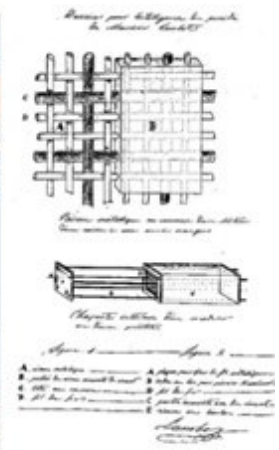
As primeiras incursões do que pode ser considerado de betão armado ocorreram em 1848, sendo que na Exposição Universal de Paris em 1855 foi apresentada a Barca de Lambot, representada na figura 2-4, a qual foi fabricada por Joseph Louis Lambot o qual no documento de patente apresenta uma armação do barco e também de algo parecido com um pilar retangular com quatro barras longitudinais de ferro.



a) Joseph Louis Lambot



b) Barca de Lambot



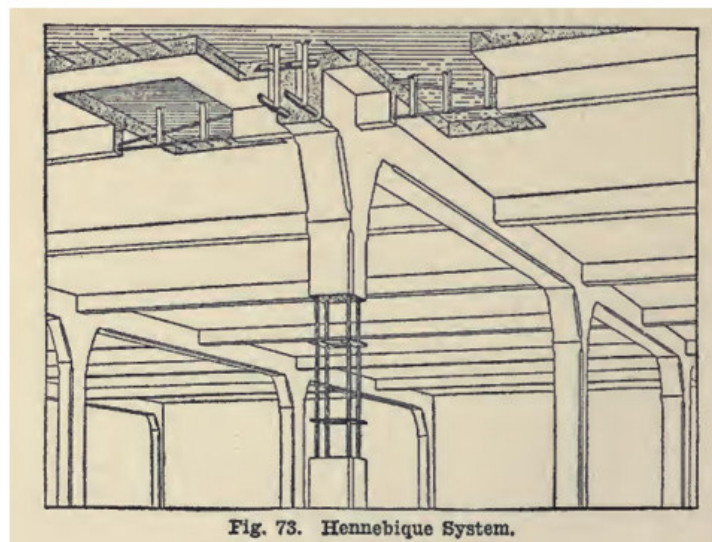
c) Documento de Patente

Figura 2-4 – O inventor da barca e o documento de patente

Presume-se que em 1850 Joseph Louis Lambot tenha efetuado as primeiras experiências práticas do efeito da introdução de armação numa massa de betão. Em 1854, Joseph Louis Lambot já executava construções de "cimento armado" com diversas finalidades. Com a evolução dos sistemas de betão armado durante o século XIX e com a apresentação do sistema Ransome em 1889 na exposição de Paris e em especial o trabalho desenvolvido por François Hennebique, figura 2-5, que foi um dos grandes impulsionadores, verifica-se a implementação do betão armado em todo o mundo.



a) François Hennebique



b) Sistema Hennebique

Figura 2-5 – François Hennebique e o seu sistema

2.2 BETÃO ARMADO EM PORTUGAL

Em Portugal as primeiras incursões com a utilização deste novo material foram feitas no Edifício de Moagem do Caramujo (1898), o qual levou somente um ano a ser executado, figura 2-6, estando terminado no Verão de 1898, e o resultado foi a "primeira obra arquitetónica integralmente estruturada em betão armado e executada em Portugal", pelo processo de origem francesa (patenteado por François Hennebique).

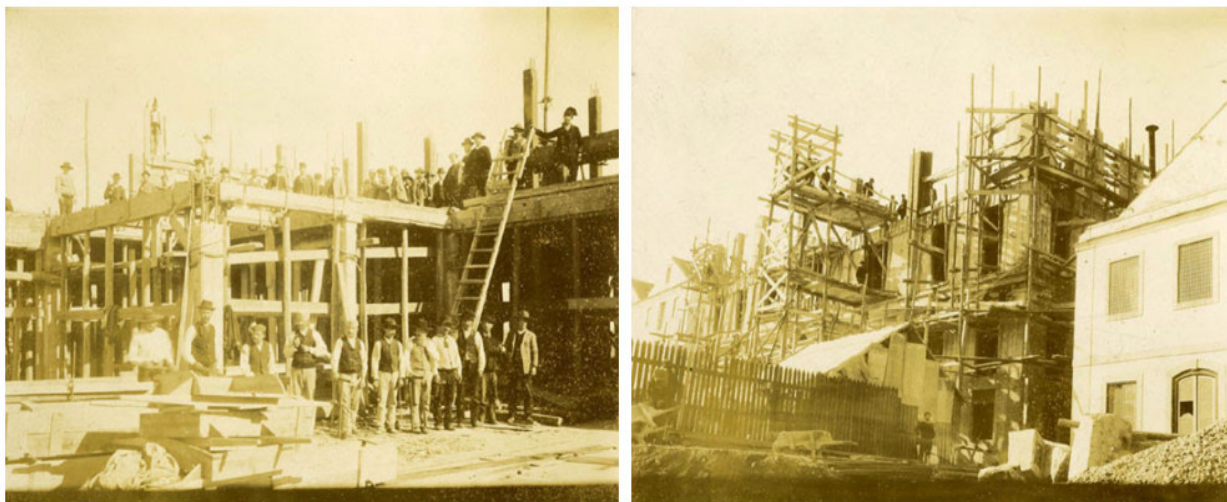
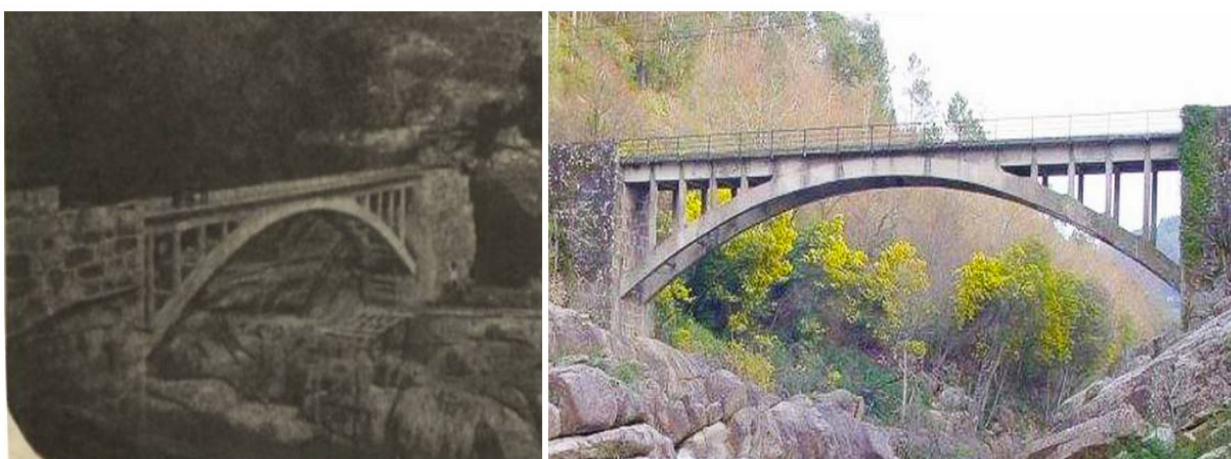


Figura 2-6 – Construção da Fábrica de Moagem do Caramujo (José-Maria da Silva)

A evolução do sistema Hennebique em Portugal teve um impulso com o concessionário português desse sistema, Moreira de Sá & Malevez, o qual foi responsável pela execução de um elevado número de empreitadas de edifícios, pontes, figura 2-7, armazéns industriais e reservatórios.



a) Ponte na fase final de construção

b) Estado atual da ponte em 2021

Figura 2-7 – Duas fotografias da Ponte do Boco ou de Parada (CM Vieira do Minho, 2021)

Após estas obras iniciais foi rapidamente adotada a construção em betão armado no panorama da construção em Portugal até aos dias de hoje.

2.3 DURABILIDADE DO BETÃO ARMADO

O betão armado é um material relativamente sensível e que está sujeito a uma degradação ao longo do tempo, deste modo é expectável que as construções sofram um natural envelhecimento provocado quer pelo meio ambiente (chuva, sol, vento, poluição) quer pela utilização normal. Em certos casos verifica-se que o material tem um envelhecimento mais acelerado o que conduz a uma redução da durabilidade do betão, sendo esta uma questão que traz preocupações atendendo à grande quantidade de estruturas construídas nos últimos 50 a 60 anos.

Inicialmente não era tida em conta a durabilidade nos regulamentos sendo só em 1983 com o Regulamento de Estruturas de Betão e Armado e Pré-esforçado (REBAP) tida em consideração essa questão. À luz dos Eurocódigos Estruturais a durabilidade do betão é considerada no próprio dimensionamento das estruturas.

2.4 ANOMALIAS E PATOLOGIAS DO BETÃO ARMADO

Os termos anomalias e patologias de estruturas de betão armado por vezes são mal interpretados ou utilizados de forma menos correta, um pouco pelo desconhecimento do significado de que cada um deles.

O termo patologia vem do grego pela junção das palavras “Pathos” e da palavra “Logos” que significam respetivamente doença e estudo, o que desde logo pode ser associado a estudo da doença. Desde modo, patologia designa o conjunto de fenómenos que afetam o comportamento e desempenho de uma construção, com implicações estruturais ou não estruturais (Brito, 2001).

De uma forma sucinta anomalia é algo que se desvia da norma, do expectável, da média geral ou do propósito com que foi criado, podendo também ser caracterizado como uma irregularidade. Portanto, as anomalias podem resultar de múltiplas causas, incluindo frequentemente o processo de construção, estruturais e durabilidade. As anomalias devidas a erro humano podem ocorrer em fase de execução de obra, ou durante um período de tempo, em geral curto, após a entrada em serviço da estrutura. Para além das anomalias resultantes do normal desgaste dos equipamentos e materiais, que surgem normalmente após um tempo mais ou menos dilatado da entrada da estrutura em serviço, identifica-se ainda um outro conjunto de anomalias que ocorrem como resultado de fenómenos físico-químicos mais ou menos complexos.

De acordo com o que foi mencionado as anomalias podem ser:

CAPÍTULO 2

- Decorrentes do processo de construção
 - Vazios ou zonas porosas
 - segregação
 - erros de geometria
 - descontinuidades visíveis
 - manchas
 - fissuração
- Estruturais
 - Fissuração
 - Deformação excessiva
- Durabilidade
 - coloração do betão
 - exposição / corrosão de armaduras
 - fissuração do betão
 - delaminação do betão
 - desagregação do betão

Na figura 2-8 estão apresentados alguns exemplos de anomalias, que contribuem para a deterioração das estruturas de betão.



a) Fendilhação

b) Delaminação

c) Eflorescências

Figura 2-8 – Exemplos de deterioração das estruturas de betão (António Costa – IST)

Tendo por base as definições facilmente é perceptível o porquê de estes termos por vezes serem erradamente utilizados, atendendo a que por vezes podem ter uma causa comum, no entanto a gravidade

que apresentam é distinta. Pode-se afirmar que uma patologia dá normalmente origem a uma anomalia, mas não é necessariamente uma anomalia.

2.5 FISSURAÇÃO

A definição de fissura presente no dicionário é de “Abertura estreita, alongada e pouco profunda” (Priberam, 2021), trata-se de uma anomalia que é usual encontrar em estruturas de betão armado atendendo a que podem ser causadas por diversas razões. Na figura 2-9 estão representadas algumas fissuras em estruturas de betão armado, neste sentido, é fundamental um acompanhamento e estudo da causa, mas também do efeito das mesmas os quais podem ser de duas ordens, alteração/degradação estética e indução/agravamento de outras patologias com possível perda de material e resistência.



Figura 2-9 - Exemplo de três fissuras em muros de suporte (Eurico Carola, 2021)

Como foi mencionado anteriormente o aparecimento de fissuração é comum na construção, seja em elementos estruturais ou elementos não estruturais. Os principais motivos para o seu surgimento são fatores como variações de temperatura externa, assentamento plástico, cargas excessivas, corrosão de armaduras, deformação estrutural, colocação incorreta de armaduras e cabos de pré-esforço, retração autogénea ou por secagem, remoção prematura de cofragens e escoramentos e ataque químico.

2.5.1 Cura do Betão

Uma cura do betão executada de forma deficiente pode provocar a fissuração pela retração do betão, figura 2-10, este fenómeno ocorre atendendo a que não existe água para compensar a evaporação natural durante a secagem.



Figura 2-10 - Fissuras por deficiente cura do betão

2.5.2 Assentamento Plástico do Betão

A fissuração, conforme indicada na figura 2-11, deve-se essencialmente à migração da água do betão para a superfície exterior antes de atingir a presa, a diminuição do volume de betão provoca assentamento que se impedido pela existência de cofragem ou armadura tem como resultado a fissuração.

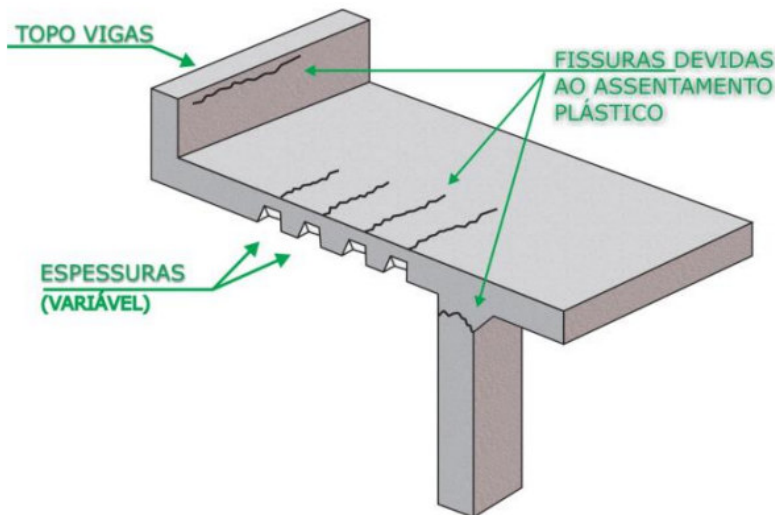


Figura 2-11 – Fissuras devido ao assentamento plástico do betão (Leila Meneghetti, s.d.)

2.5.3 Variação da Temperatura

A variação da temperatura é uma das possíveis causas relativas ao processo de construção deve-se ao facto de betão fresco passar por um processo de aumento de temperatura devido às reações químicas originas pela hidratação do cimento. Este aumento de temperatura ocorre durante as primeiras horas ou dias depois da betonagem o betão arrefece de seguida até à temperatura ambiente. O calor de hidratação associado a baixa resistência do betão pode levar a fissuras. Estas fissuras são mais graves em peças de grande dimensão em que não existam ou sejam em reduzido número as juntas de dilatação.

2.5.4 Retração do Betão

A retração a longo prazo do betão é independente dos carregamentos a que a estrutura é sujeita, ocorrendo apenas devido à diminuição de volume do betão pela evaporação da água (Sampaio, 2010). À medida que a superfície do betão seca, a água evapora-se dos espaços entre as partículas, fazendo com que estas tendam a aproximar-se umas das outras, o que resulta numa retração do betão. Uma vez que a camada exterior do betão está exposta ao ar e as camadas inferiores não, o betão perto da superfície seca e retrai a uma taxa diferente da camada interior. Esta camada atua como um impedimento à retração do betão superficial, produzindo tensões que irão levar à fissuração da camada superficial de betão (Gromicko et al., s.d.). É necessário ter em consideração o efeito da retração durante a fase de projeto através da construção de juntas, que permitam determinar o local onde vão ocorrer as fissuras devidas à retração. Como se pode verificar na figura 2-12, quanto mais rígida for uma estrutura, maiores as tensões, resultando assim numa maior fissuração.

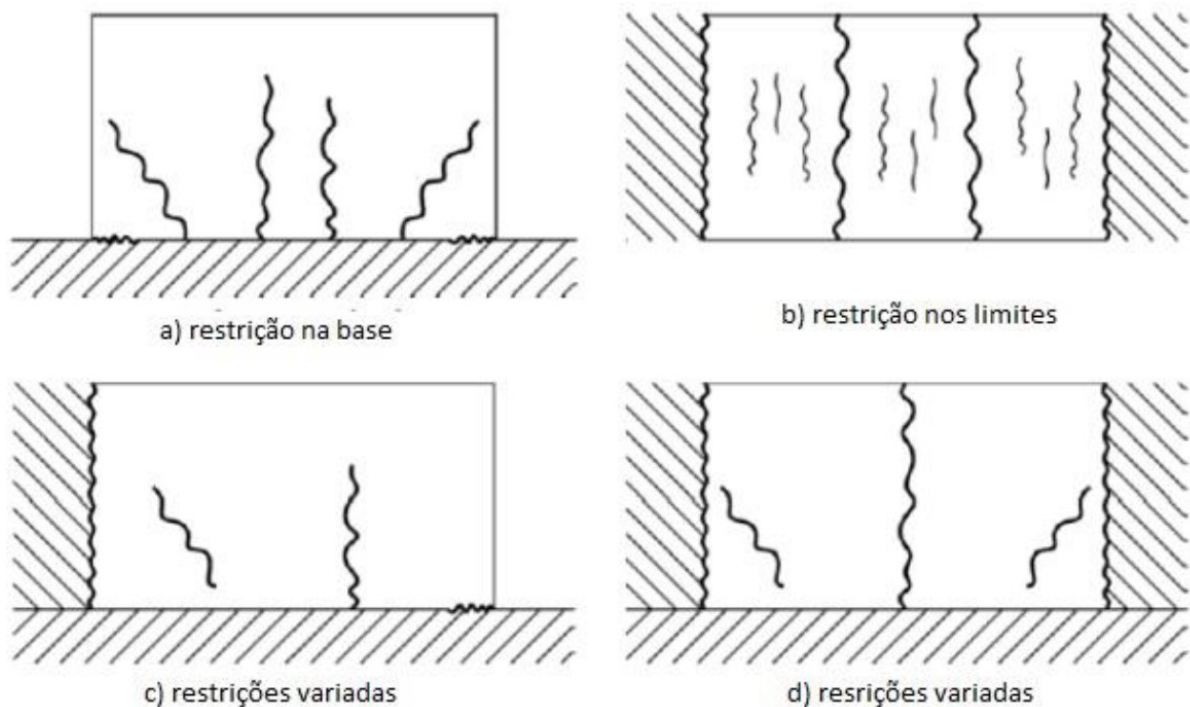


Figura 2-12 – Fissuras por retração do betão

A disposição das fissuras depende das restrições impostas à estrutura e das armaduras existentes no betão.

2.5.5 Fluência do Betão

A fluência do betão é definida como a deformação a longo prazo devida a cargas constantes atuantes na estrutura. Sempre que o betão é sujeito a cargas ou tensões durante muito tempo, este irá deformar. A deformação normalmente ocorre na direção em que a força é aplicada. Se a estrutura se encontrar restringida nos apoios, a fluência pode causar fissuração ou até o colapso da estrutura, sendo então necessário considerar o efeito da fluência na fase de projeto da estrutura (Gromicko et al., s.d.).

As fissuras provocadas pela fluência são comuns em paredes de retenção (por exemplo, silos de betão) ou em paredes de fundação que não são apoiadas na estrutura do piso.

2.5.6 Assentamentos Diferenciais dos Apoios

O deslocamento relativo dos apoios normalmente devido a assentamentos do terreno de fundação pode introduzir fissuras ou deformações pois corresponde a alterações impostas à estrutura, como se pode verificar na figura 2-13. As fissuras geradas são normalmente inclinadas a 45° nas paredes perpendiculares ao deslocamento das fundações, sendo estas tanto mais severas quanto mais rígida for a estrutura.

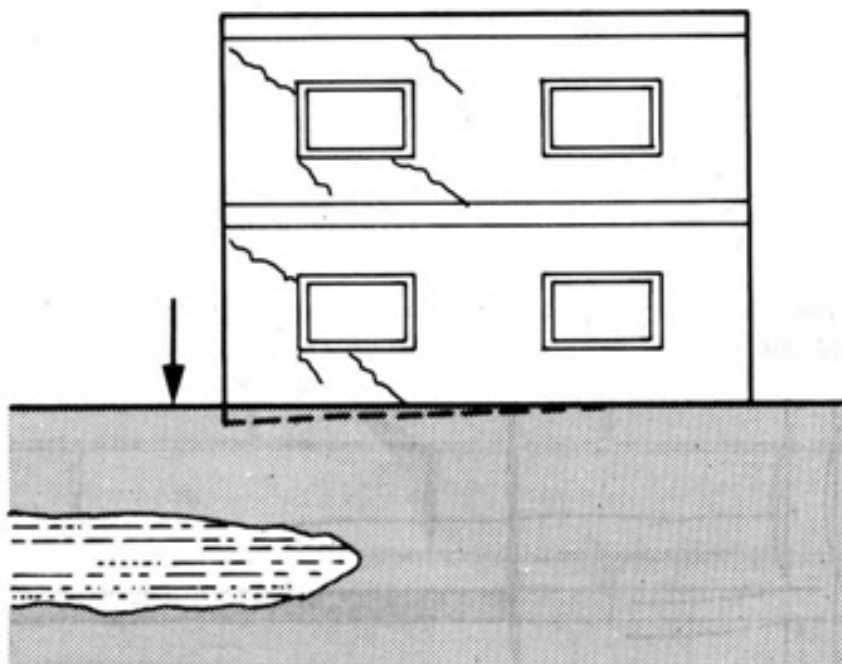


Figura 2-13 – Fissuras devidas a assentamentos diferenciais dos apoios

De acordo com (Silva, 1998), (Jacome, 2005) e (Sampaio, 2010), os principais fatores que levam a que ocorram assentamentos diferenciais são:

- Deficiente consolidação do terreno;

- Heterogeneidade do solo de fundação;
- Fundações sobre aterros;
- Construção de diferentes tipos de fundações;
- Deficiente dimensionamento dos elementos da fundação;
- Influência de fundações vizinhas.

As fissuras vão evoluindo gradualmente e são tanto mais severas quanto mais rígida for a estrutura. Os assentamentos diferenciais podem danificar tanto os elementos estruturais, como as paredes de enchimento de alvenaria.

2.5.7 Corrosão das Armaduras

A corrosão das armaduras pode levar à deterioração do betão, provocando mesmo o aparecimento de fissuras, figura 2-14. Quando ocorre a oxidação do aço, a ferrugem resultante vai ocupar mais espaço do que o aço ocupava inicialmente. Esta expansão cria tensões no betão, que podem provocar delaminação e fragmentação.



Figura 2-14 – Fissuras por corrosão da armadura

A progressão da corrosão ocorre de acordo com a figura 2-15, na qual se demonstra a progressão da deterioração da estrutura devido à corrosão das armaduras.

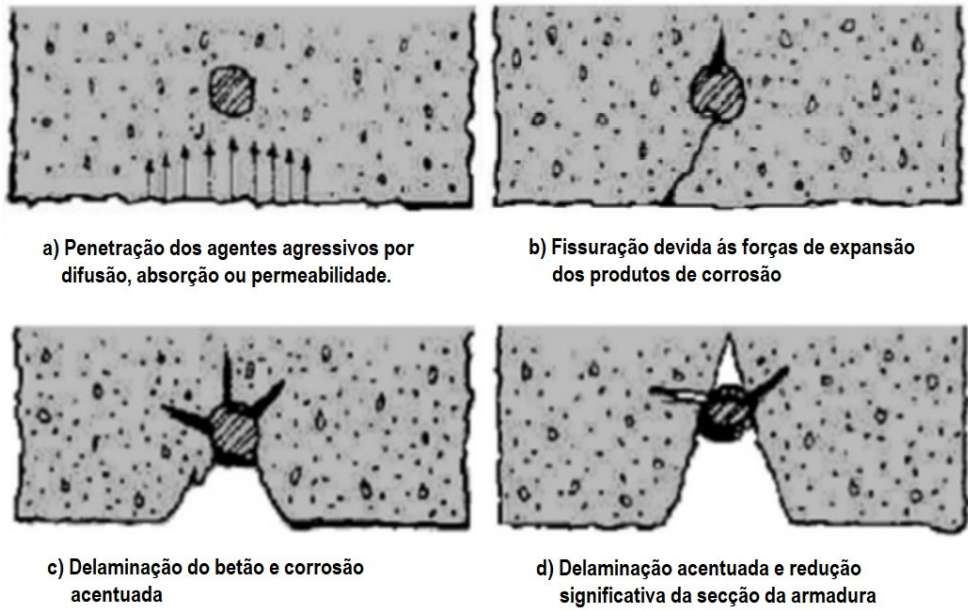


Figura 2-15 – Progressão da corrosão de armaduras

2.5.8 Colocação Incorreta de Armaduras e Cabos de Pré-esforço

Uma colocação das armaduras sem serem respeitados os recobrimentos necessários, ou regulamentares ou o seu deslocamento durante a fase de betonagem pode implicar um deficiente recobrimento das mesmas, figura 2-16, levando a que se formem fissuras no betão (Lemay, s.d.). Os deslocamentos das armaduras antes do endurecimento do betão podem provocar igualmente fissuras.



Figura 2-16 – Fissuras por mau posicionamento de armaduras

No caso dos cabos de pré-esforço, figura 2-17, a sua excentricidade tem que estar de acordo com o projeto, ou a capacidade resistente será necessariamente menor podendo provocar fissuração e mesmo colapso.

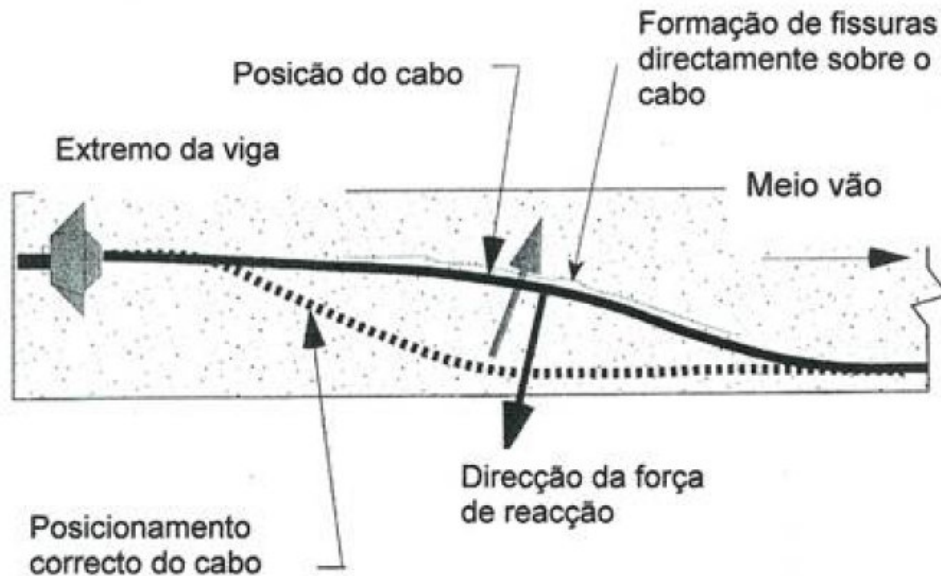


Figura 2-17 – Cabo de pré-esforço mal posicionado

2.5.9 Cargas Mecânicas

Fissuração provocada por tração, compressão, torção, esforço transversal, flexão ou pela combinação de vários tipos de esforços que conduzem as tensões atuantes no betão superiores às tensões resistentes, figura 2-18. As fissuras mais frequentes devidas a excesso de tensão resultantes de carregamentos são as de tração e usualmente atravessam toda a secção a causa está associada à fragilidade do material quando comparada com a resistência à compressão. As fissuras paralelas à direção do esforço com espaçamento e traçado irregular são usualmente fissuras resultantes do efeito do coeficiente de Poisson, isto é, para compressões muito elevadas geram-se deformações transversais que resultam em trações que o material não consegue absorver. As fissuras por flexão surgem no bordo onde se verificam tensões de tração e progridem normalmente perpendicularmente ao eixo das peças lineares. As fissuras de torção contornam toda a periferia da peça e têm desenvolvimento com inclinação de 45°, já as devidas a esforço transversal aparecem tão rapidamente quando maior for a evolução das tensões.

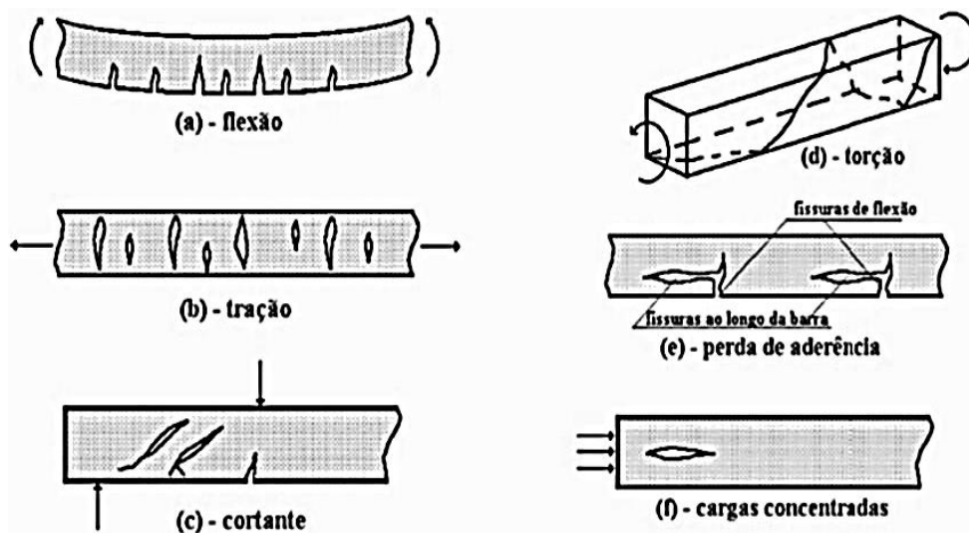


Figura 2-18 – Fissuras devidas a cargas mecânicas (Souza, 1998)

2.5.10 Cristalização de sais

Ocorre quando há elementos em contacto com soluções salinas. Com a evaporação a solução salina cristaliza, aumentando o seu volume. A fissuração ocorre por tensões resultantes da cristalização dos sais nos poros do betão (Lapa, 2008).

2.5.11 Ciclo gelo-degelo

A fissuração desenvolve-se atendendo a que se trata de um fenómeno que ocorre quando existem superfícies expostas à água com carácter permanente ou quase-permanente, os poros e fissuras já existentes no betão ficam saturados pelo contacto com a água, quando se atingem temperaturas negativas. Essa água congela e expande, gerando tensões no interior do betão e consequentemente fissuras e destacamento do betão superficial, na figura 2-19 encontra-se representado este fenómeno.



Figura 2-19 - Ciclo gelo-degelo (adaptado de RainGuard, 2017)

2.5.12 Ações Sísmicas

A ação dos sismos causa geralmente anomalias graves nas estruturas, podendo ir desde deformações até ao colapso total, figura 2-20. A fissuração mais típica nestes casos é uma fissuração a $45^\circ(+ e -)$ ou seja uma fissuração em X, devido à impossibilidade acomodar grandes deslocamentos interpisos que podem verificar-se nos dois sentidos da direção horizontal (chama-se mesmo X-cracking e é típica dos panos de enchimento ou eventualmente paredes resistentes (estruturas verticais laminares).



Figura 2-20 - Fissuras e Colapso de Estruturas devido à Ações Sísmicas (ADBC, 2018)

2.5.13 Reação alcalis-sílica

Neste caso a fissuração tende a acontecer uma vez que alguns agregados contêm sílica reativa que reage com os alcalis presentes no cimento, formando um gel que envolve os agregados. Teores elevados de humidade levam a que o gel expanda, criando trações no betão, o que leva à sua fissuração, diminuição de resistência e perda de integridade. A presença de eflorescências, juntamente com fissuração irregular é uma evidência de que se pode estar perante uma reação alcalis-sílica. (Gromicko, et al, 2014)

2.5.14 Ação do Fogo

O fogo causa fortes variações de volume (provocando gradientes de temperatura extremos), resultando em fissuração.

2.6 INSPEÇÃO E MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

A inspeção e monitorização das estruturas é uma necessidade em todo o tipo de obras, mas ainda mais em estruturas de betão as quais são afetadas por um grande número de fatores que, como mencionado anteriormente, podem influenciar de uma forma significativa a sua vida útil. O grande volume de obras em betão armado realizadas nos últimos 50 anos ainda reveste de uma acrescida responsabilidade a que este serviço seja efetuado de forma contínua e com a responsabilidade que tal facto implica. Não têm sido muitos os casos em Portugal em que uma estrutura tenha colapsado, mas já ocorreram, figura 2-21, e com graves prejuízos humanos, sociais e económicos



Figura 2-21 – Colapso da Ponte Hintze Ribeiro (Observador, 2021)

A inspeção e monitorização das estruturas não deve nem pode ser descurada, sendo este facto tanto mais importante quanto o tempo de vida útil definido para cada estrutura.

2.6.1 Tempo de Vida Útil

De acordo com a definição, o tempo de vida útil de projeto é o período durante o qual se pretende que uma estrutura ou parte da mesma seja utilizada para as funções a que se destina, com a manutenção prevista, mas sem necessidade de grandes reparações (Eurocódigo 0 – Bases para o projeto de estruturas). Não quer isto dizer que o tempo de vida útil da estrutura não possa ser superior ou que não possa passar

mais tempo sem que sejam necessárias intervenções, o tempo de vida útil serve ainda para definir o chamado tempo de referência para definição do valor característico das ações definidas com base estatística. O tempo de vida útil é, portanto, um valor mínimo exigido pelas normas para o período de tempo sem que tais intervenções se realizem. De acordo com a Tabela 2-1, verifica-se que estão definidos determinados valores indicativos do tempo de vida útil de projeto, sendo esta tabela constante do Eurocódigo 0– Bases para o projeto de estruturas.

