



Análise de soluções tecnológicas para inspeção automática de infraestruturas críticas

Um caso de estudo no Grupo Águas de Portugal

Filipe Miguel Fialho de Brito

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante
Prof. Alexandra Bento Moutinho

Júri

Presidente: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis
Orientador: Prof. Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante
Vogais: Prof. António Ramos Andrade
Eng^a Marta Alexandra Cordeiro de Saramago Carvalho Marques

Novembro 2019

RESUMO

O setor do abastecimento de água e do saneamento de águas residuais revela-se como um grande contributo para o desenvolvimento económico, social e ambiental. No entanto muitas das infraestruturas deste setor, como as principais: barragens, estações de tratamento de água, reservatórios e estações de tratamento de águas residuais, foram construídas há já algumas décadas, muitas delas localizadas em áreas remotas, com dificuldades de acessibilidade e frequentemente incluem espaços confinados com fraca qualidade do ar ou outros perigos para os humanos. De forma a assegurar um seguro, fiável e contínuo serviço de abastecimento e saneamento tanto as infraestruturas como os seus ativos devem apoiar-se em atividades de manutenção planeadas, incluindo inspeções regulares para avaliação do seu estado e/ou condição. Normalmente as atividades de manutenção aumentam ao longo do ciclo de vidas dos ativos e as implicações económicas desta atividade requerem uma priorização sistemática. Isto apenas pode ser alcançado através de uma boa gestão de ativos, incluindo a avaliação da condição atual dos mesmos. Estas avaliações são suportadas e potenciadas pelas informações obtidas através de inspeções ou processos de monitorização.

As técnicas tradicionais de avaliação de condição de infraestruturas envolvem uma inspeção visual, realizada por um inspetor experiente, combinada com critérios relevantes de tomada de decisão. Por vezes as anomalias não são quantificadas de forma precisa, porque não é possível aceder de perto ao componente da infraestrutura que se quer inspecionar ou porque não são utilizadas ferramentas precisas de instrumentação. Torna-se, por isso, necessário encontrar soluções tecnológicas automatizadas que auxiliem o ser humano na realização de tais inspeções, com o objetivo de tornar as inspeções mais rápidas, seguras e mais objetivas, aumentando o custo-eficácia das ações de manutenção.

O presente trabalho visa analisar os desafios relacionados com a inspeção de ativos, abordando e propondo soluções automatizadas de inspeção com menos intervenção humana. De forma a identificar as inspeções aos ativos onde seja mais relevante aplicar estas soluções, foi desenvolvida uma metodologia de quantificação de relevância, com base na quantidade de ativos e a severidade da inspeção a realizar.

Palavras-chave: Infraestrutura; Gestão de Ativos; Manutenção; Inspeções; Anomalias; Severidade; Soluções automatizadas.

ABSTRACT

Water supply and sanitation services represent a major contribution to economic, social and environmental development of a country. Typically, the urban water sector has a great number of facilities, such as dams, water treatment plants, reservoirs and wastewater treatment plants, which were built a few decades ago, many of them located in remote areas, difficult to reach and frequently including confined spaces with poor air quality and other hazards for workers. To ensure a safe, reliable and continuous supply of drinking water and sanitation services both infrastructure and their assets must rely on good and planned maintenance, including regular inspections and condition evaluation. Maintenance efforts usually increase throughout the asset's lifecycle, and economic implications of this activity require systematic prioritization. This can only be achieved through asset management, including assessing the current asset service condition. These assessments are supported and enhanced by the information obtained through inspections or monitoring processes.

Traditional asset service condition assessment techniques involve visual inspection, carried out by experienced inspectors, combined with relevant decision-making criteria. Sometimes the anomalies are not quantified accurately, because it is not possible to closely access the infrastructure assets that is intended to inspect or because there aren't used precise instrumentation methods. It is, therefore, necessary to find automated technological solutions that assist human inspectors in carrying out such inspections, with the aim of making inspections faster, safer and more objective, increasing maintenance cost-effectiveness.

This work aims to analyse the challenges related with asset inspection, addressing and proposing automated inspection solutions, with less human intervention. In order to identify the asset inspections that are most relevant to apply these solutions, a methodology for quantifying relevance was developed, based on assets quantity and the severity of inspections.

Keywords: Infrastructure; Asset Management; Maintenance; Inspections; Defects; Severity; Automated solutions.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos, aos quais estarei eternamente grato. Quero deixar expresso os meus agradecimentos:

Às professoras Virgínia Infante e Alexandra Moutinho, pela oportunidade, atenção prestada, disponibilidade e constante ajuda ao longo do percurso.

À Eng.^a Marta Carvalho, pelo constante acompanhamento, incentivação, disponibilidade e atenção prestada, principalmente na fase final do trabalho.

Ao Eng.^o Rodrigo Marques, pela disponibilidade e ajuda prestada, assim como os momentos de boa disposição.

Ao Eng.^o Nuno Brôco e ao Grupo Águas de Portugal pela oportunidade e excelente acolhimento.

Ao Eng.^o João Pimentel e ao Eng.^o Sotero Ribeiro, pela atenção e ajuda prestada.

Aos meus familiares, pelo apoio incondicional e toda a ajuda que me permitiu chegar até aqui.

À Inês, por toda a ajuda, apoio e incentivo em todos os momentos deste percurso.

Aos meus amigos, por todo o apoio e motivação.

ÍNDICE

Resumo	i
Agradecimentos.....	iii
Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	ix
Lista de Acrónimos e Símbolos	x
Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Metodologia	3
1.5. Estrutura da Dissertação.....	4
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Gestão de ativos.....	5
2.1.1. Definição e Conceito	5
2.1.2. Ciclo de vida de um ativo	6
2.1.3. Gestão de ativos nos serviços de águas e saneamento - AdP.....	7
2.2. Manutenção.....	8
2.2.1. Definição e Objetivos	8
2.2.2. Tipos de manutenção.....	9
2.2.3. Inspeção/monitorização	10
2.2.4. Inspeção baseada no risco.....	11
3. Contextualização do Grupo Águas de Portugal – setor da água.....	14
3.1. Enquadramento do setor da água em Portugal	14
3.2. Grupo Águas de Portugal.....	17
4. Análise exploratória dos dados fornecidos.....	20
4.1. Metodologia de extração de dados.....	20
4.1.1. Equipamentos	20
4.1.2. Construção Civil	22
4.2. Metodologia de análise de dados.....	26
5. Caso de Estudo.....	33

5.1. Descrição dos ativos escolhidos	33
5.2. Análise às inspeções atuais dos ativos escolhidos	43
Construção Civil.....	45
Equipamentos.....	46
5.3. Pesquisa de soluções automáticas de inspeção.....	47
5.3.1. Técnicas de inteligência artificial aplicadas em imagem	48
5.3.2. Inspeção de baseada em robôs.....	67
5.3.3. Monitorização de deslocamentos.....	70
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	72
6.1. Conclusões.....	72
6.2. Trabalhos Futuros.....	74
Referências Bibliográficas	76
Anexos.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fases do ciclo de vida de um ativo.....	7
Figura 2 - Tipos de Manutenção.....	10
Figura 3 – Risco associada a cada ativo [13].....	13
Figura 4 - Diagrama do planeamento de inspeção com base no risco [13].....	13
Figura 5 - Etapas na atividade de abastecimento de água [18].	15
Figura 6 - Etapas na atividade de saneamento de água [19].....	15
Figura 7 - Eixos do PENSAAR 2020 [23].	16
Figura 8 - Presença do Grupo AdP no território continental.	18
Figura 9 - Infraestruturas do Grupo AdP (2018) [1].	19
Figura 10 – Distribuição das diferentes tipologias de ativos com anomalias pelas famílias de infraestruturas.....	22
Figura 11 - Tipos de barragens do Grupo AdP [25] [26] [27].	25
Figura 12 – Sistematização dos descritores considerados para a identificação da relevância. .26	
Figura 13 - Tipologia de ativos vs severidade.	29
Figura 14 – Tipologias de ativos em quantidade mais elevada no Grupo AdP.....	30
Figura 15 - Grade mecânica [29].	34
Figura 16 - Circuito de gradagem com by-pass ao circuito principal. [29].	34
Figura 17 – Exemplo de canal aberto em obra de entrada, fornecido por AdP.	35
Figura 18 – Exemplo de válvula de comporta de canal de entrada, fornecido por AdP.....	35
Figura 19: Exemplo de um desarenador arejado [29].....	36
Figura 20 - Desarenador tangencial mecanizado [29].	36
Figura 21 - Desarenador do tipo hidrociclone [29].	36
Figura 22 - Decantador circular [32].	38
Figura 23 - Ponte raspadora de um decantador [29].	39
Figura 24 - Tanque de arejamento numa ETAR em <i>West Lafayette</i> [33].	39
Figura 25 - Espessador gravítico de lamas [35].	40
Figura 26 - Digestores anaeróbios da ETAR do Choupal [36].	40
Figura 27 - Interior do reservatório de água potável em Houston [38].	41
Figura 28 - Torre de tomada de água da barragem do Pinhão [40].	42
Figura 29 - Descarregador de cheias sobre a barragem – Barragem das Olgas [25].....	42
Figura 30 - Descarregador por orifícios através da barragem – Barragem de Corgas [70].....	43
Figura 31 - Descarregador em canal de encosta – Barragem de Beliche [71].	43
Figura 32 - Resultados de aplicação do algoritmo FHT, (a) imagem com fissuras, (b) imagem sem fissuras, (c)(d) resultados de aplicação do algoritmo às imagens (a)(b) [48].	50
Figura 33 - (a) A normal da referência (traço interrompido) e uma das normais representativas de uma região com anomalias (a vermelho); (b) comparação do ângulo entre essas duas normais [49].	50

Figura 34 - Imagem recolhida para deteção de anomalias, neste caso específico, fissuração [49].	51
Figura 35 - Resultado da metodologia de deteção de anomalias aplicada na Figura 34 [49]. ...	51
Figura 36 - Imagem recolhida para deteção de anomalias, neste caso específico, corrosão [49].	52
Figura 37 - Resultado da metodologia de deteção de anomalias aplicada na Figura 36 [49]. ...	52
Figura 38 - Deteção automática de destacamentos: (a) imagem completa; (b) coluna com destacamento; (c) deteção da região de interesse; (d) fissuras detetadas; (e) deteção de armadura longitudinal; (f) deteção de armadura transversal [50]......	53
Figura 39 - (a) (c) imagens recolhidas, (b) (d) resultados de aplicação do algoritmo em (a) e (c), destacando os pixéis corroídos a preto [51]......	53
Figura 40 - Resultado da deteção de fissuras de imagens captadas por drone (a) e o corresponde mapa de probabilidade (b) [52]......	55
Figura 41 - Resultado da deteção de fissuras de imagens captadas por drone (c) e o corresponde mapa de probabilidade (d) [52]......	55
Figura 42 - Deteção de fissuras em tempo real utilizando um drone: (a) captação de vídeo pelo drone; (b) exemplo da deteção de fissuras em tempo-real [52]......	55
Figura 43 - Deteção de corrosão utilizando ZF Net aplicada a imagens RGB, em que as caixas verdes representam regiões corroídas [53]......	56
Figura 44 - Deteção de anomalias em aço sobre iluminação intensiva: (a) fotografia de uma estrutura corroída; (b) output da Faster R-CNN [54].	57
Figura 45 - Deteção de anomalias em betão: (a) fotografia de uma parede fissurada; (b) output da Faster R-CNN [54]......	57
Figura 46 - Amostra de resultados da inspeção estrutural automatizada, demonstrando o output a cada passo do método [55].	58
Figura 47 - Deteção de alterações comparando a nuvem de pontos das duas imagens acima, com recurso ao software <i>CloudCompare</i> , em cima: fotografias recolhidas de duas campanhas de inspeção, em baixo: comparação da nuvem de pontos [56].	59
Figura 48 - Ilustração do método proposto por Stent et al. [58] (a) Captura de imagem; (b) Deteção de alterações nas novas imagens; (c) os resultados apresentados em grupos e ordenados por importância.	60
Figura 49 - Ilustração dos resultados para 3 casos [58].	61
Figura 50 - Resultados da deteção de colunas em estruturas de betão armado [59][60].	62
Figura 51 - Segmentação e identificação de componentes numa nuvem de pontos [61].	63
Figura 52 - Resultado do reconhecimento de componentes de uma ponte [45]......	64
Figura 53 - Resultados do método proposto por Hoskere [62].	65
Figura 54 - Métodos não destrutivos do sistema BetaScan [38]......	68
Figura 55 - Exemplos de aplicações do robô ICM Climber [64].	68
Figura 56 – SeaCat [65].	69
Figura 57 - Trajetória de inspeção numa parede submersa [65]......	70

Figura 58 – (a) Layout em *zigzag* da fibra ótica num elemento de betão. (b) Dobragem da fibra na propagação da fissura. (c) Atenuação do sinal ao longo da fibra, antes e depois da fissura [69].71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição da quantidade de equipamentos analisados pelas 4 empresas.	22
Tabela 2 - Tempo despendido por ano durante a atividade de inspeção.	27
Tabela 3 - Perigos para o humano durante a atividade de inspeção.	27
Tabela 4 - Dificuldade de acessibilidade humana para realização da inspeção.	28
Tabela 5 - Necessidade de paragem do ativo ou instalação para realização da inspeção.	28
Tabela 6 – Cruzamento entre necessidades de inspeção a ativos da AdP com as soluções analisadas.	73

LISTA DE ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS

AdP	Águas de Portugal
AP	Aprendizagem profunda, do inglês <i>Deep learning</i>
CNN	<i>Convolutional neural network</i>
D-CNN	<i>Deep convolutional neural network</i>
EE	Estação elevatória
EEA	Estação elevatória de água
EEAR	Estação elevatória de água residual
EPDM	<i>Ethylene propylene diene monomer</i>
EPI	Equipamentos de proteção individual
ERSAR	Entidade reguladora dos serviços de águas e resíduos
ETA	Estação de tratamento de água
ETAR	Estação de tratamento de águas residuais
FCNN	<i>Fully convolutional neural networks</i>
FHT	<i>Fast haar transform</i>
GPS	Global position system
LiDAR	<i>Light detection and ranging</i>
MVS	<i>Multi-view stereo</i>
PCA	<i>Principal component analysis</i>
PEAD	Polietileno de alta densidade
RBI	<i>Risk based-inspection</i>
SfM	<i>Structure from motion</i>
VANT	Veículo aéreo não tripulado

INTRODUÇÃO

O presente documento foi elaborado no âmbito da unidade curricular Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico, tendo como objetivo a apresentação de um trabalho realizado em parceria, sob a forma de estágio curricular, com a empresa Águas de Portugal Serviços Ambientais, do Grupo Águas de Portugal durante o ano letivo de 2018/2019.

1.1. ENQUADRAMENTO

O setor do abastecimento de água e do saneamento de águas residuais revela-se como um grande contributo para o desenvolvimento económico, social e ambiental, tendo tido uma evolução muito positiva nas últimas décadas em Portugal.

Muitas das infraestruturas deste setor, como as principais: barragens, captações, estações de tratamento de água, reservatórios e estações de tratamento de águas residuais, foram construídas há já algumas décadas, necessitando de ser alvo de inspeção para avaliação do seu estado e/ou condição. De acordo com o Relatório e Contas do Grupo Águas de Portugal, em 2018, os investimentos de reabilitação e substituição atingiram 47,3 milhões de euros, mais 10 milhões do que o ano anterior. O total de investimento para este ano foi de 133,8 milhões de euros, portanto 35% do investimento é dedicado apenas a obras de reabilitação e substituição de infraestruturas já existentes [1]. As implicações económicas de reparação requerem uma priorização sistemática, sendo esta alcançada através da perceção do estado atual da infraestrutura.

Um prognóstico fiável da condição e comportamento de uma infraestrutura é uma base importante para uma gestão efetiva da sua vida de serviço. Para determinar o ponto economicamente fiável para as ações de manutenção, é essencial deter o conhecimento sobre o estado atual da infraestrutura, assim como a perceção sobre a sua evolução ao longo do tempo. Estas avaliações são potenciadas pelas informações obtidas através de inspeções ou processos de monitorização.

As técnicas tradicionais de avaliação de condição de infraestruturas envolvem uma inspeção visual, realizada por um inspetor experiente, combinada com critérios relevantes de tomada de decisão. Por vezes até, as inspeções são realizadas de forma qualitativa, não são quantificadas as anomalias de forma precisa, porque não é possível aceder de perto ao componente da infraestrutura que se quer inspecionar ou porque não são utilizadas ferramentas precisas de instrumentação. Torna-se, por isso, necessário encontrar soluções tecnológicas automatizadas que auxiliem o ser humano na realização de tais inspeções, com o objetivo de tornar as inspeções mais rápidas, seguras e objetivas, aumentando o custo-eficácia das ações de manutenção.

O presente trabalho visa responder a alguns dos desafios relacionados com a inspeção de ativos, abordando e propondo soluções de inspeção melhoradas, com menos intervenção

humana e mais objetivas, visando a utilização de ferramentas e meios tecnológicos, privilegiando a automatização. De forma a identificar as inspeções aos ativos onde seja mais relevante aplicar estas soluções, foi desenvolvida uma metodologia de identificação de relevância, com base no número de ativos e a severidade da inspeção a realizar.

1.2. MOTIVAÇÃO

Esta dissertação pretende contribuir para o desenvolvimento e melhoria da manutenção condicionada, nomeadamente na área das avaliações de estado/condição dos ativos e infraestruturas, nas empresas do Grupo Águas de Portugal, doravante denominado Grupo AdP ou simplesmente AdP.

O Grupo AdP é o principal grupo empresarial português com atividade nos domínios do abastecimento de água e de saneamento de águas residuais, atuando em todas as fases do ciclo urbano da água, incluindo a captação, o tratamento, o transporte e a distribuição de água para consumo público, assim como a recolha, o transporte, o tratamento e a rejeição de águas residuais urbanas, incluindo a sua reciclagem e reutilização. Através das suas empresas, tem uma presença alargada no território continental, prestando serviços a cerca de 80% da população portuguesa.

O Grupo AdP, após o importante esforço de investimento em infraestruturas e o conjunto de alterações organizacionais mais recentes, implementa uma agenda de medidas orientadas para a consolidação e melhoria da eficiência de exploração. No âmbito da dissertação importa destacar, a promoção da gestão das infraestruturas, conciliando um esforço de otimização com os desafios de preservação através da consolidação do conhecimento do estado atual das infraestruturas existentes.

De forma a dar suporte às crescentes necessidades do Grupo em matéria de gestão de ativos, existe atualmente a necessidade de desenvolver novas soluções que permitam, de forma rápida, adequada, segura e automatizada, avaliar a condição dos ativos e disponibilizar os elementos necessários para ajudar à tomada de decisão sobre eventuais intervenções de manutenção desses mesmos ativos.

Esta necessidade tem como principais motivações:

- A segurança da inspeção: alguns ativos estão localizados em zonas confinadas, de difícil acesso ou com risco de queda e ambientes tóxicos, que exigem a implementação de fortes medidas de segurança para minimizar o risco, mas que não o anulam.
- Existência de novas tecnologias, como é o caso de soluções de inspeção com recurso a sensorização por infravermelhos, termografia, ultrassons, processamento de imagem, etc.
- Mapeamento das anomalias, permitindo o acompanhamento da progressão da anomalia ao longo do tempo, conseguindo assim monitorizar a sua evolução e atuar apenas quando necessário.

- Rapidez, aumentando o número de inspeções realizadas aos ativos mais relevantes e diminuindo o tempo de paragem da infraestrutura.
- Análise de informação *à posteriori*, podendo assim ter a informação já trabalhada e num formato para análise, servindo de apoio à decisão sobre intervenções e prioridades.

Adicionalmente, está em implementação o Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais (PENSAAR 2020) para Portugal continental, que identificou, como lacuna do setor, a falta de conhecimento do estado/condição atual dos ativos por parte das entidades gestoras. Este plano estabeleceu um conjunto de objetivos operacionais, dos quais se destaca a gestão eficiente dos sistemas já existentes, nomeadamente o património infraestrutural. Assim, esta dissertação revela-se como um contributo para que o Grupo AdP melhore a sua gestão das infraestruturas existentes, na vertente do conhecimento da condição das mesmas.

1.3. OBJETIVOS

A presente dissertação visa contribuir para uma eficiente gestão das infraestruturas, tendo como objetivos:

- Elaborar uma metodologia que auxilie a seleção das inspeções aos ativos mais relevantes (constituintes das infraestruturas). Sendo estas posteriormente consideradas para o caso de estudo, cujas inspeções são mais severas (do ponto de vista da segurança, tempo despendido, acessibilidade e necessidade de paragem).
- Analisar soluções tecnológicas para inspeção automática de infraestruturas críticas, nomeadamente as inspeções aos ativos escolhidas para o caso de estudo.
- Melhorar o conhecimento do estado atual das infraestruturas e ativos, para que estes facultem informações críticas e estejam na base das tomadas de decisão.

1.4. METODOLOGIA

Numa fase inicial foi feita a contextualização do Grupo AdP no setor de abastecimento de água e saneamento de águas residuais. Foi feita a apresentação das infraestruturas do Grupo que servem a sociedade, destacando a sua importância. Para tal, foram analisados diferentes casos do Grupo, dos quais se destacam exemplos e excertos de relatórios de inspeções a várias infraestruturas, com o objetivo de estudar como estas se processam. Por fim, foram apresentados os desenvolvimentos na área de avaliação de infraestruturas com recurso a novas tecnologias aplicáveis aos ativos da AdP, definindo quais as principais motivações que levam a tais desenvolvimentos.

Após terem sido enquadradas quais as principais necessidades do Grupo, foi facultada informação sobre campanhas de inspeções realizadas, entendendo a realidade da empresa a nível da tipologia de ativos, a sua condição geral e as principais anomalias detetadas. Através da elaboração de uma metodologia de análise, foi possível determinar as inspeções aos ativos mais relevantes, definindo a sua priorização quanto à aplicação de soluções tecnológicas automáticas. Estas inspeções resultaram no caso de estudo. Complementarmente, foi possível acompanhar uma equipa de engenheiros que, ao longo de um dia, inspecionaram uma tipologia de infraestruturas, os reservatórios. Foi possível obter uma perceção mais concreta do que era relatado nos relatórios e fichas de avaliação de condição dos ativos (inspeções).

Por último, foi feita uma pesquisa sobre soluções tecnológicas automatizadas que poderiam ser aplicadas às inspeções definidas no caso de estudo. A pesquisa baseou-se em tecnologias exploradas pela comunidade científica, não necessariamente aplicada aos mesmos ativos do caso de estudo, mas que de certa forma a sua aplicabilidade seria possível e os resultados seriam coerentes com os obtidos pelos autores.

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O documento foi estruturado em 6 capítulos. No primeiro capítulo, Introdução, é enquadrada a necessidade de desenvolvimento da dissertação no Grupo AdP.

O segundo capítulo, Revisão bibliográfica, são apresentados os conceitos gestão de ativos e manutenção, relacionando-os com o setor da água e a monitorização das infraestruturas.

No terceiro capítulo é realizada a contextualização do Grupo Águas de Portugal no setor das águas em Portugal e dá a conhecer as principais áreas de operação do Grupo.

O quarto capítulo analisa os dados fornecidos pelo Grupo, descrevendo a metodologia de extração de dados e de análise. Resultando esta análise na definição do caso de estudo.

No quinto capítulo, Caso de estudo, são descritos quais os ativos tidos em conta após a análise do capítulo anterior, é feita uma breve análise às inspeções atuais dos ativos escolhidos para o caso de estudo, e por fim são exploradas algumas soluções para automatização das inspeções.

No sexto capítulo e último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo apresentam-se conceitos relacionados com a gestão de ativos, com a manutenção e com as atividades de inspeção.

2.1. GESTÃO DE ATIVOS

2.1.1. DEFINIÇÃO E CONCEITO

De acordo com a normal ISO 55000, um ativo é definido como um item, coisa ou entidade que tem valor potencial ou atual para a organização. O seu valor irá variar entre a organização e os seus *stakeholders*, podendo ser tangível ou intangível, financeiro ou não financeiro. O valor pode também variar ao longo da vida útil de um ativo, sendo esta o período desde a criação do ativo à sua desativação. Os ativos podem ser geridos como um sistema ou individualmente de acordo com as necessidades e benefícios [2].

Uma gestão eficaz de ativos visa a criação de valor ao integrar as componentes financeiras, ambientais e sociais, reduzindo o risco e aumentando a qualidade. Assim, é necessário coordenar e otimizar os processos desde a conceção do ativo até ao final da sua vida útil ou renovação. Ao criar uma sistematização das atividades, com objetivos definidos, é possível avaliar o desempenho, risco e custos [2].

Segundo o *Institute of Asset Management* (IAM) a gestão de ativos é definida como o conjunto de atividades e práticas sistemáticas e coordenadas, através das quais, uma organização gere de forma ideal e sustentável os seus ativos e sistemas de ativos, o seu desempenho, os riscos e os gastos ao longo da vida útil dos mesmos, com o propósito de atingir o plano estratégico organizacional. Sendo este último definido como o plano a longo prazo para a organização que deriva da sua missão, visão, valores, políticas de negócios, requerimentos dos *stakeholders*, objetivos e gestão de riscos [3].

A gestão de ativos foca-se numa boa gestão de práticas e aplicação técnico-financeira, de modo a permitir decidir quais os ativos que são relevantes para cumprir os objetivos propostos pela organização. A qualidade e sustentabilidade do serviço prestado pelas infraestruturas (ativos) depende da sua adequada gestão.

A gestão de ativos permite a uma organização ter conhecimento do valor dos seus ativos e produzir valor a partir dos mesmos. O que constitui valor dependerá dos objetivos, da natureza e do propósito de cada organização e das necessidades e expectativas dos *stakeholders*. Permite, ainda que uma organização analise a necessidade e o desempenho dos ativos e sistemas de ativos a diferentes níveis e faça uma consequente aplicação de abordagens analíticas relativamente à gestão durante as diferentes fases da vida do ativo [2].

Os benefícios da gestão de ativos, não estando apenas limitado a estes, apresentam-se como [2]:

- Aumento do retorno dos investimentos e redução dos custos, preservando o valor dos ativos.

- Melhoria da tomada de decisão sobre futuros investimentos em ativos com conhecimento de causa, conciliando os custos, riscos, oportunidades e desempenho.
- Eficiente gestão do risco, contribuindo para reduzir as perdas financeiras, aumentar a segurança e reputação, e minimizar o impacto ambiental e social.
- Melhoria de serviços prestados, assegurando um contínuo desempenho dos ativos, leva a que os serviços ou produtos atendam ou superem as expectativas dos clientes e *stakeholders*.
- Apresentar responsabilidade social, a melhoria da capacidade de organização, permite que se demonstrem práticas comerciais éticas e socialmente responsáveis.

Qualquer organização, pública ou privada, lida com ativos. Portanto, torna-se essencial reconhecer o valor presente e futuro dos mesmos, assim como quais são os custos associados ao desenvolvimento de um plano estratégico de gestão de ativos, que por sua vez permita uma boa organização e prestação de serviços. Já existem diferentes sistemas, métodos e softwares usados na gestão de diferentes tipos de ativos. Cabe às empresas decidir o que considerar como ativo e o que incluir no portefólio de ativos [4].

2.1.2. CICLO DE VIDA DE UM ATIVO

No contexto da gestão de ativos é importante a compreensão do ciclo de vida do ativo. Existem 4 fases chaves no ciclo de vida de um ativo (Figura 1) [4]:

- **PLANEAMENTO:** primeira fase que estabelece e verifica a necessidade de ativos, com base na avaliação dos ativos existentes e do seu desempenho para cumprir as necessidades. Em todas as etapas do planeamento é crucial garantir que o seu desenvolvimento contínuo acrescente valor à organização. É planeado também a expectativa de valor acrescentado com a aquisição do ativo, definindo as metas para a sua utilização.
- **AQUISIÇÃO:** após identificadas as soluções disponíveis e os requerimentos é tomada a decisão na escolha da melhor opção. O plano de aquisição envolve a atividade de compra ou desenvolvimento do ativo, de forma a garantir uma aquisição rentável.
- **OPERAÇÃO e MANUTENÇÃO:** é normalmente a fase mais longa do ciclo de vida dos ativos. Durante esta fase deve ser feita uma apropriada manutenção, monitorização e aplicação de potenciais melhorias, tais como reabilitações e renovações, para assegurar os requisitos operacionais.
- **DESTRUIÇÃO:** esta fase representa o final da vida útil do ativo, ocorre quando os custos de operação, manutenção e reabilitação não se justificam ou quando este tem um baixo desempenho. O descarte do ativo deve ser tomado na perspetiva dos efeitos na prestação de serviço. Esta fase desenrola-se paralelamente ao planeamento e aquisição de um novo ativo.



Figura 1 - Fases do ciclo de vida de um ativo.

2.1.3. GESTÃO DE ATIVOS NOS SERVIÇOS DE ÁGUAS E SANEAMENTO - ADP

A renovação e substituição das infraestruturas de suporte a serviços de água e saneamento é uma tarefa contínua. Estas infraestruturas são críticas, no sentido de serem um suporte essencial para a prestação de um serviço público de primeira necessidade à saúde e bem-estar das populações e à economia das sociedades [5]. A gestão racional destas infraestruturas é indispensável para a sustentabilidade das suas atividades.

Penny Burns define ativos de infraestruturas (*infrastructure assets*) como “ativos que não são substituídos como um todo, mas sim renovados pouco a pouco através de substituições de componentes individuais, enquanto é mantido o funcionamento do sistema como um todo. Estes têm um período de vida útil indefinido. A vida económica, no entanto, pode ser estabelecida para um componente individual” [6].

Os sistemas de abastecimento e saneamento representam uma parcela significativa do património de utilidade pública, com elevado valor económico, social e ambiental. O investimento nestes sistemas é uma atividade de capital intensivo, extensamente dependentes do uso dos seus ativos e com necessidades de investimento que se estendem além da fase inicial de montagem dos sistemas para as fases de operação e manutenção [7]. É necessário gerir de modo sustentável e racional, de forma a assegurar a prestação a longo prazo de um serviço de elevada qualidade, assegurando o desenvolvimento das comunidades e a proteção do ambiente [5].

Desde 2005 que no Grupo AdP têm sido desenvolvidas estratégias e políticas internas de gestão de ativos, com grande enfoque na uniformização e monitorização da informação

resultante da gestão da operação e manutenção com recurso a aplicações informáticas. A título de exemplo, refere-se o caso do Sistema de Manutenção e Gestão de Ativos (SMGA), baseado no *software Maximo* [7].

Adicionalmente, foram desenvolvidas várias ferramentas que vêm enquadrar e agilizar a tomada de decisão sobre os orçamentos e planos de investimentos e potenciar uma gestão eficiente dos ativos infraestruturais, das quais se destacam: fichas de cadastro para a inventariação dos ativos, indicadores de desempenho, metodologias de análise de risco, etc. Por fim, existem também novas soluções informáticas que foram desenvolvidas com o objetivo de integrar a informação e permitir uma ligação eficiente da atividade de manutenção com as restantes áreas das empresas [7].

No Grupo AdP, são desenvolvidas diferentes atividades que incorporam a gestão de ativos, tendo sido estas associadas às fases do ciclo de vida dos ativos da Figura 1 ([8]):

- Gestão da informação (3): identificar e tratar os dados operacionais, identificar lacunas de informação, assegurar a consistência dos dados e uma partilha de informação de forma acessível e simples.
- Cadastro (2): estruturar e atualizar a informação cadastral, coordenar a inventariação, etiquetagem e caracterização dos ativos e promover a articulação entre os cadastros técnico, geográfico e financeiro.
- Inspeções (3): avaliações periódicas e sistematizadas da condição física dos ativos, no sentido de disponibilizar informação crítica para suportar as tomadas de decisão relativas a intervenções de investimento ou manutenção dos mesmos. E ainda assegura níveis adequados de fiabilidade dos ativos e a sua funcionalidade.
- Monitorização (3): diagnóstico da exploração atual dos sistemas com vista à melhoria de desempenho.
- Gestão da energia (3): assegurar a gestão do uso e consumo de energia dos recintos e dos respetivos sistemas.
- Planeamento de investimentos (3): através da análise dos dados de operação, manutenção, monitorização e avaliação da condição, são elaboradas análises de risco relativamente aos ativos operacionais.

2.2. MANUTENÇÃO

2.2.1. DEFINIÇÃO E OBJETIVOS

A manutenção representa um elemento essencial na gestão de ativos, permitindo maximizar a vida útil de um ativo, ou seja, assegurar que este cumpra com a sua função o máximo de tempo possível. A melhoria de um sistema pode ser obtida através da reabilitação ou substituição dos ativos da infraestrutura, mas também através de melhorias nas atividades de manutenção e de operação [9].

De acordo com a norma EN 13306:2010 a manutenção é definida como “a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um item, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que possa desempenhar a função requerida” [10].

