

**Deteção de anomalias em estruturas de betão com
processamento de imagem - O caso de estudo do Pavilhão
do Conhecimento, em Lisboa**

Inês Melo Lopes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Professor Doutor Jónatas Miguel de Almeida Valença

Professor Doutor Eduardo Nuno Brito Santos Júlio

Júri:

Presidente: Professor Doutor António Manuel Figueiredo Pinto da Costa

Orientador: Professor Doutor Jónatas Miguel de Almeida Valença

Vogal: Professor Doutor António José Da Silva Costa

Outubro de 2019

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Expresso aqui o meu agradecimento a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Eduardo Júlio agradeço por me ter aceite neste projeto, que me permitiu contactar com uma área de investigação de Engenharia Civil.

Em particular agradeço ao Professor Jónatas Valença pela orientação, disponibilidade, apoio, interesse manifestado, partilha de informação e espírito crítico que sempre demonstrou ao longo de toda a dissertação.

Ao Bruno Santos agradeço todo o acompanhamento, abertura e partilha de conhecimento.

Aos meus colegas e amigos pelo apoio incondicional e incentivo durante a realização desta dissertação, bem como durante o meu percurso universitário.

A toda a minha família, e ao Diogo, agradeço o apoio nesta fase de finalização e o incentivo para sempre ser mais e melhor.

Em especial, ao meu pai, agradeço por ter me ensinado valores que carrego comigo em todos os momentos. Obrigado por cuidares de mim, onde quer que estejas.

Resumo

Nos últimos tempos de revolução tecnológica, as novas tecnologias começaram a assumir um papel em praticamente todas as áreas de estudo. As vantagens das aplicações dos novos métodos são inúmeras e dificilmente teria sido possível resolver tantos problemas sem o acesso a estes métodos. A engenharia civil não é exceção, e um exemplo de aplicação nesta área é a análise e processamento de imagem. Na engenharia civil, um exemplo de aplicação concreta das novas tecnologias é a utilização de técnicas de análise e processamento de imagem para facilitar a detecção de anomalias em estruturas de betão.

O presente trabalho procura, assim, explorar a possibilidade de desenvolvimento de um método de processamento de imagem para identificação e mapeamento de anomalias em fachadas de betão à vista, com o intuito de aumentar a precisão e exatidão dos resultados e reduzir significativamente a duração atual de tais processos, bem como diminuir os erros humanos associados. Para tal, é proposto um método, baseado em classificação de imagem para: 1) localização de zonas críticas em superfícies de betão à vista; 2) identificação dessas mesmas anomalias; 3) mapeamento, ao nível do pixel, das anomalias identificadas.

De forma a avaliar a eficácia do método, comparar-se-ão os resultados obtidos com uma classificação das imagens realizada visualmente. O método proposto permite a localização e mapeamento de anomalias em superfícies de betão, no entanto, revela dificuldade de identificação de anomalias com característica semelhantes no espectro do visível.

Palavras-Chave

Anomalias, Zonas críticas, Processamento de Imagem, SuperCluster-Anomaly

Abstract

Over the past decades, new technologies have begun to play an increasingly central important role in most research areas. There are multiple advantages to applying those new methods and Civil Engineering is no exception to the benefits that result from the growing use of new technologies. Image processing in order to improve the process of identification of anomalies in concrete buildings is one of the examples of the application of such technologies.

The present study sought to explore the possibility of using an image processing method in the identification of anomalies in the façades of visible reinforced concrete buildings in order to reduce the time associated with such a process as well as to reduce the risk of human eye error.

The proposed method, based in image classification will be able to: 1) Locate the critical areas in concrete building surfaces; 2) Identify the present anomalies, 3) mapping them, at pixel level.

The outcome will be analysed by comparing with the results of a classification based on a visual analysis. The main goal is to analyse the improved effectiveness of image processing study, although, it shows limitations when trying to identify anomalies with similarities in their visible spectrum.

Key-words

Anomalies, critical areas, image processing, SuperCluster-Anomaly

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura e Conteúdo	2
2. Inspeção e Avaliação de Estruturas.....	3
2.1. Métodos Tradicionais.....	3
2.2. Métodos baseados em processamento e análise de imagens.....	5
2.2.1. Fotogrametria.....	5
2.2.2. Processamento de imagem	6
2.2.3. Análise Hiper e Multiespectral de imagens.....	10
3. Metodologia desenvolvida	13
3.1. Aquisição de Imagem	14
3.2. Pré-processamento	14
3.3. Construção dos mapas Ground Truth	14
3.4. <i>Clustering e SuperCluster- Anomaly</i>	15
3.5. Pós-processamento	16
3.6. Detecção de Armadura à Vista.....	16
3.7. Mapa de Resultados	18
4. Caso de Estudo: Pavilhão de Conhecimento	19
4.1. Descrição da Estrutura e Identificação das anomalias.....	19
4.2. Caracterização das anomalias	20
4.3. Construção dos mapas <i>Ground Truth</i>	23
4.4. Método <i>SuperCluster-Anomaly</i>	25
4.4.1. Pré-processamento e construção do mosaico de imagens.....	25
4.4.2. Clustering das imagens e SuperCluster-Anomaly.....	26
4.4.3. Pós-processamento de dados	29
4.4.4. Análise de Resultados do pós-processamento.....	42
4.5. Método Alternativo para Detecção de Armadura à Vista	50
4.6. Aplicação na totalidade dos 48 painéis	52
5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	55
5.1. Conclusões.....	55
5.2. Desenvolvimentos Futuros.....	57
6. Referências Bibliográficas	58
7. Anexos.....	60

Índice de Figuras

Figura 1 - Exemplo de meio de acesso que auxilia a atividade de inspeção do tabuleiro de uma ponte, local de difícil de acesso. A) equipamento utilizado; B) plataforma de acesso à zona inferior da ponte. (Valença et al, 2017);	4
Figura 2 - Ponte de Vila Fria, em Portugal. a) fotografia da ponte no local; b) modelo 3D obtido através de um método fotogramétrico terrestre. (Valença <i>et al</i> , 2017);.....	6
Figura 3 - Figura esquemática sobre as regiões de sobreposição das fotografias que é necessária existir aquando obtenção das imagens (adaptado de Valença e Júlio, 2018);	7
Figura 4 - Secção A, estudada por fotogrametria da barragem de Itaipu, Brasil (à esquerda o painel dividido por fotografias obtidas, à direita, o mapa orto-retificado) (Valença e Júlio, 2018);	8
Figura 5 - Secção B, estudada por fotogrametria da barragem de Itaipu, Brasil (à esquerda o painel dividido por fotografias obtidas, à direita, o painel orto-retificado) (Valença e Júlio, 2018);.....	8
Figura 6 - (a) Localização da anomalia numa região de interesse e (b) a sua distinção dos restantes elementos da fotografia. (c) contorno da fissura final (Valença e Júlio, 2018);	8
Figura 7 - Gráfico obtido no corte $i=60$, através do método de processamento de imagem;	9
Figura 8 - (da esquerda para a direita) Imagem da Luz visível (a); seguindo para Imagem Multiespectral (b); Imagem de Radiação IV (c); por último Radiação UV (d) (Pereira <i>et al.</i> , 2017).	10
Figura 9 - Resultados obtidos do método SurfCrete, que utiliza análise Multi e Hiperespectral. a) informação da gama do visível; b) informação da gama do infravermelho.	11
Figura 10 - Esquema representativo da metodologia adotada no Trabalho;.....	13
Figura 11 - Comparação dos valores dos canais Vermelho e Azul para as anomalias Indícios de Corrosão e Armadura à vista;	17
Figura 12 - Pavilhão do Conhecimento (Câmara Municipal de Lisboa, s.d.);	19
Figura 13 – Identificação das zonas críticas presentes no Painel 13;	23
Figura 14 - Identificação das zonas críticas presentes no Painel 22;	23
Figura 15 - Identificação das zonas críticas presentes no Painel 33;	24
Figura 16 — Painel 13: a) imagem ortoretificada; b) <i>Ground-Truth</i> relativa à anomalia Armadura à Vista;	24
Figura 17 – Fotomosaico realizado pelo <i>stitching</i> de todas as fotografias retiradas à fachada de forma segmentada;	25
Figura 18 - Fotografias dos painéis 13 (a)), 22 (b)), 33 (c));	26
Figura 19 – Painel 13: a) Fotografia; b) <i>Clustering</i> para a anomalia Armadura à vista;	27

Figura 20 – Resultado após aplicação do método <i>SC-Anom</i> para a anomalia armadura à vista sobre o painel 13;	28
Figura 21 – Identificação da anomalia Armadura à vista do painel 13, observável através da sobreposição da informação obtida através do processamento do programa <i>SC-Anom</i> ;	28
Figura 22 - Resultados dos parâmetros obtidos após análise das anomalias Armadura à Vista e Índícios de Corrosão: a) Identificações Verdadeiras Positivas; b) identificações Falsas Negativas; c) identificações Verdadeiras Positivas; d) identificações Falsas Positivas; e) parâmetro F1.	31
Figura 23 - Os resultados dos parâmetros após análise das anomalias Armadura à Vista e soma da informação das anomalias Armadura à Vista e Índícios de Corrosão: a) Identificações Verdadeiras Positivas; b) identificações Falsas Negativas; c) identificações Verdadeiras Positivas; d) identificações Falsas Positivas; e) parâmetro F1.....	33
Figura 24 - Os resultados dos parâmetros após análise das anomalias Armadura à Vista, soma das GT das anomalias Armadura à Vista e Índícios de Corrosão e informação sobre a soma das duas anomalias anteriores e a anomalia desagregação: a) Identificações Verdadeiras Positivas; b) identificações Falsas Negativas; c) identificações Verdadeiras Positivas; d) identificações Falsas Positivas; e) parâmetro F1.	36
Figura 25 - a) painel 13 original; b) exemplo de resultado obtido após execução do <i>SC-Anom</i> do painel 13;.....	37
Figura 26 - a) painel 22 original; b) exemplo de resultado obtido após execução do <i>SC-Anom</i> do painel 22;.....	38
Figura 27 - a) painel 33 original; b) exemplo de resultado obtido após execução do <i>SC-Anom</i> do painel 33;.....	38
Figura 28 - Painéis após eliminação da informação das juntas entre painéis na avaliação da anomalia Armadura à Vista: a) Painel 13; b) Painel 22; c) Painel 33;.....	39
Figura 29 - Gráfico que demonstra os resultados do parâmetro F1 para a análise dos resultados anteriormente obtidos após pós-processamento – eliminação de juntas entre painéis: a) Identificações Verdadeiras Positivas; b) identificações Falsas Negativas; c) identificações Verdadeiras Positivas; d) identificações Falsas Positivas; e) parâmetro F1;.....	41
Figura 30 - Armadura à Vista e respetivos produtos de corrosão;.....	43
Figura 31 - Análise da Anomalia Delaminação: a) Resultado do processamento do <i>SC-anom</i> ; b) Fotografia do painel 13 onde existe esta anomalia (assinalada pelo contorno amarelo);	45
Figura 32 - Análise da Anomalia Colonização Biológica: a) Resultado do processamento do SuperCluster; b) Fotografia do painel 33 onde existe esta anomalia (assinalada pelo contorno amarelo);	46
Figura 33 - Detecção de zonas críticas no painel 13: a) zonas com Armadura à Vista; b) zonas com desagregação de betão; c) zonas com indícios de corrosão.....	47

Figura 34 - Detecção de zonas críticas no painel 22: a) zonas com Armadura à Vista; b) zonas com desagregação de betão; c) zonas com indícios de corrosão.	48
Figura 35 - Detecção de zonas críticas no painel 33: a) zonas com Armadura à Vista; b) zonas com desagregação de betão; c) zonas com indícios de corrosão.	48
Figura 36 - Zonas críticas detetadas no painel 13: a) através do processamento; b) através de avaliação visual, considerada Ground Truth;	49
Figura 37 - Zonas críticas detetadas no painel 22: a) através do processamento; b) através de avaliação visual, considerada Ground Truth;	49
Figura 38 - Zonas críticas detetadas no painel 33: a) através do processamento; b) através de avaliação visual, considerada Ground Truth;	49
Figura 39 - Resultado da aplicação do método de deteção de Armadura à Vista no painel 13: a) fotografia original do painel 13 e b) resultado do método;	50
Figura 40 - Resultado da aplicação do método de deteção de Armadura à Vista no painel 22: a) fotografia original do painel 22 e b) resultado do método.	51
Figura 41 - Resultado da aplicação do método de deteção de Armadura à Vista no painel 33: a) fotografia original do painel 33 e b) resultado do método.	51
Figura 42 - Zonas críticas detetadas por painel mediante o tipo de análise realizado;	52
Figura 43 - Resultados obtidos na análise de todos painéis constituintes do mosaico ortoretificado da fachada: a) identificações Verdadeiras Negativas; b) identificações Falsas Positivas; c) Identificações Falsas Negativas; d) Identificações Verdadeiras Positivas; e) Parâmetro F1.	54

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Dados de centro RGB recolhidos para a anomalia Armadura à Vista;.....	17
Tabela 2 - Dados de centro RGB recolhidas para a anomalia Índicios de corrosão;	17
Tabela 3 – Quadro Resumo das Características físicas das anomalias;	22
Tabela 4 – Valor de <i>threshold</i> estudado para cada anomalia;.....	27
Tabela 5 – Resultados obtidos para as anomalias Armadura à Vista e Índicios de corrosão;.....	30
Tabela 6 – Resultados obtidos para a soma da informação das anomalias armadura de corrosão e índices de corrosão, considerando o centro RGB associado a armadura à vista;	32
Tabela 7 – Resultados obtidos para a soma de informação das anomalias Armadura à vista, desagregação e índices de corrosão, considerando diferentes centros RGB;	35
Tabela 8 - Resultados obtidos após pós-processamento de eliminação de juntas para os casos em que se avalia apenas a anomalia Armadura à Vista e a Soma das anomalias Armadura à Vista e Índicios de corrosão;.....	40

Simbologia

SC-Anom – SuperCluster-Anomaly

TP – Verdadeiro Positivo (*True Positive*)

FP – Falso Positivo (*False Positive*)

TN – Verdadeiro Negativo (*True Negative*)

FN – Falso Negativo (*False Negative*)

Th – *threshold*

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A Engenharia Civil, no início do século XX, em Portugal, é marcada pelo início da construção em betão armado. A implementação progressiva deste tipo de construção, permite uma revolução na construção civil, nomeadamente nos edifícios de habitação. Inicialmente, apenas os pisos são substituídos por lajes maciças, mas mais tarde também os elementos verticais passam a ser construídos em betão armado, sendo que, por fim, surgem as primeiras estruturas integralmente assim construídas (Branco *et al*, s.d.). A relevância deste novo material deve-se essencialmente à sua versatilidade e resistência, que permitiram construções, simultaneamente, com mais pisos e a alocação de um maior número de fogos de habitação. Este tipo de construção pôde, dessa forma, responder às necessidades contemporâneas da sociedade, do crescimento das grandes cidades e da fixação de um maior número de habitantes nos centros urbanos.

Acompanhando a crescente utilização do betão armado, os estudos sobre esta técnica evoluem e começam a surgir normas e regulamentos ajustados à nova realidade. A partir dos anos 60, altura em que a sua utilização está massificada, os edifícios passam a ser inseridos na categoria de edifícios recentes de betão armado (Appleton, 2003). Para além da construção voltada para a habitação, os desenvolvimentos dos conhecimentos permitem a aplicação do novo material em obras de arte, assim como em edifícios de grande porte e de importância social e cultural. Alguns imóveis em betão armado são inclusivamente considerados imóveis de interesse, sendo nomeados como património imóvel ou premiados.

Mas, atualmente, os edifícios em betão armado construídos antes do século XXI começam a atingir o fim da vida útil. O termo vida útil estrutural refere-se ao período durante o qual existe um certo nível de segurança da estrutura e a partir do fim do qual a probabilidade de colapso começa a aumentar. Existem inúmeros fatores que contribuem para a diminuição da duração deste período entre eles: as deficiências de projeto, de execução ou exploração e/ou a presença de ações agressivas do meio ambiente (químicas, físicas ou biológicas). Estes fatores introduzem anomalias nas estruturas de betão armado, estruturais ou não estruturais. Por essa razão, a manutenção das estruturas é essencial, de forma a garantir que se controla o risco de deterioração no período de vida útil das mesmas. A menor durabilidade está muitas vezes associada a processos de manutenção menos eficazes, tornando mais importante o papel da monitorização e avaliação estrutural. No entanto a versatilidade dos métodos tradicionais de monitorização e avaliação estrutural é limitada e não responde às exigências de rapidez, eficácia e baixo custo. Com o avanço das novas tecnologias, estas começam a ser aplicadas à inspeção do estado das estruturas de betão armado com o objetivo de detetar as anomalias de forma mais eficaz e flexível e, assim, responder à crescente necessidade de avaliação e inspeção das estruturas. Áreas como a fotogrametria, processamento de imagem e análise Multi e Hiper-Espectral têm apresentado resultados positivos, obtidos de forma mais simples, imediata e, na maioria das vezes, não invasiva. As aplicações dos referidos métodos são variadas: mapeamento de diferentes zonas geológicas,

através de fotografias aéreas; análise da imagem ao nível do pixel ou de características de cor, saturação e luz; medição da temperatura para eventual mapeamento de zonas húmidas.

De forma a tentar contribuir para o desenvolvimento crescente deste tipo de aplicações, a presente dissertação tem como objetivo a exploração da aplicação de métodos de processamento de imagem na deteção de anomalias estruturais e não estruturais, em fachadas de edifícios de betão armado à vista. Estes métodos serão elaborados com recurso a apenas fotografias das mesmas. O trabalho desenvolver-se-á incidindo sobre a aplicação de um processo de *clustering* às imagens que passarão por um processo de pré-processamento, processamento e pós-processamento. O trabalho basear-se-á no desenvolvimento de um algoritmo, o *SuperCluster-Anomaly*, procurando-se que o procedimento ocorra de uma forma semi-automática, e que permita ao utilizador detetar e mapear anomalias na fachada de um edifício de betão armado à vista, com intervenção humana mínima.

1.2. Objetivos

O principal objetivo do trabalho apresentado é o desenvolvimento de um método que permita a localização e identificação de anomalias numa superfície de betão à vista através da classificação de imagens. O método proposto deverá permitir atingir os seguintes objetivos específicos:

- Localizar zonas com anomalias nas superfícies de betão analisadas;
- Identificar as diferentes anomalias presentes na superfície de betão analisada;
- Mapear as anomalias, ao nível do pixel, na superfície de betão analisada.
-

1.3. Estrutura e Conteúdo

A dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, incluindo o presente, com a seguinte organização:

No capítulo 2 é estudada e definida a importância da Inspeção e Avaliação das Estruturas de Betão Armado. Distinguem-se os métodos tradicionais dos métodos baseados em processamento e análise de imagens, recorrendo a exemplos de aplicação reais. No capítulo 3, explicita-se a metodologia desenvolvida no processo de deteção das anomalias através do programa de processamento utilizado, *SuperCluster-Anomaly*, desde a obtenção das fotografias até à apresentação de resultados.

No capítulo 4, aplica-se a metodologia apresentada ao caso de estudo: o Pavilhão do Conhecimento. Após uma descrição sobre o edifício e as condições em que se encontra, através de fotografias de uma das fachadas do Pavilhão do Conhecimento, apresentam-se os resultados obtidos através do processamento das imagens no que se refere às anomalias e mapeamento de zonas problemáticas na fachada.

Por último, no capítulo 5, serão discutidos os resultados, retirando-se as conclusões necessárias. Refletir-se-á sobre pistas de investigação e eventuais desenvolvimentos futuros sobre o tema desta dissertação.

2. Inspeção e Avaliação de Estruturas

A inspeção e avaliação das estruturas permite garantir a manutenção da segurança das estruturas ao longo da sua vida útil. Um bom plano de inspeção é determinante para a obtenção de resultados e conclusões sobre o estado de segurança da mesma, mas também sobre a origem das anomalias. Na maior parte dos casos, através da monitorização cumpre-se este requisito. Esta tem por base o acompanhamento e controlo do comportamento estrutural de uma estrutura em diversos instantes, o que permite uma comparação de resultados ao longo do tempo. Assim, é possível detetar anomalias e avaliar se têm origem estrutural ou não estrutural, diagnosticando-as e identificando ou clarificando qual o fenómeno que as origina.

A monitorização pode apoiar-se na medição de diversas grandezas com auxílio de instrumentos de medição. O papel das novas tecnologias é relevante neste contexto, uma vez que permite uma evolução e desenvolvimento de diversas técnicas de estudo das estruturas, auxiliando as que são usualmente utilizadas e garantido uma maior eficácia e detalhe dos métodos.

2.1. Métodos Tradicionais

A monitorização de uma estrutura permite fazer o acompanhamento da mesma durante as diversas fases da sua vida útil, nomeadamente, construção, exploração ou deteção de anomalias. Os métodos de monitorização recolhem informação relevante que, em conjunto com os modelos de análise permitem prever de forma atempada situações de degradação e eventual colapso (Agostinho, 2012).

Idealmente a inspeção da estrutura deve efetuar-se de forma periódica, sendo usual que se efetue a inspeção básica ou de rotina, tipicamente inspeção visual direta, maior parte das vezes acompanhada por esboços e esquemas, réguas de medição da abertura das fendas, lupas de medição, fita-métrica, fotografias, entre outros. Este tipo de inspeção permite classificar o estado de conservação da estrutura, de forma a ser possível assinalar e alertar caso surjam danos significativos.

Caso seja identificada uma possível anomalia, são executados diversos tipos de ensaios básicos no sentido de complementar a informação obtida com a inspeção visual e de se determinar o tipo de deterioração que poderá estar na origem da anomalia detetada. Os principais tipos de anomalias em edifícios de betão armado têm como origem o desgaste e alteração química do betão e/ou das suas armaduras, originadas por agentes externos ou internos. Na maioria dos casos são aplicados e desenvolvidos testes que permitam identificar a causa do problema. Os ensaios a realizar têm diferentes objetivos, tais como a caracterização da deterioração, avaliação da durabilidade e a caracterização mecânica dos materiais. Inicialmente, e de execução mais direta são realizadas as seguintes avaliações: mapeamento da delaminação e fendilhação, a determinação da localização de armaduras e medição de recobrimentos, determinação da dureza superficial, profundidade de carbonatação e execução de perfis de penetração de cloretos (Costa, s.d.). Com estas informações é possível:

- apurar erros de conceção que possam a existir a nível de projeto;

- entender em que estado se encontra o betão, por exemplo, se apresenta muitos vazios (relacionado com erros de execução);
- verificar a existência de deformações originadas por reações expansivas;
- determinar qual o grau de fendilhação;
- apurar se existe contaminação por cloretos ou por carbonatação, concluindo se existe alteração do comportamento desejável do betão;
- observar qual o estado das armaduras, observando se estas desempenham a função para que foram projetadas, ou se existe corrosão e conseqüente perda de resistência.

Após a realização da inspeção básica da estrutura, caso se averigüe que as informações não são suficientes para se desenvolver um diagnóstico correto são realizados ensaios mais complexos, alguns deles de carácter invasivo e destrutivo. Estes permitem realizar uma avaliação com maior detalhe. Exemplos deste tipo de ensaios são (Costa, s.d.):

- a extração de carotes;
- ensaios de ultrassons;
- *pull-off*;
- *pull-out*;
- extração de provetes de aço;
- ensaios para avaliação do grau e velocidade de corrosão;
- avaliação do comportamento estrutural.

É importante salientar que todo o tipo de ensaios até agora mencionado, poderá ser de difícil execução mediante a localização da estrutura e a localização da anomalia na própria estrutura, sendo por vezes necessário recorrer a equipamentos especializados, que encarecem o processo de monitorização e inspeção, como ilustrado na Figura 1.



Figura 1 - Exemplo de meio de acesso que auxilia a atividade de inspeção do tabuleiro de uma ponte, local de difícil de acesso. A) equipamento utilizado; B) plataforma de acesso à zona inferior da ponte. (Valença et al, 2017);

Para além de invasivos, a maior parte deste tipo de ensaios, uma vez que dependem de posterior análise (laboratorial ou analítica), implicam um processo moroso, pouco eficaz e oneroso quando se pretende analisar uma estrutura de grande dimensão. Desta forma, o desenvolvimento e melhoramento dos processos de diagnóstico e monitorização é de elevado interesse. Estes devem permitir automatizar e tornar estes processos mais flexíveis.

2.2. Métodos baseados em processamento e análise de imagens

Os métodos baseados em processamento e análise de imagens surgem como possível alternativa às desvantagens e limitações dos métodos tradicionais.

Neste capítulo serão apresentados os métodos de fotogrametria, processamento de imagem e Análise de imagem Híper e Multiespectral, assim como as suas principais aplicações.

Sendo uma área de investigação em constante desenvolvimento, devido à evolução das novas tecnologias, os métodos sugeridos são frequentemente atualizados e dotados de cada vez mais capacidades para as situações para os quais são projetados.

2.2.1. Fotogrametria

A Fotogrametria é a “ciência e tecnologia de aquisição de informação confiável por meio de imagens adquiridas por sensores”, de forma a obter “informação sobre um objeto sem contacto direto entre este e o sensor”, possibilitando a transformação entre sistemas: um sistema bidimensional, chamado sistema fotográfico, e um sistema tridimensional, que representa o próprio espaço-objeto” (Coelho e Brito, 2007).

A Fotogrametria, como ciência em constante evolução, principalmente em termos das suas aplicações, pode ser dividida de um modo geral em duas áreas: a fotogrametria métrica (terrestre ou aérea) e a fotointerpretação.