Tabela 2-1 – Valores indicativos do tempo de vida útil de projeto

Categoria do tempo de vida útil de projeto	Valor indicativo do tempo de vida útil de projeto (anos)	Exemplos
1	10	Estruturas provisórias ⁽¹⁾
2	10 a 25	Componentes estruturais substituíveis, por exemplo, vigas-carril, apoios
3	15 a 30	Estruturas agrícolas e semelhantes
4	50	Estruturas de edifícios e outras estruturas correntes
5	100	Estruturas de edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil.

⁽¹⁾ As estruturas ou componentes estruturais que podem ser desmontados, tendo em vista a sua reutilização, não deverão ser consideradas como provisórias

Na Tabela 2-1 evidenciam-se os tempos de vida útil sugeridos pelos códigos em vigor. No ato de dimensionamento de uma estrutura é tida como base uma determinada utilização que a mesma terá durante o seu tempo de utilização, no entanto, em algumas estruturas esta utilização poderá ser alterada o que implicará consequências diferentes para a estrutura do que foi originalmente tido em conta no seu dimensionamento. Esta alteração poderá implicar uma reavaliação do tempo de vida útil da mesma.

A segurança das estruturas não é uma opção é uma obrigação, nesse sentido, são realizadas inspeções e monitorizações de uma forma faseada a todas as estruturas mediante uma escala definida.

2.6.2 Monitorização

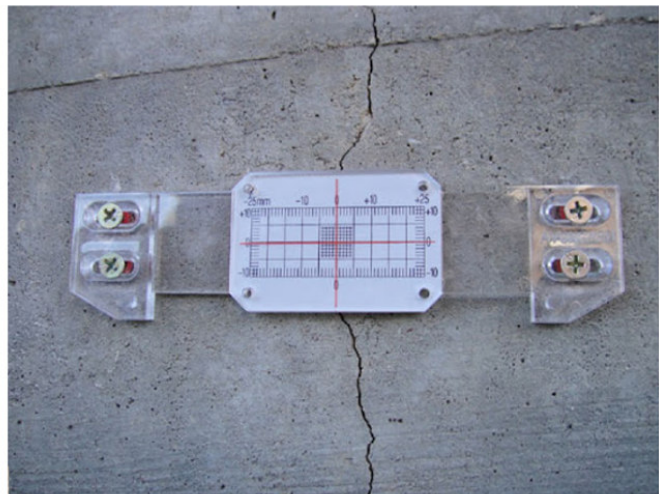
Os meios e métodos utilizados diferem de estrutura para estrutura, atendendo não só à própria geometria da estrutura, mas à sua envolvente, implantação e aos dados que se pretendem obter. A monitorização

permite obter dados da estrutura durante as várias fases que a mesma atravessa, quer seja na execução, ou em exploração. Estes dados são obtidos por sistemas de monitorização que depois permitem uma análise dos dados obtidos e assim elaborar uma resposta mais assertiva baseada em um grau de informação suficientemente elevado e não em projeções.

A escolha dos equipamentos de monitorização é bastante ampla sendo que estes podem ser manuais, tais como, a colocação de testemunhos, esclerómetros de pêndulo ou ensaios com o martelo de Schmidt, ou elétricos como os sensores, fissurómetros e comparadores de deslocamento. Na figura 2-22 são apresentados dois destes equipamentos. Uma outra alternativa são os sensores de varrimento laser e o tema da presente dissertação os UAV.



a) Esclerómetro de Schmidt



b) Fissurómetro

Figura 2-22 – Exemplo de dois equipamentos de monitorização

2.6.3 Inspeção

No mesmo sentido do ponto anterior a inspeção de uma estrutura depende de muitos fatores que influenciam diretamente como a inspeção é executada. Os métodos mais usuais são a utilização de equipamentos de elevação em estruturas de reduzida dimensão, figura 2-23, tais como plataformas de elevação de tesoura, braços elevadores articulados, andaimes, bailéus, que permitem a inspeção visual dos elementos e a elaboração de medições com meios manuais e o registo fotográfico das anomalias.



a) Braço Articulado
(Genielift, 2021)



b) Plataforma Tesoura (Directindustry, 2021)

Figura 2-23 – Exemplo de dois equipamentos usados na inspeção de estruturas

Para estruturas em que a envolvente ou a dimensão da mesma não permita o recurso a estes meios é usual a utilização de outros meios que permitam executar a inspeção, neste caso, os mais usuais são as plataformas bybridge e o recurso a alpinismo industrial, figura 2-24. Constituem-se normalmente como opções bastante onerosas e com prazos de execução bastante condicionantes.



a) Plataforma bybridge (bridgebybridge, 2021)



b) Alpinismo Industrial (Pissutti, 2010)

Figura 2-24 – Outros métodos de inspeção visual

Em ambos os casos mencionados, as medições são efetuadas por meio de equipamentos manuais seguindo-se a recolha de fotos para a elaboração da ficha de inspeção da estrutura.

2.6.4 Utilização de UAV

O uso de equipamentos UAV é já aplicado em alguns países que vêm desenvolvendo metodologias para a aplicação sistemática destes meios de inspeção remota, quer na fase inicial da obra, figura 2-25, quer no decurso da sua vida útil, dado que as monitorizações / inspeções são mais rápidas, com custos mais baixos e a possibilidade de utilização da documentação fotográfica e do mapeamento com elevada precisão permitir com outras tecnologias como o Building Information Modeling (BIM) uma modelação da estrutura que em muitos casos é inexistente, por se tratarem de estruturas em que os projetos originais ainda não eram sequer digitais.



Figura 2-25 – Inspeção de obra na fase de construção com UAV (Salleto, 2021)

Esta diminuição dos custos e a garantia de qualidade final são um fator importante para a escolha destas ferramentas, no entanto, como se trata de um método ainda recente possui determinadas limitações que dificultam ainda a sua massificação, nomeadamente, a dificuldade na obtenção de medições fidedignas das fissuras (desenvolvimento e espessura) a necessidade de melhoramento dos equipamentos para garantir a restituição exata das geometrias normalmente baseada na utilização de sistemas de GNSS onde tal não se afigura fácil (zona inferior do tabuleiro, tuneis etc.). Outros aspetos importantes respeitam ao desconhecimento das capacidades desta metodologia, à utilização de tecnologias que grande parte dos técnicos ainda não domina e ao facto de, até ao momento, esta ser uma metodologia semi-automática que implica a necessidade de técnicos para efetuarem a análise da documentação fotográfica produzida e assim identificarem as anomalias das estruturas.

CAPÍTULO 3

PROCESSAMENTO DE IMAGENS

O processamento de imagens tem uma importância vital em todo o processo e somente os avanços que foram sendo efetuados nesta matéria nos últimos anos permitem a elaboração do presente estudo e a criação dos meios necessários à elaboração de ferramentas computacionais que permitam responder e atingir os objetivos propostos na presente dissertação.

O processamento de imagens é um estágio para novos processamentos de dados tais como Machine Learning ou reconhecimento de padrões. A maioria das técnicas envolve o tratamento da imagem como um sinal bidimensional, no qual são aplicados padrões de processamento de sinal.

3.1 MACHINE LEARNING

O Machine Learning consiste na execução de algoritmos que criam de modo automático modelos de representação de conhecimento com base num conjunto de dados. A ideia em que assenta esta aprendizagem é que se deve treinar as máquinas, dando-lhes acesso aos dados históricos, uma ou mais medidas de desempenho, e deixando o algoritmo “aprender”, ou seja, ajustar de modo iterativo o modelo de representação de conhecimento de modo que este melhore o seu desempenho. Após este treino, o modelo tem um potencial para efetuar previsões de qualidade em situações futuras e que estejam relacionadas com padrões históricos.

Este é um método de análise de dados que está tão instituído no quotidiano que praticamente é impercetível a sua utilização, dada toda a familiaridade existente, sempre que se efetuam pesquisas na internet independentemente do terminal (PC ou telemóvel) é usual a receção de recomendações de pesquisa as quais são baseadas em algoritmos de Machine Learning.

A possibilidade de desenvolvimento da inteligência artificial foi largamente impulsionada pela quantidade de dados disponíveis com a massificação da internet, pelo aumento que se tem registado da capacidade

computacional assim como um maior suporte por parte de grandes empresas e investigadores que têm desenvolvido trabalho nesta área. Um dos exemplos de fácil identificação e compreensão é o dos filtros de *spam* (*Sending and Posting Advertisement in Mass*) no qual a utilização desta aprendizagem permite a identificação dos *emails* de *spam* baseada em conhecimento adquirido e pela identificação dos utilizadores. Neste exemplo o processo de aprendizagem tem como base o esquema apresentado na figura 3-1. Uma das necessidades deste tipo de utilização passa por uma base de dados muito robusta, sendo quem quanto mais diversificada (dentro do objetivo definido) melhores serão os resultados obtidos.

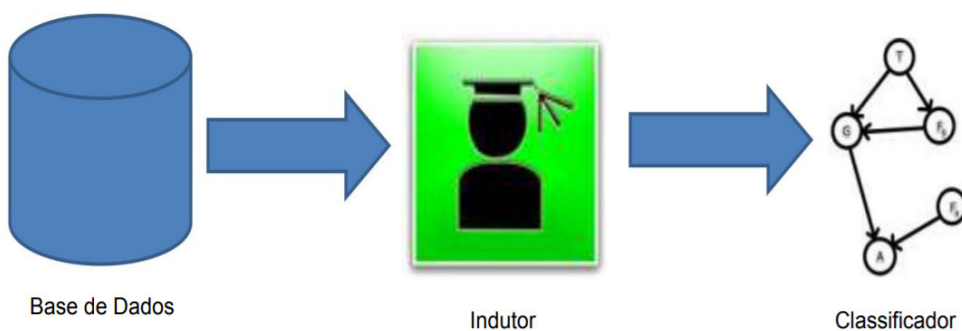


Figura 3-1 – Modelo de aprendizagem de algoritmo de SPAM

A testagem e avaliação do modelo é efetuada com base no indicado na figura 3-2, em que após a avaliação dos resultados obtidos é possível a verificação da fiabilidade do mesmo.

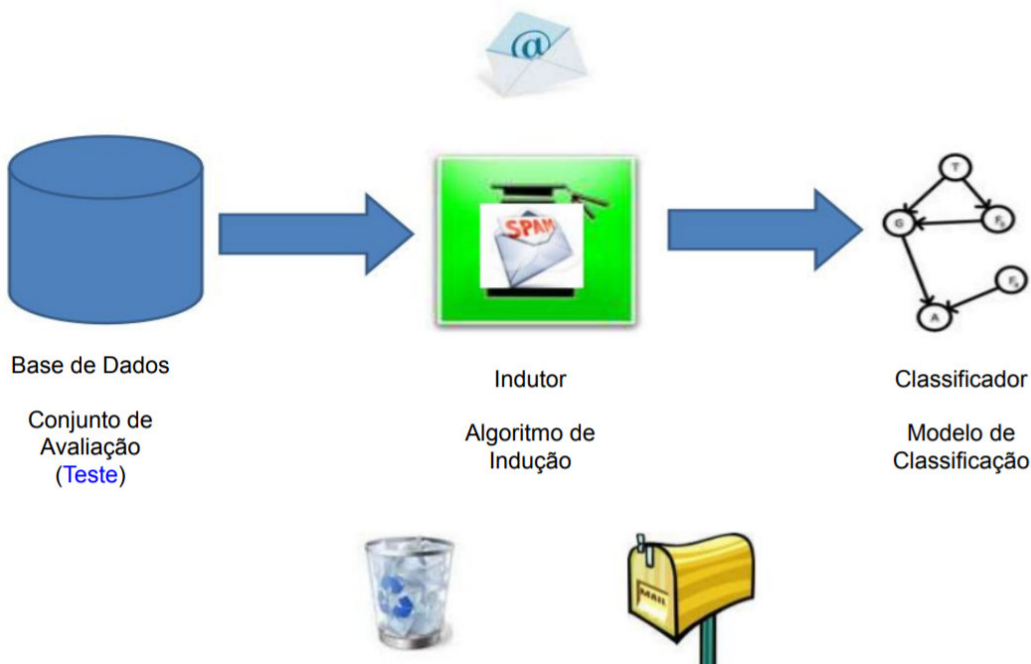


Figura 3-2 – Avaliação do modelo

3.2 CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS – CNN

As CNN são um tipo de Deep Learning. A característica mais marcante das CNN, é a sua estruturação semelhante à rede de neurónios existente no cérebro humano. Esta inspiração permitiu na área da inteligência artificial a criação de um modelo computacional de um neurónio conforme o representado na figura 3-3. Com apenas um neurónio existem muitas limitações ao que se consegue fazer, no entanto estes podem ser combinados entres eles em estruturas de camadas, cada uma com números diferentes de neurónios. São sistemas compostos por vários nós que se interconectam em diversas ramificações. Estas redes aprendem por meio da atualização e ampliação desses laços e interconexões. Uma CNN, não é mais do que um algoritmo de aprendizagem profundo que pode captar uma imagem de entrada, atribuir importância (valores que podem ser aprendidos) a vários aspetos / objetos da imagem e ser capaz de os diferenciar

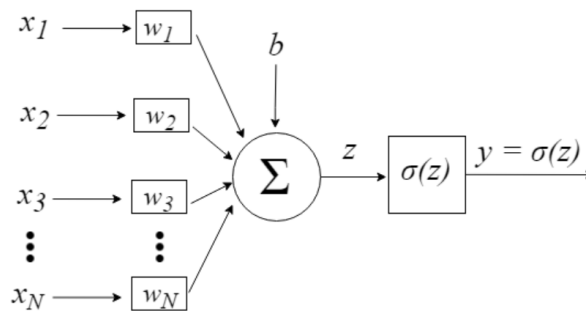


Figura 3-3 – Modelo computacional de um neurónio

Uma das primeiras aplicações bem sucedidas de uma rede neural foi efetuada em dezembro de 1989 por Yann LeCun com a publicação "Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition". Neural Computation no qual foi desenvolvido a LeNet estando a sua arquitetura representada na figura 3-4, a qual foi projetada com sete camadas entre convoluções e totalmente conectado.

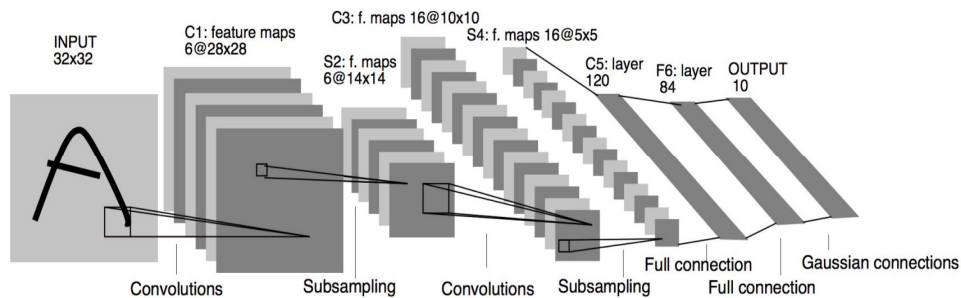


Figura 3-4 – Arquitetura da Rede LeNet (Yann LeCun et al, 1989)

Tratou-se um ponto de partida, pois desde essa data foram muitos os avanços, tornando-se as CNN mais profundas e complexas, como a AlexNet que possui 8 camadas e apresenta sessenta milhões de parâmetros ou a GoogleNet a qual possui vinte e duas camadas e quatro milhões de parâmetros. Este crescimento permitiu a criação de CNN's com funções específicas e com modelos variáveis que permitem uma escolha de acordo com a finalidade a que as mesmas se destinam, como se pode verificar na figura 3-5, sendo que na presente dissertação a escolha recaiu na AlexNet.

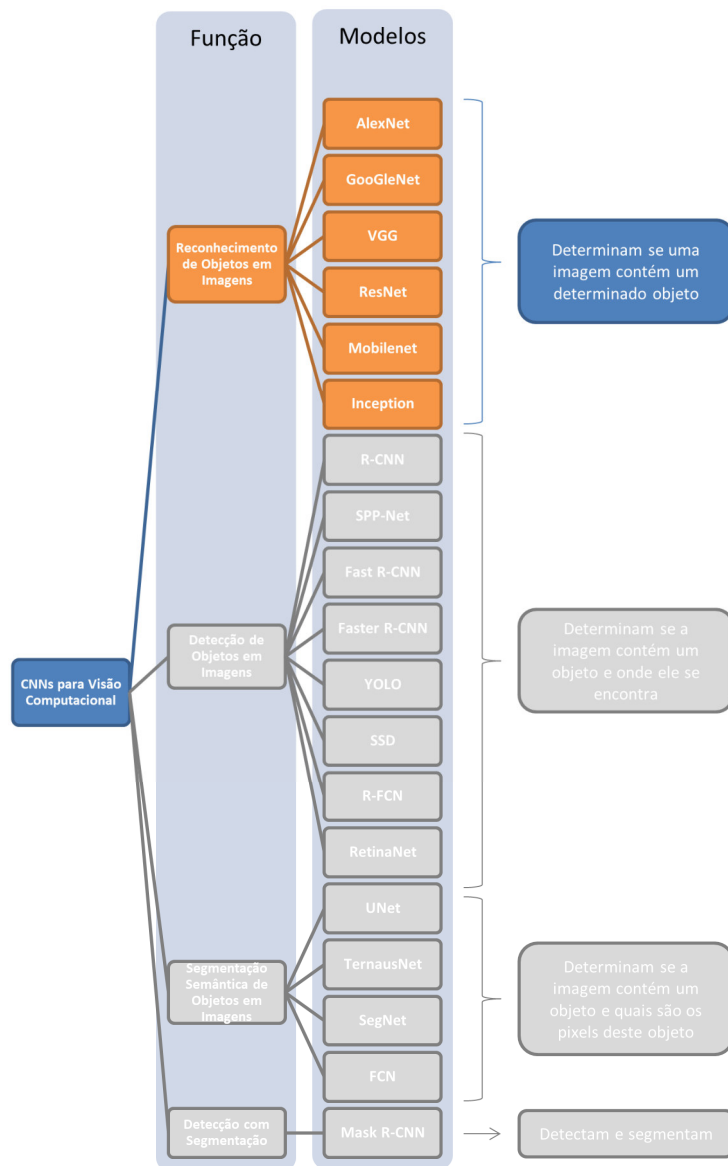


Figura 3-5 - Redes neuronais convolucionais para classificação de imagens e reconhecimento de objetos

A AlexNet possui uma arquitetura muito similar à LeNet desenvolvida por Yann LeCun mas é muito mais profunda, com mais filtros por camada e com camadas convolucionais sobrepostas. Na figura 3-6 é possível analisar a arquitetura da AlexNet a qual foi desenvolvida por Alex Krizhevsky, e publicada em um paper “ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks”

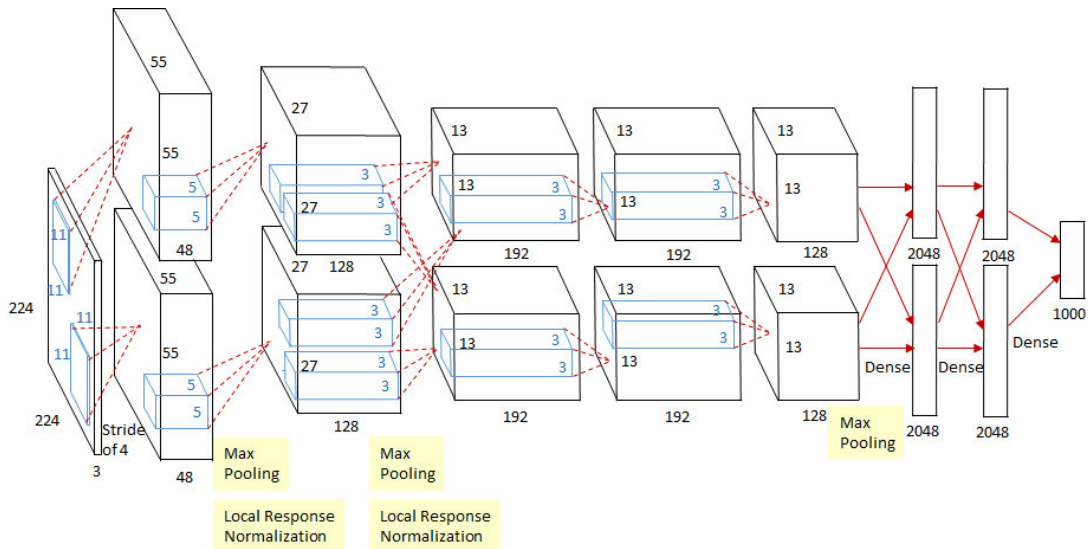


Figura 3-6 – Arquitetura da AlexNet (Lapix, 2020)

Quando se refere o reconhecimento/classificação de imagens, as entradas são usualmente matrizes tridimensionais com altura e largura (de acordo com as dimensões da imagem) e profundidade, determinada pela quantidade de canais de cores. Em geral as imagens utilizam três canais, RGB, com os valores de cada pixel.

As convoluções funcionam como filtros que analisam pequenos secções e vão percorrendo toda a imagem na detecção dos traços mais marcantes, ou seja, com uma imagem 32x32x3 e um filtro que cobre uma área de 5x5 da imagem com movimento de 2 saltos (chamado de stride), o filtro passará pela imagem inteira, por cada um dos canais, formando no final um *feature map* ou *activation map* de 28x28x1. A profundidade da saída de uma convolução é igual à quantidade de filtros aplicados. Quanto mais profundas são as camadas das convoluções, mais detalhados são os traços identificados com o *activation map*.

O filtro, que também é conhecido por *kernel*, é formado por pesos inicializados aleatoriamente, que são atualizados a cada nova entrada durante o processo de *backpropagation*. A pequena região da entrada onde o filtro é aplicado é chamada *receptive field*.

A função de ativação serve para trazer a não-linearidades ao sistema, para que a rede consiga aprender qualquer tipo de funcionalidade. Essa função anula todos os valores negativos da saída da camada anterior.

Uma camada de *pooling* serve para simplificar a informação da camada anterior. Assim como na convolução é escolhida uma unidade de área, por exemplo 2x2, para transitar por toda a saída da camada

anterior. A unidade é responsável por resumir a informação daquela área num único valor. Se a saída da camada anterior for 24x24, a saída do *pooling* será 12x12. Além disso, é necessário escolher como será efetuada a sumarização. O método mais utilizado é o *maxpooling*, no qual apenas o maior número da unidade é passado para a saída. Essa sumarização de dados serve para diminuir a quantidade de pesos a serem aprendidos e também para evitar *overfitting*.

3.3 TREINO DA REDE

As CNN's eliminam a necessidade de efetuar uma extração manual de características, fazendo-o automaticamente através das imagens fornecidas. Esta extração automática faz com que este modelo de Deep Learning seja altamente fidedigno para classificação de objetos, e quando comparado com outros algoritmos de classificação de imagem exige um menor tempo de pré-processamento. (Alves, 2018). O processo de treino da rede, como se pode analisar na figura 3-7, passa por introduzir uma quantidade de amostras de dados fazendo com que a rede aprenda os padrões referentes ao reconhecimento pretendido, neste caso em concreto as fissuras, e quando amostras são introduzidas na rede ela seja capaz de reconhecer se as mesmas contêm o padrão para a qual foi treinada.

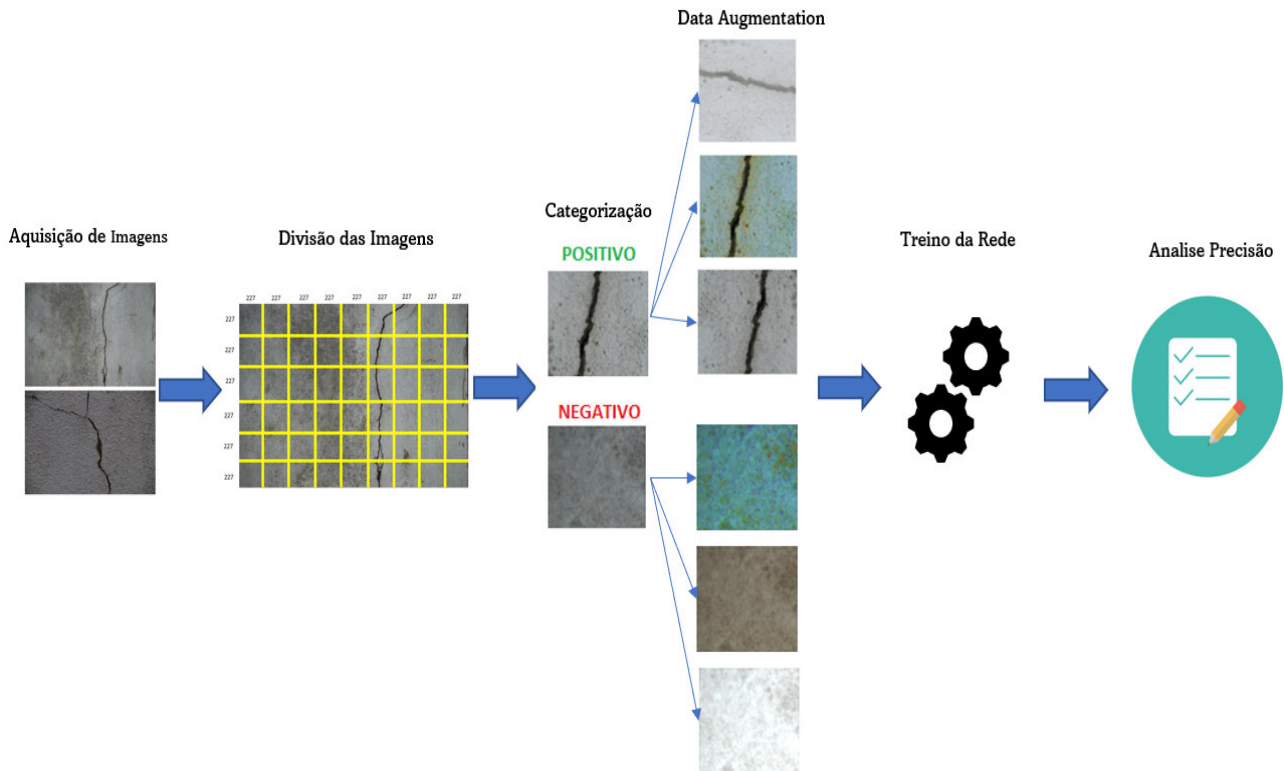


Figura 3-7 – Processo de treino da Rede

3.3.1 Base de Dados

O treino da rede baseia-se, como mencionado, em fornecer imagens com fissuras e sem fissuras (o objeto da dissertação) com o intuito preparar o algoritmo para uma classificação correta das imagens fornecidas. A construção de uma base dados de imagens o mais completa possível torna-se consequentemente essencial. A base de dados utilizada foi criada pela obtenção de imagens de fissuras de outras bases de dados, de fotografias *online* (só usando fotos de elevada qualidade) e de fotografias obtidas em contexto real as quais são uma grande parte da base de dados produzida.

3.3.2 Scripts de Apoio à Criação da Base de Dados

Como é possível observar na figura 3-7 apresentada anteriormente, após a obtenção da base de dados cada imagem é dividida em quadrados de dimensão 227x227 *pixels*, dimensão escolhida por ser a dimensão *standard* definida na AlexNet. Este processo foi inicialmente executado por utilização do *software* Photoscape, no entanto atendendo ao elevado número de imagens a tratar e ao tempo associado com esta tarefa foi elaborado um *script* em Matlab, que permitiu automatizar este processo (ver figura 3-8).

```
%% Automated image-splitter for R-CNN dataset building
%% Phase 1

% 1 - get source folder
source = uigetdir('C:/','Select source folder');

% 2 - get export destination folder
export = uigetdir('C:/','Select destination folder');
cd(export);

% 3 - get file names and directories
files = dir(fullfile(source, '*.jpg'));

% 4 - start base name for file exports
basename = '0_';

%% Phase 2
```

Figura 3-8 – Parte do *Script* Auto-Image-Splitter

A forma como este *script* a que foi dado o nome *Auto_Image_Splitter* atua, é de uma forma simplificada a seguinte: ao executar o código é solicitada a origem das imagens que se pretendem seccionar na dimensão atribuída, seguindo-se a indicação do diretório e nome do ficheiro onde as imagens já divididas deverão ser guardadas, O processo é repetido em sequência automática para todas as imagens seguintes.

O número de imagens obtidas de dimensão de 227×227 pixels varia de acordo com a resolução de cada imagem original. Na imagem 3-9 encontra-se indicada a quantidade obtida com base na imagem indicada a qual apresenta uma dimensão de 3872×2592 pixels.

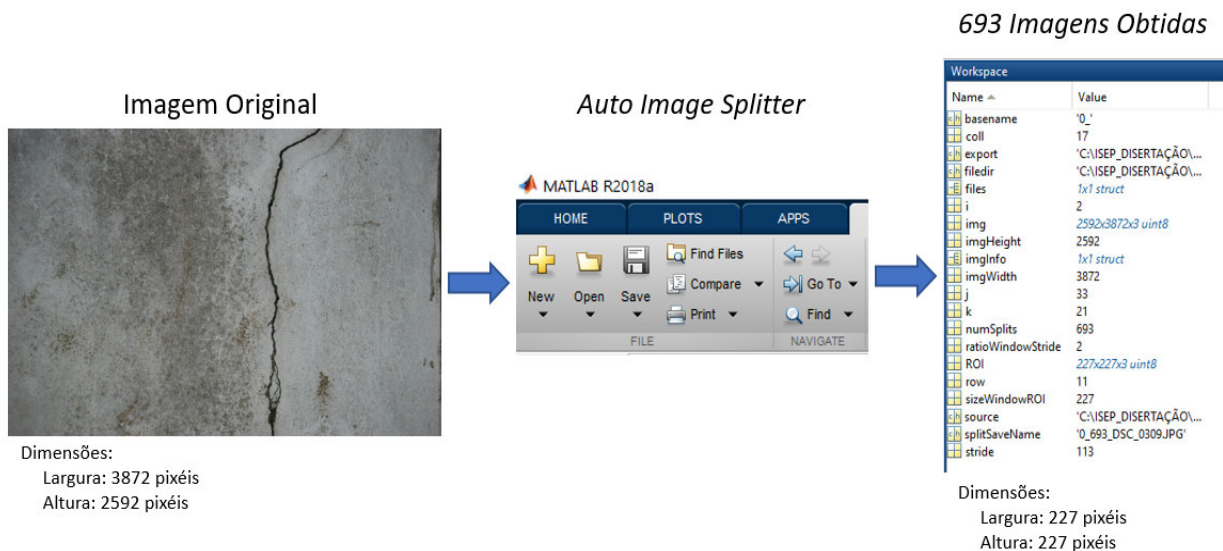


Figura 3-9 – Processo de divisão com *Auto_Image_Splitter*

Após a execução do método mencionado na figura 3-9, foi possível obter uma base de dados mais extensa, no entanto, após a divisão de cada imagem torna-se necessário efetuar uma categorização das imagens obtidas de modo a separar as imagens com fissura e as imagens sem fissura. Este processo é bastante moroso atendendo ao elevado número de imagens obtidas a partir de cada fotografia. No processo de categorização foram criadas duas pastas uma de positivos (imagem com fissura) e outra de negativos (imagem sem fissura).

A necessidade de obtenção de um *dataset* com uma dimensão na ordem das 100.000 a 120.000 imagens conduziu à necessidade de utilização de *Data Augmentation*, para o qual também foi criado um *script* pelas mesmas razões enunciadas anteriormente e que deram origem ao *Auto_Image_Splitter*.

A *Data Augmentation* é uma técnica utilizada para gerar novos exemplares de dados com o intuito de aumentar a generalidade do modelo pela utilização de algumas técnicas de tratamento de imagem, permitindo, a partir de um original, a criação de um elevado número de diferentes imagens como se pode ver pela figura 3-10 em que, tendo por base uma imagem inicial foram obtidas 20 imagens.