A manutenção visa maximizar o desempenho de um ativo de forma eficiente e regular, prevenindo a ocorrência de interrupções de funcionamento ou falhas, e conseqüentemente minimizar as paragens do sistema, aumentando a disponibilidade do mesmo. A manutenção também tem como objetivos: maximizar a vida útil dos ativos, diminuir a sua exposição a falhas frequentes e severas e evitar danos graves que possam resultar em reparações dispendiosas.

2.2.2. TIPOS DE MANUTENÇÃO

Na literatura existe alguma divergência de designações quanto aos tipos de manutenção. A classificação apresentada resulta da consulta de várias fontes (Figura 2).[10][11].

As ações de manutenção dividem-se em:

- **Manutenção planeada:** manutenção organizada com antecedência e controlada pelo uso de um planeamento. Esta envolve uma preparação e uma programação.
- **Manutenção não planeada:** manutenção sem qualquer planeamento, geralmente associada à filosofia de manutenção até à falha. É necessário reparar, substituir, ou restaurar a ação desempenhada por um ativo depois da ocorrência da falha, trazendo de volta as condições de funcionamento mínimas. Sendo esta realizada o mais rápido possível – Manutenção corretiva.

A manutenção planeada subdivide-se em:

- **Manutenção preventiva:** manutenção efetuada segundo critérios pré-determinados, conduzida a fim de reduzir a probabilidade de um ativo entrar em rotura. Podendo ainda dividir-se em sistemática, que consiste em inspeções/revisões periódicas e ações de reparação preventivas em função do tempo ou número de unidades de utilização, ou em condicionada, que periodicamente, sujeita o ativo à medição de parâmetros que revelarão o estado de funcionamento e de degradação.
- **Manutenção de melhoria:** manutenção programada baseada na introdução de melhorias para melhor desempenho do ativo, que visa a redução ou eliminação da necessidade de manutenção.

Assim, torna-se necessário efetuar uma gestão das ações de manutenção, com o objetivo de controlar os recursos, tempo e custos, para assegurar uma manutenção eficiente e adequada, evitando desperdício de recursos e períodos de inatividade devido a falhas dos ativos. É importante estabelecer uma gestão da manutenção numa empresa. Atualmente existem softwares (*Computerised Maintenance Management – CMM*) que simplificam este processo,

reunindo e armazenando toda a informação necessária de apoio aos gestores, possibilitando também a facilidade de comunicação entre os gestores e os técnicos.

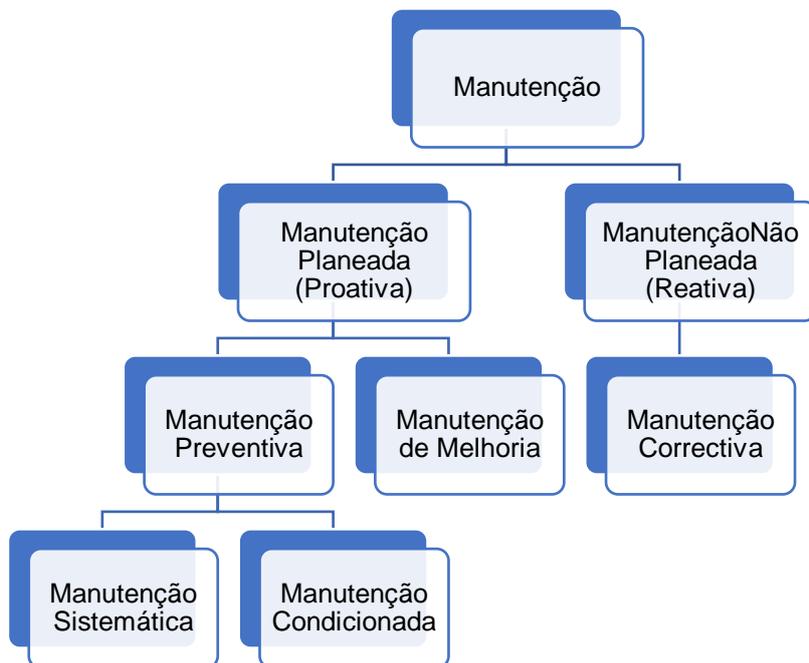


Figura 2 - Tipos de Manutenção.

2.2.3. INSPEÇÃO/MONITORIZAÇÃO

A degradação progressiva do estado dos ativos, sejam equipamentos ou construções, é um fator inevitável. Na maioria dos casos, as falhas nos ativos que levam a ações de manutenção são consequências desta degradação. A norma EN 13306:2010 define degradação como “a evolução irreversível de uma ou mais características de um bem relacionado com a passagem do tempo, a duração de utilização ou a uma causa externa” [10].

Através da monitorização da condição dos ativos periodicamente é possível estimar a evolução da degradação: Esta revela-se uma estratégia essencial para que se perceba a necessidade de intervenções de manutenção e para que estejam assegurados os níveis requeridos de funcionamento. Alguns autores definem que esta monitorização pode ser realizada de duas formas [12]:

- Monitorização *online*: o parâmetro monitorizado é acompanhado por um sensor ao longo do tempo ou por número de ciclos. Desta monitorização resulta uma manutenção condicionada eficaz, tendo em conta que o sensor deteta a ocorrência de alterações. Contudo, existem casos em que não é possível, por restrições técnicas ou económicas, realizar uma monitorização *online*.
- Monitorização *offline*: os parâmetros monitorizados são acompanhados por inspeções periódicas. Os períodos de inspeção devem ser seleccionados com base na progressão da degradação ao longo do tempo.

A norma EN 13306:2010 classifica a inspeção e a monitorização de condição como atividades de manutenção. Definindo inspeção como “exame de conformidade através de medições, observações ou testes de características de um bem”. E define monitorização de condição como “atividade, realizada manualmente ou automaticamente, com intenções de medir, num intervalo pré-determinado, as características e parâmetros do estado atual de um bem” [10].

Para este trabalho adotou-se que as inspeções ou avaliações de condição, consistem em avaliações sistemáticas e periódicas da condição física dos ativos, ao longo do ciclo de vida, através da aferição e monitorização do estado de conservação das estruturas e seus componentes.

A inspeção é iniciada com uma visita ao local, no sentido de obter a maior informação possível relativamente ao ativo a inspecionar. Habitualmente são realizadas inspeções visuais, em que surgem as identificações de anomalias, e para esclarecimento da análise, é necessário o levantamento fotográfico com foco na anomalia. Com base nas observações são elaborados relatórios detalhados, caracterizando os ativos, tipificando as anomalias e as ações a desenvolver pós inspeção. Assim, estas inspeções produzem informações críticas, uniformizadas e sistematizadas, que estão no fundamento e apoio de tomadas de decisão. Promovendo o conhecimento e gestão da evolução do estado de conservação dos ativos, ao longo do ciclo de vida. Por exemplo, torna-se possível a classificação de ativos em diferentes graus ou escalas em função da sua condição, de forma a permitir a priorização das intervenções.

2.2.4. INSPEÇÃO BASEADA NO RISCO

Para o processo de planeamento das inspeções aos ativos são usualmente recomendadas práticas baseadas em análise de risco, isto é, planeamento de inspeção baseado no risco. A inspeção baseada no risco (*Risk based-Inspection* – RBI), define-se como um processo sistemático que começa por identificar as infraestruturas e os ativos associados e culmina na elaboração de um plano de inspeções. A probabilidade e a consequência de falha destes ativos devem ser avaliadas considerando todos os mecanismos de dano credíveis que sejam expectáveis de afetar os ativos, e ainda, os cenários de falha baseados em cada mecanismo devem também ser considerados [13].

Os outputs esperados deste processo de planeamento para cada ativo analisado são:

- Ranking do risco relativo de todos os ativos.
- Plano de inspeção a ser implementada em cada ativo.
- Descrição de quaisquer outras atividades de mitigação de riscos como: reparações, substituições, etc.
- Identificação dos agentes de risco.

A inspeção influencia a incerteza do risco associado ao ativo, promovendo o conhecimento do estado de deterioração e de previsão de falha. Embora a inspeção não reduza o risco diretamente, é uma atividade de gestão de risco, através do fornecimento de novas informações, o que pode levar à redução de risco. O objetivo do planeamento de inspeção

baseado no risco é gerir o processo de tomada de decisão priorizando os recursos em função dos riscos (associados à falha), tendo como benefícios a obtenção de planos que oferecem modos de gerir os riscos a nível do ativo. Estes planos destacam os riscos na perspetiva da segurança e do ambiente e/ou na perspetiva económica. É ainda possível identificar ativos que não requerem inspeção, devido ao nível aceitável de risco associado à operação atual do ativo. Esta abordagem providencia um instrumento para uma melhoria contínua das inspeções aos ativos. Assim que novos dados (resultados de inspeções) estão disponíveis ou quando ocorrem mudanças, a reavaliação do programa pode ser feita e ajustada fornecendo uma visão atualizada dos riscos. Serve também para orientar o desenvolvimento de tecnologias de inspeção e promover uma rápida e ampla implementação de tecnologias emergentes, assim como tecnologias comprovadas noutros ramos que podem ser adaptadas [13].

O risco, neste contexto, é definido como a combinação da probabilidade de ocorrência de um evento pelas suas consequências, geralmente negativas (equação (1)). A análise de risco, consiste no uso sistemático de informação para identificar perigos e estimar o risco associado, fornecendo uma matriz para avaliação, mitigação e aceitação de riscos. Esta informação pode incluir dados históricos, análises teóricas, opiniões informadas e preocupações dos *stakeholders*.

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade} \times \text{Consequência} \quad (1)$$

Quando o risco é identificado e a sua magnitude estabelecida, aplica-se a gestão de riscos, um processo que avalia, determina a necessidade da redução e desenvolve um plano para manter os riscos num nível aceitável. Alguns riscos podem ser identificados como aceitáveis, tornando-se desnecessária medidas para a sua redução. A redução de riscos é o ato de mitigar um risco conhecido [13].

A Figura 3 apresenta o risco associado de 10 ativos, atentando que a numeração visível (de 1 a 10) apenas identifica o ativo, não estando relacionado com o valor do risco. Tanto a probabilidade (eixo vertical) como a consequência (eixo horizontal) de falha foram determinados para cada ativo. Ordenando os ativos pelo risco obtém-se uma classificação dos ativos a serem inspecionados baseada no risco, e daí podem ser desenvolvidos planos de inspeção que atendem nas áreas com risco mais elevado. A *ISO-risk line* apresentada na Figura 3 representa um nível constante de risco, que pode ser definido como nível aceitável de risco [13].

O procedimento de análise e avaliação de risco pode ser aplicado de forma qualitativa, quantitativa ou utilizando ambos os aspetos, isto é, semi-quantitativa. Cada uma destas abordagens fornece uma forma sistemática de exibir os riscos, identificar áreas de preocupação e elaborar uma lista priorizada para inspeção [13].

A abordagem qualitativa requer dados baseados em informações descritivas e subjetivas, tendo como base o julgamento e experiência dos engenheiros. Os resultados são habitualmente dados em termos qualitativos como alto, médio ou baixo, estando a precisão diretamente dependente do conhecimento e experiência da equipa de analistas. O método quantitativo baseia-se em informações relevantes sobre o projeto do ativo, as práticas operacionais, o histórico operacional, a fiabilidade do ativo, as ações humanas, a progressão

física dos acidentes e os potenciais efeitos ambientais e na saúde humana. Este método utiliza modelos lógicos que descrevem a combinação de eventos que podem resultar em acidentes severos (geralmente consistem numa árvore de eventos ou de falhas) e também são utilizados modelos físicos que descrevem a progressão de acidentes. A abordagem semi-quantitativa resulta da aplicação de uma metodologia que contenha aspetos de ambas as abordagens anteriores. Geralmente são utilizados os mesmos dados que na abordagem quantitativa, em menor detalhe, mas os modelos utilizados não são tão rigorosos. Os resultados são usualmente obtidos em categorias de consequência e probabilidade ou como valores de risco, cujos valores podem estar associados a cada categoria para permitir o cálculo do risco e a aplicação de critérios adequados de aceitação de risco [13].

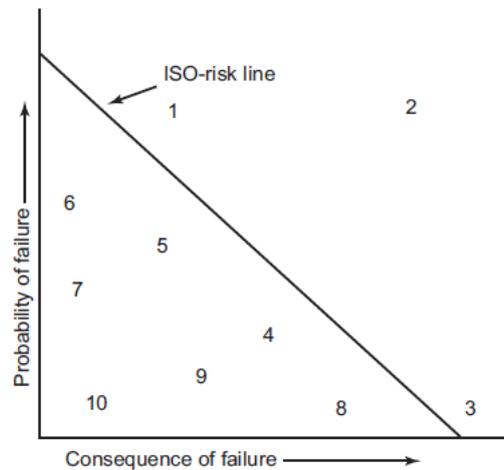


Figura 3 – Risco associada a cada ativo [13].

O planeamento de inspeção com base no risco apresenta-se de forma simplificada no diagrama da Figura 4, independentemente da abordagem aplicada.

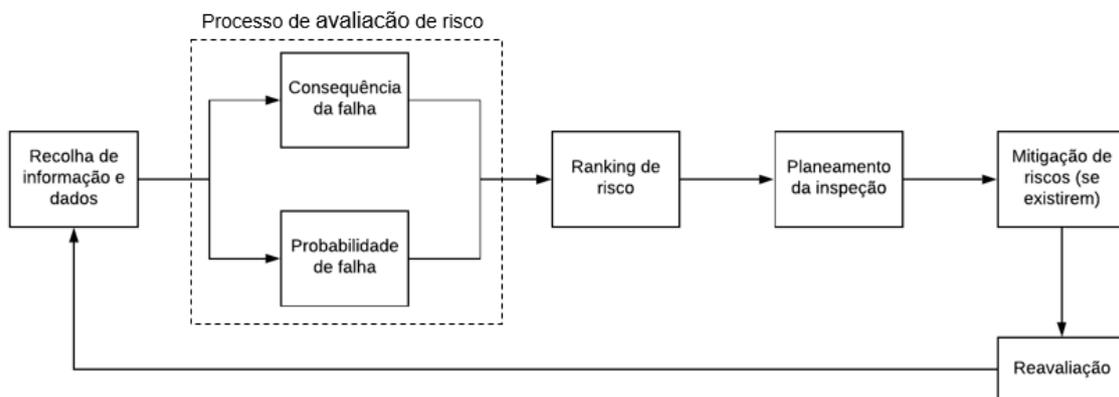


Figura 4 - Diagrama do planeamento de inspeção com base no risco [13].

3. CONTEXTUALIZAÇÃO DO GRUPO ÁGUAS DE PORTUGAL – SETOR DA ÁGUA

No presente capítulo é realizada uma breve contextualização do setor da água em Portugal, é feita uma apresentação do Grupo Águas de Portugal e por fim é explorado o universo de infraestruturas e ativos do Grupo AdP, assim como a sua categorização.

3.1. ENQUADRAMENTO DO SETOR DA ÁGUA EM PORTUGAL

A água é recurso essencial para a vida na terra. A água potável e o saneamento são reconhecidos como direitos humanos básicos, pois são indispensáveis para sustentar meios de subsistência saudáveis e fundamentais para manter a dignidade de todos os seres humanos [14]. As atividades de abastecimento público de água às populações e de saneamento de águas residuais urbanas constituem serviços públicos de caráter estrutural, essenciais ao bem-estar geral, à saúde pública e à segurança coletiva das populações, às atividades económicas e à proteção do ambiente. Portanto, devem obedecer a um conjunto de princípios, entre os quais se destacam a universalidade de acesso, a continuidade e a qualidade do serviço, a eficiência e a equidade de preços [15].

O objetivo 6 - Água potável e saneamento que integra os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pelas Nações Unidas, prevê alcançar até 2030 o acesso universal e equitativo à água potável e segura para todos, assim como alcançar o acesso a saneamento e higiene adequado e equitativo [16].

O setor de águas e resíduos contribui significativamente para o desenvolvimento económico e social do País, tanto pela capacidade de gerar atividade económica e de criar emprego e riqueza, como pela crescente melhoria que tem conferido às condições de vida da população, gerando externalidades económicas noutros setores. Em Portugal, os serviços de abastecimento e de saneamento sofreram uma evolução muito significativa nas últimas décadas [15].

De acordo com a ERSAR (Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos), o setor da água subdivide-se em dois serviços distintos: o de abastecimento de água para consumo humano e o de saneamento de águas residuais. A atividade de abastecimento de água inclui as etapas descritas na Figura 5, isto é, compreende as etapas necessárias para entregar e tornar apto o consumo da água nas habitações. Nesta atividade, são designados sistemas em “Alta” os constituídos por um conjunto de componentes a montante da rede de distribuição. Estes estabelecem a ligação do meio hídrico ao sistema em “Baixa”. Já os sistemas em “Baixa” são constituídos por um conjunto de componentes que permitem prestar aos consumidores, abrangidos pela rede pública, o serviço de abastecimento de água. Os sistemas podem ser integrados quando a ligação entre o meio hídrico e o consumidor é assegurada pelo mesmo sistema [17].

A atividade de saneamento de águas residuais compreende as etapas descritas na Figura 6. Esta atividade é fulcral para garantir a qualidade das massas de água, sendo determinante no condicionamento dos outros usos do domínio hídrico, designadamente a captação de água para consumo humano. O sistema de saneamento de águas residuais em “Baixa” assegura a drenagem de águas residuais urbanas, rejeitando-as num sistema em alta. Caso se trate de um sistema integrado, estas são rejeitadas num destino final adequado. Um sistema em “Alta” é constituído por um conjunto de componentes que permite a ligação do sistema em “Baixa” ao ponto de rejeição.

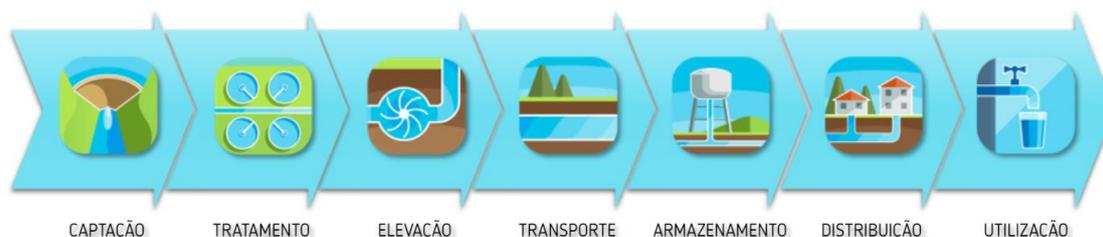


Figura 5 - Etapas na atividade de abastecimento de água [18].

A atividade de saneamento de águas residuais compreende as etapas descritas na Figura 6. Esta atividade é fulcral para garantir a qualidade das massas de água, sendo determinante no condicionamento dos outros usos do domínio hídrico, designadamente a captação de água para consumo humano. O sistema de saneamento de águas residuais em “Baixa” assegura a drenagem de águas residuais urbanas, incluindo a recolha nas habitações individuais até à sua rejeição num sistema em alta. Caso se trate de um sistema integrado, estas são rejeitadas num destino final adequado. Um sistema em “Alta” é constituído por um conjunto de componentes que permite a ligação do sistema em “Baixa” ao ponto de rejeição.



Figura 6 - Etapas na atividade de saneamento de água [19].

O ciclo urbano da água compreende todas estas etapas descritas, tanto para abastecimento de água como para saneamento de águas residuais. Todo este ciclo é o culminar de um longo processo que envolve milhares de pessoas no país, que contribuem, para que este recurso natural chegue em condições de salubridade e segurança às habitações [20]. É na captação da água que se inicia o ciclo urbano da água, podendo esta ser recolhida de diversas fontes, como albufeiras, rios ou águas superficiais. Evidentemente, esta água antes de ser distribuída e consumida necessita de ser tratada, de forma a remover quaisquer contaminantes e agentes patogénicos [21]. A fase de tratamento geralmente ocorre numa instalação denominada de Estação de Tratamento de Água (ETA). Na eventualidade, para realizar o

transporte desde a captação até à ETA poderá ser necessário elevar esta água, através de estações elevatórias, desde pontos baixos para pontos altos. Depois de serem feitas as correções das características físicas, químicas e bacteriológicas, a água torna-se apta para consumo. Antes de ser consumida, a mesma necessita de ser transportada para zonas de armazenamento, que consistem em reservatórios que salvaguardam e asseguram a continuidade do abastecimento. Por fim, a água é distribuída para as zonas de consumo [22]. Nas zonas de consumo, os utilizadores usam a água para vários propósitos.

Por consequência da utilização da água, esta transforma-se em água residual, sendo um subproduto do uso doméstico, industrial, comercial ou atividades agrícolas, cuja qualidade se degradou. Ao contrário da distribuição, a água residual necessita de ser recolhida e encaminhada para vários tratamentos, que geralmente ocorrem numa infraestrutura denominada por Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR). Nestas instalações, são removidos contaminantes e é restaurada a qualidade da água por processos físicos, químicos e/ou biológicos, para que a água possa ser devolvida ao meio hídrico em condições ambientalmente seguras, sem comprometer a saúde pública e os ecossistemas. A devolução da água tratada ao meio hídrico constitui a última etapa, a rejeição.

O setor das águas caracteriza-se como capital intensivo, em termos dos recursos que absorve, e com períodos prolongados de retorno do investimento. Isto justifica-se pelo elevado investimento na fase inicial, cujo retorno se verifica apenas no longo prazo, através da suavização das tarifas praticadas ao longo do período de vida útil das infraestruturas [15].



Figura 7 - Eixos do PENSAAR 2020 [23].

Os investimentos realizados nas últimas décadas permitiram uma evolução notável nos serviços de abastecimento de água e saneamento, existindo agora novos desafios para o setor que exigem uma gestão eficiente dos recursos. O PENSAAR 2020 – Estratégia para o Setor de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais constitui o instrumento estratégico para o setor das águas em Portugal continental, para o período de 2014 a 2020. Esta estratégia tem como objetivo promover junto das populações o acesso a um serviço de qualidade e adequado às suas necessidades, com custos socialmente aceitáveis, promovendo simultaneamente a evolução do setor para um patamar de excelência. A gestão desta estratégia é baseada num quadro estratégico, organizado em 5 eixos e 19 objetivos operacionais, representado na Figura 7.

Dos objetivos operacionais, destacam-se no enquadramento da tese no Objetivo Operacional OP3.4 – Gestão eficiente de ativos e aumento da sua reabilitação do Eixo 3 – Otimização e gestão eficiente dos recursos. Este promove a otimização e gestão eficiente de recursos ao dispor para a prestação de serviços, nomeadamente do património infraestrutural ou ativos que foram construídos ao longo das últimas décadas. Preservar estes recursos, gerindo-os da melhor maneira e tirando proveito da capacidade existente, é o grande desafio que se coloca atualmente. O aumento substancial de ativos obriga a que se dê mais atenção à preservação desses ativos e à prática de boa gestão, promovendo a maximização do período de vida útil [23].

3.2. GRUPO ÁGUAS DE PORTUGAL

O Grupo Águas de Portugal é o principal grupo empresarial português com atividade no setor da água em Portugal, atuando tanto na vertente do abastecimento de água como de saneamento. A sua principal atividade é a gestão integrada do ciclo urbano da água, através das empresas subsidiárias, operando vários sistemas de abastecimento de águas e saneamento de águas residuais, em “alta” e em “baixa”, em Portugal continental. Através das suas empresas atualmente presta serviços a cerca de 80 % da população portuguesa.

O Grupo AdP foi constituído em 1993 com a responsabilidade pelo desenvolvimento dos Sistemas Multimunicipais de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais [24]. Representa-se na Figura 8 a cinzento a área territorial abrangida pelo Grupo no final de 2018.

O Grupo opera ainda na área das energias renováveis, aproveitando o potencial energético dos seus ativos e dos recursos endógenos; e em mercados internacionais, através da prestação de serviços em associação com parceiros locais ou empresas portuguesas do setor. A 31 de Dezembro de 2018, o Grupo era constituído por 18 empresas, das quais 12 são entidades gestoras de abastecimento de água e tratamento de águas residuais [1].

O Grupo AdP possui uma vasta diversidade e quantidade de ativos (Figura 9). Cada um está associado a uma família de infraestruturas, que se dividem em: ETA, ETAR, captações, rede adutora e distribuição, rede coletora, reservatórios, estação elevatória de água, estação elevatória de saneamento e barragens.

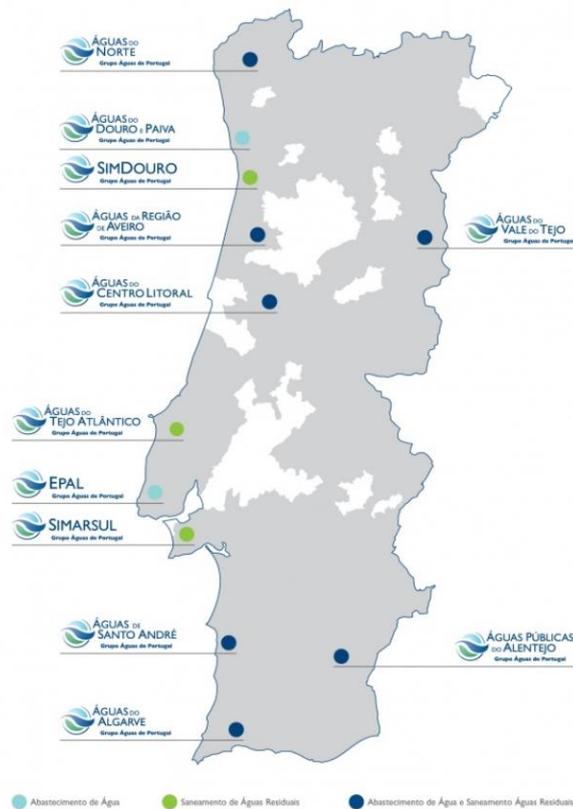


Figura 8 - Presença do Grupo AdP no território continental.

Cada família de infraestruturas pode conter ativos exclusivos. Por exemplo, os decantadores (primários e secundários) existem apenas em ETAR. No entanto, a maior parte dos ativos são comuns a quase todos os tipos de infraestruturas, como é o caso das válvulas de borboleta, bombas centrífugas ou quadros elétricos. Os ativos que se encontram em contacto com águas residuais, como em ETAR e EEAR, estão sujeitos a ambientes que constituem mecanismos de deterioração mais agressivos, o que pode levar a um desgaste mais prematuro, existindo assim uma suscetibilidade em intervenções antecipadas e uma maior preocupação acerca da condição destes ativos, para que sejam evitadas manutenções não planeadas que possam colocar em risco o funcionamento da infraestrutura/instalação.

Dado o elevado número de infraestruturas e a diversidade e complexidade dos ativos que as constituem, torna-se necessário categorizar os ativos. Tendo por base a tipologia de ativos do Grupo AdP e o trabalho de estruturação já realizado, no âmbito do presente trabalho os ativos foram agrupados pelas seguintes categorias: **construção civil e equipamentos**; sendo que os equipamentos subdividem-se em 3 tipos:

- **Equipamentos e instalações mecânicas/eletromecânicas:** contêm apenas componentes mecânicos, como é o caso das válvulas com atuação manual, ou aqueles que para além disso, contêm também componentes elétricos, como é o caso de compressores.

- **Instrumentação:** equipamentos que apenas se dedicam a medir ou indicar grandezas físicas, como por exemplo, analisadores e sondas.
- **Equipamentos e instalações elétricas:** constituídos apenas por componentes elétricos, assim como quadros elétricos.



Figura 9 - Infraestruturas do Grupo AdP (2018) [1].

Como base para o trabalho a desenvolver, analisou-se a evolução histórica das ferramentas de apoio à avaliação de condição de ativos em infraestruturas utilizadas pela AdP. Estas ferramentas foram desenvolvidas internamente e surgiram como resposta às necessidades identificadas, sendo alvo de constante evolução. Em 2013, quando a atividade começou a ser feita de forma mais estruturada, a ferramenta utilizada era o *Excel*. Nesta fase, foram criadas fichas para as infraestruturas, denominadas de fichas de aptidão funcional de infraestruturas, as quais eram impressas em papel e preenchidas manualmente aquando da visita à infraestrutura, sendo posteriormente analisadas e utilizadas para criar de raiz os *outputs* na referida ferramenta *Excel*. Em 2014, foi mantida a metodologia em *Excel*, mas as fichas passaram a ser preenchidas em *tablet*. Neste caso, a ferramenta já disponibilizava *outputs* diretos com elementos para relatórios, tendo o relatório final sido alvo de auditoria externa com resultados validados. Foram também criados manuais de apoio ao preenchimento e utilização das fichas. Posteriormente, foi desenvolvida uma aplicação em *Winforms C#* com base na metodologia anterior, que permitiu gerar *outputs* diretos com elementos para incorporar relatórios. Em 2017, foi desenvolvido de raiz um novo módulo de orçamentação, para permitir uma avaliação dos ativos e gerar automaticamente a avaliação de estado da infraestrutura. Por fim, em 2018, tornou-se possível avaliar as diversas tipologias de ativos, como equipamentos mecânicos, eletromecânicos, elétricos e construção civil caracterizando a anomalia identificada e a necessidade de intervenção para repor as devidas condições. Como *outputs* a ferramenta gera, de forma automática, relatórios individuais por anomalia com recurso a fotografias, lista de preços e orçamento.

4. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS FORNECIDOS

No presente capítulo são analisados dados com respeito a inspeções realizadas, são identificadas as tipologias de ativos do Grupo e é elaborada uma metodologia que permitirá estabelecer quais as inspeções aos ativos mais relevantes, com base nos descritores considerados.

4.1. METODOLOGIA DE EXTRAÇÃO DE DADOS

4.1.1. EQUIPAMENTOS

Por questões de confidencialidade as empresas em análise foram identificadas como 1, 2, 3 e 4. Foram analisadas 1228 fichas de aptidão funcional de equipamentos da empresa 1. É apresentado no Anexo A uma ficha, a título de exemplo. Nestas fichas, as informações consideradas relevantes para análise foram:

- Instalação: infraestrutura a que pertencia o equipamento e onde estava disposto (o seu local físico).
- Designação: o nome que identifica o ativo, por exemplo Quadro elétrico.
- Inspeção visual: Este campo divide-se em vários critérios como: Estado e aperto de ligações, operacionalidade de portas e fechaduras, fugas e derrames, corrosão e pintura, lubrificação, etc. Dos 3 tipos de equipamentos, cada um apresenta critérios exclusivos. Cada critério é classificado através de *checkboxes* (OK e Não OK). A caixa OK é assinalada se o ativo cumprir com sucesso o requisito do critério. No final existe uma caixa de comentários onde são descritas as anomalias. Por exemplo, na tipologia “equipamentos e instalações eléctricas”, se o ativo apresentar corrosão é assinalada a caixa “Não OK” no critério “Verificação de nódulos de corrosão”.
- Condições de funcionamento: composto por critério acerca do funcionamento atual do ativo. Por exemplo, se estava parado ou desativado, as suas grandezas em marcha, como caudal, pressão, etc.

Das fichas constavam ainda informações referentes à verificação do cumprimento do plano de manutenção preventiva, verificação de conformidade com diretivas, marca, modelo, número de série, ano de fabrico e fotografia.

As 1228 fichas estavam construídas em folhas de cálculo, mas a formatação era variável, ou seja, quando comparando duas fichas, os mesmos dados estavam em células diferentes. Daí não ter sido possível utilizar uma ferramenta que percorresse todas as fichas e extraísse automaticamente os dados relevantes para outra folha de cálculo. Portanto, todos os dados das fichas foram recolhidos manualmente.

Adicionalmente, foram analisadas mais 894 fichas de aptidão funcional da empresa 2, com a mesma informação que as anteriores. Nestas fichas a formatação estava uniformizada, possibilitando a criação de uma macro em Excel que efetuou repetidamente o processo de extração da informação.

Após compilação dos dados relevantes, elaborou-se uma lista com todos os ativos e respetiva informação de caracterização. Tendo em conta que a lista se tornou muito extensa, e era pouco relevante para o trabalho a desenvolver considerar os ativos que não apresentavam anomalias, decidiu-se apenas considerar aqueles que apresentavam pelo menos uma anomalia. Para a progressão do trabalho futuro, que passa por encontrar soluções para inspeção dos ativos, é fulcral que, para determinada tipologia de ativos, passem a ser registadas anomalias nas suas avaliações de condição, oferecendo assim, relevância aos ativos que geralmente apresentam maior frequência de deteção de anomalias. Do total dos 2122 ativos analisados, apenas foram considerados 732 (34,5%), referentes aos que apresentavam, pelo menos, uma anomalia.