A Fotogrametria métrica consiste na execução de medições através de fotografias e outras fontes de informação. Estas permitem o posicionamento relativo de pontos, de forma a retirar-se informações relacionadas como ângulos, distâncias, áreas, volumes, elevações, formato de objetos. Geralmente é utilizada na execução de cartas planimétricas e altimétricas, mosaicos, ortofotomapas, etc. (Temba, 2000).

Por sua vez, a Fotointerpretação consiste principalmente no reconhecimento e identificação de objetos, os quais permitem a realização de uma análise sistemática e cuidadosa das fotografias obtidas por sensores acoplados a bordo de aeronaves ou câmaras terrestres. A interpretação das imagens focar-se-á num processo que analisará aspetos como cor, textura, rugosidade, padrão, forma, etc (Wolf e Dewitt, 2000).

Neste trabalho salienta-se a evolução da fotogrametria digital como principal técnica de auxílio aos estudos em Engenharia Civil. Este tipo de fotogrametria contempla a automatização da fotogrametria, através de um processamento analítico que permite transformar imagens digitais em produtos digitais. O processamento da fotogrametria digital ocorre de forma semiautomática, uma vez que depende sempre da supervisão e intervenção do utilizador. Este processamento não é automático uma vez que não é possível encontrar espaços tridimensionais ideais, e por este mesmo facto, o processamento deve ser adaptado a cada situação e aos seus pormenores.

Como produto fotogramétrico apresenta-se de seguida o caso da ponte de Vila Fria, em Portugal (Figura 2). Através de fotogrametria terrestre, executaram-se a caracterização estrutural e a monitorização da estrutura da ponte, nomeadamente a análise estrutural 3D e o controlo dos

deslocamentos desta estrutura de alvenaria. Utilizando uma técnica de mapeamento de alta resolução, foi possível dispensar a utilização de plataformas especiais de acesso, o que resultou num processo mais económico. Através deste resultado prosseguem-se os estudos necessários para a avaliação de segurança da estrutura.

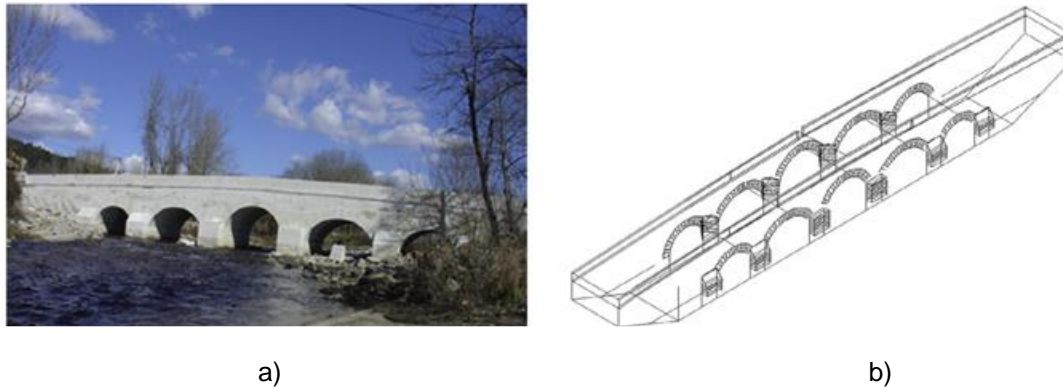


Figura 2 - Ponte de Vila Fria, em Portugal. a) fotografia da ponte no local; b) modelo 3D obtido através de um método fotogramétrico terrestre. (Valença *et al*, 2017);

De acordo com alguns estudos que comparam a utilização de levantamentos fotogramétricos a métodos tradicionais, por exemplo topográficos, conclui-se que a utilização de câmaras para a monitorização de estruturas é muito vantajosa. Estas permitem que os resultados: sejam mais exatos, por não existir intervenção humana nas medições; sejam obtidos de forma rápida, devido à automatização; e permitam recolher uma quantidade muito elevada de informação. Além disso, os levantamentos fotogramétricos, como referido anteriormente, permitem o processamento automático de um grande número de pontos, permitindo o mapeamento e monitorização de grandes estruturas civis. Tal mapeamento possibilita a realização de um modelo tridimensional das mesmas, assim como, a análise de zonas de difícil acesso ou análise de estruturas em condições adversas, como em zonas marítimas, sob fogo, entre outras. Estes métodos são aplicáveis em estudos de pequena a grande escala, evidenciando o leque de aplicação dos mesmos, que, por oposição aos métodos tradicionais, apresentam uma relação custo/benefício elevada. (Pereira *et al*, 2014)

2.2.2. Processamento de imagem

Outro método de processamento e análise de imagem é o processamento das fotografias obtidas.

Este método é estudado no presente trabalho, com o objetivo de explorar a sua aplicabilidade na avaliação das superfícies das estruturas de betão, no sentido de detetar anomalias, como por exemplo na avaliação automática das fissuras.

Numa primeira abordagem, o método de processamento resulta da combinação de diferentes técnicas que permitem a caracterização de padrões de fissuração, campos de deslocamentos e de tensão que surgem em elementos estruturais devido a cargas, assim como áreas de colonização biológica, humidade, agregados expostos, argamassa de reparação, entre outros (Valença *et al.*, 2017).

Como exemplo de aplicação deste método de estudo em estruturas reais apresenta-se de seguida o caso da barragem de Itaipu, no Brasil. O estudo da barragem de Itaipu surge no sentido de inspecionar

e fazer a monitorização de uma estrutura, permitindo a experiência da utilização de um programa de processamento de imagem, anteriormente desenvolvido, utilizado para processar fotografias. Este método é denominado de *MCrack*, até ao momento desenvolvido e experimentado apenas em condições controladas de laboratório. As suas vantagens quando comparado aos métodos tradicionais resultam da imunidade ao erro humano, da capacidade de medição do comprimento total da fissura, da possibilidade de uma monitorização contínua sem variar o referencial, fornecendo uma precisão e exatidão elevadas. No entanto é necessário garantir uma elevada qualidade e resolução das imagens obtidas, mais difíceis de obter quando se trata de estruturas de difícil acesso.

O método *MCrack* necessitava de ser desenvolvido, passando a considerar diversas variáveis que se apresentam em estruturas de betão armado sujeitas às condições existentes no meio ambiente exterior, para poder ser utilizado em condições exteriores a um laboratório, para poder. O caso de estudo da barragem de Itaipu permitiu utilizá-lo numa estrutura real, o que permitiu a evolução e adaptação do mesmo método, denominado agora por *MCrack-Dam*.

O primeiro passo do processo é a aquisição sistemática de imagens, realizada com uma simples máquina fotográfica, prosseguindo para o pré-processamento das fotografias obtidas e a sua orto-retificação. De seguida, é realizada a localização e identificação de zonas condicionantes com fissuras, e por fim, o pós-processamento das mesmas imagens e caracterização das anomalias. As imagens foram captadas nos locais anteriormente sinalizados pela equipa de inspeção da barragem, com um grau de rigor elevado, garantindo uma boa definição nas imagens adquiridas e a existência de regiões de sobreposição das fotografias (cerca de 30% de sobreposição). Estas regiões de sobreposição permitem que seja possível construir um mosaico de fotografias, como se pode observar na Figura 3.

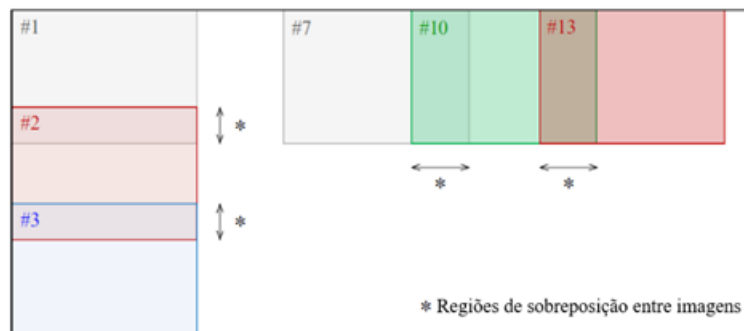


Figura 3 - Figura esquemática sobre as regiões de sobreposição das fotografias que é necessária existir quando obtenção das imagens (adaptado de Valença e Júlio, 2018);

Computacionalmente, o mosaico é processado possibilitando o mapeamento das fissuras, isto é, definindo as chamadas Regiões de Interesse (ROI). Finalmente, a caracterização de cada fissura, nomeadamente a medição da sua abertura, é feita em cada imagem individualmente.

O pré-processamento das fotografias baseia-se na orto-retificação da imagem e localização da sua resolução espacial. Este permitirá a medição de elementos presentes no mosaico. Este pré-processamento é obtido através da construção da matriz homografia, que através de um padrão projeta as coordenadas reais da imagem em novas coordenadas que permitem obter a imagem orto-retificada.

Nas figuras que se seguem, é possível observar as duas secções estudadas, com o mosaico dividido nas diferentes fotografias que o compõem, obtidas por fotogrametria, e o mosaico final para ambas as secções (Figuras 4 e 5).

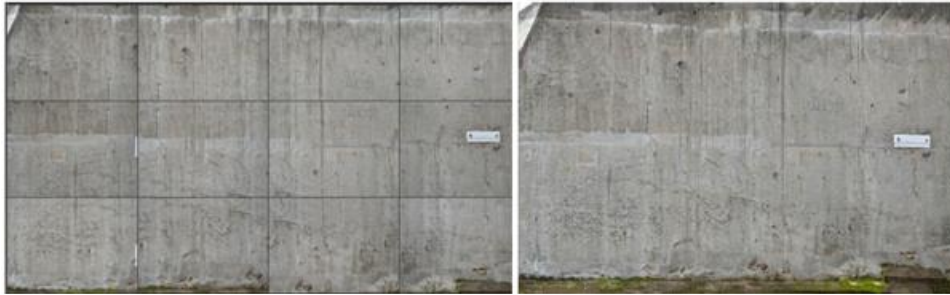


Figura 4 - Secção A, estudada por fotogrametria da barragem de Itaipu, Brasil (à esquerda o painel dividido por fotografias obtidas, à direita, o mapa orto-retificado) (Valença e Júlio, 2018);



Figura 5 - Secção B, estudada por fotogrametria da barragem de Itaipu, Brasil (à esquerda o painel dividido por fotografias obtidas, à direita, o painel orto-retificado) (Valença e Júlio, 2018);

De seguida, são escolhidas de entre as regiões de interesse aquelas a ser analisadas pelo utilizador, o que permitirá a aplicação do método original *MCrack*, mas já considerando variáveis que permitem definir na imagem o que é superfície de betão, distinguindo, assim, as restantes texturas e cores que permitem identificar anomalias (neste caso, fissuras).

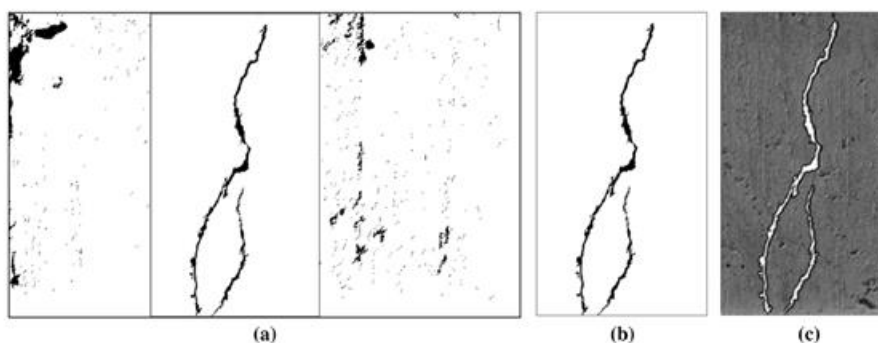


Figura 6 - (a) Localização da anomalia numa região de interesse e (b) a sua distinção dos restantes elementos da fotografia. (c) contorno da fissura final (Valença e Júlio, 2018);

Após escolhidas as regiões de interesse nas fotografias, executa-se um pós-processamento das informações obtidas. Neste caso, o algoritmo permite fazer uma caracterização das fissuras, para além do delinear dos seus limites. Identifica a zona mais crítica de maior abertura, o seu comprimento e área e apresenta um fator que indica o grau de precisão da aplicação do método. Finalmente, constrói-se um mapeamento das anomalias, assinalando as zonas críticas. Este método permite obter o padrão de

fissuração na totalidade da superfície em estudo, o que se traduz em diversas vantagens face aos métodos tradicionais (determinação manual e morosa dos padrões de fissuração, a medição manual de poucas fissuras, assim como a dificuldade que pode surgir na medição manual).

Como exemplo adicional de aplicação de métodos de processamento de imagem em problemáticas estudadas em Engenharia Civil, pode ser referido o método utilizado para a distinção de superfícies com características geomecânicas distintas para posterior aplicação numa modelação de elementos finitos (Z. Q. Yue *et al*, 2003). Este método permite através de técnicas de processamento de imagem digital distinguir as distribuições não homogêneas dos geomateriais – solos, rochas, pavimentos rodoviários, entre outros- e definir uma interface de forma vetorizada. Neste caso, o método baseia-se na identificação do grau de cinzento presente na cor de cada pixel. Através de uma função discreta e de um histograma, é estudado o nível de cinzento de cada pixel e os constituintes das imagens são distinguidos uns dos outros. Na Figura 7, observa-se um gráfico que apresenta o nível de cinzento presente em cada pixel atravessado pelo corte $i=60$. Nota-se que entre $j=41$ e 141, estes níveis têm uma ordem de grandeza média diferente dos restantes, o que demonstra que se trata de uma zona diferente. Repetindo este processo ao longo de toda a imagem é possível determinar a fronteira entre diferentes materiais.

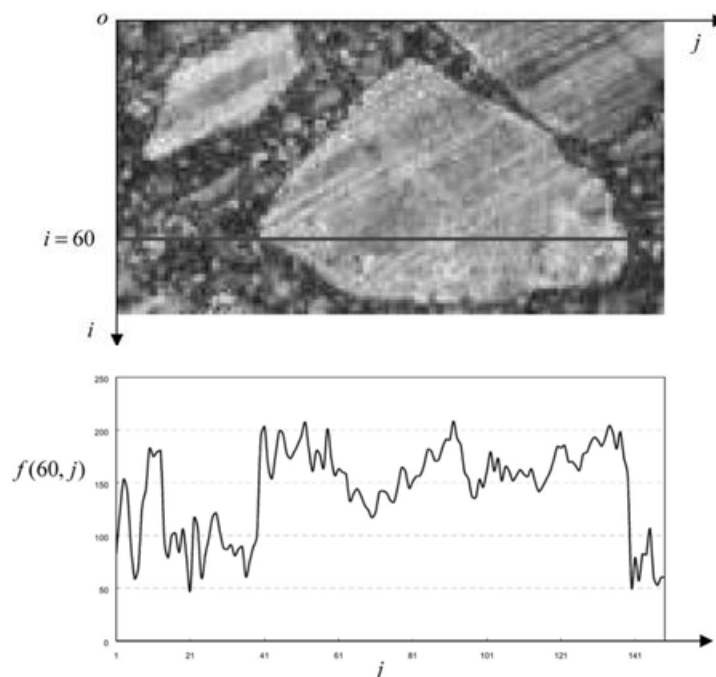


Figura 7 - Gráfico obtido no corte $i=60$, através do método de processamento de imagem;

Os dois exemplos apresentados são distintos, no entanto as conclusões são semelhantes. O processamento automático da informação resulta em maior rapidez, eficiência, fiabilidade e quantidade de dados. Também a possibilidade de intercalar informação que permita a continuação ou origem de novas análises torna vantajosa a utilização de métodos de processamento de imagem quando nos referimos a manutenção e inspeção de estruturas, como a estrutura do caso de estudo (Valença, 2011).

2.2.3. Análise Hiper e Multiespectral de imagens

Recentemente, registou-se um aumento da utilização das técnicas de aquisição de imagens Hiper e Multiespectrais, como técnicas não destrutivas, no diagnóstico de superfícies. A análise Hiper e Multiespectral de imagens é uma tecnologia que visa extrair informação de imagens obtidas usando radiação eletromagnética no espectro do visível, assim como em comprimentos de onda inferiores ou superiores a esta região. Desta forma, consegue-se obter informação não possível de obter a olho nu (Valença, 2011).

As fotografias multiespectrais combinam, numa mesma imagem, informações provenientes de diversas fontes ou canais, entre as nove bandas (sete da luz visível, uma de UV e outra de IV), o que permite identificar objetos ou informação que estaria oculta numa fotografia, dita, normal. Este tipo de imagem torna possível a deteção de anomalias em fachadas e superfícies de edifícios como corrosão, eflorescência de sais, desenvolvimento de colonização biológica (musgos, líquenes e fungos) e humidade, (Hemmler *et al.*, 2005). Por sua vez, a análise hiperespectral permite obter informação do espectro da radiação de um objeto de forma contínua, de modo a que cada pixel da imagem demonstre o espectro completo e não valores discretos como no caso da imagem multiespectral.

Tirando partido das possibilidades de edição gráfica dos softwares atuais e do processamento por computador, a combinação de diversos canais origina imagens com cores virtuais que realçam os diferentes aspetos já referidos. Na Figura 8, é possível comparar a mesma imagem captada e processada em diferentes bandas de radiação do espectro eletromagnético (Pereira *et al.*, 2017).

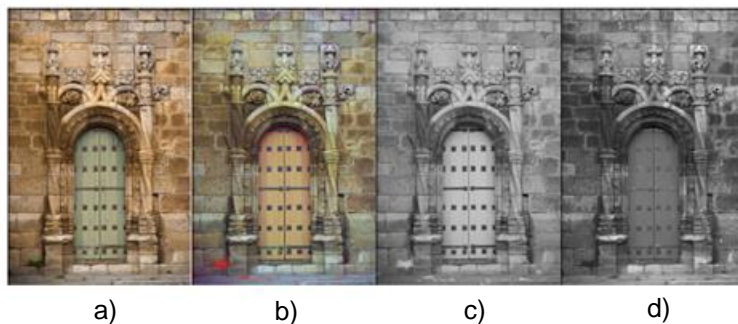


Figura 8 - (da esquerda para a direita) Imagem da Luz visível (a); seguindo para Imagem Multiespectral (b); Imagem de Radiação IV (c); por último Radiação UV (d) (Pereira *et al.*, 2017).

Neste caso a imagem multiespectral combina uma imagem RGB, com informação de três comprimentos de onda da banda do visível (R- vermelho, G- verde, B- preto) em que no canal do vermelho (R), se colocou uma imagem monocromática da fotografia no campo do infravermelho, obtendo-se a imagem da Figura 8B. É possível identificar, mais facilmente, presença de vegetação (musgos e líquenes), oxidação de um elemento metálico na base do edifício, manchas de erosão e degradação biológica (Pereira *et al.*, 2017).

Estes métodos não invasivos permitem a recolha simultânea de informação espectral e espacial bastante vantajosas em processos de análise e diagnóstico das imagens (Fischer e Kakoulli, 2013).

O desenvolvimento dos métodos de processamento, assim como dos equipamentos como as câmaras, tem favorecido uma evolução notória nestas áreas de estudo. Como tem vindo a ser referido, também

a análise híper e multiespectral apresenta vantagens ao captar informação não visível a olho nu ou através de análises baseadas nos métodos tradicionais.

Outros estudos científicos sublinham ainda mais vantagens neste tipo de processo. José L. Lerma demonstra como a combinação da deteção multiespectral associada a outras técnicas permite obter resultados de processamento muito relevantes. Os seus estudos recaíram essencialmente sobre edifícios históricos com fachadas cujo material maioritário é cerâmico. Combinou a técnica multiespectral com Análise de Texturas (Lerma, 2002), que permite a deteção de materiais diferentes que apresentam características semelhantes, e Análise Multibanda (Lerma, 2001), que, por sua vez, permite a classificação de imagens combinada com informação retirada ao longo do tempo e com fotografias retiradas em condições de luz e exposição diferentes.

Valença *et al.* (2012) desenvolveu um método denominado de SurfCrete que permite o desenvolvimento de Mapas de Danos no betão (Concrete Damage Maps – CDS), com vista na aplicação em superfícies de betão. Os objetivos do método seriam de identificar os diversos materiais, mas também de localizar os diferentes danos presentes na superfície de betão, como por exemplo, a colonização biológica, materiais de reparação e fissuras. No método, a aquisição de imagem é realizada de forma a adquirir informação no espectro do visível, mas também na banda do infravermelho. Ao estudar as diferentes informações obtidas, o procedimento permitiu concluir que os melhores resultados ao estudar a superfície de betão, se demonstravam quando se explorava a informação capturada através da banda do infravermelho. Na Figura 9, pode verificar-se um exemplo da deteção executada neste método, nomeadamente do resultado quando se recorre à informação adquirida através da radiação infravermelha. Para além desta conclusão, Valença *et al.* (2012) concluem que é atingida uma eficácia de 94% ao aplicar o SurfCrete, e que o método se demonstra mais eficiente e robusto do que as técnicas de mapeamento tradicionais.

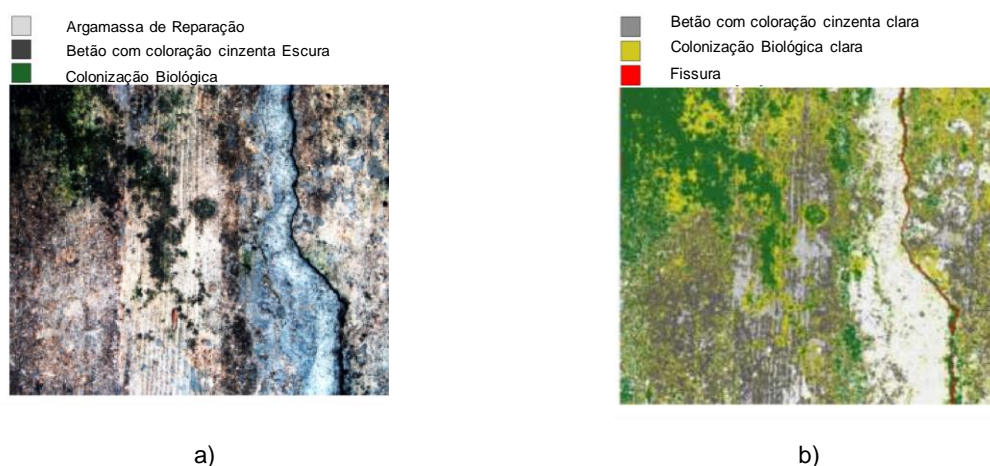


Figura 9 - Resultados obtidos do método SurfCrete, que utiliza análise Multi e Hiperespectral. a) informação da gama do visível; b) informação da gama do infravermelho.

3. Metodologia desenvolvida

A metodologia adotada nesta dissertação visa a detecção semiautomática de anomalias em edifícios de betão à vista com base num processo de classificação de imagem, o qual através das características radiométricas inerentes a cada tipo de anomalia observáveis nas imagens, nomeadamente na definição do seu centro no espectro do visível, as distingue e permite identificar as regiões de interesse.

A Figura 10 representa o fluxograma com o procedimento utilizado, sendo possível verificar que se desenvolvem, paralelamente, dois métodos distintos de classificação, assim como a construção dos mapas de Ground Truth.

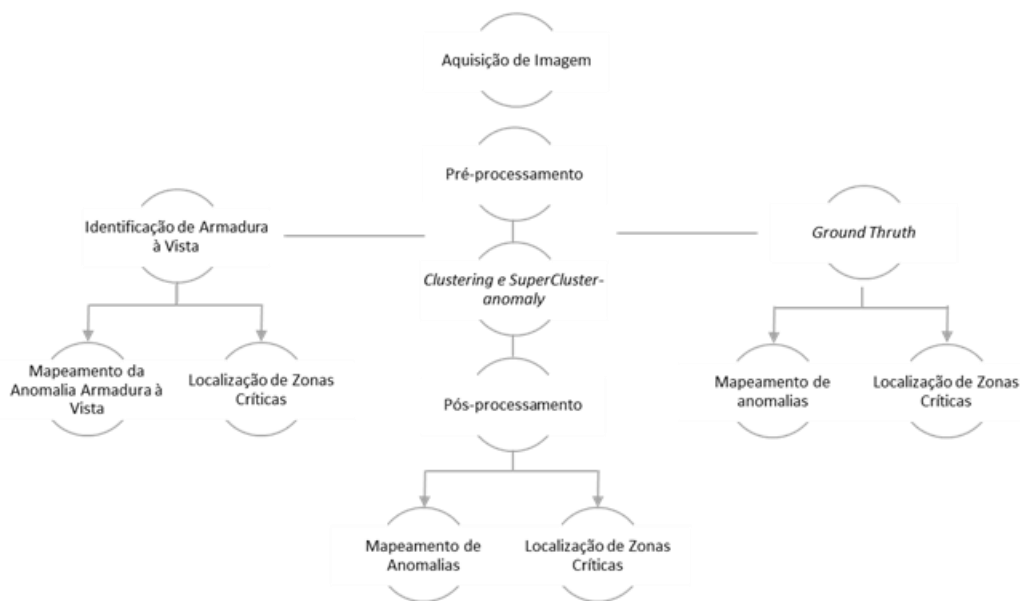


Figura 10 - Esquema representativo da metodologia adotada no Trabalho;

O processo principal desenvolve-se em 4 etapas: (i) aquisição de imagem; (ii) pré-processamento das imagens; (iii) processamento das imagens através do clustering e do método *SuperCluster-Anomaly* (SC-Anom) proposto; (iv) pós-processamento dos dados, com respetiva seleção de regiões de interesse conforme o tipo de anomalia; e v) obtenção de mapa de resultados.

De forma paralela, surge o método de Detecção de zonas com Armadura à Vista, o qual permite realizar um mapeamento, a nível do pixel, da localização da Armadura à vista em todas as imagens analisadas, assim como a localização de zonas críticas que incluam esta anomalia.