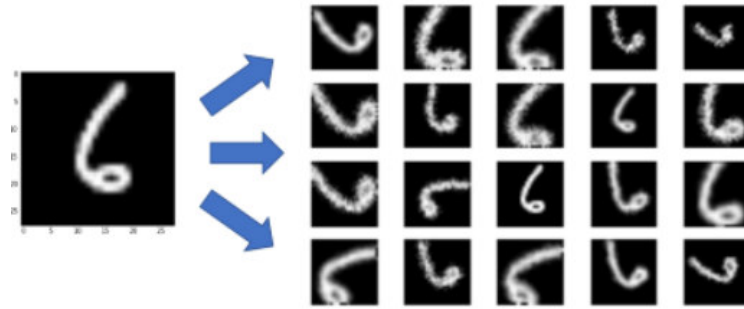


Figura 3-10 – Exemplo de utilização de Data Augmentation

Usualmente utilizam-se para a *Data Augmentation* as seguintes técnicas:

- Rotação da imagem;
- Brilho;
- Orientação da imagem;
- Ampliação;
- Foco

Neste sentido foi desenvolvido um *script* para aplicar algumas das técnicas indicadas, de forma automática e não de forma individual a cada imagem. Uma parte do *script* encontra-se reproduzido na figura 3-11

```

1      %% Data Augmentation - Rotation, Contrast, Brightness, Blur, Zoom
2
3      %% Phase 1
4
5      % 1 - get source folder
6      source = uigetdir('C:/','Select source folder');
7
8      % 2 - get export destination folder
9      export = uigetdir('C:/', 'Select destination folder');
10     cd(export);
11
12     % 3 - get file names and directories
13     files = dir(fullfile(source, '*.jpg'));
14
15
16     %% Phase 2
17
18     % 1 - augmentation loop (split by split)
19     for i = 1:length(source)
20
21         %1.1 - get single image file
22         filedir = fullfile(source, files(i).name);
23         img = imread(filedir);
24         [pathsrc, name, ext] = fileparts(filedir);

```

Figura 3-11 – Parte do *Script* Data Augmentation

O princípio de utilização do *script* é similar ao anterior. Na primeira fase é solicitado o nome do diretório onde se encontram as imagens originais, seguidamente o nome do diretório de destino das imagens criadas, as quais são guardadas com um nome que identifica quais as técnicas associadas à criação da imagem como se pode verificar na figura 3-12. No *script* desenvolvido foram utilizadas as técnicas:

- Rotation;
- Contrast;
- Brightness;
- Blur;
- Zoom

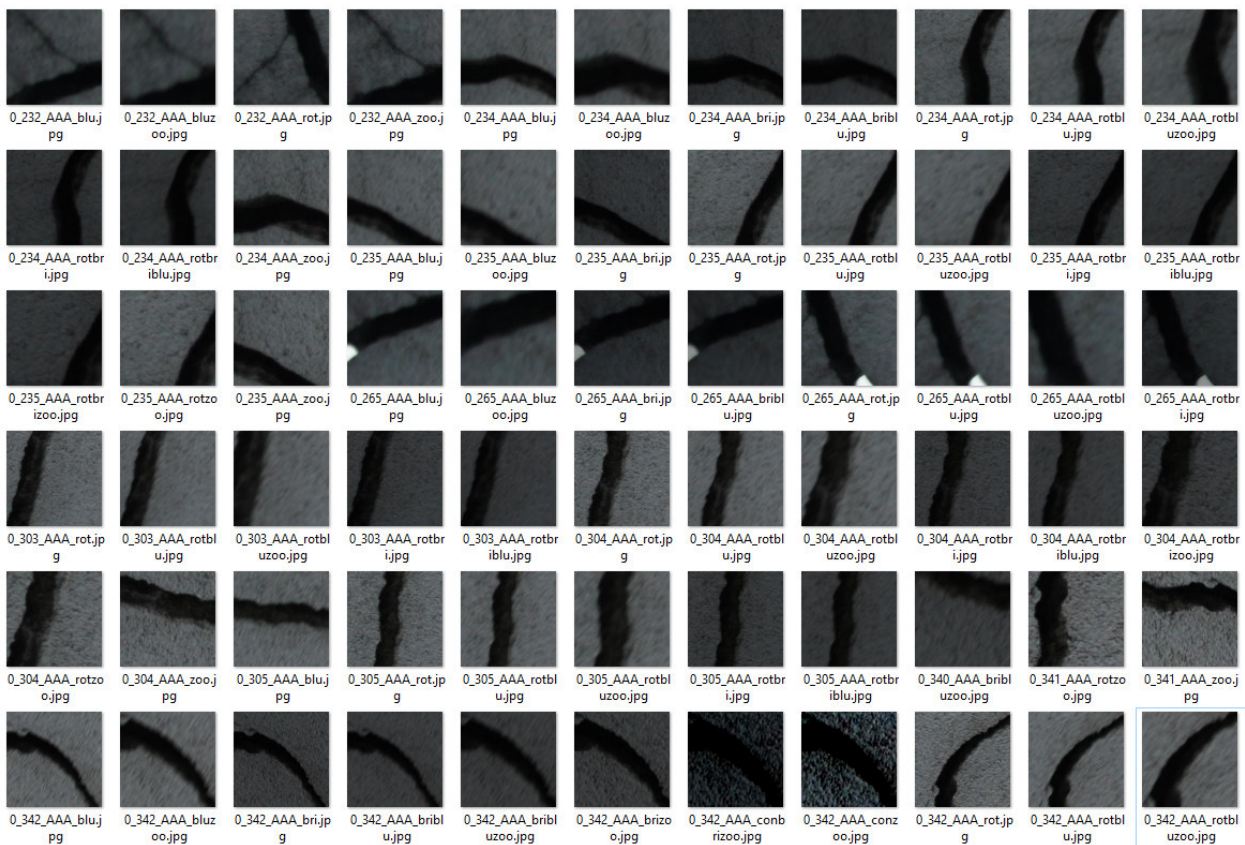


Figura 3-12 – *Output* da utilização do *script* Data Augmentation

Com o desenrolar do processo verificou-se que alguns parâmetros necessitavam de ser alterados e em alguns casos a conjugação de mais do que um parâmetro produzia imagens que não serviam os propósitos iniciais. Deste modo, foram efetuadas alterações nos valores dos parâmetros como *zoom* e *contrast*, no entanto, mesmo com as alterações efetuadas os *outputs* foram sendo todos analisados atendendo a que, em alguns casos pontuais, a imagem resultante não foi utilizada.

3.3.3 Dimensão da Base de Dados e Fiabilidade do Treino

Com o desenvolvimento do trabalho e adquirida uma maior confiança na utilização das CNN algumas dúvidas relativas ao treino foram surgindo, nomeadamente:

- Qual o número de *inputs* a ser dado ao treino para a obtenção dos melhores resultados?
- Qual a importância da diversidade dos *inputs* em relação à percentagem de eficácia da rede?
- Qual o número de *inputs* a partir do qual não se regista um aumento significativo na qualidade dos resultados obtidos?

Com o intuito de responder a estas questões optou-se por efetuar o treino de quatro redes diferentes, com as quantidades de imagens de acordo com o indicado na Tabela 3-1, e tendo por base alguns procedimentos previamente estabelecidos.

Tabela 3-1 – Dados do treino das quatro redes criadas

Rede	Número de Imagens com fissuras	Número de Imagens sem fissuras	Número total de Imagens
Rede 1	10.000	10.000	20.000
Rede 2	20.000	20.000	40.000
Rede 3	40.000	40.000	80.000
Rede 4	43.000	43.000	86.000

Como mencionado anteriormente foram tidos em consideração no treino da rede alguns procedimentos que permitiam uma análise dos dados obtidos, de acordo com os seguintes procedimentos:

- O treino da rede inicial, rede 1, servia de base ao treino das restantes redes;
- O treino das restantes redes foi efetuado pela incorporação de um maior número e de uma diversificação de imagens, mantendo sempre as imagens que serviram de base à rede anterior.

Para realizar o treino da CNN utilizou-se o programa Matlab, com a Deep Learning Toolbox, na qual estão implementados alguns dos mais populares algoritmos de redes neuronais convolucionais. As etapas mencionadas na figura 3-13, são as efetuadas quando se usa o algoritmo da AlexNet.

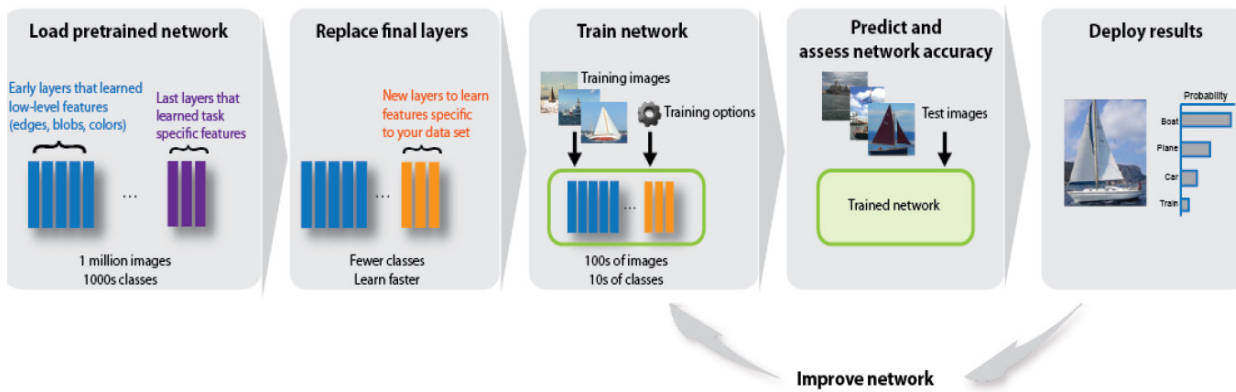


Figura 3-13 – Etapas de treino recorrendo à AlexNet

Para treino da rede foi utilizado o *script* em que parte se encontra apresentado na figura 3-14 e que foi identificado com o nome Cracknet_train_script.

```

1  %% AlexNet modified to classify Cracks on concrete
2
3  % Call AlexNet
4
5  net = alexnet;
6
7
8  % Access AlexNet's Layers
9
10 layers = net.Layers;
11
12 layers;
13
14
15 % Set up training data
16
17 rootFolder = 'C:\ISEP_DISERTAÇÃO\07_TREINO_REDE_4\TREINO';
18 categories = {'POSITIVO', 'NEGATIVO'};
19 imds = imageDatastore(fullfile(rootFolder, categories), 'LabelSource', 'foldernames');
20
21 %imds = splitEachLabel(imds, 500, 'randomize') % we only need 500 images per class
22 %imds.ReadFcn = @readFunctionTrain;

```

Figura 3-14 – Parte do Script de treino das Redes

Um outro aspeto a realçar, no que concerne à constituição da base de dados que deu origem a cada uma das redes treinadas, prende-se com a diversidade das fotografias que foi aumentando do treino da primeira rede até à quarta rede, como se pode verificar na figura 3-15, em que se apresenta uma amostra das imagens que constituem a base de dados da rede 1, e a figura 3-16 com uma amostra das imagens da rede 4.

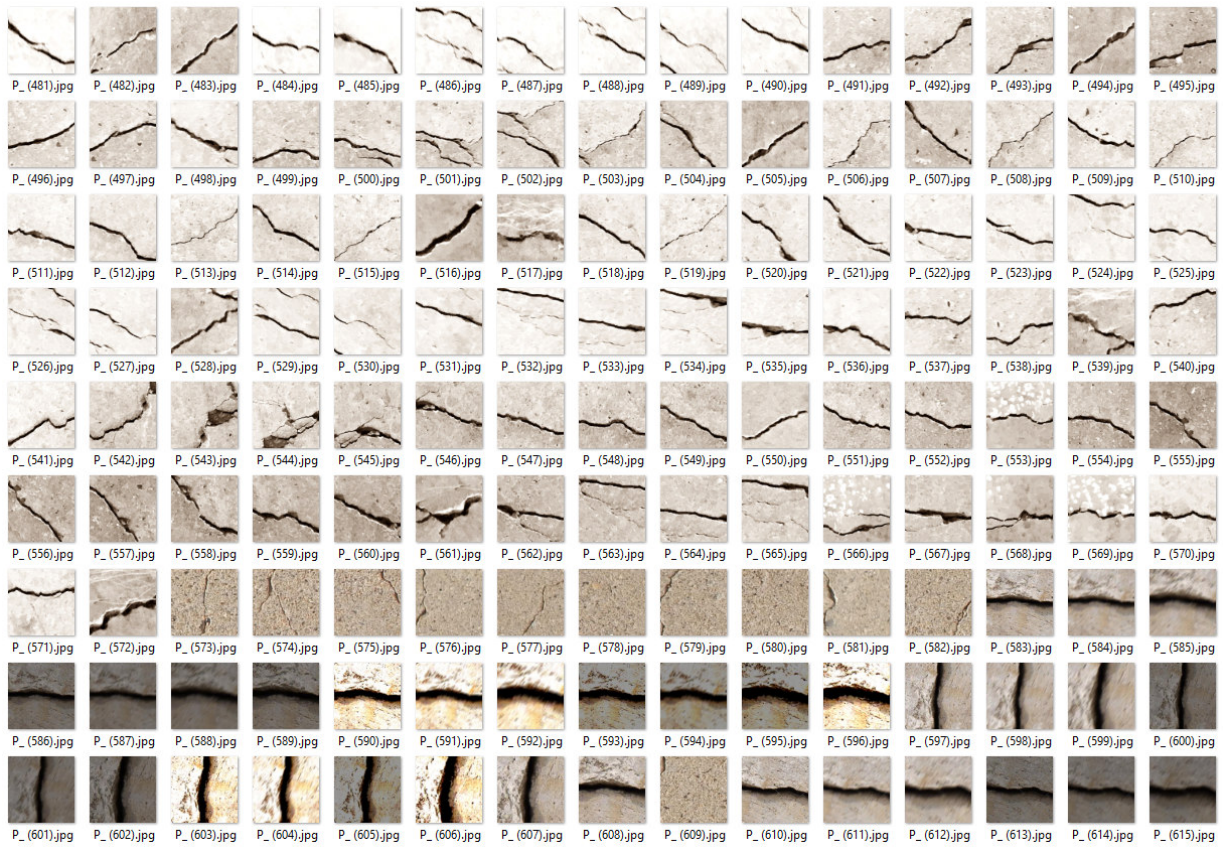


Figura 3-15 – Amostra das imagens com fissuras da rede 1

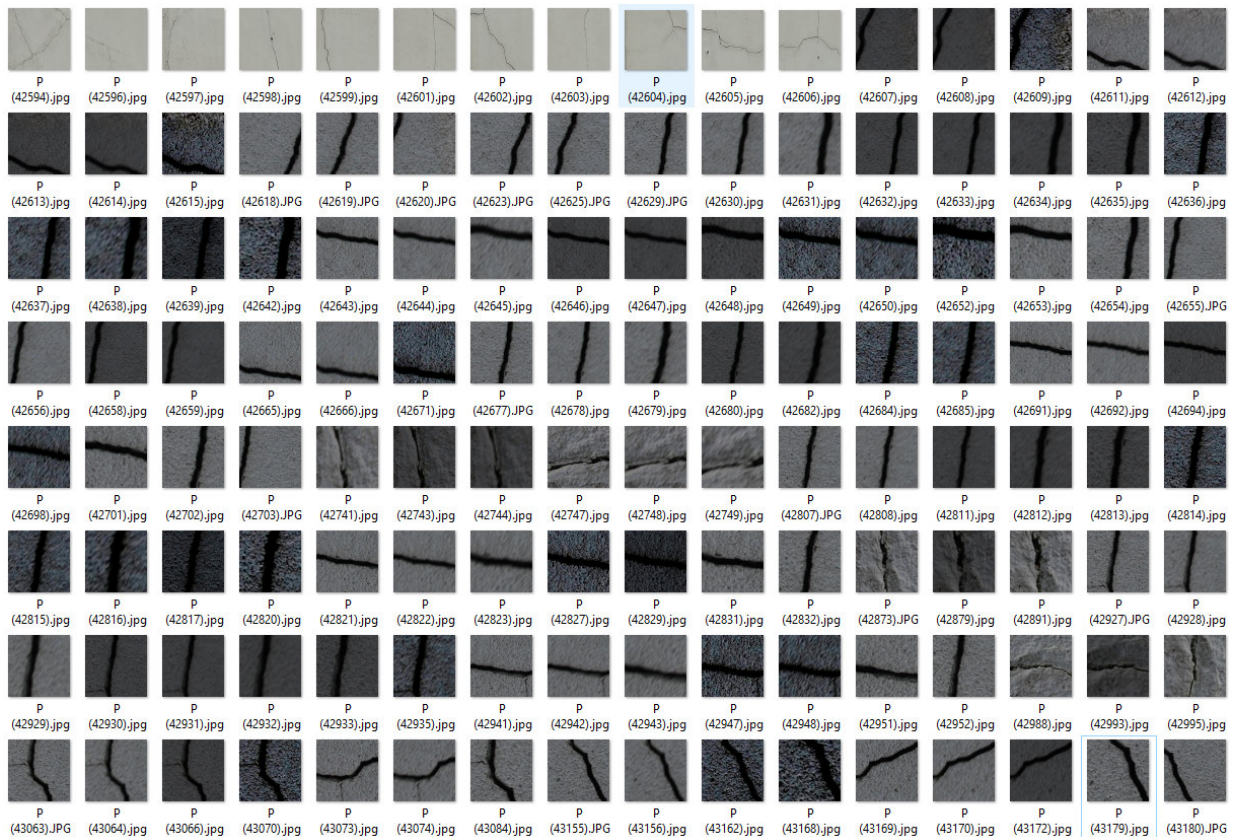


Figura 3-16 – Amostra das imagens com fissuras da rede 4

Verificou-se que, como seria expetável, a duração do treino de cada rede aumentou em função da quantidade de imagens da rede a treinar. O treino da rede foi efetuado num computador portátil, com as seguintes especificações técnicas, processador Intel(R) Core(TM) i7-105510U CPU @ 1.80GHz 2.30GHz e 16,0 GB de RAM instalada.

Os tempos de treino foram aumentando até o culminar de pouco mais de 10 horas para o treino da rede 4. De referir que a duração do treino da rede 3 foi muito aproximada da duração da rede 4.

CAPÍTULO 4

DETEÇÃO DE FISSURAS

Após o processo de treino de cada uma das redes no software Matlab por recurso ao algoritmo (ver 3.3.3 Dimensão da Base de Dados vs Fiabilidade do Treino) é criado um ficheiro com extensão “. mat” no qual se encontra a rede treinada. Na Tabela 4-1 identifica-se cada uma das redes e as características das mesmas.

Tabela 4-1 – Identificação das redes e dos ficheiros criados

Rede	Nome do ficheiro	Número total de Imagens usadas no treino
Rede 1	cracknet_1.mat	20.000
Rede 2	cracknet_2.mat	40.000
Rede 3	cracknet_3.mat	80.000
Rede 4	cracknet_3.mat	86.000

Com as quatro redes treinadas a metodologia programada passou pela criação de um algoritmo de deteção de fissuras, o qual foi executado no software Matlab.

4.1 PROCESSO

O algoritmo de deteção de fissuras compreende a realização de uma determinada sequência de passos que permita a obtenção de um resultado que é a deteção da fissura. Na figura 4-1 encontra-se indicada a forma como este algoritmo funciona com a identificação das suas principais etapas.

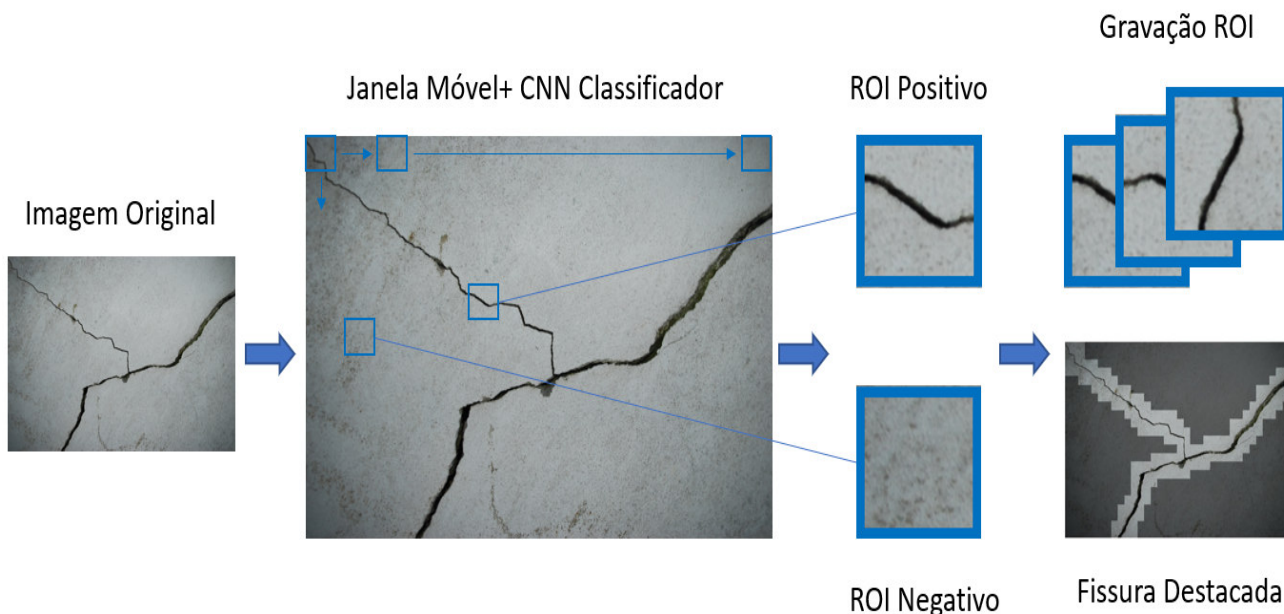


Figura 4-1 – Processo de deteção de fissura

A primeira etapa incide sobre a identificação do diretório onde se encontram localizadas as fotografias originais que serão alvo de análise. Seguidamente é efetuada a análise de cada imagem por varrimento de uma janela móvel com a dimensão de 227×227 pixels, dimensão escolhida por ser a dimensão *standard* definida na AlexNet, que percorre a imagem sequencialmente na horizontal desde o canto superior esquerdo até ao canto inferior direito. Ao ser feita esta passagem sempre que a mesma deteta a presença de fissura essa janela é gravada na Region of Interest (ROI) store onde são arquivadas todas as ROI positivas da imagem. Este varrimento é efetuado com um *stride* de 113 pixels. O *stride* não é mais do que um intervalo que pode ser definido para a deslocação da imagem, sendo o escolhido de 113 pixels uma vez que é metade da janela móvel. Como se pode verificar na imagem 4-2, este *stride* é necessário já que existem problemas das CNN em detetar fissuras nos bordos das imagens.

Após a deteção efetuada as zonas que não foram definidas como ROI são ligeiramente escurecidas de modo a que as zonas de interesse sejam destacadas em relação às restantes zonas da imagem, e garantir maior destaque das zonas fissuradas em detrimento das zonas sem fissuras.

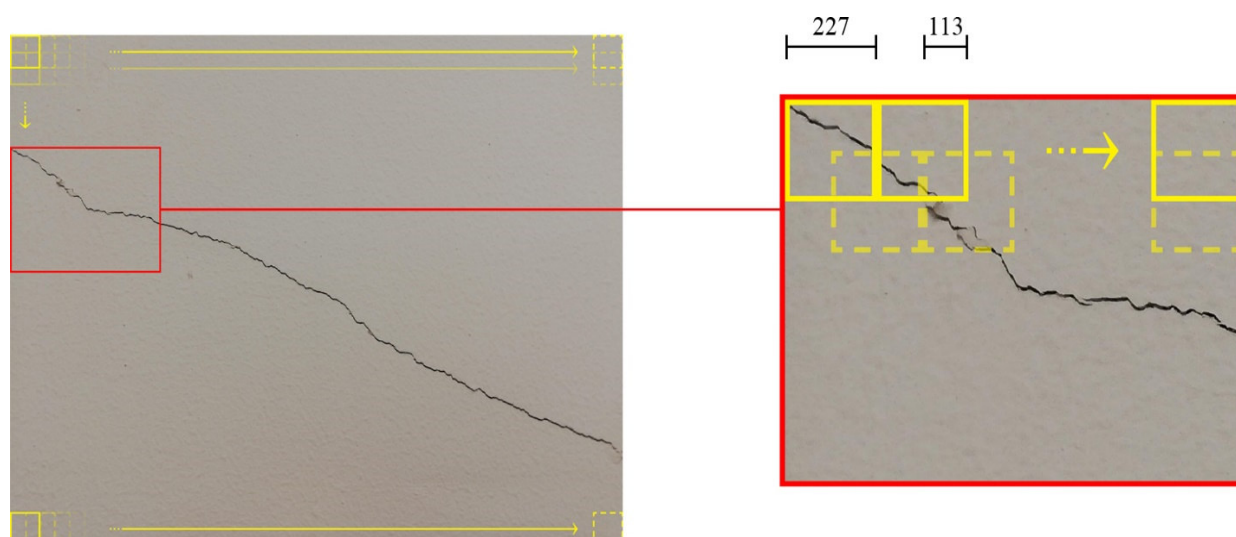


Figura 4-2 – *Stride* na detecção das fissuras (ISEP, 2020)

Todas as ROI são gravadas para posterior tratamento da informação gerada.

4.2 ANÁLISE DE DADOS

Os testes de detecção de fissuras foram executados com recurso a fotografias obtidas de uma estrutura de betão armado (muro de suporte) utilizando aparelho fotográfico, figura 4-3, da marca Nikon modelo D80 equipada com uma objetiva SIGMA 18/200, que se apresentava bastante fissurado (ver fotografia 4.4).



a) NIKON D80



b) Objetiva SIGMA 18-200

Figura 4-3 – Máquina Fotográfica NIKON D80 Equipada com Objetiva SIGMA



a) Fotografia 1

b) Fotografia 2



c) Fotografia 3

d) Fotografia 4

Figura 4-4 – Fotografias de muro de suporte usadas na avaliação das redes treinadas

De notar que as fotografias utilizadas para o ensaio do algoritmo de deteção representam as condições que serão expectáveis encontrar em muitas estruturas, pois possuem além das fissuras outros elementos que, caso a rede não esteja bem treinada, poderão ser identificados como falsos positivos de fissuras, como sejam os casos de:

- Manchas;
- Escorrências;
- Vazios (chochos);

O ensaio de deteção das fissuras apresentadas na figura 4-4 foi efetuado por cada uma das quatro redes criadas e atrás identificadas tendo-se obtido os resultados que são seguidamente discutidos.

Foram obtidos os *outputs* de cada uma das redes no que respeita à deteção das fissuras, e, como seria expectável, os melhores resultados são apresentados pelas redes 3 e 4. Na figura 4-5 estão identificados os resultados da deteção das fotografias apresentadas na figura 4-4 utilizando a rede_1 (baseada em 20000 imagens).

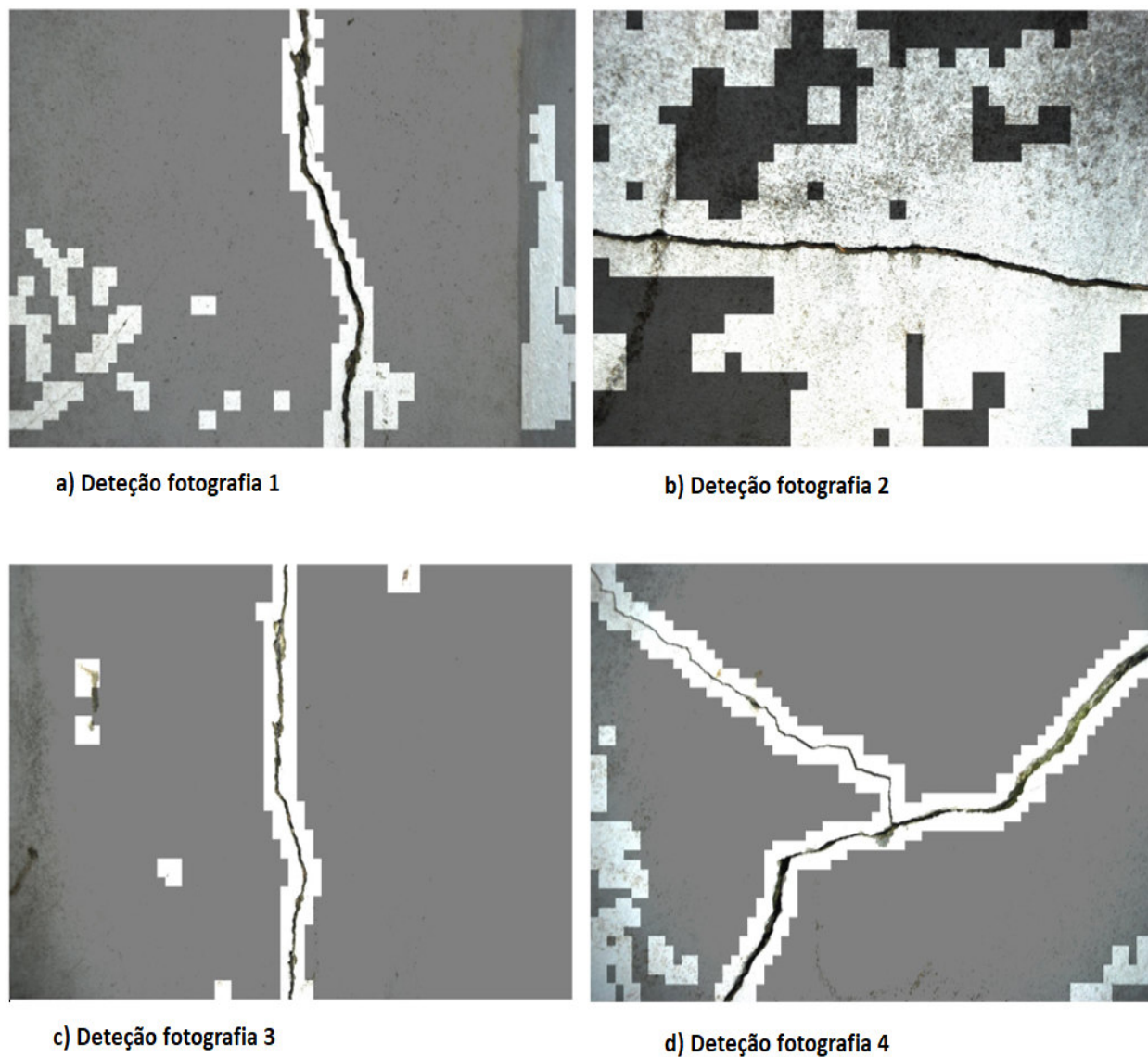


Figura 4-5 – Resultado da deteção usando rede treinada 1

Na figura 4-6 apresentam-se os resultados da deteção das fotografias obtidos com o uso da rede 2, sendo nítida uma melhoria considerável na deteção quando comparados com os apresentados na figura 4-5. Esta melhoria encontra-se associada a uma base de dados mais extensa (dobro das imagens) assim como a uma maior diversidade dos *inputs* que constituem a base de dados.

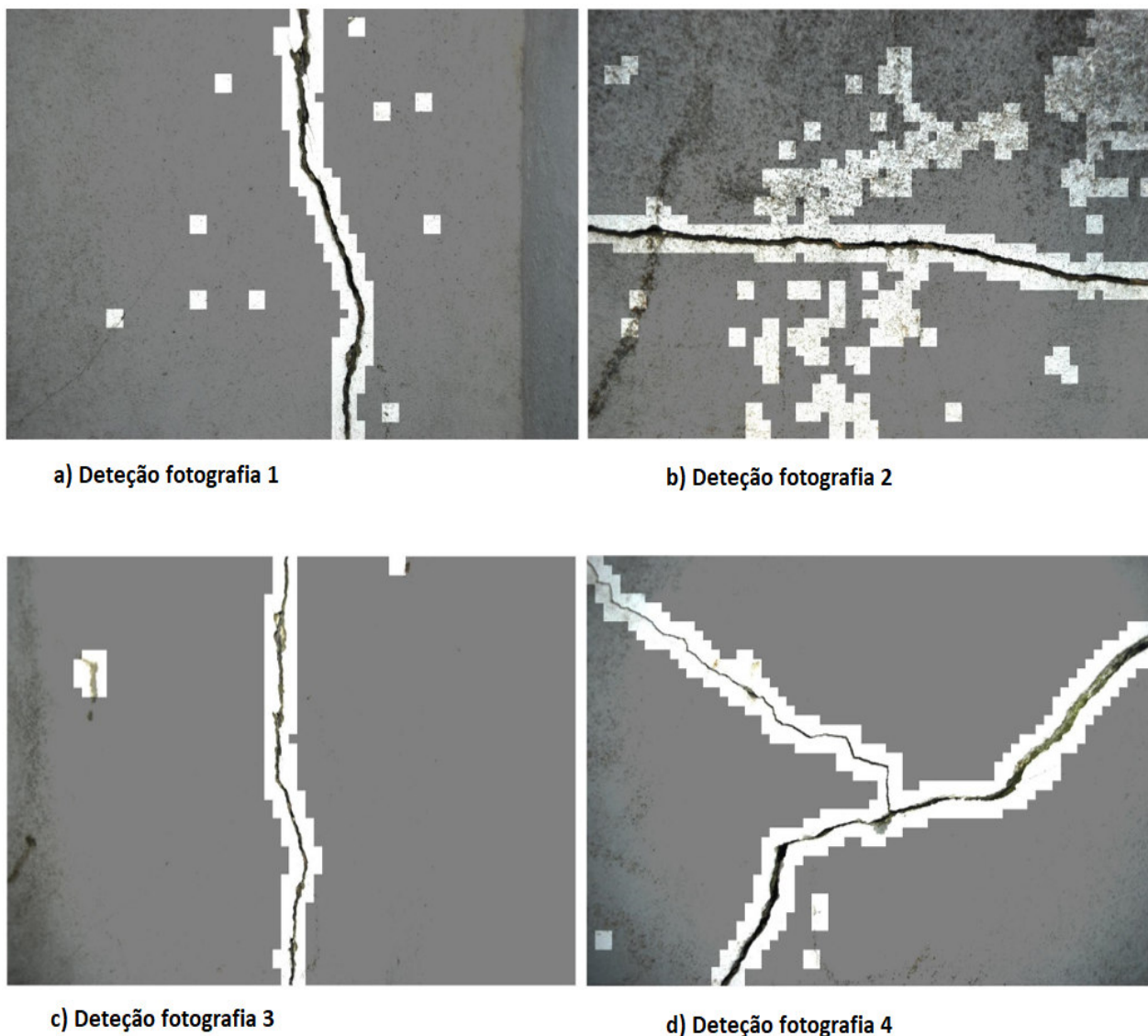


Figura 4-6 – Resultado da detecção usando rede treinada 2

Seguindo o mesmo princípio usado anteriormente, efetuou-se a detecção usando a rede 3, sendo a análise efetuada às mesmas fissuras analisadas com as redes treinadas 1 e 2. Os resultados apresentados na figura 4-7 evidenciam um acerto total em relação às fissuras existentes em cada uma das fotografias. Outro aspecto a realçar relativamente aos *outputs* está relacionado com a inexistência de falsos positivos presentes nas duas redes anteriores. De mencionar que a base de dados usada para o treino da rede 3 voltou a sofrer um incremento elevado de *inputs* (nova duplicação das imagens) em relação à rede 2, o que, em adição à maior diversidade de *inputs*, se revelou um fator decisivo para a melhoria de resultados obtida.