Adicionalmente, foram ainda analisados dados da empresa 3 e 4. No entanto, estes dados não continham a informação sobre cada ativo individualizada por ficha, estando toda a informação da campanha de inspeção condensada apenas num ficheiro *Excel*. Na folha denominada de *Avaliações*, estava discriminado em cada linha o ativo, a infraestrutura e a unidade de tratamento ou etapa da infraestrutura a que pertencia. Cada ativo era avaliado nos seguintes critérios: construção civil, equipamentos eletromecânicos, instalações elétricas e instrumentação. Era atribuída uma classificação por critério e as anomalias eram descritas por extenso no campo de observações. Por exemplo, um motor elétrico tinha classificação *satisfatória* no campo dos equipamentos eletromecânicos com a seguinte observação: verifica-se corrosão superficial na base da caixa redutora e no motor dos parafusos de Arquimedes; válvula de guilhotina na saída dos parafusos de Arquimedes com fuga pela guilhotina. As outras naturezas foram preenchidas como *não aplicável*. A informação estava muito condensada e teria de ser extraída manualmente. Para além disso, as anomalias encontravam-se escritas por extenso. Assim, os dados foram extraídos deste ficheiro *Excel*, mas de outra folha denominada de *Melhorias*. Esta folha é gerada a partir da anterior, mas a sua informação é mais acessível e inteligível. Estava discriminado em cada linha: o equipamento, a natureza da melhoria, a anomalia e observações. Quando o campo da anomalia estava por preencher foi necessário consultar as observações e preencher manualmente, tendo em conta a anomalia identificada. Foram apenas recolhidos dados com respeito a ativos com anomalia(s). Estes dados complementaram os anteriores (das empresas 1 e 2), mas provinham essencialmente de ETAR e EEAR.

Foram contabilizados 1072 equipamentos no total, que resultaram da análise de dados das 4 empresas, excluindo aqueles que não apresentavam anomalias (Tabela 1). Desta lista de equipamentos, foram agrupados os repetidos, com o objetivo de criar uma listagem com a tipologia de ativos inspecionados com anomalias. Esta listagem encontra-se no Anexo B.

Na Figura 10 está representada a distribuição do número de tipologias diferentes de equipamentos que apresentaram anomalia(s) pelas famílias de infraestruturas consideradas. A laranja representa-se as infraestruturas que contactam com água residual (ETAR e EEAR). Como se constata o universo de ativos a inspecionar é bastante vasto. A partir do gráfico é possível ter a perceção da diversidade da tipologia de equipamentos que é necessário inspecionar numa campanha de inspeção a uma infraestrutura.

Tabela 1 – Distribuição da quantidade de equipamentos analisados pelas 4 empresas.

Equipamentos analisados	Empresa 1	Empresa 2	Empresa 3	Empresa 4	Total
Quantidade de equipamentos inspecionados	1228	894	-	-	2122
Quantidade de equipamentos inspecionados com anomalia(s)	347	385	276	64	1072

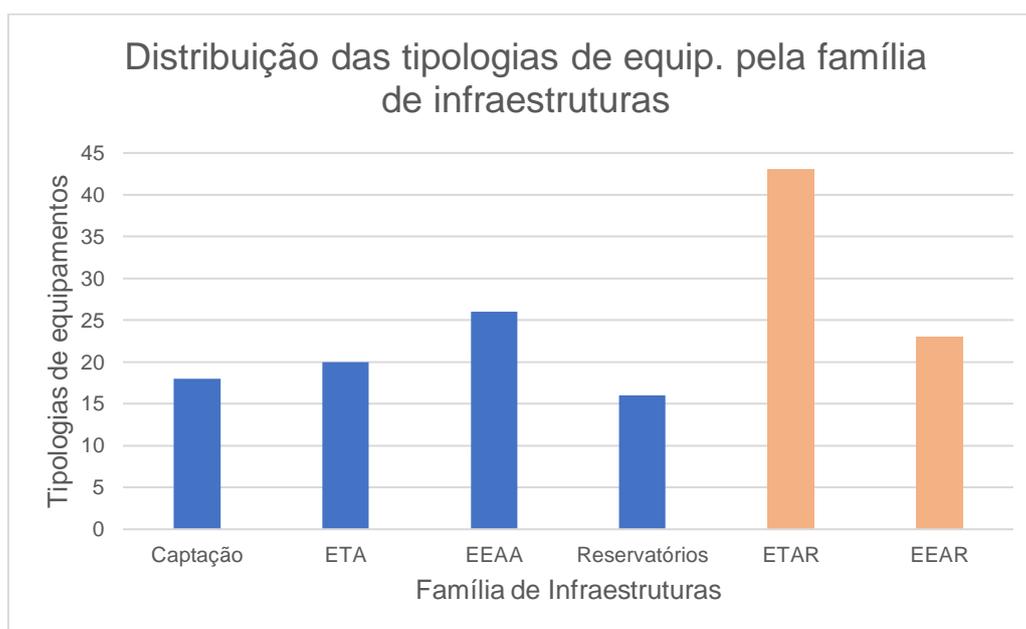


Figura 10 – Distribuição das diferentes tipologias de ativos com anomalias pelas famílias de infraestruturas.

4.1.2. CONSTRUÇÃO CIVIL

Relativamente aos ativos de construção civil, foram analisados relatórios de vistoria/peritagem a elementos de construção civil de infraestruturas da empresa 1. A informação estava disposta de forma totalmente diferente dos equipamentos, tornando necessária uma abordagem de análise diferente. Cada relatório correspondia a uma infraestrutura e no mesmo constava:

- Ativo: neste caso é um elemento da infraestrutura, por exemplo nos reservatórios, os ativos decompunham-se em envolvente exterior, acessos e revestimento interior, etc.
- Anomalias: patologias presentes nos ativos, estando estas descritas por extenso e por vezes redigidas de forma diferente para o mesmo tipo de anomalia.
- Estado de conservação do ativo: considerando a gravidade das anomalias, o ativo era caracterizado por uma classificação entre mau, fraco, razoável, bom e excelente.
- Vida útil remanescente estimada: uma previsão tendo por base o aspeto visual e o estado de conservação atual.
- Prioridade de intervenção: estando dependente do estado de conservação e o risco que constituí, por exemplo se está em contacto ou não com água potável.
- Proposta de solução para cada tipo de anomalia identificada.
- Estimativa orçamental de custo de reparação/manutenção.

Foram analisadas também fichas em *Excel* de avaliação de condição dos ativos de construção civil da empresa 2. Contendo estas a informação disposta de forma mais parametrizada e de fácil extração. Os ativos designavam-se de forma mais detalhada, por exemplo, no caso dos reservatórios, a envolvente exterior estava dividida em mais elementos: cobertura, paramentos, escadas exteriores, sistema de ventilação, drenagem de águas e outros componentes. Estes também eram classificados quanto à sua apreciação (equiparável ao *estado de conservação*). As anomalias/patologias constavam no campo das observações.

Por fim, os mesmos ficheiros das empresas 3 e 4 que foram usados para extrair informação relativamente aos equipamentos, também foram utilizados para construção civil. A disposição dos dados era idêntica e os ativos encontravam-se designados da mesma forma que os dados da empresa 2.

A designação ou terminologia dos ativos de construção civil em cada fonte analisada diferia um pouco e estava bastante detalhada, o que levaria a uma listagem bastante extensa. De forma a manter a coerência e a informação sintetizada, foi estabelecida, com a ajuda da AdP, uma terminologia genérica para cada tipologia de ativos de construção civil, sendo esta utilizada em todas as famílias de infraestruturas (exceto nas barragens):

- Exterior – Cobertura: inclui sistema de impermeabilização e drenagem de água.
- Exterior - Paramentos exteriores: inclui vigas, pilares, paredes, juntas e sistema de drenagem de água.
- Acesso ao interior: inclui vãos, escadas, gradeamentos, portas e tampas.
- Interior – teto: inclui revestimento.
- Interior – Paramentos: inclui vigas, pilares, paredes, juntas, laje intermédias e de fundo.
- Recinto: inclui vedação, arranjos exteriores e pavimentos.
- Outros componentes: iluminação, fixações, ventilação, etc.

Na verdade, cada infraestrutura tem as suas especificidades e características, mas sendo esta uma análise com fins académicos, seria prudente utilizar esta metodologia definindo

tipologias de ativos genéricas para cada família, sem sobrecarregar em demasia a análise com informação desnecessária. Para além destas tipologias para cada família de infraestruturas, ainda se acrescentou:

- ETA:
 - ✓ Canais
 - ✓ Decantadores.
 - ✓ Filtros.
 - ✓ Reservatórios de água tratada.
- ETAR:
 - ✓ Canais.
 - ✓ Decantadores.
 - ✓ Desarenador/Desengordurador.
 - ✓ Tanque de Arejamento.
 - ✓ Espessador de Lamas.
 - ✓ Digestores.
 - ✓ Silos (cal e armazenamento).
- Estações elevatórias:
 - ✓ Canais.

De notar que, no caso das estações elevatórias, não foi feita a distinção entre infraestrutura de água potável e água residual, como na análise dos ativos “equipamentos”, dado que do ponto de vista de construção civil esta distinção não se justifica. E ainda, na secção de construção civil foi introduzida a família de infraestruturas *caixas e posto de transformação*. Esta distinção não foi feita nos equipamentos, porque não existiam inspeções a equipamentos destas famílias ou então estes não se encontravam diferenciados (por exemplo, uma válvula poderia pertencer a uma caixa, e esta a um reservatório).

Apesar da família *barragens* estar incluída no grupo de construção civil, foram definidos ativos específicos e adequados a esta família de infraestruturas. O Grupo AdP detém duas tipologias principais de barragens: betão e aterro. A última pode diferenciar-se em terra e enrocamento (Figura 11).

Foi apresentado pela AdP numa reunião, o tipo de barragens do Grupo. Foi discutida a forma mais adequada, sem detalhar em demasia, de identificar a tipologia de ativos de construção civil das barragens (tendo em conta o pormenor na designação dos ativos das outras infraestruturas). Foram consideradas as seguintes tipologias:

- Betão:
 - ✓ Paramento de montante (emerso).
 - ✓ Coroamento.
 - ✓ Galerias.
 - ✓ Paramento de jusante.
 - ✓ Descarregadores de cheias.

- ✓ Descarregadores de fundo.
- Aterro:
 - ✓ Paramento de montante (terra).
 - ✓ Paramento de montante (enrocamento).
 - ✓ Coroamento.
 - ✓ Galerias.
 - ✓ Paramento de jusante.
 - ✓ Descarregadores de cheias.
 - ✓ Descarregadores de fundo.
- Torres de tomada de água.
- Câmara de Válvulas.
- Posto de Comando.



Figura 11 - Tipos de barragens do Grupo AdP [25] [26] [27].

Encontra-se no Anexo C a listagem da tipologia de ativos de construção civil inspecionados.

A construção destas listagens serviu para definir e identificar o universo de ativos do Grupo AdP a ser inspecionados. Esta informação é fulcral, pois esta “base de dados” possibilita no próximo capítulo estabelecer uma metodologia para priorizar os ativos cujas inspeções são mais relevantes para o âmbito da tese.

4.2. METODOLOGIA DE ANÁLISE DE DADOS

Uma vez identificadas as tipologias de ativos, torna-se necessário estabelecer uma metodologia que permita evidenciar as inspeções aos ativos identificados nos capítulos 4.1.1 e 4.1.2., ou seja que apresentem uma maior relevância de encontrar soluções de inspeção automatizadas.

O processo de quantificação e avaliação da relevância tem por base a quantidade de ativos de cada tipologia existentes no Grupo AdP e a severidade associada às inspeções desses mesmos ativos, encontrando-se representado no esquema da Figura 12.

Esta metodologia incorpora os princípios da inspeção baseada no risco, tal como definido no capítulo 2.2.4 - Inspeção com base no risco. Neste caso, o risco é representado pela relevância da inspeção de cada ativo. Numa análise de risco, a consequência é o impacto de um evento, podendo ser positivo (por exemplo, quando ocorrem ganhos) ou negativo (quando ocorrem perdas), função da gravidade. Nesta metodologia, optou-se por determinar a severidade como *proxy* da consequência, esta resulta da contribuição de diferentes descritores que caracterizam as inspeções aos ativos: tempo despendido, perigo, acessibilidade e paragem do ativo. A probabilidade, que considera a possibilidade de um evento prejudicial ocorrer, no âmbito das inspeções, seria muito difícil de quantificar, pois não existem registos na empresa de ocorrências ou acidentes nas atividades de inspeção. Então, tendo como informação disponível, a quantidade de cada tipologia de ativos no Grupo AdP, e existindo a necessidade de todos serem inspecionados no seu ciclo de vida, utilizou-se a quantidade de ativos como *proxy* para a probabilidade e como fator decisivo para a identificação das inspeções mais relevantes.

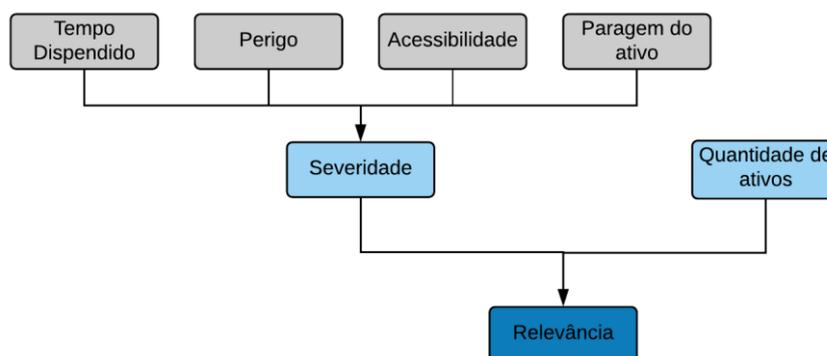


Figura 12 – Sistematização dos descritores considerados para a identificação da relevância.

Na aplicação desta metodologia adotou-se uma avaliação semi-quantitativa, baseada em várias informações qualitativas que foram categorizadas em valores numéricos. Para determinar a severidade associada à inspeção dos ativos, propôs-se uma matriz com o objetivo de avaliar cada inspeção através de vários descritores. Para cada descritor foi criada uma escala numérica par, de 1 a 4, em que 1 representa menor gravidade e 4 maior gravidade. Foi escolhida uma escala numérica par para evitar um ponto médio ou resposta neutra, pois o objetivo é obter uma resposta concreta para os descritores que foram escolhidos com a ajuda da AdP, tiveram como

base a segurança humana, os constrangimentos para o humano e as implicações para a instalação/infraestrutura (em que se insere o ativo) quando se procede à inspeção. Os descritores considerados foram os seguintes:

- **TEMPO DESPENDIDO POR ANO (TD):** produto da frequência anual da inspeção pelo tempo médio despendido por inspeção (em minutos), considerando apenas o tempo efetivo em que o humano está em contacto com o ativo.

Tabela 2 - Tempo despendido por ano durante a atividade de inspeção.

Tempo despendido por ano (minutos)	
<=10	1
10<x<=15	2
15<x<=30	3
>30	4

- **PERIGO (P):** representa o perigo durante a execução da inspeção. Relacionando a gravidade do perigo com a necessidade de utilização de equipamentos de proteção individual ou procedimentos adequados.

Tabela 3 - Perigos para o humano durante a atividade de inspeção.

Perigos para execução da inspeção	
O ativo e/ou meio envolvente não constituem qualquer perigo	1
O ativo e/ou meio envolvente apresentam perigos, minimizáveis com EPI.	2
O ativo e/ou meio envolvente apresentam perigos, minimizáveis com procedimentos adequados e EPI.	3
O ativo e/ou o meio envolvente apresentam perigos não mitigáveis com utilização de procedimentos ou EPI.	4

- **DIFICULDADE DE ACESSIBILIDADE HUMANA (AC):** aborda a existência de constrangimentos no acesso ao ativo aquando da sua inspeção. Podendo este estar num espaço livre ou confinado, e que para a realização da inspeção sejam necessários equipamentos auxiliares propositados à acessibilidade ou meios de apoio externos.

Tabela 4 - Dificuldade de acessibilidade humana para realização da inspeção.

Dificuldade de Acessibilidade Humana	
Acesso livre e sem constrangimentos. Sem necessidade de qualquer tipo de auxílio.	1
Acesso livre. Com equipamentos auxiliares propositados à acessibilidade humana.	2
Espaços confinados, com equipamentos auxiliares propositados à acessibilidade humana.	3
Ausência de equipamentos auxiliares à acessibilidade (escadas, degraus) EPC. Necessidade de utilização de meios de apoio externos.	4

- **NECESSIDADE DE PARAGEM DO ATIVO (PA):** constata a influência da inspeção no funcionamento do ativo/etapa/instalação. A realização da inspeção pode impedir o funcionamento do ativo, e este pode comprometer a performance/funcionamento da instalação.

Tabela 5 - Necessidade de paragem do ativo ou instalação para realização da inspeção.

Necessidade de Paragem do Ativo	
Sem necessidade de paragem do ativo/etapa/instalação	1
Necessidade de paragem do ativo, mas que não compromete a performance/funcionamento da instalação	2
Necessidade de paragem do ativo comprometendo o funcionamento da instalação e ou etapa	3
Paragem total da instalação e ou etapa	4

De referir que todas as escalas foram desenvolvidas com o apoio da equipa da AdP, sob forma de inquérito aos engenheiros que realizam estas inspeções, com base na sua experiência profissional, e que todas as inspeções descritas são inspeções visuais. Apesar de existirem algumas técnicas ou instrumentações auxiliares realizadas, como por exemplo termografia, estas não foram consideradas para esta análise.

De referir também que alguns dos descritores poderiam ter sido mais desenvolvidos ou mesmo acrescentados outros. Por exemplo, no caso do tempo despendido é apenas considerado um tempo efetivo de realização da inspeção, não é considerado o tempo de deslocamento até à instalação, a montagem de acessórios para iniciar a inspeção ou a quantidade de mão-de-obra necessária para realizar a inspeção. Concluindo, não é tido em conta o dispêndio em reunir as condições necessárias para iniciar a inspeção.

Posteriormente ao preenchimento da matriz, isto é, para cada descritor da inspeção a cada ativo foram atribuídos valores de 1 a 4, estes valores foram conjugados através de uma adição. Esta adição está representada na equação (2) e é definida como severidade, sendo as mais severas as que apresentam valor mais elevado. Foi utilizada uma adição para possibilitar a colocação de ponderações em cada descritor (as ponderações consideradas são multiplicadas

por cada descritor na equação (2). De seguida foi realizado um exercício de ponderação dos diferentes descritores. Dependendo dos valores de output da severidade, o peso de cada descritor foi ajustado de forma iterativa, para que no final se obtivesse um resultado coerente com a experiência prática.

$$Severidade = 0,1 \times TD + 0,2 \times P + 0,2 \times AC + 0,5 \times PA \quad (2)$$

A severidade é um dos fatores decisivos à escolha das inspeções aos ativos que se pretendem explorar e que resultará no caso de estudo. É importante referir que a severidade não está relacionada com a ocorrência de falhas ou com a importância do ativo, esta apenas caracteriza a inspeção a um ativo, e é o termo escolhido para o resultado da aglomeração dos descritores assumidos. A matriz encontra-se preenchida no anexo D.

Na Figura 13 apresentam-se as tipologias de ativos que foram identificadas com severidade mais alta, destacando-se o interior dos reservatórios, alguns órgãos de construção civil das ETAR e alguns equipamentos que contactam com água residual (válvulas comporta, ponte raspadora, grade mecânica).

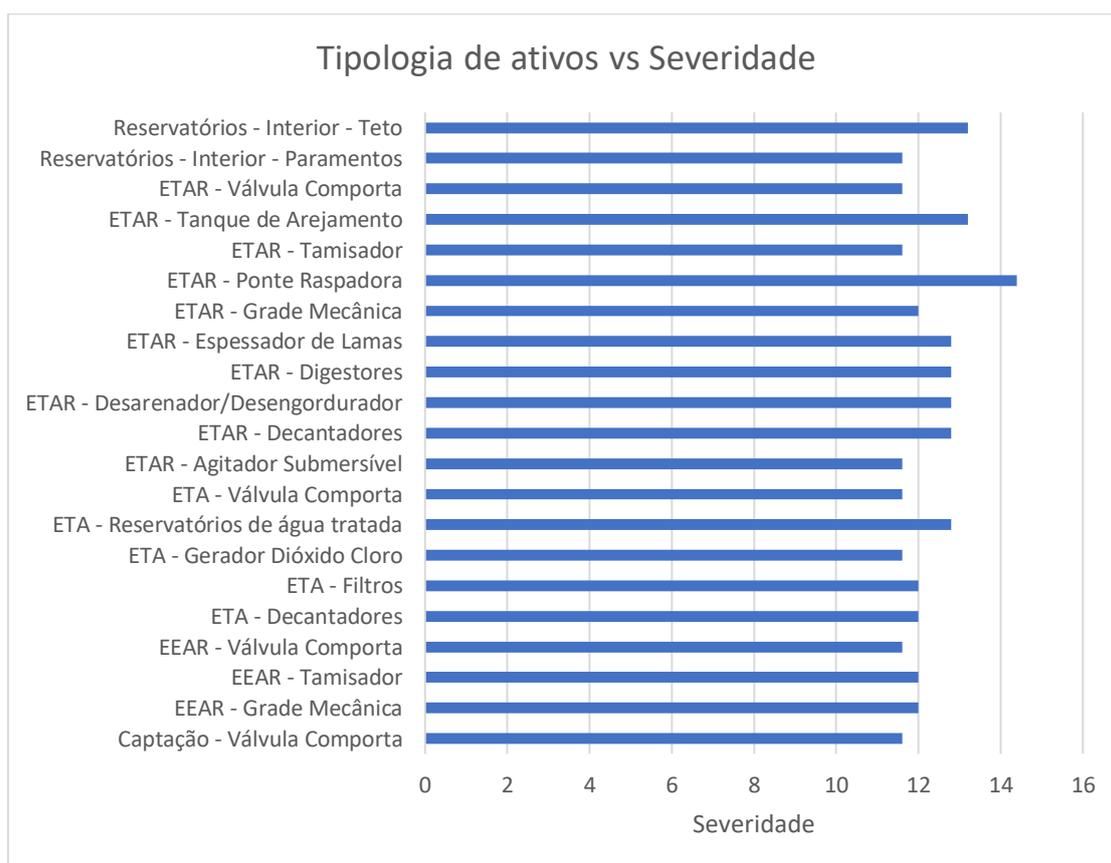


Figura 13 - Tipologia de ativos vs severidade.

Para além da severidade, a quantidade de ativos também foi considerada como um fator decisivo na escolha das inspeções aos ativos para o caso de estudo. A partir de um ficheiro de inventariação de 4 empresas do Grupo, foi extraída a quantidade de infraestruturas de cada

família (isto é, a quantidade de infraestruturas de captação, ETA, etc.). E desse mesmo ficheiro foi recolhida a quantidade de ativos das tipologias identificadas (isto é, quantas bombas centrífugas existem nas 4 empresas, por exemplo). Mais tarde, a AdP facultou a quantidade de infraestruturas total do Grupo, o que permitiu estimar a quantidade total de cada tipologia de ativos existente no Grupo. Na Figura 14 apresenta-se a tipologia de ativos cuja quantidade é mais elevada no Grupo AdP.

Assim, de modo a identificar quais as tipologias de ativos com maior relevância (relação entre severidade e maior quantidade de ativos), foi construído um gráfico de severidade versus quantidade de ativos, em que cada ponto representa uma tipologia de ativos. No eixo das abcissas representa-se a quantidade de ativos e nas ordenadas a severidade. Como se reparou as listas de tipologias de ativos “equipamentos” e “construção civil” são bastante longas, assim apresenta-se o gráfico com a escala da quantidade de ativos a partir de 10 (para excluir tipologias em descontinuidade ou que não são frequentes) e a escala da severidade a partir de 8. Isto para não sobrecarregar em demasia o gráfico. Para a escolha das inspeções a serem exploradas no caso de estudo, consideraram-se, de forma qualitativa aquelas que estavam mais afastadas do eixo da origem, sendo esta escolha feita em conjunto com o Grupo AdP.

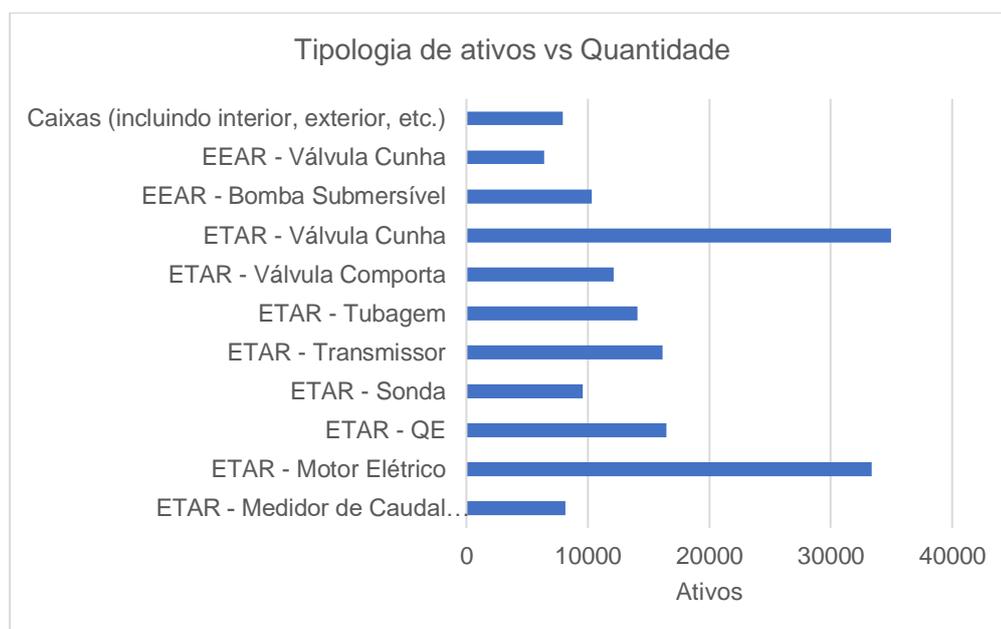
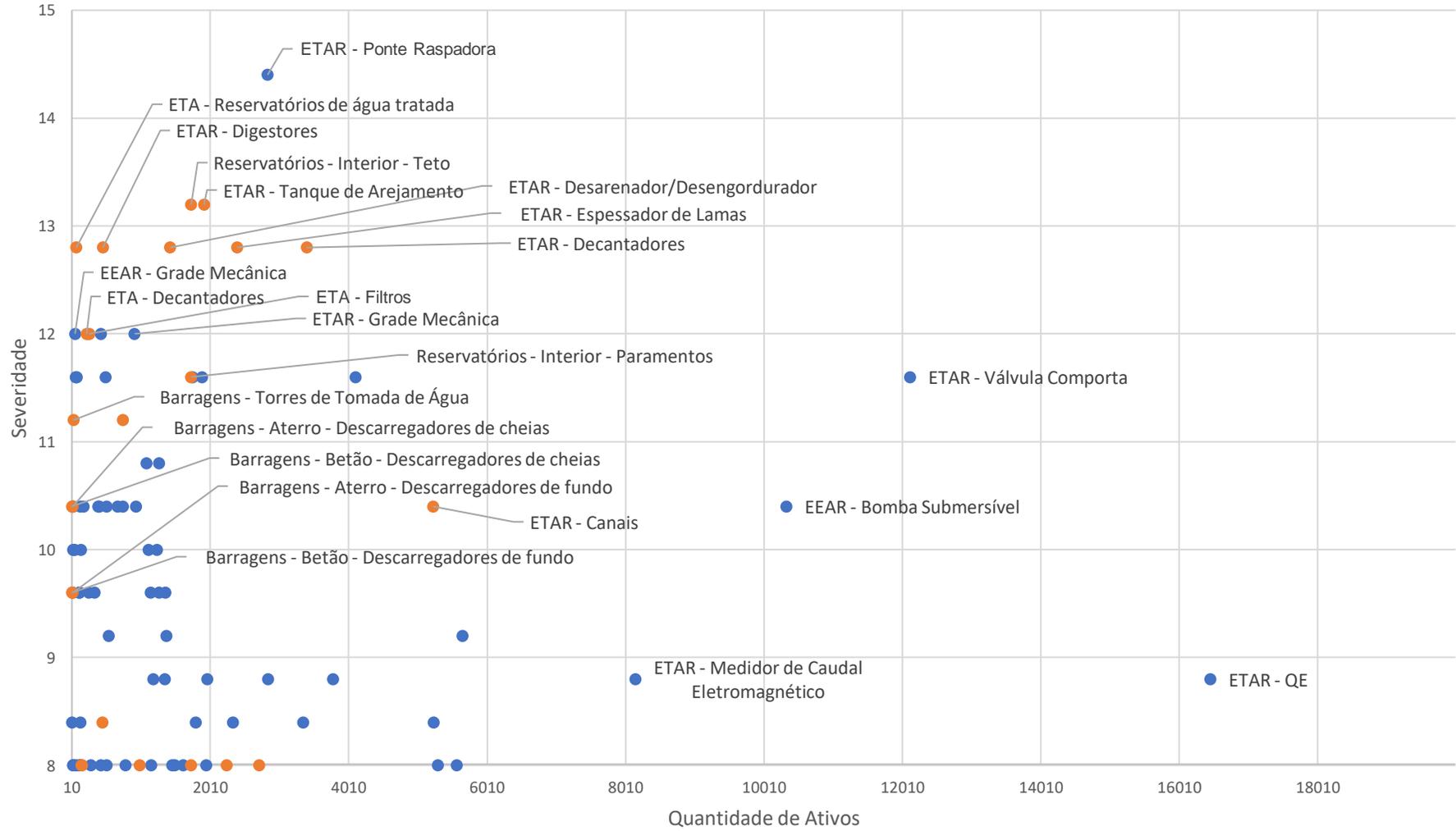


Figura 14 – Tipologias de ativos em quantidade mais elevada no Grupo AdP.

Esta metodologia pode ser aplicada e utilizada noutros contextos (ou mesmo a outros setores) com o mesmo objetivo, desde que os parâmetros sejam ajustados à análise específica, isto é, os descritores e as ponderações associadas devem ser ajustados à realidade onde irá ser aplicada a metodologia.

Severidade vs Quantidade de Ativos

● EQ ● CC



Tendo presente os resultados obtido, escolheram-se para o caso de estudo os seguintes ativos:

- **CONSTRUÇÃO CIVIL:**
 - ✓ Canais (ETAR).
 - ✓ Desarenador/Desengordurador (ETAR).
 - ✓ Decantadores (ETAR).
 - ✓ Tanque de Arejamento (ETAR).
 - ✓ Espessador de lamas (ETAR).
 - ✓ Digestor (ETAR).
 - ✓ Paramentos interiores e teto (Reservatórios).
 - ✓ Torres de tomada de água (Barragens).
 - ✓ Descarregadores de cheias (Barragens).

- **EQUIPAMENTOS:**
 - ✓ Grade Mecânica (ETAR e EEAR).
 - ✓ Ponte Raspadora (ETAR).
 - ✓ Válvula Comporta (ETAR e EEAR).

Como se observa pelo gráfico, cada ponto representa uma tipologia de ativos, estando os pontos de interesse rotulados. Optou-se por não rotular todos os pontos, caso contrário a informação ficaria sobreposta e impercetível. Apesar de alguns pontos terem uma severidade e quantidade elevada, não foram considerados uma vez que, ou não constituíam grande interesse da parte da AdP em serem explorados (por exemplo, quadros elétricos e válvulas de cunha) ou já tinham sido explorados em teses anteriores em parceria com a empresa, como é o caso das bombas submersíveis.

E ainda, em alguns destes ativos já referidos, não se justifica a sua escolha, apesar da quantidade elevada, devido ao facto de a inspeção requerer muita atividade humana, como abertura de portas, no caso dos quadros elétricos e acionamento manual, no caso das válvulas. Atividades estas que para serem realizadas são imprescindíveis da ação humana.

Com respeito às barragens, apesar da sua severidade ser um pouco abaixo do que se esperava, facilmente se justifica pelo facto de não estarem implícitos na análise alguns fatores associados à segurança e risco. A segurança de barragens constitui um motivo de preocupação para a sociedade, pois representa potenciais riscos para as pessoas e bens localizados nos vales a jusante, face à possibilidade, embora remota, de colapso da estrutura. Portanto, estes fatores oferecem uma importância maior à inspeção de barragens que não foi considerado. Apesar da quantidade também ser reduzida, importa referir que uma infraestrutura como uma barragem implica, geralmente, uma maior área de inspeção.

5. CASO DE ESTUDO

O presente capítulo apresenta soluções tecnológicas para as inspeções dirigidas ao conjunto de ativos escolhidos por apresentarem maior relevância, nos termos da metodologia desenvolvida. Estas soluções consistem em técnicas e métodos que visam automatizar a inspeção.

Na primeira secção são descritos os ativos escolhidos e seu enquadramento na infraestrutura. A segunda secção descreve as inspeções atuais, como são efetuadas, anomalias que devem ser procuradas e anomalias tipicamente identificadas durante a inspeção. Na terceira secção são abordadas soluções tecnológicas que visam a automatização das inspeções.

