



Tomada de decisão e transformação digital em gestão de ativos na Infraestruturas de Portugal

Caso de estudo – Ponte das Várzeas

João Duarte Pacheco Clara

Dissertação para obtenção do grau de mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Prof. Doutor Nuno Gonçalo Cordeiro Marques de Almeida

Engenheiro Hugo de Vasconcelos Corrêa Patrício

Júri

Presidente: Prof. Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Orientador: Prof. Doutor Nuno Gonçalo Cordeiro Marques de Almeida

Vogal: Doutor João Gomes Morgado

Janeiro de 202

Declaração

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

Agradecimentos

Finalizada esta etapa importante da minha vida gostaria de agradecer aos meus orientadores pelos ensinamentos, conselhos, e enorme disponibilidade que sempre mostraram ao longo do desenvolvimento desta dissertação. Ao Professor Doutor Nuno Marques de Almeida pelo seu contributo na formulação do tema e pelos incentivos e orientações dados que me permitiram a concretização dos objetivos propostos. Ao Engenheiro Hugo Patrício da Infraestruturas de Portugal cujo envolvimento foi fundamental para complementar o meu conhecimento no âmbito da gestão de ativos em infraestruturas de ferrovia.

Gostaria também de expressar um enorme agradecimento a todos aqueles que me acompanharam ao longo do meu percurso académico, Professores, colegas e amigos, Família.

Resumo

A tomada de decisão é um tema central no âmbito da gestão de ativos em organizações de infraestruturas ferroviárias e rodoviárias. O processo de tomada de decisão carece de informação disponível prontamente, exata, completa, oportuna e num formato claro. Neste contexto, a transformação digital tem sido amplamente debatida tendo em vista a otimização do processo de tomada de decisão e dos seus resultados.

A literatura demonstra que existem enormes oportunidades em termos tecnológicos para a implementação da transformação digital em projetos de arquitetura, engenharia e construção principalmente nas fases de operação e manutenção. Um dos assuntos mais relevantes revela-se ser os requisitos de informação de suporte à tomada de decisão, assim como a modelação dos processos de tomada de decisão tendo conta a sua envolvente, e os resultados pretendidos.

A presente dissertação visa estudar a aplicabilidade de um modelo de tomada de decisão ajustado às atividades de gestão de ativos e apreciar, explorando e simulando a sua implementação num caso concreto na Infraestruturas de Portugal, os possíveis impactos no âmbito da transformação digital da organização.

Esta apreciação assenta numa análise de tecnologias de suporte assim como os requisitos de informação para os processos de tomada de decisão envolvidos nas atividades de gestão de ativos da ponte das Várzeas, nomeadamente a avaliação de fadiga útil restante realizado pela Infraestruturas de Portugal.

Palavras-chave: Gestão de ativos; tomada de decisão; transformação digital; pontes de ferrovia; digital twin

Abstract

Decision making is a central topic within asset management in rail and road infrastructure organizations. The decision-making process needs information that is promptly available, accurate, complete, timely and in a clear format. In this context, digital transformation has been widely discussed with the objective to optimize the decision-making process and its outcomes.

The literature shows that there are huge opportunities within new technologies available for the implementation of digital transformation in architecture, engineering and construction projects mainly in the operation and maintenance phases. One of the most relevant issues turns out to be the information requirements to support decision-making, as well as the modelling of decision-making processes considering their context, and the intended results.

This dissertation aims to study the applicability of a decision-making model adjusted to asset management activities and to evaluate, explore and simulate its implementation in a specific case at Infraestruturas de Portugal, the possible impacts within the digital transformation of the organization.

This assessment is based on an analysis of the support technologies as well as the information requirements for the decision-making processes involved in the asset management activities of the Várzeas bridge, namely the remaining useful fatigue assessment performed by Infraestruturas de Portugal.

Keywords: Asset Management; decision-making; digital transformation; railway bridges, digital twin

Índice geral

Agradecimentos	i
Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Índice geral.....	iv
Índice de figuras	vi
Índice de tabelas	viii
Simbologia	ix
1. Introdução	1
1.1 Âmbito e justificação do tema.....	1
1.2 Objetivo e metodologia.....	1
1.3 Organização do documento.....	2
2. Revisão de conhecimentos	5
2.1 Método de pesquisa	5
2.2 A transformação digital em gestão de ativos.....	5
2.3 Tomada de decisão em gestão de ativos.....	17
3. Modelo de tomada de decisão com vista à transformação digital em gestão de ativos.....	41
3.1 Método CIPO	41
3.2 Contexto interno e externo da organização.....	42
3.3 Entradas	42
3.4 Processos	43
3.5 Saídas, resultados esperados	44
3.6 Monitorização contínua	44
4. Caso de estudo – Ponte das Várzeas	45
4.1 Descrição ponte das Várzeas.....	46
4.2 Sistema de análise de fadiga.....	48
5. Aplicação do modelo ao caso de estudo	51
5.1 Contexto organizacional	51

5.2	Entradas	55
5.3	Processo.....	57
5.4	Outputs	57
5.5	Monitorização contínua	58
6.	Discussão da aplicação do modelo ao caso de estudo.....	59
6.1	Contributos do estudo	59
6.2	Limitações do estudo	64
7.	Conclusão	66
	Bibliografia	68
	Anexos.....	73
	Anexo I.....	73

Índice de figuras

Figura 1 – Esquematização da organização do documento.....	2
Figura 2 -Troca de dados em Modelos Digitais, Sombra Digitais e Digital Twin	12
Figura 3 - Cadeia de valor da informação da infraestrutura digital.	14
Figura 4 - O paradigma de Digital Twin (Boje et al., 2020).....	15
Figura 5 - Do BIM para Digital Twin, - adptado de Mariela Daskalova 2018.....	17
Figura 6- Principais temas abordados na ISO 55000 (Adaptado do Life cycle Engineering).....	19
Figura 7 - Princípios Fundamentais de Gestão de Ativos (adaptado da ISO 55000:2016)	20
Figura 8 - Relações entre os termos chave em Gestão de Ativos. Adaptado de ISO 55000:2016.....	22
Figura 9 - Relação entre os fatores-chave de um sistema de gestão de ativo e definição dos seus limites.....	23
Figura 10 - Enquadramento do CCV no CTCV e fases do CV-Norma ISSO 15686-6	24
Figura 11 - Exemplos de variações na descrição de um ciclo de vida de um ativo(The Institute of Asset Management, 2015).....	24
Figura 12 - Relação entre os níveis organizacionais, hierarquia de decisão e a sua escala temporal- adaptado de Y. Sun et al., 2008.....	27
Figura 13 - O âmbito da gestão de ativos numa organização – adaptado The Institute of Asset Management, 2015.....	28
Figura 14 - Custos operacionais de Informação sobre os ativos – adaptado The Institute of Asset Management, 2015.....	29
Figura 15 - Enquadramento do DT em Gestão de ativos nas fases de Operação e Manutenção – Adaptado de Lu et al., 2020,	36
Figura 16 - Categorias de tecnologias e processos para obtenção do DT	38
Figura 17 - Modelo CIPO.....	41
Figura 18 - Localização da Ponte de Várzeas (Google Maps 2021)	46
Figura 19 - Ponte das Várzeas - Google Maps 2021	47
Figura 20 - Principais elementos técnicos da Ponte das Várzeas.....	47
Figura 21 - Visão Geral do Sistema de Análise de Fadiga.....	48

Figura 22 - Simplificação do SAF.....	50
Figura 23 - Objetivos organizacionais da IP	55
Figura 24 - Fatores que influenciam a tomada de decisão em pontes ferroviárias e rodoviária	63
Figura 25 - Proposta de inserção de um modelo CIPO num contexto de transformação digital e implementação de um DT.....	64

Índice de tabelas

Tabela 1 - Diferenças entre DT, BIM e SCF	16
Tabela 2 - Resumo das aplicações de DT nas infraestruturas ferroviárias.....	39
Tabela 3 - Agrupamento e descrição dos módulos do sistema e respectivas tecnologias.....	49
Tabela 4 - Inputs do processo CIPO	56

Simbologia

AEC – Projeto de Arquitetura, Engenharia e Construção

BIM – Building information model

CAVE – Cave automatic real environment

CC – Cloud Computing

CCV – Custo do Ciclo de Vida

CIPO – Contexto, Inputs, Processo e Outputs

CTCV – Custo total do Ciclo de Vida

DL – Deep Learning

DT – Digital Twin

IA -Inteligência Artificial

IAM – Institute of Asset Management

IFC – Industry Foundations Classes

IoT – Internet of Things

IP – Infraestruturas de Portugal

LIDAR – Light Detection and Ranging

MIE – Monitorização da Integridade Estrutural

MLS – Mobile LIDAR System

RA – Realidade Aumentada

RFID – Identificação por Radiofrequência

RV - Realidade Virtual

SAF – Sistema de Análise de Fadiga

SCF – Sistema ciber-físico

SIG – Sistema de Informação Geográfico

UAV –Unmanned Aerial Vehicle (Veículo Aéreo não tripulado)

UE – União Europeia

1. Introdução

1.1 Âmbito e justificação do tema

A construção é muitas vezes descrita como um setor pouco dinâmico no que diz respeito a potenciais avanços tecnológicos. Nas últimas décadas a nossa sociedade tem vindo a atingir níveis de produtividade e de eficácia elevados em quase todas as indústrias, mas o setor da construção tem ficado aquém. Tendo em conta que este é um setor onde a informação precisa de estar disponível prontamente e que esta precisa de ser exata, completa, oportuna e num formato claro que seja compreensível para o seu destinatário, o setor tem vindo a aderir cada vez mais rápido à transformação digital. Um dos grandes avanços nas últimas décadas tem sido a implementação de modelos, como o Building Information Modelling (BIM) que tem vindo a transformar o método tradicional de implementação baseado em modelos 2D, em sistemas de informação 3D. O BIM tem sido considerado como uma das inovações mais importantes nas últimas décadas, permitindo melhorar a troca de informação e colaboração entre todos os intervenientes, aumentar a produtividade, eficácia e qualidade final de um projeto bem como tem contribuído para a normalização do setor. Atualmente estes modelos, apesar de fornecerem procedimentos e esquemas exatos ainda não estão preparados para captar e processar a grande quantidade de informação que é criada durante todo o ciclo de vida de um projeto, desde a sua conceção até ao fim do seu ciclo de vida. O Digital Twin(DT) é o paradigma que tem sido mencionado por diversos autores para resolução desta problemática. Um dos objetivos do DT é permitir que haja uma comunicação bidirecional entre o sistema físico e o sistema digital, permitindo a sua sincronização, através das mais variadas tecnologias, como sensores, *cloud computing* e inteligência artificial que têm sido amplamente implementadas na Indústria 4.0.

O sucesso de um projeto de construção depende fortemente da gestão de informação e capacidade de processar todo o volume de dados, ao longo de todo o seu ciclo de vida. Os estudos mais predominantes centram-se principalmente na gestão de informação durante as fases de conceção e construção, que apesar de serem críticas, muitas vezes não são parte significativa na totalidade do projeto. A fase de operação e manutenção é a fase que representa a maior percentagem do ciclo de vida total do projeto, dentro da qual o processo tomada de decisão por parte de uma organização é o que mais pode beneficiar. Os engenheiros responsáveis pela tomada de decisão em infraestruturas enfrentam um desafio enorme: devem não só considerar características estruturais e de carregamento, mas também considerar a durabilidade estrutural (fadiga, corrosão, etc.), os dados provenientes de inspeções e os impactos históricos e sociais de forma a equilibrar necessidades operacionais e restrições orçamentais.

1.2 Objetivo e metodologia

O objetivo da dissertação é estudar a aplicabilidade de um modelo de tomada de decisão ajustado às atividades de gestão de ativos e apreciar, explorando e simulando a sua implementação num caso concreto de uma entidade gestora de ativos de infraestruturas, os possíveis impactes no âmbito da transformação digital da organização.

A discussão feita é com base no impacto que a transformação digital, dentro de uma organização com um vasto leque de ativos, tal como a Infraestruturas de Portugal, possa ter no suporte ao processo de tomada de decisão. Dentro deste objetivo procura-se a aplicação do modelo proposto pela comissão técnica para a gestão de ativos (TC251) para o processo de tomada de decisão, o estudo das tecnologias de suporte à transformação digital no âmbito da tomada de decisão, assim como a modelação dos requisitos de informação necessários à tomada de decisão.

1.3 Organização do documento

A metodologia e organização implementadas visam a exibição de uma forma estruturada de dados de entrada para um processo decisório para implementação num sistema de gestão de ativos, a análise de um modelo de tomada de decisão, assim como todas as tecnologias que o suportam e os seus requisitos de informação.

No capítulo 2 apresenta-se a pesquisa bibliográfica realizada sobre as diferentes tecnologias e processos de suporte que permitem a transformação digital no âmbito de gestão de ativos de infraestrutura. Apresenta-se também o conceito de gestão de ativos e de tomada de decisão,

Apresenta-se no capítulo 3, um modelo de tomada de decisão com vista à transformação digital em gestão de ativos, e paralelamente é feito no capítulo 4 a apresentação do caso de estudo da ponte das Várzeas pertencente ao portfólio de ativos da Infraestruturas de Portugal.

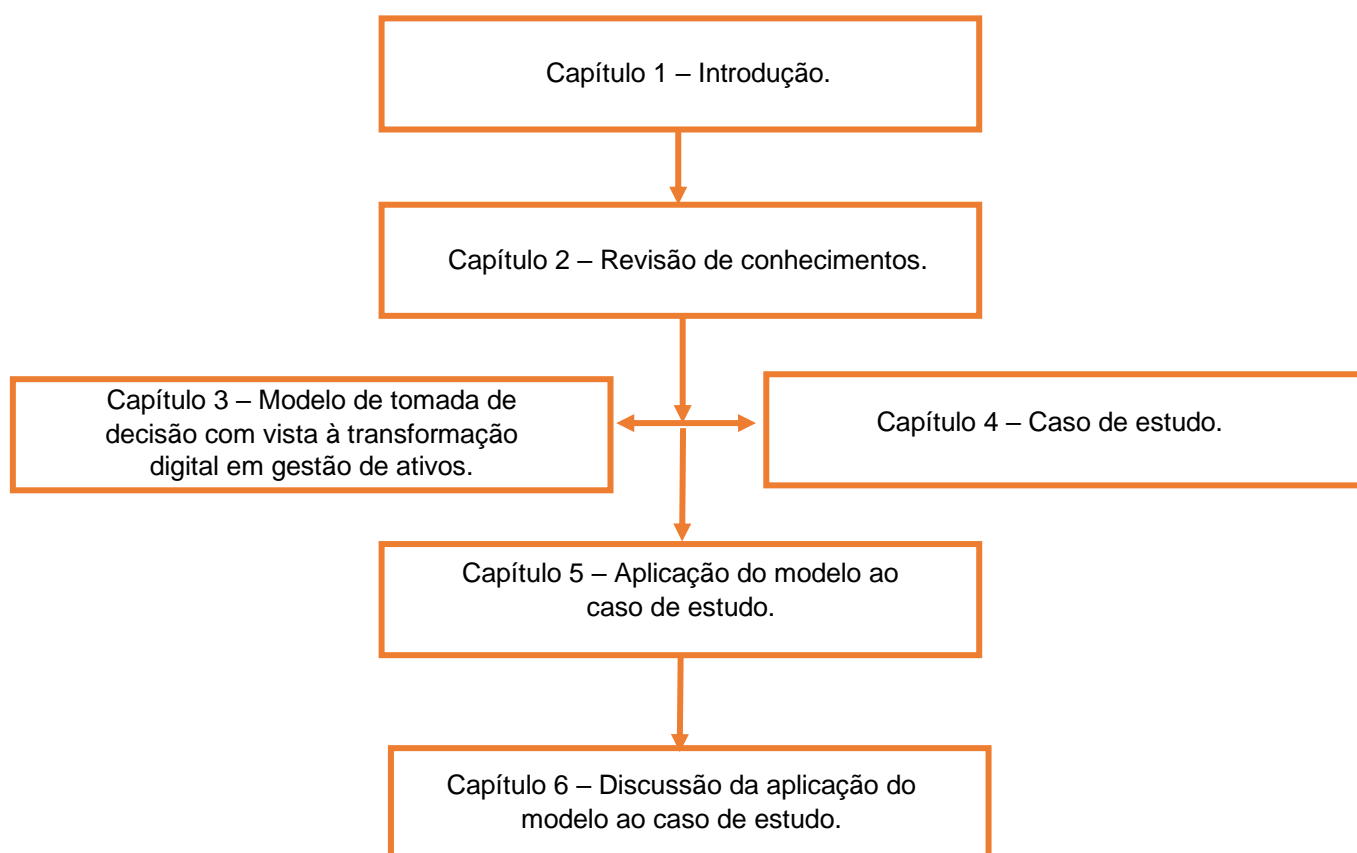


Figura 1 – Esquematização da organização do documento

No capítulo 5 é aplicado o modelo apresentado ao caso de estudo, sendo que no capítulo 6 é feita a discussão da aplicação do modelo ao caso de estudo assim como quais os seus contributos e limitações.

No capítulo 6, é feita uma apreciação dos limites e contribuições da aplicabilidade do modelo ao caso de estudos identificando as lacunas e as hipóteses de resolução das mesmas.

2. Revisão de conhecimentos

2.1 Método de pesquisa

O método de pesquisa utilizado baseou-se em artigos científicos e guias técnicos. Baseou-se na utilização de plataformas online, como bibliotecas científicas como B-on, Science Direct, Web of Science e Google Scholar. Os resultados desta pesquisa encontram-se sistematizados na tabela 1 do Anexo I.

Automation in Construction foi um dos jornais científicos internacionais mais importantes para esta pesquisa, sendo este baseado em assuntos pertinentes em relação às diversas tecnologias de auxílio à concepção, engenharia, construção e operação e manutenção de infraestruturas. O âmbito do jornal é bastante amplo abrangendo todas as fases do ciclo de vida de um projeto, desde o planejamento, passando pela fase de construção, até à fase de operação e manutenção, podendo mesmo ter em conta o eventual desmantelamento e reciclagem de infraestruturas. Fundamental para esta pesquisa foi também o papel do Institute of Asset Management nas organizações. O IAM no domínio dos sistemas de gestão de ativos, destaca-se promovendo o conhecimento, e principalmente, as ferramentas de aplicação consistente das mais valorizadas práticas internacionais, assim como, de métodos de diagnóstico que permitem confirmar o grau de aceitação dos sistemas de gestão implementados nas organizações. O trabalho desenvolvido pelo IAM permitiu às organizações a criação de mecanismos de avaliação do grau de maturidade dos seus sistemas, e principalmente facilitou a compreensão das vantagens de gestão de ativos.

2.2 A transformação digital em gestão de ativos

2.2.1 Da Indústria 4.0 à Construção 4.0

No setor da indústria cada vez mais tem sido aplicado o termo Indústria 4.0 como a quarta revolução industrial. A Indústria 4.0 representa a tendência cada vez mais evidente de automatizar o setor, a partir das mais recentes tecnologias. Tecnologias como o sistema ciber-físico(SCF), Internet of Things (IoT) e as clouds tem permitido a transição do físico em sistemas virtuais. Este novo paradigma tem como proposta a automatização, monitorização, implementação de sensores, robotização e digitalização de modo a promover e melhorar os variados sistemas de produção, distribuição e manutenção (Xu et al., 2018).

Posteriormente, mas de maneira idêntica, nos projetos de arquitetura, engenharia e construção (AEC) tem sido proposto por diversos autores o conceito Construção 4.0 por este estar claramente atrás em relação às últimas tecnologias utilizadas noutros setores. A maior parte dos processos de produção na construção são tradicionalmente manuais, organizados com ferramentas básicas de gestão e com baixa incorporação de tecnologia. Esta falta de automatização tem levado a níveis de desempenho inferiores comparando a outros setores. Há várias razões que podem ser consideradas para adereçar este problema, mas a fragmentação que existe entre os processos, os seus atores e a forte dependência entre trabalhos são as principais.

O paradigma Construção 4.0 pode ser então definido como uma proposta para automatizar e digitalizar as diferentes fases do ciclo de vida de um projeto de AEC, apostando numa forte componente de obtenção de dados em tempo real e com a incorporação de sensores no local de implementação da obra, de forma a otimizar o tempo e custo, o controlo de qualidade e a segurança dos trabalhadores e utilizadores (Alaloul et al., 2018)

Várias tecnologias emergentes têm vindo a criar a possibilidade de digitalização de todos os dados, informações e processos e também a automatização de tarefas e atividades que anteriormente eram executadas manualmente. No entanto, para tirar total partido destes benefícios, será necessário implementar um programa de transformação digital a todos os níveis de uma organização, com as tecnologias e processos emergentes, tendo que ser avaliado as potenciais vantagens, custos, riscos e esforços da mudança necessária de forma sustentar novas formas de trabalho.