Outro processo, que assume um papel muito importante no trabalho é a execução dos mapas Ground Truth. Estas permitem analisar criticamente os resultados obtidos e validar se os objetivos são atingidos. Inicialmente são analisados e construídos os mapas da *Ground Truth* para cada imagem. A *Ground Truth* compreende a informação sobre as anomalias presentes na fachada do edifício em estudo, e a utilização destes mapas como referência permite, ao longo do trabalho, avaliar em detalhe a classificação obtida pelos métodos proposto.

3.1. Aquisição de Imagem

A aquisição de imagem deve ser realizada tendo em consideração o objeto de estudo. As imagens serão adquiridas de forma a permitir a construção de um fotomosaico. É necessário ter em consideração uma sobreposição de pelo menos 30% entre imagens adjacentes em ambas as direções, horizontal e vertical, sendo importante respeitar esta área de sobreposição de forma a que o *stitching* ocorra sem perda de informação relevante.

A utilização do equipamento de cabeça robotizada - *Gigapan Pro V*. com instalação de uma câmara *Nikon D810* com uma lente zoom de distância focal entre 20-300 mm, permite adquirir as imagens necessárias de estruturas de grande dimensão. Neste caso, trata-se de um processo efetuado a partir de uma estação terrestre. As imagens são adquiridas segundo uma ordem pré-definida, e o mosaico construído é processado em software específico para o efeito denominado *Image Composite Editor* (Microsoft, 2015).

3.2. Pré-processamento

O pré-processamento é realizado tendo em vista a preparação das imagens para serem processadas nas etapas seguintes. Nesta etapa é realizado o fotomosaico final através do *stitching* das imagens com base nas zonas de sobreposição existente entre cada um. O programa utilizado permite determinar os parâmetros necessários para se obter um mosaico final no formato *.png.

De seguida, procede-se à identificação da região global de interesse a analisar em cada imagem. Desta forma, através de uma máscara, em cada imagem, define-se a área de interesse a processar, eliminando eventual informação exterior à fachada do edifício.

Na etapa de pré-processamento, é igualmente calculada a matriz Homografia (H) para todas as imagens obtidas. Esta matriz H torna possível ortorectificar a imagem, ou seja, corrigir a imagem através de rotações e translações de forma a que a mesma fique numa posição paralela ao plano do sensor da câmara, eliminando também a distorção e permitindo calcular a resolução espacial dessa mesma imagem ortorectificada. [Valença *et al*, 2012]

O processo, executado em *Matlab* (Mathworks, 2018), consiste na seleção de 4 pontos coplanares, possíveis de identificar na imagem e cujas distâncias reais sejam conhecidas. Sabendo as suas coordenadas na imagem, é possível determinar a matriz H para cada fotografia e proceder à sua ortorectificação.

3.3. Construção dos mapas Ground Truth

A construção dos mapas de *Ground Truth* passa por um processo de 2 fases:

- Identificação das zonas críticas;
- Mapeamento por anomalia em cada imagem.

Através de uma análise visual cuidada, realiza-se um estudo das imagens adquiridas, com a forma de inspeção direta das mesmas. Esta análise permite iniciar o processo de deteção das anomalias, nomeadamente a sua identificação e localização nas superfícies de betão à vista.

A construção dos mapas *Ground Truth* é um processo muito relevante para avaliar o método proposto. Estes mapas são originados através de um processo de classificação realizado pelo utilizador, o qual é assumido como referência para avaliar os resultados e assumido como *Ground Truth*. Será a partir destes mapas que serão analisadas as conclusões sobre o mapeamento das anomalias das imagens.

Para além disso, o estudo pretende que sejam identificadas as zonas críticas nessas mesmas superfícies. Nesta dissertação, o termo 'zona crítica' refere-se a zonas que apresentam elevada densidade de anomalias, relativamente à restante superfície, ao ponto de ser considerada problemática e necessitar de ser assinalada para avaliação e/ou posterior intervenção.

Uma vez terminada a deteção de zonas críticas através do processo visual, aplica-se o algoritmo que permite detetar estas zonas, com base nas características das anomalias anteriormente estudadas. A comparação destes resultados com o número de zonas críticas identificadas por inspeção visual, permite averiguar a exatidão do método proposto. O passo aplicado, após o processamento das imagens, recolhe parâmetros que caracterizam estas zonas críticas, nomeadamente a sua área, perímetro, e o maior e menor comprimento.

3.4. Clustering e SuperCluster- Anomaly

O *SuperCluster-Anomaly* (*SC-Anom*) consiste num método que se desenvolve num espaço de cor, especificamente no espaço RGB, isto é, no sistema cor-luz, em que R representa a banda do Vermelho (*Red*), G a banda do Verde (*Green*) e B a banda do Azul (*Blue*). Através da radiação que cada corpo emite, é possível determinar o nível da sua radiação, à qual corresponde a coordenadas no espaço RGB. O pré-processamento das imagens terá já identificado as coordenadas neste espaço para cada pixel da imagem. Uma vez conhecidos estes valores pode executar-se o algoritmo e, assim, seleccionar o conjunto de *clusters* que constituem cada anomalia a identificar, sendo que antes da aplicação do método se executa o *clustering* das imagens.

Inicialmente o procedimento passa pelo *clustering* das imagens, que se baseia num agrupamento dos pixels conforme as suas características radiométricas, formando vários *clusters* (grupos). Este agrupamento é realizado tendo em consideração a distância euclidiana entre pixels de cor semelhante, existindo uma distância máxima. O número de *clusters* é definido à priori, sendo que quanto maior o número de clusters, maior a discretização e mais grupos são avaliados. É necessário ter em consideração que quanto maior o número de *clusters* a processar, maior a exigência de processamento necessária, dando-se preferência ao processamento de um menor número de clusters possível.

O *SC-Anom* inicia-se através da definição de um ponto de coordenadas conhecidas, denominado de centro, e um raio, cuja designação é *threshold*, *th*. Estes dois parâmetros delimitam uma esfera, no

espaço RGB, no interior da qual o algoritmo seleciona os *clusters* relevantes para a análise. A determinação dos valores do *threshold* para cada caso é definida à partida pelo utilizador.

Existem duas variáveis: o centro e o raio. Enquanto a determinação dos valores do *threshold* para cada caso é definida à partida pelo utilizador, o centro pode ser selecionado de diversas formas. Neste caso, como o objetivo da utilização do método reside no zonamento das diversas anomalias o valor do é centro variável. De forma a selecionar o valor mais acertado para cada caso, elabora-se a recolha de uma amostra de valores RGB para cada anomalia e calcula-se a média dos mesmos valores.

Após a recolha destas informações, ocorre o processamento do *SC-Anom*. A partir dos resultados, podem identificar-se as anomalias presentes nas imagens do elemento analisado. É sobre este ficheiro que irá ocorrer o pós-processamento.

3.5. Pós-processamento

Após a execução do algoritmo *SC-Anom*, segue-se o pós-processamento dos resultados. Um dos passos mais relevantes de pós-processamento é a aplicação da morfologia matemática (MM). As imagens possuem um elevado grau de complexidade, devido à sua textura, ruído, entre outros fatores.

A morfologia matemática assume um papel fundamental neste tipo de estudos porque resolve os problemas de extração de informação das imagens através de uma análise das suas estruturas geométricas. Existem diversos modos de utilizar a morfologia matemática, e cada um aplica-se a cada caso conforme a técnica necessária. Neste caso, a morfologia matemática será aplicada através de operações simples entre as matrizes que processam a forma e a estrutura de uma imagem binária. Esta permitirá estudar a forma e a textura das imagens do objeto em estudo. Esta técnica permite realizar um varrimento de modo a eliminar informação assinalada pelo processamento que não seja relevante para os resultados procurados (Candeias e Banon, 1997). Por exemplo, a morfologia matemática pode ser utilizada para a eliminação de linhas horizontais que representam juntas entre painéis. Como estas juntas possuem uma largura fixa, através do *MatLab* (Mathworks, 2018), é possível assinalar, utilizando uma reta, a localização da junta, inserindo-se a largura desta em píxeis. A reta assume a largura inserida nos valores das matrizes e a informação da junta é eliminada da imagem, de forma a não interferir com os resultados que se pretende obter.

3.6. Deteção de Armadura à Vista

Como referido anteriormente, um dos métodos alternativos ao método principal em estudo, é a execução de um algoritmo que deteta unicamente a armadura à vista. Este método permite distinguir a armadura à vista dos seus vestígios de corrosão. Localmente, onde existe armadura corroída existem indícios da sua corrosão. No entanto, é necessário analisar se uma estrutura que não apresente varões à vista, possui também ela corrosão de armadura. O algoritmo deteta uma zona com grande densidade de vestígios de corrosão e identifica-a para posterior inspeção detalhada e, se necessário, intervenção.

Este processo foi desenvolvido através da análise das características das fotografias à fachada do edifício do caso de estudo. Verificou-se a existência de um padrão que distingue a identificação da anomalia Armadura à vista das restantes. Na recolha do código RGB que a identifica pode verificar-se que o valor de B é sempre superior a R, como se observa nas Tabelas 1 e 2 e na Figura 11, em oposição ao código RGB que identifica Índícios de corrosão.

Tabela 1 - Dados de centro RGB recolhidos para a anomalia Armadura à Vista;

	R [0,1]	G[0,1]	B[0,1]
Armadura à Vista	0,086	0,086	0,118
	0,192	0,192	0,212
	0,161	0,161	0,180
	0,082	0,078	0,101

Média	0,141	0,141	0,160

Tabela 2 - Dados de centro RGB recolhidas para a anomalia Índícios de corrosão;

	R[0,1]	G[0,1]	B[0,1]
Índícios de Corrosão	0,353	0,329	0,333
	0,243	0,286	0,325
	0,396	0,388	0,380
	0,337	0,337	0,341

Média	0,271	0,322	0,361

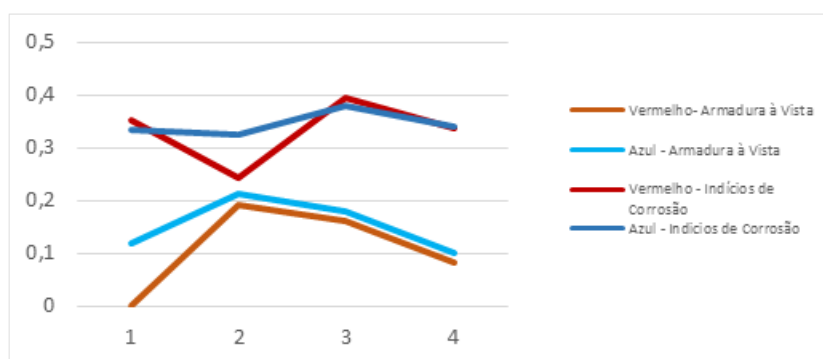


Figura 11 - Comparação dos valores dos canais Vermelho e Azul para as anomalias Índícios de Corrosão e Armadura à vista;

Quando se realiza o *clustering* das imagens para posterior identificação da anomalia armadura à vista, o processamento, realizado através do *SC-Anom*, identifica também os indícios de corrosão, uma vez que as suas características de cor se apresentam com valores próximos aos da anomalia de armadura à vista. O algoritmo de deteção de Armadura à Vista foi desenvolvido no sentido de identificar todos os pixels que possuam no seu código RGB, o valor B superior a R. Desta forma, é possível distinguir os pixels que são assinalados em conjunto nas duas anomalias, e perceber dentro de um conjunto de maior dimensão, se se trata de um caso com armadura à vista ou se apenas nos deparamos com um caso com indícios de corrosão.

3.7. Mapa de Resultados

O estudo dos resultados pode ser realizado a dois níveis: a nível do pixel, com os mapas de confusão, e a nível da localização das zonas críticas, através de uma análise visual.

A primeira análise dos resultados decorre após a execução do pós-processamento. O ficheiro final deverá apresentar a identificação das anomalias presentes. A avaliação da exatidão dos resultados presentes no ficheiro é executada através de um mapa de resultados. Este permite através da sobreposição dos resultados com os mapas *Ground Truth* retirar as conclusões ambicionadas.

O mapa de resultados estuda esta comparação, através de um mapa de confusão, do qual surge uma matriz que inclui os seguintes parâmetros: Verdadeiros Positivos (TP), Falsos Positivos (FP), Verdadeiros Negativos (TN) e Falsos Negativos (FN). O primeiro (TP) indica a quantidade de pixéis assinalados pelo utilizador que coincidem com os valores assinalados pelo programa, o segundo (FP) indica aqueles que o programa deteta, mas o utilizador não. O terceiro parâmetro (TN) indica o número de elementos da matriz que não são identificados nem pelo utilizador nem pelo programa e o parâmetro FN, indica aqueles identificados pelo utilizador que deveriam ter sido também identificados pelo programa e não o foram.

De forma a analisar a eficácia da análise estuda-se um parâmetro denominado por F1 dado por:

$$F_1 = \frac{2 \times (p \times r)}{(p+r)} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde *r* (*recall*) indica qual a proporção de elementos positivos identificados e *p* (*precision*), a proporção de identificações positivas que está realmente correta. O parâmetro F1 permite-nos então perceber se os resultados são satisfatórios ou se necessitam de ajustes.

Relativamente à identificação de zonas críticas, a análise dos resultados é realizada através de uma análise visual que pretende comparar as zonas críticas identificadas por inspeção visual com aquelas detetadas nas imagens após execução de todo o processamento associado ao método *SuperCluster-Anomaly*.

4. Caso de Estudo: Pavilhão de Conhecimento

4.1. Descrição da Estrutura e Identificação das anomalias

O Pavilhão do Conhecimento situa-se no Parque das Nações em Lisboa e foi construído no âmbito da EXPO'98, fazendo parte de um projeto que se acredita ter revolucionado a zona este da cidade e influenciado as estratégias de requalificação urbana na capital (Ciência Viva, s.d.). O projeto arquitetónico do pavilhão teve como autor o arquiteto J. L. Carrilho da Graça e como engenheiro António Adão da Graça. Ganhou diversos prémios de arquitetura, nomeadamente o Prémio Valmor em 1998 assim como o Grande Prémio do Júri FAD, 1999, em Barcelona (Ciência Viva, s.d.).

Este edifício albergou um dos pavilhões temáticos da EXPO de Lisboa, o pavilhão do conhecimento dos Mares, onde era possível explorá-los com uma perspetiva histórica, técnica e humana. Mais tarde, reabriu com as funções ainda praticadas atualmente como pavilhão do Centro da Ciência Viva que mobiliza diversas exposições temáticas nas áreas científicas da física, matemática, química, biologia e ciências sociais (Ciência Viva, s.d.). O edifício foi construído em betão armado, com a perspetiva de ser semelhante a um navio, sendo que a sua finalização é em Betão à Vista, utilizando-se maioritariamente betão branco. No interior tem dois pisos destinados a exposições, e possui um grande volume vertical atingindo aproximadamente 40 metros de altura. O método construtivo adotado para as suas fachadas exteriores foi a utilização de painéis de betão armado pré-fabricados. Tal opção ficou a dever-se à dimensão das fachadas, mas também às condições de prazo exigidas para a obra. É de notar que todo o projeto e construção dos pavilhões que faziam parte da EXPO'98 foi um processo rápido e acelerado, devido aos curtos prazos existentes até à realização do evento.



Figura 12 - Pavilhão do Conhecimento (Câmara Municipal de Lisboa, s.d.);

A utilização do Pavilhão do Conhecimento como caso de estudo neste trabalho deve-se ao facto de este apresentar várias anomalias, entre elas a delaminação do betão do recobrimento da armadura. Esta delaminação esteve e poderá estar na origem de descasque de betão. O descasque do betão pode comprometer a segurança dos cidadãos que diariamente utilizam o

espaço envolvente ao Pavilhão, sendo importante sinalizar as zonas críticas para posterior intervenção e reparação.

Para a aplicação do método proposto nesta dissertação, foi definido como objeto de estudo a fachada Oeste da torre do edifício. Foi realizado um levantamento fotográfico e uma visita ao local que permitiu identificar a presença de diversas anomalias na face da fachada em estudo.

Como referido anteriormente, é possível verificar a existência de destacamento de betão originado pela corrosão das armaduras dos painéis. São observados locais onde existe desagregação do betão e também zonas que verificam valores de recobrimentos reduzidos. É observável que as juntas entre painéis são os locais mais problemáticos visto que a maior parte das anomalias enunciadas atrás se situam nas suas proximidades. Tal acontece, uma vez que, estas zonas ficam sujeitas a fatores que as tornam mais propensas a incluir anomalias, como por exemplo, a existência de acumulação de água proveniente de escorrências da água da chuva cuja humidade promove a colonização biológica.

O pavilhão localiza-se numa zona citadina, mas próxima do rio, tal localização leva a classificação do grau de exposição, segundo a NP EN 206-1, de XS1 (Exposto ao sal transportado pelo ar, mas não em contacto direto com a água do mar).

O edifício já foi alvo de algumas reparações nas suas fachadas, onde se observa a aplicação de argamassa de reparação em diversos locais.

Resumidamente, as anomalias observadas foram as seguintes:

- Armadura à Vista;
- Desagregação do Betão;
- Indícios de corrosão;
- Delaminação do Betão;
- Colonização Biológica.

Ao longo do trabalho, embora sejam analisados os diversos problemas detetados na fachada do edifício em estudo, optou-se por utilizar o termo anomalia no sentido lato para serem referidos todos os problemas analisados.

4.2. Caracterização das anomalias

De todas as anomalias atrás enunciadas, as que se observam em maior número são a armadura à vista e a desagregação de betão.

Os casos de armadura à vista apresentam varões de armadura expostos em estado claro de corrosão. Os casos em que surgem varões isolados apresentam-se em igual número aos casos de grupos de dois ou mais varões expostos. Nestas zonas, podem ainda observar-se vestígios de corrosão em forma de escorrência, mas também desagregação de betão. De referir que na maior parte dos casos assinalados de armadura à vista, esta apresenta-se exposta dado que, devido à identificação e localização de problemas de delaminação como casos de descasque

iminente, foi realizada uma intervenção, anterior a este estudo, onde foi realizado um descasque controlado para evitar acidentes.

Para além destes casos, existem zonas de armadura à vista que resultam de valores de recobrimento reduzidos, provenientes de erros de execução e pormenorização das armaduras. Dadas as condições climatéricas ou ambientais em que se encontra a estrutura, tende a iniciar-se o processo de corrosão das armaduras. Este processo, dado de forma expansiva, origina a perda de aderência entre a armadura e o betão, surgindo, conseqüentemente, a fendilhação e delaminação do mesmo.

Os vestígios de corrosão, por sua vez, são detetados ao longo de todos os painéis da fachada, mesmo em casos em que não se observa armadura à vista. Estes apresentam-se sobre a forma de escorrências através de poros no betão. Na avaliação das anomalias das estruturas é importante perceber as zonas em que existe corrosão das armaduras em que, na maioria dos casos, esta não é perceptível a olho nu. A existência deste tipo de escorrências pode ser um indicador importante para a deteção de regiões onde já possa existir corrosão de armaduras, ou seja, que necessitam de intervenção. Por esta razão, os indícios de corrosão serão também analisados como uma anomalia.







A desagregação de betão é outro caso assinalado como uma das anomalias mais presentes na fachada analisada. Os cantos do edifício e as juntas de betonagem são as zonas que apresentam este problema de forma mais evidente. Já a delaminação só foi possível assinalar num local, onde é evidente a fissuração e algum destacamento do material.

Como referido anteriormente, também se observa presença de colonização biológica, mas apenas é localizada numa junta entre painéis. Devido à escorrência e acumulação de humidade nestas zonas, musgos e líquenes começam a desenvolver-se, apresentando-se em manchas esverdeadas e escuras.

Por último, é de referir que se observam casos em que já se procedeu à intervenção e reparação de algumas zonas da fachada, detetando-se argamassa de reparação. Estas apresentam-se principalmente em juntas entre painéis, o que evidencia os problemas já referidos no perímetro dos painéis.

Para a aplicação do método proposto no Capítulo 3, é necessário definir as características físicas que distinguem as anomalias identificadas, de entre a amostra recolhida. Nesse sentido, foi elaborado um quadro resumo que contempla esta informação, Tabela 3.

Tabela 3 – Quadro Resumo das Características físicas das anomalias;

Identificação da Anomalia	Exemplo	Características	Código RGB
Argamassa de Reparação		<ul style="list-style-type: none"> ○ Cor idêntica à do betão; ○ Localizado nas juntas entre painéis ○ Apresenta-se fissurado ○ Formato Alongado e Linear 	0.43 0.42 0.40
Armadura à vista		<ul style="list-style-type: none"> ○ Cor acastanhada (escura) ○ Apresenta-se com forma linear ○ Usualmente direção horizontal ou vertical ○ Intervalo entre anomalias constante 	0.14 0.14 0.16
Indícios de corrosão		<ul style="list-style-type: none"> ○ Cor acastanhada ○ Apresenta escorrência com a mesma cor ○ Sem forma definida ○ Normalmente presente junto de zonas com armadura à vista ou zonas muito porosas do betão 	0.27 0.32 0.36
Delaminação de betão		<ul style="list-style-type: none"> ○ Forma não linear, com direção aproximadamente horizontal ○ Origina sombras devido ao relevo 	0.36 0.33 0.33
Desagregação de Betão		<ul style="list-style-type: none"> ○ Maioritariamente junto de juntas de betonagem e entre painéis ○ Porosidade ○ Falta de material ○ Cor cinzenta (mais escura que o betão) ○ Observa-se agregados grossos do betão ○ Textura rugosa 	0.31 0.28 0.26
Colonização Biológica		<ul style="list-style-type: none"> ○ Cor muito escura ○ Zona de acumulação de água ○ Presença entre juntas de painéis ○ Forma linear ○ Direção horizontal ou vertical 	0.27 0.27 0.27

4.3. Construção dos mapas *Ground Truth*

A construção dos mapas de *Ground Truth* passa por um processo de 2 fases:

- Identificação das zonas críticas;
- Mapeamento por anomalia em cada imagem.

Numa primeira etapa analisaram-se todas as imagens obtidas da fachada, avaliando-se a presença das anomalias anteriormente identificadas. Verificou-se que as mais frequentes e com maior dimensão são a armadura à vista, indícios de corrosão e desagregação do betão.

Posteriormente a esta análise, iniciou-se a identificação de zonas críticas. Como anteriormente referido, o termo 'zona crítica' refere-se às zonas em cada imagem que apresentam maior concentração de anomalias ou indícios destas, o que na prática seriam as zonas sinalizadas pelo inspetor para análise e ensaios.

Como referido atrás, a identificação das zonas críticas pode resultar da presença de anomalias diferentes. Por esse motivo, a identificação de zonas críticas é realizada independentemente da(s) anomalia(s) presentes. Para tal, analisaram-se as 48 fotografias da fachada e avaliaram-se todas as patologias presentes, assinalando-se as zonas críticas. Como exemplo, nos painéis 13, 22 e 33 foram assinaladas: 5, 1 e 5 zonas críticas, respetivamente. Nas Figuras 13, 14 e 15, pode observar-se o modo como foram assinaladas, respetivamente para os painéis 13, 22 e 33.

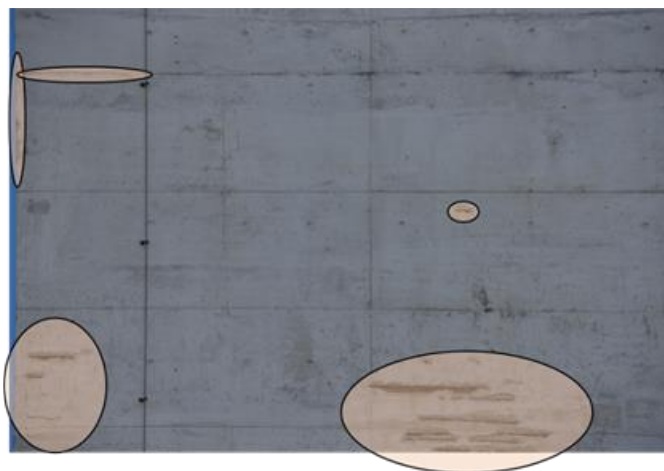


Figura 13 – Identificação das zonas críticas presentes no Painel 13;



Figura 14 - Identificação das zonas críticas presentes no Painel 22;

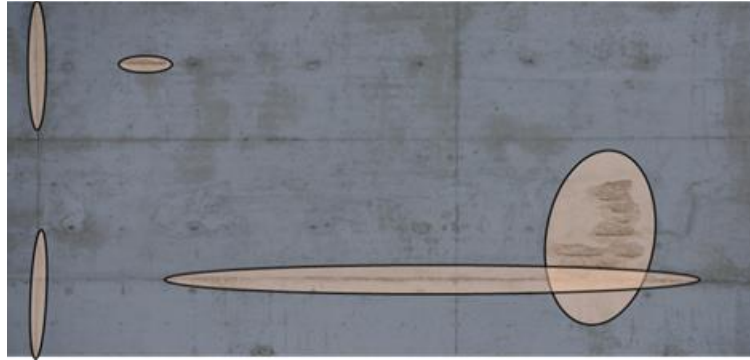


Figura 15 - Identificação das zonas críticas presentes no Painel 33;

Foi igualmente mapeada cada anomalia de forma a construir a respetiva *Ground Truth*. A *Ground Truth* é uma ‘máscara’ em forma de matriz binária, em que os elementos de índice 1 representam os pixéis da imagem onde se localizam as anomalias, e os de índice 0 representam os pixéis onde não existem anomalias. Estas máscaras são executadas ‘manualmente’ pelo utilizador, com recurso a um algoritmo desenvolvido em *Matlab* (Mathworks, 2018), onde se define os limites de áreas com o objeto a detetar, as quais são identificadas a branco (índice 1) na imagem das GT. Foram executados os mapas *Ground Truth* para cada tipo de anomalia presente em cada imagem, de forma isolada, tal como exemplificado na Figura 16.