5.1. DESCRIÇÃO DOS ATIVOS ESCOLHIDOS

GRADE MECÂNICA

A gradagem é uma das primeiras etapas de tratamento em estações elevatórias e ETAR. É composta por um conjunto de grades ou grelhas montadas num ou vários canais por onde circula a água residual, que têm como objetivo remover plásticos, metais, madeira, tecidos e outros resíduos sólidos, para que estes não danifiquem ou entupam os equipamentos e a tubagem a jusante [28]. As grades são constituídas por barras paralelas de secção paralelepípedica, cilindra ou mista, espaçadas uniformemente, colocadas verticalmente ou inclinadas no canal por onde passam as águas residuais, retendo os sólidos com dimensão superior ao espaçamento entre as barras [29]. Após a retenção, os sólidos são recolhidos e armazenados para posterior encaminhamento a destino próprio [30].

As grades mecânicas ilustradas na Figura 15 têm um sistema de limpeza automática. Os materiais sólidos retidos na frente da grelha são removidos por um pente (acionado por correntes e estas por um motor elétrico), que ao atravessar as barras recolhe os detritos para um tabuleiro perfurado, permitindo o escoamento da água (que por ser muito poluída, volta a entrar na linha de tratamento). Estas ainda podem ser compostas por outros componentes complementares como tampas e painéis laterais metálicos, painéis de controlo e um quadro elétrico associado. As grades mecânicas são colocadas em ETAR de média e grande dimensão e em praticamente todas as novas ETAR, tendo em conta a mão-de-obra reduzida e a indução de melhores condições de escoamento e remoção de sólidos. São essenciais para caudais grandes ou para águas residuais com elevado teor de sólidos.

A instalação de outras grades a montante, nomeadamente com limpeza manual, pode ser ponderada. Estas colocam-se a 60° a 80° com a horizontal, de modo a facilitar a operação de limpeza, e são colocadas em ETAR de pequenas dimensões. Os materiais retidos devem ser removidos com frequência, de modo a não impedir a passagem do efluente, evitando a subida do nível a montante, que no limite pode provocar transbordos e inundações.

Por norma a operação de gradagem inclui mais do que uma grade. São colocadas em série no mesmo canal, tendo a grade a jusante menor espaçamento entre barras do que a grade a montante, aumentando assim a possibilidade de remover sólidos de diferentes dimensões com maior eficiência. Também existe uma grade redundante (Figura 16), como que uma reserva instalada num canal paralelo, que assegura o *by-pass* ao circuito principal, funcionando quando a grade principal do circuito

se encontra indisponível (opta-se frequentemente por uma grade de limpeza manual para grade de reserva) [29].

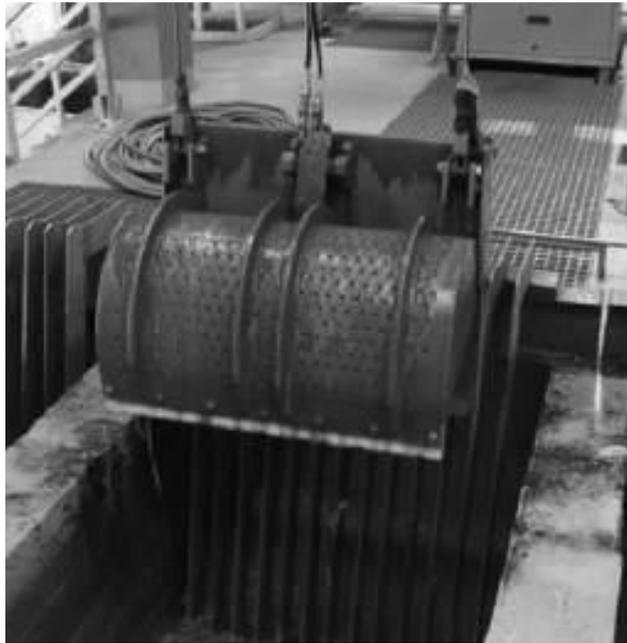


Figura 15 - Grade mecânica [29].

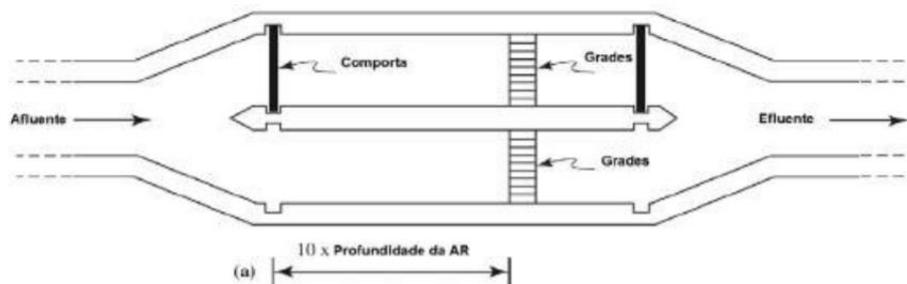


Figura 16 - Circuito de gradagem com by-pass ao circuito principal. [29].

CANAIS

Neste trabalho consideram-se apenas os canais abertos (Figura 17) ou de superfície livre. São canais que geralmente se encontram na obra de entrada e no tratamento preliminar das ETAR. A sua função é encaminhar a água residual que chega à ETAR para as etapas de tratamento a jusante. Nos canais inserem-se os equipamentos de remoção de partículas sólidas, como as grades mecânicas e os tamisadores. Para além destes, podem também ser instalados instrumentos para medição de caudal, geralmente medidores ultrassónicos que medem o nível do líquido. Na grande maioria dos casos, os canais são de secção retangular ou trapezoidal.



Figura 17 – Exemplo de canal aberto em obra de entrada, fornecido por AdP.

VÁLVULAS DE COMPORTA

As válvulas de comporta (Figura 18) são ativos bastante utilizados em canais, compostas por comportas verticais deslizantes, chamadas de guilhotina, que permitem a passagem de água no canal. A regulação da passagem de água é realizada pelos operadores, podendo controlar o escoamento através da abertura da comporta totalmente, parcialmente ou através do fecho da mesma. O seu acionamento pode ser feito de forma manual, pneumática, hidráulica ou elétrica. Na Figura 18 observa-se uma válvula de comporta com acionamento manual através de um volante, estando este ligado ao um fuso que assegura o deslocamento vertical da guilhotina.



Figura 18 – Exemplo de válvula de comporta de canal de entrada, fornecido por AdP.

DESARENADOR / DESENGORDURADOR

O desarenador é um órgão de tratamento utilizado em ETAR, que tem como objetivo a remoção de partículas sólidas inorgânicas com dimensão até 0,3 mm (por exemplo: areias e partículas metálicas) – desarenação, para proteção dos equipamentos a jusante (bombas, válvulas e tubagens) contra o desgaste por abrasão e, ainda, para evitar a deposição destas partículas nos canais, tubagens e posteriores órgãos. Existem vários tipos de desarenadores.

A desarenação processa-se a seguir à gradagem. O desarenador retém as águas residuais durante algum tempo para que ocorra a sedimentação das partículas, requerendo assim uma baixa velocidade de escoamento. Este órgão pode consistir num simples canal de secção rectangular ou trapezoidal com fundo inclinado em sentido descendente, que promove a entrada da água residual (tipo

mais utilizado nas ETAR pequenas). As partículas sedimentadas são arrastadas por um parafuso transportador que as empurra para um poço localizado à entrada do tanque, podendo também ser utilizadas correntes e lâminas raspadoras em vez dos parafusos transportadores.

Os desarenadores arejados são órgãos constituídos por tanques de planta retangular, com escoamento horizontal, com injeção de ar difuso num dos lados do fundo do tanque, provocando assim um escoamento da água em espiral (Figura 19) [29].

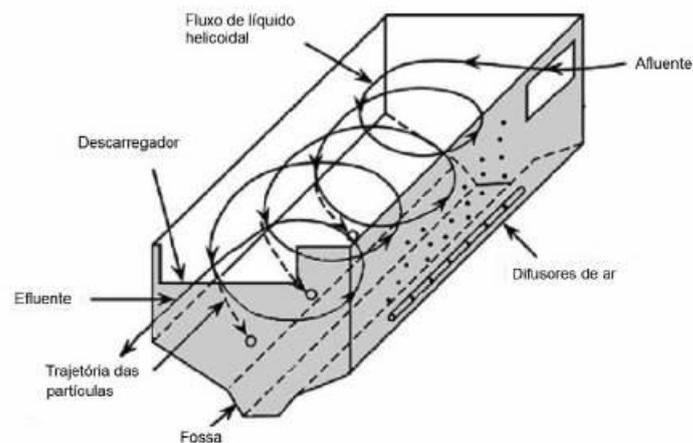


Figura 19: Exemplo de um desarenador arejado [29].

Por último, existem os desarenadores tangenciais e os desarenadores tipo vórtice, tanques formados por uma parte cilíndrica sobreposta a uma parte cónica, onde é provocado um movimento de vórtice. O objetivo é capturar por ação gravítica, as partículas para o fundo do desarenador. O vórtice pode ser provocado mecanicamente por agitadores ou hidraulicamente pela admissão tangencial da água na parte cilíndrica. As Figura 20 e Figura 21 representam respetivamente o tipo tangencial mecanizado e o tipo hidrociclone [29].

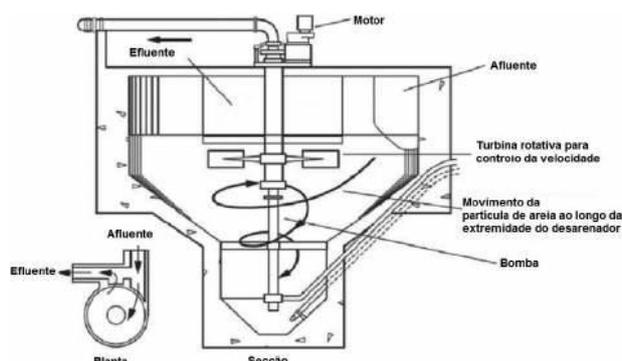


Figura 20 - Desarenador tangencial mecanizado [29].

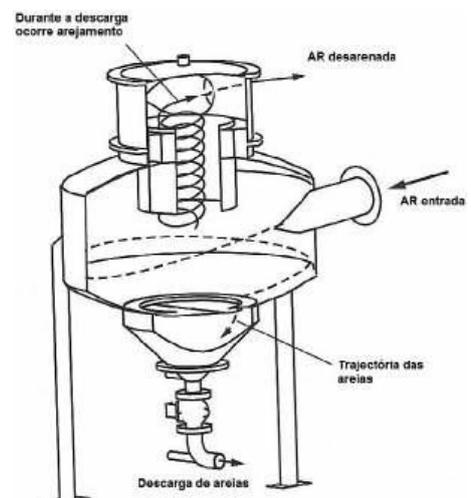


Figura 21 - Desarenador do tipo hidrociclone [29].

O desengordurador é um órgão que tem como objetivo a remoção de óleos e gorduras presentes no efluente, já que estes compostos podem interferir nos processos de tratamento físico e

biológico da ETAR, assim como prejudicar o meio hídrico. Este processo, tal como a desarenação, também é conseguido por um método gravítico, apesar de depender das características do efluente, que poderão exigir a aplicação de outras técnicas (como o aquecimento do efluente, a destilação e tratamento químico seguido de centrifugação, filtração ou ultrafiltração). O processo de desengorduramento pode ocorrer em órgão próprio ou em conjunto com a desarenação (para este estudo foi considerado a agregação destes dois ativos). A remoção dos óleos e gorduras é sempre feita à superfície, pela ação de raspadores que transportam depois as substâncias para o exterior [31]. Os desengorduradores também requerem velocidades de escoamento baixas.

DECANTADORES

A decantação nas ETAR tem por objetivo a separação das partículas em suspensão na água residual, através da sedimentação por ação da gravidade, para obtenção de um líquido clarificado. Esta operação é utilizada em diferentes níveis do tratamento das águas residuais. No tratamento primário, sob a forma de decantação primária, o objetivo é remover os sólidos suspensos facilmente sedimentáveis, facilitando a remoção de poluentes dissolvidos, em suspensão fina e coloidal nas etapas de tratamento subsequentes. No tratamento secundário, sob forma de decantação secundária, o objetivo é remover os flocos biológicos formados no processo biológico [29].

Os decantadores primários (DP) e os decantadores secundários (DS) são geralmente órgãos separados, mas que integram qualquer ETAR em arejamento convencional. O DP está localizado a jusante da gradagem mecânica e dos desarenadores, enquanto que o DS é colocado a jusante do tratamento biológico. Em ETAR em que a solução de tratamento biológico recorre ao arejamento prolongado, não existe etapa de decantação primária. Os decantadores têm configurações idênticas, geralmente circulares (Figura 22 Figura 22 - Decantador circular [32].), e utilizam a gravidade para a separação dos sólidos.

Na decantação primária, a remoção de poluentes faz-se por dois mecanismos: a sedimentação, que dá origem às lamas que se acumulam no fundo do decantador, e a flotação dos sobrenadantes, que origina as escumas. A decantação secundária é parte integrante do processo de tratamento biológico, destinando-se essencialmente à separação dos flocos da biomassa desenvolvida no reator biológico, os quais são predominantemente constituídos por microrganismos (matéria orgânica) [29].



Figura 22 - Decantador circular [32].

A remoção dos sólidos que assentam no fundo dos decantadores é feita por lâminas raspadoras, que se encontram presas à ponte raspadora, e que empurram estes sólidos para uma extremidade (no caso dos decantadores retangulares) ou para o centro (no caso dos decantadores circulares). Os sólidos entram assim para um poço de lamas, de onde são extraídos por bombagem ou pressão hidrostática, seguindo para a linha de tratamento de lamas. As escumas que se formam à superfície são removidas para posterior tratamento, pela mesma ponte raspadora que remove os sólidos para o poço de lamas, mas também por um raspador superficial do líquido [29].

PONTE RASPADORA

A ponte raspadora (Figura 23) executa um movimento de rotação em torno do eixo central do decantador ou um movimento de translação ao longo do decantador retangular. Como referido, a ponte raspadora é composta por um raspador de fundo, que se encarrega de remover os sólidos depositados no fundo do decantador, e por um raspador superficial, que possibilita a remoção das escumas que se formam na superfície. Os raspadores normalmente estão ligados ou suspensos ao passadiço que facilita o acesso pedonal da periferia ao apoio central. A ponte raspadora aplicada num decantador central, como é o caso mais comum em ETAR, tem geralmente uma das extremidades apoiada no centro do decantador, através do apoio central, e a outra extremidade na periferia do tanque, através de uma roda. Esta desloca-se pelo acionamento periférico das rodas através de um motor elétrico, alimentado por um coletor de escovas. Os raspadores de fundo podem estar suspensos através de uns tirantes ligados ao passadiço ou podem ser suportados por uma estrutura ligada ao passadiço e que assenta no fundo do decantador através de umas rodas.



Figura 23 - Ponte raspadora de um decantador [29].

TANQUE DE AREJAMENTO

O arejamento é a operação através da qual o oxigénio molecular (O_2) é transferido da fase gasosa (atmosfera) para a fase líquida (água residual). O objetivo é manter um determinado teor de oxigénio dissolvido na água residual e manter a agitação da massa líquida, de modo a garantir que os sólidos se mantenham em suspensão. Esta operação ocorre num tanque de arejamento (Figura 24), onde um arejador específico é instalado para forçar o arejamento, seja por difusão de ar comprimido ou de oxigénio puro liquefeito na água residual, seja por dissolução do ar atmosférico na massa líquida (através da agitação do líquido) [29].



Figura 24 - Tanque de arejamento numa ETAR em *West Lafayette* [33].

ESPESSADOR DE LAMAS

Na fase sólida, ou seja, no tratamento de lamas geradas na ETAR foram considerados os órgãos: espessadores de lamas e digestores de lamas. O espessamento tem como objetivo reduzir o volume das lamas afluentes à fase sólida, por redução do seu teor em água, diminuindo as dimensões

e o custo de investimento dos órgãos e etapas de tratamento subsequentes. Os principais processos de espessamento de lamas são: espessamento gravítico, espessamento por flotação com ar difuso e o espessamento mecânico. A água removida das lamas (escorrências), apresenta um elevado teor de contaminantes e é geralmente conduzida para a obra de entrada da ETAR para tratamento. Do ponto de vista de construção civil, o espessador gravítico tem formas muito idênticas a outros órgãos já abordados, como os tanques de sedimentação ou os decantadores [34].



Figura 25 - Espessador gravítico de lamas [35].

DIGESTORES DE LAMAS

À fase do espessamento segue-se a estabilização de lamas, que visa reduzir o potencial de putrefação, remover parcialmente os microrganismos patogênicos e eliminar odores. A estabilização pode ser aeróbia (na presença de oxigênio) ou anaeróbia (na ausência de oxigênio). Nas ETAR de maior dimensão do Grupo AdP predomina a segunda, a qual ocorre em digestores anaeróbios. Estes digestores (Figura 26) são normalmente tanques de betão armado circulares fechados.



Figura 26 - Digestores anaeróbios da ETAR do Choupal [36].

PARAMENTOS INTERIORES E TETO (RESERVATÓRIOS)

No abastecimento, os reservatórios têm como finalidade compensar e regularizar as flutuações de consumo de água face à adução, constituir reservas de emergência, equilibrar as pressões na rede de distribuição e regularizar o funcionamento das bombagens. Classificam-se em enterrados, semi-

enterrados e elevados. Quando não é possível a construção do reservatório em solos elevados nas proximidades da área de distribuição, torna-se necessária a utilização de reservatórios elevados [37]. A sua forma pode ser circular ou retangular. Acerca do ativo escolhido, o interior (Figura 27), este é composto pela laje de cobertura, pilares, vigas (dependendo da dimensão), juntas construtivas e paramentos. Todos os componentes estruturais são revestidos de forma a garantir a impermeabilização.



Figura 27 - Interior do reservatório de água potável em Houston [38].

TORRE DE TOMADA DE ÁGUA

As torres de tomada de água são estruturas que têm como objetivo o aproveitamento de recursos hídricos superficiais de linhas de águas naturais. A água captada tem como principal destino o abastecimento público, utilização agrícola e produção de energia [39]. Numa barragem, as torres de tomada de água (Figura 28) localizam-se na albufeira, podendo ter uma ou mais entradas de água. O acesso é feito pelo coroamento da barragem, através de uma ponte de acesso. As torres dividem-se em: torre de tomada de água molhada (cujo interior contém água, que está ao mesmo nível da água da barragem) e torre seca (que não contém água no interior).

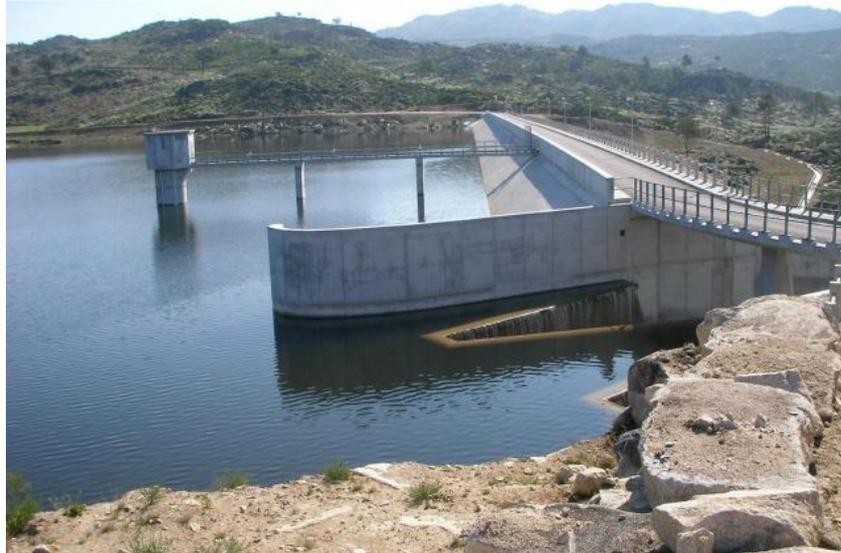


Figura 28 - Torre de tomada de água da barragem do Pinhão [40].

DESCARREGADOR DE CHEIAS

O descarregador de cheias é um órgão de segurança da barragem, uma estrutura criada para garantir o escoamento das cheias ou do caudal excedente na albufeira, de forma controlada. Estes órgãos podem ser construídos em várias localizações relativamente à barragem. No caso dos descarregadores sobre a barragem (Figura 29), que são maioritariamente empregues nas barragens de betão, a sua descarga pode ser controlada por comportas. A lâmina de água pode atingir diretamente o leito do rio ou ser guiada por um canal. Os descarregadores por orifício(s) (Figura 30) construídos no paramento da barragem, são obrigatoriamente controlados por comportas. Os jatos de água saídos dos orifícios podem atingir o leito do rio próximo do pé da barragem, longe do pé ou ser direcionados para a atmosfera. Os descarregadores em canal de encosta (Figura 31), geralmente utilizados nas barragens de pequena e média dimensão, também podem ter a sua descarga controlada por comportas [41].



Figura 29 - Descarregador de cheias sobre a barragem – Barragem das Olgas [25].



Figura 30 - Descarregador por orifícios através da barragem – Barragem de Corgas [70].

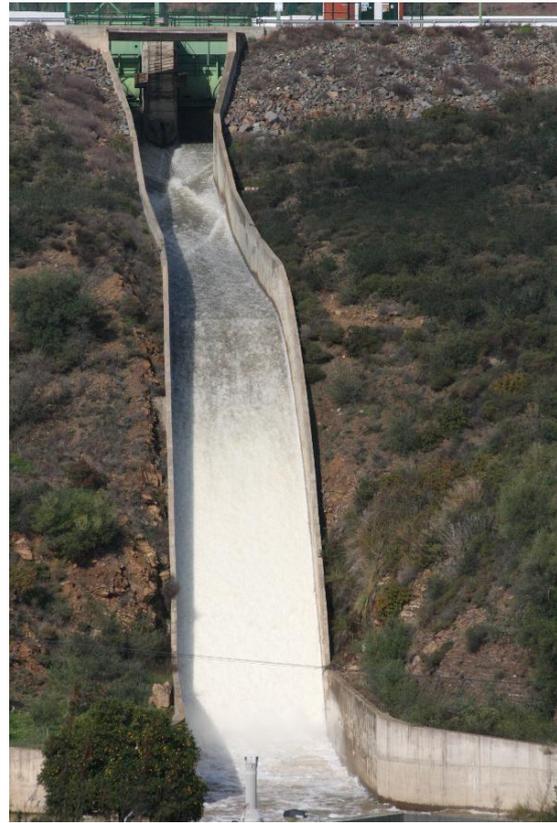


Figura 31 - Descarregador em canal de encosta – Barragem de Beliche [71].

5.2. ANÁLISE ÀS INSPEÇÕES ATUAIS DOS ATIVOS ESCOLHIDOS

Os órgãos de construção civil presentes em ETAR, os reservatórios de água e os órgãos das barragens (descarregadores de cheias e torres de tomada de água) têm em comum o facto de serem construídos em betão armado, salvo raras exceções. O betão revela-se um excelente material de construção, pelo que tem vindo a ser utilizado na construção de quase todo o tipo de infraestruturas. Demonstra ser bastante durável, resistente à compressão e, com a introdução das armaduras ao betão, passou também a providenciar uma boa resistência à tração. No entanto, com a inserção das armaduras no betão surge um novo problema: a durabilidade do betão. Quando o aço embutido corrói, surgem fissuras e destacamentos no betão, consequências que, não só reduzem a integridade estrutural do aço, como também permitem que elementos prejudiciais entrem em contacto com o betão, aumentando a sua deterioração [42]. Para além destes fenómenos, outros problemas que também afetam a durabilidade do betão e reduzem a sua vida útil serão discutidos posteriormente.

Todas as estruturas de betão deterioram-se com o tempo. A taxa de deterioração é função de dois fatores: a qualidade do betão e o meio envolvente. A qualidade do betão é referente às propriedades da composição do betão, como o rácio água/cimento, o tipo de cimento, o tamanho e dureza do agregado e o ar incorporado. A qualidade depende também do processo produtivo das estruturas de betão, como a compactação, proteção e cura.

A água potável ou residual será, nestes ativos, o meio envolvente mais agressivo. No caso dos tanques e reservatórios, o contacto contínuo com a água sujeita-os a ciclos de humidade-secagem (*wet-dry cycles*), gelo-degelo, ataques químicos e abrasão. Mesmo o betão com boa qualidade irá deteriorar-se nestas condições (a uma taxa inferior do que um betão de fraca qualidade). Por esta razão, é recomendável uma proteção do betão, de forma a aumentar a durabilidade. A melhor altura para a aplicação é quando este é recente, antes que agentes químicos agressivos, como ácidos, sais e sulfatos entrem em contacto com o betão e o danifiquem. Nos tanques que não tenham uma proteção adequada, notar-se-ão os efeitos da exposição na segunda ou terceira década de serviço, sob forma de fissuras, destacamentos e fugas [42].

Uma das causas mais comuns na deterioração do betão armado é a corrosão nas armaduras. Na presença de humidade e oxigénio, o aço irá corroer se não for protegido. Em condições normais, a alta alcalinidade do novo betão (pH entre 12 e 14) cria uma camada protetora natural de óxido de ferro envolta do aço das armaduras, conhecida como camada passiva. Desde que esta camada esteja intacta, o aço está protegido contra a corrosão. Em contrapartida, com o passar do tempo, devido à carbonatação ou à concentração de iões de cloro, o valor do pH decresce. Perdendo a alcalinidade do betão em volta da armadura e a camada passiva, o processo de corrosão inicia-se. Quanto menor a qualidade do betão, maior será a sua permeabilidade, e conseqüentemente, permitirá que a água e o oxigénio penetrem mais facilmente, promovendo a corrosão. A corrosão forma-se na camada superficial das armaduras, aumentando o volume das mesmas até 2 a 6 vezes o volume inicial. Esta expansão criará forças de tração elevadas dentro do betão, e uma vez que este é relativamente fraco quando submetido a tensões de tração, formam-se fissuras para aliviar estas tensões. Na presença de fissuras, o processo acelera, pois a armadura fica mais exposta aos agentes químicos agressivos [42]. A ocorrência de corrosão nas armaduras reduz a sua secção, e conseqüentemente a capacidade resistiva do elemento.

Outros mecanismos de deterioração do betão armado nos tanques de água potável e residual são:

- Abrasão: resulta dos efeitos abrasivos dos sedimentos, areias, britas e outros resíduos em contacto com o betão, causando a sua erosão.
- Ataque químico: na presença de ácidos e de água com baixo pH, a água acídica dissolve a matriz cimentícia, diminuindo a integridade estrutural do betão. Além disso, os sulfatos contidos na água reagem com o aluminato tricálcico do cimento, formando um composto expansivo denominado de etringite. As expansões conseqüentes causam tensões internas e conseqüentemente, a formação de fissuras no betão. Adicionalmente, os ciclos de humidade-secagem nas marcas de nível da água nos tanques acentua o impacto do ataque dos sulfatos.

- Ciclos de gelo-degelo: a congelação da água origina um aumento de volume de cerca de 9%, pelo que a água contida nos poros do betão origina uma expansão do mesmo, o que provoca microfissuras que resultam em danos de maior dimensão já abordados.

No contexto deste trabalho e consoante a informação analisada no capítulo 4, as inspeções realizadas são inspeções visuais (salvo algumas exceções), em que um técnico especializado, através da sua sensibilidade e capacidade de perceção, relata e avalia a condição do ativo, identificando, quando possível, as suas anomalias qualitativa e quantitativamente.

CONSTRUÇÃO CIVIL

Relativamente aos ativos escolhidos que são construídos em betão armado: canais, decantadores, tanques (desarenador, arejamento, espessamento, digestores), reservatórios, torres de tomada de água e descarregadores de cheias, a sua inspeção completa é apenas possível com a paragem do ativo e quando estão reunidas todas as condições de segurança. No caso dos tanques e decantadores, a inspeção implica o esvaziamento. Evidentemente, podem existir redundâncias destes órgãos que permitam a paragem dos mesmos sem impacto no desempenho da instalação, mas na grande maioria das vezes, não é possível realizar uma inspeção completa do ativo.

Geralmente, são feitas inspeções apenas à parte exterior ou visível do ativo, que não comprometa paragens, exposição ao perigo ou necessidade de meios externos. Nos órgãos das ETAR e canais, a existência de redundâncias é rara e o esvaziamento total destes tanques para ações de inspeção é impraticável, por questões legais e ambientais, sendo feita uma inspeção à condição exterior visível do ativo. Através da experiência e sensibilidade do inspetor, a condição exterior é extrapolada para as partes não visíveis (submersas). No entanto, a realização da inspeção pode coincidir com uma ação de manutenção que envolve a paragem do ativo.

No caso dos reservatórios, pode acontecer estes estarem divididos em duas células e a sua inspeção ser conciliada com os planos de lavagem das mesmas ou, em menor ocorrência, com ações de manutenção, tal como nos órgãos das ETAR. Uma inspeção só é usualmente realizada tendo em conta estas janelas de oportunidade, porque o esvaziamento dos mesmos seria um desperdício de recursos, com grande impacto económico. Relativamente aos ativos das barragens, o desenrolar da inspeção acaba por ser idêntico. Nas torres de tomada de água, a janela de oportunidade surge quando existe escassez de água na albufeira, usualmente no verão, em que os paramentos das torres estão emersos. No que diz respeito aos descarregadores de cheias, a sua acessibilidade é difícil e torna a inspeção perigosa. O inspetor realiza a inspeção numa zona segura com o auxílio de um instrumento ótico, que possibilite um longo alcance, tal como é feito nos paramentos de montante e jusante das barragens.

As principais anomalias procuradas no momento da inspeção destes ativos são:

- Fissuração;
- Desgaste e degradação da superfície do betão;
- Destacamentos;
- Destacamentos com exposição de armadura;

- Corrosão das armaduras;
- Degradação dos revestimentos/pinturas;
- Fugas e repasses de água;
- Abertura de juntas construtivas;
- Lixiviação do betão;
- Presença de vegetação;
- Cavidades e erosão das soleiras no canal de descarga (descarregador de cheias).

EQUIPAMENTOS

A presença de humidade e contaminantes numa ETAR é constante, aumentando a suscetibilidade à corrosão dos equipamentos metálicos, causando deterioração e forçando ações de reparação ou a completa substituição do ativo, atingido mesmo os materiais mais resistentes à corrosão. O sulfureto de hidrogénio ou ácido sulfídrico (H_2S) resulta da redução do sulfato que é a principal forma sob a qual o enxofre se apresenta na água residual. Trata-se de um gás tóxico e muito corrosivo, estando associado à corrosão dos equipamentos em ETAR. Para além disso, na presença de humidade converte-se em ácido sulfúrico, um ácido ainda mais agressivo que ataca o betão exposto e também as superfícies de equipamentos de aço ou que na sua composição têm ferro e cobre, originando corrosão e deterioração dos materiais vulneráveis expostos. Equipamentos elétricos e de instrumentação são particularmente vulneráveis ao H_2S , pois este ataca os contactos de cobre para formar sulfeto de cobre, sendo este um mau condutor elétrico, originando falhas nos equipamentos e fraca fiabilidade [43].

A corrosão é a deterioração de um metal, por ação de reações químicas entre o mesmo e o ambiente envolvente. O tipo de metal e as condições envolventes são determinantes para a forma e a taxa de deterioração. Existem vários tipos de corrosão que se podem formar: uniforme, localizada e galvânica. A corrosão uniforme ocorre quando a superfície do componente metálico é atacada, podendo levar à falha por diminuição da espessura. Ocorre em áreas relativamente grandes na superfície do material. A corrosão localizada ataca apenas uma região do metal, sendo mais difícil de detetar. Pode iniciar-se sob forma de picadas e atingir profundidades consideráveis (*pitting*). Pode ocorrer em juntas, flanges ou em contactos metal/não metal onde se formem zonas estagnantes, resultando na formação de uma célula de concentração, originando corrosão intersticial. A corrosão galvânica surge quando são colocados em contacto dois metais diferentes com a presença de um eletrólito. A diferença de potenciais entre eles origina a passagem de corrente elétrica, corroendo-se o metal de potencial mais baixo [44].

O material constituinte dos equipamentos difere bastante, a sua escolha este depende da função do equipamento, da etapa de tratamento onde está inserido e das características do fluído e do ambiente onde que está instalado, podendo este ser mais ou menos agressivo (por exemplo a infraestrutura pode estar localizada numa zona costeira, isto é, uma atmosfera bastante agressiva devido à presença de sais, provenientes do mar, transportados por ação de ventos). Por vezes torna-se necessário utilizar metais que, apesar da sua suscetibilidade à corrosão, apresentam boa resistência

mecânica (como é o caso do ferro fundido). Para estes casos é necessário aplicar uma proteção anticorrosiva e pintura adequada, cujas espessuras mínimas são definidas pela agressividade do meio. Nas situações em que os equipamentos estão em contacto direto com o fluído, o revestimento aplicado pode ser diferente da parte exterior do equipamento, o fluído pode conter sedimentos abrasivos que requeiram uma proteção adequada.