A transformação digital, associada a técnicas computacionais inovadoras está a abrir rapidamente caminho de forma que num futuro próximo tenhamos:

- A recolha, organização e análise de dados e informação existente (projeto, testes, inspeções, monitorização e outra informação disponível);
- Técnicas tradicionais e não invasivas de inspeção com a utilização de novas tecnologias;
- Sistemas de avaliação estrutural mais acessíveis e a Internet of Things, com vista a criar novas possibilidade de monitorização e análise;
- Implementação e aplicação de metodologias automáticas baseadas em indicadores de desempenho e métricas para classificação e diagnóstico detalhados da integridade de por exemplo uma ponte, incluindo o tabuleiro da ponte, pilares e fundações.

2.2.2 Tecnologia e processos de suporte

A Construção 4.0 vem então despoletar a necessidade de controlar e monitorizar ativos (infraestruturas, edifícios, pontes, etc.) durante todo o seu ciclo de vida. Esta necessidade cria uma linha de investigação em relação à transformação digital de um portfólio de ativos.

A utilização de Building Information Modelling tem sido uma das tecnologias bases para o desenvolvimento de programas de transformação digital. BIM é uma metodologia colaborativa para as fases de conceção, construção e operação para projetos AEC. De um ponto de vista tecnológico, BIM pode ser visto como uma evolução das ferramentas tradicionais de CAD para um modelo digital, baseado em ferramentas 3D, incorporando variáveis como tempo, custo, sustentabilidade, segurança e gestão, integrando os diversos intervenientes. Está cada vez mais a ser um grande fator de contribuição para a implementação de um projeto AEC baseada em dados multidisciplinares adquiridos através das mais diversas tecnologias de modo a serem processados e usados ao longo das diferentes fases de um projeto, permitindo a interligação dos mesmos. (Volt, Rebekka; Stengel, Julian Schultmann, 2014)

BIM também pode ser definido como o processo de criação, partilha, troca e gestão de informação de uma forma eficaz, durante todo o ciclo de vida de um projeto AEC de uma infraestrutura. O conceito é a utilização de um repositório único de dados, ao qual todas as pessoas envolvidas têm acesso, partilhando toda a informação criada, alterada e adicionada ao longo do ciclo de vida de um projeto. (Kurwi et al., 2017)

A tecnologia BIM é baseada na modelação por objetos paramétricos. Um elemento paramétrico é um objeto digital que contém, além dos parâmetros geométricos (Porto et al., 2015), várias características específicas como as propriedades físicas e materiais. Os estudos mais recentes apontam para a consideração de 7 dimensões, sendo estas:

- A dimensão 3D que apresenta a estrutura geométrica espacial referente aos projetos de arquitetura, estruturas e sistemas (água, eletricidade ou internet) e os instrumentos utilizados permitem a análise de conflitos entre estes projetos;
- A dimensão 4D que adiciona a dimensão relativa ao fator tempo, traduzindo o planeamento da construção, dando ênfase ao controlo da deteção de incoerências ou alterações complexas que eventualmente possam ser introduzidas no projeto de construção inicial;
- A dimensão 5D que está associada à componente custos, apoiando a orçamentação e o seu acompanhamento nas distintas fases do projeto e da construção;
- A dimensão 6D que apoia a concretização de simulações energéticas e de sustentabilidade, apoiando a análise, ainda em fase de projeto, da otimização do consumo de energia no imóvel ou infraestrutura;
- A dimensão 7D é utilizado por gestores na área de operação, manutenção e de gestão do empreendimento em uso, pois permite, aos engenheiros, extrair e consultar dados relevantes dos ativos, como o estado de componentes, especificações, manutenções/operações manuais ou períodos de garantias. (Elsafani, 2016).

O BIM como o conhecemos carece de informação referente ao ambiente onde o ativo físico se localiza, esta informação pode ser obtida digitalmente através de um Sistema de Informação Geográfica. Um SIG é uma estrutura digital para armazenar, gerir e analisar dados de diferentes tipos, tendo em conta a sua localização espacial. Um SIG ligado a um modelo digital de uma infraestrutura (BIM) permite fazer uma gestão em rede entre a geolocalização de um projeto AEC, fornecedores e elementos urbanos/rurais. O SIG armazena dados que permitem a conceção e localização do projeto AEC com auxílio a diversas camadas de informação: hidrológica, geográfica, geológica, de projetos antigos, entre outras. (Zhu et al., 2019)

Em termos de tecnologia que podem alimentar tanto um BIM e um SIG, começando no nível base de recolha de dados, podemos referir o conceito de recolha automatizada de dados, onde se encontram diversas tecnologias que permitem, em praticamente tempo real, a recolha destes mesmos dados.

A Internet of Things (IoT) é fundamental na transformação digital tendo em conta que é a tecnologia que irá fornecer os modelos de informação. Isto pode ser feito através de sensores (temperatura, pressão, e outras quantidades mesuráveis).

IoT pode ser definida como a extensão da conectividade de rede e capacidade de computação para objetos, sensores e outros aparelhos do nosso quotidiano que não são normalmente considerados computadores (McEwen & Cassimally, 2013). São todos os aparelhos e objetos que se encontram de certa maneira capacitados a estarem permanentemente ligados à internet, e que são capazes de comunicar entre si e de transmitir em tempo real uma vasta quantidade de informação sobre aquilo que os rodeia. IoT também é definido como a rede que permite a ligação de objetos e dispositivos físicos que recolhem informação e interagem com o meio onde se inserem. (Tang et al., 2019) Em projetos AEC, a IoT é utilizada na ligação dos modelos digitais BIM com os ativos físicos para controlo e monitorização *in situ* de trabalhadores, equipamento, parâmetros de segurança e saúde e progresso na frente de obra, otimizando a comunicação e a logística de trabalhos no geral.

Este controlo dos ativos físicos pode ser suportado através de sensores. Os sensores são dispositivos eletrónicos para determinar a variação de uma grandeza física ou química, transformando-as em variáveis elétricas. Os sensores são utilizados em projetos AEC para monitorizar a integridade estrutural de edifícios e infraestruturas, para verificar o correto funcionamento de equipamentos e sistemas, a segurança de trabalhadores, controlar o conforto térmico entre outros. (Boje et al., 2020)

Para além dos sensores, existem uma variedade de tecnologias presentes na Indústria 4.0 que podem ser extrapoladas para a Construção 4.0 permitindo uma variedade de funcionalidades como a digitalização, o controlo e a monitorização que facilitam a obtenção dos mais variados tipos de dados inserindo-os em modelos BIM e SIG.

Sistemas como os Veículos Aéreos Não tripulados (UAV), mais conhecidos como drones, permitem a realização de missões aéreas à distância. Têm autonomia e capacidade para transportar diversos elementos, incluindo dispositivos que permitem captar diferentes parâmetros e fotografias. Os UAV em projetos AEC podem ser utilizados como auxílio à monitorização, controlo do progresso e manutenção de infraestruturas nas diferentes fases do ciclo de vida, permitindo obter vistas aéreas globais, verificar detalhes da estrutura e equipamentos e alcançar locais de difícil acesso. Têm também capacidade de transportar materiais e equipamento facilitando a logística de um projeto. (Asadi et al., 2020).

Scanners 3D (S3D) também é uma tecnologia amplamente utilizada nos variados projetos de AEC sendo estes dispositivos que permitem capturar parâmetros como a geometria e cor de um objeto, de forma recriá-lo digitalmente. Os Scanners 3D podem ser utilizados na construção para gerar modelos digitais do terreno e de infraestruturas já construídas permitindo a sua monitorização (Xiong et al., 2013). Uma das grandes tecnologias emergentes dentro desta área é a tecnologia LIDAR (Light Detection And Ranging), mais especificamente a MLS (Mobile LIDAR System) que consiste num sistema LIDAR em movimento que tanto pode ser acoplado a um veículo rodoviário como ferroviário.

O rastreamento de materiais e equipamentos, de forma manter o seu controlo nos locais de projetos AEC pode ser obtido através da identificação por radiofrequência (RFID) que utiliza campos eletromagnéticos e ondas de radiofrequência, para identificar automaticamente, geolocalizar e rastrear etiquetas fixadas aos objetos. A RFID também facilita o estudo do comportamento das estruturas através do movimento destas etiquetas (a medição da deformação, expansão dos materiais, entre outros), e a monitorização e gestão do equipamento etiquetado nas instalações. (Xue et al., 2018).

As tecnologias referidas anteriormente têm um potencial elevado para a obtenção de informação e dados nas diferentes fases do ciclo de vida de um projeto AEC, mas esta informação, para além de ter de ser armazenada, precisa de ser processada e analisada de forma a tornar-se útil nas diferentes fases do ciclo de vida de uma infraestrutura. A tecnologia big data e big data analytics são baseadas em técnicas com objetivo de solucionar estas questões. Big data envolve um conjunto de técnicas que permite o tratamento de grandes quantidades de dados que à partida são difíceis de armazenar, processar e analisar, pelas ferramentas tradicionais, de forma centralizada principalmente pelas suas grande dimensões e complexidade. Enquanto que a big data analytics para além de processar grandes quantidades de dados, analisa tendências e correlações que possam ter interesse, possibilitando assim a extração de informação útil para a otimização de processos de conceção, construção e manutenção.(Han & Golparvar-Fard, 2017)

A possibilidade de ter acesso a todos os dados e poder computacional para a consulta e troca de informações e ficheiros é conseguido remotamente através da tecnologia cloud computing. Cloud computing permite o acesso a recursos computacionais e aplicações através de uma rede ligada às *clouds*, sem a necessidade de hardware e software sofisticado nos aparelhos utilizados na sua consulta. O acesso a informações e dados em servidores remotos permite, aos diversos gabinetes das diferentes especialidades de AEC, a simplificação do uso, em locais distintos, das diversas ferramentas sofisticadas de modelação e simulação.(Chong et al., 2014)

O tratamento dos diversos dados obtidos, tal com a possibilidade de acesso remotamente é aquilo que torna possível um engenheiro responsável pela gestão e manutenção de uma infraestrutura a possibilidade de tomar as decisões mais adequadas no momento certo. A possibilidade de as decisões serem auxiliadas por software próprio é promovido pela tecnologia Deep Learning (DL). DL são algoritmos estruturados hierarquicamente concebidos para que, de forma automatizada, consigam aprender e obter conhecimento, sem que haja regras previamente estabelecidas e inspirados na aprendizagem humana. Pode ser utilizado ao longo do ciclo de vida de um projeto de construção de forma a identificar o desgaste dos elementos de segurança, para controlar equipamentos e verificar a presença ou movimentos de pessoas. Mais especificamente, pode também identificar e classificar características de elevado interesse, tais como fissuras num elemento de betão ou num elemento metálico. (Akinosho et al., 2020).

Em paralelo temos a mais conhecida inteligência artificial (IA). IA descreve-se como a capacidade das máquinas em resolver problemas complexos usando algoritmos que imitam e são inspirados pela inteligência humana. A inteligência artificial otimiza os processos de conceção, monitorização e

previsão do comportamento das estruturas e dos seus elementos nos projetos de estruturas, segurança, entre outros. A inteligência artificial também tem a capacidade de melhorar os modelos de previsão dos fenômenos naturais que possam vir a afetar os elementos de uma estrutura. (Chow et al., 2020)

A capacidade de aquisição de dados em tempo real, através das tecnologias descritas anteriormente, juntamente com a utilização da big data e da inteligência artificial tem sido amplamente utilizado como técnicas de identificação de danos em infraestruturas, denominado por diversos autores como monitorização da integridade estrutural (MIE) ou structural health monitoring (SHM). (L. Sun et al., 2020)

Um dos grandes problemas, com aquisição de grande quantidade de dados é a sua normalização de forma que a interoperabilidade entre as diferentes tecnologias e softwares seja possível, para isso foi criado o modelo de dados Industry Foundations Classes (IFC), suportado pela norma ISO 16739. (Jaud et al., 2020)

O conjunto das tecnologias descritas anteriormente, permitem a transformação digital de um portefólio de ativos, mas alguns autores sugerem que a tecnologia pode ir para além disso, consideram que pode ser também uma ferramenta de auxílio no local de implementação do próprio projeto de AEC, mais especificamente na fase de operação e manutenção, tal como já acontece na Indústria 4.0. Uma das tecnologias mais evidente na sua aplicação é a Robótica. Robótica é a ciência e a técnica que estuda a conceção, fabrico e a utilização de robôs, ou seja, máquinas, que podem ser programadas para interagir autonomamente com objetos de forma a executar tarefas de diferentes tipos. Os robôs são muito utilizados na indústria para recolher informações em tempo real do local (por exemplo temperaturas e imagens) e executam tarefas de fabrico de forma repetitiva. No projetos de AEC os robôs têm a possibilidade de trabalhar com auxílio de modelos (BIM) de forma a executar tarefas como a soldadura, a dobragem e o corte de varões de aço a ser utilizados em betão armado. (Mantha et al., 2018; Tavares et al., 2019).

Outra tecnologia de auxílio nas fases de construção, operação e manutenção no local é a fabricação aditiva. Fabricação aditiva refere-se à construção em 3D através da adição e sobreposição de camadas ultrafinas de material, alcançando níveis de precisão elevados e reduzindo os tempos de construção. Pode ser utilizado em construção no próprio local de implementação de um projeto ou pode ser utilizado para a construção de modelos e componentes de uma certa construção à escala exata. (Craveiro et al., 2019)

Mais virada para as fases de operação e manutenção existem duas grandes tecnologias em evolução, a Realidade Virtual (RV) e a Realidade Aumentada (RA). Realidade virtual é uma tecnologia criada para gerar cenários com uma aparência real a partir de sistemas informáticos. Podem, portanto, proporcionar uma imersão total em modelos (BIM, por exemplo) através da utilização óculos ou numa CAVE (cave automatic real environment), quer para realizar visitas virtuais ao local de implementação de um projeto, quer para realizar revisões de projeto, quer para trabalhar de forma interativa, em tempo real e à escala na otimização de um projeto AEC. Também pode ser utilizado para a criação de

ambientes imersivos para orientação dos trabalhadores antes do primeiro dia de trabalho, em temas como a saúde e segurança, logística da construção, expondo de forma atrativa os diferentes riscos provenientes dos ambientes de construção(Wolfartsberger, 2019; Zhang et al., 2020)

A RA é uma tecnologia que permite sobrepor elementos virtuais em ambientes reais, utilizando dispositivos de visualização, como óculos de RA ou tablets. É um suplemento importante e necessário para visualizar e interagir com modelos digitais (BIM, por exemplo) no local da infraestrutura. A realidade aumentada facilita a coordenação dos projetos e os seus elementos, tais como as estruturas e as diferentes instalações, permitindo a otimização de projetos nas diferentes fases de ciclo de vida. A utilização desta tecnologia permite aos engenheiros e trabalhadores compreender e explorar os planos de construção, permitindo a visualização em 3D de modelos nos locais exatos de implementação. Também permite a identificação dos diferentes elementos através de camadas de informação que facilitam a sua interpretação.

Por fim a realidade aumentada tem enormes vantagens de implementação nas fases de gestão e manutenção de infraestruturas ao exibir simultaneamente a versão digital sobreposta à infraestrutura real, juntamente com legendas e guias de procedimento.(Automation in Construction-Preface, 2013)

A combinação das tecnologias descritas anteriormente levam a um conceito muito abrangido na comunidade científica conhecido como sistemas ciber-físicos.

Sistemas ciber-físico são, então, todos os mecanismos que permitem uma interação bidirecional entre os componentes físicos e computacionais, através de redes de monitorização e controlo de processos físicos que realizam ações físicas e fornecem feedback aos sistemas digitais. Um sistema ciber-físico é um elemento essencial para a coordenação entre os modelos digitais (BIM, por exemplo) e os ativos físicos. É utilizado para determinar o que se construiu, em relação àquilo que se planeou, corrigindo o sistema digital com as novas características. É possível assim monitorizar os projetos AEC ao longo de todo o seu ciclo de vida.(Yuan et al., 2016)Wang et al., 2013, 2014)

2.2.3 Digital Twin

O patamar final das tecnologias referidas até aqui, ou seja o termo que agrega todas estas tecnologias e define o futuro da engenharia civil no seu todo, mas mais particularmente em gestão de ativos é o conceito de Digital Twin(DT).

No entanto, DT tem vindo a ser interpretado de muitas maneiras diferentes. Com base em diferentes autores e diferentes propostas de DT é possível concluir que ainda não existe uma definição comum. Diversos autores concluem que o debate à volta da definição de DT contínua. O DT tem vindo a atrair um interesse crescente em múltiplos sectores de atividade, levando a definições distintas em função do contexto em que o termo é utilizado.

O conceito de DT é considerado por diversos autores como a representação virtual dinâmica de um sistema físico que permite uma variedade de simulações. É caracterizado pela capacidade de sincronização entre um sistema virtual e o sistema físico em si, através da obtenção de dados em

tempo real provenientes de sensores e outros dispositivos *smart*, com auxílio de algoritmos matemáticos, permitindo a criação de modelos virtuais cada vez mais precisos. É principalmente utilizado na otimização, monitorização, diagnóstico e prognóstico de um sistema real. O DT na construção pode ser considerado como o nível mais completo em termos virtuais com capacidade a nível de prevenção e previsão para auxílio nos projetos AEC, tornando-se uma ferramenta base no auxílio a referenciar o passado, controlar o presente e prever o futuro.(Bolton et al., 2018)(Boje et al., 2020)

Na realidade Bolton (et al., 2018) propõe a distinção entre dois tipos diferente de DT:

- Um modelo digital dinâmico, que é alimentado com dados fornecidos em tempo real do ativo físico (por exemplo, através de sensores), e dá feedback ao gémeo físico em tempo real através de mecanismo de controlo (por exemplo, ajuste de temperatura ou paragem do equipamento)
- Um modelo digital estático, ou “sombra digital”, que é um modelo alterado periodicamente de acordo com a introdução de dados a longo prazo a partir do gémeo físico através de sistemas incorporados. É um instrumento de planeamento estratégico e o feedback enviado ao gémeo físico é obtido através de investimento de capital.

Com uma proposta ligeiramente diferente, (Kritzinger et al., 2018) classifica DT em três categorias, consoante o nível de integração de dados (Fig 2):

- Modelo digital, uma representação digital de um objeto físico que não utiliza troca automática de dados entre o objeto físico e o digital. Uma mudança no estado do objeto físico não tem impacto no objeto digital e vice-versa.
- Sombra digital, um modelo digital com fluxo de dados unidirecional automático entre o objeto físico e o digital. Uma mudança no estado do objeto físico leva a uma mudança no digital, mas não vice-versa.
- Digital Twin – um modelo onde a troca de dados entre o físico e o digital é totalmente automático, permitindo mesmo que uma alteração no digital altere o estado e a operação no físico. Uma mudança do estado de qualquer um dos objetos tem impacto no estado do outro.

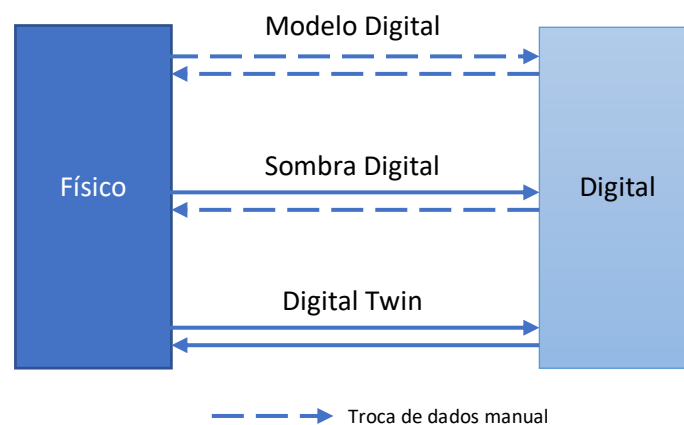


Figura 2 -Troca de dados em Modelos Digitais, Sombra Digitais e Digital Twin

Como referido anteriormente, a maior parte da literatura refere que o papel do BIM é reunir e estruturar dados multidisciplinares, provenientes de diferentes fontes, e partilhá-los com os interessados de forma unificada e digital, melhorando a comunicação e os resultados dos recursos. Segundo a (EFCA, 2019), o BIM é uma ferramenta que gere informação em 3D e aborda projetos onde a informação é trocada entres diferentes partes em todas as fases de um projeto. Embora o BIM possa ser considerado um modelo de informação de ativos e um modelo digital de um ativo ou de um sistema físico, este não preenche todos os requisitos para ser considerado um verdadeiro DT, tal como definido na literatura. Para que seja considerado, o BIM não só precisa de incluir todos os dados necessários sobre o ativo ou sistema de ativos, como também precisa da ligação ao ativo físico, melhorando a tomada de decisão através da análise de dados provenientes do ativo físico e fornecendo-lhe feedback. Este conceito está implícito na cadeia de valor da informação da infraestrutura digital(Fig.3) de autoria de (Bowers et al., 2018)

De acordo com estes autores, BIM é uma ferramenta de gestão que lida com um grande volume de dados, e não uma ferramenta de tomada decisão, como DT deve ser.