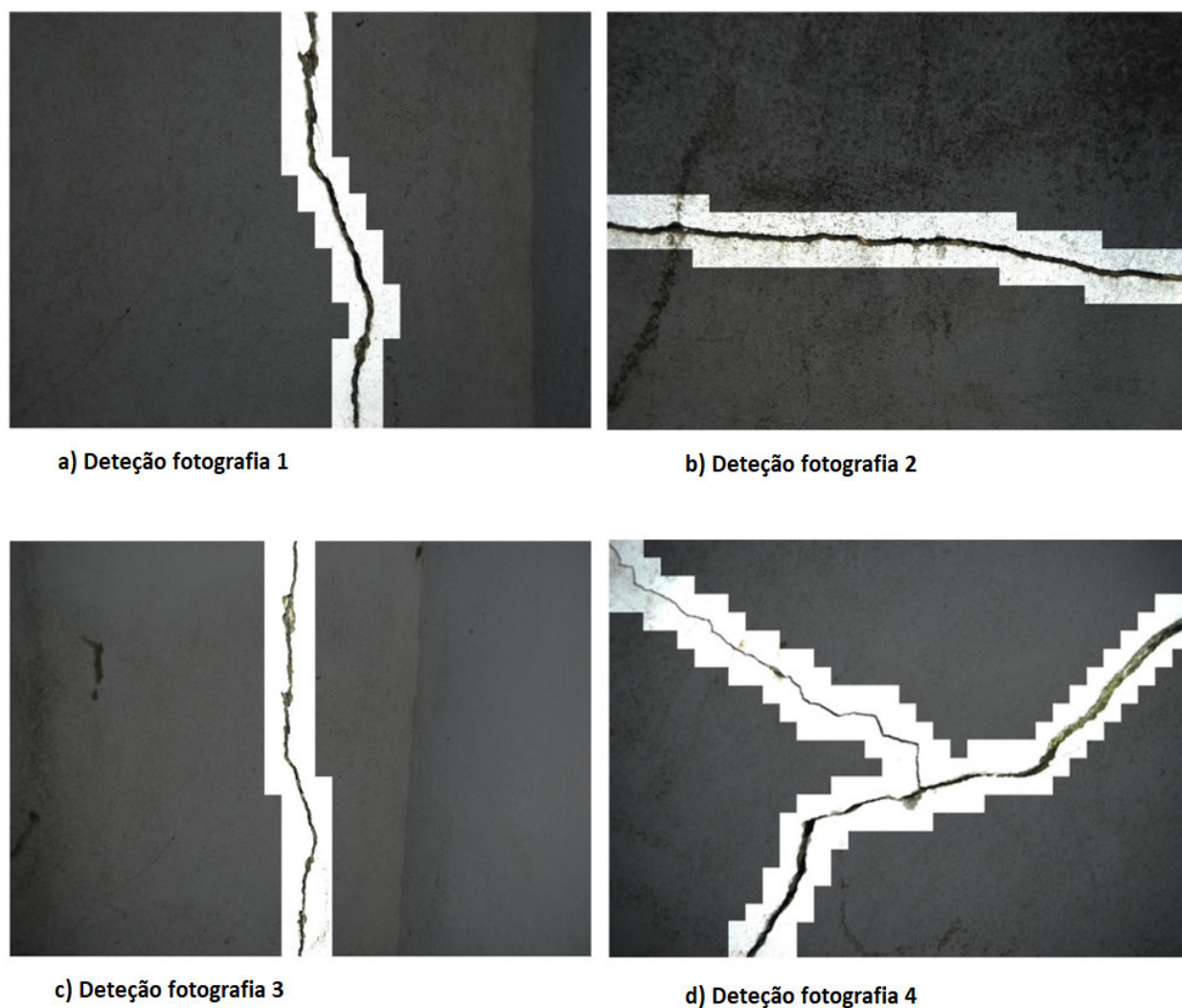


Figura 4-7 – Resultado da deteção usando rede treinada 3

Tendo em consideração a qualidade dos dados obtidos na deteção das fissuras com a rede 3, pretendeu-se verificar se algum ganho seria obtido com a deteção usando a rede cracknet_4. O incremento de *inputs* foi menor com um acréscimo total de 6.000 imagens, em que 3.000 são referentes a imagens com fissuras e as restantes 3.000 com imagens sem fissuras. Os resultados obtidos, indicados na figura 4-8, são os expectáveis atendendo a que o acerto se manteve no mesmo patamar ao obtido com a deteção da rede 3 assim como a manutenção da inexistência de falsos positivos.

Uma conclusão a que se pode chegar será que a rede anterior já se encontrava no patamar de treino necessário para a obtenção dos resultados pretendidos e que o incremento da rede 4 já não se traduziu num ganho de eficácia, pelo que foi atingido o ponto estacionário da rede em relação ao número de *inputs* e diversidade para as fotografias que foram alvo de estudo.

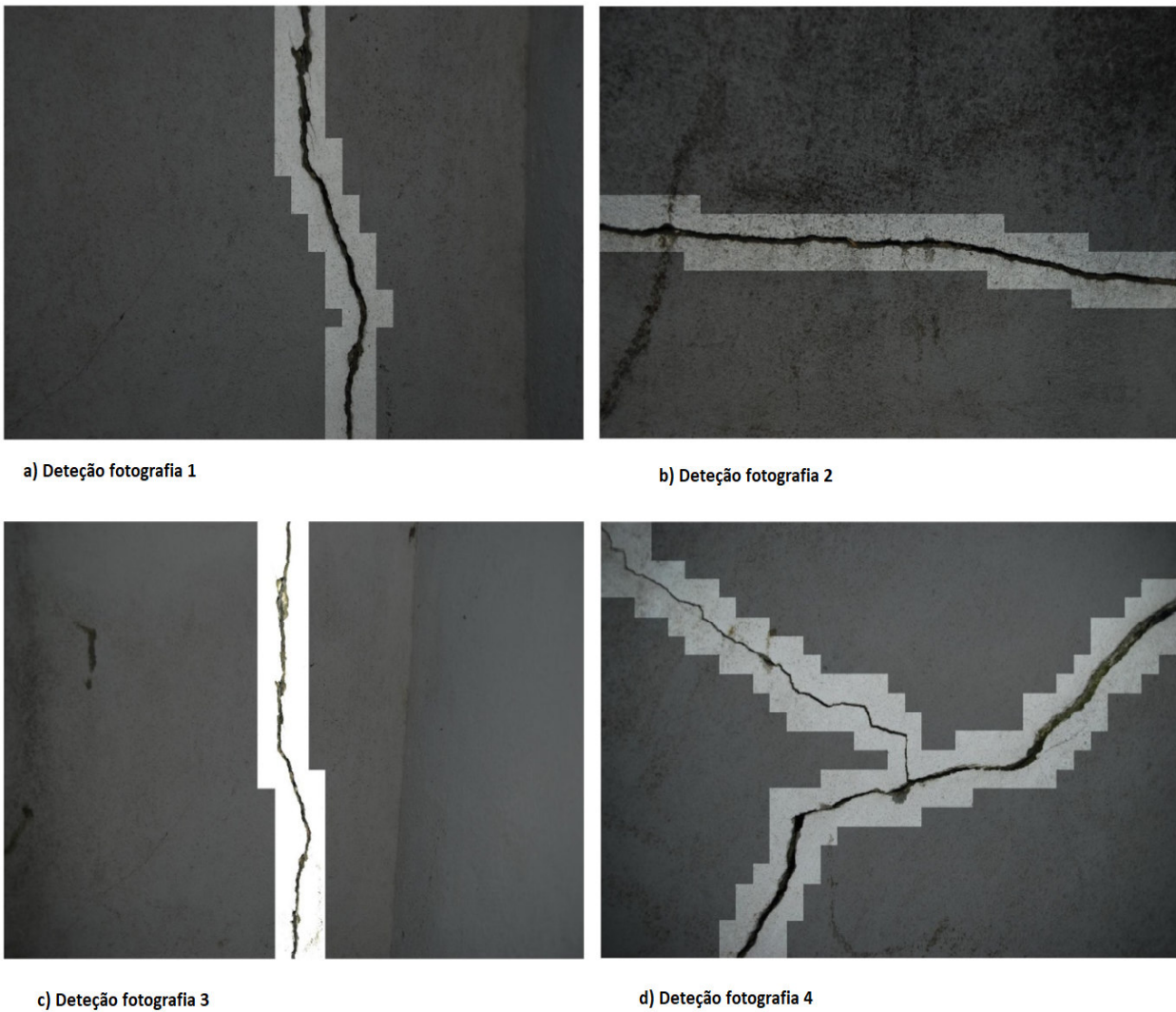


Figura 4-8 – Resultado da detecção usando rede treinada 4

No subcapítulo 3.3.3 foram referidas algumas questões a que se pretendia responder com o treino das redes e com os *outputs* daí resultantes. Atendendo aos resultados obtidos e à análise dos mesmos, já é possível elaborar uma resposta para essas questões. Uma das questões estava relacionada com o número de *inputs* necessário para a obtenção dos melhores resultados. Analisando as quatro redes verificou-se que o treino efetuado para a rede 3 com uma base de dados de 80.000 imagens resultou num número de *inputs* necessário para os resultados pretendidos tendo a rede 2 e mais concretamente a rede 1 ficado muito abaixo do que era necessário. Outra questão de elevada importância para qualidade dos resultados obtidos pelas redes 3 e 4 é a diversidade das imagens que servem de *input*. A resposta à terceira questão colocada no subcapítulo referido ficou respondida nas conclusões retiradas na discussão da rede 4.

CAPÍTULO 5

CARACTERIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE FISSURAS

Após o desenvolvimento do algoritmo de detecção de fissuras o trabalho desenvolvido evoluiu principalmente no sentido da obtenção dos dados necessários para a sua caracterização. Desenvolveram-se, no entanto, melhorias pontuais no algoritmo de detecção relacionadas essencialmente com a redução da zonas de identificação de detecção das fissuras como se pode verificar na figura 5-1 onde foi feita a detecção usando a rede treinada 4 das fotografias apresentadas em 4.24. O passo seguinte foi então a complementação do algoritmo anterior com nova informação que permitisse, utilizando a detecção efetuada, contabilizar o desenvolvimento e a espessura das fissuras detetadas. Como é óbvio, a obtenção de tais dados é de uma importância vital para todo um processo de inspeção / monitorização.

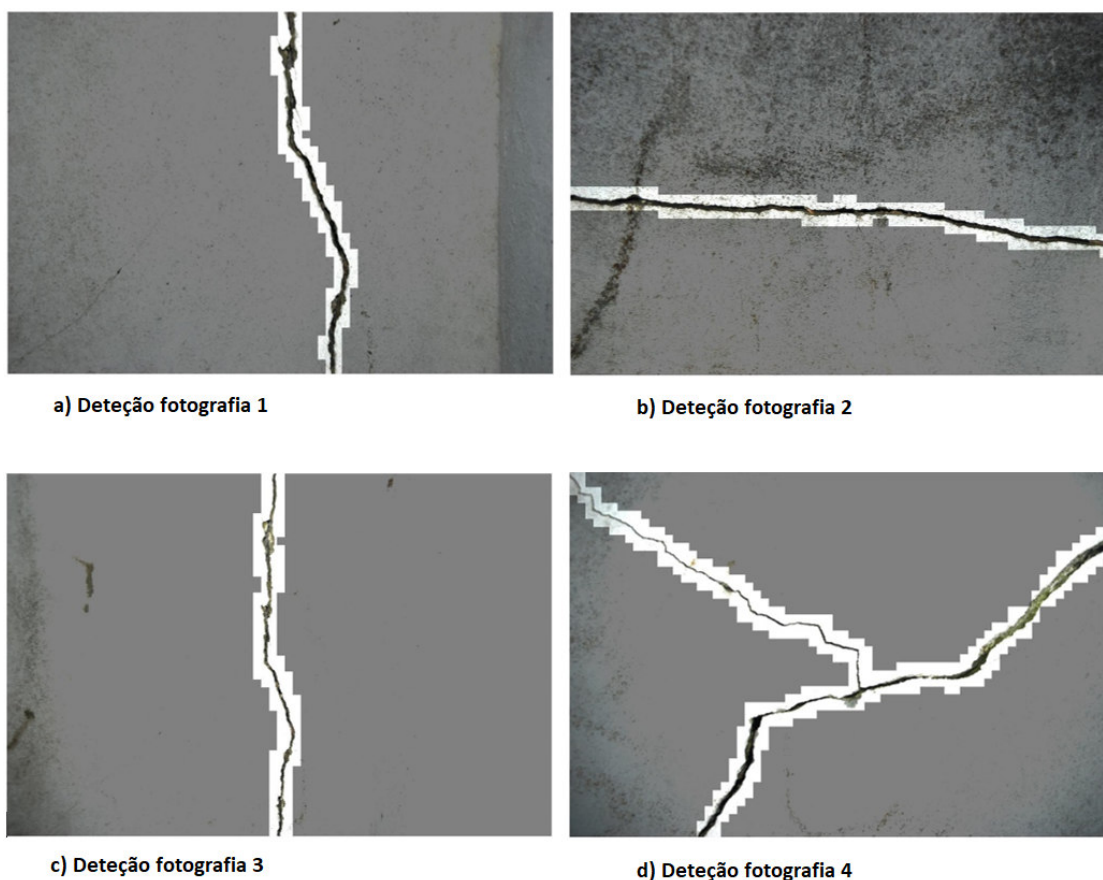


Figura 5-1 – Detecção de fissuras usando a rede 4 e melhorias do algoritmo

5.1 PROCESSO

A caracterização automática das fissuras é um seguimento lógico da fase de deteção, a qual utiliza alguns dos dados obtidos anteriormente, neste caso as ROI presentes na *ROI store*, para efetuar o processo de medição das mesmas. O conceito idealizado para a execução do algoritmo assenta nas etapas identificadas na figura 5-2, com a qual se pretende identificar os passos mais importantes na identificação automática de fissuras.

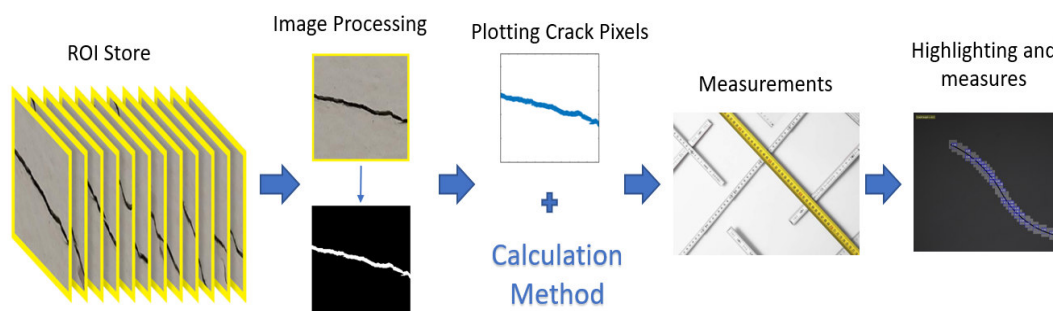


Figura 5-2 – Processo de Identificação Automática de Fissuras

Partindo das imagens guardadas na *ROI store* provenientes do processo de deteção da fissura, estas passam por um processo de transformação da imagem original a cores para *grayscale* seguindo-se a passagem para preto e branco puro (*binary*) e no final a inversão de cores da imagem a preto e branco (*inverted*). Este processo, apresentado na figura 5-3, permite que a imagem final seja convertida em um conjunto de zeros e uns que podem ser trabalhados de forma matemática.

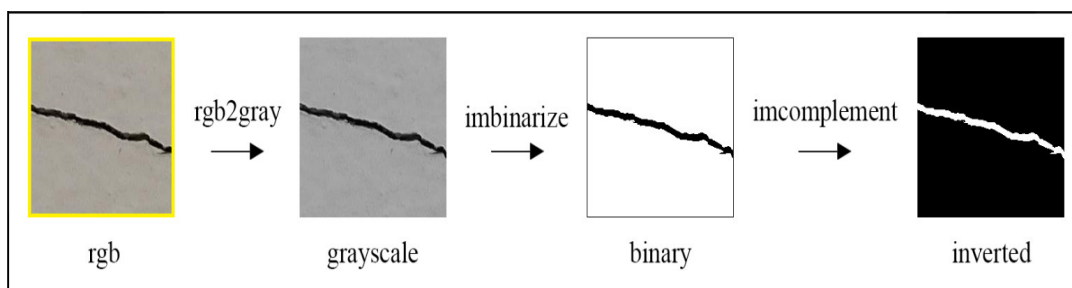


Figura 5-3 – Processamento das imagens da *ROI store*

A etapa seguinte implica diferentes tratamentos conforme se pretenda efetuar a medição do desenvolvimento ou a medição da espessura das fissuras, uma vez que os processos utilizados são diferentes. De mencionar que no caso da medição da espessura a deteção é feita com *ROI Overlap* e que no caso da medição do desenvolvimento a deteção é feita sem *ROI Overlap*. A técnica de *Overlap* não é mais do que a sobreposição de duas zonas de interesse o que permite no caso da espessura que esta seja feita de forma gradual, o facto de não existir *Overlap* na deteção do desenvolvimento deve-se à necessidade de obter ROI isolados uns dos outros.

5.1.1 Identificação da Espessura da Fissura

Na figura 5-4 encontra-se descrito o processo utilizado para a identificação da espessura da fissura.

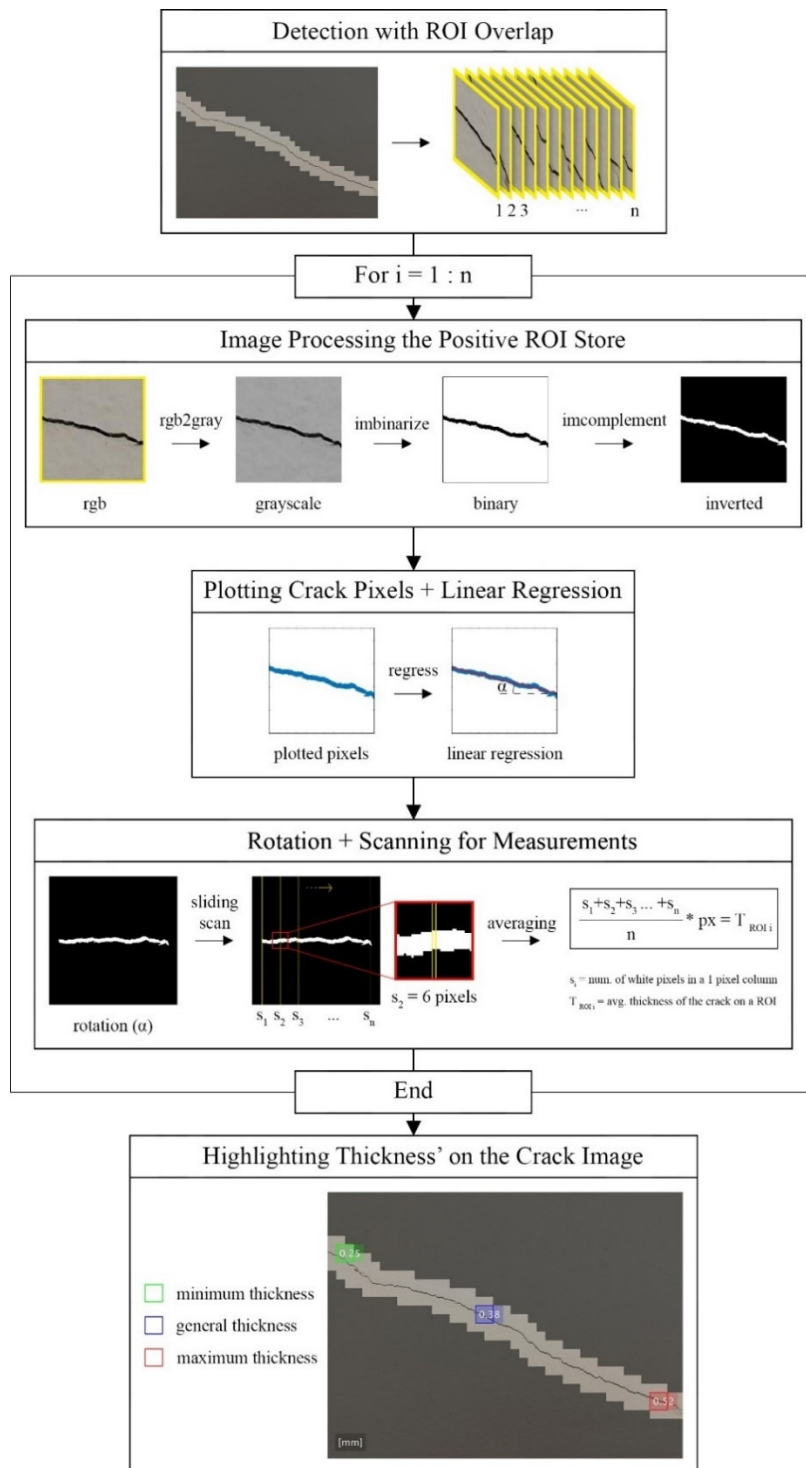


Figura 5-4 – Processo de Identificação da Espessura da Fissura (ISEP, 2020)

Após o processamento da imagem em cada uma das ROI é feita a identificação da fissura e com estes elementos efetua-se uma regressão linear de modo a obter o declive médio da fissura. Este procedimento é efetuado de forma individual em cada uma das ROI. O passo seguinte passa pela execução de um corte

com a largura de um pixel, sendo feita a contabilização do número de *pixels* brancos. Esta soma permite calcular a espessura da fissura a qual é obtida pela multiplicação do número de pixels pelo valor a que cada um corresponde em unidades métricas (mm) na fotografia, como se pode verificar na figura 5-5 onde o processo está isolado do restante processo de identificação da espessura.

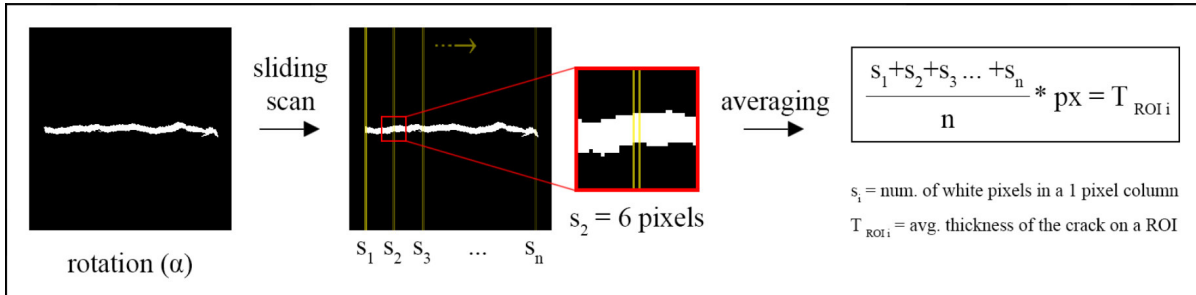


Figura 5-5 – Horizontalização da Fissura e Medição da Espessura

Por fim, com base no *output* gerado na deteção é feita a identificação da espessura nos locais onde a mesma foi medida. A apresentação gerada pode facilmente ser alterada, sendo que inicialmente estava a ser apresentada a espessura média, mas essa informação só será necessária relativamente a um caso académico como foi a situação de validação do algoritmo. Como se pode verificar na figura 5-6 o número de medições apresentadas pode ser alterado para o número pretendido sem que, no entanto, o mesmo sobrecarregue em demasia a imagem.

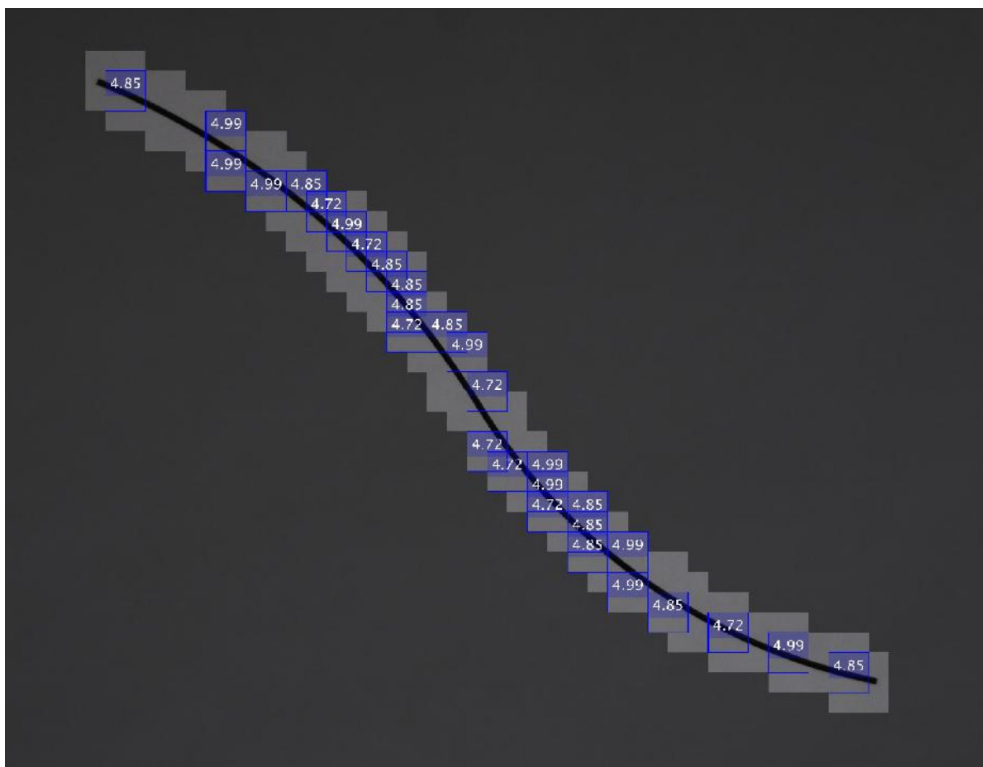


Figura 5-6 – Exemplo de apresentação da medição da espessura numa imagem

5.1.2 Identificação do Desenvolvimento da Fissura

Como foi mencionado anteriormente a medição do desenvolvimento é feito de forma diferente da medição da espessura. Na figura 5-7 encontra-se descrito o processo utilizado para a contabilização do desenvolvimento da espessura

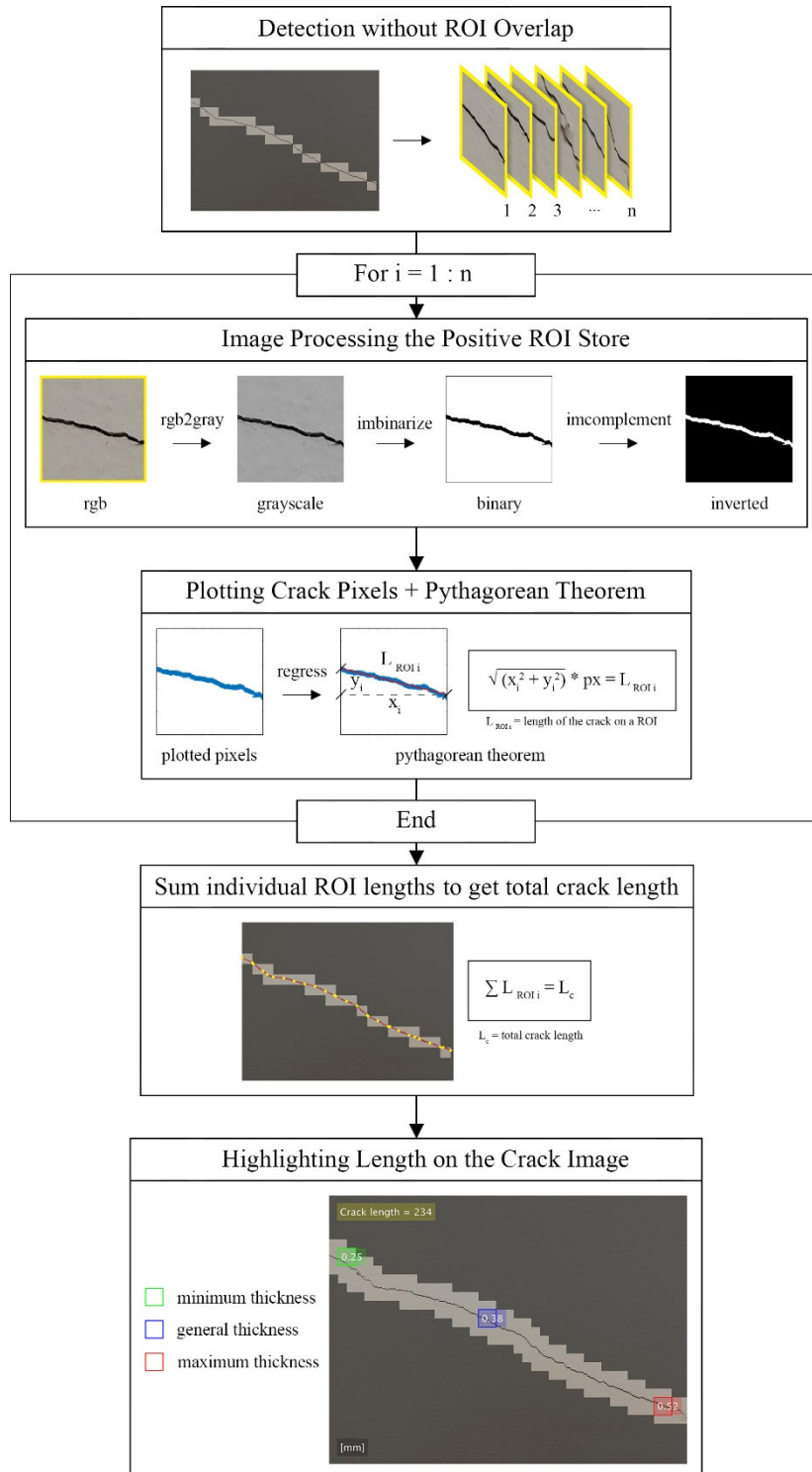


Figura 5-7 – Processo de Identificação do Desenvolvimento da Fissura (ISEP, 2020)

Como foi anteriormente descrito para o cálculo da espessura, o processo de contabilização do desenvolvimento utiliza os elementos existentes na *ROI store* provenientes da detecção, seguindo-se uma etapa de processamento de imagem como identificado anteriormente na figura 5-3. A etapa seguinte consiste na aplicação de uma regressão linear em cada uma das ROI constituintes da fissura que permite, pela aplicação do teorema de Pitágoras, a obtenção do desenvolvimento da fissura constituinte dessa ROI, como se pode verificar na figura 5-8. O valor obtido é guardado iniciando-se o processo na próxima ROI num processo sequencial até ao processamento da última ROI. Após a obtenção deste último valor é feito o somatório de todos os valores obtidos que equivale ao desenvolvimento da fissura.

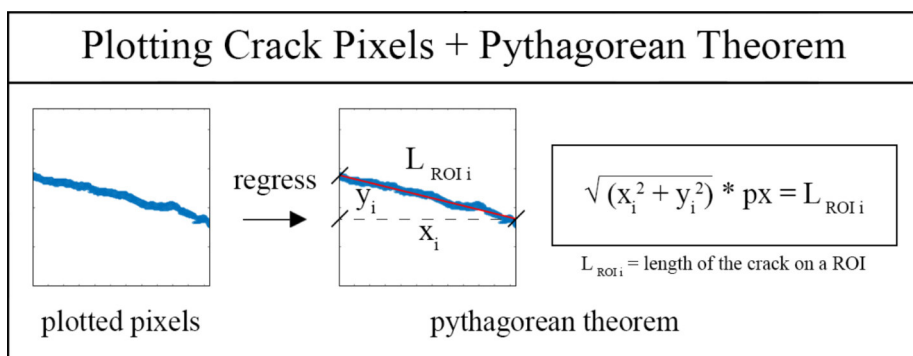


Figura 5-8 – Obtenção do desenvolvimento em cada ROI

Por fim e com base no *output* gerado na detecção é feita a identificação do desenvolvimento, que aparece indicado, por defeito, no canto superior esquerdo da imagem (ver imagem 5.7).

5.1.3 Valor do Pixel

Algo que não foi mencionado anteriormente em nenhum dos processos de identificação é a equivalência em unidades métricas (em mm) de um pixel.

A obtenção da dimensão real em milímetros correspondente a um pixel da fotografia é crucial para a forma como o algoritmo se desenvolve, pelo que este valor terá que ser obtido de forma automática no próprio algoritmo uma vez que as imagens captadas não têm sempre a mesma dimensão ou são capturadas à mesma distância do objeto fotografado implicando uma conversão diferente para cada imagem. Na figura 5-9 apresenta-se o método como este valor é obtido.