Quanto aos equipamentos escolhidos, estes são inspecionados em simultâneo com os órgãos de construção civil associados. A grade mecânica e as válvulas de comporta estão muito presentes nos canais, e a ponte raspadora está associada aos decantadores. Na grade mecânica é verificado o estado geral da grade, assim como o estado dos componentes complementares, como motor elétrico, correntes, guias, tampas, quadro elétrico, etc. Verifica-se a existência de corrosão, se as barras ou os dentes do pente de limpeza estão degradados, danificados ou quebrados, se existem obstruções ou acumulação de sólidos retidos e se o sistema de limpeza das grades funciona corretamente e sem constrangimentos. É realizado um ensaio de funcionamento e adicionalmente o inspetor pode verificar se existe algum ruído anómalo. As válvulas de comportas são concebidas em materiais pouco corrosíveis, como o aço inoxidável. Algumas podem apresentar o obturador em PEAD (polietileno de alta densidade), no entanto, os mais antigos são em aço carbono. Na inspeção das válvulas de comporta é verificada, tal como nas grades mecânicas, a existência de corrosão tanto na estrutura da mesma como nos componentes complementares (fuso, porca do fuso, volante, motor elétrico se aplicável, etc.) e o desgaste da proteção anticorrosiva. É verificado se a comporta veda através do seu acionamento e também se o material vedante (geralmente em borracha EPDM) está deteriorado. É inspecionada a necessidade de lubrificação nos componentes mecânicos e se as calhas que guiam as comportas asseguram o fácil deslizamento das mesmas. Quanto à ponte raspadora, geralmente construídas em aço inoxidável, é verificado o estado da estrutura da ponte e passarela, são identificadas zonas que se encontram corroídas e também é verificado o estado de degradação da pintura anticorrosiva. É verificado o desgaste dos raspadores, e ainda o nivelamento dos raspadores de fundo em relação ao fundo decantador, e o estado das rodas de apoio no fundo (se aplicável). No apoio central é inspecionado o apoio central e o coletor de escovas, e na periferia o motor elétrico e as rodas laterais. Para além das inspeções aos ativos escolhidos com o auxílio do gráfico, é importante referir nesta secção (equipamentos) que durante a inspeção ao interior dos reservatórios é feita a inspeção às tubagens metálicas visíveis no interior dos mesmos, é verificado a existência de corrosão e a integridade estrutural das mesmas.

5.3. PESQUISA DE SOLUÇÕES AUTOMÁTICAS DE INSPEÇÃO

As avaliações de condição das infraestruturas são potenciadas pelas informações obtidas através dos processos de inspeção e/ou monitorização dos seus ativos. As técnicas mais tradicionais para avaliação destas infraestruturas envolvem inspeção visual por inspetores formados na área, como já referido. Esta metodologia consome bastante tempo, é dispendiosa e, por vezes, perigosa [45]. Atualmente, os métodos de avaliação não destrutivos, como termografias, ensaios de impacto-eco, ultrassons e radares de penetração no solo, oferecem medidas quantitativas da integridade das

infraestruturas e produzem análises fiáveis e têm vindo a ser estudados e implementados. Ainda assim, riscos de segurança e problemas de acessibilidade subsistem nestes métodos de inspeção manual. Como resultado, têm sido adotados sistemas de inspeção com auxílio de meios robóticos, de forma a colmatar a dificuldade de acessibilidade aos ativos, estejam estes em grandes altitudes ou espaços de difícil acesso que possam constituir perigos. Os meios robóticos promovem uma inspeção remota, com menos intervenção do técnico, mais objetiva e com maior repetibilidade. Para alcançar estes benefícios, é necessário implementar métodos quantitativos de deteção, uma locomoção robusta e uma operação autónoma. [46].

A monitorização pode ser feita para obter informações quantitativas acerca do estado atual da infraestrutura, através da medição de grandezas físicas, como acelerações, deformações e/ou deslocamentos. As grandezas são medidas por sensores que respondem a estímulos físicos. Esta abordagem oferece a capacidade de observar a integridade estrutural em tempo real (se o sensor for dedicado) ou de forma pontual, com o objetivo de aumentar a segurança e a fiabilidade, reduzindo os custos de manutenção e inspeção. Os sensores conseguem apresentar dados fiáveis, mas normalmente estão limitados em resolução espacial e temporal ou requerem a instalação de matrizes densas de sensores. Uma vez instalados, o acesso é limitado, usualmente, dificultando as ações de manutenção. E se apenas é necessária uma monitorização ocasional, a instalação de sensores de contacto é também difícil e demorada.

Assim, inspeções aprimoradas e abordagens de monitorização com menos intervenções de mão-de-obra humana estão a ser desenvolvidas e testadas para que se possa progredir e perceber todos os benefícios da automatização das inspeções de infraestruturas críticas [45].

5.3.1. TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADAS EM IMAGEM

A inteligência artificial aplicada em imagem tem ganho reconhecimento no campo da engenharia e visa melhorar as avaliações de condição dos ativos. Imagens e vídeos são os dois principais modos de dados analisados por estas técnicas. As imagens capturam informações visuais idênticas às obtidas pelos inspetores, sendo estas informações recolhidas a partir de todo o campo de visão sem qualquer tipo de contacto, dando resposta a alguns métodos convencionais de inspeção e monitorização que utilizam sensores de contacto, e que por vezes apenas estão limitados a inspecionar um parâmetro ou aspeto do ativo. Os vídeos são uma sequência de imagens em que o tempo, como dimensão extra, fornece informações importantes, desde a assimilação do contexto quando as imagens são recolhidas a partir de múltiplas vistas, até à resposta dinâmica da estrutura quando comparadas várias amostras de dados que variaram temporalmente. A inteligência artificial aplicada a imagem proporciona um conjunto de tarefas que podem ser úteis no contexto das inspeções, nomeadamente, deteção de anomalias, reconhecimento de objetos, etc. Isto é, a interpretação das informações relevantes das imagens e vídeos.

As imagens recolhidas para posterior análise são, usualmente, capturadas por câmaras instaladas em veículos aéreos não tripulados (VANT ou *drones*). Geralmente, a inspeção consiste em duas etapas: a utilização de *drones* para uma aquisição automatizada remota de dados (imagens ou vídeos), e o processamento de dados e inspeção utilizando técnicas de inteligência artificial. A utilização

de *drones* não é uma tecnologia do futuro, o rápido crescimento da indústria durante os últimos anos tornou os *drones* uma opção fiável para aquisição de dados.

A *startup* portuguesa *Prodrone* desenvolveu uma solução para a inspeção das pás de uma turbina eólica, em que para a aquisição de dados, é acoplado num *drone* uma câmara permitindo fotografar com numa resolução de 0,4 milímetros por píxel as pás das turbinas. Para processamento de dados, uma plataforma web chamada *Blade Insight* utiliza algoritmos baseados em aprendizagem automática e inteligência artificial, para identificar os defeitos e criar relatórios de forma autónoma. Adicionalmente, a distância do *drone* à pá é gravada em cada fotografia, através de um sensor ativo baseado na tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*), que combinada com o conhecimento da especificações da câmara utilizada, é possível medir os defeitos. O processo de aquisição de dados é semiautónomo, pelo que não necessita de um piloto especializado [47].

As apostas nesta tecnologia focam-se primariamente em tirar fotografias e vídeos, usando-os para inspeção no local ou subsequentes inspeções posteriores e virtuais por engenheiros. A habilidade para automaticamente e de forma robusta converter dados de imagens e vídeo em informação útil ainda constitui um desafio [45].

Analisa-se de seguida a literatura sobre deteção de anomalias, reconhecimento estrutural de componentes, e a combinação destes dois aspetos: a deteção de anomalias com consistência a nível estrutural.

DETEÇÃO DE ANOMALIAS

A deteção automática de anomalias é um elemento crucial para qualquer sistema de inspeção automático ou semiautomático. A deteção de anomalias visuais com elevada precisão e sensibilidade é uma tarefa desafiante, sendo mais agravada pela presença de características semelhantes a danos (como cantos escuros ou sulcos que podem ser confundidos com fissuras). Muitos investigadores dedicam-se ao desenvolvimento de métodos e técnicas para identificar com fiabilidade diferentes defeitos visuais, incluindo fissuras em betão, destacamentos e corrosão. Serão discutidas três abordagens diferentes para deteção de anomalias: métodos de extração heurísticos, deteção de anomalias baseado em aprendizagem profunda e deteção de alterações.

Métodos de extração heurísticos: têm sido desenvolvidos diferentes métodos heurísticos para a deteção de anomalias recorrendo a imagens. Estes métodos funcionam pela aplicação de um valor limite (*threshold*) à saída do classificador para um particular tipo de anomalia. Alguns dos principais tipos de anomalias analisados são:

FISSURAÇÃO EM BETÃO: Grande parte do trabalho desenvolvido em deteção de anomalias baseado em imagem foca-se em fissuras. Abdel-Qader et al. [48] compararam 4 tipos de algoritmos para deteção de anomalias, tendo estes por base a deteção de arestas (*edge-detection*). Estes algoritmos filtram as zonas onde existe uma variação acentuada da intensidade do brilho da imagem. Como resultado, o algoritmo *Fast Haar Transform* (FHT) foi o que apresentou resultados mais precisos.

A Figura 32 demonstra a aplicação do algoritmo numa imagem de uma parede de betão com fissuras (a) e sem fissuras (b).

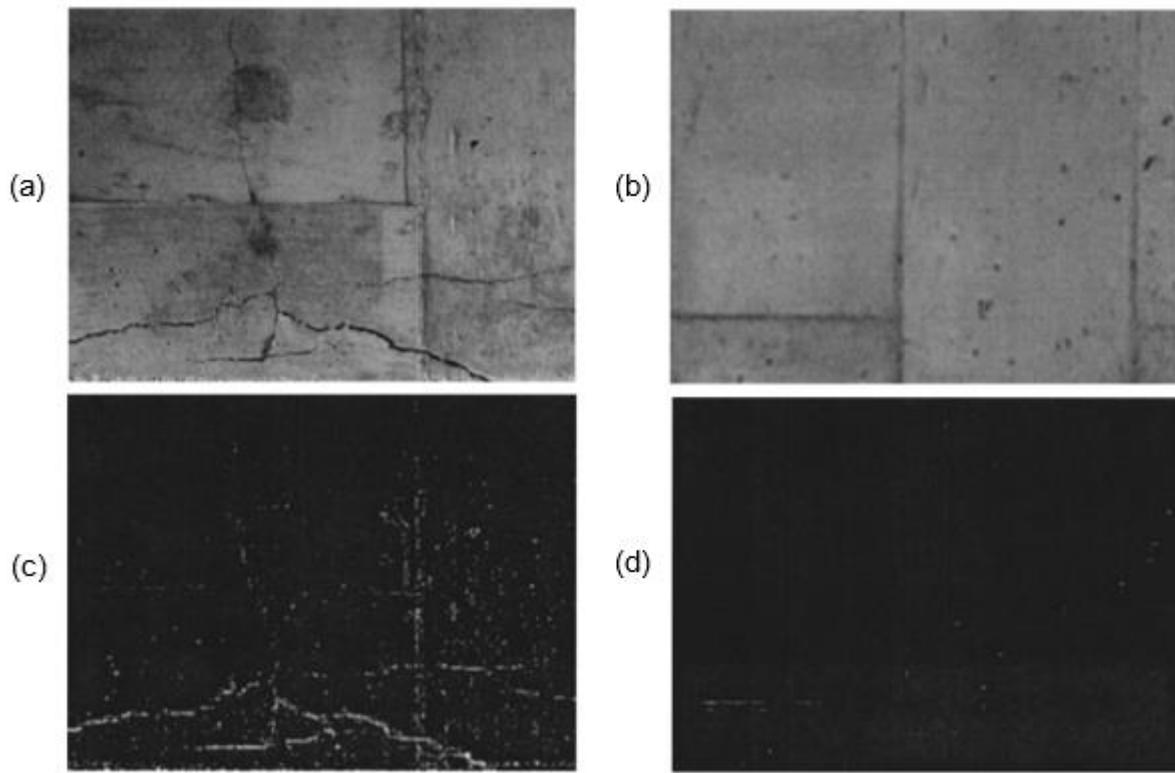


Figura 32 - Resultados de aplicação do algoritmo FHT, (a) imagem com fissuras, (b) imagem sem fissuras, (c)(d) resultados de aplicação do algoritmo às imagens (a)(b) [48].

Erkal e Hajjar [49] desenvolveram e avaliaram uma metodologia de localização e quantificação de anomalias em superfícies, baseada em *laser scan* e análise de dados de nuvens de pontos, podendo detetar anomalias que variam entre fissuras, corrosão, ruturas e destacamentos. Este método requer a utilização de um *laser scan* tridimensional de alta resolução, com habilidade para capturar imagem.

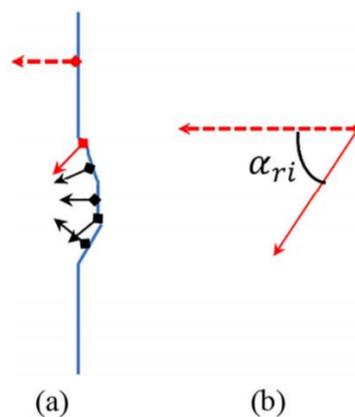


Figura 33 - (a) A normal da referência (traço interrompido) e uma das normais representativas de uma região com anomalias (a vermelho); (b) comparação do ângulo entre essas duas normais [49].

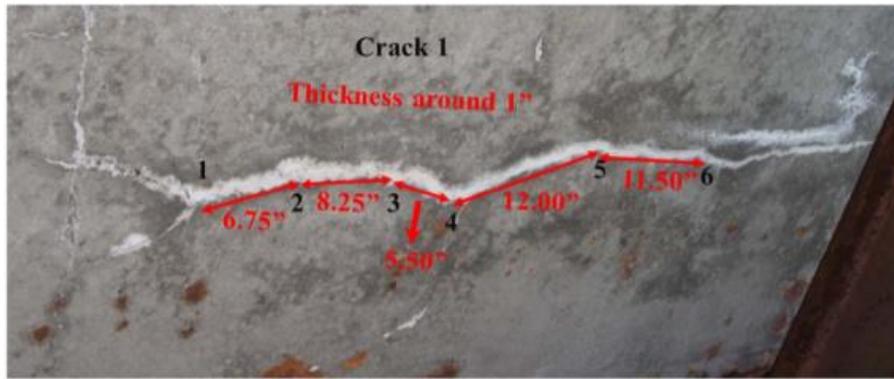


Figura 34 - Imagem recolhida para deteção de anomalias, neste caso específico, fissuração [49].

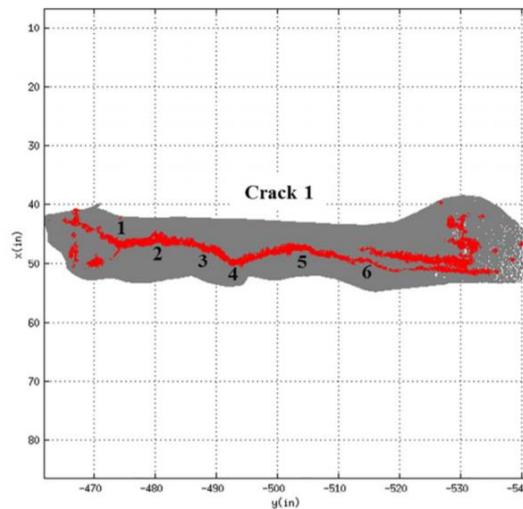


Figura 35 - Resultado da metodologia de deteção de anomalias aplicada na Figura 34 [49].

Primeiramente, as anomalias são detetadas com base na normal das superfícies e na informação acerca da cor presente. As normais dos pontos da superfície com anomalias são comparadas com as superfícies sem anomalias e é definido um ângulo. O seu valor é comparado com um valor limite que diferencia as zonas com defeitos, como se constata na Figura 33. Cada normal representa um ponto, sendo estes depois agrupados em zonas que constituem anomalias, através de um processo de agrupamento (*clustering*). Por fim é calculada a área e o volume de cada anomalia, baseada em *mesh grids*.

Para validação do método, foi recolhida uma imagem de fissuração em betão (Figura 34). A Figura 35 mostra que o método de deteção de anomalias é preciso, mesmo com a fissura a apresentar bastante eflorescência. A comparação entre as medições recolhidas pelos técnicos e as medições calculadas através do método revelaram um erro máximo de 0,42%.

Nas Figura 36 e Figura 37 é verificado o mesmo, só que para um caso de corrosão em aço com perda de material.

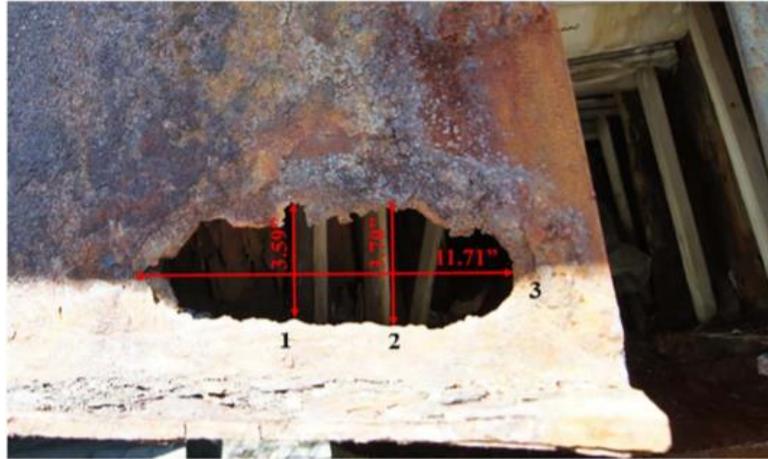


Figura 36 - Imagem recolhida para detecção de anomalias, neste caso específico, corrosão [49].

Na Figura 36 verifica-se que todo o componente está corroído, daí os resultados apresentados na Figura 37 evidenciarem toda a região do componente a vermelho. Identifica-se também uma zona com bastante perda de material, não estando esta representada na Figura 37, pois o método só identifica corrosão. Tal como na fissuração, também foi possível medir algumas distâncias referentes à perda de material (identificadas como 1, 2 e 3 na Figura 36), apresentando um erro máximo de 1,62% comparativamente às medições recolhidas pelos técnicos.

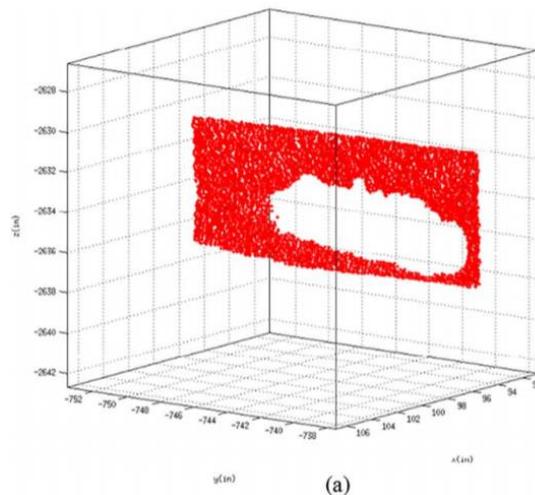


Figura 37 - Resultado da metodologia de detecção de anomalias aplicada na Figura 36 [49].

DESTACAMENTOS: Alguns métodos também têm sido propostos para identificar outros defeitos, como é o caso dos destacamentos. Paal et al. [50] implementaram uma combinação de segmentação, *template matching* e processamento morfológico para detecção de destacamentos e avaliação de colunas de betão. As características visuais de um destacamento de betão são a sua natureza linear, textura e a cor mais escura, quando comparadas a uma coluna de betão. Foi utilizado um método de detecção de destacamentos baseado no valor da entropia local, possibilitando a segmentação da imagem e identificando a branco as zonas com destacamentos. As regiões destacadas também são caracterizadas pela exposição da armadura, sendo esta uma característica importante. Assim, as características visuais distintivas da armadura, orientação, textura, cor e tamanho foram consideradas. Depois da detecção do destacamento é feita uma detecção da armadura com base na cor, e

posteriormente a detecção entre a armadura orientada transversalmente e longitudinalmente, com um algoritmo de *template matching* que considera a textura. Os resultados apresentam-se na Figura 38.

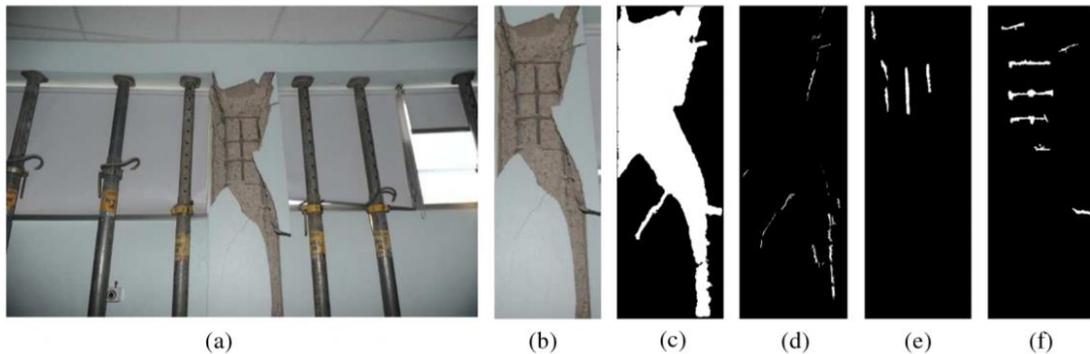


Figura 38 - Detecção automática de destacamentos: (a) imagem completa; (b) coluna com destacamento; (c) detecção da região de interesse; (d) fissuras detetadas; (e) detecção de armadura longitudinal; (f) detecção de armadura transversal [50].

CORROSÃO: Alguns investigadores utilizaram a informação textural, espectral e de cor para identificação de corrosão. Ghanta et al. [51] propuseram um algoritmo baseado na transformada de *wavelet*, na análise dos componentes principais (PCA - *Principal Component Analysis*), e na classificação de padrões para estimar a percentagem de corrosão em imagens. A Figura 39 mostra a detecção de corrosão nas imagens recolhidas do revestimento de uma ponte em aço.

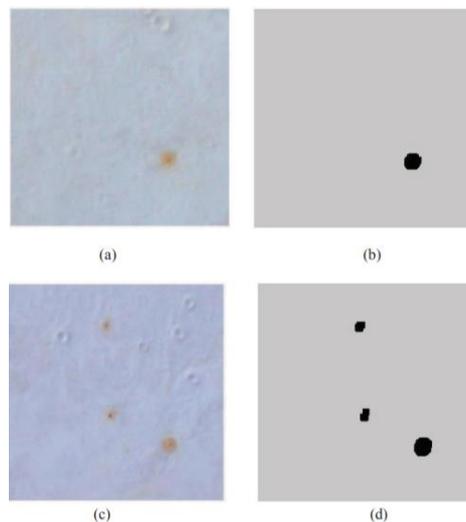


Figura 39 - (a) (c) imagens recolhidas, (b) (d) resultados de aplicação do algoritmo em (a) e (c), destacando os pixels corroídos a preto [51].

Métodos baseados em aprendizagem profunda: Os estudos descritos até agora foram baseados em métodos heurísticos conjuntamente com um classificador. Porém, a aplicação destas técnicas num ambiente de inspeção automática é limitada. Estas técnicas não empregam as informações contextuais disponíveis nas regiões envolventes onde o defeito está presente, como a natureza do material ou os componentes estruturais. Necessitam de ser reguladas manualmente ou semi-automaticamente, dependendo da aparência da estrutura que será inspecionada. Na realidade, as situações variam bastante e a elaboração manual de um algoritmo em que a sua aplicação é bem-

sucedida, é difícil. O recente sucesso da aprendizagem profunda (AP, do inglês *Deep learning*), vertente da aprendizagem automática, num vasto campo de aplicações, como classificação de imagens, transportes autónomos e imagem médica levou a sua aplicação à inspeção de infraestruturas. A AP alargou a capacidade e robustez da tradicional deteção de anomalias baseada em imagem, para uma ampla variedade de defeitos visuais. A AP é um ramo da aprendizagem automática, e esta, por sua vez é um subconjunto da inteligência artificial. A aprendizagem automática é uma área focada no desenvolvimento de teorias computacionais de aprendizagem e na construção de sistemas de aprendizagem, como é o caso de redes neuronais artificiais. A AP é composta por uma rede neuronal artificial com várias camadas, cada uma providenciando uma diferente interpretação dos dados introduzidos. O seu design é inspirado na rede neuronal biológica do cérebro humano. Diferentes métodos de deteção de anomalias baseados em AP têm vindo a ser estudados: classificação de imagem, deteção de objetos e métodos de segmentação semântica [45].

CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS: Byunghyun et al. [52] propôs um classificador em CNN (*Convolutional Neural Network*), que consiste na deteção automatizada de fissuras numa superfície de betão, particularmente a *AlexNet* (modelo de redes neuronais convolucionais). O processo de treino foi dividido em cinco classes: fissuras, superfícies intactas, dois tipos de padrão similares a fissuras e plantas. O método foi aplicado em imagens e *frames* de vídeos captadas com o auxílio de um *drone*. Um mapa de probabilidade foi introduzido para tornar o processo de deteção robusto, dado que foi definido um valor limite probabilístico para o qual o pixel era identificado como pertencente a uma fissura. O *dataset* (conjunto de dados) utilizado no processo de treino e validação da solução da *AlexNet* contava com cerca de 150000 imagens. A Figura 40 apresenta o resultado da deteção de fissuras numa superfície porosa e com juntas de construção, em que foi obtida uma exatidão de 96,09%. A Figura 41 corresponde a uma superfície de betão com tubagens e caixas de distribuição elétrica, em que se obteve uma exatidão de 98,5%.

O classificador também foi aplicado em tempo real numa parede de betão com 16 fissuras, com diferentes formas e tamanhos. A parede está bastante contaminada com sedimentos devido a fugas, contendo ainda várias caixas retangulares luminosas. O *drone* estava equipado por uma câmara que, mantendo uma distância de 2 metros da parede enquanto filmava, como ilustra a Figura 42. Foram detetadas com sucesso 15 das 16 fissuras, estando em falta apenas uma fissura com 0,05 mm de largura. Contudo, a deteção é demonstrada num vídeo reproduzido a 3 *frames* por segundo.

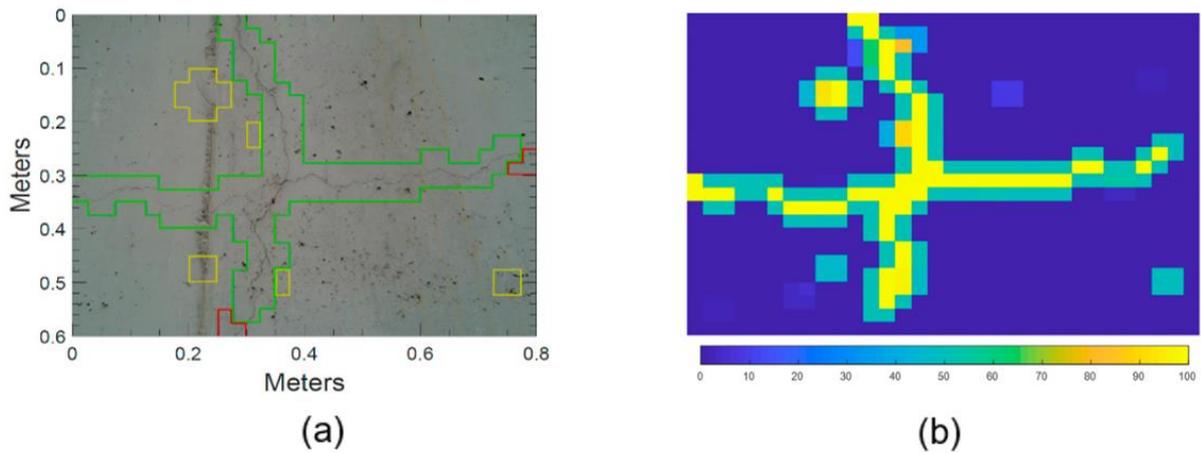


Figura 40 - Resultado da detecção de fissuras de imagens captadas por drone (a) e o corresponde mapa de probabilidade (b) [52].

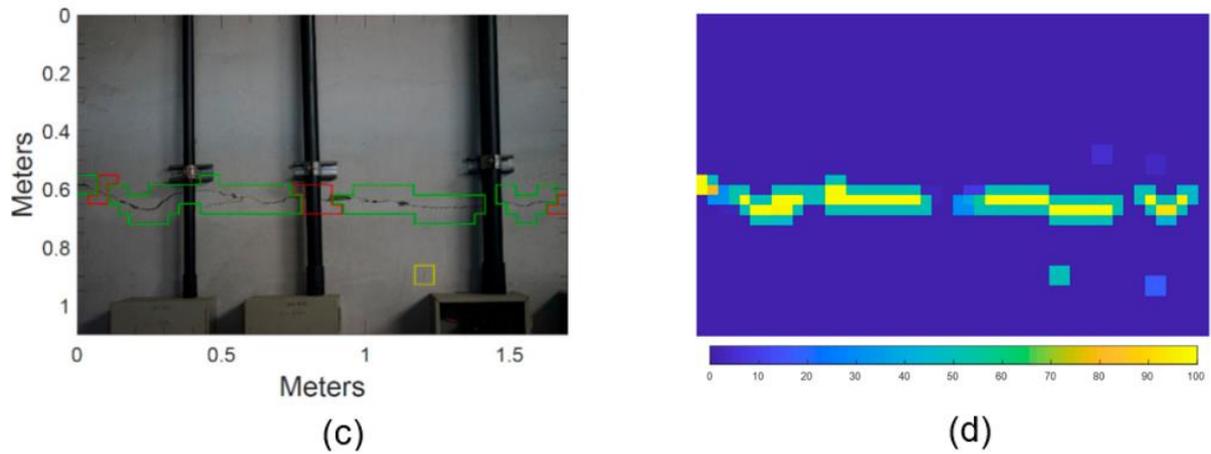


Figura 41 - Resultado da detecção de fissuras de imagens captadas por drone (c) e o corresponde mapa de probabilidade (d) [52].



Figura 42 - Detecção de fissuras em tempo real utilizando um drone: (a) captação de vídeo pelo drone; (b) exemplo da detecção de fissuras em tempo-real [52].

Atha e Jahanshahi [53] avaliaram a detecção de corrosão em imagens, utilizando uma CNN que aprende a classificação apropriada das características de um objeto. O artigo apresenta diferentes abordagens de detecção de corrosão em estruturas metálicas, baseadas em CNN. São comparadas performances de duas arquiteturas CNN pré-treinadas e de duas arquiteturas CNN propostas. Apresentam-se algumas imagens dos resultados obtidos. A Figura 43 apresenta os resultados da CNN treinada, utilizando a arquitetura *ZF Net*, para diferentes janelas deslizantes (*sliding windows*). Quanto menor o tamanho destas janelas, mais precisa será a detecção das regiões corroídas, no entanto existe maior suscetibilidade em existirem mais detecções falsas. Foi criado um *dataset*, para treino, validação e teste, através de 926 imagens recolhidas utilizando várias câmeras, sendo estas cortadas em regiões com corrosão e sem corrosão, e posteriormente estas regiões foram divididas em imagens de 128 x 128 pixels, resultando num total de mais de 67000 imagens



Figura 43 - Detecção de corrosão utilizando ZF Net aplicada a imagens RGB, em que as caixas verdes representam regiões corroídas [53].

DETEÇÃO DE OBJETOS: Este método, ao invés de classificar unicamente toda a imagem quanto a uma anomalia ou defeito (classificação de imagens), classifica múltiplos tipos de anomalias, através de uma *bounding box* (caixa limitante) em cada região [45]. Cha et al. [54] propuseram a arquitetura *Faster Region-based CNN (Faster R-CNN)* para identificar cinco tipos de anomalias: fissuração no betão, corrosão em aço com dois níveis (médio e alto), corrosão nos parafusos e delaminação do aço. Após a *Faster R-CNN* ter sido treinada, validada e testada utilizando um *dataset* de 297 imagens (com resolução de 6000x4000 píxeis). Os resultados obtidos foram: 90,6%, 83,4%, 82,1%, 98,1% e 84,7% de precisão média para os cinco tipos de anomalias, respetivamente. A robustez da *Faster R-CNN* foi avaliada utilizando algumas imagens de estruturas. Apresenta-se alguns resultados na Figura 44 e Figura 45.