Sendo um conceito relativamente recente e bastante amplo é comum a utilização de DT's ser dirigida a bens tangíveis exclusivamente físicos através da sua réplica digital. Esta realidade encontra-se bastante presente em situações em diferentes setores, como nas réplicas de máquinas de indústria, ou mesmo de turbinas no setor da aviação. Ainda assim, com a definições mais recentes do conceito, tem sido cada vez mais evidente que os DT's podem ser aplicados a ativos intangíveis, tais como redes de transportes, fluxos económicos, processos de fabrico, ou, de forma semelhante ao que está em estudo, gestão de ativos.

Os DT's são muitas vezes confundidos tanto com modelos de simulação como com modelos de monitorização. De facto, DT apresenta os dois conceitos, e assim fornece de forma eficaz ferramentas de visualização com modelos de simulação extremamente desenvolvidos.

Geralmente os modelos de simulação têm descrições completas do objeto ou sistema em estudo, mas muitas das vezes estes modelos carecem do seu desempenho histórico e quase sempre do seu estado atual, impossibilitando de obter uma previsão fidedigna. É nesta lacuna que DT's difere dos modelos de simulação sendo capazes de receber em tempo real dados de forma a gerar melhores previsões. Assim sendo, a utilização de dados anteriores permite verificar e melhorar simulações geradas e os dados adquiridos em tempo real permite previsões que proporcionará respostas mais precisas e adequadas.

O paradigma em questão apareceu em investigação há quase 20 anos, reaparecendo agora que a nossa sociedade se tem tornado cada vez mais interligada. O conceito foi introduzido em 2003 como parte de um curso universitário de gestão do ciclo de vida de um produto.

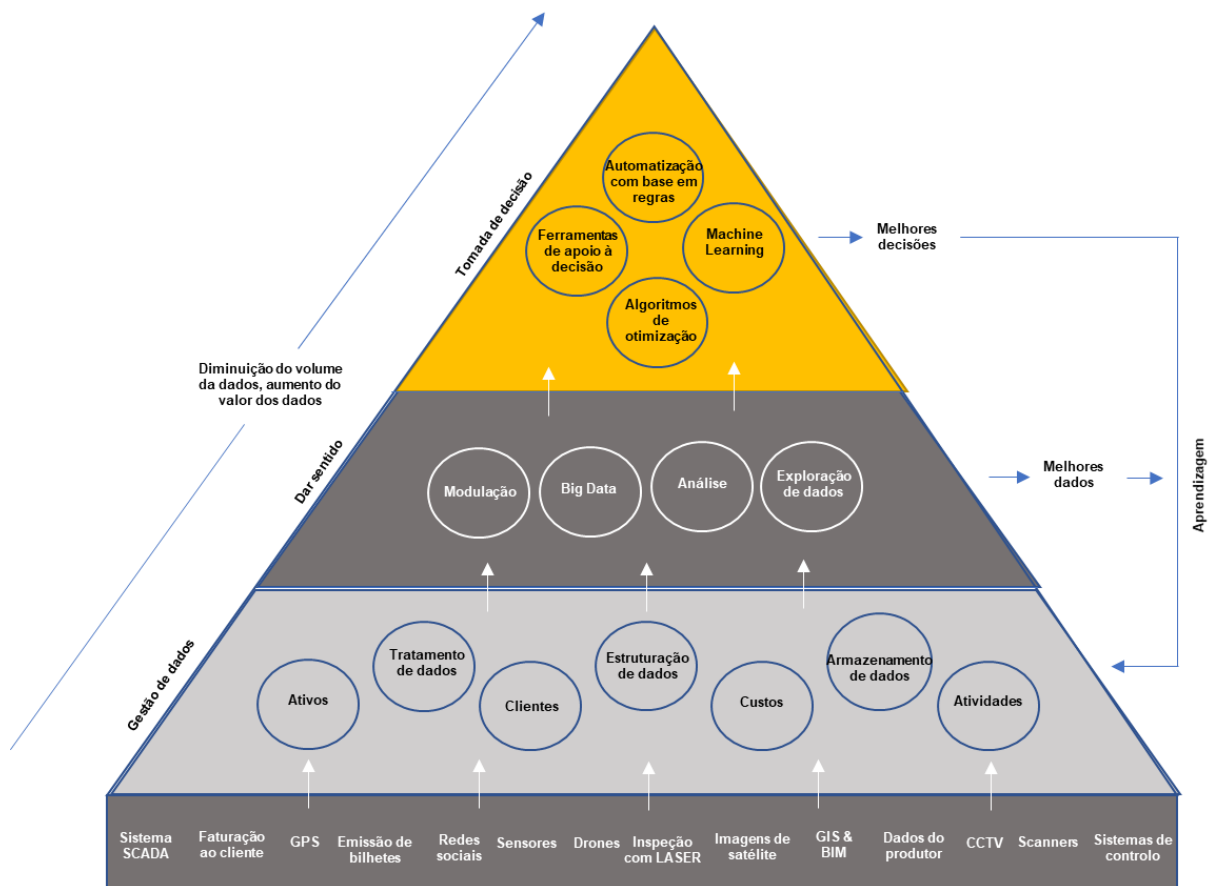


Figura 3 - Cadeia de valor da informação da infraestrutura digital.

Muitos autores tem definido DT como a integração do sistema ciber-físico, sendo o paradigma DT o objetivo final, inalcançável, pois nenhum modelo consegue representar com fidelidade sistema do mundo real. (Boje et al., 2020) O conceito de DT e a sua relação com os dados, está representado na Figura 4.

Segundo a Deloitte (Adam Mussomeli, Aaron Parrott, Brian Umbenhauer, 2020) a exploração do conceito de Digital Twin intensificou-se devido a uma série de fatores:

- Simulação: Ferramentas para a criação de DT têm vindo a ficar mais potentes e sofisticadas, e o poder computacional tem vindo a aumentar de tal forma que o valor do conhecimento obtido tem-se tornado um fator essencial.
- Novas fontes de obtenção de dados: dados obtidos, em tempo real, através de novas tecnologias (como o LIDAR) tem sido incorporado em simulações. Sensores, e a IoT incorporados nos ativos ou nos processos, podem fornecer dados operacionais para simulações, permitindo a monitorização em tempo real.
- Visualização: A visualização avançada de dados permite ultrapassar problemas de análise associados ao volume de dados, através da filtragem e extração de informação em tempo real. As mais recentes tecnologias de visualização de dados vão para além das ferramentas básicas e convencionais, como os dashboards, permitindo incorporação do 3D e mesmo a realidade virtual e aumentada.

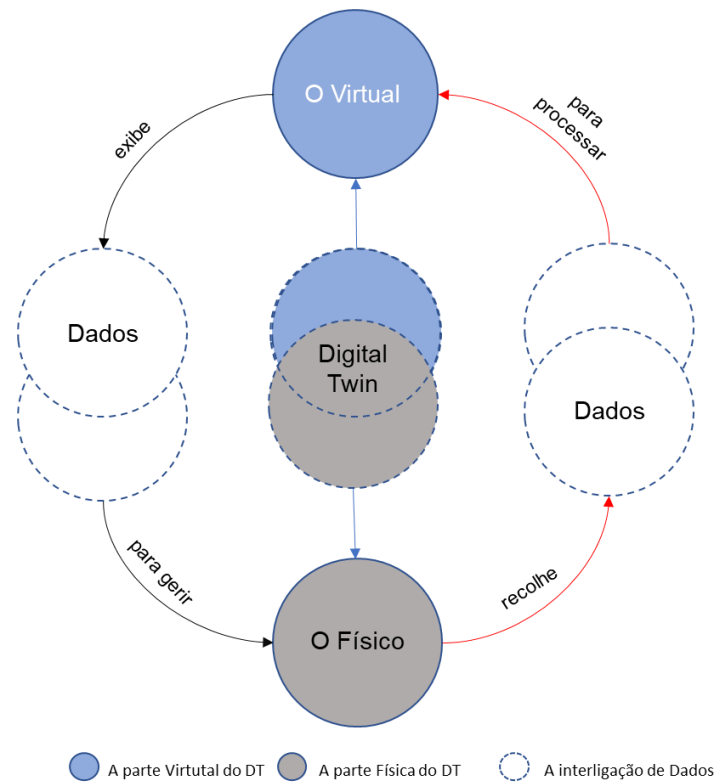


Figura 4 - O paradigma de Digital Twin (Boje et al., 2020)

- Instrumentalização: os sensores tanto embutidos como externos, estão a tornar-se mais pequenos, precisos, baratos e potentes.

- Plataforma: Tem vindo cada vez mais possível o acesso a plataformas com maior potência computacional e menos dispendiosa, e também o acesso a cloud's.

Existem então três conceitos que são definidos de maneira muito semelhantes na bibliografia, mas que têm pequenas características que os distinguem. São estes o DT, o BIM e os sistemas ciber físicos.

Um modelo BIM é a representação digital de elementos físicos construídos e as suas características funcionais. Estão são as principais comparações que podem ser feitas entre DT e BIM:

- 1) Ambos, um modelo BIM e um DT necessitam de um modelo virtual.
- 2) DT dá ênfase na existência de uma parte física correspondente ao modelo virtual, enquanto o BIM não.
- 3) Um modelo BIM pode representar algo que não existe ou que ainda não foi construído. Um modelo DT deve refletir o estado do seu gémeo físico em tempo real, enquanto o modelo BIM não tem de o fazer.

As principais comparações que podem ser feitas entre um Digital Twin e um Sistema Ciber-Físico são as seguintes:

- 1) Ambos, DT e SCF necessitam da existência de objeto físico.

- 2) Ambos, requerem que seja feito em tempo real uma transferência de dados e informações entre o objetivo físico e o sistema/modelo virtual.
- 3) Digital Twin requer a existência de um modelo virtual, enquanto o sistema ciber-físico não. Noutras palavras, o DT foca-se no “virtual” enquanto o SCF foca-se no “ciber”
- 4) DT têm de ter uma relação de gémeo entre a entidade física e a sua correspondente entidade virtual, enquanto o SCF não.

Deve ser realçado que, quando nos referimos a uma relação gémea, referimos-nos ao facto de que cada parte física encontrará uma parte virtual correspondente, e de forma análoga, cada parte virtual encontrará uma parte física correspondente. No ciclo de vida de um projeto, existem variadíssimas incertezas que podem mudar de forma flexível, como o ambiente, as condições, os requisitos, as partes físicas, as partes virtuais, os dados, as conexões e os serviços. Assim, o DT tem de ser capaz de acomodar estas incertezas. Embora a parte física e a parte virtual possam mudar e que seja difícil para a parte virtual replicar a parte física com 100% de precisão, é possível encontrar uma relação dupla.

As diferenças globais entre DT, BIM e SCF são apresentadas na tabela 1, onde o “○” significa que o elemento é opcional, enquanto o “✓” significa que o elemento obrigatório.

Tabela 1 - Diferenças entre DT, BIM e SCF

Elementos	Modelo BIM	Digital Twin	Sistema Ciber-Físico
Modelo Físico	○	✓	✓
Modelo Virtual	✓	✓	○
Ligação entre o físico e os modelos virtuais	○	✓	✓
Relação de gémeo entre a parte física e o modelo virtual	○	✓	○

Digital Twins são a nova meta orientadora e talvez o próximo passo após BIM (Daskalova, M. 2018)

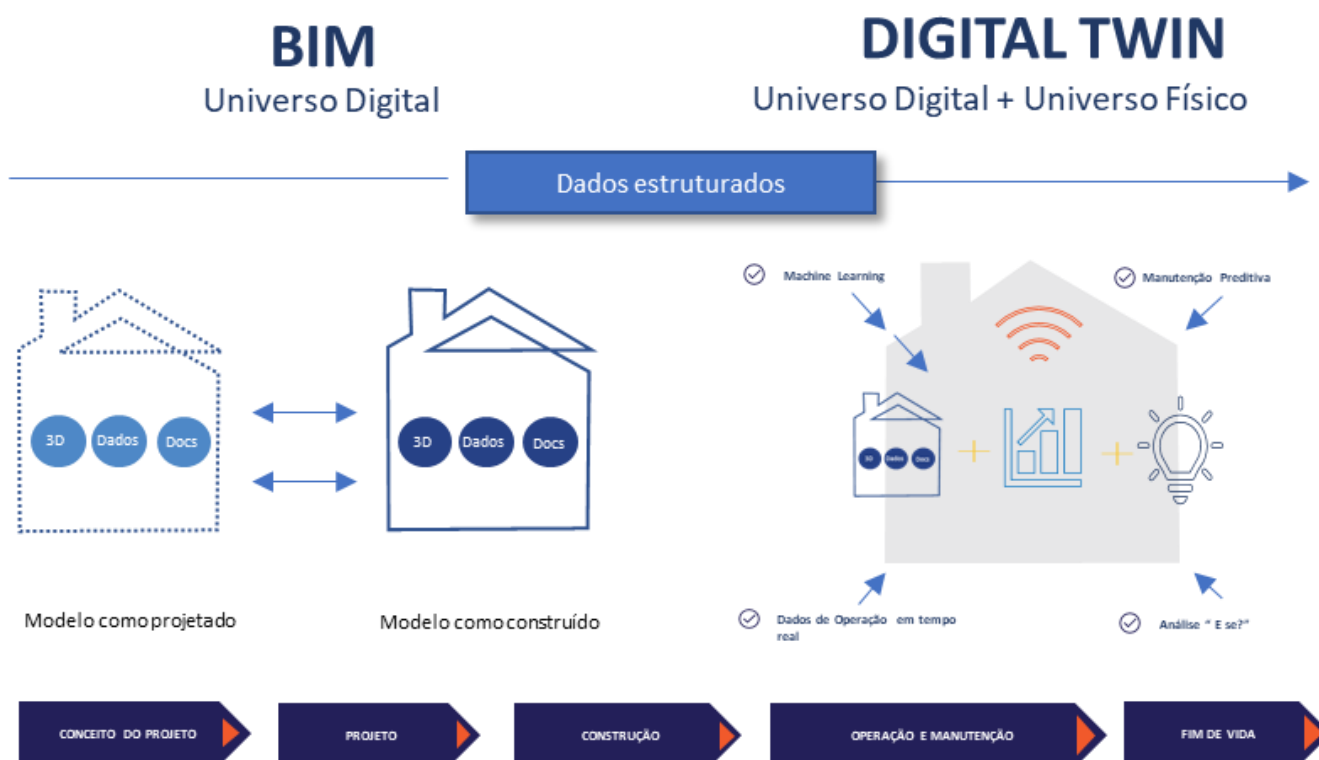


Figura 5 - Do BIM para Digital Twin, - adaptado de Mariela Daskalova|2018

Assim podemos dizer que apesar de um DT não ser um BIM, é preciso um bom modelo BIM, e um sistema ciber-físico para obter DT, tal como é demonstrado Figura 5.

2.3 Tomada de decisão em gestão de ativos

2.3.1 Gestão de ativos

Gestão de ativos é descrita como uma teoria de gestão que combina princípios de engenharia e de economia com práticas empresariais, tendo em vista uma gestão mais eficiente através de um processo sistemático de otimização da tomada de decisão, enfatizando a minimização de custos sobre o ciclo de vida dos ativos, fornecendo uma visão de longo prazo sobre os mesmos. (Oecd, 2000). Uma outra definição descreve a gestão de ativos como um conjunto de atividades sistemáticas e coordenadas alargadas numa organização que gere de forma otimizada os seus ativos e respetivo desempenho, risco e expedientes associados ao longo dos seus ciclos de vida de acordo com o plano estratégico da organização. (National Rail, 2014).

Existem seis elementos básicos sobre os quais a gestão de ativos pode assentar: dados sobre os ativos, objetivos do gestor para a infraestrutura, desempenho da infraestrutura, planeamento financeiro, gestão de risco e análise de custo do ciclo de vida.

Para a correta aplicação de um sistema de gestão de ativos, é preciso considerar que esta implementação não é um processo instantâneo, é trabalhoso e exigente e requer, para seu correto desenvolvimento, tempo. Isto apenas é conseguido através de um processo contínuo, baseado em boas condutas de planeamento e acompanhamento.

De forma a obter uma gestão de ativos eficaz é necessário uma base de dados que englobe todos os ativos existentes e respetivo histórico da sua condição, independentemente do setor em questão. Esta informação é fundamental e é esta que irá permitir o sucesso da implementação de uma gestão de ativos eficaz. Uma informação precisa, correta e constante poderá evitar que decisões erradas sejam tomadas, que conseqüentemente levam a gastos desnecessários. É este um dos principais objetivos da gestão de ativos, pois tendo em conta que é uma teoria de gestão com base económica, esta tem em vista a otimização de recursos.

Em relação aos dados que torna uma gestão de ativos eficaz salienta-se que se deve ter em conta, para cada ativo, a localização e definição do ativo em relação à rede onde este se encontra, a idade dos ativos, as condições em que opera, os níveis de serviço, informação financeira, o seu histórico tanto de problemas como de intervenções, o seu valor e custo de substituição, assim como normas de operação e manutenção. Um dos dados importante para a gestão eficaz de um ativo é o seu nível desempenho, pois este indicará se cumpre o seu objetivo, e se lhe é retirado o máximo de proveito. Para avaliar o seu desempenho é possível estabelecer indicadores e através de um sistema de monitorização recolher informação sobre os mesmos. Estes indicadores não necessitam de ser numéricos, mas sim indicadores que representem o estado do ativo e o seu desempenho. A implementação de monitorização está associada a um acréscimo significativo no custo de um sistema de gestão de ativos, e para que este não se torne insustentável, é relevante otimizar o número e o tipo de indicadores a utilizar. Os indicadores devem ser simples e de entendimento imediato, organizados por grau de importância, distribuídos por áreas, relevantes para a infraestrutura em causa, refletir de forma sucinta o grau de eficiência com que os objetivos da infraestrutura estão a ser cumpridos e por fim estarem direcionados para objetivos previamente definidos para que o feedback seja imediato e acertado.

Um programa de gestão de ativos eficaz tem a capacidade de fornecer diversos benefícios quando implementado. Sendo os mais enunciados, de entre outros, a otimização das despesas relativas às operações de manutenção e substituição, ganhos de eficiência ao nível do desempenho, melhoria na visão global e a longo prazo do sistema, incentivo à modernização, atualização e pormenorização de informação sobre os ativos, uniformização tanto em termos técnicos como financeiros na definição dos ativos e melhorias em termos estratégicos.

A Norma ISO 55000:2016 – Gestão de ativos- Visão geral, princípios e terminologia define um ativo como algo tangível ou intangível, ou seja, como um bem, uma coisa ou uma entidade que tem valor real, atual, ou potencial no seu futuro. O valor atribuído a cada ativo depende não só das partes interessadas, mas também consoante as diferenças que as organizações têm.

O conjunto destes ativos, quando uma organização decide geri-los de forma agrupada, são considerados um portfólio de ativos. Esta decisão depende meramente das necessidades de gestão da organização.

A ISO 55000:2016 deverá ser utilizada por organizações que pretendam alcançar o equilíbrio ótimo entre desempenho, risco e custo. Apenas conseguirá havendo um controlo e gestão eficaz dos ativos pelas organizações a fim de perceber e produzir o valor, gerindo os riscos e oportunidades.

Na sua definição, esta Norma deverá ser utilizada pelas organizações que pretendam o aumento do valor no agrupamento dos seus ativos e por aqueles que pretendam utilizar um sistema de gestão de ativos, ou seja, todos aqueles que estejam envolvidos no planeamento, projeto, implementação e revisão das atividades de gestão de ativos. Existem fatores da própria organização e das partes interessadas como o propósito, a natureza, o contexto, as restrições financeiras, os requisitos regulamentares, as necessidades e as expectativas que influenciam o tipo de ativos de que uma organização necessita para atingir os seus objetivos e o modo como os mesmo são geridos.