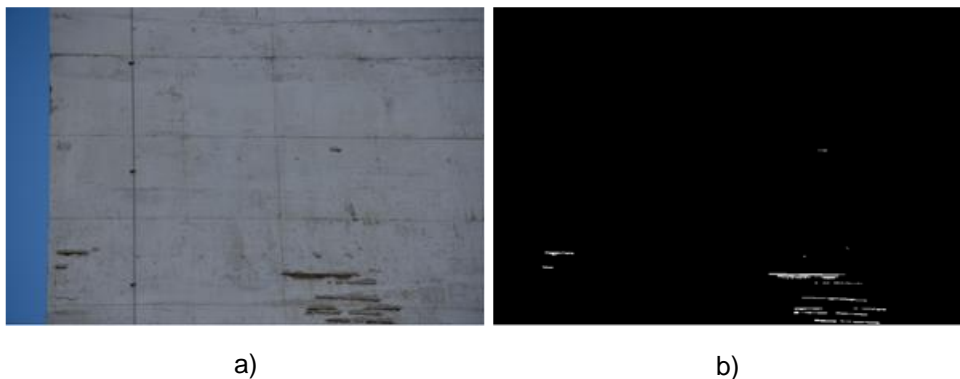


Figura 16 — Painel 13: a) imagem ortoretificada; b) *Ground-Truth* relativa à anomalia Armadura à Vista; Na Figura 16 b), é possível observar zonas a branco, que representam anomalias. Em paralelo, com a imagem da esquerda é possível concluir que as zonas a branco apenas assinalam os pixéis que no seu conjunto formam os varões de armadura à vista. Esta máscara exclui toda a informação adicional da imagem que não corresponde a varões à vista, permitindo que se considere este ficheiro, em todo o processo, como a verdade absoluta – *Ground-Truth*. Por meio da comparação, a *Ground Truth* permite aferir a eficácia dos resultados do método. As diferentes *Ground Truth* realizadas para os painéis 13,22 e 33 para as diversas anomalias podem ser analisados nos Anexos A a C.

4.4. Método *SuperCluster-Anomaly*

4.4.1. Pré-processamento e construção do mosaico de imagens

No pano Oeste da torre do Pavilhão do Conhecimento, foram obtidas 48 fotografias de alta resolução, no formato 6x8 de forma a retratar toda a fachada. A resolução das imagens é de 4912x7360 px².

Após a aquisição das imagens, procedeu-se ao *stitching* das mesmas. Este processo permite construir o fotomosaico de toda a fachada recorrendo à diminuição da resolução das imagens iniciais, como se pode observar na Figura 17.

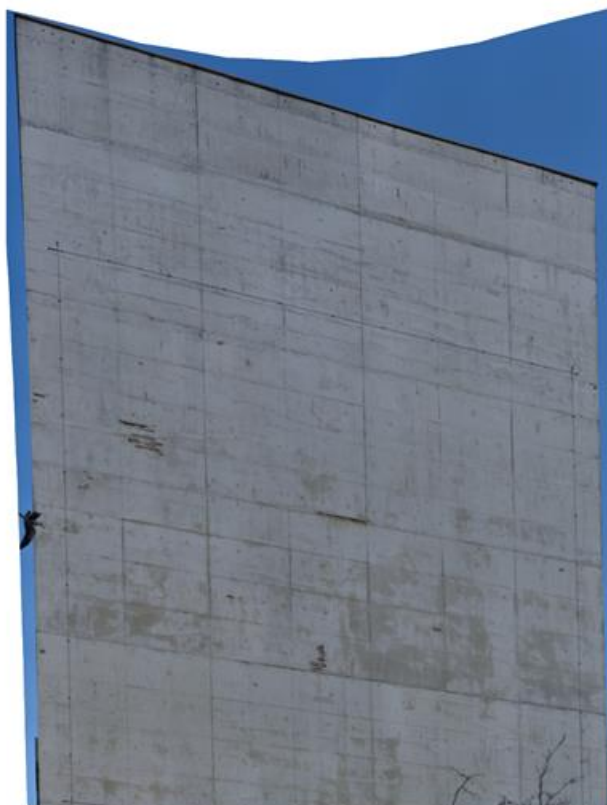


Figura 17 – Fotomosaico realizado pelo *stitching* de todas as fotografias retiradas à fachada de forma segmentada;

O fotomosaico permite ter uma perceção geral da fachada Oeste da torre, auxiliando a localização das anomalias detetadas e a identificação das regiões críticas a ter em consideração, no âmbito de uma futura intervenção na estrutura de betão.

No sentido de aferir os pressupostos admitidos na metodologia proposta, foi seleccionada uma amostra de três imagens. O processamento de seguida apresentado irá incidir sobre estas três imagens, o que permitirá fazer a validação desde o pré-processamento até ao pós-processamento, para este caso de estudo.

As imagens escolhidas, presentes na Figura 18, correspondem ao painel 13, 22 e 33, e foram assim denominadas porque correspondem à 13ª, 22ª e 33ª fotografia obtidas sobre parte da fachada.

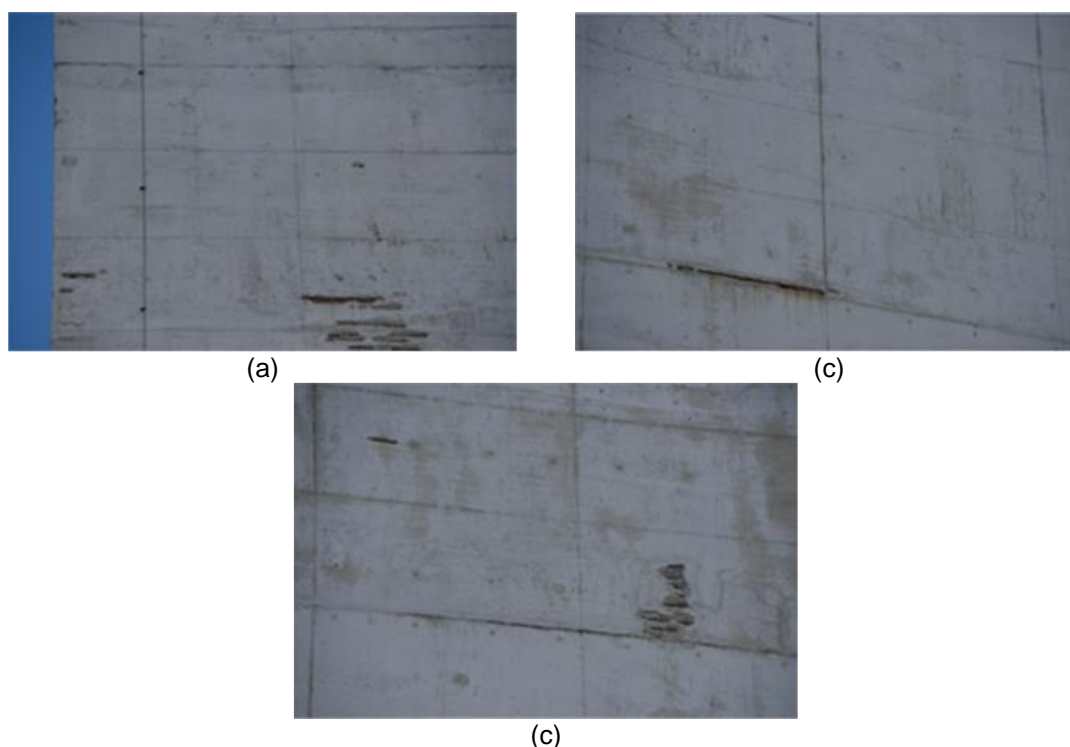


Figura 18 - Fotografias dos painéis 13 (a)), 22 (b)), 33 (c));

O painel 13 foi selecionado por ser o único que apresenta todos os tipos de problemas detetados na estrutura; o painel 22 foi escolhido porque apresenta apenas uma zona crítica composta por um varão de armadura à vista; já o painel 33 por ser representativo dos casos existentes de armadura à vista, indícios de corrosão e desagregação do betão, permitindo isolar estas anomalias das restantes estudadas.

4.4.2. Clustering das imagens e SuperCluster-Anomaly

Como fase inicial do processamento, executou-se o *clustering* das fotografias que representam o painel 13, 22 e 33. Para tal, foi necessário definir o número de clusters a considerar. Foi avaliado o processamento para os casos com 30, 60 e 120 clusters.

Este estudo inicial permitiu verificar que para obter a informação necessária, de forma eficaz a nível de custo computacional, o processamento considerando 30 *clusters* será o mais indicado. Foi escolhido este valor pois comprovou-se que o seu eventual aumento não apresenta alterações relevantes nos resultados obtidos. Desta forma, admitiu-se para todo o método a utilização de 30 clusters.

Paralelamente, realizou-se o estudo do *threshold* (*th*) mais adequado para cada anomalia a analisar, do qual resultaram os valores da Tabela 4:

Tabela 4 – Valor de *threshold* estudado para cada anomalia;

Anomalia	th
Argamassa de Reparação	0,05
Armadura à vista	0,20
Indícios de corrosão	0,10
Delaminação de betão	0,10
Desagregação de Betão	0,15
Colonização Biológica	0,10

Como exemplo da aplicação, é possível observar na Figura 19, o *clustering* do painel número 13, com a divisão em 30 clusters. Posteriormente, foi selecionado o centro RGB referente à anomalia Armadura à Vista (C (35,35,41)), e *threshold* de 0,2 para aplicar o SC-Anom.

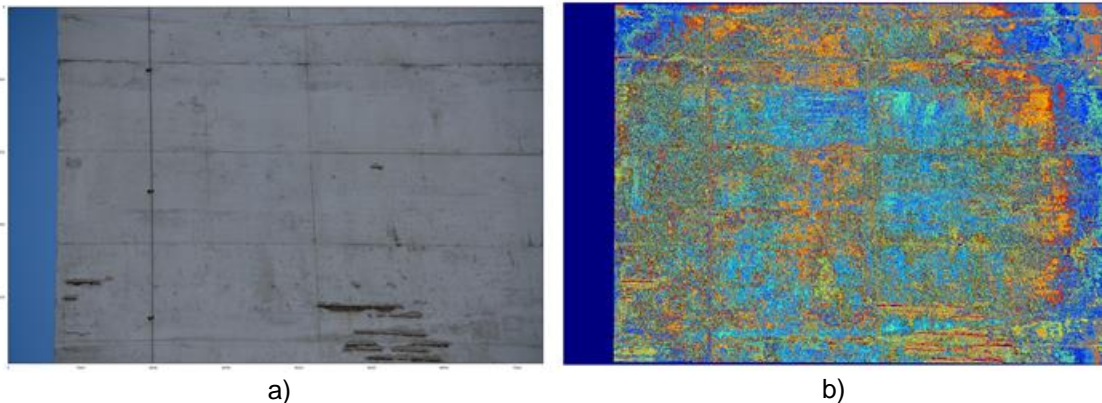


Figura 19 – Painel 13: a) Fotografia; b) *Clustering* para a anomalia Armadura à vista;

Nota-se a presença de um padrão retangular formado por retas com espaçamentos constantes na direcção vertical e horizontal, que foram identificadas como juntas de betonagem entre painéis resultantes do processo construtivo. Para além deste padrão, identificaram-se diversas áreas de maior dimensão que surgem com aparência de manchas. Conclui-se que estas são zonas de sombras, manchas e marcas de escorrências. É possível identificar armadura à vista, uma vez que surgem linhas de orientação horizontal com formato linear e espaçamentos pequenos e regulares.

A aplicação do método *SC-Anom* confirma as zonas identificadas à priori. Na Figura 20, é possível observar que aquelas zonas que na figura originada pelo clustering se assemelhavam a armadura à vista correspondiam a clusters que a representam adequadamente.

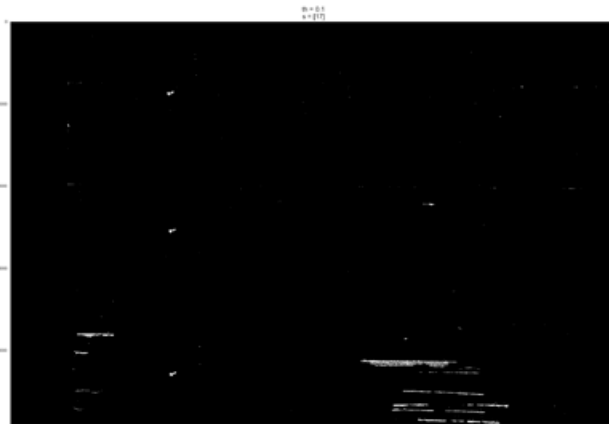


Figura 20 – Resultado após aplicação do método *SC-Anom* para a anomalia armadura à vista sobre o painel 13;

No caso da Figura 21, confirma-se através da sobreposição da informação da imagem a laranja sobre a fotografia original do painel 13, que a maior parte das zonas selecionadas correspondem efetivamente à anomalia que se pretendia assinalar. Quando se realizar o pós-processamento será eliminada a informação que não é relevante, que neste caso corresponde aos três olhais que fixam o cabo de aço presente na fachada.



Figura 21 – Identificação da anomalia Armadura à vista do painel 13, observável através da sobreposição da informação obtida através do processamento do programa *SC-Anom*;

Nesta fase do processamento, observou-se que este assinalava com sucesso as regiões críticas que englobam armadura à vista. O mesmo método de análise foi aplicado para todas as anomalias, nos três painéis, o que permitiu retirar conclusões sobre os diversos ajustes necessários para retirar os resultados que melhor representassem a realidade a analisar.

4.4.3. Pós-processamento de dados

4.4.3.1. Resultados diretos do *SC-Anom*

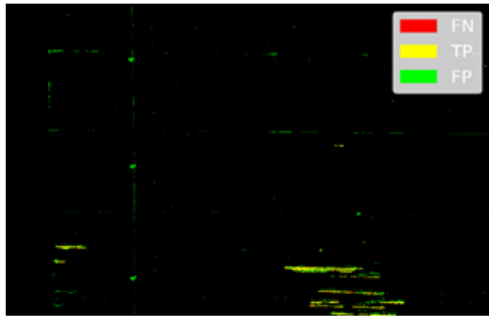
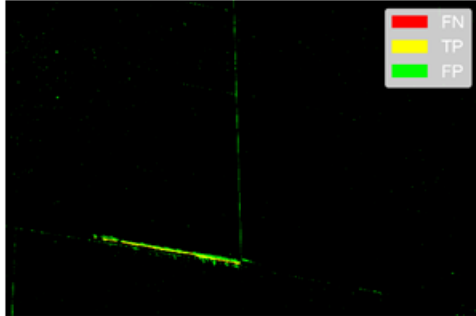
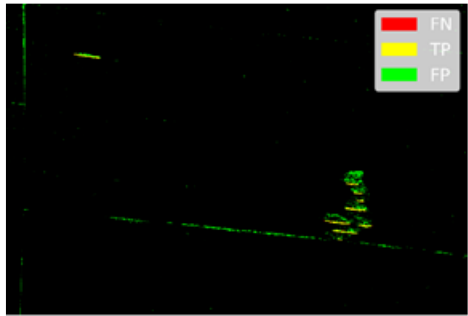
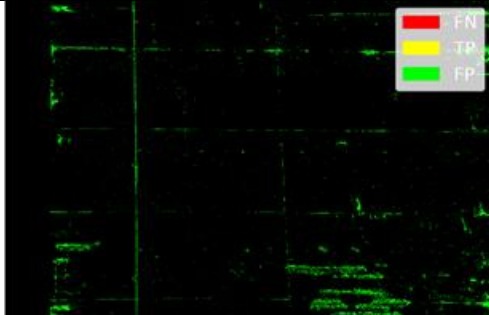
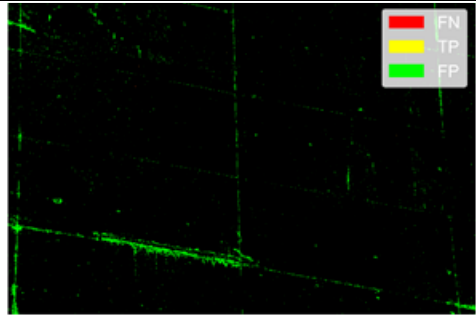
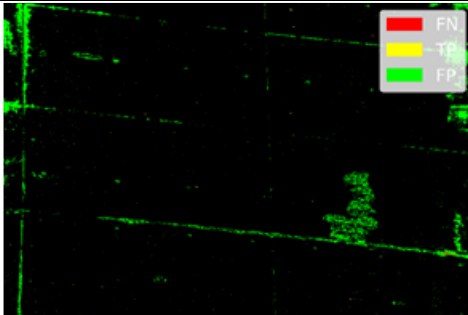
Com o objetivo de ajustar o processo de *clustering* das imagens, ao caso de estudo e tirar conclusões sobre a sua exatidão, como referido anteriormente, foram selecionadas três fotografias de entre as quarenta e oito que compõem o mosaico da fachada.

Como referido no sub-Capítulo 4.3, foram construídas manualmente imagens binárias dos mapas *Ground Truth* para cada anomalia e por cada painel. As imagens dos mapas *Ground Truth* permitem avaliar a deteção das anomalias realizadas pelo método *SC-Anom*. Importa lembrar que, para o processamento deste programa foram utilizados os valores recolhidos sobre o código RGB que identifica o centro de cada anomalia estudada, assim como *th* e o número de clusters.

Tal como referido anteriormente, após o processamento do *SC-Anom*, o estudo dos resultados baseou-se num mapa de resultados e nos parâmetros de análise que este apresentava. Nos parágrafos que se seguem serão avaliados os resultados obtidos para cada um dos três painéis selecionados anteriormente.

Numa primeira instância, observou-se que as anomalias em maior número e num estado mais crítico, que permitem o zonamento das zonas críticas da fachada são a armadura à vista e indícios de corrosão. Apresenta-se de seguida a Tabela 5, com os resultados obtidos na comparação dos mapas *Ground Truth* Armadura à Vista e Indícios de Corrosão definidas pelo utilizador e os resultados obtidos pelo *SC-Anom* para as duas anomalias. Através dos gráficos na Figura 22, é possível compreender qual o comportamento de todos os parâmetros explorados na análise.

Tabela 5 – Resultados obtidos para as anomalias Armadura à Vista e Indícios de corrosão;

	PAINEL 13	PAINEL 22	PAINEL 33
<p>Armadura à Vista (AV) Centro RGB: (0,14; 0,14; 0,16)</p>			
	<p>FN:3,47x10⁻⁵ FP:1,13 TN:0,0996 TP:0,894 P:0,44 R:0,89 F1:0,59</p>	<p>FN:5,21x10⁻⁵ FP:3,047 TN:0,996 TP:0,959 P:0,24 R:0,96 F1:0,38</p>	<p>FN:8,51x10⁻⁵ FP:3,792 TN:0,995 TP:0,932 P:0,20 R:0,93 F1:0,33</p>
<p>Indícios de Corrosão (IC) Centro RGB: (0,27; 0,32; 0,36)</p>			
	<p>FN:1,97x10⁻⁵ FP:665,74 TN:0,977 TP:0,434 P:0,0007 R: 0,43 F1:0,0013</p>	<p>FN:1,17x10⁻⁵ FP:995,17 TN:0,985 TP:0,231 P:0,0002 R:0,23 F1:0,0005</p>	<p>FN:0,12x10⁻³ FP:156,195 TN:0,969 TP:0,379 P:0,0024 R:0,38 F1:0,0048:</p>

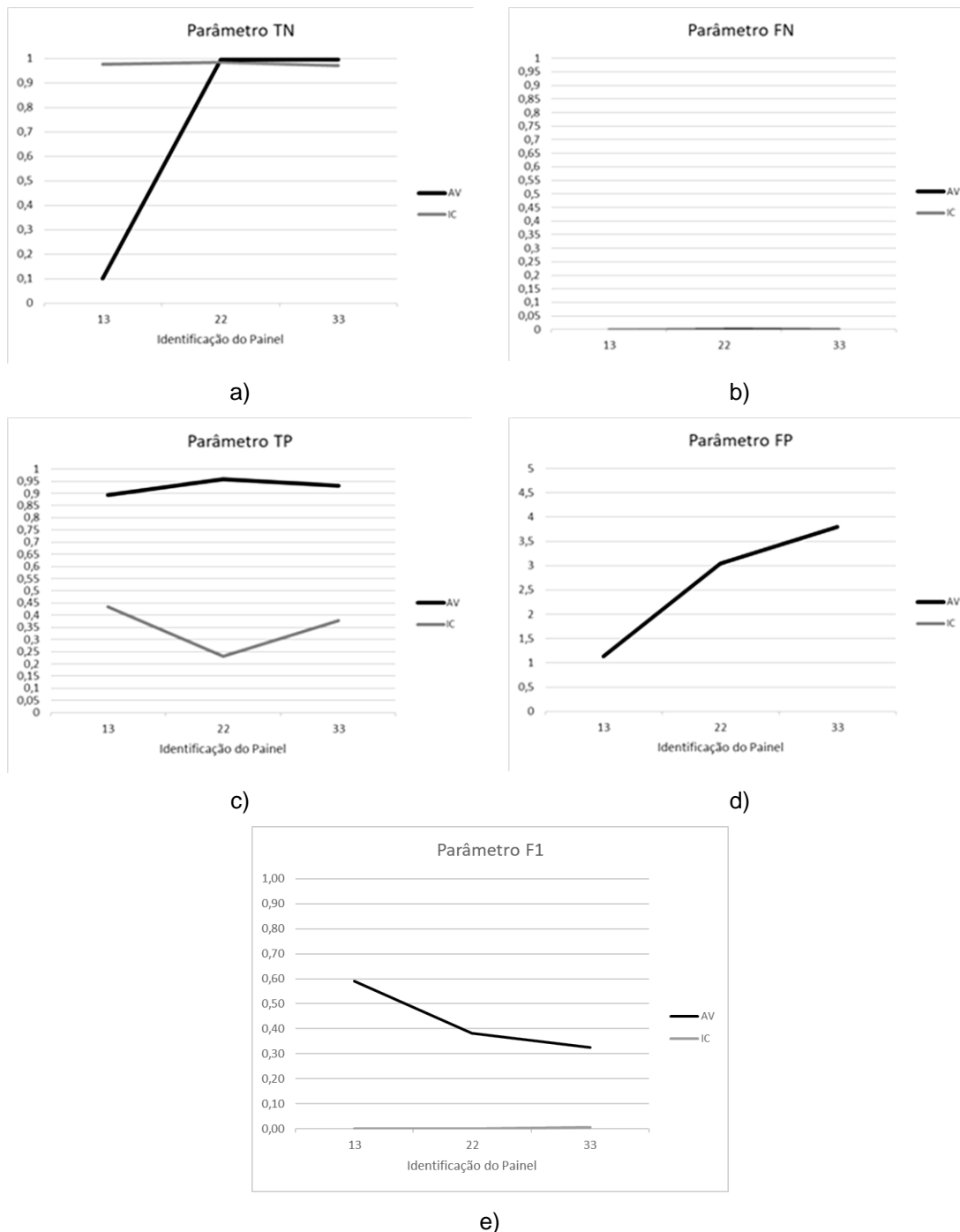


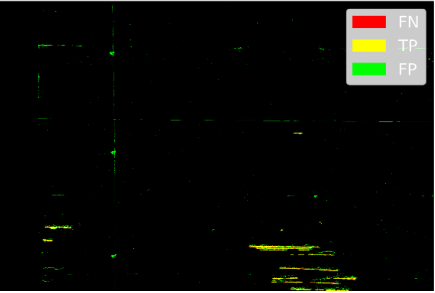
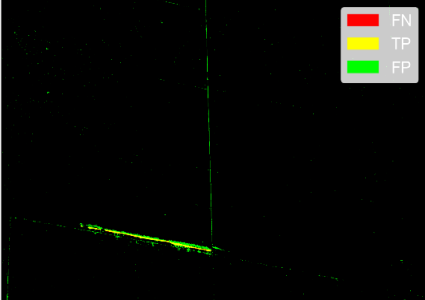
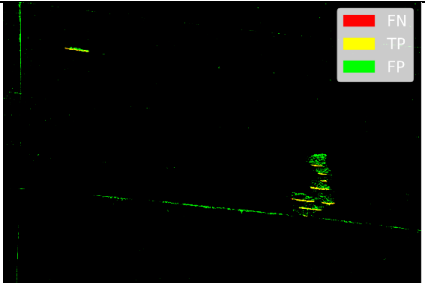
Figura 22 - Resultados dos parâmetros obtidos após análise das anomalias Armadura à Vista e Índícios de Corrosão: a) Identificações Verdadeiras Positivas; b) identificações Falsas Negativas; c) identificações Verdadeiras Positivas; d) identificações Falsas Positivas; e) parâmetro F1.

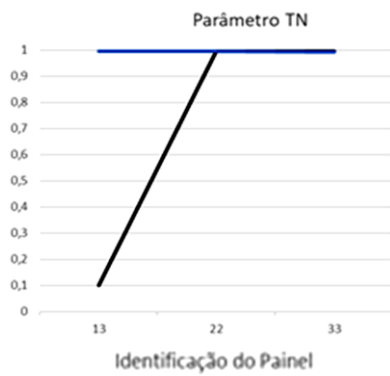
Ao analisar os resultados, observa-se que o resultado do parâmetro F1, do painel 13 analisado para a anomalia Armadura à Vista, corresponde a 0,591. Para o mesmo painel, dos restantes parâmetros: TP assume um valor muito próximo da unidade; TN apresenta-se com um valor muito baixo; FP é inferior a 50%; e o parâmetro FN assume uma percentagem muito próxima de 0%. Todos estes valores contribuirão para o valor de F1 apresentado.