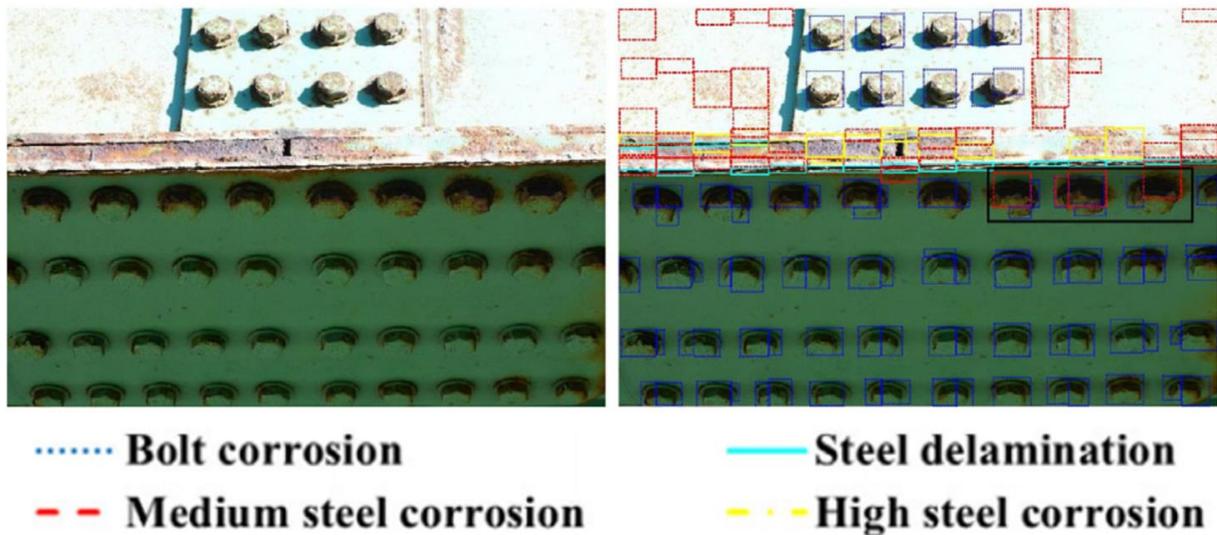


Figura 44 - Detecção de anomalias em aço sobre iluminação intensiva: (a) fotografia de uma estrutura corroída; (b) output da Faster R-CNN [54].

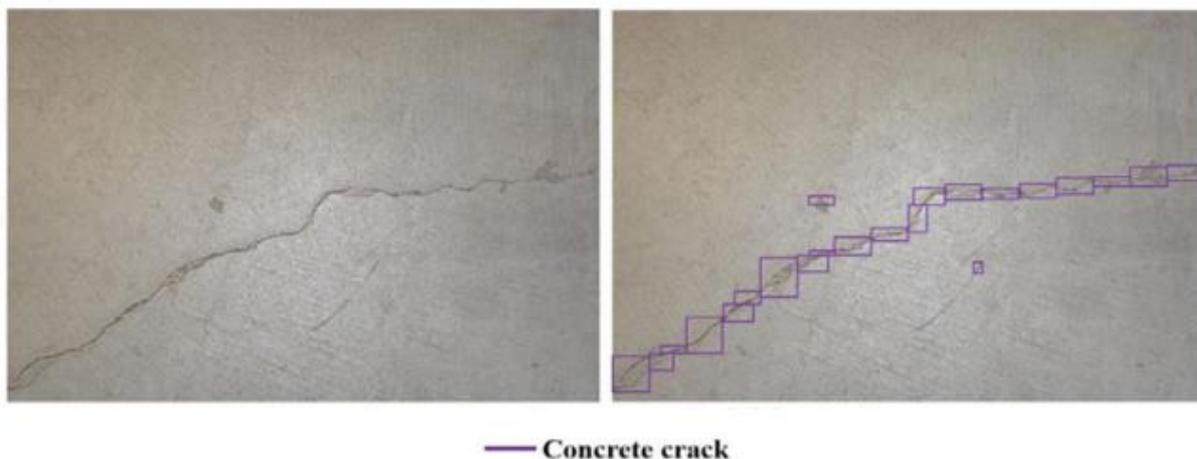


Figura 45 - Detecção de anomalias em betão: (a) fotografia de uma parede fissurada; (b) output da Faster R-CNN [54].

MÉTODOS DE SEGMENTAÇÃO SEMÂNTICA: Os métodos de detecção de objetos não conseguem delinear com precisão a forma da anomalia, simplesmente isolam em caixas limitantes as regiões de interesse. No entanto, após a delimitação das regiões pode ser interessante a aplicação de algoritmos de detecção de anomalias. Outro método de isolar as regiões de interesse numa imagem é a segmentação semântica, que classifica cada pixel da imagem num número fixo de classes. O resultado consiste numa imagem segmentada, em que cada segmento (conjunto de pixéis) é associado a uma determinada classe, o que traz como vantagem a precisa localização e forma da anomalia [45]. Hoskere et al. [55] avaliam um novo método de localização e uma técnica de classificação de anomalias, com base num algoritmo que classifica o pixel de cada imagem utilizando uma D-CNN (*Deep Convolutional Neural network*), sendo capaz de reconhecer 6 tipos de anomalias. O resultado consiste numa imagem segmentada, onde a porção que representa uma anomalia é destacada e classificada num dos tipos. Foram considerados seis tipos de anomalias: fissuração no betão, destacamentos de betão, exposição

de armadura, corrosão no aço, fissuração no aço e fissuração no asfalto. Foi criada uma base de dados de raiz que compreende imagens de vários tipos de estruturas, incluindo pontes, edifícios, pavimentos, barragens e espécimes de laboratório. Apresenta-se na Figura 46 o resultado de detecção em várias tipologias de estruturas.

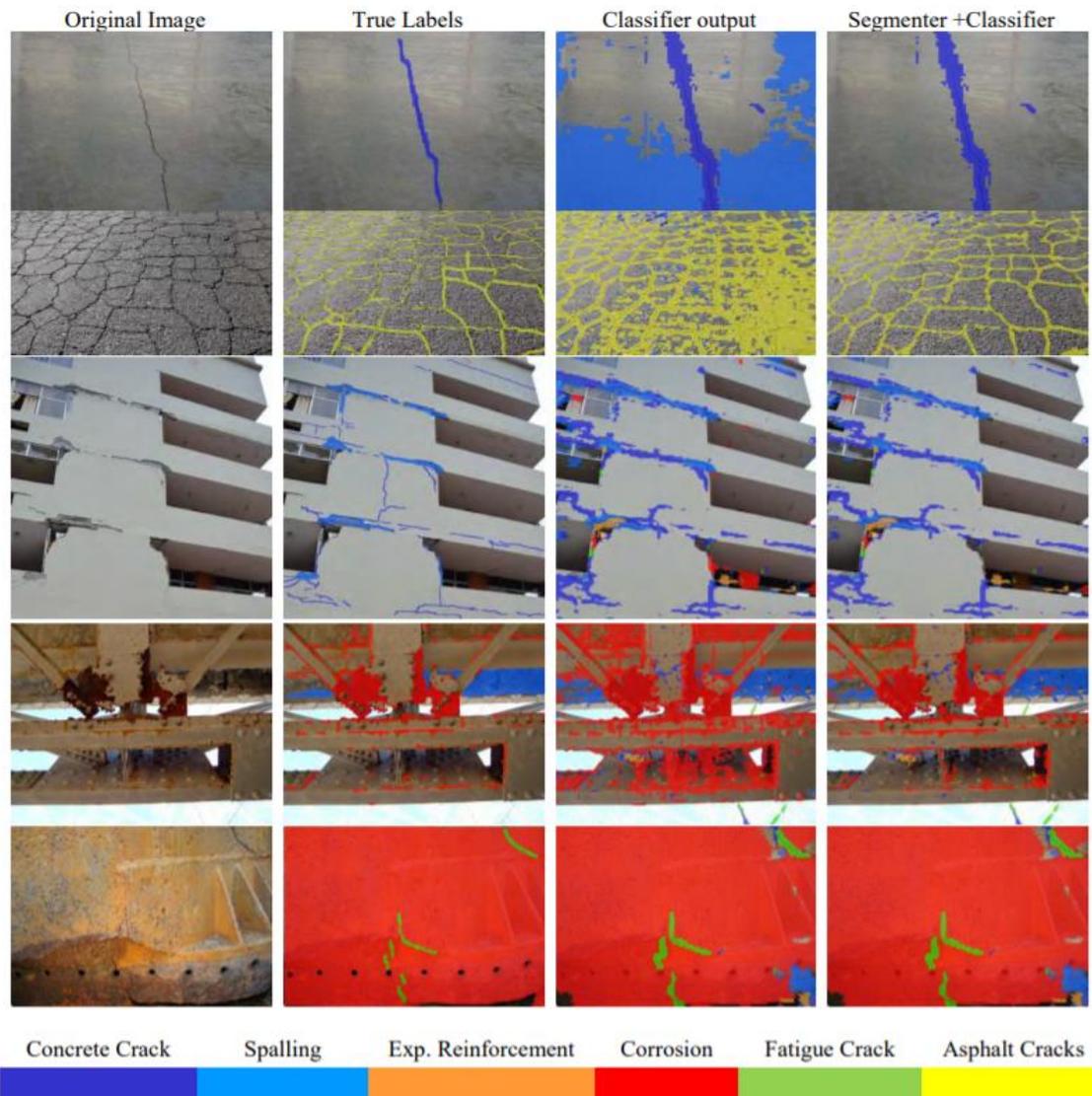


Figura 46 - Amostra de resultados da inspeção estrutural automatizada, demonstrando o output a cada passo do método [55].

Deteção de alterações: Quando uma estrutura é inspecionada regularmente, deve ser criada uma representação ou modelo da mesma, para que esta possa ser comparável com os dados da inspeção subsequente. Qualquer anomalia nova na estrutura manifesta-se como uma alteração ou mudança, quando em comparação ao modelo inicial. Identificar e localizar alterações pode ajudar a reduzir a carga de trabalho do processamento de dados de uma inspeção. Qualquer dano deve manifestar-se como uma alteração. Assim, adotando métodos de deteção de alterações antes de realizar uma deteção de anomalias ajuda a reduzir o número de deteções falsas, como anomalias idênticas a texturas, estando estes presentes em ambas as inspeções. Passa-se a discutir duas abordagens baseadas em: nuvem de pontos 3D e imagem.

DETEÇÃO DE ALTERAÇÕES BASEADA EM NUVEM DE PONTOS 3D: Técnicas para estimar a estrutura tridimensional a partir de movimento *structure from motion* (SfM) e *multi-view stereo* (MVS) são utilizadas para reconstruir superfícies a partir de nuvens de pontos. Para realizar uma detecção de alterações, a representação em nuvens de pontos deve ser criada. Estas representações podem ser altamente precisas, mesmo para estruturas com muitos detalhes, como é o caso da parede de retenção do artigo consultado de seguida. A nova nuvem de dados é comparada com a anterior, através do alinhamento das mesmas, normalmente processado por um algoritmo ICP (*Iterative closest point*). Este algoritmo tem vindo a ser implementado em softwares de acesso aberto como *MeshLab* e *CloudCompare*. Depois do alinhamento, são aplicadas técnicas de detecção de alterações, podendo estas ser aplicadas em nuvens de pontos geradas por laser scan ou por fotogrametria [45].



Figura 47 - Detecção de alterações comparando a nuvem de pontos das duas imagens acima, com recurso ao software *CloudCompare*, em cima: fotografias recolhidas de duas campanhas de inspeção, em baixo: comparação da nuvem de pontos [56].

Morgenthal e Hallermann identificaram alterações manualmente inseridas numa parede de retenção com uma área aproximada de 12000 m². Através de uma câmara acoplada a um *drone*, foram recolhidas 280 imagens em 48 minutos durante 4 voos, tendo sido estas utilizadas para reconstrução da estrutura 3D em nuvem de pontos feita por SfM. Utilizando uma técnica chamada C2C (*cloud to cloud*), e o software *CloudCompare* foi possível detetar as alterações. Na Figura 47 apresentam-se os resultados da deteção de alterações. Nas duas primeiras imagens estão identificadas as zonas em que foram inseridos objectos manualmente, na última é feita a comparação das nuvens de pontos, em que a escala representa a variação da posição dos pontos na direção z (perpendicular à parede). As colorações vermelhas e azuis indicam objetos removidos e adicionados, respetivamente [57] [56].

DETEÇÃO DE ALTERAÇÕES BASEADA EM IMAGEM: A deteção de alterações em imagens tem uma aplicação bastante vasta. Um dos casos em que esta deteção é bastante usada é a deteção remota através de imagens satélite, podendo variar desde a monitorização do solo até a avaliação de danos ou desastres. Antes da deteção de alterações ser realizada, as imagens são pré-processadas de forma a remover efeitos atmosféricos e radiométricos. As imagens captadas por satélite fornecem uma compreensão das anomalias numa escala muito grande. Para infraestruturas individuais, a resolução e vistas disponíveis dessas imagens limitam a quantidade de informação útil que pode ser extraída. Para imagens captadas por *drones* ou veículos terrestres, os métodos de deteção de alterações podem ser aplicados como um precursor à deteção de anomalias, de modo a ajudar a localizar regiões candidatas que possam representar anomalias [45].

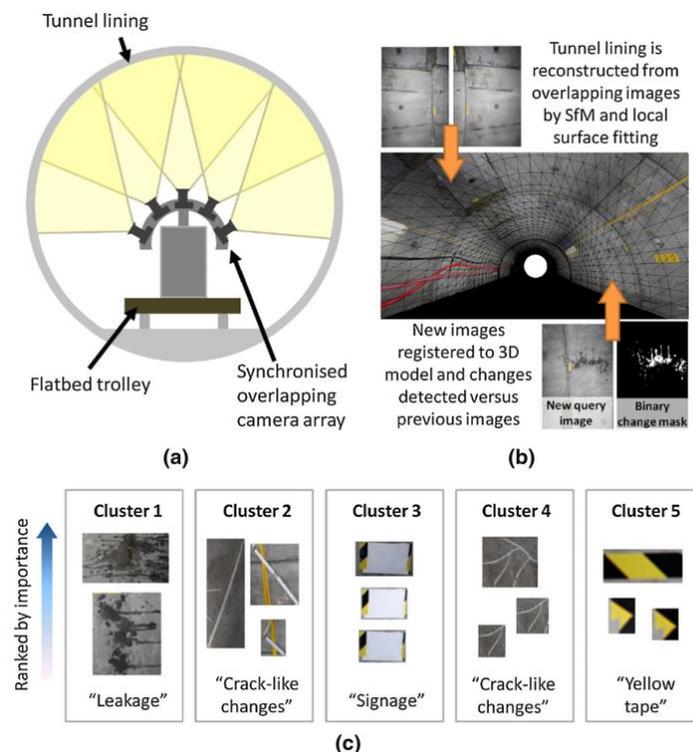


Figura 48 - Ilustração do método proposto por Stent et al. [58] (a) Captura de imagem; (b) Deteção de alterações nas novas imagens; (c) os resultados apresentados em grupos e ordenados por importância.

Stent et al. [58] descrevem um sistema automático para detecção, localização, agregação e classificação de alterações visuais nas superfícies interiores de um túnel. As imagens são recolhidas por um conjunto de câmaras comerciais, sincronizadas e sobrepostas. A geometria 3D do interior do túnel foi gerada através de técnicas SFM. São capturadas novas imagens, onde previamente foram introduzidas alterações artificiais para simular situações reais, como fugas, fissuras e destacamento. As novas imagens foram comparadas com o modelo inicial, através de diversas técnicas de detecção de alterações testadas pelos autores. A detecção de alterações foi apresentada de forma probabilística. Para que a detecção de alterações seja apresentada de forma eficiente, tornou-se necessário agrupar as alterações em classes e ordená-las quanto à sua importância, para que a tarefa de interpretação dos resultados não exija a visualização de todas as imagens em que foram detetadas alterações. Apresenta-se na Figura 48 um esquema do método proposto.

Como se observa na Figura 49, os casos 1 e 2 apresentam alterações relevantes, como fugas, riscos de giz e descoloração. Os resultados foram idênticos à realidade (*ground truth*), ao contrário do caso 3.

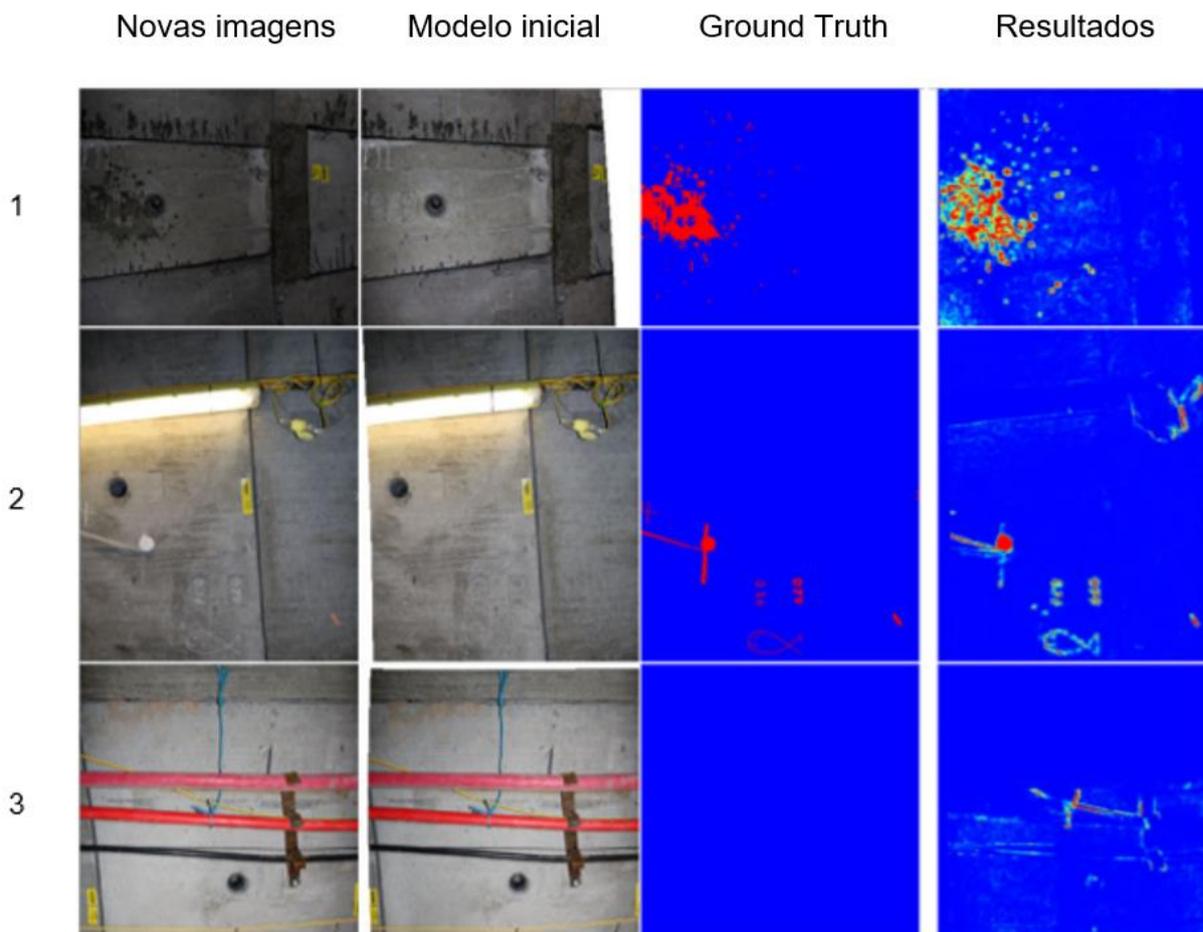


Figura 49 - Ilustração dos resultados para 3 casos [58].

RECONHECIMENTO DOS COMPONENTES ESTRUTURAIS

O reconhecimento dos componentes estruturais é um processo de detecção, localização e classificação das componentes características de uma estrutura, sendo esperado como um passo fulcral para a automatização das inspeções a infraestruturas. A informação acerca dos componentes estruturais adiciona um significado a uma imagem ou a uma nuvem de pontos. Por exemplo, rotulando uma região (conjunto de pontos) de uma nuvem de pontos como “coluna”, esta região torna-se reconhecida como um único componente estrutural. Durante a avaliação, os pontos não rotulados como “coluna” podem ser desprezados, porque estes têm origem em objetos irrelevantes. Assim, a informação acerca dos componentes estruturais é um dos atributos essenciais dos modelos construídos para inspecionar as infraestruturas de uma forma eficaz e coerente. A informação acerca dos componentes estruturais pode ser usada para melhorar a consistência dos métodos de detecção de anomalias e acelerar o seu processo, como por exemplo, através da remoção dos padrões idênticos a anomalias em objetos que não sejam os componentes estruturais de interesse (detecção de fissuras numa árvore). De forma a realizar uma inspeção totalmente automatizada, é expectável que o reconhecimento de componentes seja um elemento essencial nos algoritmos de navegação autónoma e recolha de dados em plataformas robóticas, por exemplo *drones*. Baseado no tipo e posição do componente reconhecido pelas câmaras de bordo, espera-se que os robôs autónomos planeiem uma trajetória de navegação e uma recolha de dados adequada. Passa-se a analisar os principais métodos de reconhecimento de componentes estruturais [45].

Métodos heurísticos através de imagem: Foram utilizados métodos heurísticos e filtros, criados manualmente, para reconhecimento de componentes em imagens. Zhu et al. [59][60] conceberam um método de detecção de colunas em betão armado, através de pares de segmentos de linha. Para distinguir as colunas de outros pares de segmentos de linhas irrelevantes, é aplicado um limite à relação de aspeto (comprimento/largura) do retângulo formado pelos pares. É tido em conta a textura e cor, pois as colunas apresentam padrões uniformes das mesmas. Apesar da simplicidade do método, este depende dos valores limites aplicados e tende a falhar quando é deparado com colunas mais distantes [59][60].



Figura 50 - Resultados da detecção de colunas em estruturas de betão armado [59][60].

Nuvem de pontos: Outro cenário importante para o reconhecimento de componentes são os modelos construídos através de uma nuvem de pontos. Perez-Perez et al. [61] elaboraram um método capaz de segmentar uma região de pontos e rotulá-la com base no tipo de componente (teto, chão, parede e tubagem) e na sua geometria (horizontal, vertical e cilíndrica). As regiões são segmentadas com base no método de crescimento de regiões. Este método examina os pontos vizinhos, e agrupa-os em classes caso não sejam detetadas alterações bruscas, de níveis de cor, espaçamentos, etc. O processo resulta de um treino com base em nuvem de pontos que já estão previamente segmentadas e rotuladas. A Figura 51 ilustra numa nuvem de pontos a segmentação e a identificação dos tipos de componentes num interior de um edifício, em que as cores laranja, magenta, azul e vermelho representam a parede, teto, tubagem e chão, respetivamente [61].

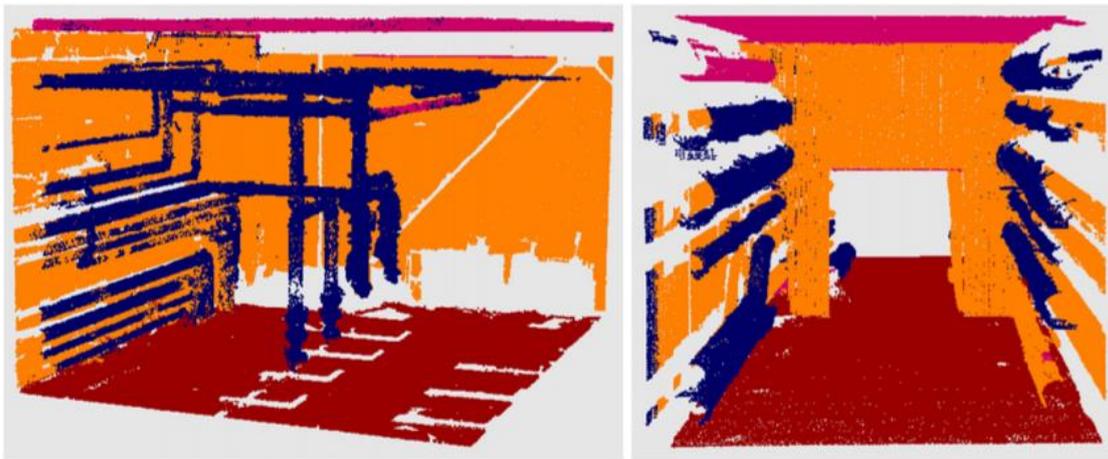


Figura 51 - Segmentação e identificação de componentes numa nuvem de pontos [61].

Aprendizagem profunda: Metodologias baseadas em AP têm sido aplicadas no reconhecimento de componentes. Nazarakí et al. [45] investigaram 3 diferentes configurações de FCNN (*Fully Convolutional Neural Networks*) para reconhecimento de componentes em pontes:

- Configuração *naïve*: estima um mapa com a identificação dos componentes diretamente da imagem de entrada.
- Configuração paralela: estima um mapa com identificação dos componentes baseado nos resultados da segmentação semântica, que foi executada paralelamente em classes relacionadas com componentes de pontes (colunas, vigas, etc.) e classes mais divergentes (como pessoas, postes, sinais de trânsito, veículos, etc.).
- Configuração sequencial: estima um mapa com identificação dos componentes baseado nos resultados de segmentação da cena e na imagem de entrada.

Para comparação das configurações foi colocado um mapa com a identificação manual de componentes (*ground truth*). As classes consideradas foram colunas, vigas e lajes, outros componentes estruturais e outros componentes não estruturais. Como se observa apenas, na terceira imagem não foi possível identificar os componentes.

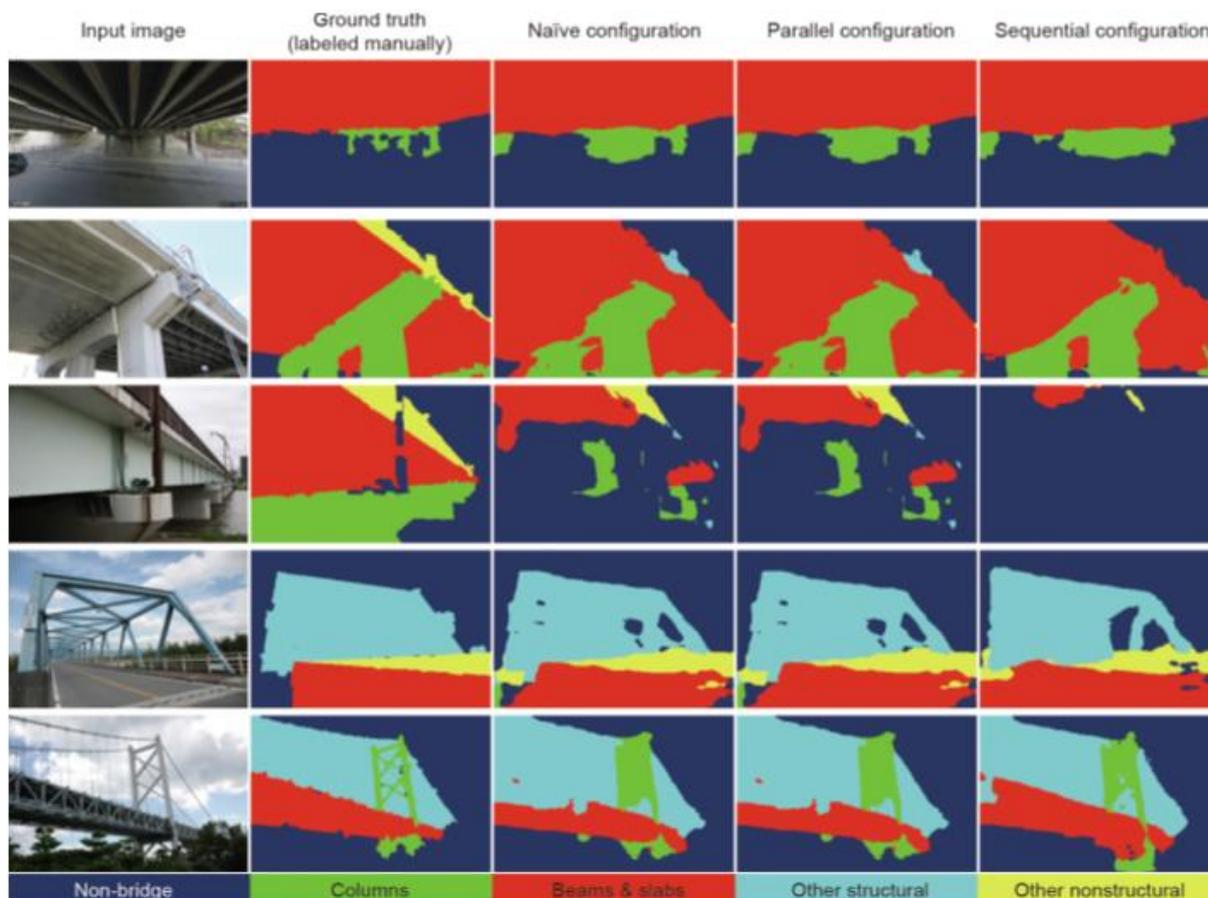


Figura 52 - Resultado do reconhecimento de componentes de uma ponte [45].

DETEÇÃO DE ANOMALIAS COM CONSISTÊNCIA A NÍVEL ESTRUTURAL

Para que se consiga realizar inspeções à condição de uma infraestrutura é necessário combinar informação: dos componentes estruturais (ativos) e da severidade das anomalias presentes nesses componentes [45]. Hoskere et al. [62] propuseram um modelo para avaliar a condição de uma estrutura num contexto pós-sísmico. Primeiramente, foram adquiridas as imagens da estrutura por meio de um *drone*, de forma a cobrir o máximo da estrutura possível. De seguida, estas imagens foram utilizadas para criar um modelo de malha 3D através da técnica SfM. As imagens são conduzidas para 3 redes de aprendizagem profunda treinada, FCNN. São segmentadas semanticamente quanto ao tipo de anomalia e ao contexto (componente estrutural). Os rótulos semânticos são projetados para a malha 3D utilizando um mapeamento UV (processo que consiste em projetar uma imagem 2D na superfície de um modelo 3D). O resultado será um modelo 3D estando cada região identificada quanto ao dano e contextualizada quanto ao tipo de componente [62]. A Figura 53 apresenta os resultados para algumas imagens de estruturas avaliadas. Foram utilizadas 3 redes neuronais: SB (*Scene and Building*), que identifica semanticamente a imagem (edifício, janelas/portas, céu, destroços e vegetação), DP (*Damage Presence*) identificando a presença de dano e DT (*Damage Type*) que identifica o tipo de anomalia (fissuras, destacamentos e exposição de armadura). Constata-se que existem algumas falsas deteções, como por exemplo cabos identificados como fissuras.

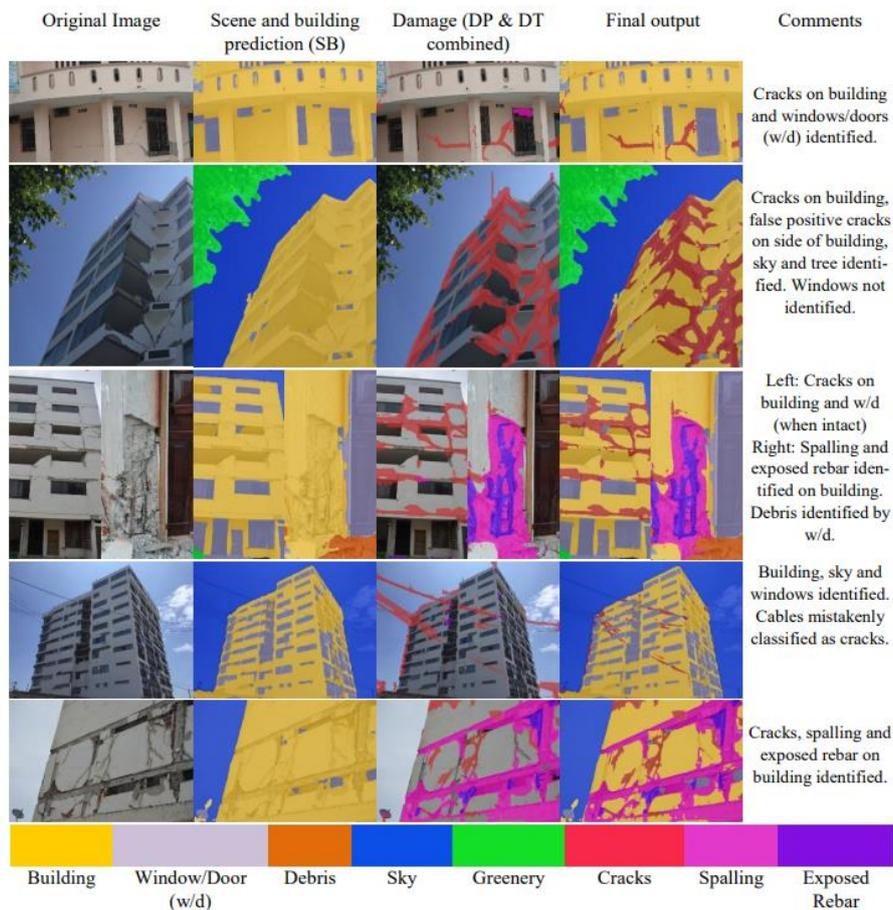


Figura 53 - Resultados do método proposto por Hoskere [62].