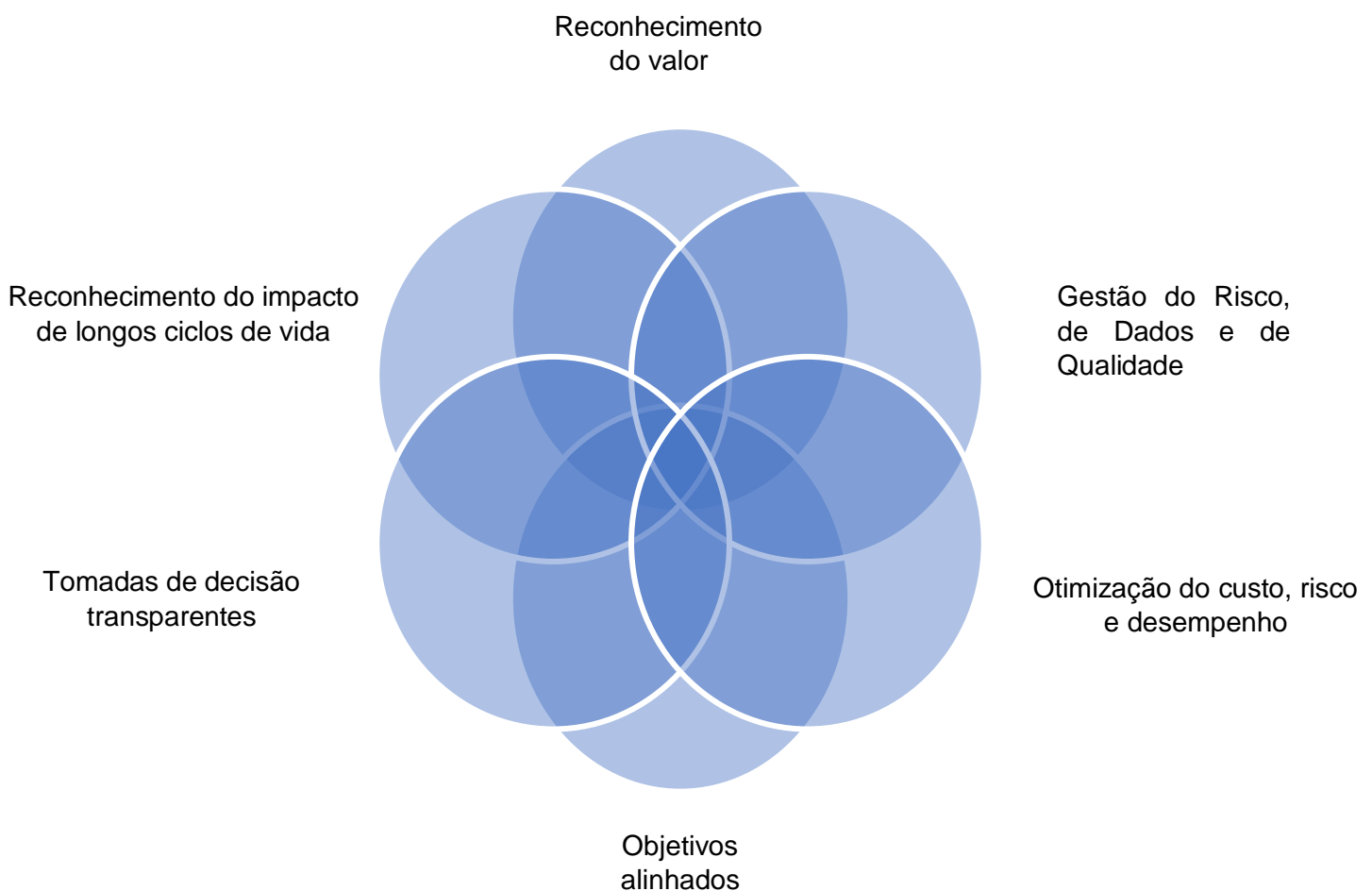


Figura 6- Principais temas abordados na ISO 55000 (Adaptado do Life cycle Engineering)

O conjunto de temas que se sobrepõe relacionado com a Gestão de Ativos leva a uma certa complexidade, tornando a gestão adequada um desafio. Uma gestão adequada conduzirá uma organização a obter o valor dos seus ativos, tendo em conta aspetos financeiros, de eficácia e de tomadas de decisão apropriadas. Uma tomada de decisão transparente cria a oportunidade de reconhecimento de valor, assim como a sua ligação aos objetivos organizacionais, tal como demonstrado na Figura 6.

Definidos na norma que a descreve, a gestão de ativos assenta sobre os seguintes princípios fundamentais:

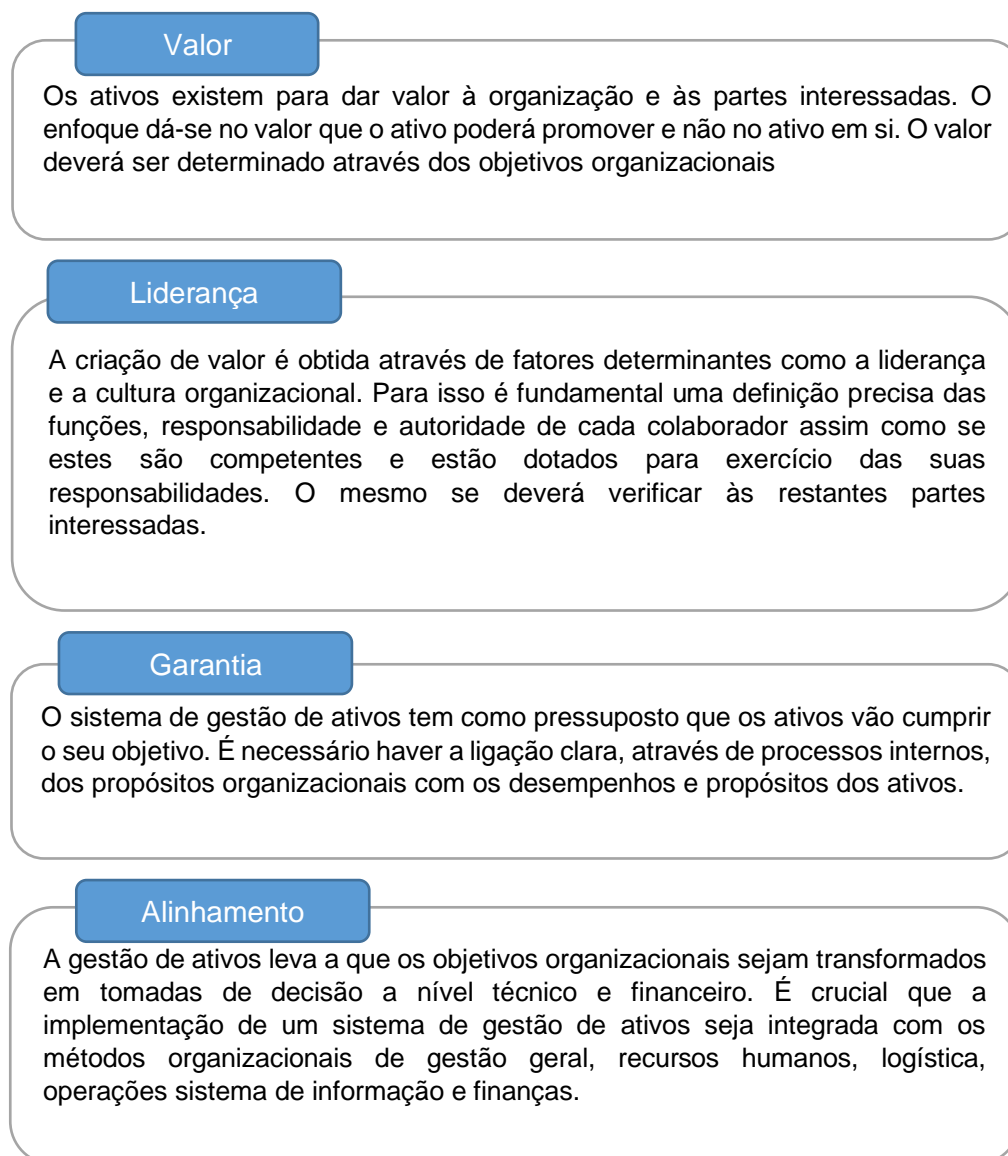


Figura 7 - Princípios Fundamentais de Gestão de Ativos (adaptado da ISO 55000:2016)

Para uma correta gestão de ativos é necessário um sistema de gestão bem definido. Um sistema de gestão de ativos é “um conjunto de elementos interrelacionados e interatuantes de uma organização, cuja função é estabelecer a política e os objetivos de gestão de ativos bem como os processos

necessários para atingir esses objetivos”, como definido na ISO 55000:2016. Tendo em conta as mais variadas funções com que a gestão de ativos se interliga numa organização, o sistema de gestão tem como principal função a coordenação das diferentes interações e contributos das unidades operacionais de uma instituição. De uma forma geral, os requisitos são os seguintes:

- **Liderança:** A nível de objetivos, responsabilidade e políticas, a gestão de topo é responsável pelo seu desenvolvimento. Assim como deverão ser estes que oferecem os recursos necessários para uma gestão adequada onde a sua prioridade é a resolução de conflitos entre a cultura da organização e o sistema de gestão de ativos implementado.
- **Planeamento:** O contexto e a direção das ações de uma organização, incluindo as actividades de gestão de ativos, são definidos por objetivos organizacionais. Um plano estratégico de gestão de ativos deve incluir os princípios a seguir. Este plano descreve a estrutura, responsabilidades, e obrigações financeiras de todas as partes envolvidas e servirá de guia para o desenvolvimento de planos de sistema de gestão desenvolverem os planos de gestão ativos.
- **Suporte:** A colaboração de diferentes partes de uma organização é obrigatória num sistema de gestão de ativos. É necessário que toda a organização tenha presente os seus objetivos. O próprio sistema deverá fornecer as informações que suportam o desenvolvimento de planos e a posterior avaliação da sua eficácia.
- **Operação:** o sistema de gestão de ativos deverá permitir a direção, implementação e controlo de todas as suas atividades relacionadas com os seus ativos. São consideradas mesmo aquelas que possam ser sido contratadas externamente. Planos e processos devem ser fornecidos de forma a projetar e operar o sistema de gestão, políticas funcionais e normas técnicas.
- **Avaliação de desempenho:** O desempenho dos seus ativos, da sua gestão e do sistema utilizado deverá ser valorizado pela organização. As medidas utilizadas para medição do desempenho podem ser diretas, indiretas, financeiras ou não financeiras. Para a medição do desempenho é fulcral a transformação de dados em informação. Tanto os ativos geridos diretamente pela organização como os ativos geridos externamente deverão ser avaliados. Os resultados da medição de desempenho deverão ser utilizados como entradas nas revisões de gestão
- **Melhoria:** De forma a haver melhoria do sistema, a avaliação de desempenho providenciará informação sobre os ativos para que este se mantenha em evolução, consoante o contexto, os objetivos e o portefólio de ativos.

Os ativos relacionam-se com o sistema de gestão de ativos de acordo com a figura 8:

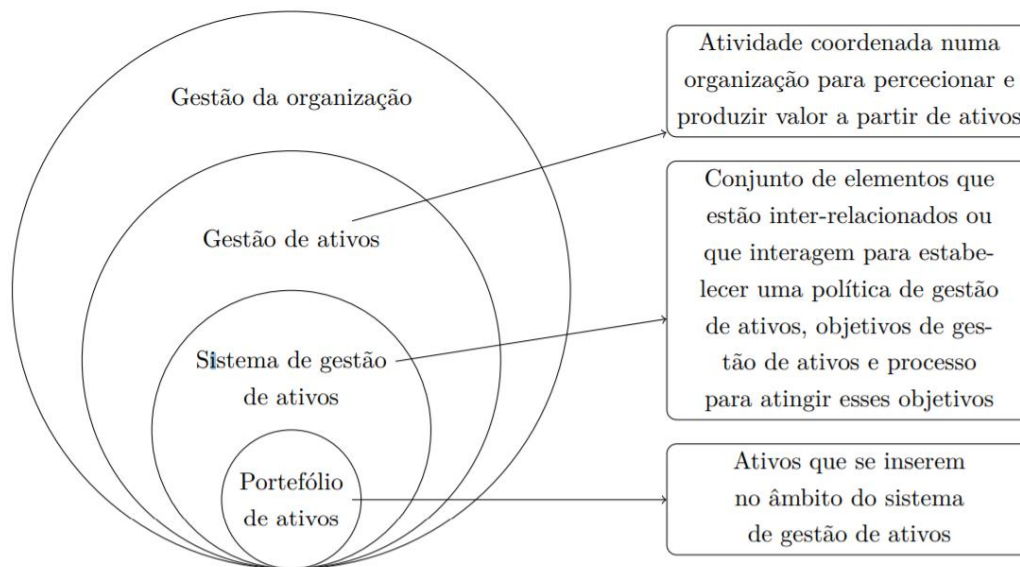


Figura 8 - Relações entre os termos chave em Gestão de Ativos. Adaptado de ISO 55000:2016

As normas permitem que as organizações atinjam, através de uma gestão eficiente dos seus ativos, os seus principais objetivos. O sistema proporciona, de forma consistente e sustentável ao longo do tempo, o cumprimento de objetivos.

O contexto da organização, assim como quem são as partes interessadas, é requerido para que seja possível o estabelecimento de planos. Os planos de gestão de ativos são influenciados e moldados pelos planos e objetivos organizacionais, apesar de estes não afetarem diretamente a gestão de ativos, não fazendo assim parte do sistema de gestão de ativos.

Uma política de gestão de ativos é criada com base nos planos e objetivos organizacionais. Esta política irá definir as principais diretrizes não só para a formulação de um plano estratégico de gestão de ativos, mas também para a definição de objetivos de gestão de ativos. O plano de gestão de ativos, tendo a estratégia e os objetivos definidos, poderá então ser elaborado. É o plano em si e a sua implementação que constituem o sistema de gestão de ativos. A avaliação do desempenho do sistema é essencial que a melhoria se efetive. Este pode ser concretizado por fases utilizando um plano de desenvolvimento do sistema de gestão de ativos. A figura 9 resume e ilustra a relação entres os principais elementos de um sistema de gestão através de um fluxograma:

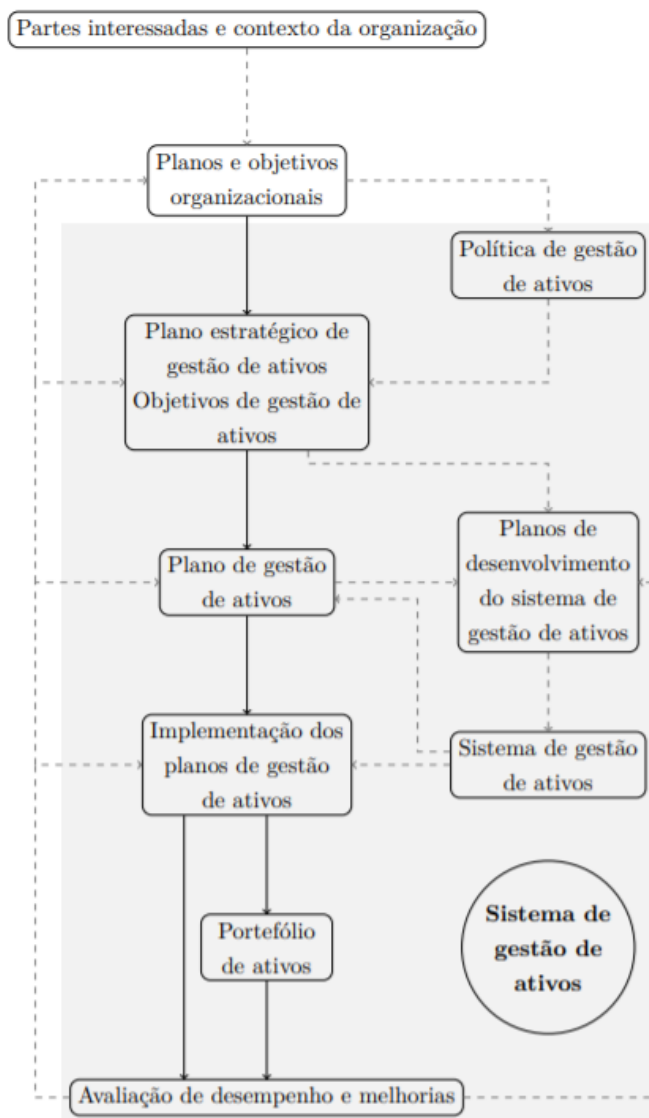


Figura 9 - Relação entre os fatores-chave de um sistema de gestão de ativo e definição dos seus limites.

2.3.2 Gestão do ciclo de vida dos ativos

Com base na bibliografia analisada é perceptível as diferentes definições utilizadas para a divisão do ciclo de vida, chegando a utilizar diferentes formas e terminologia.

O conceito de Custo Ciclo de Vida (CCV) de um ativo em construção descrito na norma ISO 15686-5, é definido como o custo de um determinado ativo ou das suas partes durante todo o seu ciclo de vida, enquanto cumprir os requisitos de desempenho para os quais foi projetado, este custo faz parte do Custo total do Ciclo de Vida como ilustrado na figura 10. A definição apresentada neste norma para o CTCV apenas acrescenta à definição apresentada anteriormente, as receitas e os custos/receitas sociais e ambientais que o ativo gera ao longo do seu tempo útil de vida, tal como as externalidades e os custos extra de construção.

O conceito apresentado na norma propõe uma divisão para as fases do Ciclo de vida de um ativo construído. Divisão que consiste na construção, operação, manutenção e fim de vida, assim como os custos ambientais.

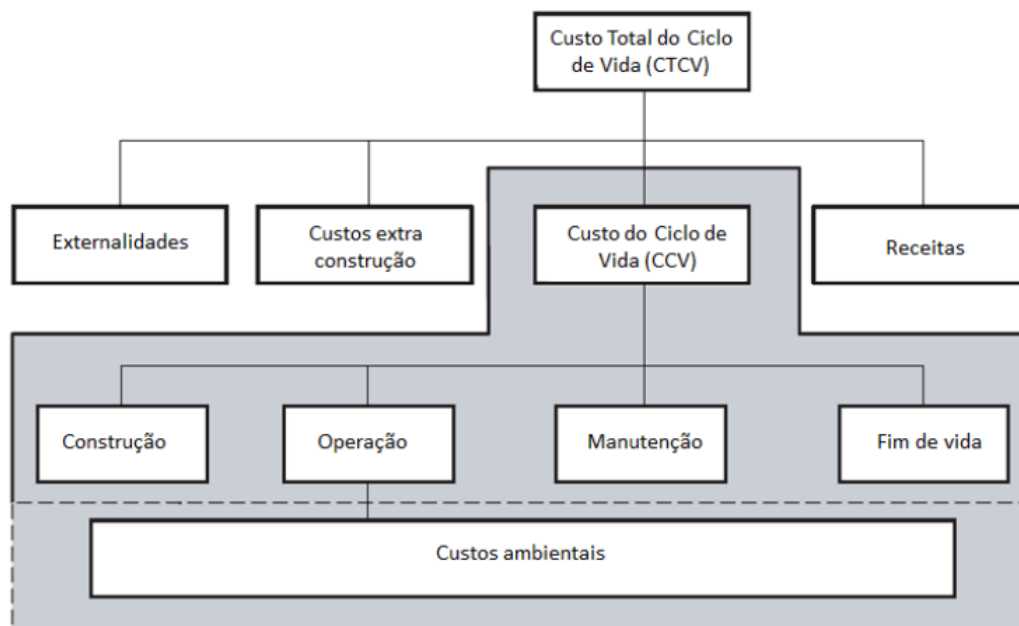


Figura 10 - Enquadramento do CCV no CTCV e fases do CV-Norma ISSO 15686-6

Outras definições são descritas na bibliografia consultada, The Institute of Asset Management diz que a designação, número de fases e as consequentes subactividades podem variar nos diferentes sectores, mas que um princípio comum é que o ciclo de vida inclui todos os aspetos da gestão de ativos, desde o conceito inicial até sua eliminação por completo, exemplificando através da seguinte figura.



Figura 11 - Exemplos de variações na descrição de um ciclo de vida de um ativo (The Institute of Asset Management, 2015).

O ciclo de vida de um empreendimento ou infraestrutura, pode considerar qualquer das três variações descritas pelo *The Institute of Asset Management*.

2.3.3 Tomada de decisão em gestão de ativos

A gestão correta de um conjunto de ativos, pressupõe tomadas de decisão eficazes possibilitando que uma organização consiga obter o maior lucro/menor prejuízo ao longo de todo o seu ciclo de vida.

O *Institute of Asset Management* considera que os desafios enfrentados neste conjunto de decisões podem ser considerados para as três principais fases de um ciclo de vida de ativo: aquisição/construção; operação e manutenção, e fim de vida que inclui desmantelamento ou renovação.

Esta divisão é essencial tendo em conta que as decisões efetuadas em cada uma destas fases têm impacto nas fases consequentes. A escolha do ativo adquirido influencia o desempenho, o risco e os requisitos de manutenção durante a sua vida operacional, e também o seu desmantelamento (custos e métodos), mas também as decisões de como o ativo é mantido e operado, influencia a sua vida útil e as complexidades e custos inerentes ao fim da sua vida útil.

Assim sendo, tendo em conta as diferentes fases do ciclo de vida de um ativo, The Institute of Asset Management considera que as decisões podem ser divididas em cinco grupos:

-Tomada de decisões de investimento de capital - Considera todos os processos e decisões para avaliar e analisar cenários de suporte às decisões relacionadas com investimentos de capital de uma organização. Estes processos e decisões podem estar relacionados tanto com novos ativos para a organização com também para a substituição de ativos em fim de vida útil (programas de apoio CAPEX).