Relativamente à anomalia Indícios de corrosão, a análise não foi tão bem-sucedida, uma vez que a deteção de identificações verdadeiras positivas é inferior a 0,5 em todos os casos analisados.

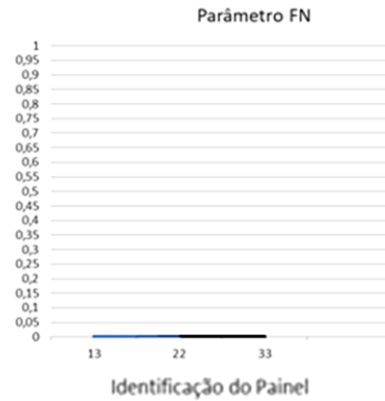
Como se procura que a eficácia do método seja superior à apresentada em todos os resultados, foram testadas algumas alterações. Admitir-se-á no passo seguinte que o centro RGB para todas as imagens corresponde ao centro definido para a anomalia Armadura à Vista. Adicionalmente, os mapas *Ground Truth* de ambas as anomalias foram somados. Uma vez que se verifica nas imagens da Tabela 5 que os resultados assinalam sempre ambas as anomalias, ao analisá-las em separado. Desta forma, os painéis serão analisados concluindo, se a utilização da informação relativa à anomalia Armadura à Vista permite assinalar informação correspondente aos indícios de corrosão ou não. Na Tabela 6 e na Figura 23 apresentam-se os resultados obtidos tendo em consideração esta alteração.

Tabela 6 – Resultados obtidos para a soma da informação das anomalias armadura de corrosão e indícios de corrosão, considerando o centro RGB associado a armadura à vista;

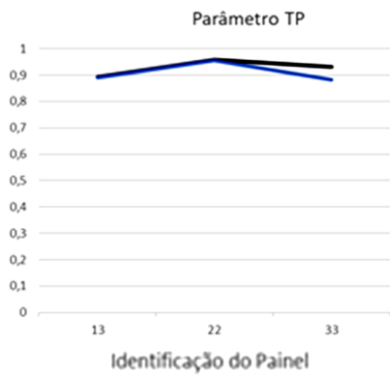
	AV+IC - Centro RGB (AV): (0,14;0,14;0,16)	
PAINEL 13		FN: $0,365 \times 10^{-3}$ FP: 1,115 TN: 0,996 TP: 0,889 P: 0,44 R: 0,89 F1: 0,59
PAINEL 22		FN: $0,585 \times 10^{-4}$ FP: 3,003 TN: 0,996 TP: 0,956 P: 0,24 R: 0,96 F1: 0,39
PAINEL 33		FN: $0,168 \times 10^{-3}$ FP: 3,208 TN: 0,995 TP: 0,884 P: 0,22 R: 0,88 F1: 0,35



a)



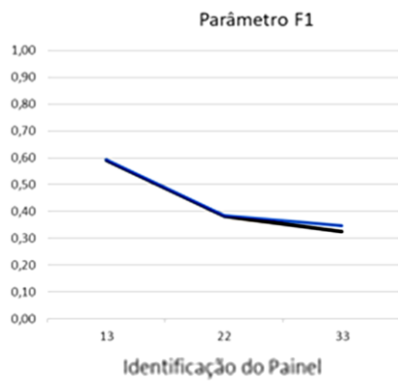
b)



c)



d)



e)

Legenda dos gráficos:

— AV
— SOMA 2

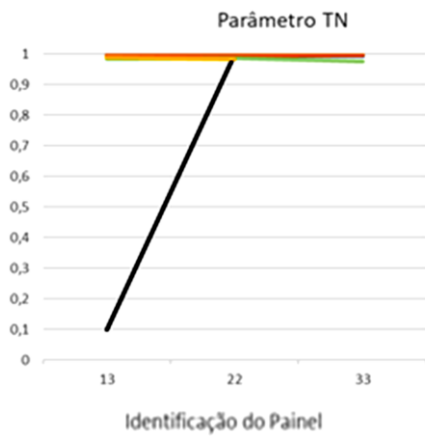
Figura 23 - Os resultados dos parâmetros após análise das anomalias Armadura à Vista e soma da informação das anomalias Armadura à Vista e Índices de Corrosão: a) identificações Verdadeiras Positivas; b) identificações Falsas Negativas; c) identificações Verdadeiras Positivas; d) identificações Falsas Positivas; e) parâmetro F1.

Após este segundo estudo, é possível passar a observar, na Tabela 6, uma quantidade significativa de elementos assinalados como FP, a verde, isto é, elementos identificados como anomalia pelo método, mas não pelo utilizador. Verifica-se que estes correspondem a pontos onde existe Desagregação de betão. O destacamento de betão provocado pelo processo de corrosão da armadura, está na origem das zonas observadas nas imagens, onde se localiza Armadura à Vista com Indícios de corrosão e Desagregação de betão no seu perímetro. Conclui-se que estes pontos foram assinalados pelo *SC-Anom* devido à presença de zonas com sombra ou escorrências de corrosão, que influenciaram o código escolhido para o centro RGB da anomalia Desagregação de betão, fazendo com que este estivesse próximo do código que representa a Armadura à Vista, sendo esta a razão porque as coordenadas RGB são próximas e os pixéis identificados como a anomalia Armadura à Vista.

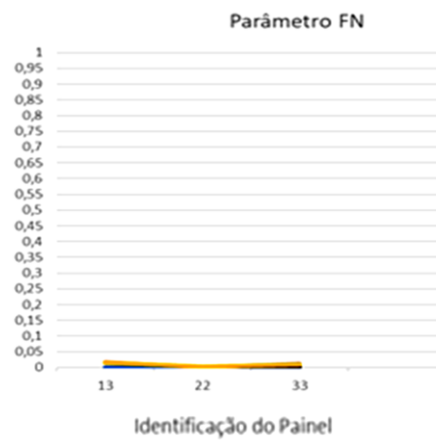
De forma a testar se o método confunde a anomalia Desagregação com as anomalias Armadura à Vista e Indícios de Corrosão, a *Ground Truth* correspondente à anomalia da Desagregação foi somada às restantes. Uma vez que não é possível definir à priori qual o centro RGB mais ajustado para a melhoria dos resultados, estudou-se isoladamente cada caso. Variou-se o centro RGB introduzido no método *SC-Anom* entre cada código RGB associado a cada anomalia. Na Figura 24 a) a e) e na Tabela 7, é possível observar os resultados para este caso.

Tabela 7 – Resultados obtidos para a soma de informação das anomalias Armadura à vista, desagregação e indícios de corrosão, considerando diferentes centros RGB;

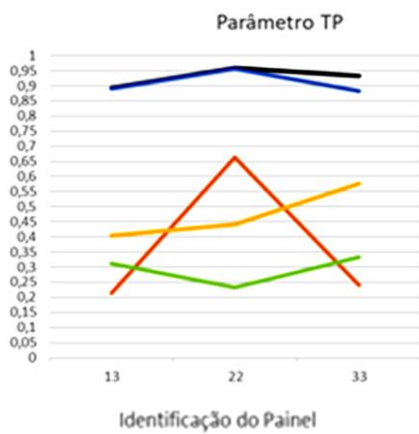
	PAINEL 13	PAINEL 22	PAINEL 33
<p>AV + IC + Desagregação (D):</p> <p>Centro RGB (AV): (0,14; 0,14; 0,16)</p>	<p>FN:642910 FP:163691 TN:35270318 TP:175401</p> <p>P R F1</p>	<p>FN:562897 FP:5826830 TN:34751379 TP:255414:</p> <p>P R F1</p>	<p>FN:486738 FP:424987 TN:34909022 TP:331573</p> <p>P R F1</p>
<p>AV + IC + Desagregação (D):</p> <p>Centro RGB (D): (0,31; 0,28; 0,26)</p>	<p>FN:51225 FP:84362 TN:35916337 TP:100396</p> <p>P R F1</p>	<p>FN:116493 FP:512345 TN:35488354 TP:35128</p> <p>P R F1</p>	<p>FN:84721 FP:581734 TN:35418965 TP:331573</p> <p>P R F1</p>
<p>AV + IC + Desagregação (D):</p> <p>Centro RGB (IC): (0,27; 0,32; 0,36)</p>	<p>FN: 452693 FP:68545 TN:35486916 TP:144163</p> <p>P R F1</p>	<p>FN: 397621 FP:890512 TN:34664949 TP:199238</p> <p>P R F1</p>	<p>FN:253458 FP:959057 TN:34596404 TP:343401</p> <p>P R F1</p>



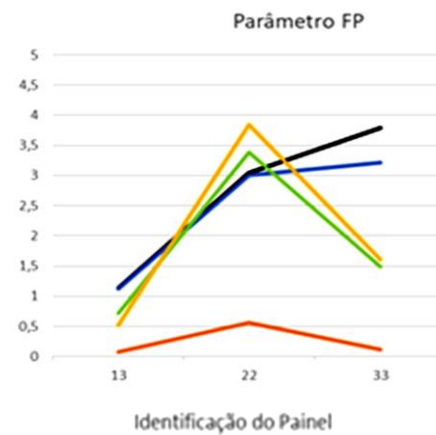
a)



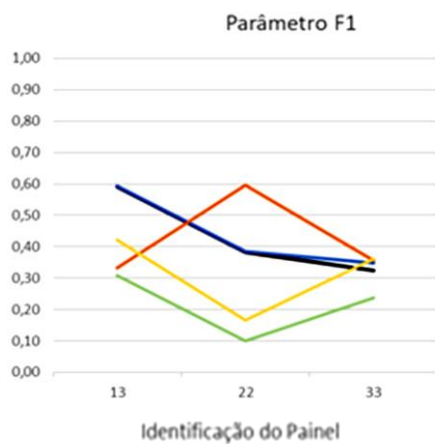
b)



c)



d)



e)

Legenda dos gráficos:

- AV
- SOMA 2
- SOMA 3 AV
- SOMA 3 IC
- SOMA 3 D

Figura 24 - Os resultados dos parâmetros após análise das anomalias Armadura à Vista, soma das GT das anomalias Armadura à Vista e Índices de Corrosão e informação sobre a soma das duas anomalias anteriores e a anomalia desagregação: a) Identificações Verdadeiras Positivas; b) identificações Falsas Negativas; c) identificações Verdadeiras Positivas; d) identificações Falsas Positivas; e) parâmetro F1.

Analisando a tabela 7 e a Figura 24, pode verificar-se que a adição da *Ground Truth*, correspondente à Desagregação de betão, às restantes GT não contribuiu para uma melhoria de resultados. Por comparação com os resultados obtidos nos passos anteriores, a deteção de valores TP assume, em todos os painéis, valores inferiores aos obtidos anteriormente, enquanto que os valores TN se mantêm muito próximos da unidade. Pode concluir-se que apesar da soma entre *Ground Truth* permitir a identificação de mais TP, também os restantes parâmetros aumentam, e neste caso, em maior número, diminuindo assim a eficácia da análise, e por consequência os valores de F1. Desta forma, conclui-se que este passo não tem um impacto positivo na análise, uma vez que o método não confunde a deteção da anomalia Desagregação com as restantes. Os pontos que se pretende identificar, correspondem, provavelmente a valores que se encontram numa zona de confusão entre as fronteiras das diferentes anomalias. Assume-se, a partir deste momento, que a deteção de Armadura à Vista deve realizar-se através da primeira análise utilizada, uma vez que em termos de processamento é a solução mais simples e os resultados obtidos são os que apresentam melhores valores, nomeadamente F1 superior a 50%, número de TP próximos da unidade e FP baixos, próximos de 0.

4.4.3.2. Resultados após eliminação de juntas

No sentido de clarificar as imagens analisadas, eliminando informação pouco relevante que sistematicamente surge nos resultados obtidos, será executado um processamento baseado em morfologia matemática. Numa fase seguinte de pós-processamento, proceder-se-á à eliminação de informação que não seja relevante, como por exemplo, os pontos que assinalam juntas entre painéis e os pontos que assinalam os cabos de aço presentes nas fachadas. Para tal, será utilizado um algoritmo de pós-processamento nas imagens originadas pelo *SC-Anom*, que elimina retas, anteriormente assinaladas. Tomando como exemplo a Figura 25 a, pode observar-se, em paralelo, com a fotografia original, qual a informação que pode ser eliminada da análise.

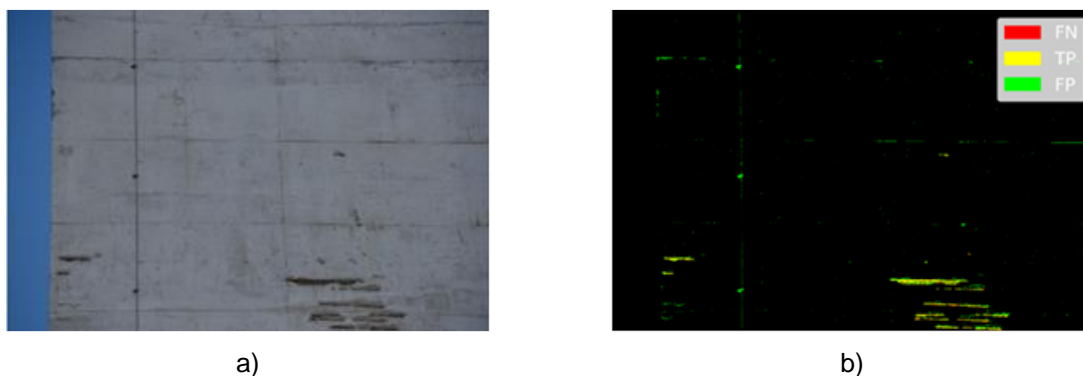
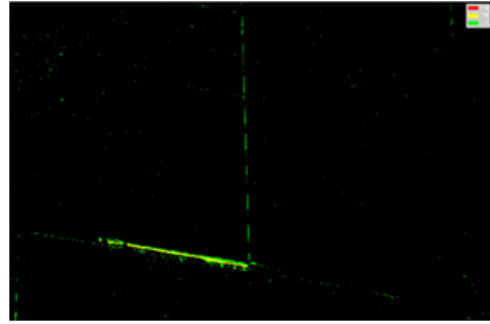


Figura 25 - a) painel 13 original; b) exemplo de resultado obtido após execução do *SC-Anom* do painel 13;



a)

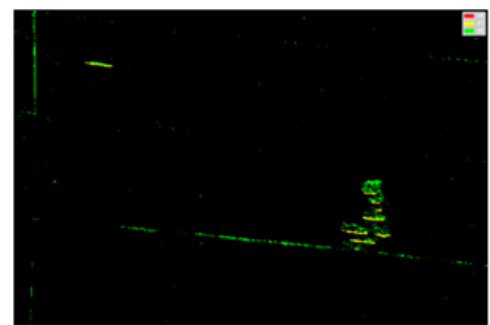


b)

Figura 26 - a) painel 22 original; b) exemplo de resultado obtido após execução do SC-Anom do painel 22;



a)



b)

Figura 27 - a) painel 33 original; b) exemplo de resultado obtido após execução do SC-Anom do painel 33;

Analisando as duas fotografias presentes na Figura 25 a 27, é possível verificar na a) a representação de linhas verticais e horizontais bem definidas, que por comparação, se observa que assinalam pixels onde está representada informação sobre as juntas entre painéis ou dos cabos de aço presentes na fachada do edifício. Estes pixels são assinalados devido à proximidade dos valores RGB que tomam com o centro RGB escolhido na análise da figura, neste caso, o centro da anomalia Armadura à Vista. De forma a contornar esta questão, é elaborada para cada painel uma máscara onde se assinalam os pixels, através de linhas retas que correspondem a cada junta entre painéis e aos cabos de aço. Esta informação é retirada às máscaras anteriormente obtidas, através de um processo de subtração de matrizes, garantindo-se sempre que as matrizes apenas tomam os valores 0 e 1. Ou seja, existem pixels, que anteriormente tomam o valor 1, que depois deste processamento terão valor 0. O resultado para os painéis teste 13, 22 e 33 da eliminação da informação das juntas entre painéis podem ser observados nas seguintes figuras:

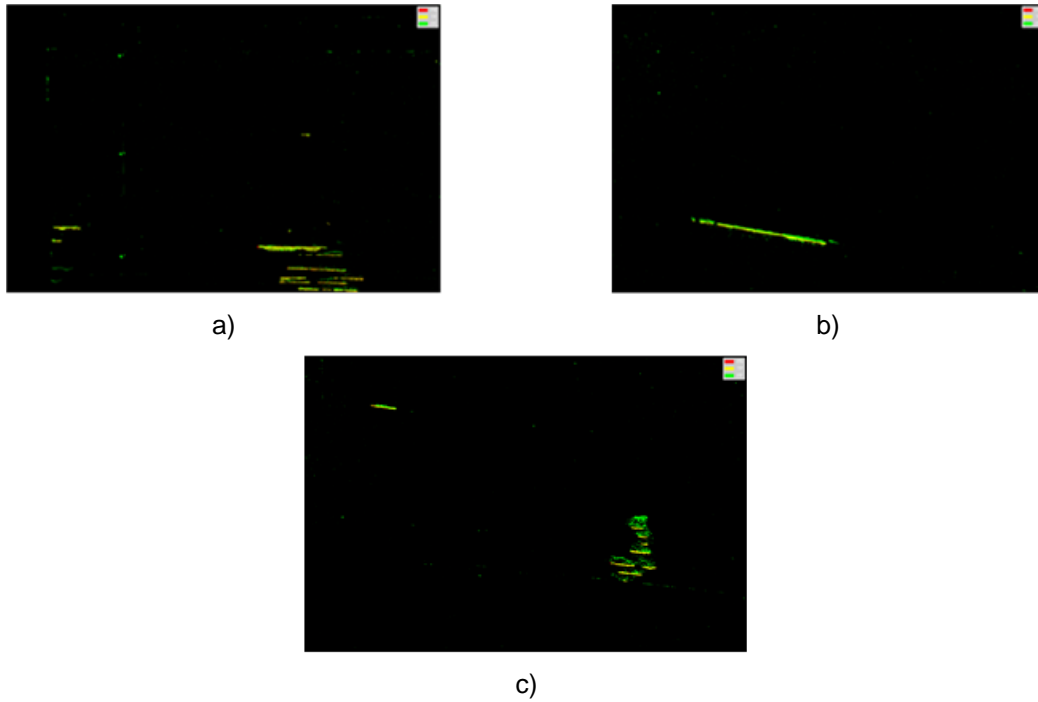
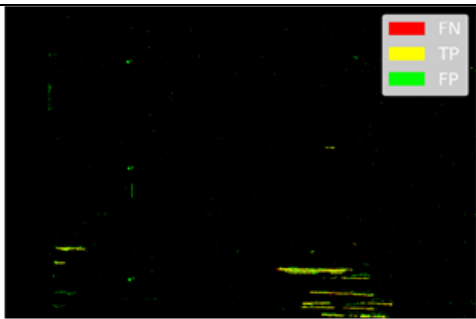
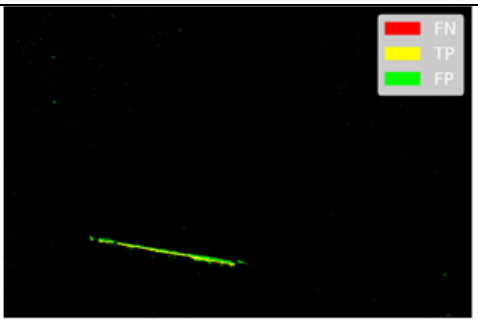
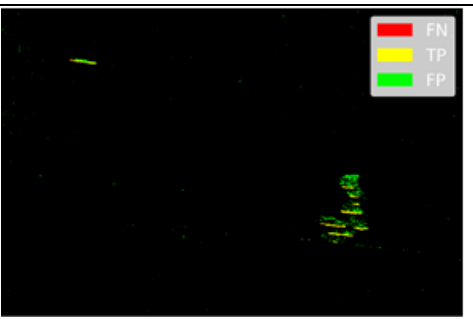
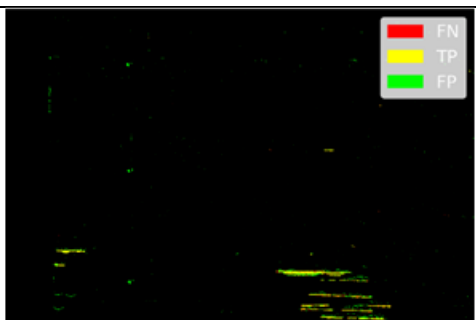
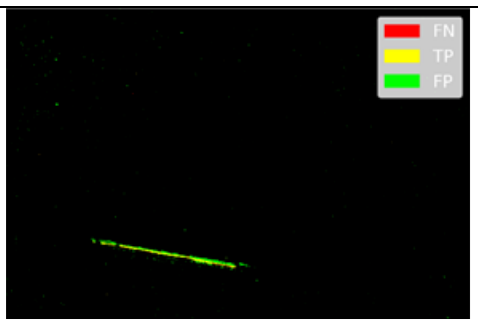
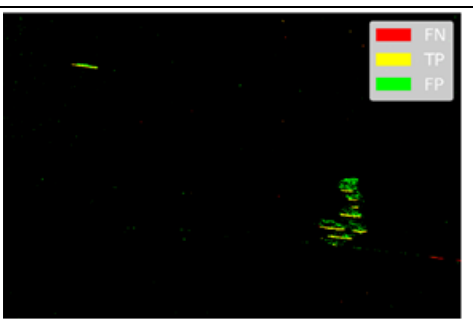


Figura 28 - Painéis após eliminação da informação das juntas entre painéis na avaliação da anomalia Armadura à Vista: a) Painel 13; b) Painel 22; c) Painel 33;

A partir deste momento, os resultados serão analisados tendo como termo de comparação as imagens obtidas através deste pós-processamento. De forma a validar a relevância deste passo, analisaram-se através do mapa de confusão, as máscaras realizadas para a anomalia armadura à vista e a soma das anomalias armadura à vista e indícios de corrosão. Os resultados obtidos apresentam-se nos gráficos presentes na Figura 29 e na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados obtidos após pós-processamento de eliminação de juntas para os casos em que se avalia apenas a anomalia Armadura à Vista e a Soma das anomalias Armadura à Vista e Indícios de corrosão;

	Painel 13	Painel 22	Painel 33
AV Centro RGB (AV):			
	FN:0,365x10⁻⁴ FP:0,75 TN:0,0997 TP:0,889 P:0,54 R:0,89 F1:0,67	FN:0,521x10⁻⁴ FP:1,86 TN:0,998 TP:0,959 P:0,34 R:0,96 F1:0,50	FN:0,85x10⁻⁴ FP:2,13 TN:0,997 TP:0,932 P:0,30 R:0,93 F1:0,46
AV + IC Centro RGB (AV):			
	FN:0,38x10⁻³ FP:0,736 TN:0,998 TP:0,884 P:0,55 R:0,88 F1:0,67	FN:0,58x10⁻⁴ FP:1,83 TN:0,998 TP:0,96 P:0,34 R:0,96 F1:0,50	FN:0,242x10⁻³ FP:1,822 TN:0,997 TP:0,832 P:0,31 R:0,83 F1:0,46

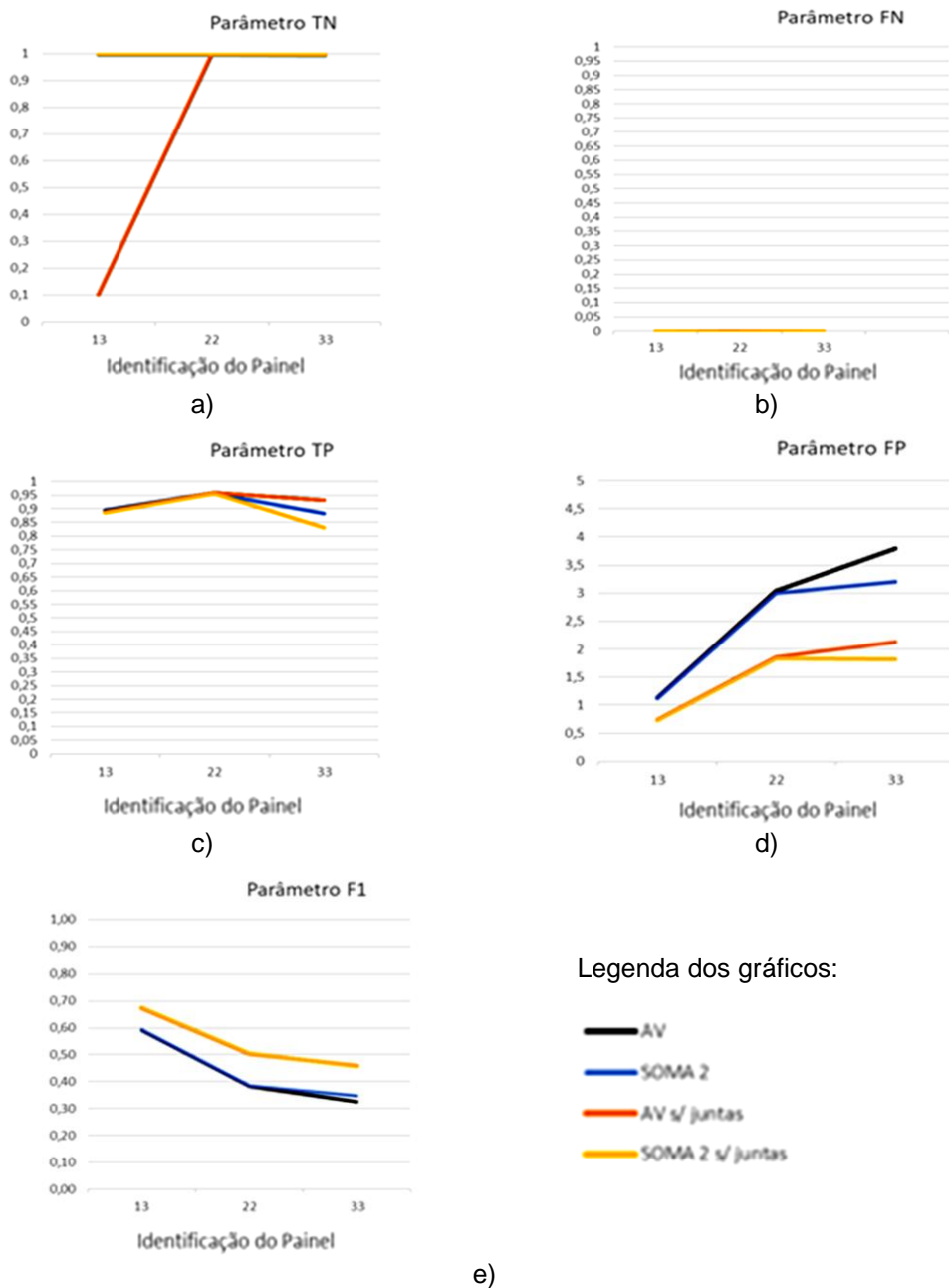


Figura 29 - Gráfico que demonstra os resultados do parâmetro F1 para a análise dos resultados anteriormente obtidos após pós-processamento – eliminação de juntas entre painéis: a) Identificações Verdadeiras Positivas; b) identificações Falsas Negativas; c) identificações Verdadeiras Positivas; d) identificações Falsas Positivas; e) parâmetro F1;

Constata-se nos resultados que a remoção das juntas na fase de pós-processamento acarreta vantagens significativas para a análise, uma vez que os valores dos parâmetros Verdadeiros Positivos e Verdadeiros Negativos se aproximam mais de 100% e os valores do parâmetro Falsos Positivos se apresentam com valores inferiores aos anteriormente obtidos. Todos estes fatores contribuem para um aumento observável no valor do fator F1, em relação aos anteriormente registados.