As técnicas de inteligência artificial aplicadas em imagem quando conjugadas com a aquisição de dados através de um *drone*, revelam-se uma solução bastante versátil, podendo ser aplicada na inspeção de qualquer ativo e permitindo a aplicação de inúmeros algoritmos de detecção de anomalias e reconhecimento de componentes estruturais, desde a identificação e quantificação de fissuras num descarregador de cheias até à detecção de corrosão na estrutura de uma válvula de comporta. Com apenas um *drone* e uma câmara incorporada é possível recolher dados de toda a superfície do ativo, assim o inspetor não necessita de deslocar-se até ao ativo, mitigando os perigos a que se sujeita durante as inspeções atuais. A navegação autónoma é limitada a áreas em que o sistema de posicionamento global (GPS - Global Position system) está disponível. Em alternativa, os *drones* necessitam de identificar a sua posição por iniciativa própria, assim como detetar e evitar os obstáculos, através de algum tipo de sensorização. Como é o caso de sistemas de visão 3D baseados em câmaras estereoscópicas de ângulo ultra amplo que permitem a aquisição de informação espacial do drone através da criação e atualização do mapeamento das áreas circundantes. No entanto, tal como as inspeções visuais realizadas pelos inspetores, estas soluções estão limitadas a ativos que estejam visíveis.

DIFICULDADES E DESAFIOS NA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS BASEADAS EM IMAGEM

Embora a comunidade científica, nos últimos anos, tenha incidido bastante o seu estudo em técnicas com base na análise de imagem, algumas barreiras necessitam de ser ultrapassadas antes da concretização destas inspeções. As principais dificuldades residem em converter os dados e as informações extraídas pelos métodos baseados em inteligência artificial em informação mais prática e útil, para que possam auxiliar com maior impacto a tomada de decisão [45].

Os técnicos especializados que realizam as inspeções têm uma capacidade de percepção que ainda não consegue ser replicada em algoritmos. Estes técnicos treinados são capazes de identificar regiões com maior importância ou com maior interesse de uma estrutura, como por exemplo, os elementos críticos que comprometem a integridade estrutural. Quando uma estrutura está danificada ou apresenta anomalias, dependendo da forma, tamanho e localização da anomalia e da importância do componente que está danificado, o inspetor pode conjugar estes dados e concluir se a anomalia compromete, ou não, a integridade estrutural. Este pode ainda perceber quais as implicações dos variados tipos de anomalias. Portanto, é necessário, apesar de todo o desenvolvimento feito neste campo, um maior rigor na deteção de anomalias e reconhecimento de componentes. Além disso, estudos e artigos científicos que se baseiem na interpretação do significado estrutural dos danos identificados, e na integração das informações locais com as globais para realizar uma avaliação global a nível estrutural, são bastante difíceis de encontrar [45]. No Grupo AdP, após a realização de uma inspeção, é essencial quantificar a condição da infraestrutura através de uma nota ou um nível de apreciação. Este resulta da avaliação individual de cada ativo que compõe a infraestrutura, tendo cada ativo um peso diferente na nota final, ou seja, cada ativo constitui uma relevância diferente para a infraestrutura. Atualmente é difícil encontrar uma solução automática que realize todo este processo, desde a sensibilidade para detetar anomalias até à capacidade de percepção dos ativos que constituem maior importância para a infraestrutura, sendo estes desafios vitais para a realização de uma inspeção totalmente automatizada. No entanto, esta sistematização de aquisição e interpretação da informação por parte dos inspetores do Grupo representa uma mais-valia para o desenvolvimento de soluções automáticas de inspeção a infraestruturas, uma vez que a existência de dados com *ground truth* é vital para o mesmo.

Os modelos de redes neuronais treinados tendem a apresentar um baixo desempenho se as características extraídas dos dados, sobre os quais se pretende tirar conclusões, forem significativamente diferentes dos dados de treino. Assim, a qualidade destes modelos depende diretamente do conjunto de dados subjacentes. Outro problema reside na execução destes métodos a imagens singulares, dado que uma única imagem não providencia contexto suficiente para realizar as tarefas de deteção de anomalias e reconhecimento de componentes. Maioritariamente, a deteção de anomalias tem melhor desempenho quando é realizada a uma imagem capturada muito próxima do ativo. No entanto o reconhecimento de componentes torna-se difícil nestas circunstâncias. Em condições de inspeção visual realizada por um humano, primeiramente, é analisada toda a estrutura, e depois é feita uma aproximação a cada ativo para uma análise mais detalhada. Assim, analogamente,

teria de ser incorporada uma sequência de visualização, por exemplo o uso de vídeo, para que as tarefas sejam realizadas *frame a frame* [45].

A qualidade das imagens que serão alvo de análise também pode restringir a aplicação dos métodos abordados, pois estas estão suscetíveis a alterações relacionadas com os efeitos ambientais que dificultam a visibilidade, como a presença de chuva, neblina ou nevoeiro. E ainda, para além destes fatores que muito dificilmente são contornados, existem ainda outros fatores ambientais, como a iluminação e as sombras, que embora sejam mais fáceis de resolver, requerem algum trabalho para serem contornados [45].

5.3.2. INSPEÇÃO DE BASEADA EM ROBÔS

Em grande parte das técnicas abordadas até agora, os veículos aéreos não tripulados (VANT), ou *drones*, são aplicados no processo de aquisição de dados (recolha de imagens), principalmente pela sua robustez e agilidade. No entanto outras técnicas de inspeção que exigem um contacto mais próximo com a infraestrutura, como métodos de avaliação não destrutivos, estão associadas a outros mecanismos de locomoção mais apropriados, como terrestres, trepadores ou de propulsão marítima.

Terrestres: O projeto denominado de *BetoScan* consiste num robô capaz de navegar sensivelmente de forma autónoma em superfícies horizontais. Está equipado com um conjunto de diferentes sensores (Figura 54) por forma a realizar medições e testes não destrutivos. Este robô é essencialmente utilizado em plataformas de betão armado, munido de diferentes sensores comerciais disponíveis [63]. Destacam-se as seguintes atividades realizadas:

- O mapeamento do potencial elétrico, capaz de detetar os locais com uma maior probabilidade de corrosão.
- O mapeamento da profundidade de cobertura de betão, através de sensores baseados em *eddy current* e um radar de penetração no solo.
- Medição de espessuras da estrutura e defeitos através de um aparelho de ultrassons. No entanto é necessário o contacto direto deste aparelho com a superfície, o que exige a paragem do robô.

Este projeto revela-se robusto e versátil, pois sensores suplementares podem facilmente ser implementados no sistema de aquisição de dados caso necessário, ou caso o material da estrutura a inspecionar seja outro. A análise de dados de diferentes sensores baseados em testes não destrutivos revela-se um meio importante para a avaliação da condição de infraestruturas. No entanto, neste caso o robô consegue apenas atuar em superfícies horizontais, o que limita bastante o campo de aplicação.

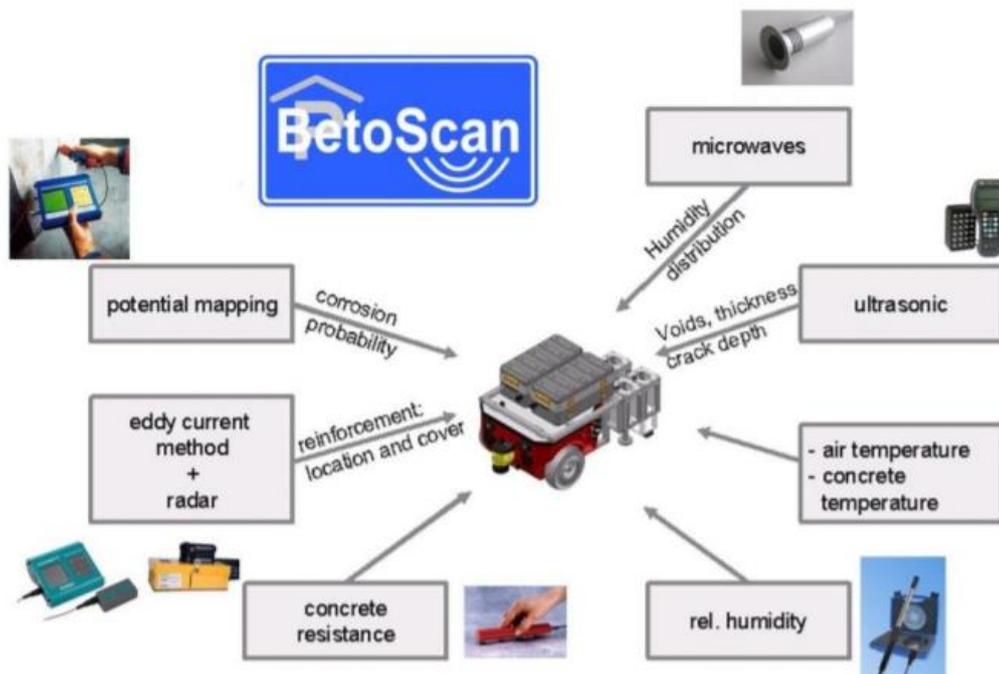


Figura 54 - Métodos não destrutivos do sistema BetaScan [38].

Trepadores: Uma adaptação da abordagem de locomoção terrestre, quando se trata de paredes verticais, é fixar o robô diretamente à estrutura sob inspeção e conseguir que ele se movimente. O grande desafio surge na forma de fixação contínua e deslocamento, enquanto este vence a força da gravidade, carregando o seu peso próprio e adicionalmente os sensores anexados [46].

Guimaraes et al. [64] abordam a inspeção de paredes verticais em betão com recurso a um robô remotamente controlado, *ICM Climber* (Figura 55). A sua fixação à parede é assegurada através de adesão por um vácuo induzido. O sistema é composto por uma câmara de vácuo central envolvida em tiras de espuma rolante, permitindo o deslocamento e aderência à parede. Este robô pode ter instalado um conjunto de aparelhos e sensores que permitem a realização de testes não destrutivos (contacto ou não contacto) à condição do betão. Os métodos de não contacto incluem análise visual, termografia, air coupled impact-eco e radar de penetração no solo. Os métodos de contacto incluem, impact-eco, resistividade do betão, potencial elétrico e tomografia. Numa primeira demonstração o robô estava equipado com air-coupled impact-eco para deteção de delaminações e cavidades. Posteriormente, foi introduzido o radar de penetração no solo para caracterizar o estado das armaduras.



Figura 55 - Exemplos de aplicações do robô ICM Climber [64].

A capacidade da locomoção na transição entre superfícies planas e verticais (por exemplo, do chão para uma parede) pode ser um passo fulcral para a automatização das inspeções. Este fator consiste na principal limitação destes robôs para a realização de inspeções autónomas.

No entanto, esta solução poderia ser aplicada nas inspeções atuais dos ativos de construção civil abordados e quantificar as anomalias e defeitos, através da aplicação da sensorização acima descrita. Revelando-se num grande progresso face a uma avaliação qualitativa por parte dos inspetores, pois as anomalias detetadas por estes são apenas visíveis (na superfície da estrutura), enquanto que através desta sensorização podem ser detetados defeitos internos. As inspeções aos descarregadores de cheias em canal de encosta são geralmente efetuadas de uma zona segura através de um instrumento ótico, pois a acessibilidade a este ativo é difícil e constitui perigos. A aplicação desta solução neste caso não só reduzia o perigo, como também permitia uma análise muito mais objetiva do que a realizada à distância pelo inspetor.

Propulsão marítima: O projeto CView tem como objetivo realizar uma inspeção a estruturas submersas. A plataforma de locomoção para este projeto, apelidada de SeaCat, é um veículo de propulsão marítima (Figura 56). A missão de inspeção define-se em 3 fases: planeamento, execução da inspeção e avaliação de dados. O veículo move-se de forma autónoma apenas na fase de execução da inspeção. Durante o planeamento são preparadas todas as informações para descrever a missão de inspeção: a estrutura a inspecionar, a trajetória para lá chegar desde o ponto de disposição na água, o ponto de recolha, a velocidade de deslocamento, etc. No entanto certas partes do trajeto de inspeção podem ser desconhecidas ou podem surgir obstáculos não previstos, o sistema de orientação do veículo funde as secções desconhecidas com os parâmetros definidos, permitindo guiar o veículo em segurança durante a sua missão. Quando o sistema de orientação deteta e estabelece a distância parametrizada (da estrutura a inspecionar ao veículo), através dos dados fornecidos pelo sonar instalado, é calculada a trajetória a efetuar para proceder à inspeção e inicia-se a fase de execução da inspeção. Este sistema define as trajetórias de inspeção de forma a deslocar-se no sentido paralelo ao nível do mar, como se observa no exemplo da Figura 57, a linha azul representa o nível do mar. Relativamente à recolha de dados de inspeção, o veículo está equipado com uma câmara e um *multibeam echosounder* (o mesmo instrumento usado na deteção da distância da estrutura ao veículo) [65]. É referido pelo autor do projeto que o objetivo do mesmo passa por detetar fissuras e áreas danificadas em estruturas, no entanto ainda foram publicados resultados deste projeto, quanto à identificação de anomalias.

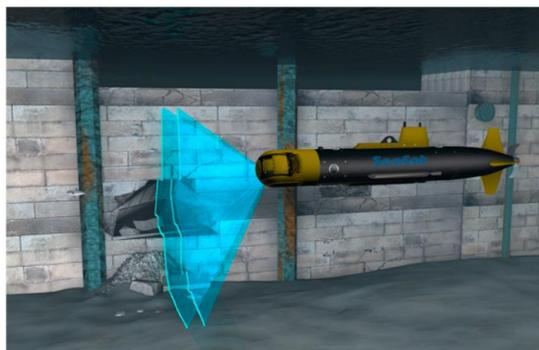


Figura 56 – SeaCat [65].

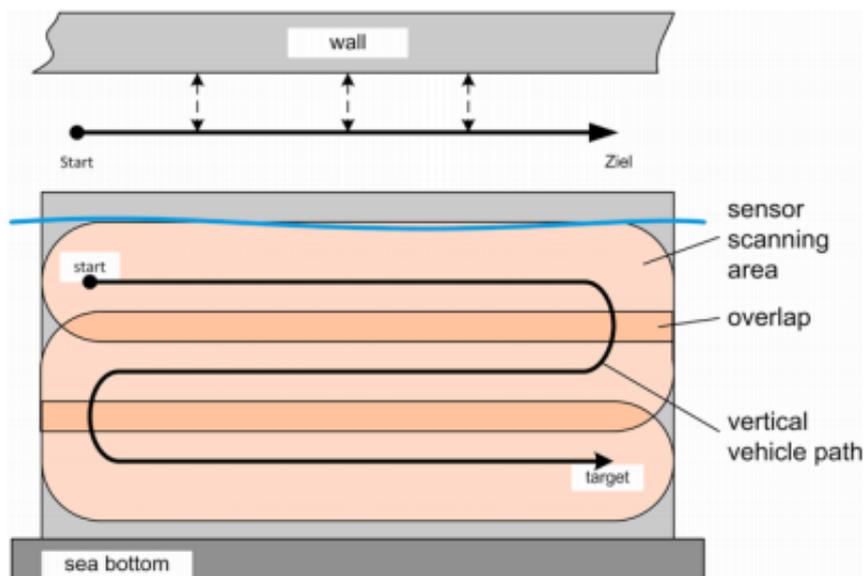


Figura 57 - Trajetória de inspeção numa parede submersa [65].

A aplicação deste tipo de solução para inspeção de ativos submersos constitui uma possibilidade para a inspeção ao interior de reservatórios de água, tendo como vantagem uma inspeção mais frequente, pois não seria necessário esvaziar o reservatório ou conciliar a inspeção com uma ação de manutenção ou plano de lavagem. Outra aplicação onde esta solução poderia ter ainda mais impacto seria na inspeção ao paramento de montante e à torre de tomada de água das barragens, que atualmente não são inspecionados ou só são parcialmente inspecionados durante períodos em que o nível da albufeira está mais baixo (que é geralmente no verão). No entanto, para inspeção dos órgãos das ETAR a sua aplicação é mais limitada, pelo facto da água residual constituir um ambiente mais agressivo que a água potável como já foi abordado, levando a uma deterioração prematura do equipamento, e pela existência de partículas e turvação na água residual, que pode levar a uma fraca visibilidade ou deteção de anomalias.

5.3.3. MONITORIZAÇÃO DE DESLOCAMENTOS

A monitorização é realizada para obter uma perceção quantitativa da condição atual da infraestrutura, através da medição de grandezas físicas como acelerações, extensões e deslocamentos. A monitorização da saúde estrutural visa o desenvolvimento de sistemas automáticos e contínuos de monitorização, e deteção de danos com o menor envolvimento laboral. Esta é usualmente conseguida utilizando sensores de contacto com fios ou *wireless*. Técnicas baseadas em imagem oferecem a vantagem de não ser necessário o contacto. Uma técnica que tem proporcionado grandes avanços na área da visão computacional e na inteligência artificial é o fluxo ótico. O fluxo ótico estima o deslocamento através da correspondência de píxeis entre dois *frames* de um vídeo. Os algoritmos de fluxo ótico associam píxeis numa imagem de referência com os píxeis correspondentes numa outra imagem da mesma cena [45]. Apesar desta abordagem ser promissora, a medição de deslocamentos e extensões em estruturas de construção civil não é assim tão simples, as suas gamas

revelam-se pequenas para serem medidas com precisão através de um sensor de fluxo óptico. Estudos recentes mostram que estes sensores têm sido aplicados na medição de deslocamentos, em pontes rodoviárias e pedestres. Ao contrário dos ativos de construção civil escolhidos, as pontes suportam cargas dinâmicas e estão sujeitas a deslocamentos superiores. Para estruturas como tanques e órgãos de barragens, justifica-se a utilização de sensores de contacto que meçam deslocamentos, como sensores de fibra ótica.

SENSORES DE FIBRA ÓTICA

Os sensores de fibra ótica consistem num cabo de fibra ótica ligado a um sensor ou um amplificador. São geralmente montados na superfície da estrutura para obter informação acerca da extensão, temperatura, defeitos e concentração de iões de cloreto [66]. Wan et al. [67] aborda a utilização deste tipo de sensores para sensorização de formação ou propagação de fissuras. Neste caso uma fibra ótica é acoplada à estrutura em forma de *zigzag*, de maneira que esteja inclinada em relação à fissuração (Figura 58a). Quando uma fissura surgir ou propagar, a fibra ótica irá dobrar para manter a continuidade (Figura 58b). Esta dobra irá induzir uma perda de sinal [67]. Através de um OTDR (*Optical time-domain reflectometer*), é possível medir a atenuação do sinal ao longo da fibra em função do tempo [68]. É possível localizar a posição da fissura através do tempo correspondente à perda de sinal, e também a abertura da fissura através da magnitude da perda de sinal. Um gráfico típico do sinal de retrodifusão versus tempo, antes e depois da formação da fissura é mostrado na Figura 58c. Antes da formação da fissura, nota-se o gradual declive decrescente do sinal. Nos pontos de viragem da fibra observa-se um declive mais acentuado. Depois da formação da fissura, declives abruptos são observados com correspondência à localização da fissura. Como se constata, apenas com uma fibra é possível identificar várias fissuras. No entanto este método só pode ser aplicado quando a fissura intersesta a fibra a um ângulo diferente de 90° .

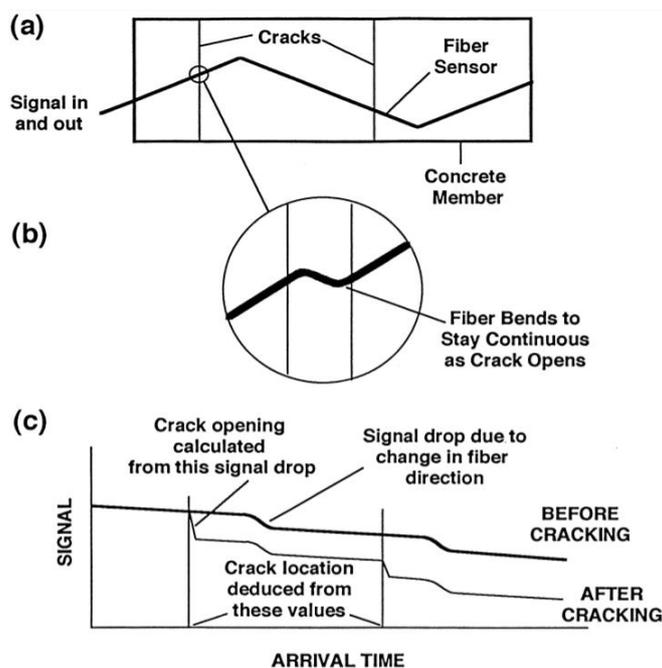


Figura 58 – (a) Layout em *zigzag* da fibra ótica num elemento de betão. (b) Dobragem da fibra na propagação da fissura. (c) Atenuação do sinal ao longo da fibra, antes e depois da fissura [69].

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Através da realização desta dissertação foi possível retirar um conjunto de conclusões acerca do trabalho realizado, para além disso foi também possível retirar ilações sobre o desenvolvimento de trabalhos futuros.

6.1. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como principais objetivos, elaborar uma metodologia que permita a seleção das inspeções aos ativos mais relevantes e analisar soluções tecnológicas para inspeção automática das mesmas.

Numa primeira fase começou-se por criar uma metodologia que permitisse perceber quais as inspeções mais relevantes no Grupo para uma determinada tipologia de ativos, conjugando a severidade associada a cada inspeção com a quantidade. Identificou-se que as tipologias de ativos mais relevantes são:

- Os principais órgãos e alguns equipamentos fundamentais das ETAR, pelo ambiente agressivo onde se inserem, requerendo a utilização de equipamentos de proteção individual, e pelo facto da inspeção a estes ativos requer uma paragem total da instalação.
- O interior dos reservatórios de água potável, a realização de uma inspeção requer o seu esvaziamento, caso não exista uma célula redundante, o desperdício de recursos e o impacto económico é elevado e impraticável.
- Os descarregadores de cheias e as torres de tomada de água, pelas limitações na acessibilidade e os perigos que os inspetores estão sujeitos, pois estes ativos estão localizados em zonas onde não se dispõem auxílios para acesso.

A metodologia para seleção das inspeções relevantes revela-se como um indicador importante para determinar as necessidades do Grupo. No entanto, conclui-se que alguns dos descritores devem ser mais desenvolvidos ou até mesmo acrescentados outros. Não é tido em conta o dispêndio em reunir as condições necessárias para iniciar a inspeção, como por exemplo montagem de acessórios, tempo de deslocamento à infraestrutura ou os recursos humanos necessários à realização da inspeção.

Após definidas quais as inspeções às tipologias de ativos mais relevantes, passou-se a analisar soluções automatizadas para inspeção das mesmas. As técnicas de inteligência artificial aplicadas em imagem quando conjugadas com a aquisição de dados através de um *drone*, revelam-se uma solução bastante versátil, podendo ter como aplicações uma ampla variedade de ativos. Pois todos os ativos cujos componentes estejam visíveis podem ser fotografados e as imagens resultantes, posteriormente, interpretadas. Adicionalmente a robustez de um *drone* permite que este se desloque para zonas inacessíveis ou que constituam perigo para os inspetores. A aplicação de técnicas de inteligência artificial na interpretação e análise das imagens também revelam uma enorme polivalência, desde a deteção de fissuras, destacamentos, corrosão ao reconhecimento de componentes estruturais. A deteção de anomalias por si só não representa uma solução automatizada, é necessário obter

informação acerca do componente estrutural em que essas anomalias estão inseridas. Para que, posteriormente, o nível de deterioração inspecionado (com base no tipo de anomalia e gravidade) associada a um componente constitua uma informação prática e útil, auxiliando com maior impacto a tomada de decisão.

Assim, conclui-se também que, a automatização das inspeções tem duas vertentes. Esta não depende só da capacidade de um meio robótico em delinear uma trajetória e recolher dados de forma autónoma, mas sim também da capacidade de reconhecer e identificar se o componente do ativo que se está a inspecionar é mais crítico ou não para a avaliação global do ativo ou infraestrutura. Esta informação é um atributo essencial para inspecionar as infraestruturas de forma eficaz e coerente.

As soluções baseadas em robôs de locomoção terrestre ou que consigam subir superfícies verticais, representam um importante campo a explorar, pois anexando um conjunto de sensores que realizem testes não destrutivos possibilita a quantificação de defeitos internos nos componentes. O que revela um enorme progresso face a uma avaliação qualitativa por parte dos inspetores, onde as anomalias detetadas por estes são apenas visíveis (na superfície da estrutura).

Os robôs de propulsão marítima, podem ver a sua aplicação na inspeção de ativos submersos, como é o caso da inspeção ao interior de reservatórios de água. Assim, exclui-se a necessidade de esvaziar o reservatório ou conciliar a inspeção com uma ação de manutenção ou plano de lavagem. Outra aplicação onde esta solução poderia ter ainda mais impacto seria na inspeção ao paramento de montante e à torre de tomada de água das barragens, que atualmente não são inspecionados ou só são parcialmente inspecionados durante períodos em que o nível da albufera está mais baixo (que é geralmente no verão). No entanto, para inspeção dos órgãos das ETAR a sua aplicação é mais limitada ou inaplicável.

Apresenta-se na Tabela 6 a correspondência dos exemplos de soluções analisadas com as necessidades de inspeção a ativos do Grupo AdP, de forma a complementar a informação discutida no capítulo 5.

Tabela 6 – Cruzamento entre necessidades de inspeção a ativos da AdP com as soluções analisadas.

	Inteligência artificial aplicada em imagem (adquirida por <i>drone</i>)	<i>ICM Climber</i>	<i>SeaCat</i>	Sensores de fibra ótica
Órgãos de const. civil das ETAR				
Interior dos reservatórios				
Equipamentos das ETAR				

Os ativos de construção civil representam um bem imóvel e a variação das suas características é quase inexistente, portanto uma única solução para inspeção de uma tipologia pode facilmente ser

aplicável noutra. No caso dos equipamentos, a diversidade é imensa, como se observa pelas tipologias de ativos identificadas (anexo B), cada uma com componentes, funções, materiais e métodos de funcionamento diferentes. Neste caso, aplicar uma solução que consiga inspecionar um conjunto de tipologias é difícil, torna-se necessário aplicar soluções que se foquem apenas na identificação de anomalias específicas, como é o caso da corrosão. Esta está presente na grande maioria dos ativos “equipamentos”, no entanto uma inspeção apenas à corrosão representa uma inspeção incompleta. E ainda, a inspeção deste tipo de equipamentos requer imensa atividade humana, como abrir portas, levantar tampas e proteções, acionar o equipamento, etc. Assim é impraticável uma inspeção completa aos equipamentos que são dotados de imensos detalhes e constrangimentos. Dificilmente será aplicada uma solução completamente autónoma, seria mais prudente uma monitorização constante de um parâmetro do equipamento do que propriamente uma solução para inspeção pontual.

A monitorização constante de um parâmetro do ativo também se revela como uma alternativa fiável à deteção de anomalias, pois desempenham um papel fundamental na quantificação de defeitos. No entanto a sua extensão à monitorização de vários parâmetros pode ser um fator limitante, como é o caso da solução apresentada no capítulo 5.5.3, esta apenas se limita à deteção de fissuras. Uma inspeção ou avaliação de condição é incompleta quando apenas é avaliado um parâmetro ou mecanismo de deterioração. Assim, as soluções de monitorização devem ser vistas como soluções que auxiliam a inspeção, podendo ser aplicadas na monitorização de um tipo de anomalia que seja expectável surgir.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

De forma a colmatar certos pontos da metodologia implementada e da análise a soluções, considera-se a realização das seguintes atividades como trabalhos futuros:

- Integrar na metodologia a família de infraestruturas: rede adutora e abastecimento de água e coletores de águas residuais, pois estes representam uma porção significativa do universo de ativos do Grupo. Acrescentado ainda que têm sido feitos muitos progressos na aplicação de soluções de inspeção e monitorização dos mesmos.
- Identificar de modo mais realístico a tipologia de ativos de construção civil. Uma tipologia genérica para todas as famílias de infraestruturas não é coerente com a realidade.
- Adaptar a metodologia de quantificação da relevância de inspeção aos ativos para cada categoria de ativos (construção civil e equipamentos). As tipologias não devem ser analisadas em simultâneo, tanto que a quantidade de ativos não é comparável entre ambos, visto que a natureza dos ativos é completamente diferente.
- Rever os descritores utilizados para quantificação da severidade, introduzindo custos associados à deslocação e realização da inspeção (assim com o dispêndio de recursos humanos), relacionando-os posteriormente com a instalação de uma tecnologia de monitorização remota.
- Analisar outras soluções baseadas em monitorização, principalmente para aplicação nos equipamentos das ETAR.

- Introduzir uma estimativa de custos à adoção de cada tecnologia de inspeção com base no custo-benefício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AdP, “Relatório e Contas 2018.”
- [2] ISO 55000, “Asset management-Overview, principles and terminology,” *Int. Organ. Stand.*, vol. 1, p. 18, 2014.
- [3] BSI, “Asset Management Part 1: Specification for the optimized management of physical assets,” *Inst. Asset Manag.*, 2008.
- [4] PECB, “4 Key Stages of Asset Management What ‘ Asset ’ Means and Why Asset Management Is Important ?,” 2016.
- [5] Helena Alegre and D. Covas, “Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água,” Lisboa, 2010.
- [6] H. Alegre, “Gestão Patrimonial de Infra-estruturas de abastecimento de água e de drenagem e tratamento de águas residuais,” Lisboa, 2008.
- [7] Águas de Portugal, *Águas de Portugal*, By the Book, Edições Especiais, Lda para AdP.
- [8] EPAL, “Gestão de Ativos,” Lisboa.
- [9] M. Almeida and M. Cardoso, “Gestão patrimonial de infra-estruturas de águas residuais e pluviais,” no. December 2015, p. 337, 2010.
- [10] B. S. Institution, “Maintenance — Maintenance terminology - BS EN 13306,” 2010.
- [11] P. Miguel de Sá Pereira, “Planos de Manutenção Preventiva Manutenção de Equipamentos Variáveis na BA Vidro, SA”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [12] R. J. C. Martins, “Análise da Degradação Mecânica de Ativos Físicos Análise da Degradação Mecânica de Ativos Físicos,” Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2017.
- [13] API, “Risk-Based Inspection,” 2009.
- [14] UNESCO, “The United Nations world water development report 2019: leaving no one behind.” UNESCO, 2019.
- [15] ERSAR, *RELATÓRIO ANUAL DOS SERVIÇOS DE ÁGUAS E RESÍDUOS EM PORTUGAL*, vol. 1. 2018.
- [16] “17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.” em <https://www.unric.org/pt/17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel>. Consultado a 25-Oct-2019.
- [17] “ERSAR” em <http://www.ersar.pt/pt/setor/caracterizacao>. Consultado a 09-Oct-2019.
- [18] “ERSAR” em <http://www.ersar.pt/pt/setor/caracterizacao/abastecimento-de-agua>. Consultado a 09-Oct-2019.
- [19] “ERSAR.” em <http://www.ersar.pt/pt/setor/caracterizacao/saneamento-de-aguas-residuais>. Consultado a 09-Oct-2019.
- [20] “Greensavers.” em <https://greensavers.sapo.pt/o-que-e-o-ciclo-urbano-da-agua-com-video/>. Consultado a 09-Oct-2019.