-Tomada de decisões de operação e manutenção – Tem em conta todas as atividades e processos de gestão envolvidos na decisão das operações e dos requisitos de manutenção que suportam os objetivos e metas para a correta gestão de ativos.

-Tomada de decisões do custo ciclo de vida e otimização do seu valor – Considera todas as atividades que possam vir a ser realizadas por uma organização onde se faz o balanço entre os custos e os benefícios de todas as intervenções de renovação, manutenção e eliminação possíveis durante o ciclo de vida de vários ativos. Considera o valor total obtido, tendo em conta as interações entre as diferentes atividades inerentes aos ciclos de vida de um conjunto de ativos, tentando assim determinar a combinação ótima de custos, riscos, níveis de desempenho e impactos na sustentabilidade. O valor total ótimo normalmente considerado é referente ao conjunto total de ativos da organização.

-Tomada de decisões estratégicas na otimização de recursos - considera as pessoas, instalações, ferramentas e materiais existentes na organização de modo que as decisões tomadas estejam de acordo com os planos da organização para a gestão de ativos. Esta deve considerar os custos e riscos à externalização dos recursos, e a melhor forma de integrar os recursos próprios disponíveis a fim de integrá-los de forma rentável nos planos de gestão de ativos.

-Tomada de decisões ao nível estratégico no fim de vida de um ativo – Considera todas as atividades a levar a cargo pela organização para o desmantelamento ou renovação de um ativo, garantindo o menor tempo de interrupção possível e os custos inerentes a este, para que seja feito de forma mais eficiente e com maior segurança de acordo com o plano organizacional para a gestão de ativos (The Institute of Asset Management, 2015).

Existem outros estudos (Y. Sun et al., 2008) sobre tipo de decisões dentro de um sistema de gestão de ativos onde é essencial não só perceber o tipo de decisão, mas também as suas características. As decisões em gestão de ativos também podem ser definidas através de critérios específicos tanto em relação à sua escala temporal como também ao nível organizacional a que pertencem. No que diz respeito à sua escala temporal são reconhecidos 4 quatro tipos de decisão em gestão de ativos:

- **Decisões a nível estratégico.** É incluído neste tipo de decisão a definição dos objetivos da própria gestão de ativos e se estes são coerentes com os objetivos organizacionais, e também o desenvolvimento de planos estratégicos de gestão de ativos a longo prazo de forma que estas decisões incidam nas políticas operacionais, de manutenção e de investimento de capital. As decisões de substituição de ativos pertencem a esta categoria. As decisões estratégicas de gestão de ativos são, normalmente, realizadas anualmente ou de cinco em cinco anos.
- **Decisões técnicas.** Estes tipos de decisões inclui o desenvolvimento de planos de gestão de ativos que são baseados em planos estratégico globais de forma a determinar as principais atividades de manutenção preventiva, de modernização de ativos e de processos operacionais. Este tipo de decisão é, tipicamente, realizada anualmente mas pode ser feita trimestralmente ou mensalmente.
- **Decisões de implementação.** Este tipo de decisão inclui a calendarização a curto prazo de atividades operacionais e de manutenção, a alocação de mão-de-obra, custo e também a definição de prazos de entrega de materiais. Este tipo de decisão de gestão de ativo é feito semanalmente ou mensalmente
- **Decisões reativas.** Este tipo de decisão ocorre quando se dá uma ocorrência não planeada, como por exemplo a falha de um componente ou um pico inesperado na procura. Estas decisões têm normalmente de ser tomadas num curto espaço de tempo, entre meia hora a um dia, para decidir, por exemplo, se os ativos afetados por uma certa ocorrência têm de ser interrompidos ou reparados imediatamente. Tendo em conta que estas decisões são tomadas num curto espaço de tempo, normalmente não são tidas em conta análises técnicas e de custo detalhadas. Assim sendo, de forma a assegurar uma maior exatidão nas decisões, os custos, as situações potenciais e as respostas adequadas são frequentemente definidas com antecedência nas fases de planeamento estratégico ou técnico da gestão de ativos

A nível organizacional identifica-se 3 níveis de decisão:

- **Decisões a nível da administração.** Este tipo de decisão é normalmente tomado pela administração ou direção de uma empresa e reflete-se em políticas de gestão de ativos, como estratégias de operação e manutenção, projetos de investimento e orçamentação.
- **Decisões a nível dos gestores.** Este tipo de decisão recai em gestores locais, e são decisões tomadas para determinar o plano de operação, as prioridades dos trabalhos de manutenção, os níveis de inventários, a alocação de mão-de-obra e a orçamentação.
- **Decisões a nível operacional.** Este tipo de decisão é normalmente executado por diretores ou engenheiros a nível local, que decidem sobre os tipos, locais e procedimentos de manutenção ou reparação. As decisões reativas recaem a maior parte das vezes a este nível.

Através destas divisões fica claro que em processos de tomada decisão é preciso considerar o intervalo de tempo em consideração assim como os níveis dentro de uma organização.

A abordagem considerada para os diferentes tipos de decisão em gestão de ativos, consoante os níveis e o intervalo de tempo pode ser descrita como um enquadramento em escalas diferentes, mas que estão relacionados, como demonstrado na figura 12.

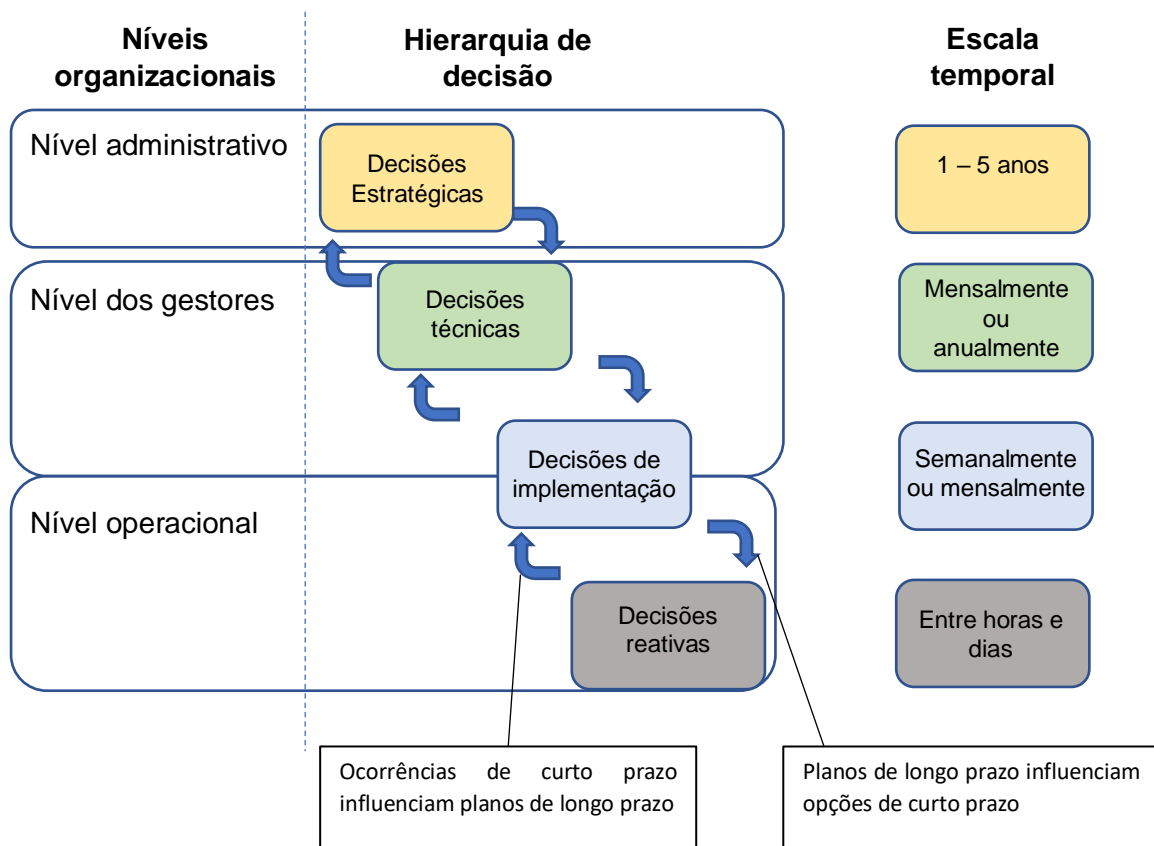


Figura 12 - Relação entre os níveis organizacionais, hierarquia de decisão e a sua escala temporal- adaptado de Y. Sun et al., 2008

2.3.4 Requisitos de informação de suporte à tomada de decisão em gestão de ativos

A informação sobre ativos físicos pode ser definida como a combinação de dados utilizados para apoiar a tomada de decisão em relação à sua gestão, tanto para fins operacionais a curto/médio prazo como também para fins estratégicos a longo prazo.

Uma boa qualidade na informação sobre os ativos é essencial para uma tomada de decisão assertiva e eficaz, tal como a previsão da frequência de manutenção ou renovação ótima. Decisões como estas, podem ser baseadas em informação como a localização do ativo, a sua condição, a probabilidade e consequência de falhar, a especificação, o custo, os constrangimentos, como a disponibilidade de recursos e outras prioridades da empresa, como também o cumprimento de medidas regulamentares.

A natureza deste tipo de informação varia e sobrepõe-se consideravelmente. A compreensão do tipo de informação que é necessária, como esta deve ser adquirida, armazenada, analisada, e como esta deve ser repetida ou corrigida ao longo do tempo, no contexto de gestão de ativos, é um tema complexo abrangente a todas as empresas.

Enquanto a tecnologia é indiscutivelmente um meio importante, tal como referido anteriormente, gestores que suportam as suas decisões com a informação proveniente dos ativos consideram a problemática num contexto mais abrangente.

As organizações deveram estabelecer e manter sistema de suporte à gestão de informação sobre os seus ativos. Estes sistemas devem ser concebidos de forma a fornecer suporte e informação suficiente de forma que as tomadas de decisão sejam feitas de acordo com os seus objetivos organizacionais (The Institute of Asset Management, 2015).



Figura 13 - O âmbito da gestão de ativos numa organização – adaptado The Institute of Asset Management, 2015

A informação sobre os ativos tem um grande impacto na eficiência e desempenho das empresas que têm a seu cargo um considerável número de ativos. A informação sobre ativos, quando estão em vigor processos eficientes, representa cerca de 20% de todo o orçamento anual de uma organização. Enquanto empresas com sistema ineficientes de informação sobre os ativos gastam significativamente mais dinheiro, tipicamente mais de 25% do seu orçamento anual. (The Institute of Asset Management, 2015)

Este valor pode parecer elevado, mas incluem o custo de preparação e de registo de informação de ativos durante a manutenção, bem como os custos ocultos significativos, tais como a gestão e o tempo gasto pelos colaboradores na procura de informação, na sua recolha, e no seu processamento a partir de diferentes fontes e formatos, que provavelmente se encontram repetidos em diferentes departamentos dentro da organização.

Como demonstrado na figura 14, a maioria dos custos é devida a atividades empresariais essenciais, atividades estas que dependem da informação obtida sobre os ativos. A melhoria da eficiência com que a informação sobre os ativos é gerida dentro de uma organização apresenta assim uma grande possibilidade de poupança de custos, estimada na ordem dos 1 – 5% do custo total das despesas empresarias.

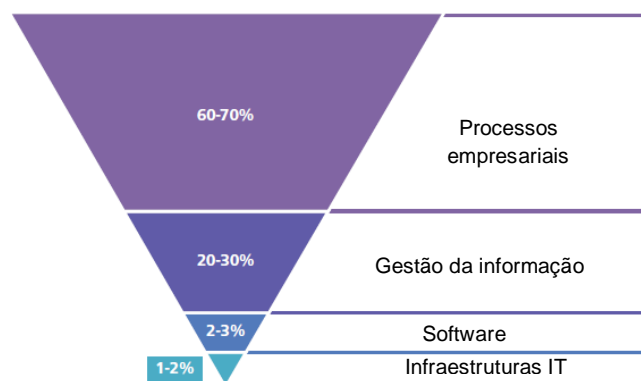


Figura 14 - Custos operacionais de Informação sobre os ativos – adaptado The Institute of Asset Management, 2015

A informação sobre os ativos é uma combinação de dados sobre os ativos físicos que são utilizados como suportes à tomada de decisão como estes são geridos. Existem inúmeras definições de dados e informação. As definições de seguida apresentadas, são as definições tidas em conta ao longo deste documento:

Dados – números, palavras, símbolos, imagens, etc. sem contexto ou significado próprio, ou seja, dados sem processamento, por exemplo 30 metros.

Informação - coletânea de dados que é expressa num devido contexto. Por exemplo o vão da ponte é de 30 metros.

Registo – Dados sobre a forma de informação que dão indicação de algo que tenha ocorrido, como por exemplo uma manutenção cujo registo tenha especificamente os trabalhos efetuados.

Conhecimento – uma combinação de experiência, valores, informação no seu devido contexto que formam a base para a tomada de decisão. Refere-se principalmente ao processo de compreensão, comparação, análise, avaliação e argumentação.

Gestão da informação - os métodos através dos quais uma organização maximiza a eficiência com que planeia, recolhe, organiza, utiliza, controla, armazena, dissemina e dispõe a sua informação, e através dos quais assegura que o valor dessa informação é identificado e explorado na máxima medida possível. O objetivo tem sido frequentemente descrito como a obtenção da informação certa para a pessoa certa, no formato e meio certos, no momento certo;

Tecnologia para a informação – a tecnologia utilizada (por exemplo, sensores, software, etc.) para satisfazer as necessidades de recolha e processamento de dados fundamentais para a obtenção de informação requerido para a melhor tomada de decisão.

A qualidade de informação requerida é um tema bastante abordado nesta temática. Vários parâmetros podem ser medidos para averiguar a qualidade dos dados obtidos, estando cada destes parâmetros associado a diferenças qualidades da informação:

Exatidão – o registo é exato, autêntico e verdadeiro em relação à entidade que representa.

Integridade – o registo contém todos os atributos ou aqueles que necessita em relação à sua finalidade. Além disso todas as entidades de uma classe específica estão registadas.

Validade- os dados estão em conformidade com todas as normas exigidas.

Consistência – A informação de entidades que podem estar representadas em mais que um registo, está coerente.

Singularidade – Existe uma única representação para cada entidade física.

Oportunidade – os dados estão atualizados e podem ser facilmente acedidos quando necessário.

Cada organização pode ter a sua maneira de avaliar estes parâmetros em relação aos dados obtidos em relação aos seus ativos.

Existe também claramente uma necessidade de melhoria de como os dados são recolhidos, usados e geridos. Estas melhoria pode ser feito ao longo de todo o ciclo de vida dos ativos. As áreas possíveis de melhoria incluem:

- Processos e tecnologias de recolha de dados
- Atividade de recolha de informação e a sua relação com a principal armazenamento de dados.
- A base de dados em si, infraestrutura, processamento de informação e acesso
- Requisitos de informação de suporte à gestão diária

- Análise da informação sobre os ativos e desenvolvimento de uma estratégia de gestão de ativos
- Requisitos de informação contínuos de forma a desenvolver e monitorizar a estratégia organizacional
- A abordagem holística de forma a melhorar os sistemas e procedimentos de forma a assegurar que as soluções são apropriadas e que todas as partes interessadas estão envolvidas na busca de soluções.

Uma das questões ainda bastante presente no âmbito da tomada de decisão gestão de ativos é qual a informação necessária e adequada para suporte à tomada de decisão ao longo de todo o ciclo de vida de um ativo, muitos vezes abordados como requisitos de informação.

Uma vez entendidas as necessidades da organização, os requisitos de informação podem ser definidos com um maior detalhe e rigor. A gestão de ativos requer inúmeros dados provenientes das mais variadas fontes dentro de uma organização, exemplos típicos, tal como referido anteriormente e mais especificados em diante incluem:

- Dados sobre os ativos físicos - quais os ativos próprios e quais aqueles operados pela organização e quais as suas características técnicas.
- Localização e ligações – Onde se encontra o ativo e como é que este está relacionado com os outros ativos.
- Relações – como se relacionam os ativos uns com os outros.
- Dados sobre a manutenção - quais os trabalhos/manutenção que foram, estão, ou irão ser realizados sobre um ativo específico.
- Dados de desempenho – como é que o ativo contribui para atingir os objetivos de operacionalidade
- Dados sobre a condição - qual tempo de vida útil restante deste ativo.
- Dados de Custo – quanto o ativo custa a comprar e a manter-se ativo.

Esta será a informação base para se conseguir tomar decisões em relação a um certo ativo, mas existem mais informações que podem ajudar a tomada de decisão certa, se for adequada e no tempo certo para um certo ativo. Essa informação numa forma mais detalhada é a seguinte:

- Frequência de uso - com que periodicidade uma certa informação é necessária em ordem a apoiar a tomada de decisão
- Tipo – o tipo de dados necessários para o fim da organização.

- Atributos e unidades específicas – por exemplo a idade de um ativo em anos.
- Precisão e exatidão – por exemplo quão exatas as medições necessitam de ser, e até que ponto pode ser tolerada a imprecisão.

De forma a uma organização conseguir perceber quais os requisitos de informação de suporte à tomada de decisão em gestão de ativos que necessitam, é importante esta compreender que informação é retida e se esta é importante. De forma a concretizar esta análise do estado atual de informação é importante fazer perguntas de formas que as respostas orientem as soluções para que essas sejam mais coerentes com os objetivos organizacionais. Existem vários exemplos de perguntas que podem ser feitas neste sentido, de seguida segue uma listagem dessas mesmas perguntas:

- Que informação a organização possui e qual a necessidade da mesma.
- Até que nível a qualidade de dados é suficiente para a organização e qual o nível de incerteza admitido.
- Que ferramentas de análise e avaliação de dados existe na organização.
- Se a gestão de dados é feita no momento certo ao longo do ciclo de vida útil de um ativo.
- Se a obtenção desses mesmo dados é feito no momento certo ao longo do ciclo de vida útil de um ativo.
- Se a acessibilidade aos dados é apropriada.
- Se existem padrões de referência disponíveis que ajudem a perceber qual o ponto de situação.
- Se abordagem de auditoria organizacional para avaliação do estado atual é adequada.
- Como é que os dados atuais são visualizados.
- Como é que os dados atuais são verificados.
- Quais as verificações de conformidade e de garantia que estão a ser efetuadas.

Em relação à recolha de dados é importante referir que esta deve ser controlada no momento da recolha pois é nesta fase que é considerado a maneira mais eficiente de controlar a qualidade dos dados. Neste sentido é importante considerar tanto fatores técnicos como humanos. Em relação aos fatores técnicos, devem ser considerados a precisão inerentes dos instrumentos de obtenção de dados, os erros aleatórios e sistemáticos, incerteza na localização/ identificação da medição e incerteza dos dados gravados. Em relação aos fatores humanos, é preciso ter em conta quando os dados não são transmitidos pelos colaboradores, quando os dados são gravados nas unidades de medição incorretas (o uso de metros em vez de centímetros, por exemplo) e por fim a periodicidade com que criam oportunidades de medição para obtenção de dados.

A fase de utilização de informação em gestão de ativos recebe normalmente muita atenção pois é nesta fase que os colaboradores entram em contacto com os dados, mas esta atenção é muitas vezes desajustada. Uma má definição dos requisitos de informação, leva a que a recolha e o armazenamento de dados seja feita porque são considerados úteis, mas sem muitas vezes considerar a forma como estes vão ser usados numa perspetiva mais global. Se há dados que estão a ser recolhidos, mas não estão a ser utilizados para informar a tomada de decisão, então será importante perceber como é que estes dados estão a ser utilizados e qual o valor que traz mantê-los na posse da organização.

Existem vários departamentos onde os dados obtidos geram informação de suporte à tomada de decisão.

A utilização de informação sobre os ativos físicos de uma organização para fins de manutenção tem duas características; A nível tático, utilizando os dados de forma a determinar a periodicidade de manutenção programada, de forma a ajudar o planeamento no fim de vida útil de um ativo, e também de forma a ajudar nos relatórios estatísticos de fiabilidade dos ativos para avaliação de desempenho. A nível operacional podendo dar resposta a falhas que exijam o acesso a informação sobre ativos específicos tanto a nível de reparações, segurança e para relatórios cujo objetivo é o agendamento de trabalhos.

A capacidade da informação sobre ativos cumprir os seus requisitos dependerá não só da modelação dos dados, mas também dos softwares de apoio ao acesso e transferência dos mesmos e do nível de formação do pessoal. As operações de manutenção acontecem, por vezes, serem independentes à organização e assim proporcionarem e oferecerem baixos níveis de interação com a informação dos próprios ativos, isto leva a uma falha organizacional que acabará por direcionar a organização a uma lacuna na otimização de atividades de manutenção, podendo mesmo levar a falhas críticas nos ativos.