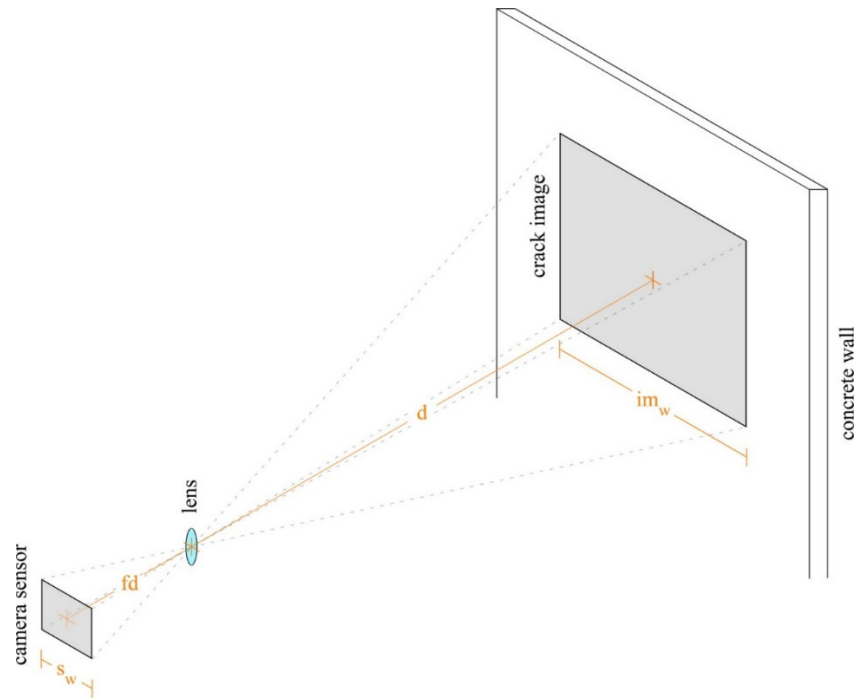


Figura 5-9 – Forma de obtenção da dimensão real em milímetros correspondente a um pixel da fotografia (ISEP, 2020)

A obtenção da dimensão real em milímetros correspondente a um pixel da fotografia é baseada no conhecimento dos dados apresentados na figura 5-9 e pela aplicação da equação (5.1)

$$px = \frac{S_w \times d}{f_d \times im_v} \tag{5.1}$$

onde:

px – Dimensão real em milímetros correspondente a um pixel da fotografia

S_w – Largura do sensor da câmara em milímetros

d – Distância da lente ao objeto fotografado em milímetros

f_d – Distância focal da lente em milímetros

im_w – Resolução da largura da imagem capturada em pixels

Pela aplicação da fórmula (5.1) é possível obter, de forma automática e para qualquer valor da resolução da imagem, a dimensão real em milímetros correspondente a um pixel da fotografia a estudar pelo que após a obtenção desse valor é possível a caracterização automática da fissura.

5.2 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO

Uma das questões mais sensíveis no desenvolvimento do algoritmo estava relacionada com a forma como seria efetuado o balizamento dos dados obtidos com os equipamentos. A captação de imagens é um processo que decorre em estruturas cujo acesso apresenta ou poderá apresentar dificuldades várias. Como tal o recurso à metodologia proporcionada pelos UAV pode revelar-se extremamente favorável, não só pela logística / custos associados, mas em larga parte pela facilidade de acesso e segurança dos técnicos envolvidos. É consequentemente fundamental que a distância física e o acesso remoto aos locais a inspecionar / monitorizar não coloque em causa a qualidade dos resultados obtidos ou a sua fiabilidade.

Nesse sentido, para calibração do algoritmo adotado, foram elaboradas em AutoCAD imagens simulando fissuras com características controladas, quer em desenvolvimento quer em espessura, que permitem comparar as características conhecidas com os resultados Obtidos pela técnica apresentada.

Este método permitiu eliminar a percentagem de erro inerente à medição das verdadeiras fissuras nas estruturas de betão armado com os métodos manuais existentes, onde pequenas variações da ordem dos milímetros ou décimas de milímetros condicionam os resultados obtidos.

Nas figuras seguintes 5-10 a 5-13 estão representados os simulacros de fissuras criados em AutoCAD e os dados respetivos que serviram de base ao desenvolvimento / balizamento do algoritmo.

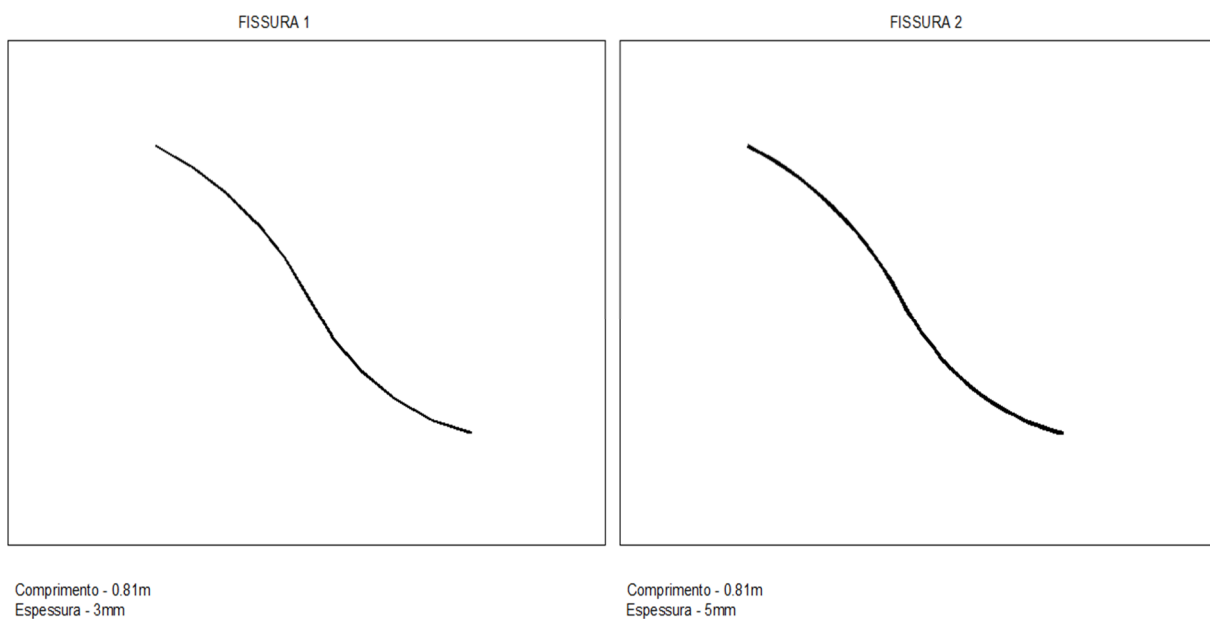


Figura 5-10 – Fissuras 1 e 2 criadas em AutoCAD

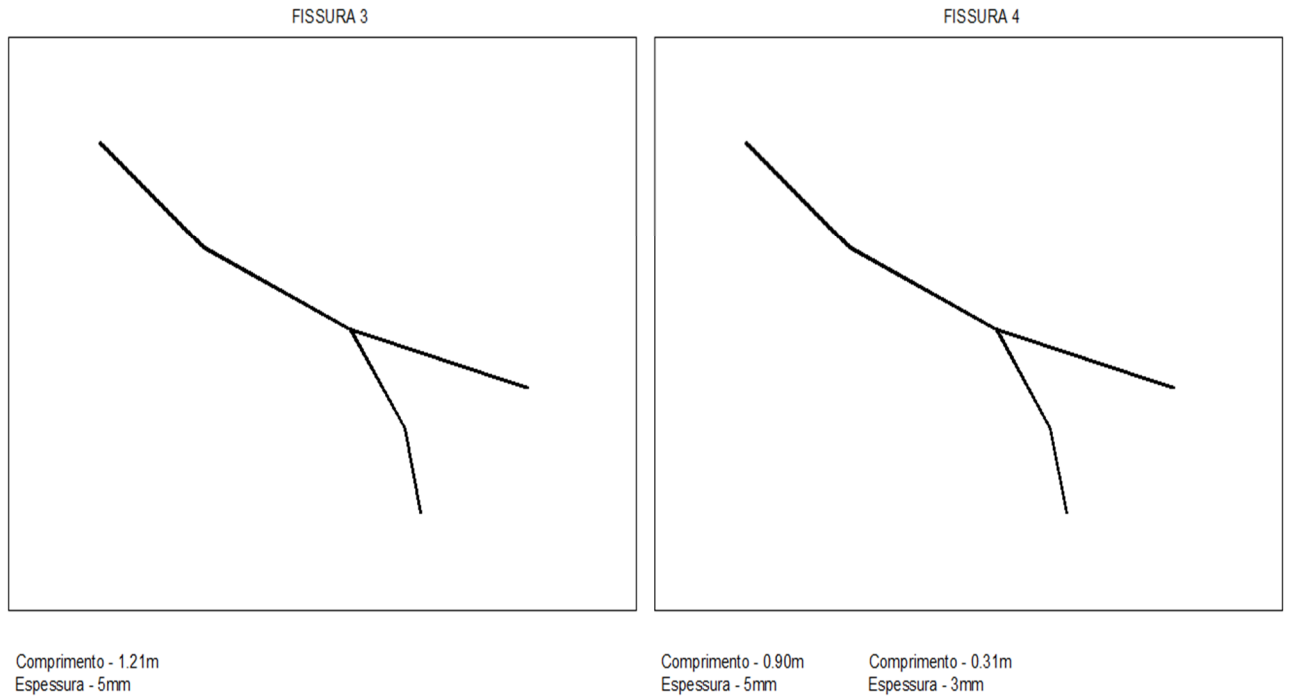


Figura 5-11 – Fissuras 3 e 4 criadas em AutoCAD

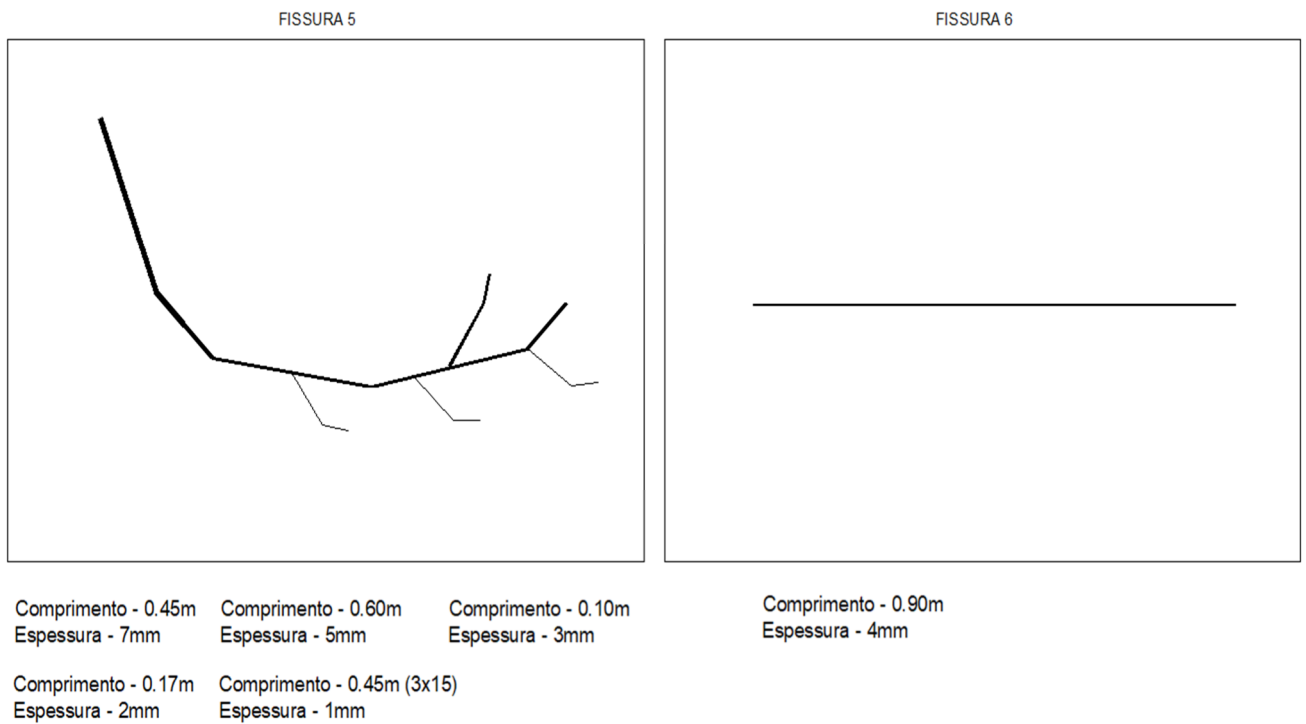


Figura 5-12 – Fissuras 5 e 6 criadas em AutoCAD

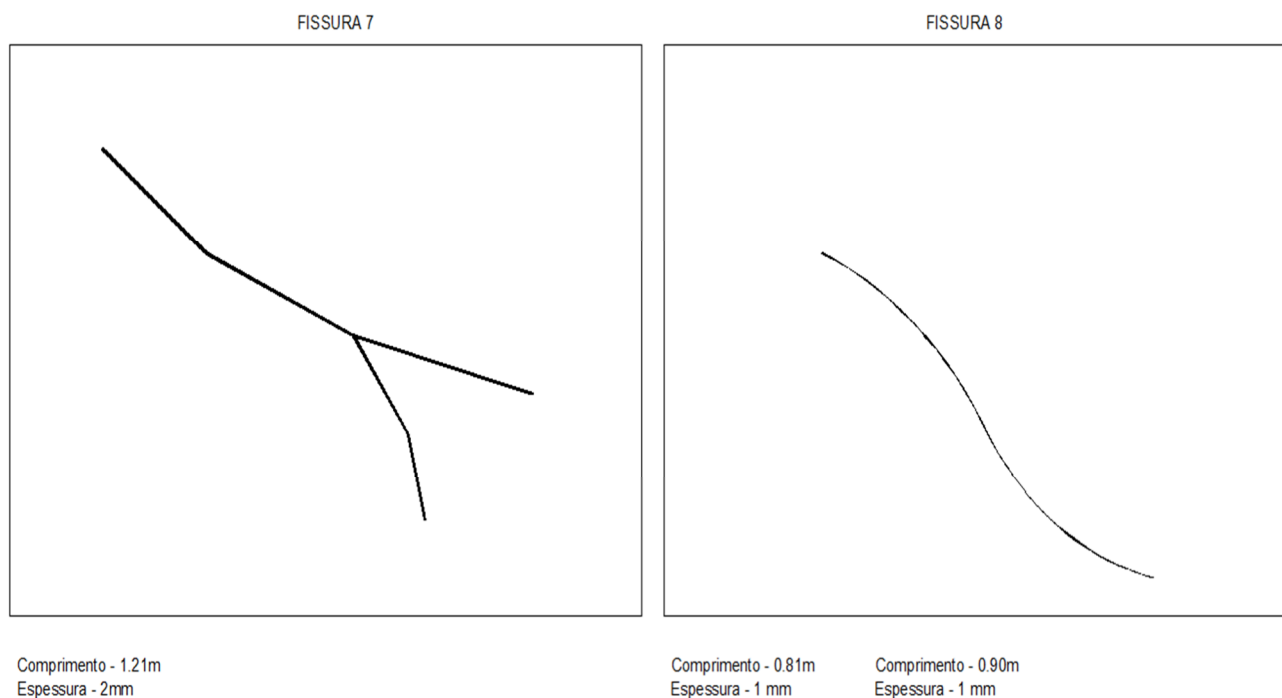


Figura 5-13 – Fissuras 7 e 8 criadas em AutoCAD

Tendo por base as fissuras produzidas em AutoCAD as quais foram impressas em tamanho A0 por recurso a uma plotter. A captação destas em fotografia foi, numa fase inicial, feita utilizando a máquina fotográfica Nikon D80 já mencionada anteriormente.

A captação das fotografias aconteceu em locais de diferente exposição solar. Na figura 5-14 apresentam-se dois exemplos da mesma fissura em locais distintos, sendo que, a obtenção das fotografias em locais diferentes e com uma exposição solar diferenciada permite verificar quais as possíveis condicionantes que esse fator pode introduzir nos resultados obtidos. O procedimento de captação das fotografias impressas passou pelas seguintes etapas:

- Fixação da fissura impressa em papel na parede por meio de fita adesiva de dupla face colocada nos cantos pela parte traseira;
- Medição de distância de 2 metros por meio de fita métrica ou laser ótico;
- Montagem de plataforma de apoio da máquina fotográfica de forma a garantir a estabilidade;
- Captação da fotografia;
- Anotação da fotografia captada;
- Repetição do processo, mas para uma distância de 3 metros;

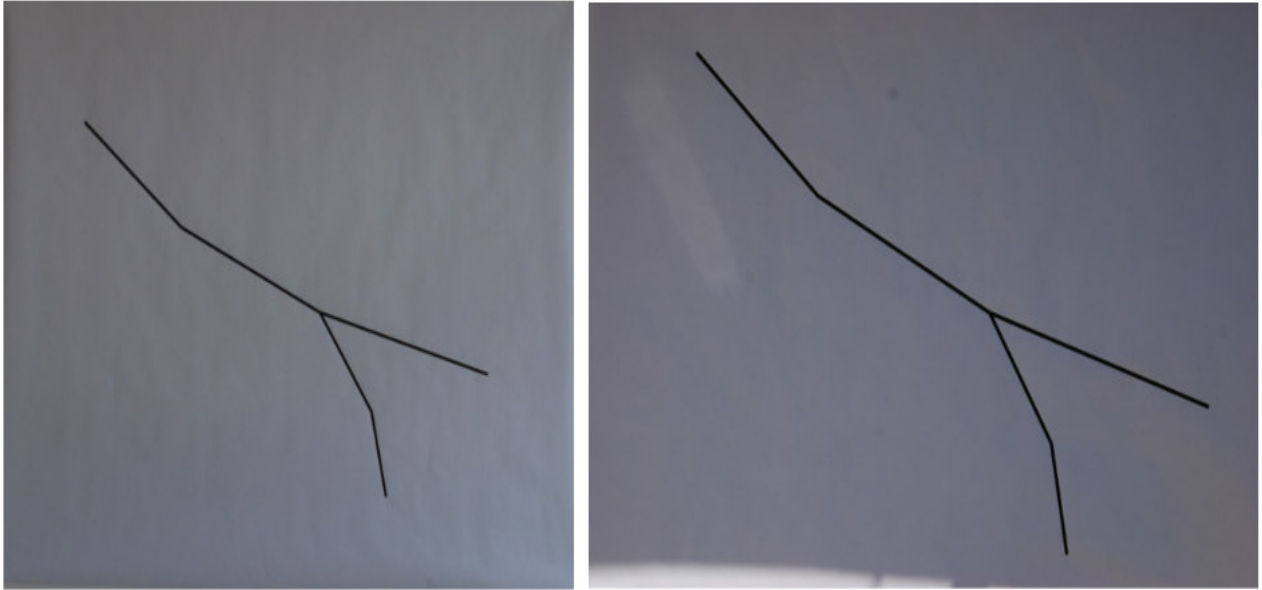
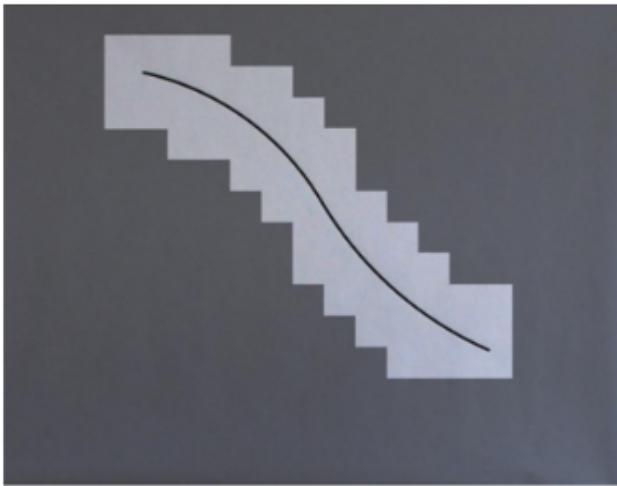


Figura 5-14 - Exemplo da fissura 3 fotografada em dois locais diferentes

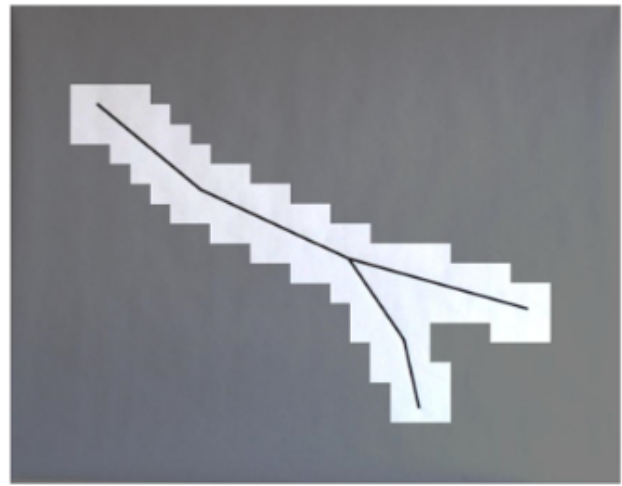
A captação das fissuras foi feita sempre em duas distâncias diferentes de modo a perceber se esta alteração poderia implicar alguma variação dos valores obtidos no algoritmo e se a perda de alguma resolução nestas fissuras traria alguma influência nos resultados. Atendendo a que todas as captações se realizaram em ambientes perfeitamente controlados a comparação com a captação de imagens no terreno poderá ser uma questão problemática, atendendo às condições variáveis verificadas em casos reais, onde existem variações de distância e de luminosidade ou outros fatores, como a perpendicularidade do eixo da câmara ao objeto a fotografar, condições de luminosidade inconstantes ou efeitos das condições atmosféricas no comportamento do UAV.

5.2.1 Detecção de fissuras

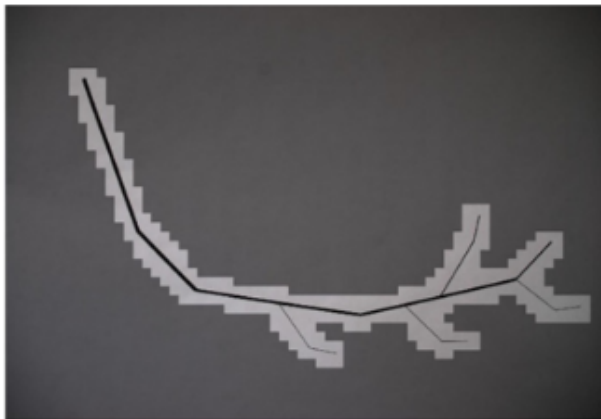
Após a captação das fissuras simuladas foi efetuada a sua deteção de todas de modo a verificar os resultados com essa parte do algoritmo. Apresentam-se na Figura 5-15 os resultados da deteção de quatro das fissuras. De notar que em todas as imagens os resultados da deteção obtidos apresentaram uma qualidade na mesma ordem de grandeza dos testes anteriores, com todas as fissuras, independentemente da distância a que foi feita a captação ou da luminosidade, a serem detetadas sem ocorrência de falsos positivos ou segmentos que não fossem detetados.



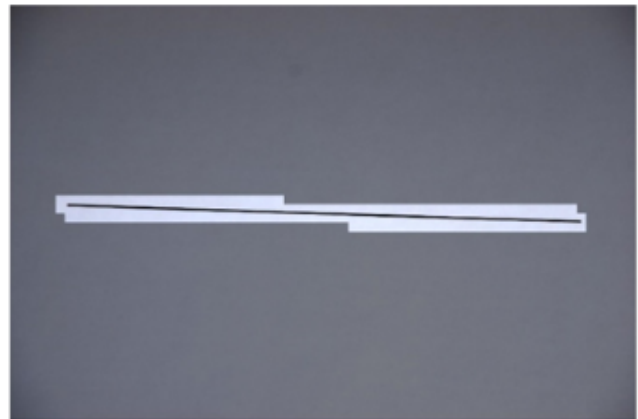
a) Fissura 2 captada a 2 metros



b) Fissura 3 captada a 3 metros



c) Fissura 5 captada a 3 metros



d) Fissura 6 captada a 3 metros

Figura 5-15 – Detecção de quatro das fissuras desenhadas em AutoCAD

5.2.2 Medição Automática

Apresentando o algoritmo no que concerne à detecção, a evidenciar o mesmo grau de resultados que anteriormente já haviam sido comprovados, seguiu-se a parte referente à caracterização das fissuras quanto ao seu desenvolvimento e à sua espessura.

Atendendo ao processo de medição automática da fissura mencionado no ponto 5.1, verifica-se que alguns fatores têm uma influência determinante para a obtenção de dados fidedignos, tais como as características do equipamento de captação de fotografia que se está a usar, condições de luminosidade da própria fotografia e distância a que a fotografia é captada.

Alguns destes dados são obtidos nos metadados da própria fotografia o que não é o caso da distância de captação a qual tem que ser corretamente contabilizada de modo a não introduzir erros externos ao algoritmo. Foi, aliás, essa uma das razões para que a obtenção das fotografias fosse feita a distâncias conhecidas, eliminando assim essa possível fonte de erro.

Os metadados ou dados EXIF não passam de uma especificação que permite aos fabricantes de câmaras digitais a gravação de informações sobre condições técnicas ou configurações do aparelho no momento da captura associado ao arquivo da fotografia. Para cada fotografia a câmara regista automaticamente, como, quando e onde a imagem foi registada, como se pode verificar na figura 5-16. Esses metadados contêm ainda informações como o a marca e o modelo da câmara, as dimensões da foto e, quando disponíveis, as coordenadas GPS.

Propriedade	Valor
Origem	
Autores	
Tirada em	14/04/2021 10:01
Nome do programa	Ver.1.10
Data de Aquisição	
Copyright	
ID de Imagem	
Dimensões	3872 x 2592
Largura	3872 pixéis
Altura	2592 pixéis
Resolução horizontal	300 ppp
Resolução vertical	300 ppp
Profundidade de bits	24
Compressão	
Unidade de resolução	2
Representação de cor	sRGB
Bits comprimidos/pixel	4
câmara	
Fabricante da câmara	NIKON CORPORATION
Modelo da câmara	NIKON D80
F-stop	F/8
Tempo de exposição	1/250 seg.
Velocidade ISO	ISO-100
Compensação de exposição	0-passo
Distância focal	46 mm
Abertura máxima	4.6
Modo de medição	Padrão
Distância do exposto	
Modo flash	Sem flash
Energia de flash	
Distância focal de 35mm	69

Figura 5-16 – Metadados de fotografia captada com Nikon D80

CAPÍTULO 5

Dos metadados de cada fotografia o algoritmo retira automaticamente a distância focal e a resolução em largura e altura, pois estas são as que vão definir o número de *pixels* que estão compreendidos em cada fotografia.

Na forma como foi programado o algoritmo o único dado que até ao momento necessita de ser introduzido é o da distância a que a fotografia foi captada, mas mesmo para este dado estão a ser feitos todos esforços para que seja possível a incorporação de um equipamento laser no UAV que consiga da mesma forma incorporar o informação da distância de captação nos metadados.

Uma vez na posse da totalidade dos dados foram efetuados os ajustes necessários de modo a melhorar o algoritmo. Nas figuras 5-17 a 5-19 encontram-se os resultados obtidos com este método, com as fotografias captadas pela máquina Nikon D80 em três das fissuras.

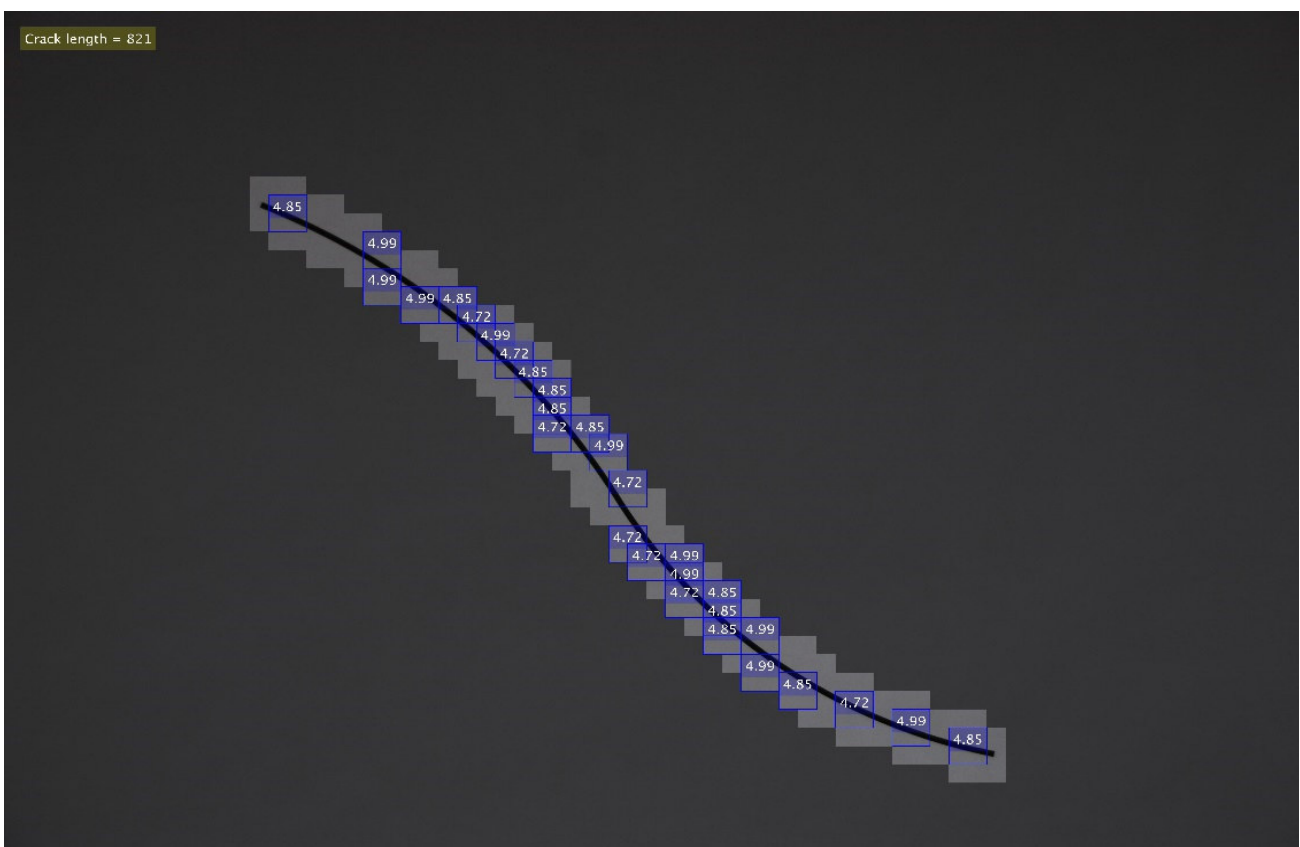


Figura 5-17 – Resultado da Medição Automática da Fissura 2

Atendendo aos resultados obtidos, com qualidade constante e similar em todas as imagens de calibração o passo lógico seguinte passou pela captação das fissuras por recurso a um UAV. Deste modo, após a execução do teste atrás descrito procedeu-se a um novo teste nas instalações do ISEP com os mesmos pressupostos do teste anterior procedendo-se, no entanto à captação de imagens com recurso ao UAS DJI Mavic Mini, identificado na figura 5-20 onde também se apresentam alguns dos dados deste UAV.

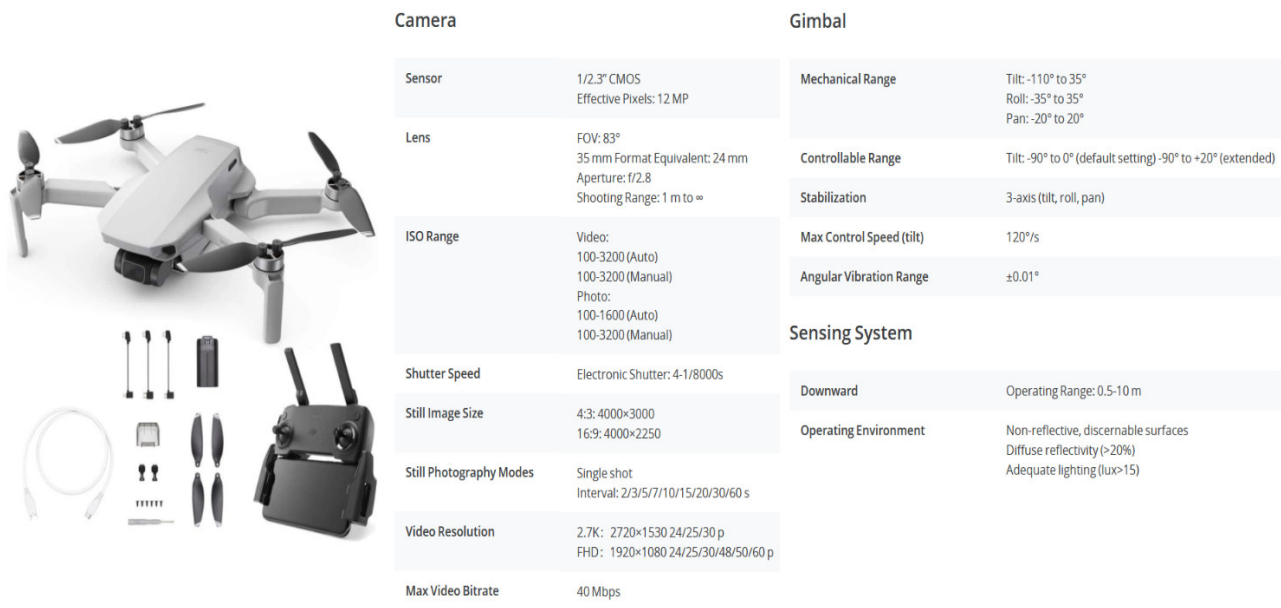


Figura 5-20 – UAS DJI Mavic Mini e Dados do Equipamento

Neste ensaio atendendo ao equipamento em uso a captação das fotografias foi feita a uma distância de 0.80 m da parede onde as fissuras estavam afixadas, sendo esta distância assegurada por medição efetuada com recurso a fita métrica.