- [21] R. B. Sowby, "The Urban Water Cycle: Sustaining Our Modern Cities – National Geographic Society Newsroom." em <https://blog.nationalgeographic.org/2014/03/19/the-urban-water-cycle-sustaining-our-modern-cities/>. Consultado a 09-Oct-2019.
- [22] "O ciclo urbano da água." em <https://www.adp.pt/pt/atividade/o-que-fazemos/o-ciclo-urbano-da-agua/?id=28>. Consultado a 09-Oct-2019.
- [23] Governo de Portugal, "Plano estratégico de abastecimento de água e saneamento de águas residuais (PENSAAR)," vol. I, p. 117, 2015.
- [24] "Conquistámos importantes transformações que se traduzem hoje em mais qualidade de vida." em <https://www.adp.pt/pt/grupo-adp/historia/?id=7>. Consultado a 09-Oct-2019.
- [25] "Barragem das Olgas - Torre de Moncorvo." em <http://www.adnorte.pt/pt/comunicacao/galeria/detalhe-galeria-imagens/?id=61&img=93&bl=11>. Consultado a 04-Oct-2019].
- [26] "Barragem de Alijó." em http://cnpgb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Alijo.htm. Consultado a 14-Oct-2019.
- [27] "Barragem de Beliche." em https://pt.wikipedia.org/wiki/Barragem_de_Beliche. Consultado a 14-Oct-2019.
- [28] EPA, "Wastewater Technology Fact Sheet - Screening and Grit Removal," 2003.
- [29] ERSAR, *Tratamento de Águas Residuais - Operações e Processos de Tratamento Físico e Químico*. 2016.
- [30] J. Barreto, "Estudo de ETAR," Instituto Politécnico de Tomar, 2016.
- [31] T. Sousa, "Estações de Tratamento de Águas Residuais: conceitos e dimensionamento," Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016.
- [32] "ETAR de Milfontes." em <http://mercurioonline.pt/html/N1704CabanamilenareagoraaETARdeMilfontes.html>. Consultado a 29-Oct-2019.
- [33] CE Solutions, "Aeration Tank Addition," 2017. em <https://www.cesolutionsinc.com/aeration-tank-addition>. Consultado a 01-Oct-2019.
- [34] A. L. Ferreira Da Silva, "Estudo comparativo de sistemas de espessamento de ETAR," Instituto Politécnico de Viano do Castelo, 2015.
- [35] "ETAR de Lagos." em <https://www.aguasdoalgarve.pt/content/etar-de-lagos>. Consultado a 04-Oct-2019.
- [36] N. Monteiro and A. Coimbra, "Comparação da Modelação da Digestão Anaeróbia da ETAR do Choupal através de Redes Neurais Artificiais e ADM1," Escola Superior Agrária de Coimbra, 2016.
- [37] "Types of Reservoirs." em <http://www.engineeringenotes.com/water-engineering-2/storage->

- system/types-of-reservoirs-water-storage-system-water-engineering/16285. Consultado a 30-Sep-2019.
- [38] “Water reservoir Houston.” em <https://www.abqjournal.com/771325/former-drinking-water-reservoir-to-open-for-tours-in-houston.html>. Consultado a 30-Sep-2019.
- [39] A. Geraldês, “Dimensionamento Estrutural de uma Torre de Tomada de Água em Betão Engenharia Civil,” Instituto Superior Técnico, 2015.
- [40] “Barragem de Queimadela.” em <http://www.adnorte.pt/pt/comunicacao/galeria/detalhe-galeria-imagens/?id=61&img=94&bl=11>. Consultado a 04-Oct-2019.
- [41] M. Rijo, “Estruturas hídricas. Barragens,” Universidade de Évora, 2007.
- [42] “Protecting Concrete Tanks in Water and Wastewater Treatment Plants.” em <https://www.roadsbridges.com/protecting-concrete-tanks-water-and-wastewater-treatment-plants>. Consultado a 01-Oct-2019.
- [43] EPA, *Detection, Control, and Correction of Hydrogen Sulfide Corrosion in Existing Wastewater Systems*. 1992.
- [44] J. S. Fernandes, “Corrosão e Protecção.”
- [45] B. F. Spencer, V. Hoskere, and Y. Narazaki, “Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring,” *Engineering*. Elsevier Ltd, 01-Apr-2019.
- [46] D. Lattanzi and G. Miller, “Review of robotic infrastructure inspection systems,” *J. Infrastruct. Syst.*, 2017.
- [47] “Drone Wind Turbine Blade Inspection.” em <https://terra-drone.eu/en/drone-inspection/drone-wind-turbine-blade-inspection/>. Consultado a 27-Oct-2019.
- [48] I. Abdel-Qader, O. Abudayyeh, and M. E. Kelly, “Analysis of Edge-Detection Techniques for Crack Identification in Bridges,” *J. Comput. Civ. Eng.*, pp. 255–263, Oct. 2003.
- [49] B. Guldur Erkal and J. F. Hajjar, “Laser-based surface damage detection and quantification using predicted surface properties,” *Autom. Constr.*, pp. 285–302, Nov. 2017.
- [50] S. G. Paal, J. S. Jeon, I. Brilakis, and R. DesRoches, “Automated damage index estimation of reinforced concrete columns for post-earthquake evaluations,” *J. Struct. Eng. (United States)*, Sep. 2015.
- [51] S. Ghanta, T. Karp, and S. Lee, “Wavelet domain detection of rust in steel bridge images,” in *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, 2011, pp. 1033–1036.
- [52] B. Kim and S. Cho, “Automated vision-based detection of cracks on concrete surfaces using a deep learning technique,” *Sensors (Switzerland)*, Oct. 2018.
- [53] D. J. Atha and M. R. Jahanshahi, “Evaluation of deep learning approaches based on convolutional neural networks for corrosion detection,” *Struct. Heal. Monit.*, pp. 1110–1128,

- Sep. 2018.
- [54] Y. J. Cha, W. Choi, G. Suh, S. Mahmoudkhani, and O. Büyüköztürk, "Autonomous Structural Visual Inspection Using Region-Based Deep Learning for Detecting Multiple Damage Types," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, pp. 731–747, Sep. 2018.
- [55] V. Hoskere, Y. Narazaki, T. A. Hoang, and B. F. Spencer, "Vision-based Structural Inspection using Multiscale Deep Convolutional Neural Networks," in *Proceedings of the 3rd Huixian International Forum on Earthquake Engineering for Young Researchers*, 2017.
- [56] N. Hallermann, G. Morgenthal, and V. Rodehorst, "Unmanned Aerial Systems (UAS)-Case Studies of Vision Based Monitoring of Ageing Structures," 2015.
- [57] N. Hallermann, G. Morgenthal, and V. Rodehorst, "Vision-based deformation monitoring of large scale structures using Unmanned Aerial Systems," *IABSE Symp. Rep.*, pp. 2852–2859, Sep. 2014.
- [58] S. Stent, R. Gherardi, B. Stenger, K. Soga, and R. Cipolla, "Visual change detection on tunnel linings," *Mach. Vis. Appl.*, pp. 319–330, Apr. 2016.
- [59] Z. Zhu, S. German, and I. Brilakis, "Detection of large-scale concrete columns for automated bridge inspection," *Autom. Constr.*, pp. 1047–1055, Dec. 2010.
- [60] C. Koch, S. Paal, A. Rashidi, Z. Zhu, M. König, and I. Brilakis, "Achievements and challenges in machine vision-based inspection of large concrete structures," *Adv. Struct. Eng.*, pp. 303–318, Mar. 2014.
- [61] Y. Perez-Perez, M. Golparvar-Fard, and K. El-Rayes, "Semantic and Geometric Labeling for Enhanced 3D Point Cloud Segmentation," in *Construction Research Congress 2016*, 2016, pp. 2542–2552.
- [62] V. Hoskere, Y. Narazaki, T. A. Hoang, and B. F. Spencer, "Towards Automated Post-Earthquake Inspections with Deep Learning-based Condition-Aware Models," 2018.
- [63] J. H. Kurz, M. Stoppel, A. Taffe, and C. Boller, "Condition assessment of reinforced concrete structures using automated multi-sensor systems," 2015.
- [64] M. Guimaraes and J. Lindberg, "Remote controlled vehicle for inspection of vertical concrete structures," 2015.
- [65] M. Jacobi, "Autonomous inspection of underwater structures," *Rob. Auton. Syst.*, pp. 80–86, May 2015.
- [66] M. Sun, W. J. Staszewski, and R. N. Swamy, "Smart sensing technologies for structural health monitoring of civil engineering structures," *Adv. Civ. Eng.*, 2010.
- [67] K. T. Wan and C. K. Y. Leung, "Applications of a distributed fiber optic crack sensor for concrete structures," *Sensors Actuators, A Phys.*, pp. 458–464, Apr. 2007.
- [68] J. C. A. Moura, "Analisador de eventos em OTDR," Instituto Superior Técnico, 2016.

- [69] C. K. Y. Leung, N. Elvin, N. Olson, T. F. Morse, and Y.-F. He, "A novel distributed optical crack sensor for concrete structures," *Eng. Fract. Mech.*, pp. 133–148, Jan. 2000.
- [70] "Barragem de Corgas." em <http://gibb.pt/project/estudos-da-seguranca-das-barragens-do-divor-da-vigia-de-corgas-e-de-burgaes/>. Consultado a 04-Oct-2019.
- [71] "Barragem de Beliche." em https://www.geocaching.com/geocache/GC239VG_barragem-de-beliche-castro-marim1?guid=3232843b-ba1a-46ae-866e-7186f67ccdf8. Consultado a 04-Oct-2019.

ANEXOS

Anexo A – Ficha de aptidão funcional de equipamentos da empresa 1

EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES ELÉCTRICAS																			
Instalação: (Design Local 1) ESTAÇÃO ELEVATÓRIA - MONTE CHÃOS								Área: (Design Local 2) CASA DAS ÁGUAS											
Identificação do Equipamento																			
Designação: QUADRO ELÉCTRICO				Marca:				Modelo:				Nº Série		Ano de Fabr.:					
1. Verificação do cumprimento do Plano de Manutenção Preventiva e sua adequação ao prescrito no Manual de Operação e Manutenção																			
Plano de Manutenção		Existe		N existe		Manual de Operação e Manutenção		Existe		N existe		Folha de Características ou Catálogo		Existe		N existe			
x Preventiva →				X		x →				X		X				X			
2. Inspeção Visual																			
Ligações Estado e Aperto				Estado de Etiquetas e Sinalizadores				Operacionalidade de Portas e Fechaduras				Verif de nódulos de Corrosão Est de Deterioração da Pintura				<u>Observações / Medidas Corretivas:</u>			
ok	N ok	Cr	NA	ok	N ok	Cr	NA	ok	N ok	Cr	NA	ok	N ok	Cr	NA	Corrosão superficial			
x				x				x				x							
3. Condições de Funcionamento																			
Eq.Parado (F. Serv.)				Consumos (Amp)				Análise Termográfica				<u>Observações / Medidas Corretivas:</u>							
				R S T															
4. Observações e Recomendações Finais																			
										(Fotografia)									
Tempo Estimado de Vida Útil Remanescente:								Anos											
Elaborado Por:												Data: 24 de setembro de 2013							

Anexo B – Listagem das tipologias de ativos “equipamentos” inspecionados com anomalias

Família	Ativo	Família	Ativo
Captação	Atuador Elétrico	ETAR	Tremonha
Captação	Bomba Centrífuga	ETAR	Tubagem
Captação	Compressor Rotativo	ETAR	Unidade Preparação Polímero
Captação	Diferencial Elevação	ETAR	Válvula Comporta
Captação	Junta Desmontagem	ETAR	Válvula Cunha
Captação	Medidor de Caudal Eletromagnético	ETAR	Válvula Guilhotina
Captação	Medidor de Caudal Mecânico	ETAR	Válvula Telescópicas
Captação	Medidor de Caudal Volumétrico	ETAR	Ventilador
Captação	Pressostato	EEAA	Atuador Elétrico
Captação	Mesa de Comando	EEAA	Autômato e Plc
Captação	QE	EEAA	Bomba Centrífuga
Captação	Reservatório Sob Pressão	EEAA	Bomba Submersível
Captação	Válvula Borboleta	EEAA	Compressor Alternativos
Captação	Válvula Comporta	EEAA	Compressor Rotativo
Captação	Válvula Cunha	EEAA	Correcção Factor Potência
Captação	Válvula Regulação Pressão	EEAA	Diferencial Elevação
Captação	Válvula Retenção	EEAA	Grupo Eletrobomba
Captação	Ventosa	EEAA	Grupo Gerador
ETA	Bomba Centrífuga	EEAA	Indicador
ETA	Bomba Diafragma	EEAA	Junta Desmontagem
ETA	Bomba Submersível	EEAA	Medidor de Caudal Eletromagnético
ETA	Diferencial Elevação	EEAA	Medidor de Caudal Mecânico
ETA	Filtro	EEAA	Medidor de Caudal Ultra Sônico
ETA	Gerador Dióxido Cloro	EEAA	Motor Elétrico
ETA	Grupo Gerador	EEAA	QE
ETA	Medidor de Cloro	EEAA	Reservatório Sob Pressão
ETA	Medidor de Caudal Eletromagnético	EEAA	Reservatório/Tanque
ETA	Misturador	EEAA	Transformador
ETA	Motor Elétrico	EEAA	Válvula Borboleta
ETA	Moto-Redutor	EEAA	Válvula Cunha
ETA	QE	EEAA	Válvula de Retenção
ETA	Reservatório/Tanque	EEAA	Variador de Frequência
ETA	Transmissor de Pressão	EEAA	Ventilador
ETA	Válvula Borboleta	EEAA	Ventosa
ETA	Válvula com Actuador	EEAR	Autômato e Plc
ETA	Válvula Comporta	EEAR	Bomba Parafuso
ETA	Válvula Cunha	EEAR	Bomba Submersível
ETA	Válvula Macho Esférico	EEAR	Compressor
ETAR	Agitador	EEAR	Diferencial Elevação
ETAR	Agitador Submersível	EEAR	Grade Mecânica
ETAR	Analizador de Rede	EEAR	Grupo Eletrobomba

ETAR	Medidor de cloro	EEAR	Junta Desmontagem
ETAR	Arejador Vertical Lento	EEAR	Medidor de Caudal Eletromagnético
ETAR	Atuador Elétrico	EEAR	Motor Elétrico
ETAR	Bomba Centrífuga	EEAR	QE
ETAR	Bomba Diafragma	EEAR	Reservatório Sob Pressão
ETAR	Bomba Parafuso	EEAR	Tamisador
ETAR	Centrífuga	EEAR	Tubagem
ETAR	Classificador de Areias	EEAR	Válvula Borboleta
ETAR	Circuito Desodorização	EEAR	Válvula Comporta
ETAR	Compressor	EEAR	Válvula Cunha
ETAR	Correcção Factor Potência	EEAR	Válvula Globo
ETAR	Desagregador	EEAR	Válvula Guilhotina
ETAR	Desarenador	EEAR	Válvula de Retenção
ETAR	Desarenador/Desengordurador	EEAR	Variador de Velocidade
ETAR	Grade Mecânica	EEAR	Ventilador
ETAR	Grupo Cogrador	EEAR	Viga monocarril
ETAR	Guias de Equipamentos Submersíveis	Reservatórios	Atuador Elétrico
ETAR	Cabos Elétricos	Reservatórios	Bomba Submersível
ETAR	Medidor de Caudal Eletromagnético	Reservatórios	Indicador de Pressão
ETAR	Medidor de Caudal Ultra Sónico	Reservatórios	Medidor de Caudal Eletromagnético
ETAR	Misturador	Reservatórios	Medidor de Caudal Mecânico
ETAR	Motor Elétrico	Reservatórios	Medidor de Caudal Ultra Sónico
ETAR	Parafuso Transportador	Reservatórios	QE
ETAR	Ponte Raspadora	Reservatórios	Transformador
ETAR	QE	Reservatórios	UPS
ETAR	Reservatório Sob Pressão	Reservatórios	Válvula Boia
ETAR	Sonda	Reservatórios	Válvula Borboleta
ETAR	Tamisador	Reservatórios	Válvula Cunha
ETAR	Torre de Lavagem	Reservatórios	Válvula Descarga
ETAR	Transformador	Reservatórios	Válvula Diafragma
ETAR	Transmissor	Reservatórios	Ventilador
ETAR	Transportador	Reservatórios	Ventosa

Anexo C - Listagem das tipologias de ativos de construção civil inspecionados

Família	Ativo
Captação	Exterior – Cobertura
Captação	Exterior – Paramentos exteriores
Captação	Acesso ao interior
Captação	Interior – teto
Captação	Interior – Paramentos
Captação	Recinto (vedação, arranjos exteriores e pavimentos)
Captação	Outros componentes
ETA	Decantadores
ETA	Filtros
ETA	Reservatórios de água tratada
ETA	Canais
ETA	Edifícios: Exterior – Cobertura
ETA	Edifícios: Exterior – Paramentos exteriores
ETA	Edifícios: Acessos
ETA	Edifícios: Interior – Teto
ETA	Edifícios: Interior – Paramentos
ETA	Recinto
ETA	Outros componentes
ETAR	Canais
ETAR	Decantadores
ETAR	Desarenador/Desengordurador
ETAR	Tanque de Arejamento
ETAR	Espessador de Lamas
ETAR	Digestores
ETAR	Silos
ETAR	Edifícios: Exterior – Cobertura
ETAR	Edifícios: Exterior – Paramentos exteriores
ETAR	Edifícios: Acessos
ETAR	Edifícios: Interior – Teto
ETAR	Edifícios: Interior – Paramentos
ETAR	Recinto
ETAR	Outros componentes
Estações Elevatórias	Canais
Estações Elevatórias	Exterior – Cobertura
Estações Elevatórias	Exterior – Paramentos exteriores
Estações Elevatórias	Acesso ao interior
Estações Elevatórias	Interior – Teto
Estações Elevatórias	Interior – Paramentos
Estações Elevatórias	Recinto
Estações Elevatórias	Outros componentes
Reservatórios	Exterior – Cobertura
Reservatórios	Exterior – Paramentos exteriores
Reservatórios	Acesso ao interior

Reservatórios	Interior – Teto
Reservatórios	Interior – Paramentos
Reservatórios	Recinto
Reservatórios	Outros componentes
Barragens	Betão – Paramento de montante (emerso)
Barragens	Betão – Coroamento
Barragens	Betão – Galerias
Barragens	Betão – Paramento de jusante
Barragens	Aterro (terra) – Paramento de montante (emerso)
Barragens	Aterro (enrocamento) – Paramento de montante (emerso)
Barragens	Aterro – Coroamento
Barragens	Aterro – Paramento de jusante
Barragens	Betão – Descarregadores de cheias
Barragens	Aterro – Descarregadores de cheias
Barragens	Betão – Descarregadores de fundo
Barragens	Aterro – Descarregadores de fundo
Barragens	Torres de Tomada de Água
Barragens	Câmara de Válvulas
Barragens	Postos de Comando
Posto de Transformação	Exterior – Cobertura
Posto de Transformação	Exterior – Paramentos exteriores
Posto de Transformação	Acesso ao interior
Posto de Transformação	Interior – Teto
Posto de Transformação	Interior – Paramentos
Posto de Transformação	Recinto
Posto de Transformação	Outros componentes
Caixas	Exterior – Cobertura
Caixas	Exterior – Paramentos exteriores
Caixas	Acessos
Caixas	Interior – Teto
Caixas	Interior – Paramentos
Caixas	Outros componentes

Anexo D – Matriz para avaliação de inspeções

	Caracterização		Inspeção					Quantidade de ativos
	Família	Ativo	Tempo Despendido por ano (min.)	Perigo	Dificuldade de Acessibilidade de Humana	Necessidade de Paragem	Severidade/Criticidade	
Equipamentos	Captação	Atuador Elétrico	3	1	1	2	6,8	145
	Captação	Bomba Centrífuga	3	2	1	2	7,6	92
	Captação	Compressor Rotativo	3	2	1	2	7,6	3
	Captação	Diferencial Elevação	2	1	1	1	4,4	38
	Captação	Medidor de Caudal Eletromagnético	1	1	1	3	8	130
	Captação	Medidor de Caudal Mecânico	1	1	1	3	8	136
	Captação	Pressostato	1	1	1	2	6	27
	Captação	Mesa de Comando	4	2	1	2	8	3
	Captação	QE	4	2	1	2	8	428
	Captação	Reservatório Sob Pressão	3	2	1	2	7,6	44
	Captação	Válvula Borboleta	2	1	1	2	6,4	189
	Captação	Válvula Comporta	2	3	3	3	11,6	62
	Captação	Válvula Cunha	2	1	1	2	6,4	298
	Captação	Válvula Regulação Pressão	1	2	1	2	6,8	9
	Captação	Válvula Retenção	2	1	1	2	6,4	139
	Captação	Ventosa	3	2	1	3	9,6	24
	ETA	Bomba Centrífuga	3	2	1	2	7,6	1310
	ETA	Bomba Diafragma	3	2	1	2	7,6	1504
	ETA	Bomba Submersível	4	3	3	2	10,4	393
	ETA	Diferencial Elevação	2	1	1	2	6,4	227
	ETA	Gerador Dióxido Cloro	4	3	2	3	11,6	83
	ETA	Grupo Gerador	2	2	2	2	8	136
	ETA	Medidor de Cloro	3	1	1	2	6,8	326
	ETA	Medidor de Caudal Eletromagnético	1	1	1	3	8	512
	ETA	Misturador	3	2	2	3	10,4	405
	ETA	Motor Elétrico	2	2	1	2	7,2	3252
	ETA	Moto-Redutor	1	2	1	2	6,8	17
	ETA	QE	4	2	2	2	8,8	1190
	ETA	Reservatório/Tanque	2	2	2	3	10	1239
	ETA	Transmissor de Pressão	1	1	1	2	6	1293
	ETA	Válvula Borboleta	2	2	1	2	7,2	3301
	ETA	Válvula Comporta	2	3	3	3	11,6	496
	ETA	Válvula Cunha	2	3	1	2	8	1950
	ETA	Válvula Macho Esférico	2	1	1	2	6,4	331
	ETAR	Agitador	3	2	2	2	8,4	2336
	ETAR	Agitador Submersível	4	2	3	3	11,6	4107
ETAR	Analizador de Rede	3	2	1	2	7,6	2261	
ETAR	Medidor de cloro	3	1	1	2	6,8	11	

Equipamentos	ETAR	Arejador Vertical Lento	3	2	2	3	10,4	939
	ETAR	Atuador Elétrico	3	1	2	2	7,6	4181
	ETAR	Bomba Centrífuga	3	2	2	2	8,4	5237
	ETAR	Bomba Diafragma	4	2	2	2	8,8	2848
	ETAR	Bomba Parafuso	4	2	1	2	8	5301
	ETAR	Centrífuga	4	2	2	3	10,8	1269
	ETAR	Classificador de Areias	3	2	2	3	10,4	747
	ETAR	Circuito Desodorização	4	2	2	3	10,8	1088
	ETAR	Compressor	3	2	1	2	7,6	5163
	ETAR	Correcção Factor Potência	3	2	1	1	5,6	363
	ETAR	Desagregador	3	2	1	3	9,6	256
	ETAR	Grade Mecânica	3	3	3	3	12	917
	ETAR	Grupo Cogeração	3	2	2	3	10,4	181
	ETAR	Cabos Elétricos	1	2	2	2	7,6	1376
	ETAR	Medidor de Caudal Eletromagnético	1	2	1	3	8,8	8149
	ETAR	Medidor de Caudal Ultra Sônico	1	2	1	3	8,8	3787
	ETAR	Misturador	3	2	1	3	9,6	1152
	ETAR	Motor Elétrico	2	2	1	2	7,2	33376
	ETAR	Parafuso Transportador	2	3	2	2	8,8	1963
	ETAR	Ponte Raspadora	4	3	3	4	14,4	2837
	ETAR	QE	4	2	2	2	8,8	16459
	ETAR	Reservatório Sob Pressão	3	2	2	2	8,4	3349
	ETAR	Sonda	3	2	1	2	7,6	9589
	ETAR	Tamisador	4	2	3	3	11,6	1888
	ETAR	Torre de Lavagem	3	2	2	3	10,4	512
	ETAR	Transformador	3	3	3	2	10	1120
	ETAR	Transmissor	1	2	1	2	6,8	16149
	ETAR	Transportador	2	3	2	2	8,8	1355
	ETAR	Tremonha	2	2	1	2	7,2	672
	ETAR	Tubagem	1	2	1	1	4,8	14069
	ETAR	Unidade Preparação Polímero	3	3	1	3	10,4	672
	ETAR	Válvula Comporta	2	3	3	3	11,6	12117
	ETAR	Válvula Cunha	2	2	1	2	7,2	34965
	ETAR	Válvula Guilhotina	2	2	1	2	7,2	4277
	ETAR	Válvula Telescópicas	2	2	1	2	7,2	3051
	ETAR	Ventilador	2	2	1	3	9,2	5653
	EEAA	Atuador Elétrico	3	1	1	2	6,8	834
	EEAA	Autómato e Plc	4	1	1	3	9,2	543
	EEAA	Bomba Centrífuga	3	2	1	2	7,6	2327
	EEAA	Bomba Submersível	4	3	3	2	10,4	130
	EEAA	Compressor Alternativos	2	2	1	2	7,2	82
	EEAA	Compressor Rotativo	3	2	1	2	7,6	26
EEAA	Correcção Factor Potência	3	2	1	1	5,6	69	
EEAA	Diferencial Elevação	2	1	1	1	4,4	182	

Equipamentos	EEAA	Grupo Gerador	2	2	1	2	7,2	52
	EEAA	Indicador	3	1	1	2	6,8	378
	EEAA	Medidor de Caudal Eletromagnético	1	1	1	3	8	786
	EEAA	Medidor de Caudal Mecânico	1	1	1	3	8	282
	EEAA	Medidor de Caudal Ultra Sônico	1	1	1	3	8	30
	EEAA	Motor Elétrico	2	2	1	2	7,2	2501
	EEAA	QE	4	2	1	2	8	1615
	EEAA	Reservatório Sob Pressão	3	2	1	2	7,6	573
	EEAA	Reservatório/Tanque	2	2	2	3	10	52
	EEAA	Transformador	3	3	3	2	10	139
	EEAA	Válvula Borboleta	2	1	1	2	6,4	1046
	EEAA	Válvula Cunha	2	1	1	2	6,4	2245
	EEAA	Válvula de Retenção	2	1	1	2	6,4	929
	EEAA	Variador de Frequência	3	2	1	2	7,6	330
	EEAA	Ventilador	2	1	1	3	8,4	135
	EEAA	Ventosa	3	2	1	3	9,6	117
	EEAR	Autômato e Plc	4	1	1	3	9,2	1372
	EEAR	Bomba Parafuso	4	2	1	2	8	6
	EEAR	Bomba Submersível	4	3	3	2	10,4	10333
	EEAR	Compressor	3	2	1	2	7,6	308
	EEAR	Diferencial Elevação	2	2	1	1	5,2	672
	EEAR	Grade Mecânica	3	3	3	3	12	56
	EEAR	Grupo Eletrobomba	3	2	2	2	8,4	11
	EEAR	Medidor de Caudal Eletromagnético	1	1	1	3	8	1495
	EEAR	Motor Elétrico	2	2	1	2	7,2	1467
	EEAR	QE	4	2	1	2	8	5573
	EEAR	Reservatório Sob Pressão	3	2	1	2	7,6	969
	EEAR	Tamisador	3	3	3	3	12	426
	EEAR	Tubagem	1	1	1	1	4	5528
	EEAR	Válvula Borboleta	2	1	1	2	6,4	325
	EEAR	Válvula Comporta	2	3	3	3	11,6	1753
	EEAR	Válvula Cunha	2	2	1	2	7,2	6379
	EEAR	Válvula Guilhotina	2	1	1	2	6,4	526
	EEAR	Válvula de Retenção	2	1	1	2	6,4	3887
	EEAR	Variador de Velocidade	3	2	1	2	7,6	683
	EEAR	Ventilador	2	1	1	3	8,4	1803
	EEAR	Viga monocarril	2	1	1	1	4,4	230
	Reservatórios	Atuador Elétrico	3	1	1	2	6,8	216
	Reservatórios	Bomba Submersível	4	3	3	2	10,4	28
	Reservatórios	Indicador de Pressão	3	2	1	2	7,6	440
	Reservatórios	Medidor de Caudal Eletromagnético	1	2	2	3	9,6	1363
	Reservatórios	Medidor de Caudal Mecânico	1	2	2	3	9,6	1268
Reservatórios	Medidor de Caudal Ultra Sônico	1	2	2	3	9,6	341	

Reservatórios	QE	4	2	1	2	8	1460
	Transformador	3	3	3	2	10	26
	UPS	3	1	1	2	6,8	297
	Válvula Boia	2	3	3	2	9,6	118
	Válvula Borboleta	2	2	1	2	7,2	577
	Válvula Cunha	2	2	1	2	7,2	4405
	Válvula Diafragma	2	2	1	2	7,2	2
	Ventilador	2	2	1	2	7,2	49
	Ventosa	3	2	1	2	7,6	366
Construção Civil	Captação Exterior - Cobertura	1	3	4	1	8	1155
	Captação Exterior - Paramentos exteriores	1	2	2	1	5,6	1155
	Captação Acesso ao interior	1	2	2	1	5,6	1155
	Captação Interior - teto	1	3	3	1	7,2	1155
	Captação Interior - Paramentos	1	2	2	1	5,6	1155
	Captação Recinto	1	1	1	1	4	1155
	Captação Outros componentes	1	2	2	1	5,6	1155
	ETA Decantadores	2	2	2	4	12	223
	ETA Filtros	2	2	2	4	12	260
	ETA Reservatórios de água tratada	4	2	2	4	12,8	74
	ETA Canais	1	2	3	3	10,4	8
	ETA Exterior - Cobertura	1	3	4	1	8	157
	ETA Exterior - Paramentos exteriores	1	2	2	1	5,6	157
	ETA Acessos	1	2	2	1	5,6	157
	ETA Interior - Teto	1	3	3	1	7,2	157
	ETA Interior - Paramentos	1	2	2	1	5,6	157
	ETA Recinto	1	1	1	1	4	157
	ETA Outros componentes	1	2	2	1	5,6	157
	ETAR Canais	1	2	3	3	10,4	5227
	ETAR Decantadores	2	2	3	4	12,8	3403
	ETAR Desarenador/Desengordurador	2	2	3	4	12,8	1429
	ETAR Tanque de Arejamento	3	2	3	4	13,2	1920
	ETAR Espessador de Lamas	2	2	3	4	12,8	2400
	ETAR Digestores	2	2	3	4	12,8	459
	ETAR Silos (cal, armazenamento)	1	2	4	3	11,2	747
	ETAR Exterior - Cobertura	1	3	4	1	8	992
	ETAR Exterior - Paramentos exteriores	1	2	2	1	5,6	992
	ETAR Acessos	1	2	2	1	5,6	992
	ETAR Interior - Teto	1	3	3	1	7,2	992
	ETAR Interior - Paramentos	1	2	2	1	5,6	992
	ETAR Recinto	1	1	1	1	4	992
	ETAR Outros componentes	1	2	2	1	5,6	992
	Estações Elevatórias	Canais	1	2	3	2	8,4
Estações Elevatórias	Exterior - Cobertura	1	3	4	1	8	2719

Construção Civil	Estações Elevatórias	Exterior - Paramentos exteriores	1	2	2	1	5,6	2719
	Estações Elevatórias	Acesso ao interior	1	2	2	1	5,6	2719
	Estações Elevatórias	Interior - Teto	1	3	3	1	7,2	2719
	Estações Elevatórias	Interior - Paramentos	1	2	2	1	5,6	2719
	Estações Elevatórias	Recinto	1	1	1	1	4	2719
	Estações Elevatórias	Outros componentes	1	2	2	1	5,6	2719
	Reservatórios	Exterior - Cobertura	1	3	4	1	8	1734
	Reservatórios	Exterior - Paramentos exteriores	1	2	2	1	5,6	1734
	Reservatórios	Acesso ao interior	1	2	2	1	5,6	1734
	Reservatórios	Interior - Teto	1	3	3	4	13,2	1734
	Reservatórios	Interior - Paramentos	1	2	2	4	11,6	1734
	Reservatórios	Recinto	1	1	1	1	4	1734
	Reservatórios	Outros componentes	1	2	2	1	5,6	1734
	Barragens	Betão - Paramento de montante	4	3	2	1	7,6	10
	Barragens	Betão - Coroamento	4	1	1	1	5,2	10
	Barragens	Betão - Galerias	4	2	3	1	7,6	10
	Barragens	Betão - Paramento de jusante	4	3	2	1	7,6	10
	Barragens	Aterro (terra) - Paramento de montante	4	3	2	1	7,6	17
	Barragens	Aterro (enrocamento) - Paramento de montante	4	3	2	1	7,6	5
	Barragens	Aterro - Coroamento	4	1	1	1	5,2	22
	Barragens	Aterro - Paramento de jusante	4	3	2	1	7,6	22
	Barragens	Betão - Descarregadores de cheias	4	3	3	2	10,4	10
	Barragens	Aterro - Descarregadores de cheias	4	3	3	2	10,4	22
	Barragens	Betão - Descarregadores de fundo	4	2	3	2	9,6	10
	Barragens	Aterro - Descarregadores de fundo	4	2	3	2	9,6	22
	Barragens	Torres de Tomada de Água	4	3	4	2	11,2	32
	Barragens	Câmara de Válvulas	4	2	3	1	7,6	32
	Barragens	Postos de Comando	4	1	1	1	5,2	32
	Posto de Transformação	Exterior - Cobertura	1	3	4	1	8	147
	Posto de Transformação	Exterior - Paramentos exteriores	1	2	2	1	5,6	147
	Posto de Transformação	Acessos	1	2	2	1	5,6	147
	Posto de Transformação	Interior - teto	1	3	3	1	7,2	147
	Posto de Transformação	Interior - Paramentos	1	2	2	1	5,6	147
	Posto de Transformação	Recinto	1	1	1	1	4	147
	Posto de Transformação	Outros componentes	1	2	2	1	5,6	147
	Edifícios (Comando/Apoio)	Exterior - Cobertura	1	3	4	1	8	2245

Construção Civil	Edifícios (Comando/Apoio)	Exterior - Paramentos exteriores	1	2	2	1	5,6	2245
	Edifícios (Comando/Apoio)	Acessos	1	2	2	1	5,6	2245
	Edifícios (Comando/Apoio)	Interior - teto	1	3	3	1	7,2	2245
	Edifícios (Comando/Apoio)	Interior - Paramentos	1	2	2	1	5,6	2245
	Edifícios (Comando/Apoio)	Recinto	1	1	1	1	4	2245
	Edifícios (Comando/Apoio)	Outros componentes	1	2	2	1	5,6	2245
	Caixas	Exterior - Cobertura	1	2	2	1	5,6	7953
	Caixas	Exterior - Paramentos exteriores	1	2	2	1	5,6	7953
	Caixas	Acessos	1	2	2	1	5,6	7953
	Caixas	Interior - teto	1	3	3	1	7,2	7953
	Caixas	Interior - Paramentos	1	2	3	1	6,4	7953
	Caixas	Outros componentes	1	2	2	1	5,6	7953