A disponibilidade de novas tecnologias no terreno que podem adquirir e transmitir dados abre um vasto leque de opções para melhorar a resposta de manutenção, podendo mesmo capturar dados sobre as condições e desempenho dos ativos.

A avaliação do inventário de ativos de uma organização pode ser um impulsionador primordial para a retenção de dados sobre os atributos dos ativos para relatórios financeiros. O historial de custos de um ativo/grupo de ativos pode fornecer um ponto de referência para assegurar uma provisão adequada para a substituição. Dependendo da base de avaliação, a informação sobre a dimensão, desempenho, custo de manutenção, estado, vida útil do ativo e características de instalação têm influência na avaliação do ativo.

O risco em ativos pode ser frequentemente avaliado numa série de questões organizacionais utilizando um modelo de probabilidade-consequência. Estes são muitas vezes orientados por dados sobre os ativos que fornecem o nível de risco, os requisitos para uma resposta adequada e os custos potenciais. Os dados sobre a manutenção, incluindo os dados de falhas conseguem dar informação sobre a fiabilidade dos componentes. As falhas específicas de um componente, que levam à identificação de um ativo em estado crítico vão suportar a resposta. Os dados fornecidos pelos fabricantes dos

equipamentos irão fornecer o ponto de partida para avaliação do estado de um componente e a sua probabilidade de falhar. Uma análise estatística pode criar objetividade, quando utilizada uma variedade de fontes de dados de forma a desenvolver uma resposta mais robusta em relação à probabilidade de falha.

Uma característica muito importante na avaliação de risco de ativos dentro de uma organização é a proporção de falhas que podem ser ligadas a determinados ativos, quer isto seja feito de forma manual ou automática. A melhoria de dados sobre falhas irá, de forma inerente, melhorar o número de correspondências com ativos, e assim aumentará a confiança nos dados estatísticos. Nos casos em que o potencial de falha tem aspetos geográficos (condições do terreno, etc), a localização do ativo será também um dado importante na avaliação do risco.

A decisão de vender, suprimir ou substituir um ativo é um dos papéis chaves da gestão de ativos. Até esta decisão, a sua gestão será baseada numa série de informações, dados de desempenho e modelos que determinem a vida útil restante do ativo, de modo que a sua substituição seja planeada.

A vida de um ativo pode ser descrita financeiramente (depreciado na sua totalidade, lucro positivo, custos operacionais elevados, etc.) ou por condição (com falta de condições, perigoso, etc.). Apesar da vida financeira de um ativo estar baseada por dados de custos, desempenho e condição, muitas vezes é necessário utilizar critérios de uma série de informação, recolhida de uma série de fontes normalmente associados ao inventário.

Alguns ativos específicos podem justificar um estudo detalhado para avaliar objetivamente as opções de substituição. A identificação dos ativos que devem ter prioridade neste estudo detalhado e o número de ativos que devem receber a atenção exige muitas vezes a recolha de uma série de dados a partir do qual a vida útil inicial pode ser avaliada e enquadrado no contexto com os outros tipos de ativos.

Os modelos de corrosão, por exemplo, tentam reunir uma série de parâmetros através de uma base de dados de forma a prever quando é que os níveis críticos de corrosão poderão ser atingidos. A correspondência destas previsões com falhas encontradas provenientes de manutenções, é um teste estatístico fundamental.

Tais modelos podem suportar um modelo de risco sobre os ativos e também oferecer uma visão geral dos ativos que se aproximam do fim de vida útil. Claramente, tais aplicações de dados dos ativos exigem a compreensão da fiabilidade dos dados utilizados, de modo que a confiança nas indicações possa ser objetiva e fornecer provas para as projeções executadas.

2.3.5 A transformação digital como suporte à tomada de decisão em gestão de ativos

O processo de tomada de decisão em gestão de ativos tem vindo a tomar um papel central (Macchi et al., 2018), mas este tem de ser baseado num número elevado de dados e informação. Atualmente, com os avanços tecnológicos, o aumento de dispositivos (sensores) que permitem a recolha destes mesmo dados tem trazido diversos benefícios no processo de tomada de decisão, uma vez que esta prática permite reduzir significativamente o número de manutenções desnecessárias tendo em conta

que se consegue basear em ações de manutenção que se realizem no momento certo e quando realmente são necessárias. Estes dispositivos permitem ajudar a perceber e agir com base na monitorização em tempo real das condições dos diversos equipamentos.

Para além destes recursos tecnológicos que permitem uma grande recolha de dados e informação, a gestão destes mesmos dados relacionados com os ativos tem um papel importante para uma correta análise de risco e tomada de decisão. A grande quantidade de informações que pode ser fornecida a um gestor, facilita a tomada de decisão, porém não permite a tomada de decisão autónoma quer ela seja total ou mesmo parcial. Existe uma falha na exploração de soluções que permitem que esta oferta de informações seja tratada e analisada de forma autónoma, cabe a um gestor saber tratar e analisar os dados para tomar decisões. Embora muitos trabalhos de pesquisa relatem a existência de métodos que lidam com previsões, poucas propõem a possibilidade de utilização destas previsões em tempo real acompanhado de especialistas com conhecimento para fornecer recomendações de intervenção.

A utilização de BIM tem sido amplamente utilizada em fase de projeto e na sua construção, mas as opções em termos de gestão de ativos é bastante limitada, apesar da pesquisa ainda se encontrar em níveis primários esta encontra-se num ritmo de desenvolvimentos bastante acelerado. (Lu et al., 2020) Uma das principais razões é o facto de o BIM ainda não estar desenvolvido o suficiente para gestões diárias de operação e manutenção. Assim, a transformação digital no seu total tem sido amplamente promovida, mas os artigos mostram a necessidade de implementação e supervisão de sistemas bem definidos e bem organizados, para além da necessidade de encontrar lacunas e especificar objetivos bem definidos para desenvolvimento futuro.

Uma proposta de enquadramento de Digital Twin em gestão de ativos na área de operações e manutenção é dada por Lu et al., 2020, onde refere quatro principais aspetos numa vertente mais prática. Sendo estes, inteligência, eficiência, integração e interoperabilidade. Inteligência, pois pretende a transição de uma gestão de ativos baseada em trabalho manual tradicional, para um trabalho mais ativo e automatizado (monitoração automática de processos, abordagens baseadas em dados, métodos baseados no conhecimento prévio). Eficiência neste caso pois o objetivo baseia-se no mesmo do que numa gestão de ativos tradicional, ou seja, tornar um processo de operação e manutenção mais eficiente utilizando menos recursos (tempo, custo, pessoal especializado, custo computacional). Integração pretende que todos os elementos (incluindo dados, tecnologia, modelos, etc.) possam ser compatíveis e integrados de modo que haja uma colaboração contínua. Interoperabilidade é descrito como uma gestão de ativos baseada em DT que pode ser utilizada sem problemas de cooperação entre atividades e também com outros sistemas/pessoas. Esta proposta apresentada divide o DT em três níveis, o nível de ativos inteligentes, o nível de integração dos ativos inteligentes e o nível de gestão de ativos com o paradigma DT, como apresentado na figura número 15:

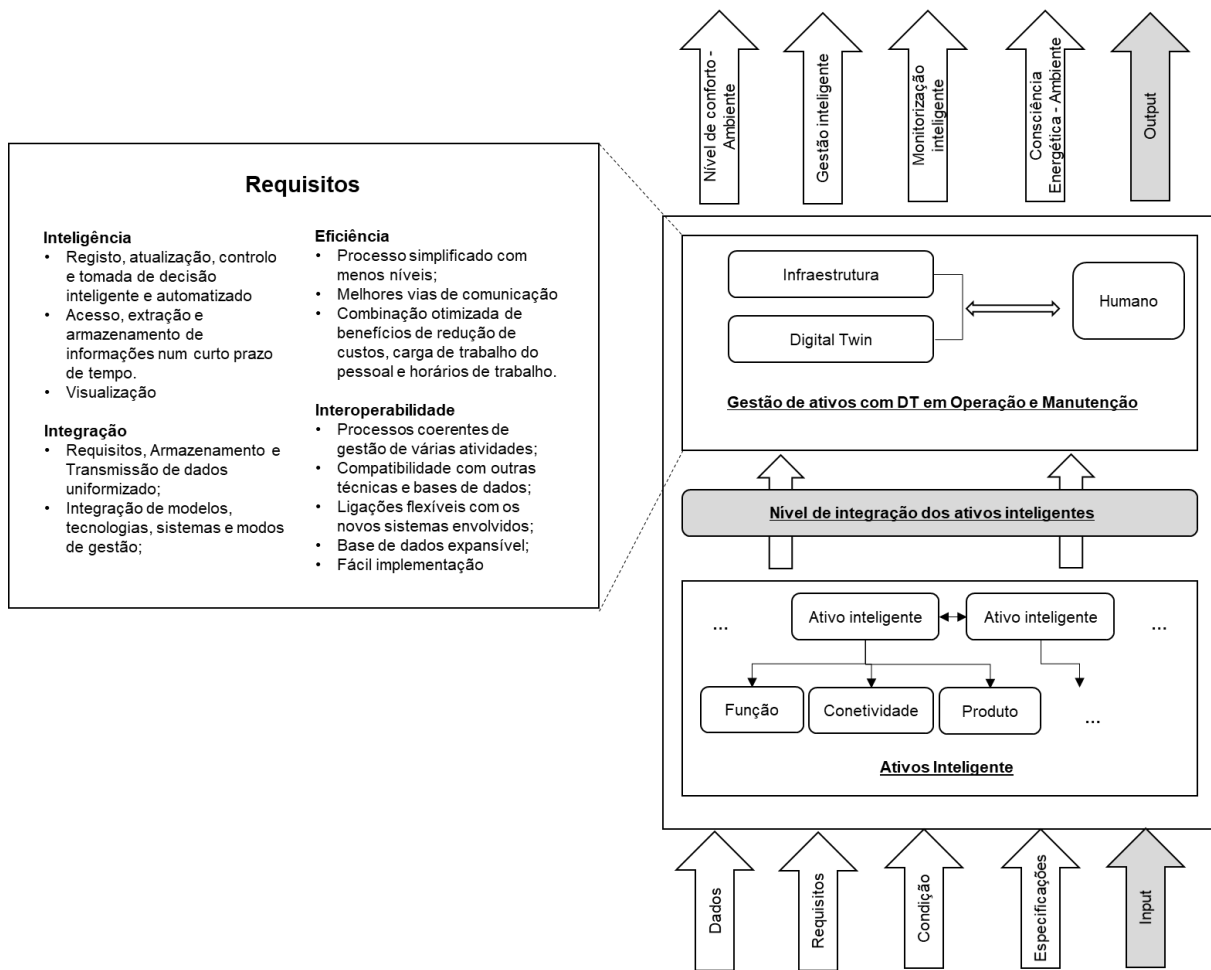


Figura 15 - Enquadramento do DT em Gestão de ativos nas fases de Operação e Manutenção – Adaptado de Lu et al., 2020,

O nível de ativos inteligentes refere-se aos ativos que, com o apoio de sistemas de sensores distribuídos, comunicação sem fios e acessibilidade móvel se tornam ativos replicados em modelos digitais como o BIM. Estes ativos inteligentes aumentam a produtividade no que toca a eficiência operacional no serviço diário. A tecnologia implementada permite a recolha de dados em tempo real, a comunicação eficaz e a integração de recursos, tornando o BIM a plataforma central de ligação a diferentes bases de dados e sistemas.

O nível de integração dos ativos inteligentes tem como base os ativos inteligentes mas requer a necessidade de ter uma camada de integração com sistemas interatuantes. IoT, RFID, sensores, e sistemas de ligação entre diferentes tecnologias permitem a partilha de dados e informações através de sistemas pré-definidos e com ligação wireless. Este sistema inclui tecnologias de análise e armazenamento de dados como a inteligência artificial e as clouds. Este nível também permite a ligação de ativos a pessoas através de uma realidade inteligente e interativa.

Por fim o nível de gestão de ativos com DT numa fase de operação e manutenção pode ser obtido com sucesso tendo em conta quatro aspetos; 1) A criação de um enquadramento e estrutura bem definido, como mostrado na figura 15. 2) A criação de um plano inteligente, com uma estrutura específica concebida de forma a integrar todos os ativos inteligentes durante os processos de gestão, incluindo o nível de integração dos ativos inteligentes. 3) A criação de um método prático de interoperabilidade e

troca de dados entre o DT e os vários sistemas e pessoas, nomeadamente o modelo digital e os sistemas de tomada de decisão suportados por inteligência artificial. Este enquadramento permite a integração do modelo digital, com softwares de análise e machine learning com todos os dados existentes sobre a infraestrutura permitindo atualizar as condições em tempo real, possibilitando a criação de um DT dinâmico. Para além disso, a incorporação de profissionais de gestão de ativos permite os sistemas inteligente baseados em inteligência artificial aprenderem técnicas de tomada de decisão; 4) A criação de um sistema eficaz e eficiente de comunicação e cooperação entre os profissionais, permitindo uma aprendizagem eficaz das novas tecnologias e ferramentas desenvolvidas.

De um modo geral, a literatura refere uma série de funcionalidades para a utilização dos DT, entre eles:

1. Melhor tomada de decisões de manutenção (previsão de danos / fissuras; deformação geométrica do material e modelação da fiabilidade dos sistemas físicos)
2. Réplica do ciclo de vida do sistema, apoiando a tomada de decisões de diferentes formas:
 - i) Prevendo os desempenhos / comportamento do sistema a longo prazo
 - ii) Promovendo a continuidade digital dos dados ao longo das fases do ciclo de vida do sistema
 - iii) Certificação da viabilidade e otimização do software de controlo do sistema
 - iv) Simulação e interligação de dispositivos IoT
3. Tomada de decisões e otimização com base estatística, tais como a otimização do comportamento / desempenho do sistema, através da simulação durante a fase de conceção ou durante outras fases do ciclo de vida, conhecendo os seus estados atuais e anteriores.

É evidente que a modelação DT está cheia de promessas no que diz respeito à gestão do ciclo de vida dos ativos. Por conseguinte, pode ser assumido como um meio relevante para responder explicitamente às necessidades de apoio à decisão.(Macchi et al., 2018)

Através de uma hierarquia em pirâmide é possível demonstrar os diferentes níveis do DT adequado para a setor da construção, para a suporte à tomada de decisão na gestão de ativos. A descrição sobre cada nível é a seguinte:

- Digitalização – Considera-se o nível mais baixo, essencialmente representação a conversão de dados analógicos existentes para o formato digital. Este atua como base para todos os outros níveis superiores. Vem com benefícios limitados como uma melhor gestão de documentos, etc., que se tornaram uma necessidade básicas nas operações atuais.

- Visualização – Este nível permite essencialmente visualizar o que está a acontecer em tempo real de uma forma melhor. Isto pode incluir monitorização *wireless*, realidade virtual e aumenta e modelos BIM.
- Análise – Esta categoria permite começar a obter informações a partir de dados e começar a responder às perguntas sobre a razão pela qual certas situações estão a ocorrer. A análise de dados torna-se predominante nesta fase. A progressão para uma organização mais madura digitalmente dá-se nesta fase. Encontram-se nesta fase todos os métodos básicos de análise de dados, métodos paramétricos, etc.
- Previsão – Aqui começa-se a responder ao que vai acontecer no futuro e a tomar decisões de acordo com isso. Todas as ferramentas de simulação, inteligência artificial, etc. entram neste nível.
- Prescritiva – Finalmente, nesta categoria, o poder computacional começa a recomendar-nos o que é ideal para uma dada situação, atingindo assim o grau máximo de automatismo e otimização possível.

De seguida na figura 16 demonstra-se esta hierarquia assim como as diversas tecnologias pertencentes que foram abordadas no capítulo 2.2.2.

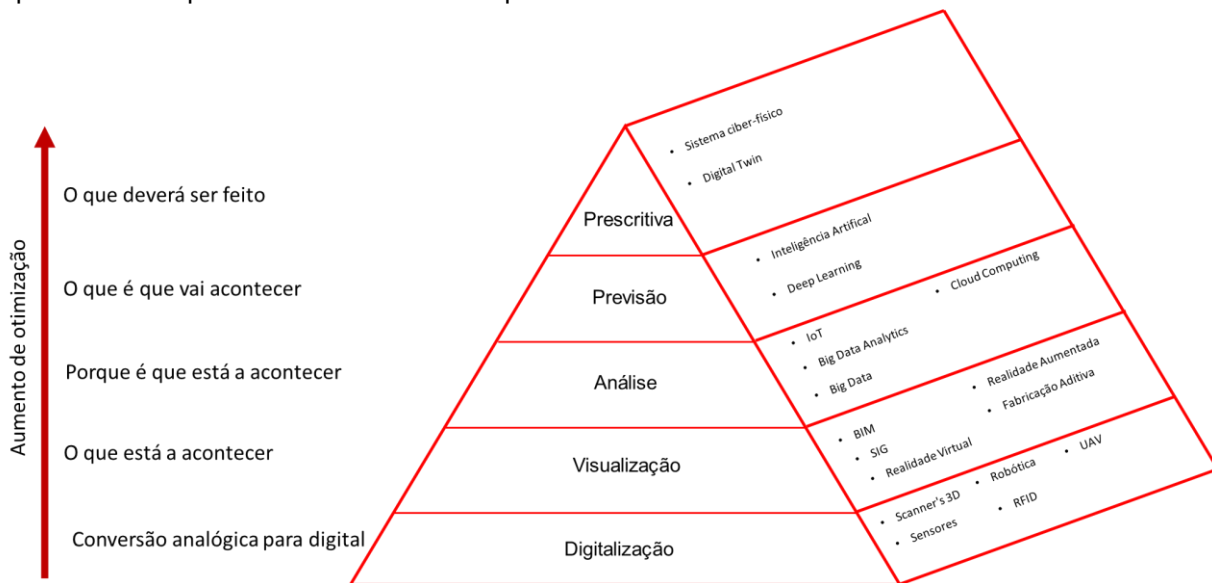


Figura 16 - Categorias de tecnologias e processos para obtenção do DT

2.3.6 A transformação digital como suporte à tomada de decisão em gestão de ativos no setor dos transportes

Os transportes é um sector fundamental para a economia da União Europeia. Os serviços de transporte abrangem uma rede complexa com cerca de 1,2 milhões de empresas privadas e públicas dentro da EU, empregando cerca de 11 milhões de pessoas e fornecendo bens e serviços aos cidadãos e empresas da EU e aos seus parceiros comerciais. O setor também proporciona mobilidade para os europeus, contribuindo assim significativamente para a livre circulação de pessoas. Serviços e

infraestruturas de transporte eficientes são vitais para explorar as forças económicas de todas as regiões da União Europeia, para apoiar o mercado interno e o crescimento, e para permitir a coesão económica e social. Também influenciam a competitividade comercial, uma vez que a disponibilidade, preço e qualidade dos serviços de transporte têm fortes implicações nos processos de produção e na escolha dos parceiros comerciais. Com um papel tão central, os transportes estão por definição também inter-relacionados com várias áreas políticas, tais como as políticas ambientais e sociais. Os principais desafios para o sector dos transportes na UE incluem a criação de um espaço único europeu de transportes que funcione bem, ligando a Europa com uma moderna, multimodal e segura rede de infraestruturas de transporte, caminhando para uma mobilidade com baixas emissões. De uma perspetiva social, a acessibilidade, a fiabilidade dos transportes é fundamental (European Commission, 2018). Assim sendo, é essencial que gestores das infraestruturas de ferrovia tenham acesso aos melhores dados possíveis, para que consigam tomar as decisões mais adequadas ao longo de todos o ciclo de vida.

O desenvolvimento da Indústria 4.0 e de DT tem vindo a despoletar novas oportunidade na tomada de decisão baseada em dados obtidos em tempo real. Apesar da maior parte dos autores focar a pesquisa noutros sectores, alguns casos estão em fase de exploração para aplicação de DT em infraestruturas de ferrovia (Tabela 2).