Após a captação foi feita a deteção das fotografias no algoritmo, estando os resultados obtidos em concordância com os resultados anteriores. Relativamente à identificação automática das fissuras os resultados também foram similares o que comprovou a fiabilidade e robustez do algoritmo mesmo tendo o ensaio decorrido em ambiente exterior e com recurso a UAS. Nas figuras 5-21 a 5-27 encontram-se os resultados obtidos para cada uma das fissuras.

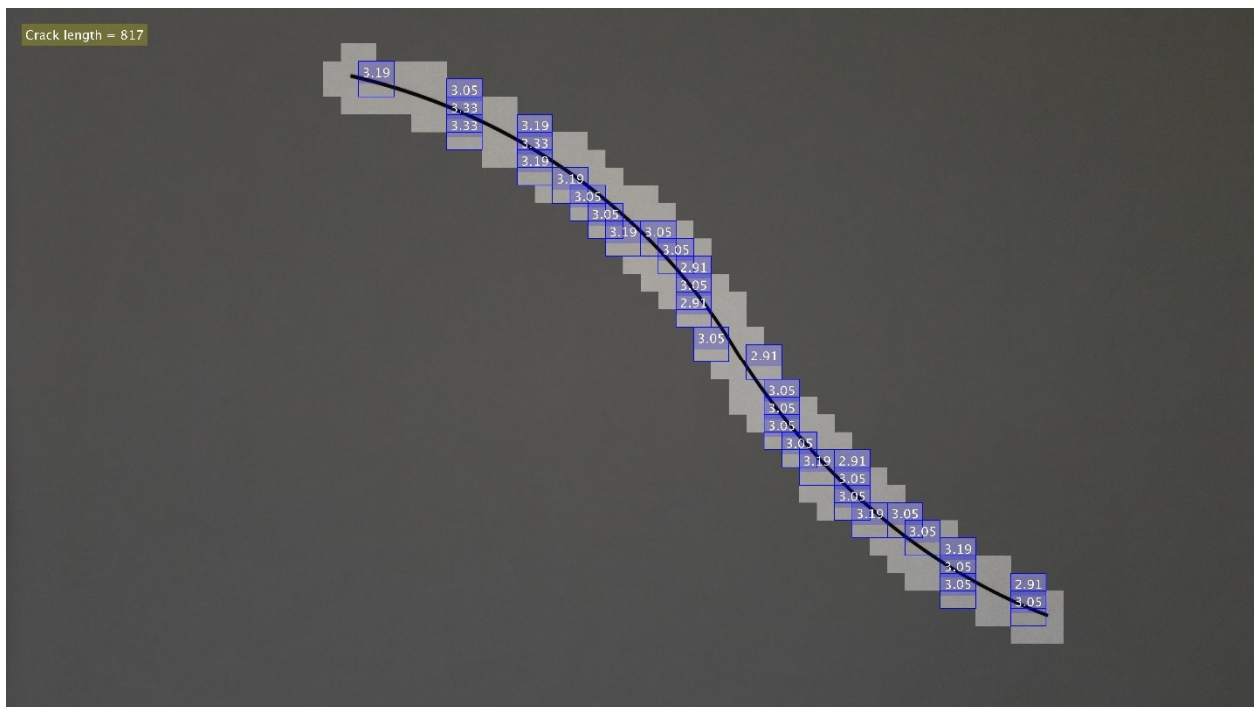


Figura 5-21 – Resultados obtidos Fissura 1 Captada com UAV

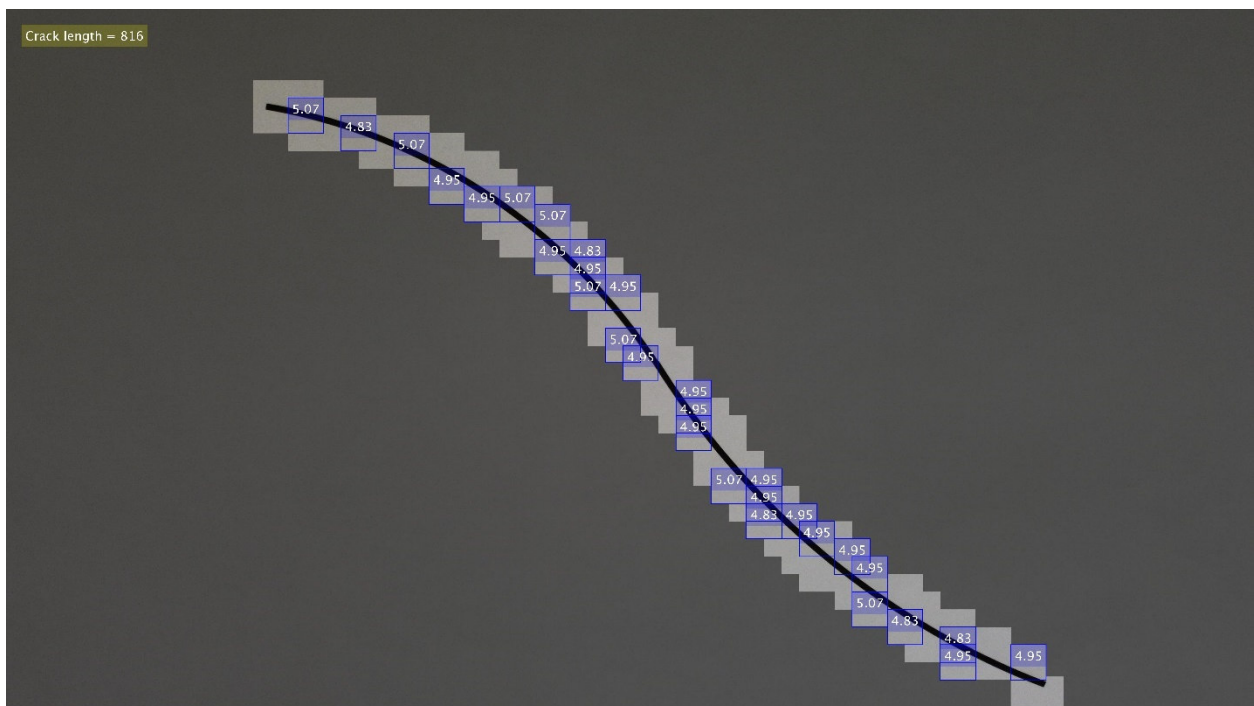


Figura 5-22 – Resultados obtidos Fissura 2 Captada com UAV

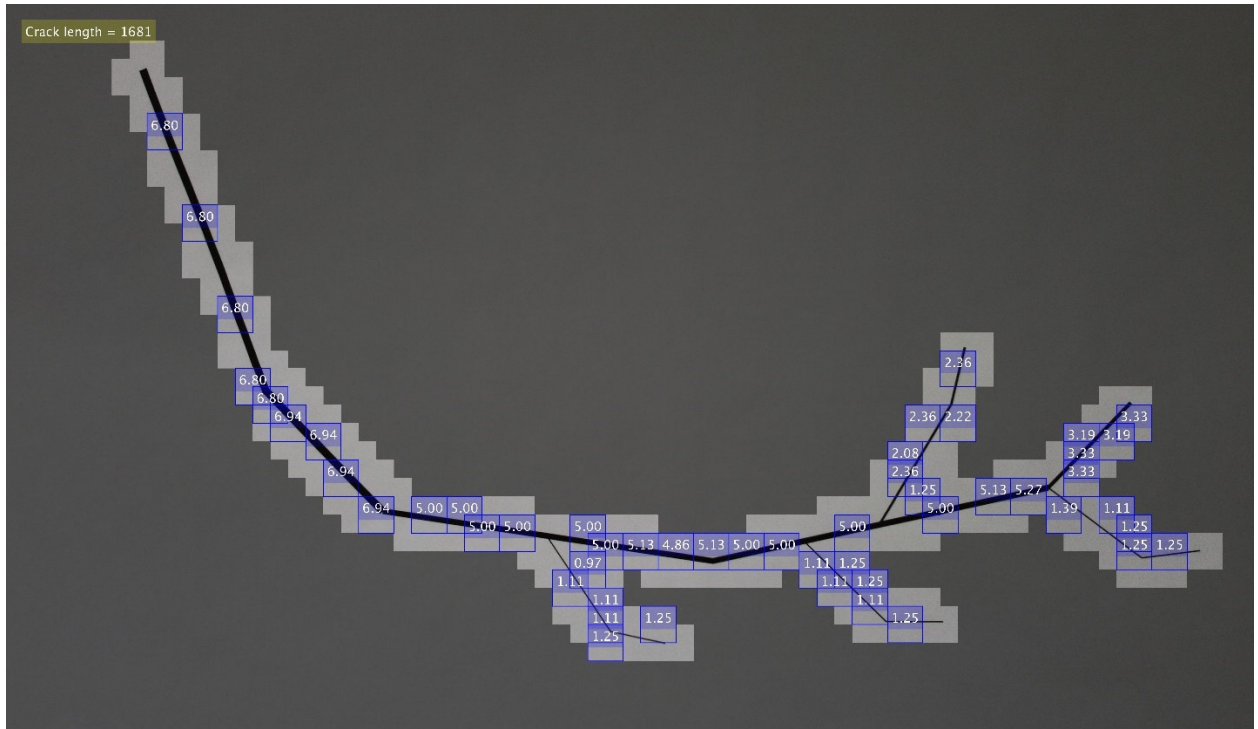


Figura 5-25 – Resultados obtidos Fissura 5 Captada com UAV

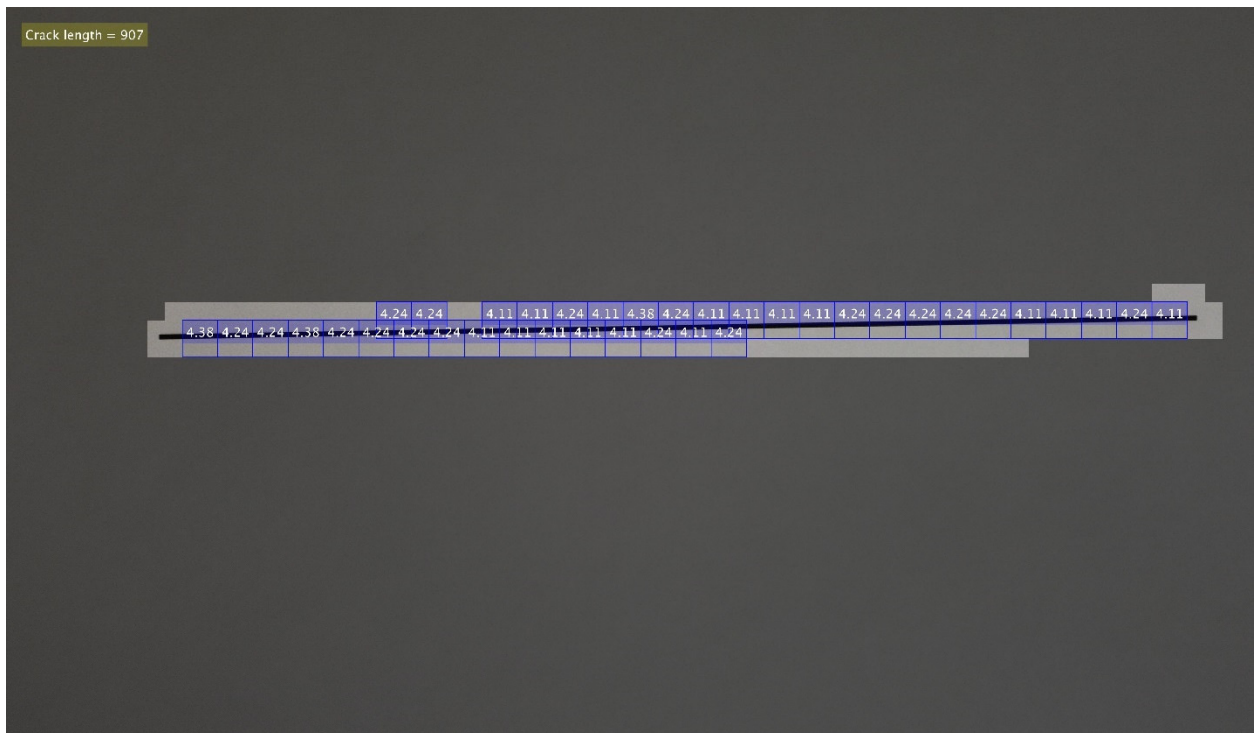


Figura 5-26 – Resultados obtidos Fissura 6 Captada com UAV

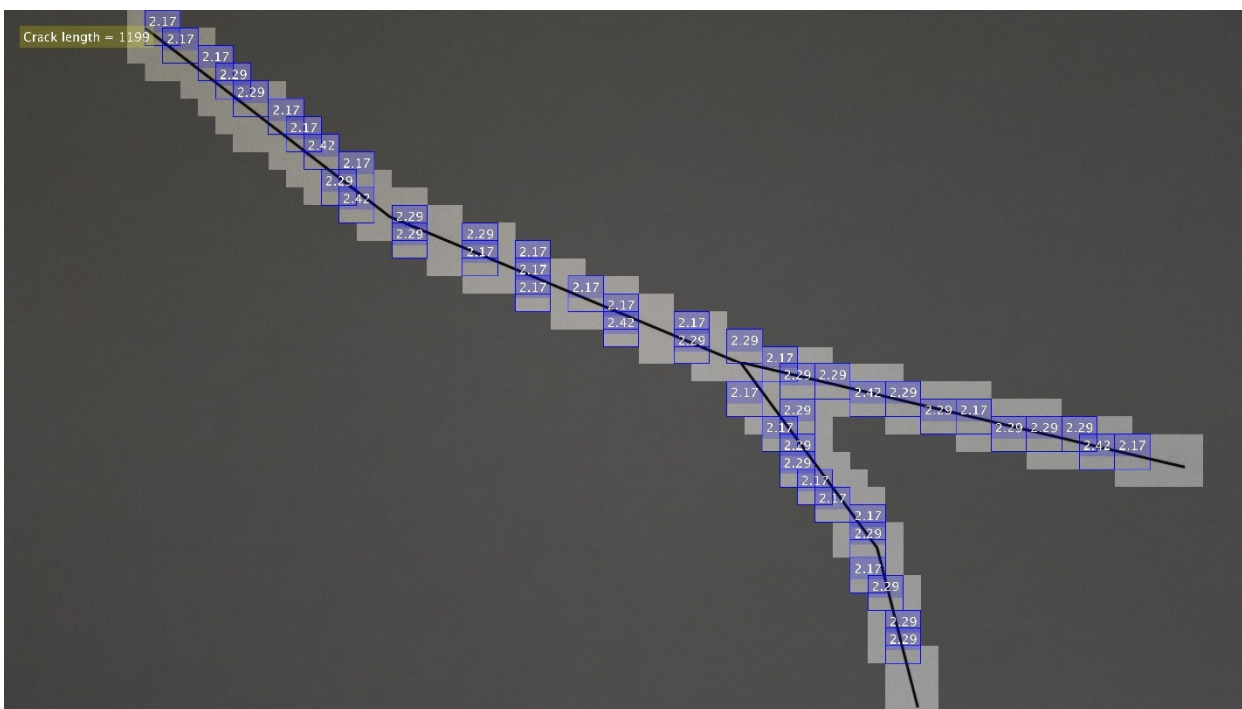


Figura 5-27 – Resultados obtidos Fissura 7 Captada com UAV

Analisando os resultados obtidos nas fissuras obtidas por recurso a UAV, verifica-se que em certos casos existem pequenas diferenças relativamente às obtidas com a máquina fotográfica NIKON. Apesar de as diferenças serem muito reduzidas foi necessário efetuar um estudo de modo a entender a que se deviam estes desvios nomeadamente se os mesmos eram referentes ao processo de obtenção pelo UAV ou do próprio algoritmo.

De acordo com a programação elaborada o único valor que não se encontra a ser contabilizado de forma automática é a distância entre o UAV/Câmara Fotográfica e a superfície da estrutura onde se encontra a fissura. Se em alguns casos, como nas fotografias obtidas por recurso à máquina fotográfica NIKON, era possível contabilizar o valor exato da distância a que se estava a captar a fotografia, no caso das fotografias captadas pelo UAV esse valor era aproximado, atendendo a que o UAV está a voar existindo sempre pequenas variações relativas à distância medida inicialmente que vão implicar fotografias obtidas a distâncias diferentes. Atendendo a esta incógnita foi feita uma análise impondo pequenas variações à distância diretamente no código do algoritmo de modo a aferir os resultados produzidos.

Para esta análise foram feitas alterações relativas à distância em três fotografias e foram contabilizados os dados na Tabela 5-1. As alterações passaram por reduzir a distância em 10 cm e aumentar a distância em 10 cm.

Tabela 5-1 – Análise do fator distância nos resultados obtidos

FISSURA	DISTÂNCIA ORIGINAL (m)	VALORES CORRETOS (mm)		NOVA DISTÂNCIA (m)	VALORES OBTIDOS COM A VARIÇÃO DA DISTÂNCIA (mm)	
		Espessura (média)	Desenvolvimento		Espessura (média)	Desenvolvimento
FISSURA 1	0,80	3,08	817	0,70	2,66	707
				0,90	3,50	927
FISSURA 3	0,80	5,09	1172	0,70	4,41	1014
				0,90	5,78	1330
FISSURA 5	0,80	3,62	1681	0,70	3,13	1454
				0,90	4,11	1909

O valor da espessura média é obtido no algoritmo no *software* Matlab no comando thickPROIstore, no qual se encontram gravadas todas as medições efetuadas na imagem relativas à espessura.

Na Tabela 5-2 foram feitas as análises das diferenças obtidas, mas em percentagem.

Tabela 5-2 – Análise dos valores obtidos em percentagem

FISSURA	DISTÂNCIA ORIGINAL (m)	NOVA DISTÂNCIA (m)	VALORES			
			Espessura (média) %	Diferença %	Desenvolvimento %	Diferença %
FISSURA 1	0,80	0,70	86,37	13,63	86,53	13,47
		0,90	113,63	13,63	113,47	13,47
FISSURA 3	0,80	0,70	86,64	13,36	86,51	13,49
		0,90	113,55	13,55	113,48	13,48
FISSURA 5	0,80	0,70	86,46	13,54	86,50	13,50
		0,90	113,54	13,54	113,56	13,56

Atendendo aos valores obtidos verifica-se que a variação a 10 cm na distância do UAV ao alvo tem repercussão uma diferença na ordem de 13,5% tanto na avaliação das espessuras como na avaliação do

desenvolvimento das fissuras. Este valor apresentado serve para demonstrar que a distância terá influência no valor final apresentado pelo que a mesma terá que ser contabilizada da forma mais exata possível, atendendo ao erro que se pode estar a imputar ao valor final e que não corresponde a nenhuma questão do algoritmo, mas a uma questão de obtenção da medição. O reconhecimento da importância que tem este parâmetro traduziu-se na procura de uma solução que permita a obtenção de uma medição o mais exata possível e que esta seja, se possível adicionada à própria fotografia. Foi definida como melhor solução a inclusão de um laser, figura 5-28, no próprio UAV o qual terá como função a medição da distância e a inclusão deste valor nos metadados da fotografia de onde esse valor seja obtido em modo automático pelo algoritmo.

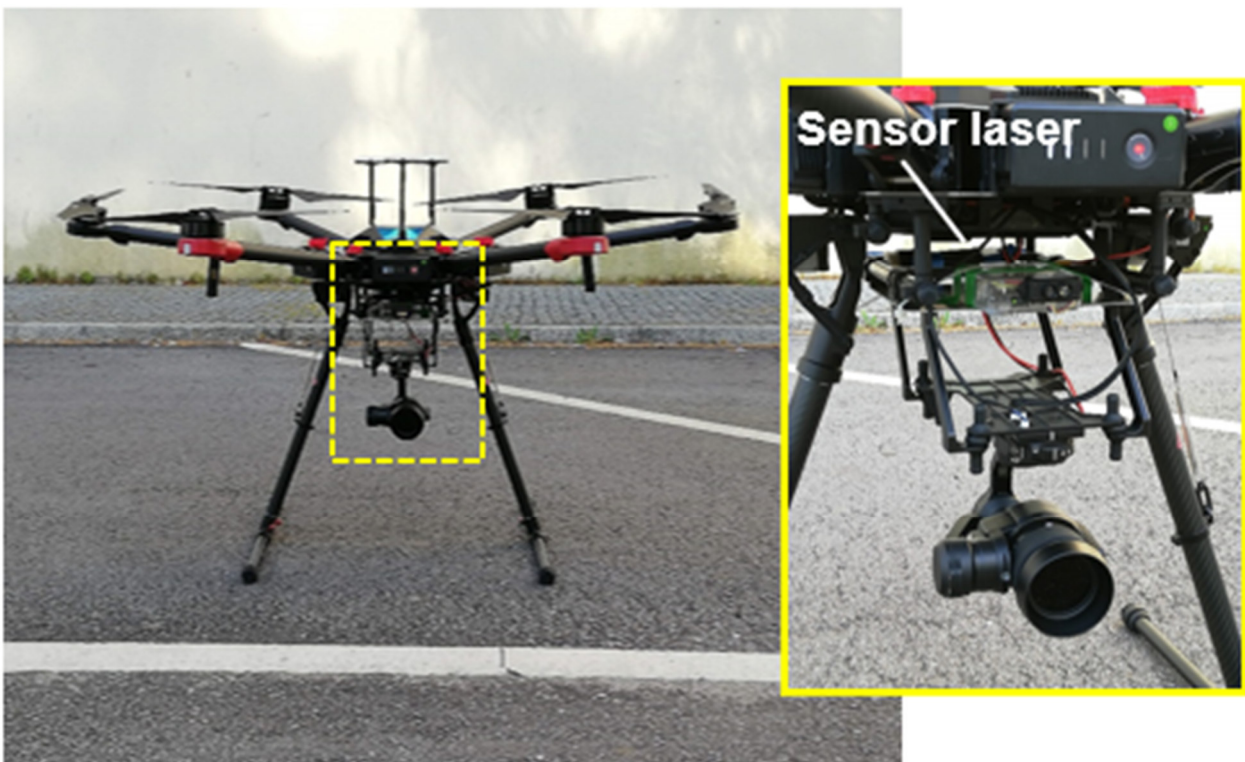


Figura 5-28 - UAV DJI MATRICE 600 Pro Equipado com Laser

Com a conclusão dos ensaios e os resultados obtidos entendeu-se que o passo seguinte deveria ser a realização de um caso de estudo no terreno em que as condições encontradas sejam semelhantes a outras estruturas de betão armado e não em fissuras perfeitamente definidas e controladas como as que serviram de apoio ao balizamento do algoritmo.

CAPÍTULO 6

CASO DE ESTUDO

6.1 INTRODUÇÃO

Seguindo uma lógica estabelecida e sempre baseada nos resultados obtidos na etapa anterior, os quais foram sempre colocados em questão e validados, o passo lógico seguinte foi a execução de um caso estudo que permitisse aferir todo o processo num contexto de utilização dos meios e do método nos locais onde o mesmo irá realmente ser utilizado. A escolha recaiu sobre a fachada do edifício F do campus do ISEP, fotografia 6-1, a qual apresenta algumas fissuras estando a dimensão da fachada e a sua envolvente enquadradas no objetivo traçado.

O edifício F do ISEP é um projeto da autoria do arquiteto português Filipe Oliveira Dias, ocupando uma área de 13.200 m². O edifício é composto por 5 pisos acima da cota de soleira e um piso enterrado destinado ao estacionamento de veículos. No rés-do-chão possui oficinas e laboratórios e nos restantes pisos, encontram-se gabinetes, laboratórios, salas de aula, anfiteatros e um restaurante. Atualmente este edifício está afeto aos cursos de mecânica, mecânica automóvel, gestão industrial e eletrotecnia, tendo ainda laboratórios dedicados a outros cursos lecionados no ISEP.

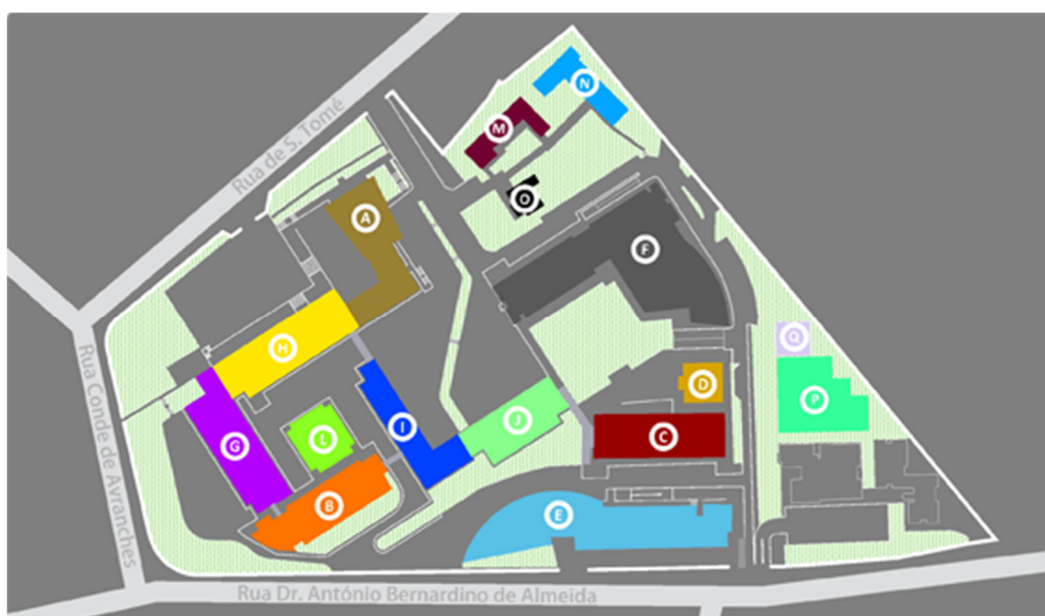


Figura 6-1 – Campus do ISEP (ISEP, 2021)

A fachada em questão, figura 6-2, apresenta um acentuado número de fissuras, sendo que algumas delas já com alguma necessidade de monitorização.



Figura 6-2 – Fachada do Edifício F alvo do ensaio

6.2 ENSAIO

O ensaio foi feito por recurso ao UAV DJI Mavic Mini, tendo sido efetuados voos de captação de imagens a uma distância de 4 metros da fachada. Na figura 6-3 encontram-se alguns exemplos das fotografias captadas no ensaio efetuado.

Também foram feitas passagens um pouco mais distantes não tanto com o intuito de deteção das fissuras, mas para obtenção de fotografias panorâmicas e em que a fachada fosse visível na sua totalidade.

De notar que no dia em que as captações foram efetuadas as condições meteorológicas não foram constantes, pelo que em algumas fotografias se pode observar o efeito da luz solar com bastante incidência e em outras existe menos claridade em virtude da existência de nebulosidade acentuada.



Figura 6-3 – Fotografias do ensaio captadas com o UAV DJI Mavic Mini

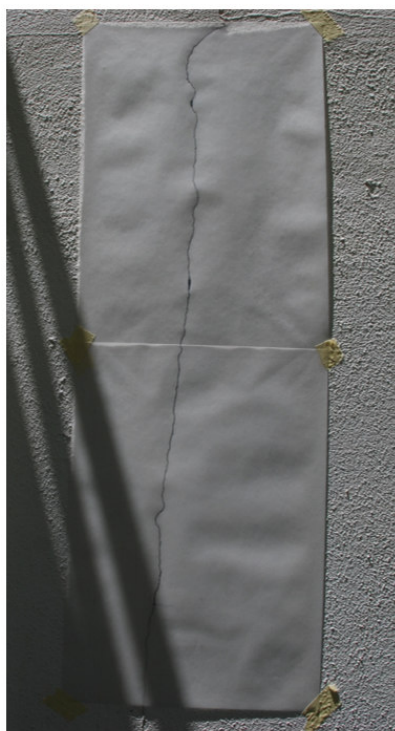
No ensaio foram tidos em consideração os métodos necessários para validar as medições obtidas de forma automática pelo algoritmo. Deste modo, foi feita a identificação de quatro fissuras existentes na fachada, mas em local acessível, figura 6-4 e 6-5, que permitisse método de obtenção de forma segura e expedita. Estas fissuras destas encontram-se representadas nas figuras 6-6 a 6-9.



Figura 6-4 – Localização das fissuras 1 e 2



Figura 6-5 – Localização das fissuras 3 e 4



a) Fotografia Marcação Fissura 1



b) Fotografia Fissura 1

Figura 6-6 – Marcação e Fissura 1



a) Fotografia da Marcação Fissura 2



b) Fotografia Fissura 2

Figura 6-7 – Marcação e Fissura 2



a) Fotografia da Marcação Fissura 3

b) Fotografia Fissura 3

Figura 6-8 – Marcação e Fissura 3



a) Fotografia da Marcação Fissura 4

b) Fotografia Fissura 4

Figura 6-9 – Marcação e Fissura 4

O processo de marcação das fissuras foi feito por recurso a papel vegetal o qual foi colado com fita adesiva no local da fissura seguindo-se a marcação da fissura com um lápis, respeitando com a máxima precisão possível a espessura e o desenvolvimento da fissura.

Após a obtenção das fissuras nas folhas de papel vegetal, estas foram digitalizadas em uma XEROX 7830 e modeladas em AutoCAD de modo permitir a correta obtenção dos valores de cada uma das fissuras.

Neste processo de digitalização foi efetuada uma marcação na folha de papel vegetal com 2 cm, figura 6-10, que permitia a contabilização da escala de forma correta.

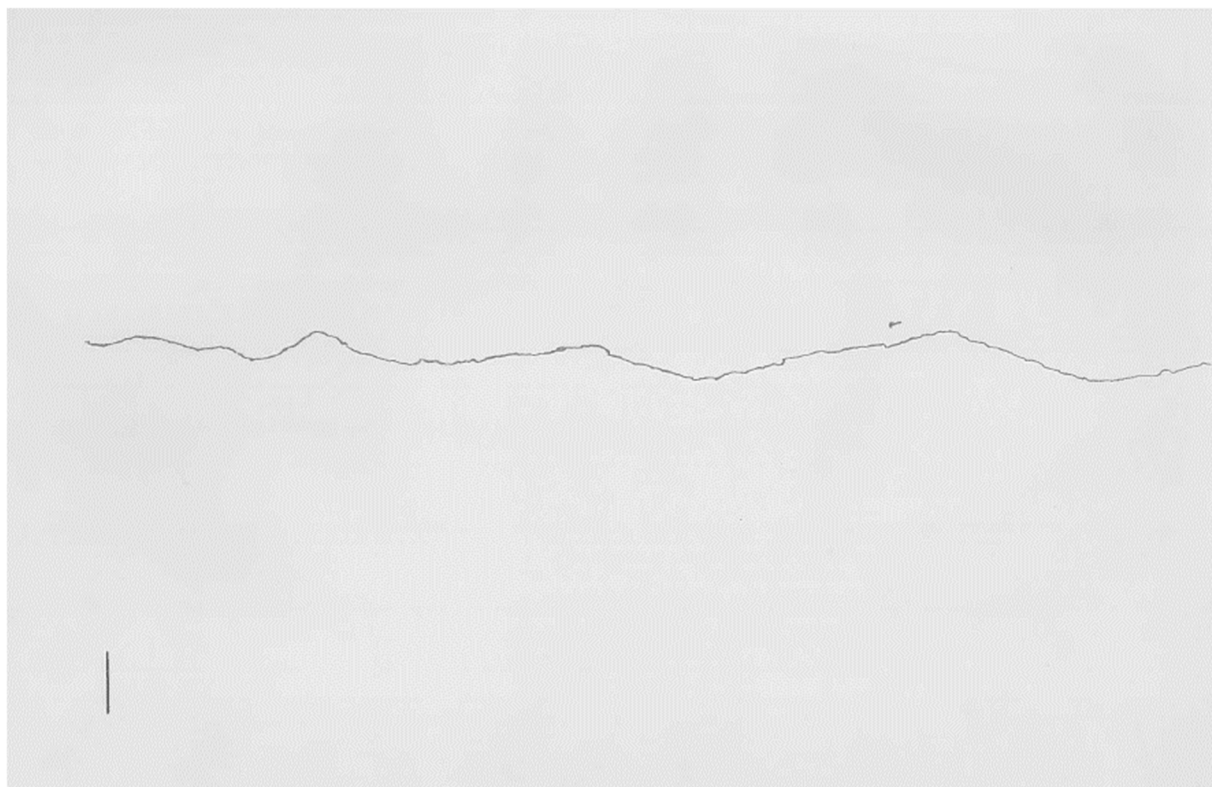


Figura 6-10 – Digitalização da Fissura 3 com a marcação de 2 cm

Após a modelação foi possível obter os dados de cada uma das fissuras, apresentadas nas figuras 6-11 a 6-14, que a comparação com os dados obtidos no algoritmo.