4.4.4. Análise de Resultados do pós-processamento

A metodologia apresentada procura ajustar o estudo das anomalias presentes na fachada de um edifício de betão armado à vista através de fotografias de alta-resolução retiradas ao pano da fachada. Desta forma desenvolveu-se um processo que passa pela análise inicial das fotografias para posterior comparação com os resultados, execução do clustering, aplicação do método *SC-Anom* e posterior avaliação dos resultados.

4.4.4.1. Localização das zonas críticas

Em primeiro lugar, foi efetuada a observação crítica das fotografias, que permitiu conhecer as condições em que a fachada se encontrava quando fotografada. Este passo permite compreender quais as zonas críticas do caso estudado, assim como que tipo de anomalias que as tornam críticas. Para além deste primeiro passo, foram analisadas as características físicas que distinguem estas anomalias de forma a ser possível distingui-las no processamento subsequente. Concluiu-se que a característica principal que as define é a cor que cada pixel da imagem admite/assume. A informação sobre a cor é obtida através do código RGB de cada pixel.

Relativamente ao processo de identificação das zonas críticas, apresentado no subcapítulo 3.2, os resultados demonstram que o número de zonas críticas identificadas manualmente, isto é, com recurso a uma inspeção visual direta das fotografias é, em média, de 2,83 zonas críticas por fotografia. Este indicador revela uma presença elevada de anomalias ao longo de todos os painéis que constituem a fachada.

4.4.4.2. Mapeamento das Anomalias

Após o estudo inicial da presença de anomalias, procedeu-se à execução do clustering e utilização do método *SC-Anom*. À medida que se foram obtendo resultados, estes foram ajustados ao longo de um estudo que teve por base uma amostra de 3 imagens escolhidas, os painéis-teste, de entre as 48 fotografias obtidas e se desenrolou em três fases.

Na primeira fase, os inputs do processamento foram os diferentes centros RGB e *threshold* definidos para cada anomalia. Através da comparação com a *Ground Truth*, desenvolvida para cada anomalia, foram obtidos os dados apresentados na Tabela 5. É possível verificar que só são apresentados os resultados referentes a duas de entre seis anomalias possíveis, o que se deve ao facto das restantes anomalias, no decorrer da análise, não apresentarem resultados conclusivos. Tal acontece porque os códigos RGB são semelhantes ao código RGB que define a superfície de betão à vista ou porque as anomalias têm uma presença muito pequena nas imagens analisadas, quando comparada com as restantes. As duas anomalias apresentadas são Armadura à Vista e Indícios de Corrosão. Através da observação das fotografias, conclui-se que a anomalia Armadura à Vista se apresenta recorrentemente ao longo da fachada, o que revela que a corrosão da própria armadura está presente, uma vez que como consequência deste mecanismo de degradação surgem as anomalias a Armadura à Vista e Indícios de corrosão. Desta forma, pode-se suspeitar que exista corrosão da armadura ao longo da fachada do edifício, mesmo quando não se observam os varões expostos. Torna-se assim essencial o estudo da identificação de vestígios de corrosão, uma vez que este pode ajudar a prever quais as zonas

concretas com maior probabilidade de existência de corrosão da armadura e eventual delaminação do betão.

Nos gráficos da Figura 22, observam-se os resultados obtidos para a análise das duas anomalias atrás referidas. No que toca à identificação de Armadura à Vista, o painel 13 é o caso em que se observam melhores resultados. O número de pixéis identificados como negativos, quer falsos ou verdadeiros, é baixo, o que, acompanhado de uma elevada percentagem de identificação de pixéis positivos, permite chegar a um valor de eficácia superior a 50%. Visualmente, resulta numa identificação quase perfeita das anomalias identificadas naquela fotografia. Nos restantes painéis, não surgem valores tão relevantes, principalmente porque a identificação de pixéis com valor negativo aumenta, o que resulta na diminuição do valor da eficácia da análise nos restantes painéis, apesar dos outros parâmetros se manterem na ordem de valores do caso do painel 13.

No que toca à avaliação da anomalia Indícios de corrosão, na primeira fase do estudo, observamos em todos os casos que o procedimento não é tão eficaz. Nos gráficos da Figura 22, é identificada uma percentagem de pixéis com valor negativo muito superior à percentagem de identificações positivas. Verifica-se que tal acontece uma vez que não foram considerados, na execução da *Ground Truth*, os pixéis que rodeiam a Armadura à Vista. Na Figura 30, em torno da Armadura à Vista existe corrosão observável da Armadura, no entanto a anomalia denominada por Indícios de corrosão foi considerada com um intuito diferente. Por isso, quando se elaboraram as *Ground Truth* de todas as fotografias, os produtos de corrosão da Armadura existentes em torno dos varões expostos não foram considerados.



Figura 30 - Armadura à Vista e respetivos produtos de corrosão;

Numa segunda instância, o estudo das fotografias foi comparado com a soma das *Ground Truth* das duas anomalias estudadas. Concebeu-se esta análise com o intuito de compreender se a união das anomalias Armadura à Vista e Indícios de corrosão numa só análise teria um impacto positivo ou não. Foi comparado o ficheiro – soma das duas *Ground Truth* – com o ficheiro originado pelo processamento do *SC-Anom*, utilizando o centro RGB e o *threshold* da anomalia Armadura à Vista. Foi selecionada esta anomalia e não os Indícios de corrosão, devido à proximidade dos centros RGB das duas e porque se observou no passo anterior que alguns pixéis assinalados como falsos positivos correspondem a pixéis onde existem indícios de corrosão. Nos gráficos da Figura 23, pode observar-se que os resultados desta análise em comparação com a anterior, não apresentam uma melhoria de resultados. As únicas variações dos resultados observáveis apresentam-se no painel 33. Estas acontecem através de uma ligeira diminuição de identificação de pixéis falsos positivos, a qual é prejudicada por uma diminuição de identificações verdadeira positivas, fazendo com que não exista variação significativa no valor de F1. Nesta fase da análise, concluiu-se que existem dois fatores que não permitem que a eficácia da análise seja superior:

- A Identificação de conjuntos de pixéis que, dada a geometria linear, se conclui pertencerem às juntas entre painéis. As juntas são assinaladas devido à sua cor escura (próxima do centro RGB da anomalia Armadura à Vista), conferida pelo relevo e sombras que surgem nessas secções;
- A Identificação de pixéis, que inicialmente se considerava corresponderem a produtos de corrosão das armaduras que se apresentavam junto da Armadura à Vista, mas nesta análise se pondera a possibilidade de apenas corresponderem a zonas de sombra originadas pelo processo que expõe os varões de armadura. O processo que inclui o destacamento do betão que provoca a exposição dos varões origina uma textura no betão que pode explicar essas zonas de sombra.

Numa última fase de utilização do método *SC-Anom*, os inputs tiveram por base um pensamento semelhante ao anterior. Desta vez adicionou-se, à soma de *Ground Truth* efetuada anteriormente, a *Ground Truth* que corresponde à anomalia desagregação. O objetivo deste passo foi de clarificar se os pixéis identificados em torno dos varões de Armadura à Vista correspondem a desagregação de betão, em vez de corresponderem a indícios de corrosão, como se pensava na análise anterior. Nesta análise, fizeram-se variar os inputs inseridos, explorando qual o impacto de considerar os centros RGB e o *threshold* das três anomalias separadamente: armadura à vista, desagregação do betão e indícios de corrosão. Através dos resultados apresentados pelos gráficos da Figura 24, é possível verificar que, independentemente do caso considerado, as alterações não se refletiram de forma positiva para o estudo. Esta conclusão foi retirada uma vez que, apesar do valor de pixéis identificados como falsos positivos diminuir abruptamente, as identificações de verdadeiros positivos diminuem também - em comparação com o primeiro caso analisado. Esta conclusão é evidente ao analisar-se a Figura 24 e), onde se apresenta a variação do parâmetro F1. Apesar de se observar uma subida do valor de F1 no painel 22, em comparação com os valores anteriormente obtidos para este parâmetro, nos outros painéis, F1 apresenta ainda um valor inferior ou próximo dos que foram obtidos nas análises anteriores.

No mesmo gráfico, é também possível comparar os valores desta fase do estudo e os resultados mais relevantes obtidos nas fases anteriores. A justificação para o aumento do parâmetro F1, no painel 22, deve-se ao facto do painel apresentar uma área elevada da anomalia armadura à vista enquanto que os restantes painéis têm uma representação insignificante. Ao somar as três GT, verifica-se que, realmente, o número de pixéis mal identificados em torno da anomalia armadura à vista diminui, fazendo com que existam menos identificações negativas. Apesar da relevância deste resultado, como a análise não se foca apenas sobre esta anomalia, mas na identificação de várias, caracterizadas de forma diferente, conclui-se que a análise não se deve realizar utilizando a soma da *Ground Truth* das três anomalias, pois os resultados obtidos nos parâmetros dos outros painéis, são piores.

Com a conclusão da última fase de obtenção de resultados do *SC-Anom*, é possível avaliar que tipo de análise se aproxima mais da realidade. A comparação dos resultados obtidos através das diferentes metodologias, e as conclusões retiradas com base na sua análise, que é a primeira análise efetuada que mais se aproxima da representação da realidade. De facto, a primeira análise, através do estudo das imagens de acordo com o código RGB referente à cor representativa de cada anomalia, permite

alcançar clareza nos resultados obtidos e o isolamento de cada anomalia em relação às demais. Esse processo origina uma identificação clara das zonas condicionantes, de acordo com cada problema, e em cada painel.

O recurso ao método *SC-Anom*, apenas consegue atingir objetivos satisfatórios para os casos de análise das anomalias Armadura à Vista, Indícios de Corrosão e Desagregação. Em relação às restantes, a anomalia Delaminação apenas é representada uma vez, não apresentando uma amostra suficiente para se ajustar o processamento. Mesmo resultados obtidos através da análise desta anomalia, presente na Figura 31, não são positivos. A maioria da informação assinalada como anomalia pelo algoritmo, não corresponde à área de imagem afetada efetivamente por este problema, verificando-se que o programa confunde a informação de cor da própria superfície de betão à vista, devido às suas manchas, irregularidades e sombras, com a anomalia a detetar.

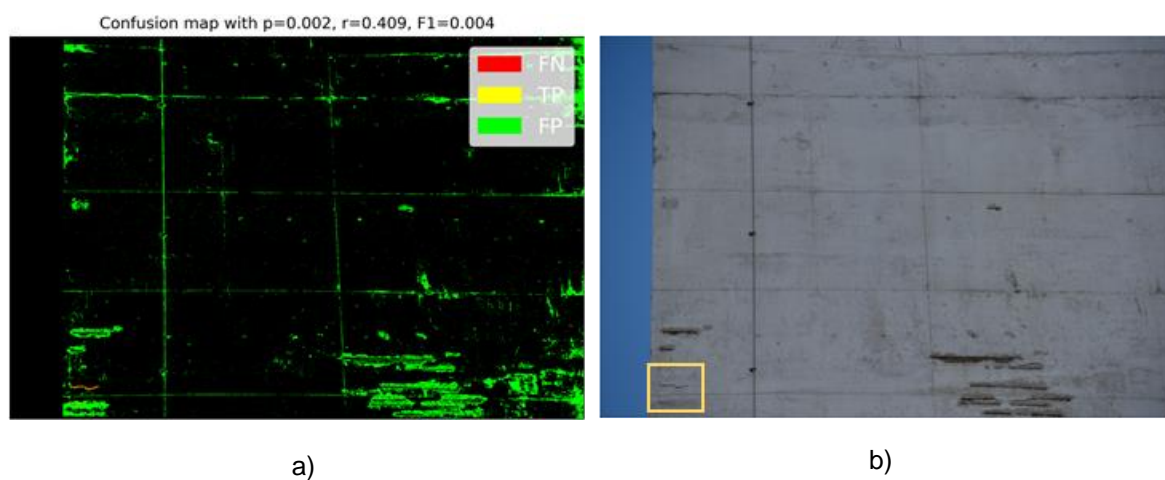


Figura 31 - Análise da Anomalia Delaminação: a) Resultado do processamento do *SC-anom*; b) Fotografia do painel 13 onde existe esta anomalia (assinalada pelo contorno amarelo);

A anomalia Colonização Biológica surge num caso em específico, tal como no caso da Delaminação. Na Figura 32, observa-se que devido à sua cor escura, o código RGB que define esta anomalia, faz com que o programa confunda a informação detetada com todos pixéis da imagem que apresentem este tom. Desta forma, são assinalados casos como as juntas entre painéis, relevo em zonas de desagregação de betão, varões à vista e cabos de aço presentes na fachada. À semelhança do que se analisou no caso da anomalia anterior, conclui-se que seriam necessários mais exemplos da presença desta anomalia para a mesma poder ser ajustada à realidade.

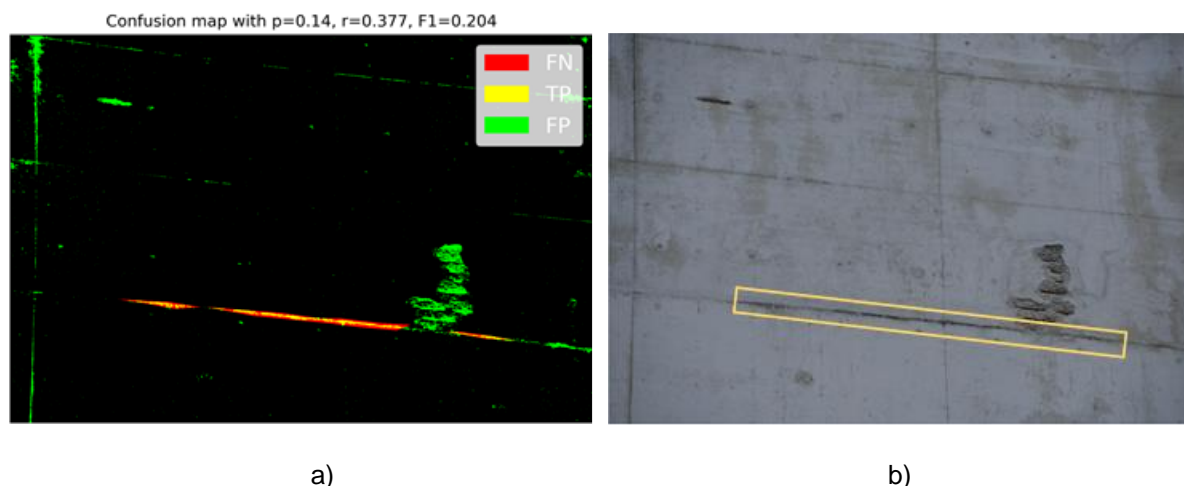


Figura 32 - Análise da Anomalia Colonização Biológica: a) Resultado do processamento do SuperCluster; b) Fotografia do painel 33 onde existe esta anomalia (assinalada pelo contorno amarelo);

Posteriormente a este estudo, iniciou-se o pós-processamento dos resultados. Esta fase centrou-se na eliminação de informação não relevante para o estudo, nomeadamente aquela que corresponde à identificação das juntas entre painéis e dos cabos de aço presentes na fachada do edifício. Após a execução deste pós-processamento, verificou-se, ao processar de novo o programa *SC-Anom*, que como esperado, os resultados melhoram. Na Figura 29 c), observa-se que o número de identificações Verdadeiras Positivas se mantém elevadas, no entanto as identificações falsas positivas diminuem significativamente. Tais valores permitem um aumento das identificações Verdadeiras em detrimento das identificações Falsas, o que resulta numa eficácia superior à obtida antes do pós-processamento.

4.4.5. Detecção de zonas críticas através do Mapeamento de Anomalias

Como referido anteriormente, um dos objetivos principais do trabalho é a identificação das zonas críticas através da análise de imagens que a compõem. Após o processamento do método *SC-Anom*, é possível iniciar o algoritmo que permite a identificação das zonas críticas. O input deste algoritmo é o ficheiro final do método proposto, que permite selecionar quais as zonas críticas, ou seja, as zonas com maior concentração de anomalias detetadas.

Uma vez que os ficheiros resultantes do método *SC-Anom*, permitem obter informações individuais sobre cada anomalia, e por essa razão, a identificação das regiões críticas através destes, leva à sinalização de zonas por anomalia. Nas Figuras 32 a 34, apresentam-se os exemplos dos resultados do painel 13, 22 e 33.

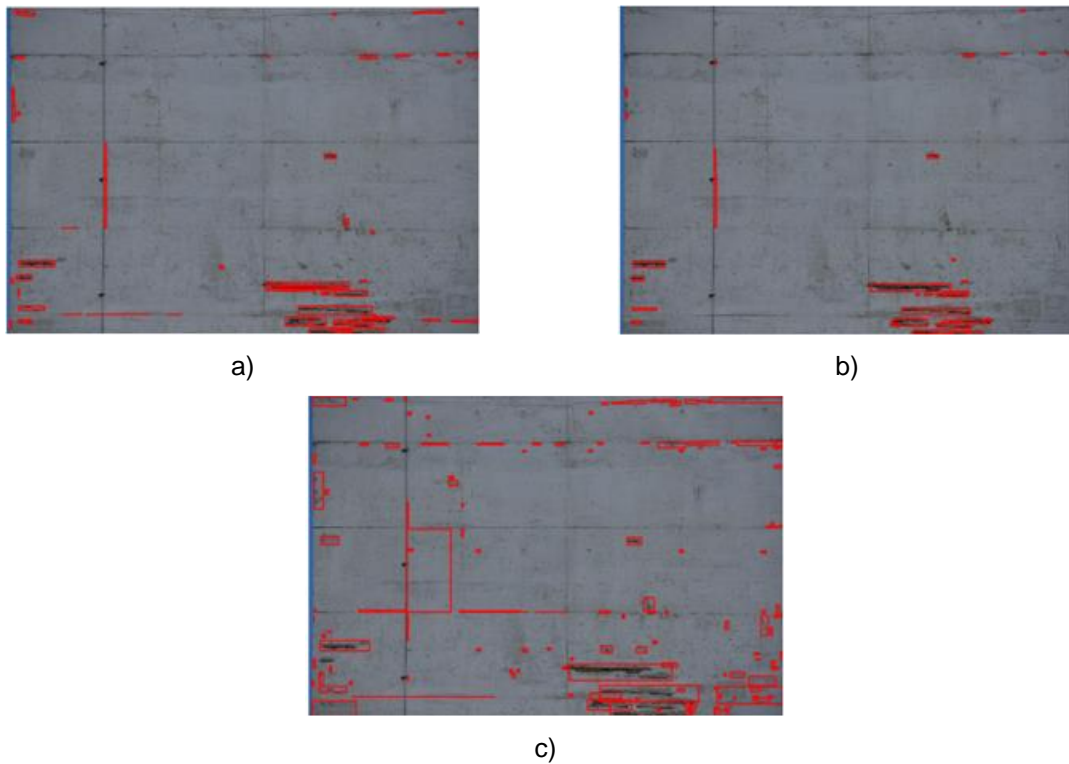


Figura 33 - Detecção de zonas críticas no painel 13: a) zonas com Armadura à Vista; b) zonas com desagregação de betão; c) zonas com indícios de corrosão.

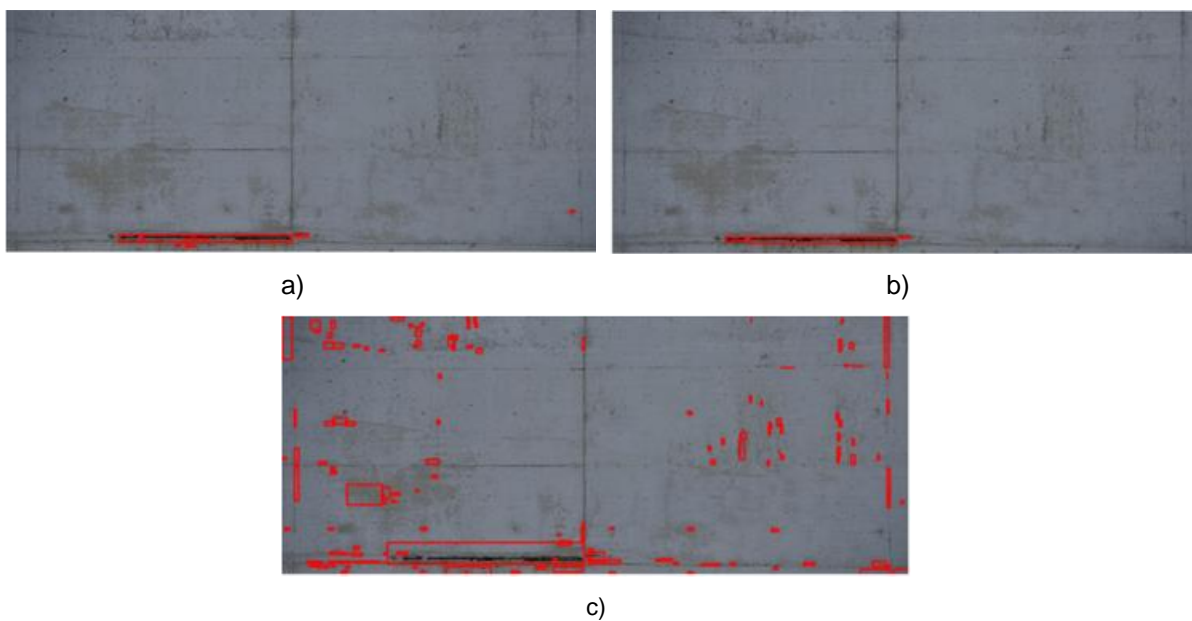


Figura 34 - Detecção de zonas críticas no painel 22: a) zonas com Armadura à Vista; b) zonas com desagregação de betão; c) zonas com indícios de corrosão.