Tabela 2 - Resumo das aplicações de DT nas infraestruturas ferroviárias

Tipo de ativo	Problemas	Oportunidades para DT	Referência
Aparelhos de mudança de via	Falhas são uma das principais causas de atrasos; questões de segurança, e são responsáveis por uma proporção significativa do orçamento alocado à manutenção e substituição	Previsão de falhas	(Peeters, 2018; Pillai et al., 2021; Roberts, 2020; Vatn, 2018)
Via-férrea	Defeitos e pontos de soldadura são descontinuidades na via-férrea	Detetar e monitorizar o estado estrutural das descontinuidades na via-férrea	(Ramatlo et al., 2020)
	Fundações com rigidez diferentes e zonas de transição podem aumentar deformações geométricas	Monitorização das cargas impostas na via, dos assentamentos a longo prazo e das deformações geométricas de acordo com os limites de segurança	
Sistema de energia	Elevada complexidade	Gestão de energia, análise do fluxo energético,	(Ahmadi et al., 2021)

			monitorização da qualidade energética, diagnóstico de falhas e manutenção, monitorização do estado, otimização do funcionamento	
Pontes	Monitorização do estado, planeamento da manutenção e renovação; inspeções consomem recursos e tempo; segurança	Monitorização e previsão do estado estrutural; Melhoria da manutenção preditiva; gestão e planeamento das inspeções		(Wenner et al., 2021)
Túneis	Monitorização do estado, planeamento da manutenção renovação; uso de energia; segurança	Monitorização da utilização de energia e do estado do sistema, planeamento da manutenção e simulação de ocorrências		(MSc. Thesis Kasper Tijs, 2020)

A tomada de decisão em gestão de ativos nas infraestruturas de ferrovia é orientada pela otimização do ciclo de vida dos ativos. São critérios como a sustentabilidade económica, conjugados com o objetivo de disponibilização de uma infraestrutura com elevados níveis de qualidade, fiabilidade e segurança que levam empresas como a Infraestruturas de Portugal, com um portefólio complexo com mais de 3.000 km de via-férrea, a conceber uma estratégia de gestão de ativos para a determinação de competências, ferramentas e ações. De forma a assegurar o cumprimento dos objetivos estipulados é essencial que disponha a todo o momento de informação atualizada de duas vertentes, dos ativos a serem geridos e das expectativas das partes interessadas. A IP é assim o maior gestor de infraestruturas de transporte em Portugal e possui um Sistema de Gestão de ativos certificado - ISO 55001. A IP é um organismo público e é responsável pela construção e manutenção de redes rodoviárias e ferroviárias.

As decisões de investimento, tem como a base a informação obtido destas duas vertentes. Em relação à primeira é essencial para além de ter um portefólio completo de todos os ativos, é necessário garantir que informações como seu estado, condição ou desempenho, sejam atualizadas, para isso o modelo de gestão de ativos da IP assenta no conhecimento da infraestrutura e no desenvolvimento da capacidade inspetiva.(Grossinho et al., 2018) Para além disso é preciso medir a importância destes ativos para a organização, ou seja, qual o potencial impacto que esta pode vir a ter nos objetivos a alcançar.

No que diz respeito às expectativas das partes interessadas, é preciso considerar tanto a perspectiva externas ou as internas à organização como também a dos acionistas, e mesmo dos clientes, quer em termos da sua rentabilidade quer em termos da sua disponibilidade ou fiabilidade.

3. Modelo de tomada de decisão com vista à transformação digital em gestão de ativos

3.1 Método CIPO

Um dos principais objetos de estudo, ainda em desenvolvimento, é a criação de um modelo de suporte à tomada de decisão, que garanta a informação necessária para auxiliar os processos dentro de uma empresa, consoante os seus objetivos organizacionais e resultados pretendidos. Para além disto é necessária uma monitorização contínua, que seja constantemente atualizada para sustentar alterações aos parâmetros de entrada e aos processos.

Neste capítulo é objetivo apresentar um modelo para aplicação nos ativos da Infraestruturas de Portugal para suporte à tomada de decisão em gestão de ativos com vista à transformação digital. A formalização, organização e esquematização do contexto organizacional, dos parâmetros de entrada de um processo e do processo de tomada de decisão em si pode ser baseado no enquadramento CIPO (Contexto, Inputs, Processos e Outcomes)

A comissão técnica para a gestão de ativos (TC251) é responsável pelo desenvolvimento da família de normas ISSO 55000. Tal como exposto anteriormente estas normas têm como objetivo definir boas práticas em gestão de ativos assim como os requisitos à criação de um sistema de gestão de ativos. O grupo Ad-Hoc 3 da CT251 tem como objetivo a compreensão das orientações relacionadas com a especificação, recolha, gestão e análise de dados de suporte à tomada de decisão em gestão de ativos tendo em conta os objetivos organizacionais. Dentro dos fator-chaves mencionados pelo grupo, encontra-se as guias orientadoras para as organizações desenvolverem o seu próprio sistema de tomada de decisão. Foi proposto então a utilização do método CIPO. Como referido anteriormente, há diferentes tipos e níveis de tomadas de decisão dentro de uma organização. Definir linhas orientadores para a tomada de decisão (TD) facilita o desenvolvimento de uma framework de TD dentro das organizações. O contexto organizacional e os efeitos desejados (outcomes) são influência direta nas tomadas de decisão e devem ser estes que impulsionam os processos e os inputs. Na figura seguinte apresenta-se uma representação do modelo CIPO:

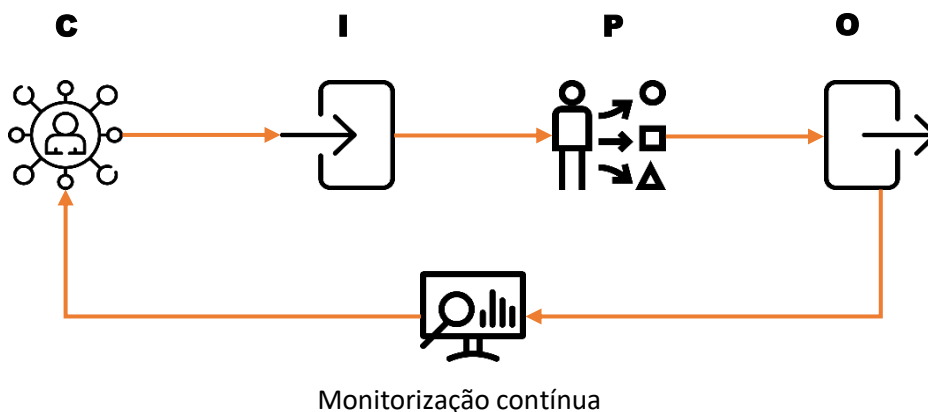


Figura 17 - Modelo CIPO

C – Contexto interno e externo da organização

I – Input's de suporte à tomada de decisão

P – Processos de tomada de decisão

O – Outcomes, Resultados esperados

O modelo CIPO é considerado um modelo orientado para a decisão que recolhe sistematicamente informação sobre um processo para identificar pontos fortes e limitações no seu conteúdo ou implementação para melhorar a eficácia do processo ou planear o futuro do mesmo. Os utilizadores deste modelo estão frequentemente concentrados na avaliação orientada para uma gestão eficaz, uma vez que este modelo combina quatro fases de avaliação. O enfoque é a melhoria contínua.

Como referido no capítulo 2.3.3 o processo de tomada de decisão pode ocorrer em diferente escala organizacional e fases temporais, é importante compreender que um modelo CIPO pode ser implementado nessas diferentes situações. Os parâmetros considerados em cada uma destas escalas e fases temporais alteram-se de forma que o modelo consiga cumprir os objetivos pretendidos.

3.2 Contexto interno e externo da organização

O contexto de uma organização permite garantir informação de forma a desenvolver e avaliar a missão, a visão, os valores, as metas, as prioridades e os objetivos. Tem como propósito a definição das características da envolvente, a determinação de metas e objetivos específicos e identificar e diagnosticar os problemas e entraves que podem vir a impedir o cumprimento de metas e objetivos. As tarefas principais para a definição do contexto baseiam-se na definição da envolvente, tanto a atual como a desejada, das necessidades que ainda não tenham sido satisfeitas e das oportunidades que ainda não foram consideradas e o diagnóstico aos eventuais problemas e entraves. Normalmente, os métodos utilizados são análises conceptuais para definir os limites da população a ser servida, estudos empíricos para definir necessidades não satisfeitas e oportunidades não aproveitadas, apreciação por peritos e clientes sobre entraves, problemas, metas e objetivos desejados. O contexto de uma organização está então diretamente relacionado com os resultados esperados, são este, para além das partes interessadas, que são fatores chaves para a definição do contexto interno e externo da organização. Alguns exemplos de partes interessadas são os proprietários privados de ativos, iniciativas governamentais, cidadãos e prestadores de serviços.

3.3 Entradas

As entradas (inputs) são informações para o desenvolvimento de programas, modelos e processos, através do processamento de base dados, dos interesses internos e externos. São fatores chaves para a gestão de ativos. Existem elementos obrigatórios para escolha dos inputs como, o impacto na decisão, a complexidade da decisão, a urgência de decisão, os fatores humanos, os dados e informações disponíveis e o conhecimento.

3.4 Processos

Os processos de tomada de decisão considerados numo modelo CIPO são bastante variáveis dependendo a escala e do período de tempo a que está a ser aplicado. A ISO 9000 define um processo como um conjunto de atividades inter-relacionadas ou em interação, que transforma os inputs em outputs. Estas atividades implicam a atribuição de recursos tais como pessoas e materiais. Uma grande vantagem da abordagem por processos, quando comparada com outras abordagens, é na gestão e controlo das interações entre processos e as hierarquias funcionais de uma organização.

Os inputs e outputs de um processo podem ser tangíveis (equipamento, materiais ou componentes) ou intangíveis (energia ou informação). Cada processo tem as suas partes interessadas, que podem ser internas ou externas à organização, com necessidade e expetativas sobre o processo, que definem os outputs requeridos ao processo. Deve ser utilizado um sistema de recolha de dados para fornecer informação sobre o desempenho do processo, que deve então ser analisado para determinar se há alguma necessidade de ação corretiva ou de melhoria, chamada muitas vezes de monitorização contínua como irá ser referido no capítulo 3.6. Todos os processos devem estar alinhados com os objetivos, âmbito e contexto da organização, e devem ser concebidos para aumentar o valor da organização.

O tipo, quantidade e variedade de processos deverá ser definido pela organização de forma a garantir o cumprimento de objetivos previamente estipulados. Apesar de os processos serem únicos para cada organização é possível identificar tipos de processos comuns, tais como:

- Processos de tomada de decisão de suporte à gestão de uma organização; estes incluem processos relacionados com o planeamento estratégico, a definição de políticas, objetivos e resultados esperados.
- Processos de tomada de decisão sobre a gestão de recursos; estes incluem todos os processos necessários para que a organização consiga garantir todos os recursos necessários para cumprir os objetivos de qualidade e os resultados esperados.
- Processos de processos de tomada de decisão de implementação, estes incluem todos os processos que permitem cumprir os resultados esperados da organização.
- Processos de tomada de decisão para medição, análise e melhoria; estes incluem os processos necessários para medir e recolher dados para a análise do desempenho e a melhoria da eficácia e eficiência. Incluem processos de medição, monitorização, auditoria, análise de desempenho e melhoria (por exemplo, para ações corretivas e preventivas). Os processos de medição são frequentemente documentados como parte integrante dos processos de gestão, recursos e realização; enquanto os processos de análise e melhoria são frequentemente tratados como processos autónomos que interagem com outros processos, recebem inputs dos resultados de medição, e enviam outputs para a melhoria desses processos.

Os processos podem estar estruturados num sistema de processos, onde interagem e combinados conseguem dar uma perspetiva global para uma melhor compreensão. Muitas vezes os outputs de um processo podem ser as entradas para outros processos, interligando e criando o tal sistema de processos.

No caso dos processos de tomada de decisão, estes são necessários para assegurar que as decisões possam ser auditadas (rastreadas), repetidas e reproduzidas. Ao fazê-lo a organização consegue garantir às partes interessadas que estão a ser tomadas as melhores decisões na prossecução das metas e objetivos da organização. Para um quadro de tomada de decisão ser eficaz há três elementos obrigatórios (baseados nos princípios fundamentais de gestão de ativos) que devem ser tidos em conta, nomeadamente, serem centrados no valor, baseados no risco, proporcionais, com critérios de tomada de decisão, com teste de sensibilidade de incertezas e transparentes.

3.5 Saídas, resultados esperados

Os resultados esperados indicam se os processos de tomada de decisão aplicados atingiram os objetivos pretendidos, mas, também, são estes que impulsionam os inputs que devem ser tidos em conta, assim como que processos devem ser aplicados para uma determinada tomada de decisão.

3.6 Monitorização contínua

Uma monitorização contínua eficaz é essencial num processo CIPO, pois os processos de tomada de decisão que requerem validação são aqueles em o output resultante não pode ser verificado por subsequente monitorização e medição pois as deficiências apenas se manifestam depois de o produto estar em utilização ou o serviço ter sido prestado. A forma de validar um processo de tomada de decisão requer que as condições de validação estejam definidas, pois este diverge bastante. A monitorização continua permite determinar com maior rapidez e precisão onde se deve concentrar a atenção e os recursos, a fim de melhorar os processos, implementar correções de rumo, abordar os riscos, ou implementar iniciativas para melhorar e permitir que a organização atinja os seus objetivos. Sendo a monitorização contínua um processo que pode ser automatizado, este permite à gestão de uma organização avaliar a eficácia dos sistemas de controlo implementados e detetar riscos associados; executar atempadamente, qualitativamente e quantitativamente, decisões relacionadas com risco; e melhorar a relação custo-eficácia dos sistemas de controlo e monitorização através de novas soluções tecnológicas. Fundamentalmente, a monitorização continua proporciona uma maior visibilidade e informação mais atempada sobre os processos de tomada de decisão concebidos para alcançar objetivos estratégicos e operacionais.

4. Caso de estudo – Ponte das Várzeas

Este capítulo tem como objetivo a apresentação do caso de estudo da ponte das Várzeas.

As pontes e os túneis diferem das outras infraestruturas ferroviárias, devido principalmente ao seu extenso ciclo de vida, que pode durar várias décadas. Não é surpreendente ter este tipo de infraestruturas em serviço, durante mais de 100 anos, nas variadas redes ferroviárias europeias. Portanto, para este tipo de ativos, alguns tipos de mecanismos de degradação, que são normalmente negligenciados em ativos com menor tempo de vida útil, assumem um papel relevante em termos de desempenho. Compreender como estes mecanismos de degradação atuam sobre os ativos, e tentar prever o seu impacto no seu comportamento, é um fator chave de suporte à tomada de decisão em gestão de ativos, a fim de maximizar o seu ciclo de vida. Esta compreensão irá suportar decisões de investimento de capital, de renovação de ativo em fim de ciclo de vida útil e também na decisão de estratégias de manutenção. O termo processo de degradação pode ser definido como uma sequência de alterações das propriedades ou atributos que causam defeitos numa estrutura. Os defeitos que podem aparecer numa estrutura são o resultado de processos ativos de degradação.

A fadiga é um caso específico de degradação que é de grande importância na avaliação das pontes metálicas existentes. A fadiga pode ser definida como o processo de iniciação e propagação de fissuras através de um elemento estrutural devido à ação de tensões variáveis. Este fenómeno é de elevada importância para a gestão de pontes porque tem correlação com o número de ciclos de tensão a que a estrutura tem sido sujeita.

Este estado limite pode ocorrer com níveis de tensão relativamente baixos e tem um comportamento frágil, o que significa que o elemento irá falhar subitamente. Este comportamento pode ser explicado pelo facto de o material não ter um comportamento elástico perfeito, provocando fissuras por fadiga no material. Quando se forma uma fenda, cada ciclo de carga consequente contribuirá para o seu desenvolvimento. Assim a fenda continuará a propagar-se até que o material já não suporte a carga e falhe. Foram desenvolvidas diferentes metodologias para a estimar a fadiga restante, ou seja, o tempo de vida útil das estruturas. Dependendo dos resultados pretendidos, estes métodos podem ter em consideração:

- Modelos analíticos estruturais, tanto modelos globais como locais;
- Propriedades dinâmicas, tanto analíticas como experimentais;
- Padrões de carregamento; i) Histórico de carregamentos, ii) Tráfego atual, iii) Previsões de tráfego futuro;
- Propriedade de resistência à fadiga com base nos materiais, secção transversal e detalhes das ligações

4.1 Descrição ponte das Várzeas

A ponte das Várzeas foi construída nos anos 50 como parte de um projeto para substituir as pontes existentes ao longo do percurso Beira Alta. Esta ponte de aço, construída pela firma alemã Fried Krupp em 1958, atravessa o rio Várzeas perto de Luso, Portugal, na linha ferroviária da Beira Alta. A figura 18 mostra a sua localização.

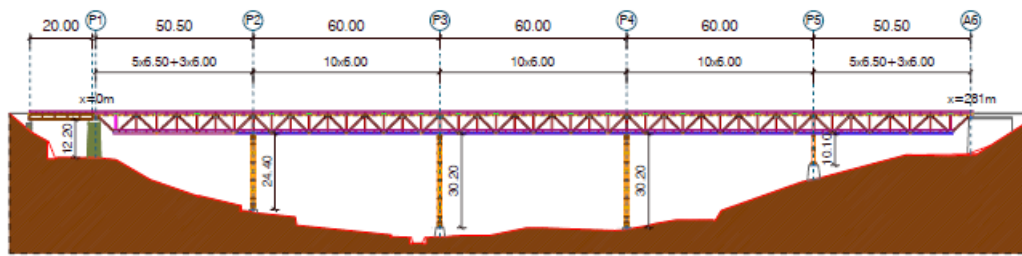


Figura 18 - Localização da Ponte de Várzeas (Google Maps 2021)

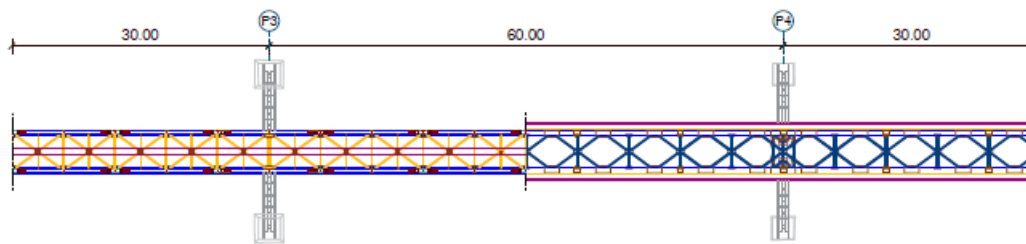
Esta ponte tem cinco vãos metálicos contínuos de $50,5 + 60 \times 3 + 50,5$ metros, bem como um sexto vão complementar simplesmente apoiado de 20 metros no lado oeste. Quatro colunas de treliças metálicas trapezoidais, um pilar de alvenaria no lado Este e uma coluna de alvenaria no lado Oeste suportam a ponte. Duas treliças invertidas Warren são unidas por travessas horizontais, duas camadas de travessas ligam as cordas inferiores e superiores das treliças, e um terceiro nível suporta as forças de lacete. No pilar de alvenaria a oeste, o vão simplesmente apoiado é suportado na última coluna. As figuras 19 e 20 exibem fotografias da ponte e esquemas técnicos respetivamente.



Figura 19 - Ponte das Várzeas - Google Maps 2021

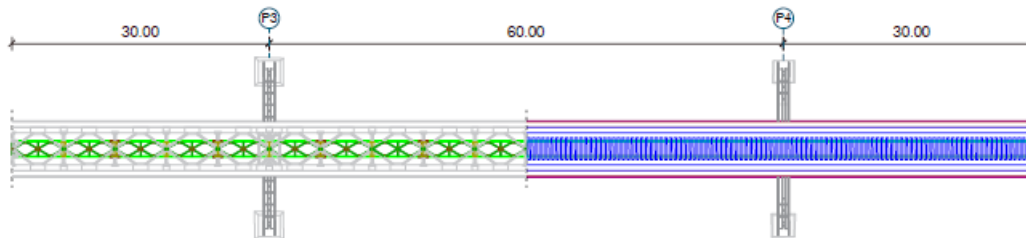


a) Alçado da Ponte das Várzeas.



b) Planta parcial do contraventamento inferior

c) Planta parcial do contraventamento superior



d) Planta parcial do contraventamento de lacete

e) Planta parcial da via férrea

Figura 20 - Principais elementos técnicos da Ponte das Várzeas

4.2 Sistema de análise de fadiga

O sistema de análise de fadiga (SAF), realizado pela Infraestruturas de Portugal tem como finalidade a avaliação vida de fadiga útil de uma ponte. É composto por um grupo de módulos interativos e inter-relacionados totalmente integrados uns com os outros de forma a fornecer os resultados esperados. Estes módulos estão agrupados em três áreas principais e incluem tecnologias relevantes para a análise de fadiga. Na figura 21 e tabela 3 estão esquematizados os diferentes módulos que pertencem ao SAF assim como as tecnologias relevantes para aquisição de dados de suporte à análise de fadiga.