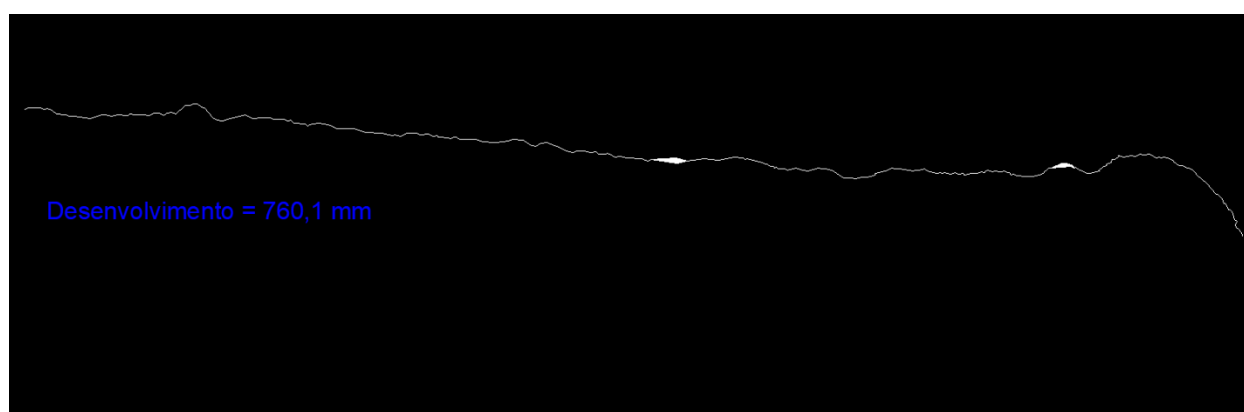


Figura 6-11 – Modelação Fissura 1

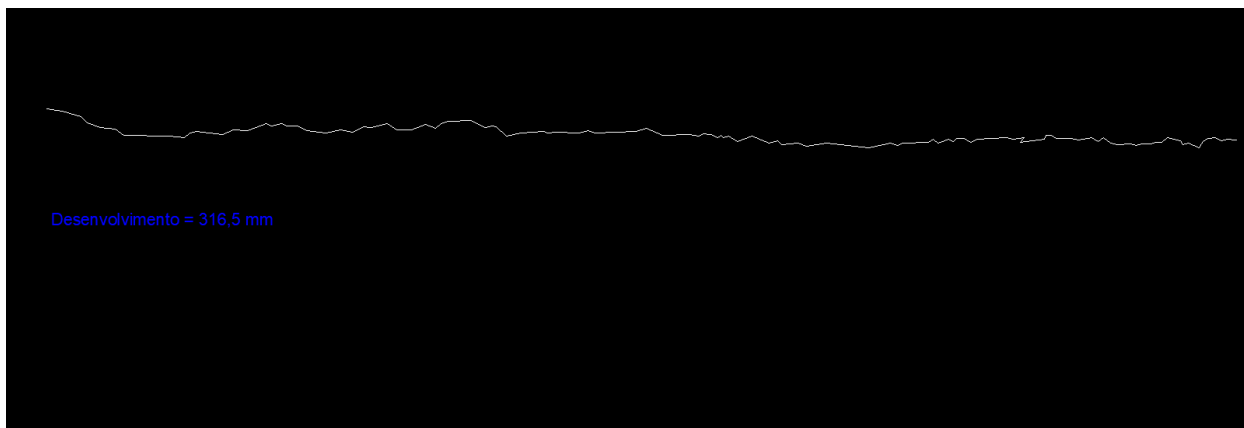


Figura 6-12 – Modelação Fissura 2

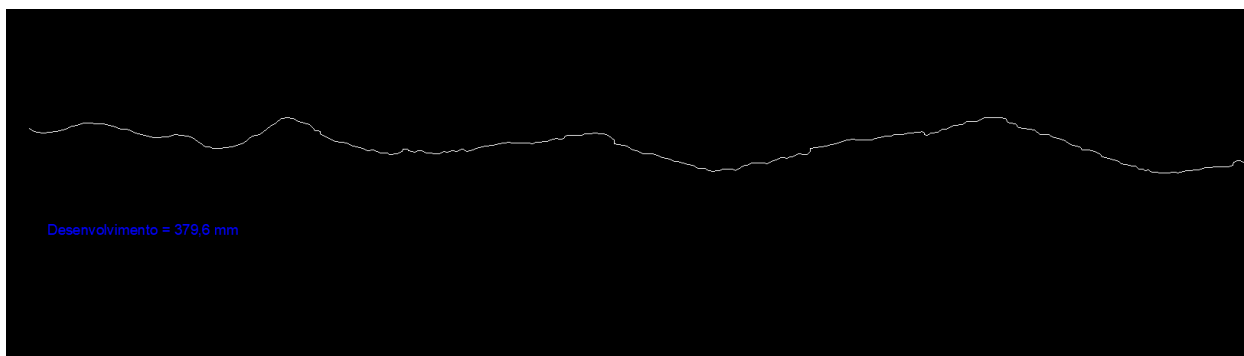


Figura 6-13 – Modelação Fissura 3

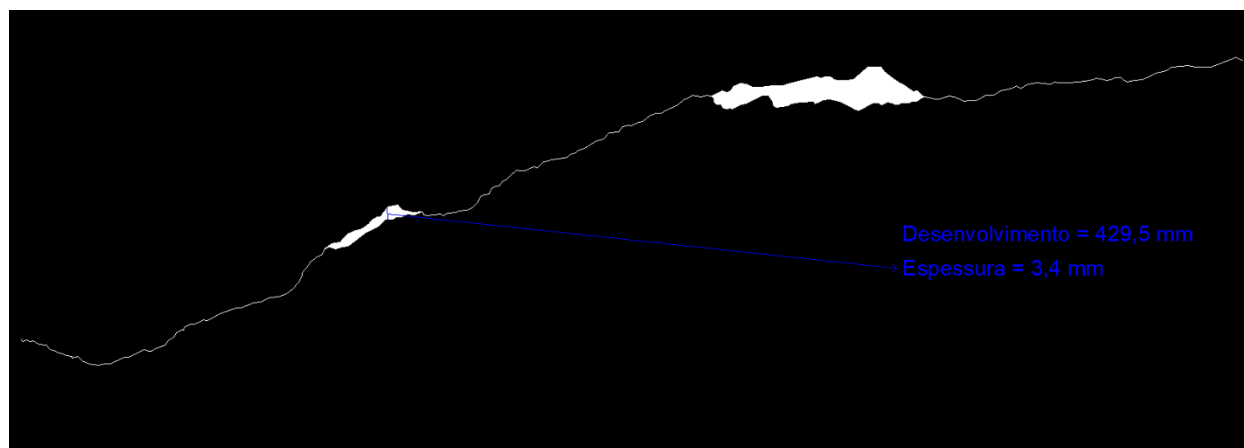


Figura 6-14 – Modelação Fissura 4

As fissuras anteriormente identificadas de 1 a 4 foram analisadas no algoritmo e os resultados obtidos neste encontram-se nas figuras 6-15 a 6-18.

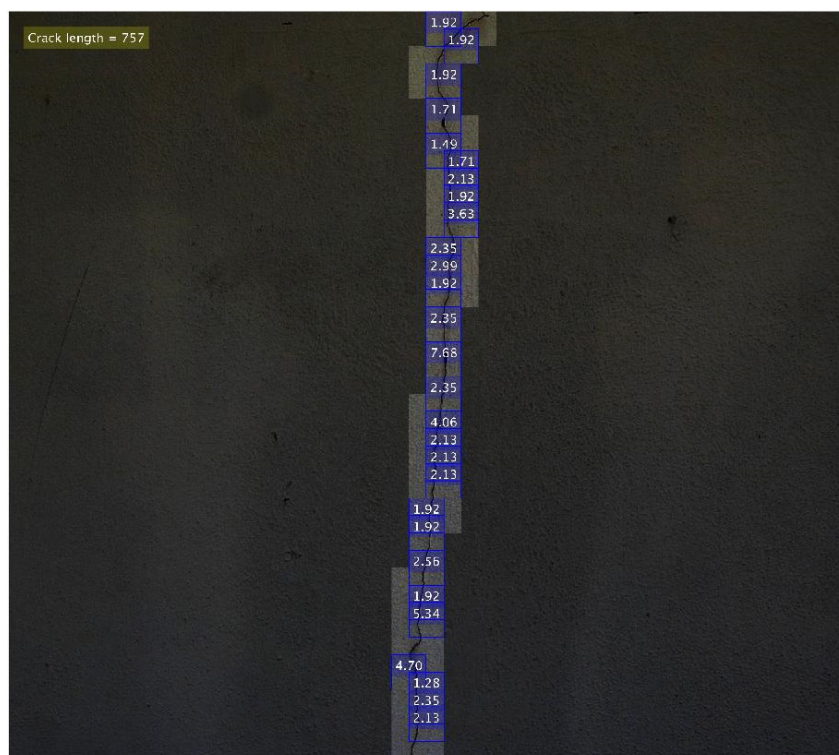


Figura 6-15 – Detecção e caracterização da Fissura 1

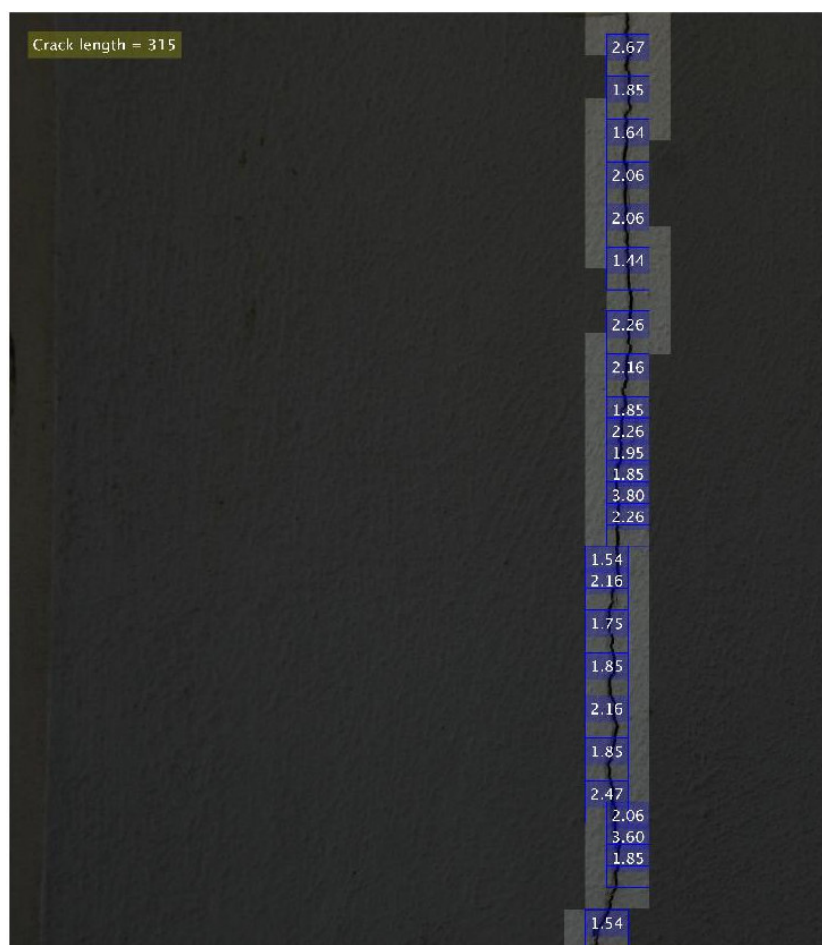


Figura 6-16 – Detecção e caracterização da Fissura 2

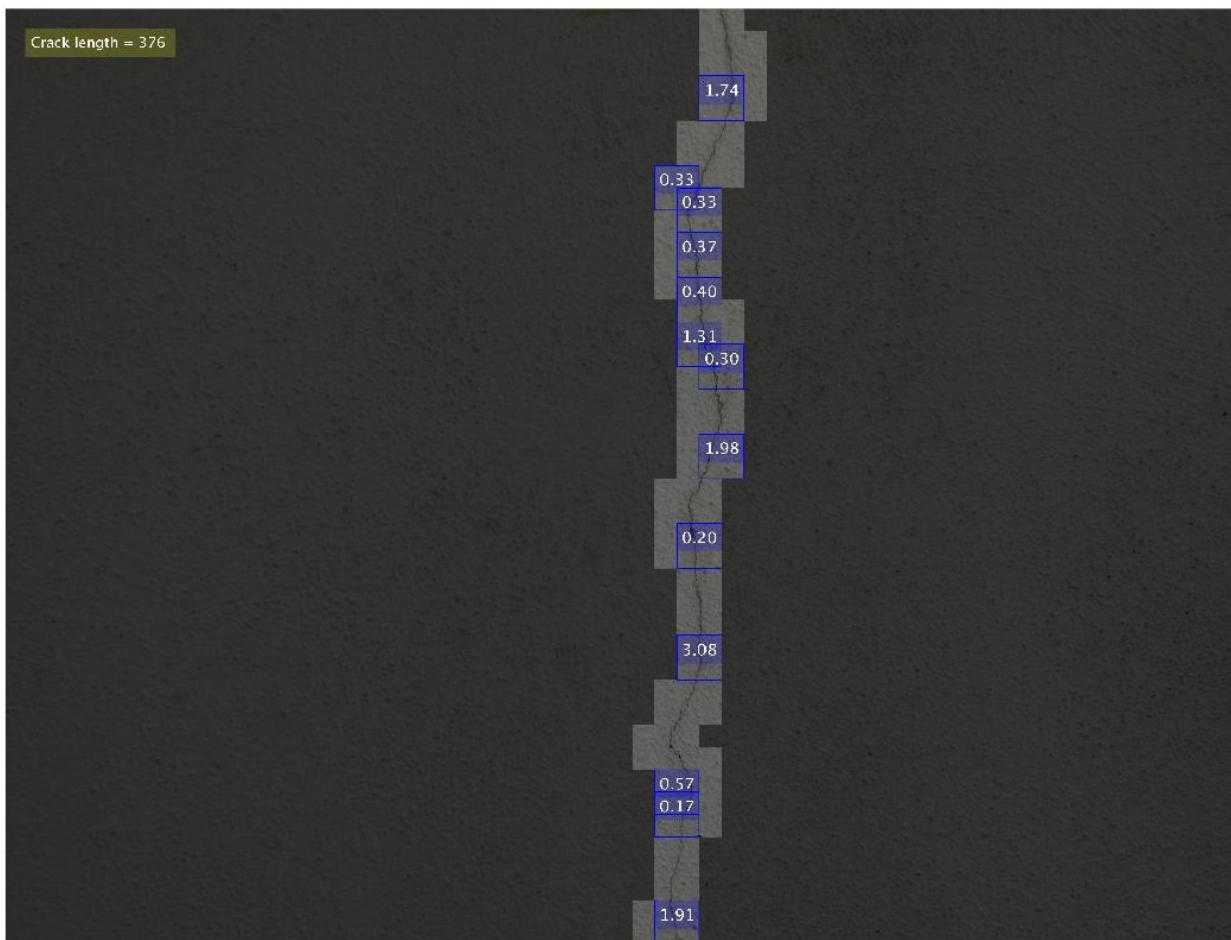


Figura 6-17 – Detecção e caracterização da Fissura 3

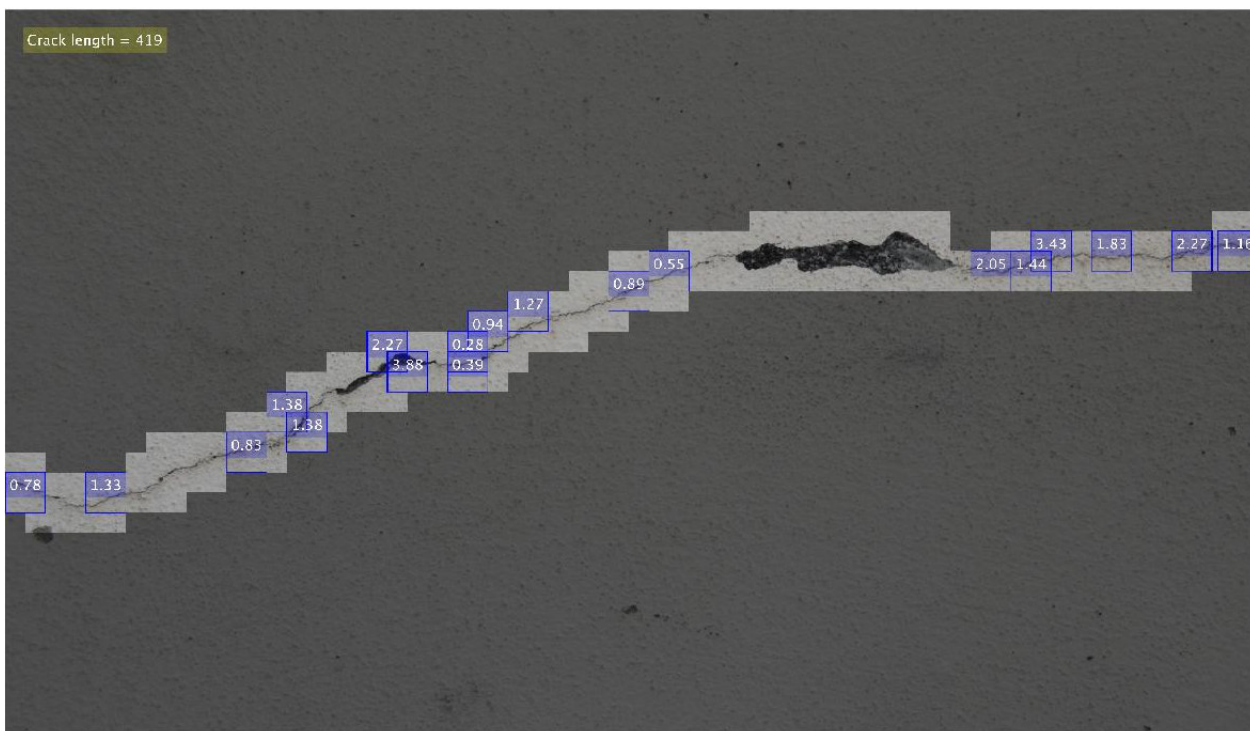


Figura 6-18 – Detecção e caracterização da Fissura 4

Como se pode verificar pelas figuras das fissuras 1 a 4 os resultados obtidos pela metodologia mais utilizada (medição e decalque) e os resultados obtidos pelo algoritmo são em tudo similares e muito aproximados, inclusivamente as diferenças obtidas nem sequer são de relevo atendendo ao valor das mesmas, no entanto na fissura 4 verifica-se uma pequena diferença no desenvolvimento, com o valor obtido na modelação em AutoCAD de 429,50 mm e o do algoritmo de 419,00 mm. Esta diferença está relacionada com a forma como a medição é feita uma vez que no algoritmo a medição tem por base uma regressão linear o que nas zonas mais espessas pode induzir em pequenos erros de medição quando em comparação com a medição efetuada na modelação a qual é feita pela ligação das duas zonas de forma direta. Verifica-se também que a existe uma zona de maior dimensão a qual só possui fissura na zona central sendo o resto uma ausência de pintura. O algoritmo neste caso não apresenta qualquer valor para a espessura o que até está correto, caso contrário os valores seriam referentes à totalidade da zona dado que a fissura não é totalmente perceptível, no entanto a ausência da deteção da espessura está relacionada com o facto de a dimensão da mesma na ROI ser superior à própria janela de 227x227, trata-se de uma situação não muito usual, mas que deverá ser devidamente acautelada no algoritmo.

No que concerne ao estudo da totalidade da fachada a mesma foi dividida nas zonas onde se encontram fissuras, sendo que cada zona foi identificada na marcação feita na fachada com a identificação Z.F. (zona de fissura) seguida de um número que identifica a zona da figura, sendo o mesmo sequencial. Na figura 6-19 encontra-se a fachada em estudo e as zonas de fissura (Z.F.) estudadas.

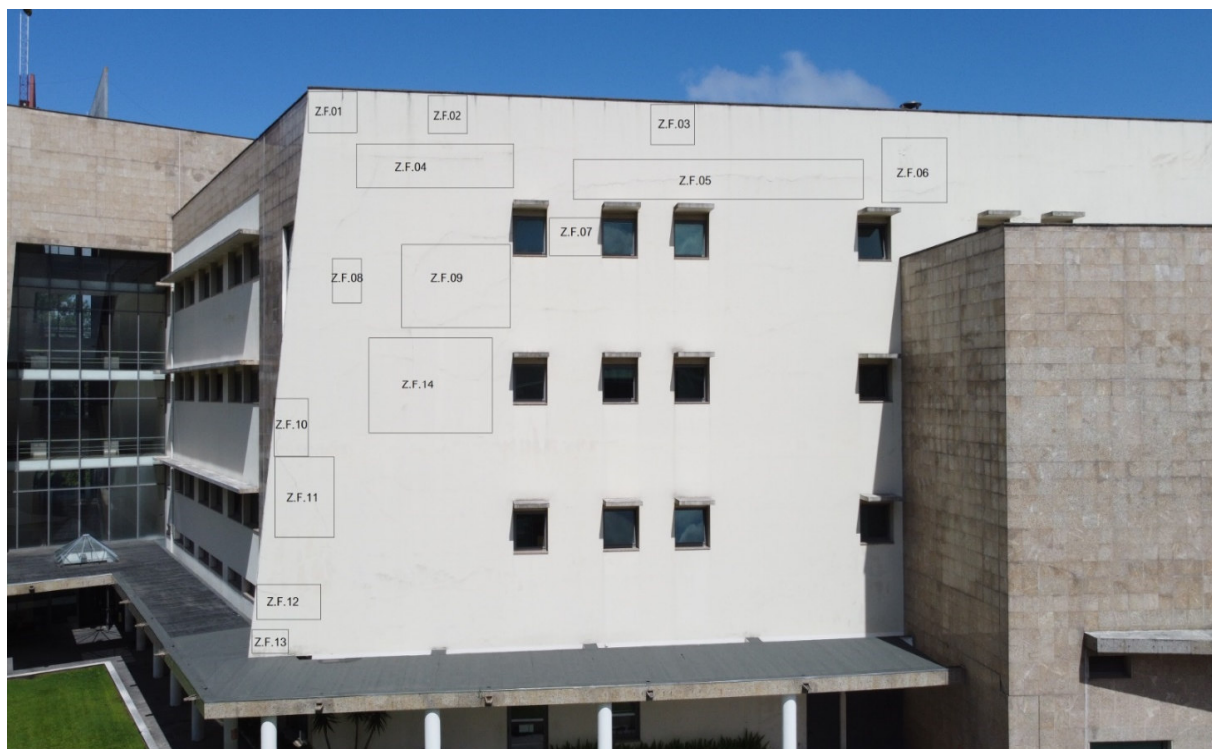


Figura 6-19 – Zonas de Fissura (Z.F.) da fachada em estudo

Em cada uma das zonas identificadas na fachada em estudo do edifício F foram efetuadas as fotografias da zona das fissuras e seguidamente essas fotografias foram introduzidas no algoritmo para que o mesmo pudesse efetuar a deteção das fissuras existentes. Em alguns casos também foram realizadas a identificação automática das fissuras tendo sido obtidos dados necessários à caracterização das fissuras e do estado atual da fachada.

As fotografias 6-20 a 6-47, onde se encontram identificadas as fissuras de maior relevância existentes na fachada e que foram alvo de estudo.