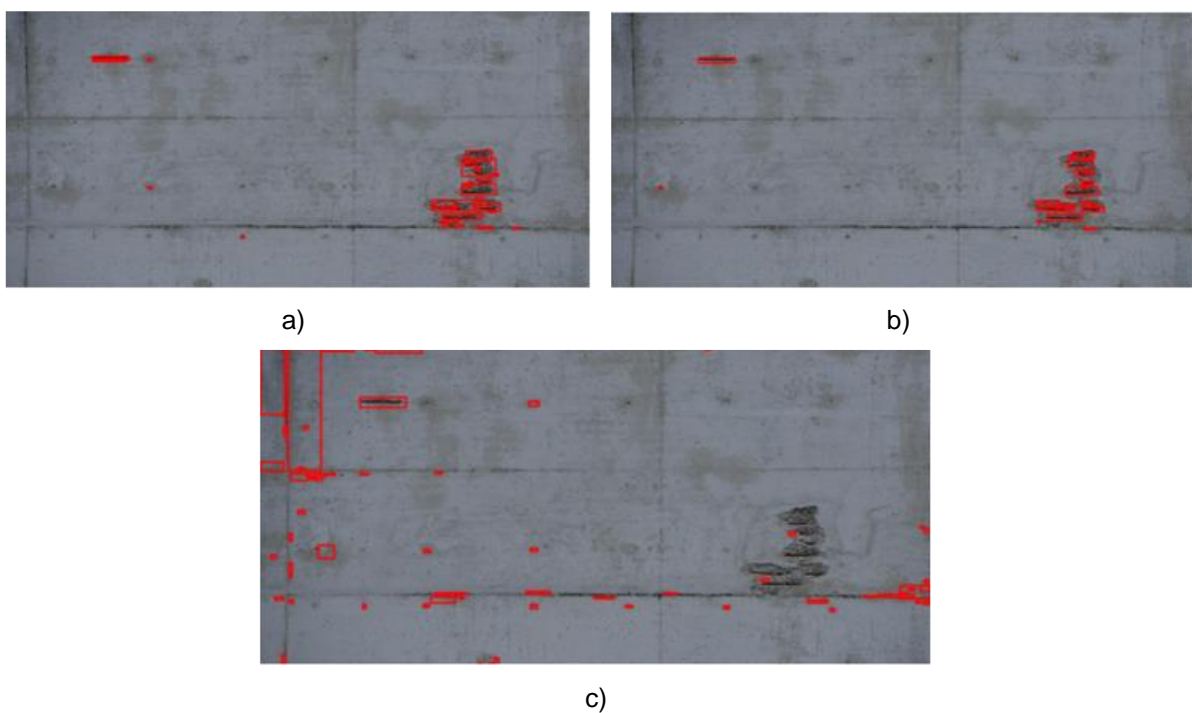


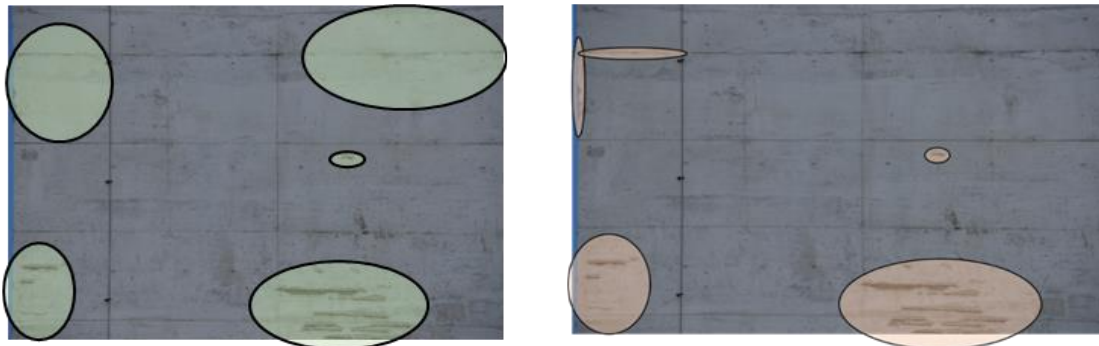
Figura 35 - Detecção de zonas críticas no painel 33: a) zonas com Armadura à Vista; b) zonas com desagregação de betão; c) zonas com indícios de corrosão.

4.4.6. Detecção de zonas críticas através da sua Localização

Posteriormente à deteção de zonas críticas conforme as anomalias detetadas, segue-se o processo de reunião das zonas críticas por imagem. Este processo permite obter os valores de zonas críticas detetadas por cada imagem, de uma forma global, sem se individualizar por anomalia.

Nas Figuras 33 a 35, observam-se três imagens, em cada figura, porque no referido painel apenas foram detetados três tipos de anomalias. Ao estudar a informação dada pelas Figuras 32 a 34, é possível obter a informação presente nas figuras 36 a), 37 a) e 38 a). Observa-se que são identificadas:

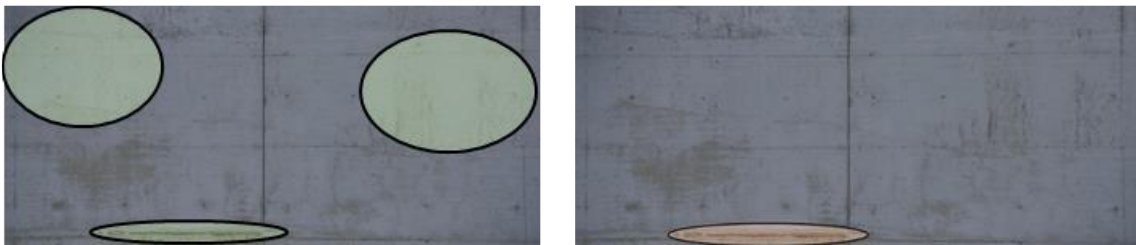
- no painel 13, 5 zonas críticas;
- no painel 22, 3 zonas críticas;
- no painel 22, 3 zonas críticas.



a)

b)

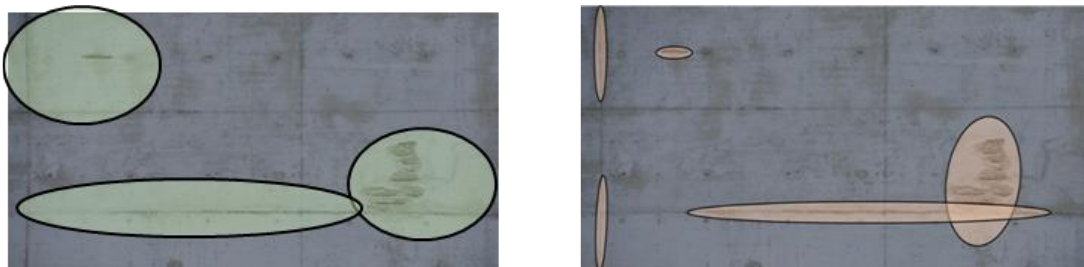
Figura 36 - Zonas críticas detetadas no painel 13: a) através do processamento; b) através de avaliação visual, considerada Ground Truth;



a)

b)

Figura 37 - Zonas críticas detetadas no painel 22: a) através do processamento; b) através de avaliação visual, considerada Ground Truth;



a)

b)

Figura 38 - Zonas críticas detetadas no painel 33: a) através do processamento; b) através de avaliação visual, considerada Ground Truth;

Com base na análise das figuras apresentadas, retira-se a seguinte informação:

- no painel 13, das 5 zonas críticas detetadas visualmente, todas são identificadas por este algoritmo, e adicionalmente, é assinalada uma zona com uma concentração grande de indícios de corrosão não assinalada anteriormente;
- no painel 22, foi detetada 1 zona crítica, assinalada pelo algoritmo, assim como mais duas, que devido à concentração de deteções de indícios de corrosão, foram assinaladas como zonas críticas pelo algoritmo;
- no painel 33, das 5 zonas críticas, todas foram detetadas, mas foram englobadas em apenas três zonas, embora de dimensão superior.

Como se pode observar, o método sendo eficaz e mais minucioso, identifica mais zonas críticas do que a inspeção visual (os valores obtidos na análise podem ser analisados no Anexo D).

4.5. Método Alternativo para Deteção de Armadura à Vista

Como foi explicado anteriormente, o objetivo inicial da execução do método de deteção de Armadura à Vista seria distinguir a deteção desta anomalia da anomalia Indícios de corrosão, devido à semelhança dos códigos RGB que as caracterizam.

Através da análise, verificou-se que a anomalia Armadura à Vista é caracterizada pelo código RGB que a identifica possuir sempre o valor de B superior a R, independentemente do pixel analisado. Tal não sucede quando selecionado um pixel em que apenas se observam indícios de corrosão.

4.5.1. Deteção das Anomalias e de Zonas Críticas

Desta forma, após execução do método *SC-Anom*, os pixéis identificados, quando se pretende analisar a anomalia Armadura à vista, permitem distinguir entre os pixéis assinalados quais correspondem a Armadura à Vista ou a Indícios de Corrosão. A aplicação do método permite obter os seguintes resultados presentes nas Figuras 39 a 41:

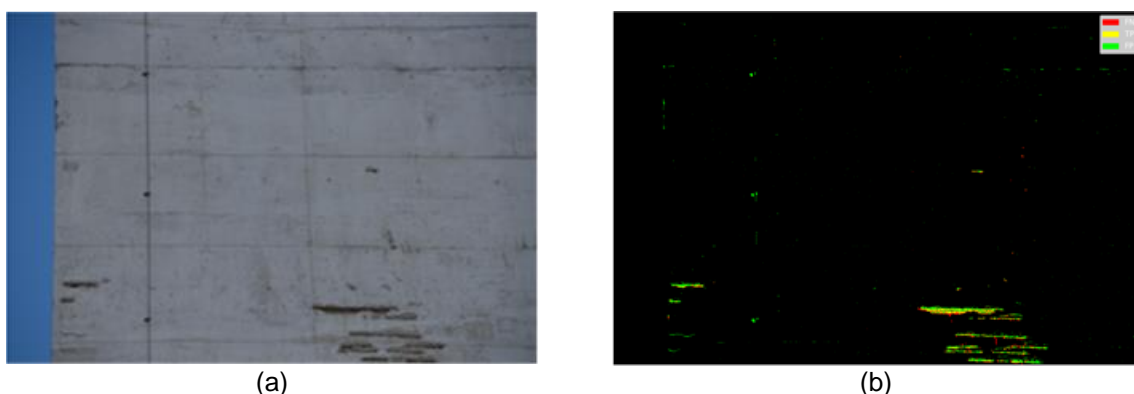


Figura 39 - Resultado da aplicação do método de deteção de Armadura à Vista no painel 13: a) fotografia original do painel 13 e b) resultado do método;

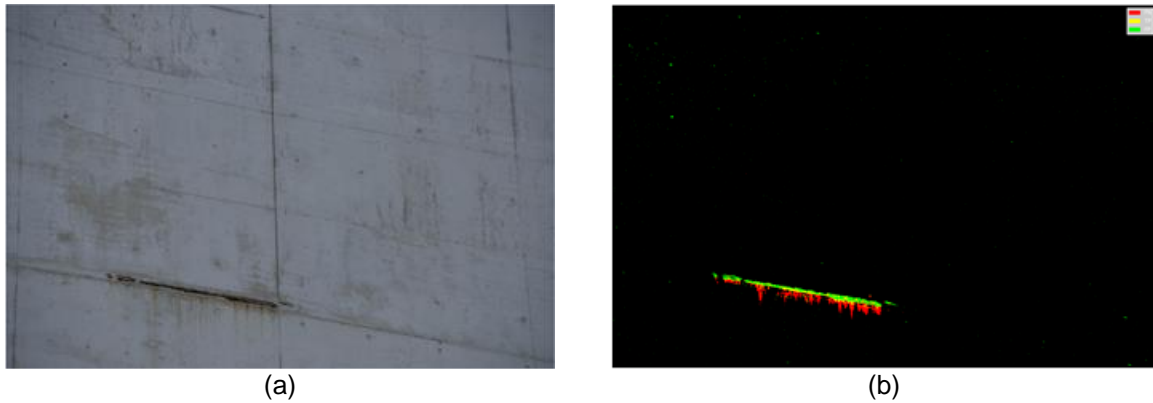


Figura 40 - Resultado da aplicação do método de deteção de Armadura à Vista no painel 22: a) fotografia original do painel 22 e b) resultado do método.



Figura 41 - Resultado da aplicação do método de deteção de Armadura à Vista no painel 33: a) fotografia original do painel 33 e b) resultado do método.

Pode observar-se o resultado proveniente do método Deteção de Armadura à Vista. No painel 33, é visível uma zona evidente de armadura com corrosão à vista identificada pelo algoritmo, com cor vermelha, indicando que é informação Falsa Positiva. Observa-se a identificação dos varões da armadura à vista, a amarelo, como informação verdadeira positiva, sendo que as zonas circundantes são assinaladas com as outras cores correspondentes a indicação de informação Falsa. Este resultado comprova que o método distingue os produtos de corrosão dos varões que se evidenciam em torno dos mesmos.

Por sua vez, no painel 22, pode observar-se apenas uma zona com armadura à vista de grande dimensão. Ao analisar a Figura 40, verifica-se que existem pequenos pontos (conjunto de pixéis) assinalados no resultado do método Deteção de Armadura à Vista, a verde, os quais não correspondem, contudo à zona onde existe armadura à vista. A identificação destes pixéis permite concluir que existem já indícios de corrosão que se apresentam isoladamente dos varões de armadura à vista que se encontram expostos. Passa-se assim a saber da existência de zonas problemáticas da fachada, em termos de início da corrosão da Armadura, anteriormente desconhecidas. De facto, o algoritmo, ao assinalar os pixéis aos quais correspondem os indícios de corrosão, permite detetar onde se localizam estas zonas. Conforme a densidade dos pontos detetados desta anomalia, é possível retirar conclusões sobre a probabilidade de existência de corrosão da armadura, mesmo sem a mesma estar visível a olho nu.

4.6. Aplicação na totalidade dos 48 painéis

Após a execução do procedimento proposto pela metodologia adotada nos três painéis-teste escolhidos, o método foi aplicado a todos os painéis que constituem a fachada.

4.6.1. Localização das zonas críticas

Inicialmente procurou-se estimar a eficácia da aplicação do método de deteção de zonas críticas. Ao executar o algoritmo nos quarenta e oito painéis, é possível obter a informação presente na figura 42.

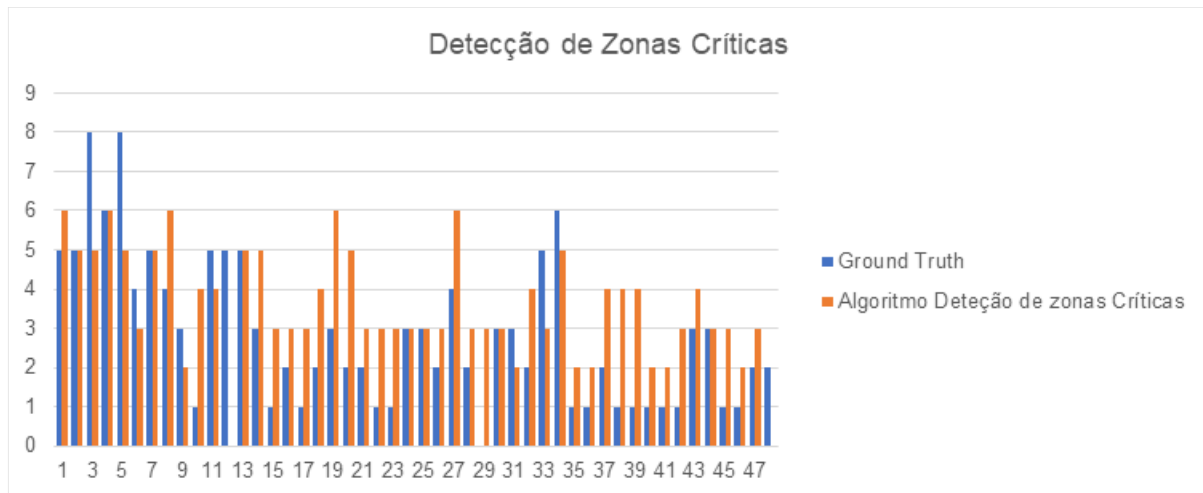


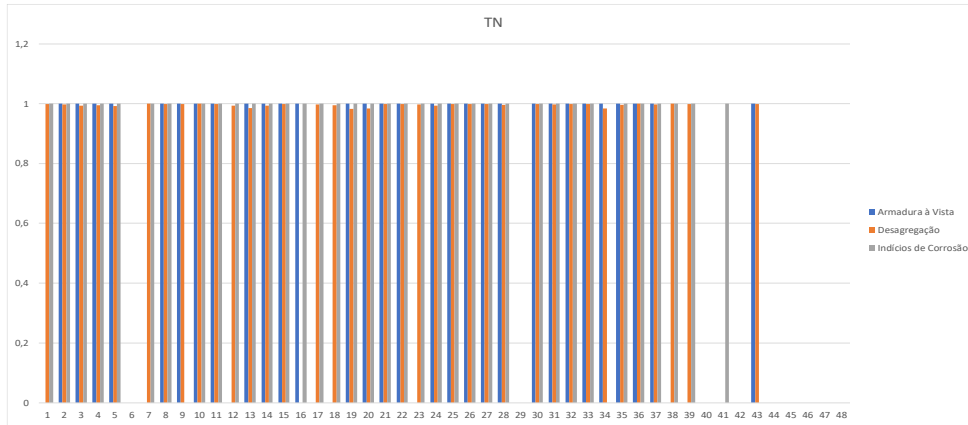
Figura 42 - Zonas críticas detetadas por painel mediante o tipo de análise realizado;

O gráfico é obtido através da tabela do anexo D, permite concluir que através do método de deteção de zonas críticas, se obtém uma deteção superior relativamente à executada com recurso à Ground Truth, determinada pelo utilizador. Estes dados permitem concluir que o método:

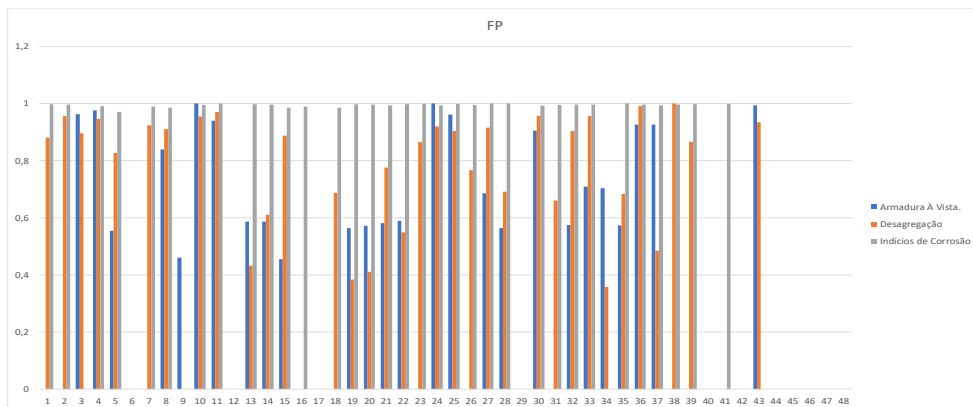
- Nalguns casos é mais rigoroso, determinando algumas zonas críticas não detetadas pelo utilizador;
- Noutros casos, deteta anomalias em locais que não são críticos;
- Deteta as mesmas regiões críticas com uma subdivisão superior à considerada quando as Ground Truth foram executadas.

4.6.2. Mapeamento de anomalias

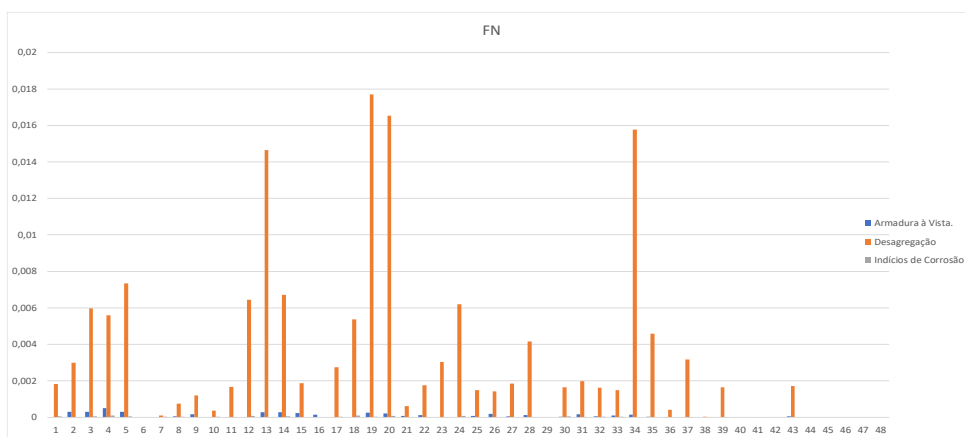
O mapeamento das anomalias Armadura à Vista, Desagregação de Betão e Índícios de Corrosão foi estudado através do método de avaliação de mapa de resultados utilizado após execução do *SC-Anom*. Devido à aplicação deste método, foram obtidos os diferentes parâmetros: TN, FP, FN, TP e F1. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 43 que se segue assim como na tabela presente no Anexo E.



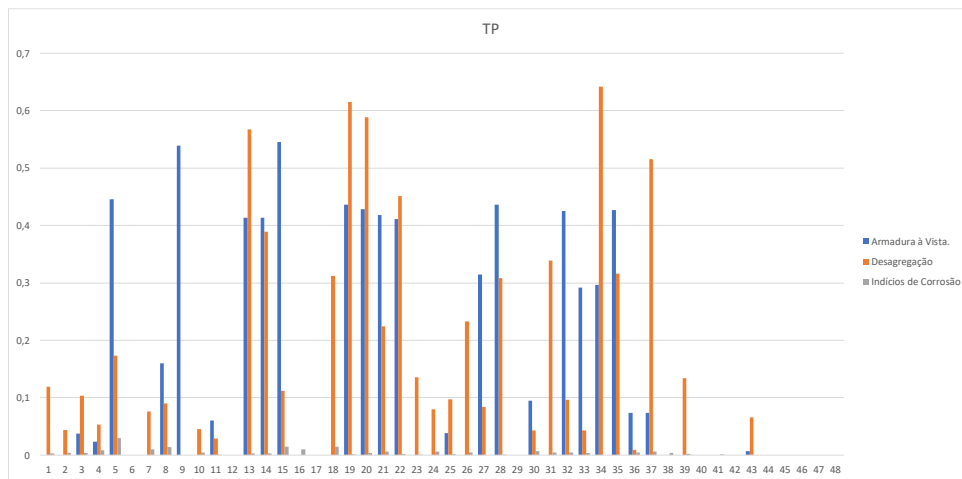
a)



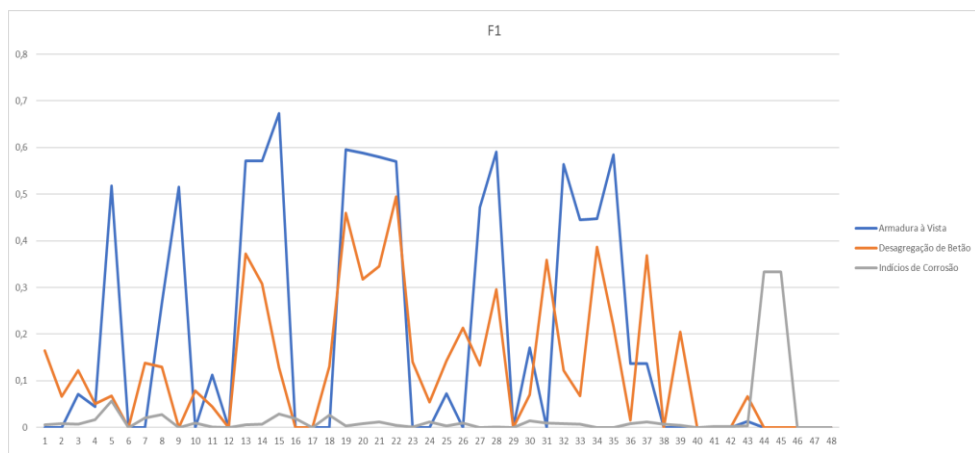
b)



c)



d)



e)

Figura 43 - Resultados obtidos na análise de todos painéis constituintes do mosaico ortoretificado da fachada: a) identificações Verdadeiras Negativas; b) identificações Falsas Positivas; c) Identificações Falsas Negativas; d) Identificações Verdadeiras Positivas; e) Parâmetro F1.

Os resultados para os 48 painéis coincidem com as conclusões retiradas anteriormente através de análise de uma amostra limitada, uma vez que:

- Para todos os painéis, o valor assumido pelo parâmetro TN é próximo de 100% na deteção de todas anomalias; conclui-se que a maior parte da informação considerada falsa, é assim identificada tanto pelo método como pelo utilizador. Com estes resultados pode afirmar-se que o algoritmo identifica corretamente as zonas que não incluem qualquer anomalia.
- O parâmetro FP assume valores muito elevados para todas as anomalias, enquanto que FN, assinala valores próximos de 0%, exceto no caso da anomalia Desagregação. Estes resultados devem-se à existência de zonas de confusão que o algoritmo deteta e identifica.
- As identificações TP são mais baixas do que se ambicionava, no entanto, em conjunto com os outros parâmetros, permitem conclusões positivas, nomeadamente no caso da Anomalia Armadura à Vista e Desagregação.
- O parâmetro F1 apresenta uma variação ao longo de todos os painéis, conforme as anomalias. A anomalia Armadura à Vista é, como se esperava, o caso que atingiu melhores resultados em termos de eficácia. No entanto, também a anomalia Desagregação apresenta bons resultados, sendo que em média a eficácia se aproxima de 50%.

5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

No presente capítulo apresentam-se as principais conclusões retiradas ao longo do trabalho realizado assim como propostas de desenvolvimentos futuros relevantes para a continuação do estudo.

5.1. Conclusões

Neste trabalho foram propostos dois métodos, desenvolvidos com base na classificação automática de imagem, para localizar e mapear anomalias em superfícies de betão à vista. O método *SA-Anom* foi desenvolvido para qualquer tipo de anomalia pré-definida, e um método alternativo foi desenvolvido especificamente para a deteção de armaduras à vista. Os resultados foram avaliados através da comparação com mapas de *Ground Truth* das anomalias, obtidos por inspeções detalhadas das imagens e assumidos como referência. Este procedimento foi aplicado e validado na fachada oeste da torre do Pavilhão do Conhecimento, um edifício de betão à vista localizado em Lisboa.

Uma primeira inspeção visual da fachada e das imagens adquiridas permitiu identificar seis anomalias, nomeadamente: Armadura à Vista; Desagregação do Betão; Indícios de Corrosão; Delaminação do Betão, Colonização Biológica e Argamassa de Reparação.

No geral, ambos os métodos propostos permitem a localização de zonas críticas, isto é., com anomalias, em superfície de betão à vista. A identificação e mapeamento dessas mesmas anomalias, ao nível do pixel, é mais difícil de atingir, existindo confusão na identificação das anomalias quando estas apresentam características de cor semelhante e se encontram fisicamente próximas ou, então raras vezes, sobrepostas. Nesses casos, é conveniente fazer a classificação simultânea das várias anomalias com características semelhantes.

Nos parágrafos seguintes são apresentadas as conclusões associadas aos objetivos específicos definidos.