Figura 6-20 – Fotografia Zona Z.F.01

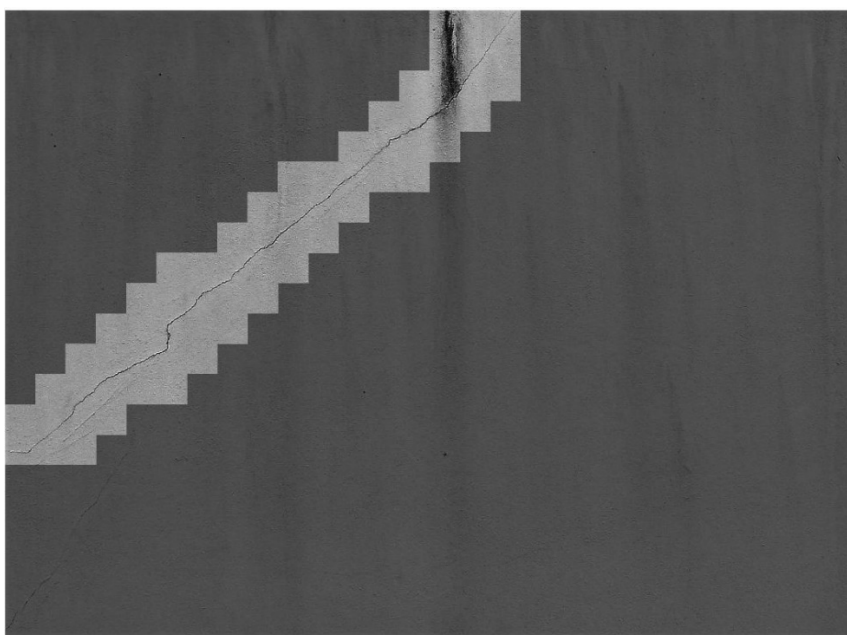


Figura 6-21 – Deteção Fissura Z.F.01



Figura 6-22 – Fotografia Zona Z.F.02

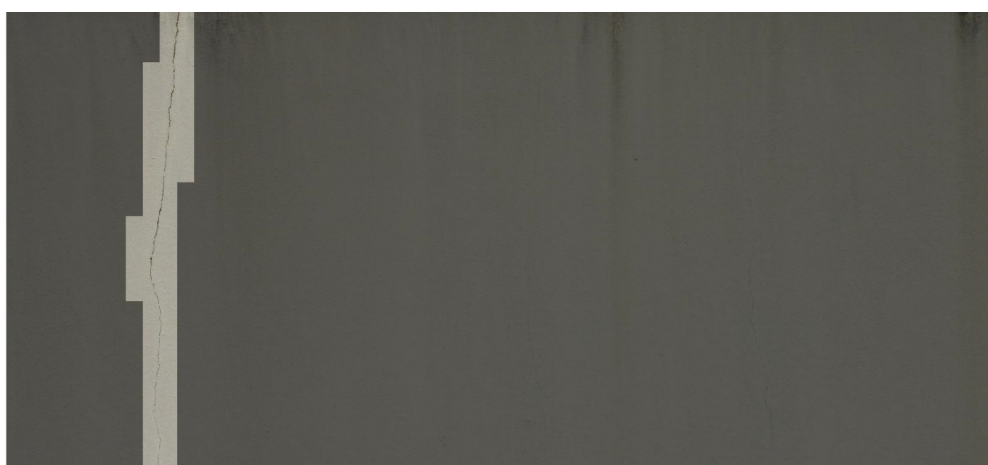


Figura 6-23 – Detecção Fissura Z.F.02

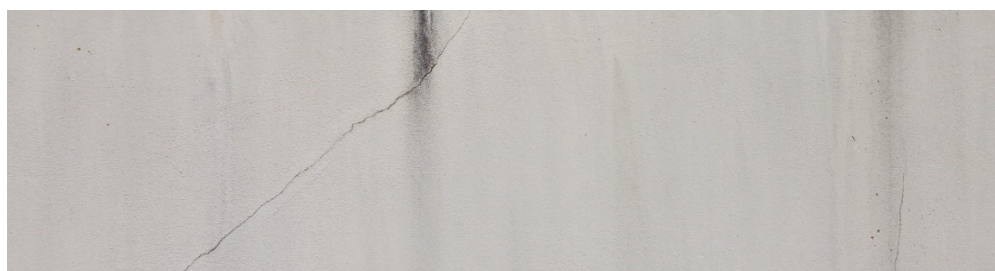


Figura 6-24 – Fotografia Zona Z.F.03



Figura 6-25 – Detecção Fissura Z.F.03



Figura 6-26 – Fotografia Zona Z.F.04

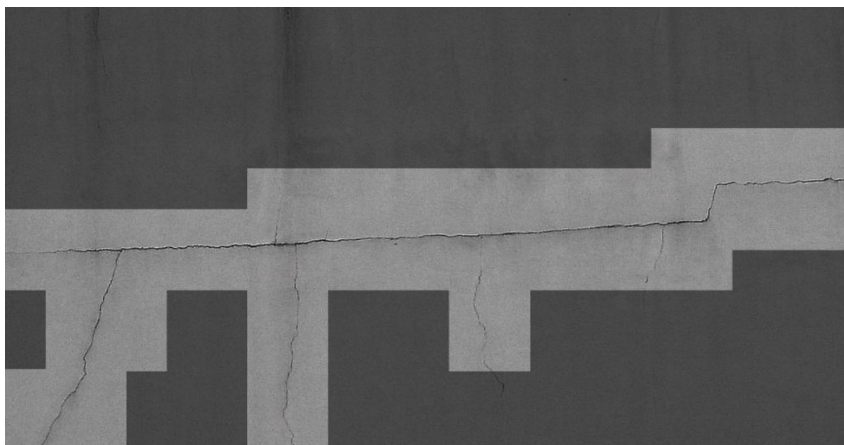


Figura 6-27 - Detecção Fissura Z.F.04

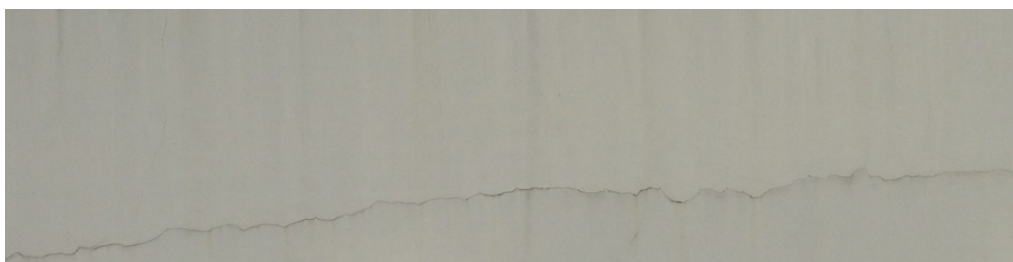


Figura 6-28 – Fotografia Zona Z.F.05



Figura 6-29 – Detecção Fissura Z.F.05

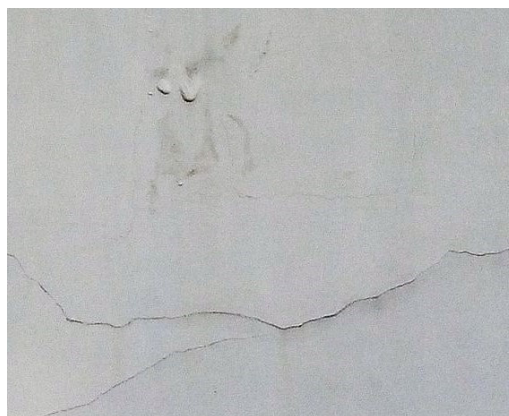


Figura 6-30 – Fotografia Zona Z.F.06

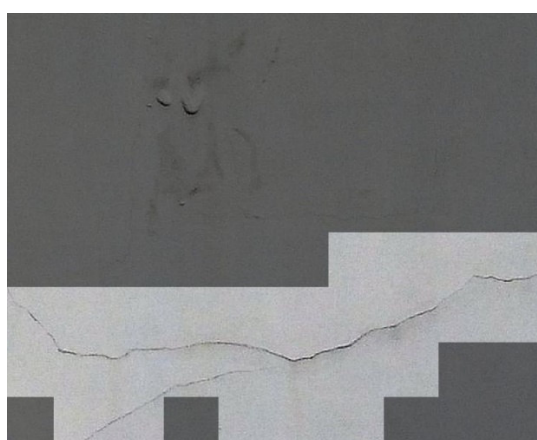


Figura 6-31 – Detecção Fissura Z.F.06

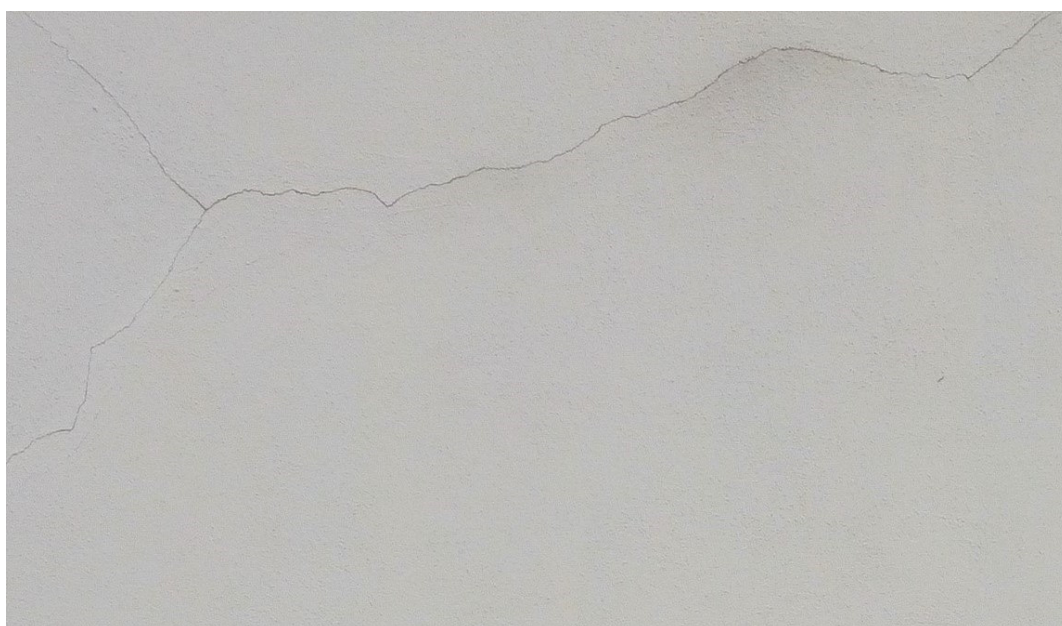


Figura 6-32 – Fotografia Zona Z.F.07



Figura 6-33 – Detecção Fissura Z.F.07

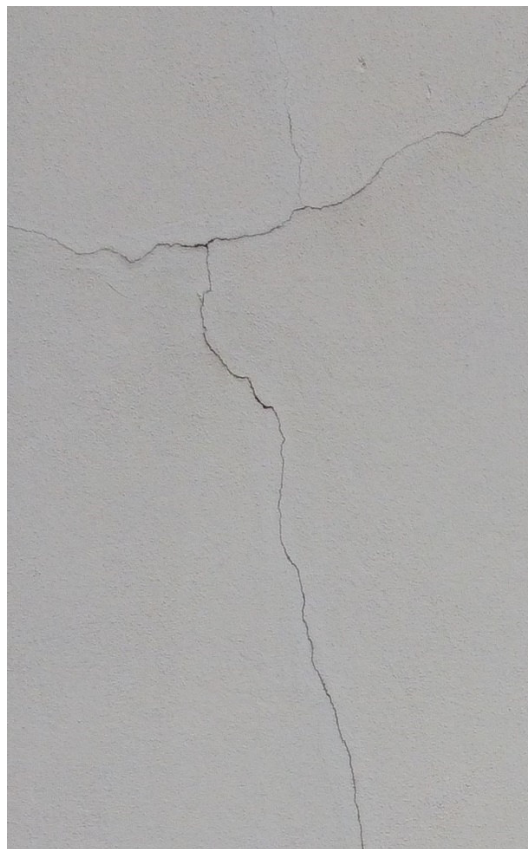


Figura 6-34 – Fotografia Zona Z.F.08

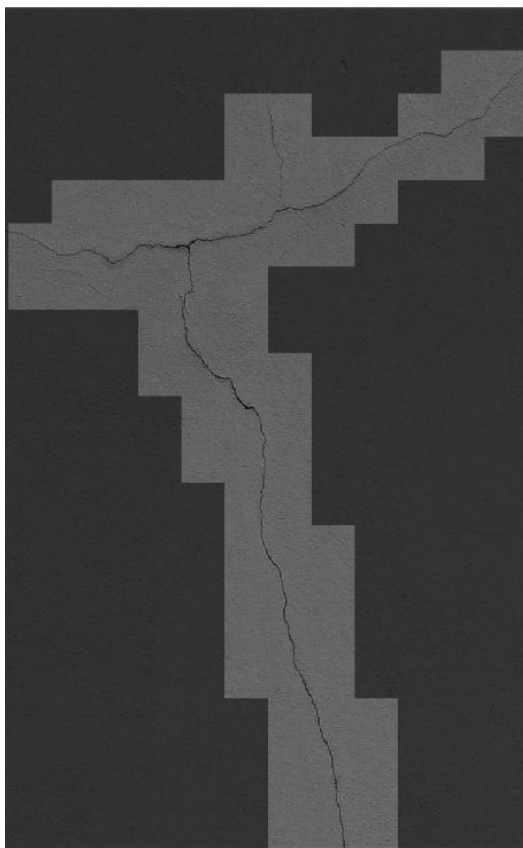


Figura 6-35 – Detecção Fissura Z.F.08



Figura 6-36 – Fotografia Zona Z.F.09

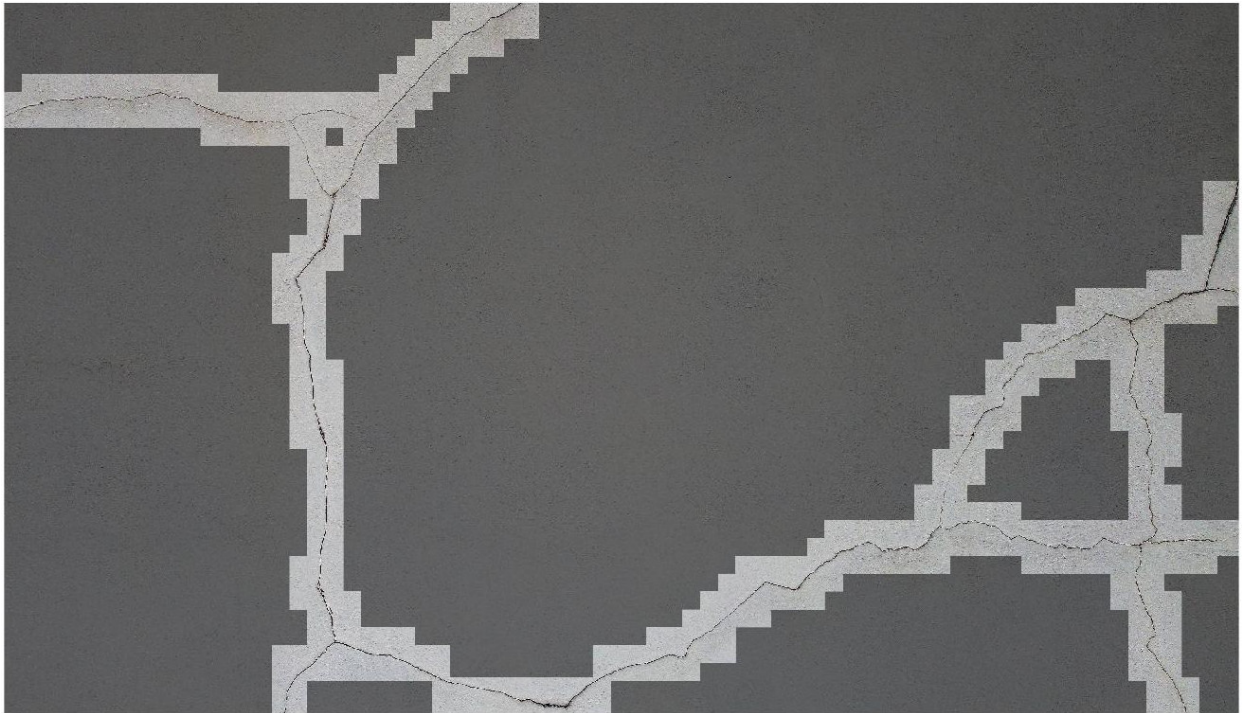


Figura 6-37 – Detecção Fissura Z.F.09

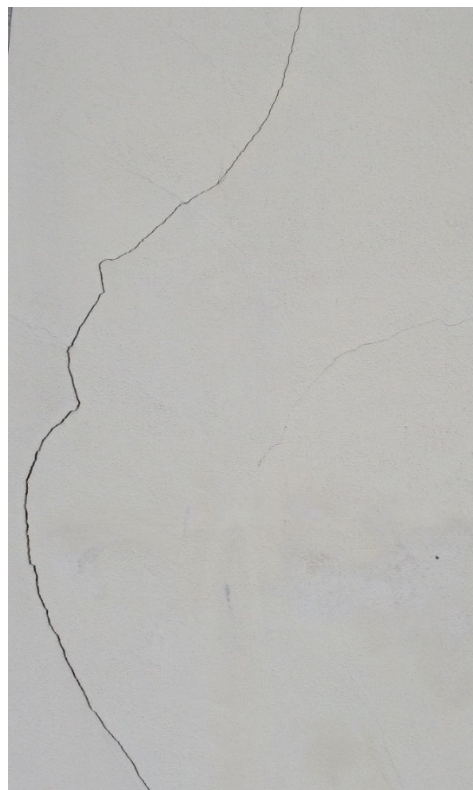


Figura 6-38 – Fotografia Zona Z.F.10

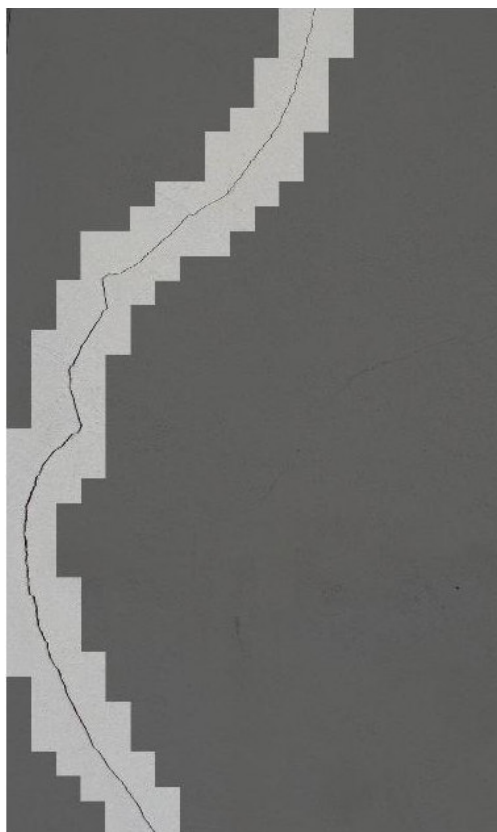


Figura 6-39 – Detecção Fissura Z.F.10



Figura 6-40 – Fotografia Zona Z.F.11

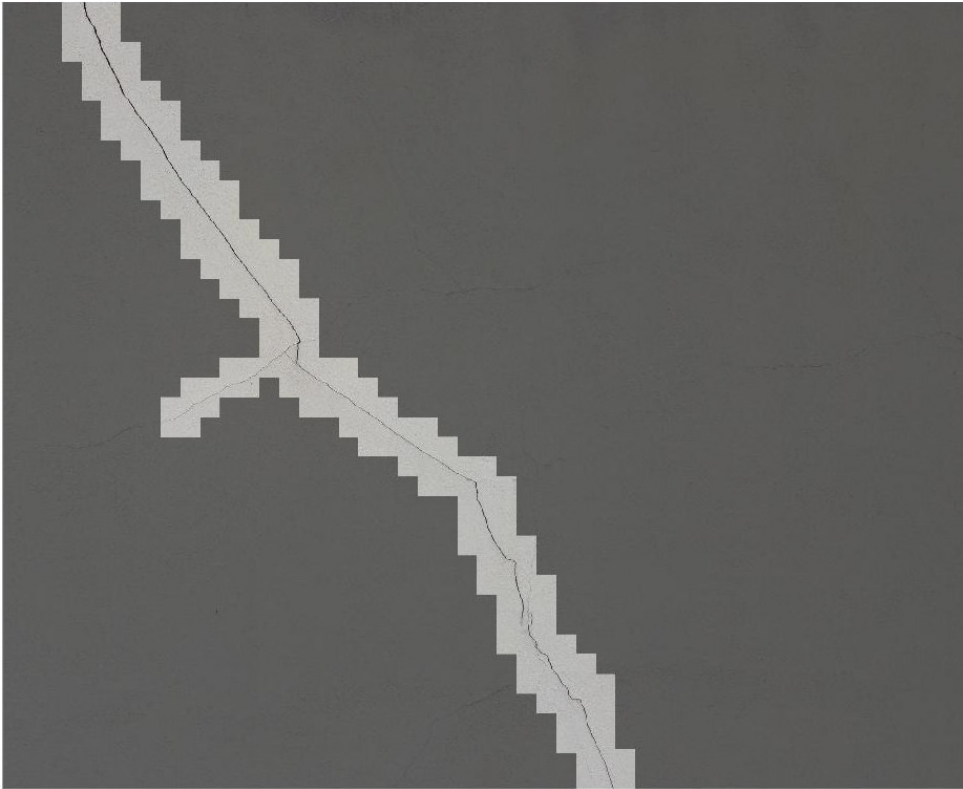


Figura 6-41 – Detecção Fissura Z.F.11



Figura 6-42 – Fotografia Zona Z.F.12



Figura 6-43 – Detecção Fissura Z.F.12



Figura 6-44 – Fotografia Zona Z.F.13

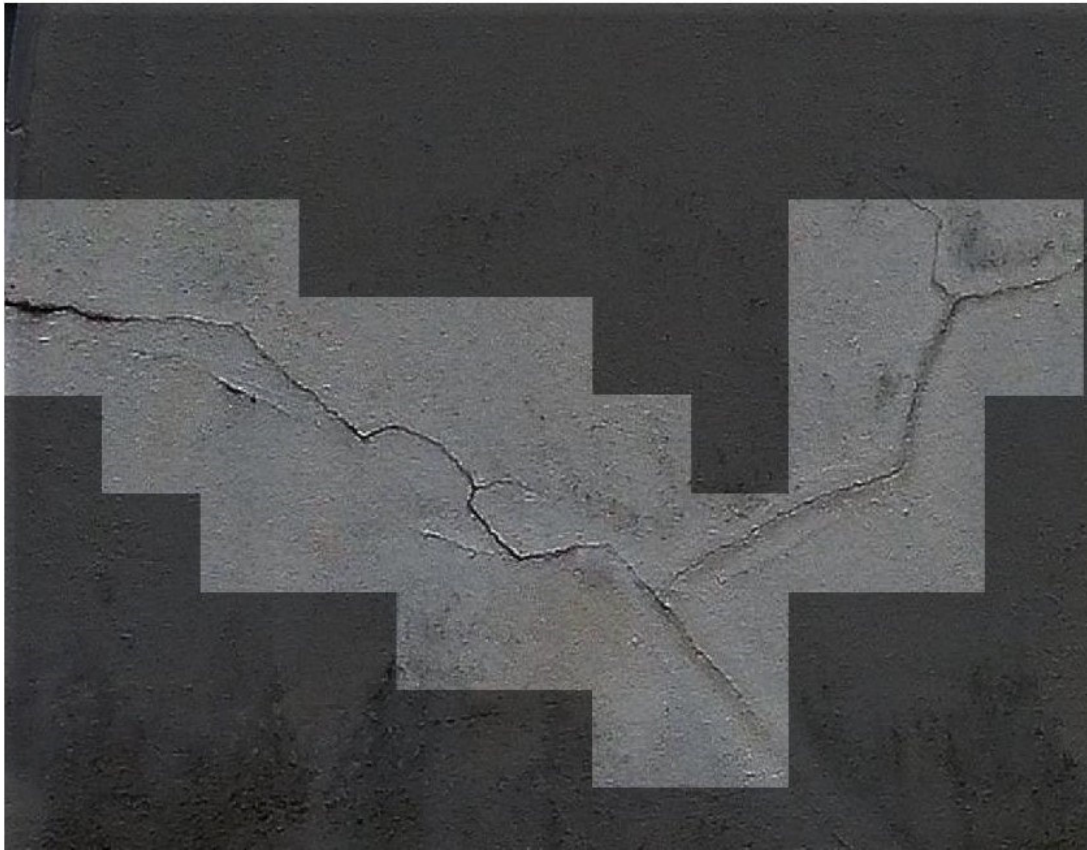


Figura 6-45 – Detecção Fissura Z.F.13



Figura 6-46 – Fotografia Zona Z.F.14

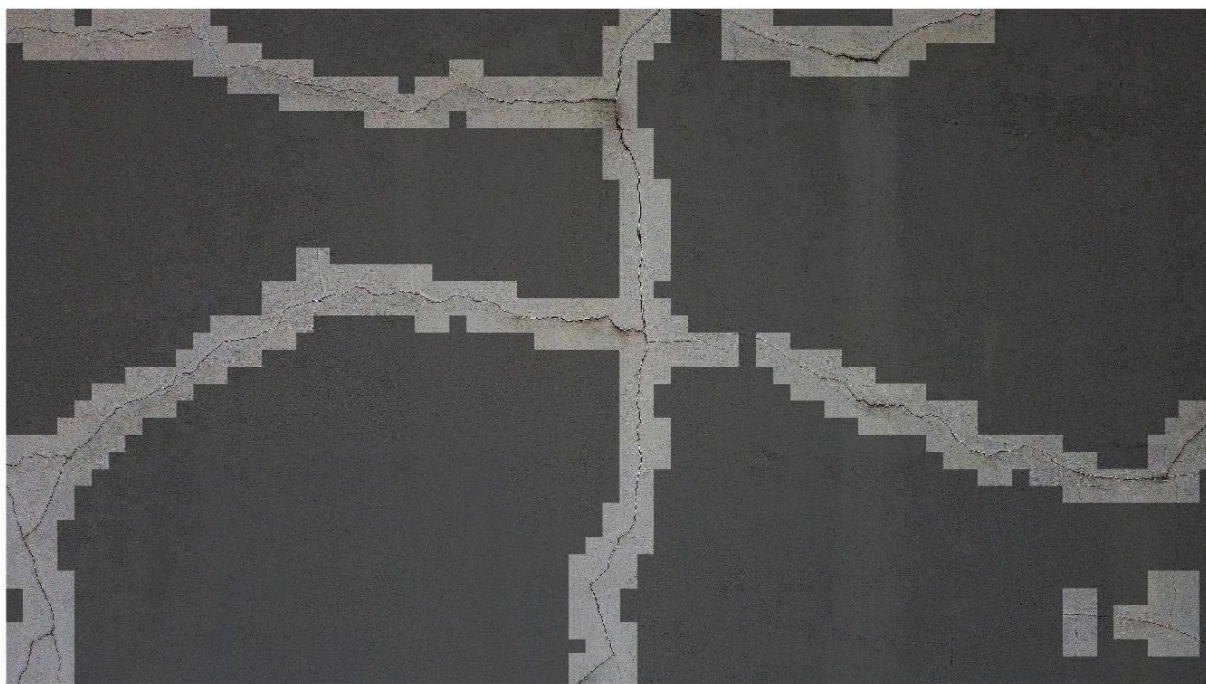


Figura 6-47 – Detecção Fissura Z.F.14

Como se pode verificar pelas fotografias apresentadas, salvo pequenas exceções em que as fissuras são muito ténues ou apresentam defeitos na pintura uma vez que a fachada é pintada e o acabamento regista algumas imperfeições, a deteção das fissuras é em geral, muito satisfatória e dentro das expetativas criadas com os testes efetuados anteriormente. De notar que o paramento, além das fissuras apresenta outras patologias tais como a falta de acabamento, zonas de acumulação de água entre a pintura e o paramento e escorrências (ver Figura 6-48).



a) Zona com bolsas de água

b) Zona com escorrências

Figura 6-48 – Zonas de outras anomalias na fachada

Com este resultado considera-se validado o algoritmo da deteção uma vez que os resultados são sempre de uma fiabilidade elevada, mesmo em situações de diferenças de luminosidade e de incidência solar como apresentado neste caso de estudo

Relativamente ao algoritmo de identificação das fissuras (desenvolvimento e espessura) e tendo em consideração a forma como os resultados do presente ensaio foram validados, efetuaram-se as medições de várias fissuras anteriormente apresentadas e para as quais se ilustra a aplicação dos algoritmos desenvolvidos nas figuras 6-49 a 6-54.



Figura 6-49 – Dados Caracterização Fissura Z.F.02

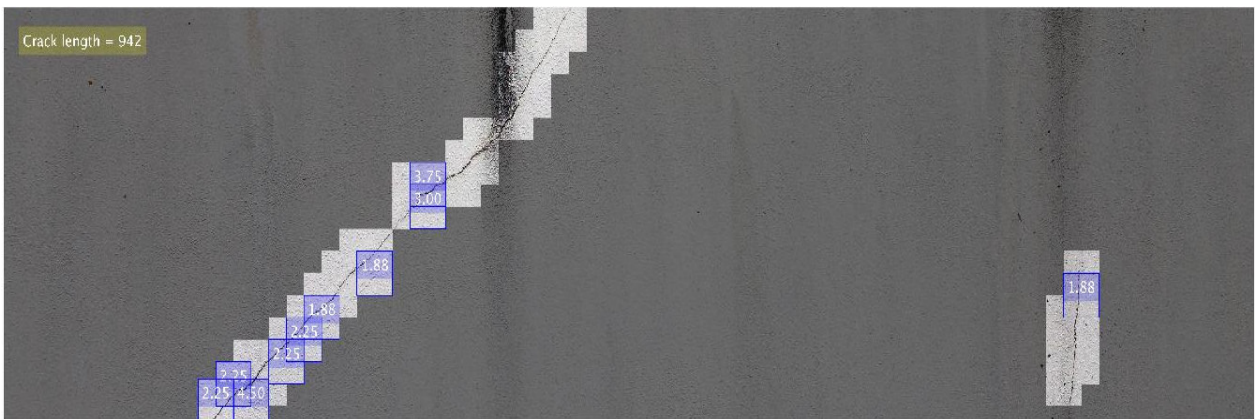


Figura 6-50 – Dados Caracterização Fissura Z.F.03

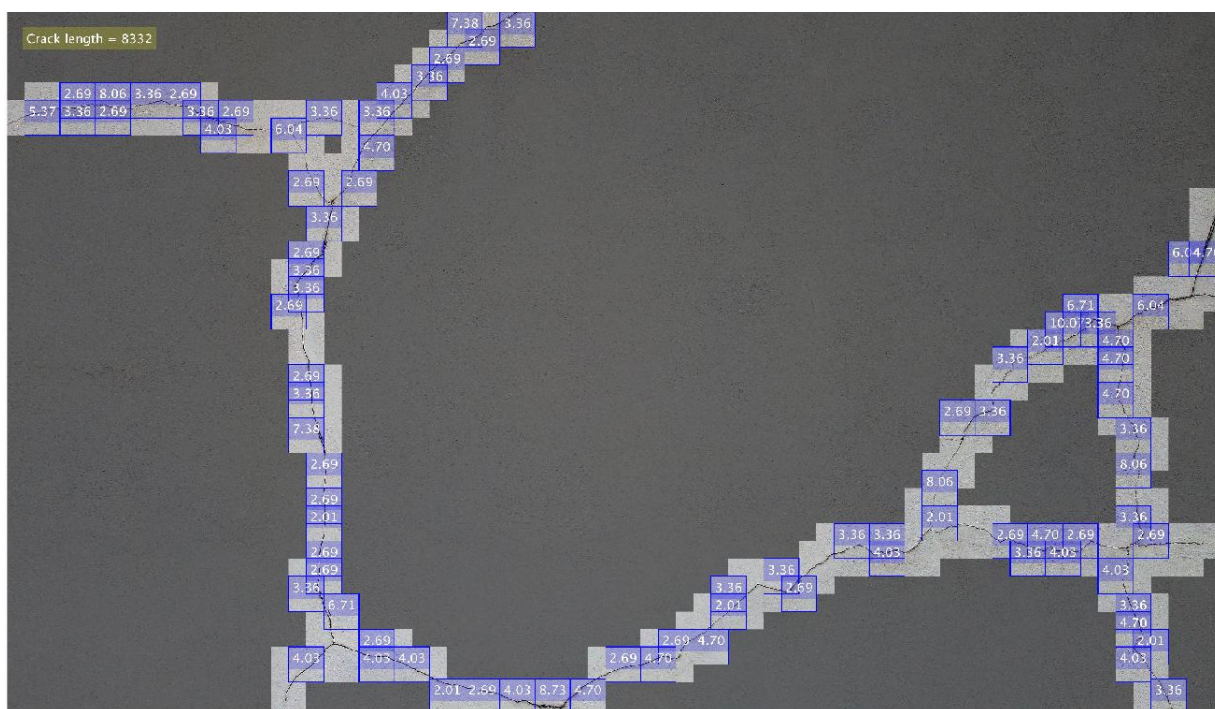


Figura 6-51 – Dados Caracterização Fissura Z.F.09

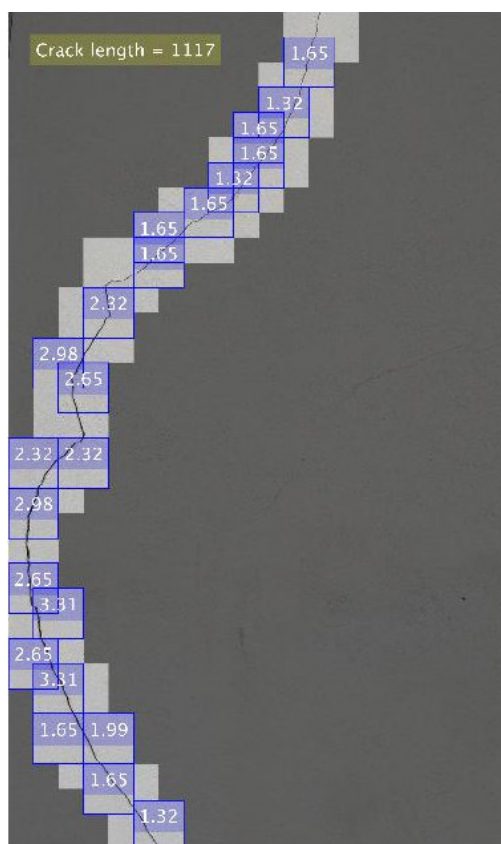


Figura 6-52 – Dados Caracterização Fissura Z.F.10

Uma estratégia que pode ser utilizada como motivo de rápida análise passa pela comparação das zonas de fissuras de maior espessura em relação às zonas de fissuras menor espessura e verificar se os resultados se coadunam com as dimensões apresentadas, facto que para as situações analisadas se confirma. Numa análise mais cuidada verifica-se que existe um ou outro valor em algumas fissuras que parece um pouco desfasado por excesso com os restantes valores. Esses casos ocorrem usualmente em zonas de início de ramificação de fissuras em que essa ramificação se situa na mesma janela ROI. Estas situações em particular implicam por vezes que a medição some as espessuras dos dois ramos de fissura e apresente como resultado o somatório. São situações que não ocorrem com muita frequência, mas que estão a ser alvo de análise e estudo na tentativa de obtenção de soluções corretivas.

Comparando a informação obtida com os resultados obtidos aquando da validação deste ensaio os valores apresentados estão dentro dos valores expectáveis pelo que consideramos que o algoritmo efetuou a sua função com sucesso.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho foi inicialmente direcionado para o desenvolvimento de um algoritmo de detecção de fissuras, no entanto, e com base nos excelentes resultados obtidos nos vários ensaios efetuados, a evolução natural e a vontade de ir mais longe com este processo motivou o estabelecimento de uma meta mais ambiciosa. Assim, foi identificado o novo propósito de obter um algoritmo robusto e validado na identificação automática de fissuras que permitisse a sua detecção, mas também a sua caracterização, por intermédio da obtenção do desenvolvimento e da espessura. Esta meta estabelecida apesar de bastante mais ambiciosa demonstrou ser o tónico necessário para a evolução que foi possível alcançar.

Nesta fase entende-se que este algoritmo tem todas as garantias para evoluir no sentido de se transformar uma alternativa muito válida à execução de inspeções e à monitorização de fissuras em estruturas de betão armado em detrimento dos métodos atuais. As vantagens e o grau de fiabilidade que o mesmo já apresenta no fase atual são uma garantia que o mesmo está preparado para o uso em trabalhos no terreno, ressalvando-se, no entanto, que o mesmo terá sempre a possibilidade de evoluir pelo que deverá ser feita uma aposta no intuito de o melhorar.

7.1 CONCLUSÕES

Os resultados da detecção de fissuras demonstraram que o algoritmo neste ponto já se encontra na sua versão final relativamente ao que foi preconizado como sendo o objetivo da presente trabalho.

Como qualquer novo serviço, a maturação deste terá que ser obtida com a execução de outros ensaios de campo, que de algum modo podem conduzir a otimizações ou uma visão diferente em alguma situação pontual na aplicação do algoritmo.

Uma das principais vantagens deste método reside na forma como se pode efetuar inspeções de uma forma expedita e previsivelmente com custos muito inferiores aos praticados atualmente sem que para isso se sacrifique os resultados obtidos, muito pelo contrário.

Neste sentido e como principal conclusão desta dissertação é que o caminho percorrido deverá ser aproveitado para uma aposta muito concreta e efetiva na execução de trabalhos de inspeção e monitorização por recurso a UAV em que a base a usar seja o algoritmo criado.

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Um dos principais desenvolvimentos a efetuar que possa traduzir-se numa melhoria significativa, passa pela integração de um laser no UAV em que este atue de forma automática na captação da distância e guarde esse valor nos metadados das fotografias. Quando este avanço for efetuado o processo passa para uma grau de automatização em que não será necessária qualquer *input* a não ser o das próprias fotografias. Uma outra situação que será de considerar no futuro passa por uma forma de fazer o corte das fotografias (*crop*), mas mantendo uma proporção de redução da sua dimensão em determinados parâmetros, que se traduzam em valores que torne possível a atualização da distância focal de forma automática garantindo deste modo os valores da distância, uma vez que nos metadados da fotografia original a distância focal apresentada é a do instante em que a foto foi originalmente captada. Será também necessário ultrapassar algumas limitações que este método tem em zonas “cegas” para o sistema GNSS utilizado como seja o caso dos túneis. Esse problema poderá ser resolvido com a colocação de equipamentos que permitam a triangulação do equipamento, sendo que estes devem ser colocados em pontos estratégicos de modo a garantir a fiabilidade e qualidade do sinal. A possibilidade de inclusão do estudo automático de outras anomalias como por exemplo as armaduras expostas que será sem dúvida um desenvolvimento importante a considerar.

O parque edificado possui muitas estruturas já com alguns anos e que não possuem qualquer tipo de modelação informática somente suporte em papel ou quando muito digitalizações desses desenhos. Nesse sentido a possibilidade de utilização de UAVs para efetuar essa modelação e a integração em BIM poderá ser mais uma possibilidade de um serviço a disponibilizar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agostinho, Sérgio – Inspeção e Monitorização de Estruturas em Engenharia Civil – Utilização de UAV na Inspeção e Monitorização. Madeira. UMA, 2012. Dissertação de Mestrado

APPLETON, Júlio – Construções em betão - Nota histórica sobre a sua evolução. Lisboa: IST.

ARAUJO, David – Reparação de Fendas em Elementos Construtivos de Betão Armado. Lisboa. IST, 2016. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

By-Bridge [online]. [consultado em 12 de abril de 2021]. Disponível em <http://www.bridgebybridge.com/pt-PT/Home>

BragaTV [online]. [consultado em 28 de junho de 2021]. Disponível em <https://bragatv.pt/vieira-do-minho-e-amares-assinam-protocolo-para-requalificar-ponte-do-boco/>

BRITO, Jorge - Diagnóstico e patologia de construções em betão armado. Lisboa: IST

CHA, Young-Jin; Choi, Wooram ; Buyukozturk, Oral - Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. Winnipeg: Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017. ISSN 1467-8667.

CNN Convolution On RGB Images [online]. [consultado em 02 de maio de 2021]. Disponível em <https://www.deeplearningbook.com.br/a-arquitetura-das-redes-neurais/>

CORREIA, Sérgio - Catálogo de técnicas de diagnóstico em elementos estruturais de edifícios correntes em betão armado, Lisboa. IST, 2014. Tese de Mestrado em Engenharia Civil

COSTA, António – Anomalias e Mecanismos de deterioração, Lisboa. IST, 1999.

COUTINHO, A. de Sousa – Fabrico e Propriedades do betão: Volume I. 5ª ed. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2012. ISBN 978-972-49-0326-2.

DJI [online]. [consultado em 09 de junho de 2021]. Disponível em <https://www.dji.com/pt/mavic-mini/specs>

Gromicko, N., Shepard, K. and Cyr, M. (2014) Visual Inspection of Concrete, [Online], Disponível em: <http://www.nachi.org/visual-inspection-concrete.htm>

ISEP - "Avaliação experimental e numérica dos efeitos dinâmicos da ação do vento na torre de telecomunicações do Monte da Virgem", Relatório final do projeto ISEP-ALTICE, 2020

JACOME, Carlos da Cruz; **MARTINS**, João Guerra. Identificação e tratamento de patologias em edifícios - Série REABILITAÇÃO, 2005.

KIM, Byunghyun; Cho, Soojin - **Automated Vision-Based Detection of Cracks on Concrete Surfaces Using a Deep Learning Technique**. Seul: Sensors, 2018. ISSN 1424-8220.

KIM, Hyunjun, et al. - **Crack and Noncrack Classification from Concrete Surface Images Using Machine Learning**. Thousand Oaks: Structural Health Monitoring (SAGE). ISSN: 1475-9217.

Lapix – Deep Learning: Reconhecimento de Imagens [online]. [consultado em 16 de março de 2021]. Disponível em <https://www.lapix.ufsc.br/ensino/visao/visao-computacionaldeep-learning/deep-learningreconhecimento-de-imagens/#AlexNet>

LeCun, Y.; Boser, B.; Denker, J. S.; Henderson, D.; Howard, R. E.; Hubbard, W.; Jackel, L. D. 1989. **"Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition"**. Neural Computation. ISSN 0899-7667.

NP EN 1992. 2010. Eurocódigo 2 – **Projeto de estruturas de betão**, Parte 1-1: Regras gerais e Regras para Edifícios. Monte da Caparica. Instituto Português da Qualidade.

Mathworks - Alexnet [online]. [consultado em 07 de março de 2021]. Disponível em <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/alexnet.html>

Mathworks - Deep Learning [online]. [consultado em 07 de março de 2021]. Disponível em <https://www.mathworks.com/discovery/deep-learning.html>

REBAP – Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado. **Decreto-Lei n.º 349-C/83**. D.R. I Série. 174 (83-07-30).

SHIBASAKI, Anderson - **Inspeção da torre do monte da virgem com auxílio de um veículo aéreo não tripulado**. Porto: ISEP, 2019. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.

SILVA, Joana – **Métodos eletroquímicos para Prevenção da Deterioração e Reparação das Estruturas de betão armado: Proteção catódica, Dessalinização e Realcalinização**, Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2007.

TEIXEIRA, Hélio - **Inspeção da torre de telecomunicações do monte da virgem com auxílio de um veículo aéreo não tripulado**. Porto: ISEP, 2019. Tese de Mestrado em Engenharia Civil.