As conclusões retiradas em função dos objetivos específicos propostos são os seguintes:

- **Localização de zonas com anomalias nas superfícies de betão analisadas:**

A localização de zonas críticas em superfícies de betão revelou-se um processo expedito e simples, após aplicação de qualquer um dos métodos explorados. Em termos de inspeção da estrutura, concluiu-se que todos os métodos estudados são eficazes na identificação de todas as zonas críticas, cumprindo assim o objetivo mais relevante da análise. Em particular, o método *SC-Anom*, uma vez que se baseia num processo de localização das zonas críticas ao nível do pixel, em termos macro, permite obter informações de mapeamento muito rigorosas, como se pode observar na tabela presente no Anexo D. De facto, na maioria dos casos, a identificação de zonas críticas pelo método *SC-Anom* é igual ou superior à identificação realizada ao executar a *Ground Truth*. Pode concluir-se assim que resulta numa análise mais conservativa quando comparada com a inspeção visual.

- **Identificação das diferentes anomalias e mapeamento das anomalias, ao nível do pixel, presentes na superfície de betão analisada:**

Inicialmente, a análise começou pela deteção do código RGB e valor do *threshold* mais ajustado para cada anomalia detetada. Perante os resultados do algoritmo aplicado à amostra de anomalias, concluiu-se que:

- As anomalias Delaminação e Colonização Biológica não permitem retirar conclusões, uma vez que apenas surgem representadas uma vez, o que se reflete numa amostra insuficiente.

- As restantes anomalias estão presentes em quase todos os painéis. No entanto, as anomalias mais críticas, isto é, mais presentes e com maiores dimensões, são Indícios de Corrosão, Armadura à Vista e Desagregação de Betão.

Foram considerados como Indícios de Corrosão todos os vestígios de corrosão que se possam apresentar, ao longo dos painéis de betão armado, quer em zonas porosas do betão, quer em perfurações feitas posteriormente à construção do edifício. Devido às pequenas dimensões das áreas dos indícios detetados, considerou-se que, quanto maior a sua densidade, maior a probabilidade de existência de corrosão das armaduras. Contudo a anomalia Indícios de Corrosão é detetada com eficácia sobretudo no caso de Armadura à Vista que apresente corrosão, ou seja, não foi possível detetar com este método casos de Indícios de Corrosão que permitam detetar corrosão de armadura sem que esta anomalia já esteja, ela mesma, visível.

Não foi possível identificar com o método proposto a anomalia Desagregação de Betão. Este método não apresentou capacidade de identificar com clareza as zonas de desagregação. Ao analisar os painéis e o código RGB representativo da anomalia, é possível verificar que a identificação e mapeamento desta se confunde com a identificação de manchas no betão devido à humidade, sombras, zonas de maior rugosidade da superfície, entre outros.

No caso da anomalia Armadura à Vista, foram propostos dois métodos: o método *SC-Anom* e o método de deteção de Armadura à Vista. O método *SC-Anom* permitiu mapear a Armadura à Vista com sucesso e de forma eficaz. Da avaliação dos resultados, é possível observar com clareza as zonas onde existe Armadura à Vista, e por essa mesma razão foi possível também assinalar as zonas críticas dos painéis. O método de Deteção de Armadura à Vista permitiu também identificar este tipo de anomalias, no entanto de uma forma diferente do método *SC-Anom*. Ao analisar os códigos RGB que definem as anomalias Armadura à Vista e Indícios de Corrosão, constatou-se que existe um padrão que os diferencia (os valores de B no código RGB da anomalia Armadura à Vista, são sempre superiores aos valores de R; enquanto que no caso dos Indícios de Corrosão, tal não se verifica). Esta constatação permite definir e desenvolver métodos expedidos e focados para identificar cada uma das anomalias. Contudo, nestes casos é necessária uma análise prévia do utilizador, de forma a otimizar a utilização de ferramentas de classificação de imagem disponíveis. Verificou-se que, considerando apenas a identificação de Armadura à Vista, este método permite fazer uma análise ainda mais rápida e eficaz. Nos resultados obtidos, pôde verificar-se que apesar dos valores de F1 não aumentarem em

comparação com os valores obtidos pelo algoritmo *SC-Anom*, os indicadores de identificações Verdadeiras Positivas são superiores quando se aplica o algoritmo de deteção de Armadura à Vista.

Na fase posterior do processamento, no sentido de ajustar os resultados aos dados analisados e à informação retirada aquando realizada inspeção visual, foram executadas mais duas alternativas de processamento, com o objetivo de se clarificar se existem problemas na identificação de cada anomalia individualmente. Para tal foram somadas as *Ground Truth* das anomalias: Armadura à Vista e Indícios de Corrosão; e as anomalias Armadura à Vista, Indícios de Corrosão e Desagregação, alternando-se os respetivos centros RGB e *threshold*. Verificou-se que esta análise não acrescentou valor aos resultados esperados, uma vez que também neste caso continua a existir alguma confusão na definição das fronteiras de cada anomalia. Conclui-se que mesmo com a aplicação deste método, o problema da identificação exata de cada anomalia não foi solucionado completamente.

Em conclusão, depois de aplicados e analisados os resultados de cada um dos métodos, é o processamento de imagens através do método *SC-Anom* que se revela mais útil na identificação, ao nível do pixel, dos vários tipos de anomalia em estudo. No entanto, é o algoritmo deteção de Armadura à Vista que apresenta maior eficácia, mas apenas para esta anomalia específica, sendo que permite a deteção da mesma sem originar problemas de identificação com as restantes. Como esta anomalia representa a maior amostra ao longo da fachada, o estudo mostrou-se ajustado para este caso.

A eficácia do método de localização das zonas críticas, ao nível do pixel, está também relacionada com os resultados obtidos pelo *SC-Anom* para o mapeamento de cada anomalia. Devido às zonas de sobreposição entre cada uma das anomalias, não é possível distingui-las com clareza. Tal resulta numa identificação de zonas críticas mais conservativa, mas redundante. Por outro lado, uma vez que a análise é feita a nível do pixel, os resultados obtidos são mais rigorosos, permitindo obter mais informação, embora carecendo de confirmação posterior, que com os resultados da análise visual.

5.2. Desenvolvimentos Futuros

A utilização da metodologia a que nos propusemos ao longo deste trabalho permitiu obter conclusões relevantes para o objeto de estudo, mas igualmente apontar pistas importantes que podem merecer seguimento futuro em outros projetos de investigação, nomeadamente:

- Explorar uma forma mais automática de se realizar a Ground Truth de uma amostra grande de imagens, visto que é um processo moroso, como forma de avaliação dos resultados;
- Estudo de um processamento baseado na textura das imagens aliada à cor, de modo a explorar os restantes resultados dos mecanismos de degradação do betão armado;
- Analisar mais casos de estudo, que apresentem amostras de anomalias superiores às apresentadas por este caso de estudo, de forma a tornar a metodologia abrangente a todos os tipos de anomalias que possam surgir;
- Adaptar o processamento à existência de anomalias correntes em superfícies constituídas por outros materiais.

6. Referências Bibliográficas

- Agostinho, S. L. (Setembro de 2012). Dissertação de Mestrado. *Inspeção e Monitorização de Estruturas em Engenharia Civil - Utilização de UAV na Inspeção e Monitorização*.
- Appleton, J. (2003). *Reabilitação de Edifícios Antigos - Patologias e Tecnologias de Intervenção*. Edições Orion.
- Branco, F., Ferreira, J., Correia, J. R. (s.d.). A evolução das Construções. Instituto Superior Técnico.
- Câmara Municipal de Lisboa. (s.d.). *Pavilhão do Conhecimento*. Obtido de <http://www.cm-lisboa.pt/equipamentos/equipamento/info/pavilhao-do-conhecimento-centro-ciencia-viva>
- Candeias, A. L., Banon, G. J. (1997). *Aplicação da morfologia matemática à análise de imagens de sensoriamento remoto*. Brasil: INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Coelho, L., Brito, J. N. (2007). *Fotogrametria Digital*. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Costa, A. (s.d.). Reabilitação e Reforço de Estruturas. Instituto Superior Técnico.
- Fischer, C., Kakoulli, J. (2013). Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: current research and potential applications. *Studies in Conservation*.
- Hemmler, M., Weritz F., Maierhofer, C.. (2005). Damage detection on buildings surfaces with multi-spectral techniques. Torino, Italy.
- Pereira, I., Carvalho, I., Machado, I. (2014). Aplicação de sensores fotogramétricos no monitoramento de patologias de estruturas civis. *Tempo-Técnica- Território*, 72-81.
- Valença, J., Dias-da-Costa, D., Júlio, E. Araújo, H. Costa, H.. (27 de July de 2012). Elsevier. *Automatic crack monitoring using photogrammetry and image processing*, pp. 433-441.
- Valença, J., Puente, I., Júlio, E., González-Jorge, H., Arias-Sánchez, P.. (2017). Assessment of cracks on concrete bridges using image processing supported by laser scanning survey. *Construction and Building Materials*, 668-678.
- Valença, J., (2011). *Monitorização do estado de conservação de estruturas de betão por processamento de imagem e análise multi-espectral*. Universidade de Coimbra.
- Valença, J., Júlio, E.. (2018). MCrack-Dam: the scale-up of a method to assess cracks on concrete dams by image processing. The case study of Itaipu Dam, at the Brazil-Paraguay border. *Civil Structural Health Monitoring*.
- Microsoft. (2015). *Image Composite Editor version 2.0.3*. Microsoft Research Computational Photographic Group. Obtido de https://www.microsoft.com/en-us/research/product/computational-photography_applications
- Mathworks (2018). Image Processing Toolbox: User's Guide (r2018b). Retrieved January 8, 2019 from <https://www.mathworks.com/help/images/index.html>

- Paul R. Wolf, B. A. (2000). *Elements of Photogrammetry - with applications in GIS*. United States of America: The McGraw-Hill Companies Inc.
- Pereira, L. Vale, C., Venceslau, R. (2017). Imagens Multiespectrais e termográficas aplicadas ao estudo de Património Arquitectónico. *Congresso de reabilitação do património*. Aveiro: Universidade de Aveiro.
- Temba, P. (2000). *Fundamentos de Fotogrametria*. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais.
- Valença J., Júlio, E. (2018). MCrack-Dam: the scale-up of a method to assess cracks on concrete dams by image processing. The case study of Itaipu Dam, at the Brazil-Paraguay border. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 857-866.
- Viva, Centro de Ciência. (s.d.). *Pavilhão do Conhecimento*. Obtido de Pavilhão do Conhecimento: <https://www.pavconhecimento.pt/conheca-nos/edificio/>
- Yue Z., Chen S. (2003). Computers and Geotechnics. *Finite element modeling of geomaterials using digital image processing*, pp. 375-397.

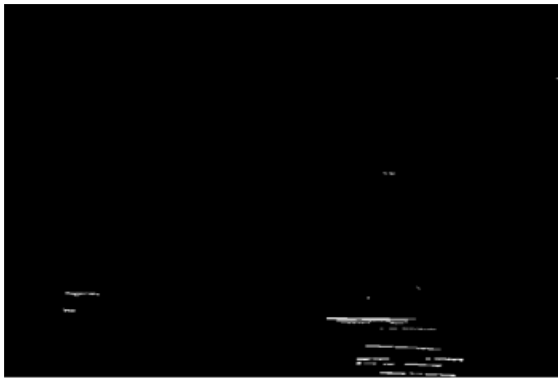
7. Anexos

Anexo A – Ground Truth das diversas anomalias para o painel 13



Armadura à Vista

Delaminação



Desagregação de Betão

Indícios de Corrosão

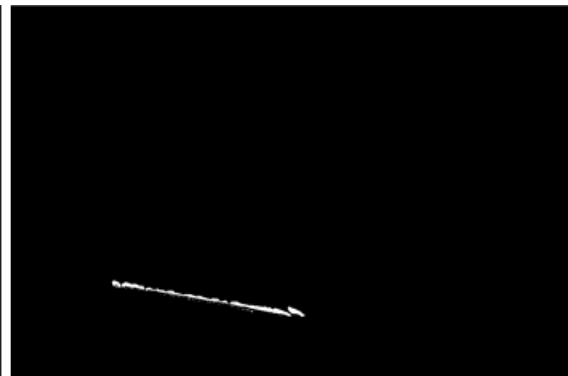
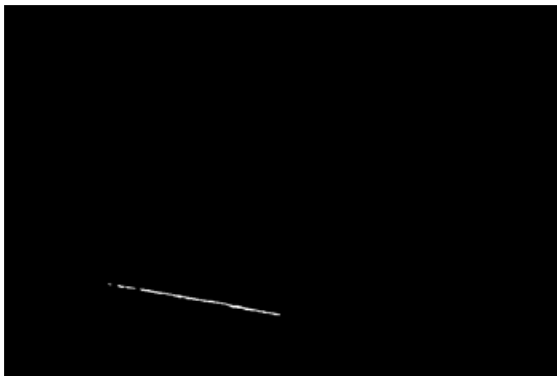


Anexo B – Ground Truth das diversas anomalias para o painel 22

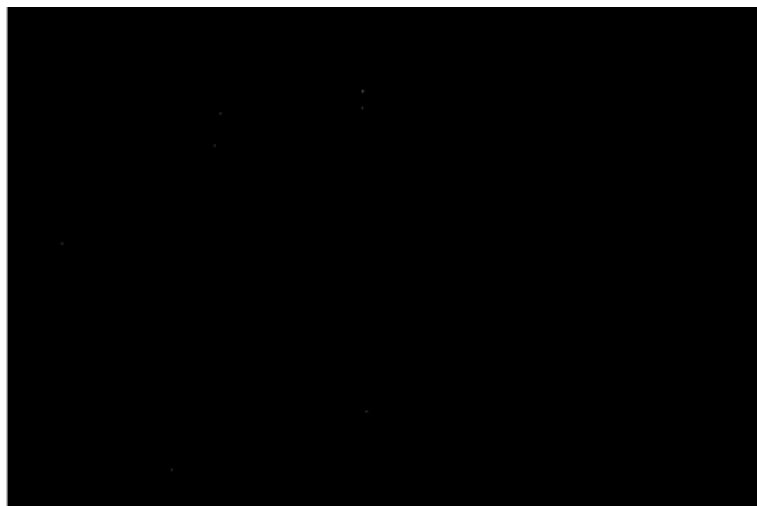


Armadura à Vista

Desagregação de Betão



Indícios de Corrosão

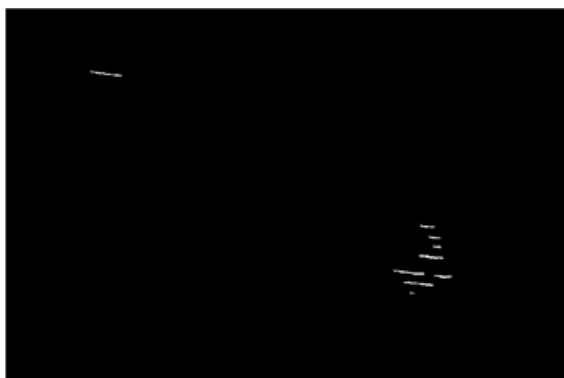


Anexo C – Ground Truth das diversas anomalias para o painel 33



Armadura à Vista

Colonização Biológica



Desagregação de Betão

Indícios de Corrosão



Anexo D – Identificação de Zonas Críticas

Painéis	Inspeção Visual	Script
1	5	6
2	5	5
3	8	5
4	6	6
5	8	5
6	4	3
7	5	5
8	4	6
9	3	2
10	1	4
11	5	4
12	5	0
13	5	5
14	3	5
15	1	3
16	2	3
17	1	3
18	2	4
19	3	6
20	2	5
21	2	3
22	1	3
23	1	3
24	3	3
25	3	3
26	2	3
27	4	6
28	2	3
29	0	3
30	3	3
31	3	2
32	2	4
33	5	3
34	6	5
35	1	2
36	1	2
37	2	4
38	1	4
39	1	4
40	1	2
41	1	2
42	1	3
43	3	4
44	3	3
45	1	3
46	1	2
47	2	3
48	2	0
Média	2,83	3,54

Anexo E – Resultados do algoritmo SC-Anom, para os 48 painéis

	Armadura à Vista							Desagregação							Indícios de Corrosão						
	Total P	Total N	tn	fp	fn	tp	f1	Total P	Total N	tn	fp	fn	tp	f1	Total P	Total N	tn	fp	fn	tp	f1
1	0	0					0	157605	27996006	0,998171	0,8807081	0,001829047	0,119291901	0,1652	157605	27996006	0,99995535	0,9973161	4,46492E-05	0,0026839	0,0069
2	0	32571720	0,999713	#DIV/0!	0,00028666	#DIV/0!	0,0445	324859	32246861	0,9970108	0,9559255	0,002989159	0,044074506	0,0657	324859	32246861	0,99998955	0,9961737	1,04506E-05	0,0038263	0,017
3	302216	29847174	0,999693	0,962268708	0,000306964	0,037731292	0,0707	301162	29848228	0,994022	0,8962585	0,005977976	0,103741508	0,1223	301162	29848228	0,99995035		4,96512E-05	0,0034666	0,056
4	595009	21858623	0,999499	0,976835645	0,000501267	0,023164355	0	121615	22332017	0,9944208	0,9471529	0,005579165	0,052847099	0,0509	121615	22332017	0,99990802	0,991284	9,19756E-05	0,008716	0
5	13767	12929943	0,999705	0,554005956	0,000295052	0,445994044	0,5177	24055	12919655	0,9926544	0,8266473	0,007345663	0,173352733	0,0677	24055	12919655	0,99995526	0,9705259	4,4738E-05	0,0294741	0,0198
6	0	0					#REF!	0	0					0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0,0278
7	0	0						106547	30146377	0,9998968	0,9240992	0,000103163	0,075900776	0,1374	106547	30146377	0,99996683	0,9898824	3,31715E-05	0,0101176	0
8	36350	33065770	0,999957	0,839889959	4,28842E-05	0,160110041	0	84548	33017572	0,9992449	0,9100274	0,000755083	0,08997256	0,1299	84548	33017572	0,99996196	0,9857123	3,80404E-05	0,0142877	0,0092
9	7002	23282819	0,999834	0,46101114	0,000165702	0,53898886	0,1121	0	23289821	0,9988077	#DIV/0!	0,001192281	#DIV/0!	0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0,0003837
10	37745	28648385	1	1	0	0	0,6731	96665	28589465	0,9996389	0,954482	0,000361112	0,045518026	0,079	96665	28589465	0,99997628	0,9953654	2,3715E-05	0,0046346	0
11	28966	26850524	0,999978	0,939411724	2,22342E-05	0,060588276	0	151093	26728397	0,9983406	0,9709649	0,001659396	0,029035098	0,0439	151093	26728397	0,99999817	0,9998081	1,83326E-06	0,0001919	0,0054
12	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		0	14011650	0,9935667	#DIV/0!	0,006433289	#DIV/0!	0	0	14011650	0,9999262	#DIV/0!	7,37957E-05	#DIV/0!	0,0065
13	232012	30532748	0,999726	0,586366222	0,000273706	0,413633778	0,5801	301376	30463384	0,9853447	0,4326954	0,014655299	0,567304629	0,3722	301376	30463384	0,99998424	0,9973024	1,57566E-05	0,0026976	0,0292
14	232012	30532748	0,999726	0,586366222	0,000273706	0,413633778	0,5705	196254	33176007	0,993283	0,611106	0,006716963	0,388893984	0,3081	196254	33176007	0,9999503	0,9967338	4,97046E-05	0,0032662	0,0194
15	104982	33267279	0,999764	0,454868454	0,000235787	0,545131546	0	83110	28545052	0,9981394	0,8879317	0,001860603	0,112068343	0,128	83110	28545052	0,99999352	0,9851522	6,48098E-06	0,0148478	0
16	0	28628162	0,999864	#DIV/0!	0,000136125	#DIV/0!	0	0	0					0	41817	28715952	0,99999666	0,9901954	3,34309E-06	0,0098046	0,0266
17	0	0					0	0	25040268	0,9972595	#DIV/0!	0,002740466	#DIV/0!	0	0	25040268	0,99997664	#DIV/0!	2,33624E-05	#DIV/0!	0,0032
18	0	0					0,4713	34859	22415821	0,9946263	0,6876273	0,00537366	0,312372701	0,131	34859	22415821	0,99989896	0,9856565	0,000101045	0,0143435	0,0075
19	267280	30773994	0,999739	0,563405418	0,000261	0,436594582	0,5912	508430	30532844	0,9822983	0,3843794	0,017701725	0,615620636	0,4596	508430	30532844	0,99996594	0,998401	3,40617E-05	0,001599	0,0115
20	230826	32373260	0,999797	0,571335118	0,000202945	0,428664882	0	251810	32352276	0,9834655	0,4111076	0,016534478	0,588892419	0,3172	251810	32352276	0,99993778	0,9962075	6,22213E-05	0,0037925	0,0044
21	101869	30302533	0,999921	0,581923843	7,85743E-05	0,418076157	0,1706	248123	30156279	0,999399	0,7759256	0,000601003	0,22407435	0,3455	248123	30156279	0,99999579	0,9942367	1,12139E-06	0,0057633	0,0007357
22	116526	30427122	0,999886	0,589001596	0,000114076	0,410998404	0,5638	142370	30401278	0,9982533	0,5490342	0,001746703	0,450965793	0,4945	142370	30401278	0,99999086	0,9977734	9,14435E-06	0,0022266	0,0111
23	0	0					0,4448	103094	26774236	0,9969733	0,864803	0,003026678	0,135197005	0,1407	103094	26774236	0,99999361	0,9996314	6,38674E-06	0,0003686	0,0031
24	22529	20427883	1	1	0	0	0,448	66604	20383808	0,9938104	0,9200198	0,006189619	0,079980181	0,0538	66604	20383808	0,99991822	0,9942646	8,17806E-05	0,0057354	0,0088
25	302845	29456571	0,999919	0,96210933	8,13061E-05	0,03789067		168676	29590740	0,998514	0,9031338	0,001486039	0,096866181	0,1427	168676	29590740	0,99998736	0,9984645	1,26391E-05	0,0015355	0
26	0	33207076	0,99981	#DIV/0!	0,000190471	#DIV/0!		49021	33158055	0,998582	0,7668958	0,001418026	0,23310418	0,2127	49021	33158055	0,99999729	0,9955529	2,71427E-06	0,0044471	0,0004586
27	62377	27314023	0,999956	0,685685429	4,42264E-05	0,314314571	0,1368	282828	27093572	0,9981471	0,9160126	0,001852949	0,083987441	0,1332	282828	27093572	1	1	0	0	0
28	82619	26169733	0,999874	0,563671795	0,000125832	0,436328205	0	139457	26112895	0,9958506	0,6914389	0,004149444	0,308561062	0,2959	139457	26112895	0,99999766	0,9997705	2,33601E-06	0,0002295	0,0141
29	0	0					0	0	0					0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0,0094
30	51107	19616007	0,999967	0,905551099	3,30342E-05	0,094448901		167040	19500074	0,9983566	0,9570103	0,001643378	0,042989703	0,0696	167040	19500074	0,99994949	0,992876	5,05126E-05	0,007124	0,0081
31	0	24542784	0,999828	#DIV/0!	0,000171782	#DIV/0!	0	87814	24454970	0,9980179	0,6607602	0,001982092	0,339239757	0,3588	87814	24454970	0,99999513	0,9952855	4,86609E-06	0,0047145	0,0073
32	14753	28045792	0,999957	0,575001695	4,3429E-05	0,424998305	0,5707	95037	27965508	0,9983791	0,903869	0,001620925	0,096130981	0,1222	95037	27965508	0,99997304	0,9959069	2,69618E-05	0,0040931	0
33	143452	26139752	0,999895	0,708564537	0,000104592	0,291435463	0	167873	26115331	0,9985106	0,9567173	0,001489355	0,04328272	0,0679	167873	26115331	0,99996156	0,9963306	3,84449E-05	0,0036694	0
34	153484	30006881	0,999859	0,703376248	0,000140868	0,296623752	0,5954	281317	29879048	0,9842355	0,3579983	0,015764492	0,642001728	0,3872	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0,0082
35	16052	20149819	0,999973	0,573261899	2,66504E-05	0,426738101	0,5884	57397	20108474	0,9954131	0,6835026	0,004586922	0,316497378	0,2165	57397	20108474	1	1	0	0	0,0115
36	56903	27474393	0,999996	0,926418642	4,00373E-06	0,073581358	0,0725	48555	22552026	0,999584	0,9907733	0,000416016	0,009226665	0,0153	48555	22552026	0,99999756	0,9959016	2,43881E-06	0,0040984	0,0066
37	56903	27474393	0,999996	0,926418642	4,00373E-06	0,073581358		67880	27463416	0,9968313	0,4846494	0,003168725	0,515350619	0,3685	67880	27463416	0,99997823	0,9941514	2,17744E-05	0,0058486	0,0048
38	0	0					0	267209	26975942	0,9999641	1	3,59209E-05	0	0	267209	26975942	0,99999741	0,996688	2,5949E-06	0,003312	0
39	0	0					0	251463	26420446	0,9983493	0,8660519	0,001650691	0,133948136	0,2049	251463	26420446	0,99999799	0,997606	2,00602E-06	0,002394	0,0021
40	0	0					0	0	0					0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0,0021
41	0	0					0	0	0					0	286165	22294893	0,99999856	0,9989691	1,43531E-06	0,0010309	0,0027
42	0	0					0,0132	0	0					0	286165	22294893					
43	435262	30493426	0,999955	0,993348834	4,51901E-05	0,006651166	0	58775	30869913	0,9982998	0,9346661	0,001700167	0,0653339	0,0667	58775	30869913					
44	0	0					0	0	0					0	27696598	78057					
45	0	0					0	0	0					0	27696598	78057					
46	0	0					0	0	0					0	0	0					
47	0	0					0	0	0					0	0	0					
48	0	0					0	0	0					0	0	0					