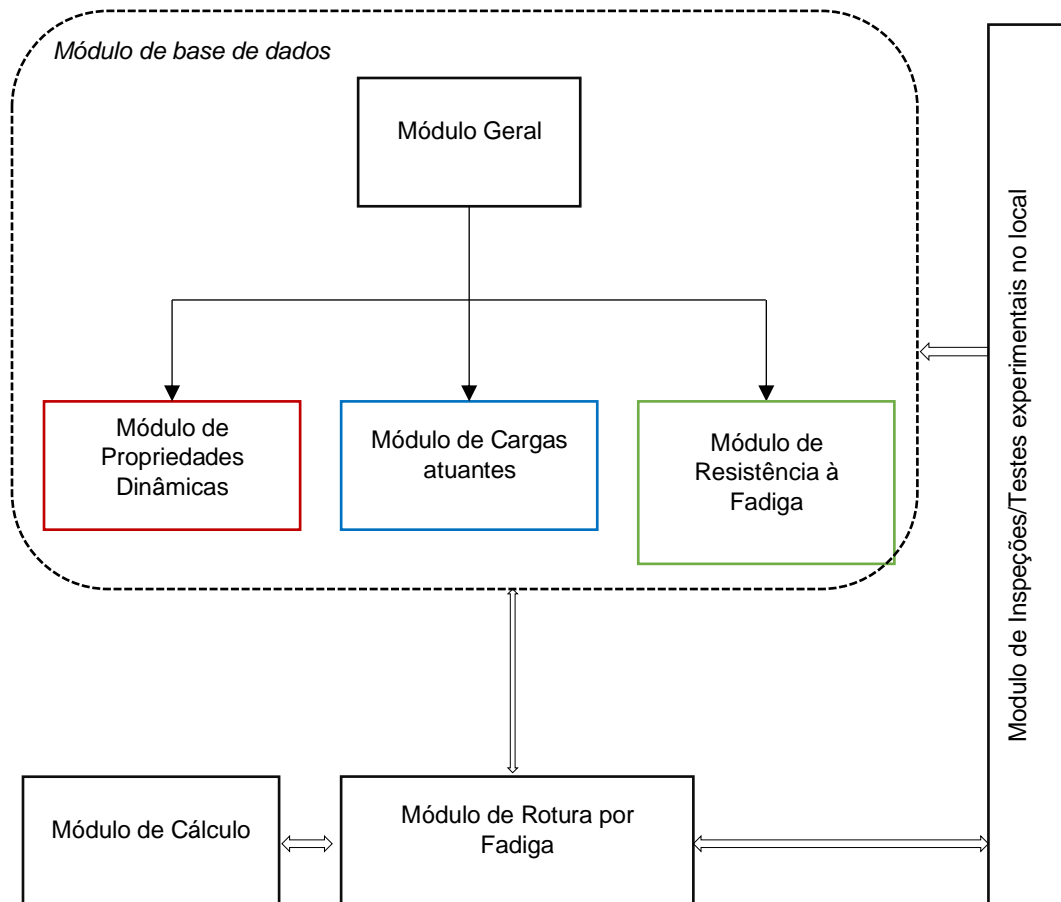


Figura 21 - Visão Geral do Sistema de Análise de Fadiga

Tabela 3 - Agrupamento e descrição dos módulos do sistema e respectivas tecnologias.

Áreas	Módulos	Tecnologias
Sistema de recolha e armazenamento de dados	<ul style="list-style-type: none"> • Geral • Propriedade dinâmicas • Cargas atuantes (Tráfego) • Resistência à Fadiga • Inspeções e testes no local 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores físicos (acelerómetros, Extensómetros, etc.) • Sensores virtuais (Software algorítmico para estimar parâmetros) • Modelos estruturais • Modelos de tráfego e modelos estatísticos
Sistemas de processamento de dados	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo 	Modelos físicos e matemáticos, eg. Avaliação de iniciação de fissuras de fadiga e a sua propagação
Parâmetros de saída e resultados	<ul style="list-style-type: none"> • Rutura por fadiga 	Software para processar dados de entrada e de saída

As ferramentas desenvolvidas pela IP permitem a implementação de SAF genérico independentemente do tipo de modelo numérico desenvolvido para a ponte, independentemente do software utilizado para desenvolver esses modelos e independentemente do tipo de detalhe que se pretende analisar. As características gerais do SAF baseiam-se no facto de o formato e o tipo de inputs necessários para avaliar a fadiga serem todos pré-definidos. Portanto, o sistema não precisa de estar na posse do modelo numérico da ponte, apenas necessita dos dados que podem ser previamente extraídos do modelo a fim de avaliar os danos causados pela fadiga com base numa análise dinâmica. A figura 22 representa uma simplificação do SAF, mostrando as independências referidas anteriormente.

Os sensores foram utilizados de forma a realizar um ensaio de vibração ambiental global de vibração, fazendo parte do módulo de testes experimentais ao local garantindo a calibração e validação do

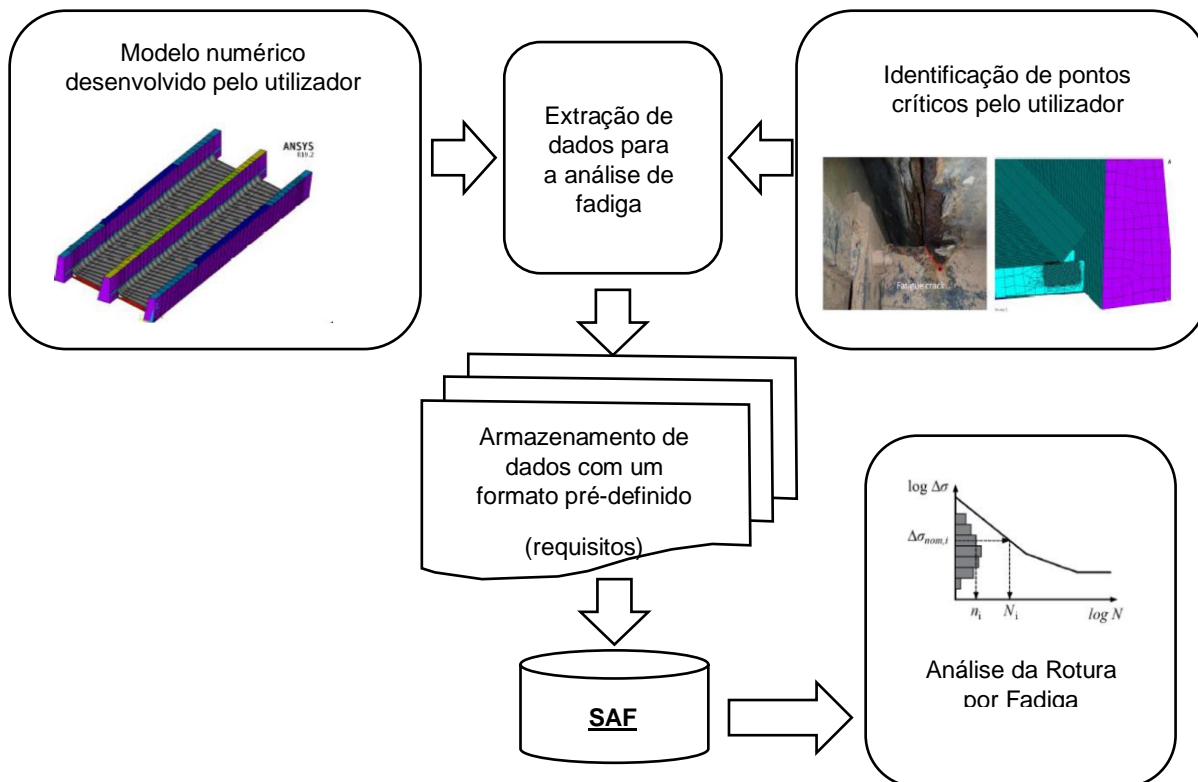


Figura 22 - Simplificação do SAF

modelo numérico da ponte. Também foram realizados ensaios de vibração ambiental local de forma a validar os modelos locais da ponte.

O cálculo da fadiga útil restante desta ponte foi realizado através da ferramenta numérica incluída no sistema de avaliação de fadiga. Tendo em conta, que não havia registo histórico do tráfego, o cálculo foi feito tendo em conta os cenários normativos definidos na norma EN1991-2. Assim sendo, tendo em conta que o tráfego usual desta ponte é significativamente inferior àquele apresentado na norma, considera-se que o resultado obtido é bastante conservativo.

Os outputs do SAF são fornecidos pelo módulo de rotura por fadiga. É o modulo de tomada de decisão que organiza os resultados de cada análise e fornece as decisões necessárias consoante os outputs obtidos dos cálculos e das inspeções. Deste podemos realçar, o valor dos danos acumulados e a vida útil estimada da estrutura ou de um componente e os parâmetros de entrada que foram utilizados para atingir os danos calculados. Os resultados de cada análise realizada pelo sistema e registados neste módulo podem ser utilizados para analisar possíveis medidas de reabilitação, reparação ou reforço, a fim de aumentar a vida útil da estrutura.

5. Aplicação do modelo ao caso de estudo

Este capítulo tem como objetivo a aplicação do método CIPO ao caso de estudo da ponte de Várzeas.

O método CIPO como referido no capítulo 3, refere a necessidade da definição do contexto organizacional, dos inputs, dos processos e dos outputs.

5.1 Contexto organizacional

5.1.1 Infraestrutura de Portugal e portfólio abrangido

A Infraestruturas de Portugal, S.A. (IP) é uma empresa pública que resulta da fusão entre a Rede Ferroviária Nacional – REFER, E.P.E. (REFER) e a EP - Estradas de Portugal, S.A. (EP)(IP, 2020). É o maior grupo português de gestão de infraestruturas de transportes, tem como grande objetivo a prestação de um serviço de mobilidade multimodal seguro, eficiente e sustentável.

A União Europeia define, em 2006, um regulamento a ser aplicado a todos os Estados Membros para a delimitação da noção de infraestrutura de transporte de modo a uniformizar o sistema de contabilidade das despesas referentes às infraestruturas quer estas sejam ferroviárias, rodoviárias ou por via navegável.

Assim sendo, a União Europeia define que por Infraestrutura de Transporte deve entender-se na totalidade das vias e instalações fixas dos três modos de transporte que sejam necessárias para assegurar a circulação de veículos e a segurança desta circulação.

Este regulamento define então para a Infraestrutura Caminho de Ferro as seguintes Classes e Subclasses:

- Terrenos;
- Estrutura e plataforma da via, nomeadamente aterros, trincheiras, drenos, valas, valetas de alvenaria, aquedutos, muros de revestimento, plantações para proteção dos taludes, etc;
 - cais de passageiros e de mercadorias;
 - bermas e pistas;
 - muros de vedação, sebes vivas, paliçadas;
 - faixas protetoras contra o fogo;
 - dispositivos para o aquecimento das agulhas;
 - anteparos contra a neve;
- Obras de arte:

- pontes, pontões e outras passagens superiores, túneis, valas cobertas e outras passagens inferiores;
 - muros de suporte e obras de proteção contra avalanches, quedas de pedras, etc.;
- Passagens de nível, incluindo as instalações destinadas a garantir a segurança da circulação rodoviária;
- Superestrutura, nomeadamente:
 - carris, carris de gola e contracarris;
 - travessas e longarinas, pequenas peças de ligação;
 - balastro, incluindo gravilha e areia;
 - aparelhos de via;
 - placas giratórias e carros transbordadores (com exceção dos exclusivamente reservados às unidade de tração);
- Instalações de iluminação destinadas a assegurar a circulação dos veículos e a respetiva segurança;
- Instalações de transformação e de transporte da corrente elétrica para a tração dos comboios: subestações, linhas de alimentação entre as subestações e os fios de contacto, catenárias e suportes; carril de transmissão (terceiro carril) e seus suportes;
- Edifícios afetos ao serviço das infraestruturas, incluindo a parte relativa às instalações de cobrança dos bilhetes de transporte.

Para as estradas define as seguintes Classes e Subclasses:

- Terrenos;
- Estruturas de apoio às faixas de rodagem:
 - trincheiras, aterros, obras de drenagem, etc.;
 - obras de suporte e consolidação;
- Faixas de rodagem propriamente ditas e obras acessórias:
 - camadas constitutivas do pavimento incluindo as subcamadas de proteção, bermas, faixas separadoras centrais, obras de escoamento de águas, zonas de estacionamento para veículos em dificuldades, áreas de repouso e parques de estacionamento em zona rural (vias de acesso e estacionamento, sinalizações),

parques de estacionamento nas localidades, situados em terrenos sob domínio público, plantações diversas, instalações de segurança, etc.;

- Obras de arte:
 - pontes, pontões, viadutos, túneis, galerias contra avalanches e quedas de pedras, anteparos contra a neve, etc.;
- Passagens de nível;
- Instalações de sinalização e telecomunicação;
- Instalações de iluminação;
- Postos de portagem, parquímetros;
- Edifícios afetos ao serviço das infraestruturas.

A Infraestruturas de Portugal sendo uma empresa pública que da resulta da fusão entre a REFER, Rede Ferroviária de Portugal e a EP, Estradas de Portugal, apresenta na sua estrutura a divisão de ativos em dois grandes grupos, Ativos Ferroviários e Ativos Rodoviários

Nos ativos ferroviários a Infraestrutura de Portugal divide-se nos seguintes tipos de ativos integrantes:

- Via-férrea (via e aparelhos de via)
- Obras de arte (pontes e túneis) e obras geotécnicas
- Suporte à tração (catenária, subestações e posto de catenária)
- Sinalização e segurança (Sistemas de sinalização e sistemas de controlo de velocidade)

Em relação aos ativos rodoviários a Infraestrutura de Portugal divide-se nos seguintes tipos de ativos:

- Pavimentos
- Obras de Arte (pontes e túneis)

5.1.2 Contexto Externo

A União Europeia, tendo em conta as alterações climáticas e a degradação do ambiente, dispõe de uma estratégia de crescimento que pretende que a UE tenha uma transformação económica sustentável, moderna, eficiente na utilização de recursos e competitiva. Nesta medida, e em conformidade com a estratégia global de desenvolvimento sustentável, a política para a mobilidade sustentável não promove a redução ou limitação da mobilidade, mas sim o incentivo à escolha de opções mais sustentáveis. Assim sendo, a política de transportes da União Europeia tem procurado cada vez mais, a recuperação de quota de mercado para o caminho-de-ferro, tanto no transporte de

mercadorias como de passageiros. O investimento proveniente da união europeia tem vindo a ser fundamental para promover uma rede mais moderna e eficiente, onde o foco tem vindo a ser cada vez mais virado para a reabilitação e modernização da infraestrutura, possibilitando o aumento, quer da capacidade, quer da velocidade das redes existentes.

Para além da ligação com a UE o grupo IP, tem dois contratos celebrados com o Estado, o contrato de concessão geral da rede rodoviária nacional e o contrato programa para a gestão da rede ferroviária nacional, tornando-se assim o responsável máximo pela gestão de infraestruturas.

São ainda considerados dentro do contexto externo da IP, os clientes, tanto utilizadores particulares como coletivos, o regulador que afere o cumprimento dos contratos referidos anteriormente, as entidades locais, como os municípios que esperam um tratamento equitativo e transparente, como ainda os fornecedores onde se inserem as subconcessionárias, empresas de projeto e construção, conservação e manutenção, consultores e fornecedores de utilidades.

A ponte das Várzeas pertence à linha da Beira Alta, principal ligação ferroviária de Portugal à Europa, faz parte da rede principal da Rede TransEuropeia de Transportes e integra o Corredor Ferroviário de Mercadorias nº 4.

No quadro do Plano de investimentos Ferrovia 2020, a ligação Porto/Aveiro – Vilar Formoso (através da Linha da Beira Alta) é definida como um projeto prioritário que visa reforçar a ligação do Norte e Centro de Portugal com a Europa por caminho-de-ferro, de modo a viabilizar um transporte ferroviário de mercadorias eficiente, potenciando o aumento da competitividade da economia nacional

5.1.3 Contexto interno

O grupo IP, em conformidade com as políticas europeias, tem se apoiado em equipas altamente especializadas, competentes e comprometidas com a organização, permitindo ser uma referência no que respeita às competências técnicas diferenciadas – gestão de ativos, inspeção, gestão de concessões, comando e controlo da circulação, engenharia, etc.

O grupo tem desenvolvido e consolidado modelos de planeamento, controlo focando principalmente no apoio à gestão e à tomada de decisões, ainda mais num contexto de existência de recursos financeiros limitados.

Os objetivos organizacionais da IP encontram-se esquematizados na figura 23.

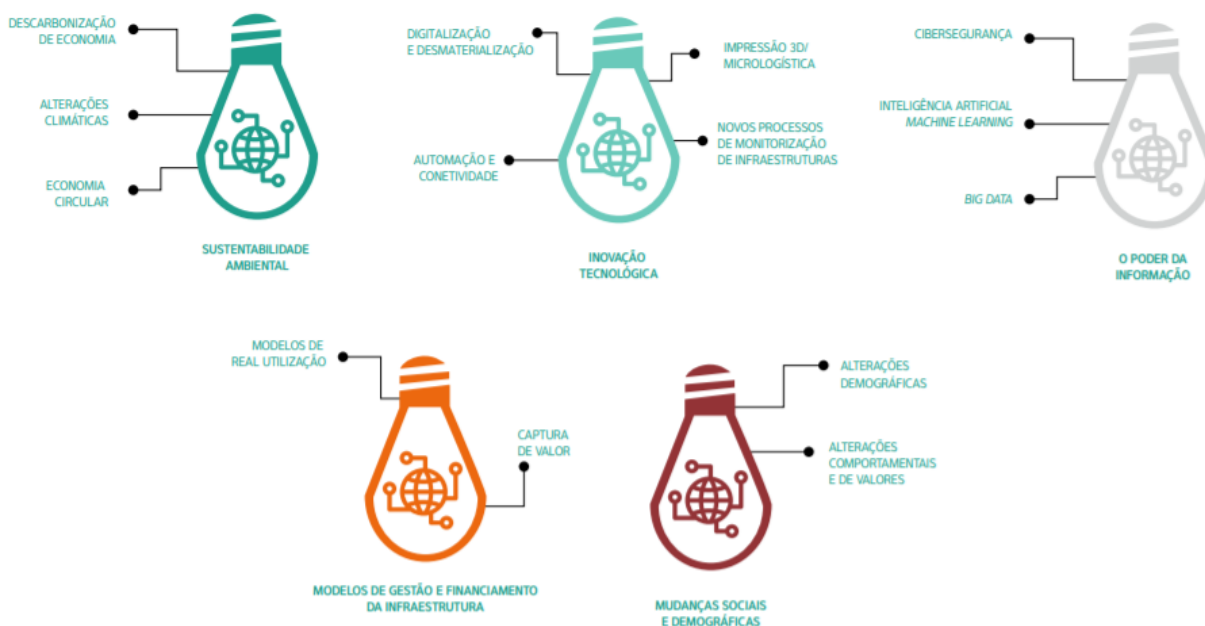


Figura 23 - Objetivos organizacionais da IP

O departamento de gestão de ativos da IP, com o objetivo de garantir uma infraestrutura com níveis elevados de qualidade, segurança e fiabilidade, é orientada pela otimização do ciclo de vida e guiada por parâmetros de sustentabilidade. Fazem parte do contexto interno todos os departamentos da IP, mas o mais relevante é a direção de gestão de ativos que dentro da área de negócio de gestão de infraestrutura, pretende, em benefício da empresa e da sociedade, e assente no conhecimento da infraestrutura e num modelo otimizado de custo, risco e desempenho, garantir o máximo valor dos ativos.

A estratégia de gestão de ativos, criada pela IP, descreve qual a abordagem gestão de ativos a cumprir, descrevendo como é possível converter em objetivos de gestão de ativos, os objetivos organizacionais e os requisitos legais, financeiros e regulatórios, das diferentes partes interessadas quer externas como internas.

5.2 Entradas

Os processos de tomada de decisão, tal como referido anteriormente, requerem uma série de parâmetros de entrada que são definidos consoante os objetivos do processo, ou seja dos resultados esperados pretendidos.

Os módulos do SAF, requerem uma série de dados, organizados na tabela 4. São estas informações que irão suportar os processos descritos no Capítulo 5.3.

Tabela 4 - Inputs do processo CIPO

Módulos	Inputs
Geral	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo Estrutural - Coordenadas dos nós, secções, tipos de ligação • Material • Informação detalhada de cada ligação
Propriedades Dinâmica	<ul style="list-style-type: none"> • Modos de frequência da ponte • Modos de Amortização • Modos de deslocamentos verticais dos nós pertencentes à trajetória de carga • Valores modais das tensões determinados considerando a forma do modo
Cargas aplicadas	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade dos comboios • Geometria dos comboios e respectivas cargas
Resistência à Fadiga	<ul style="list-style-type: none"> • Global <ul style="list-style-type: none"> • Curva S-N • Coeficiente de segurança • Local <ul style="list-style-type: none"> • Curva S-N para material • Curva S-N a ser escolhida a nível local • Fatores tensão aplicada num ponto • Coeficientes de segurança
Modelo de inspeção/experimentação	<ul style="list-style-type: none"> • Propriedade dinâmicas para diferentes tipos de vibração • Esquematização das cargas dos comboios em movimento • Contagem de comboios • Característica dos materiais • Existência de fissuras e suas características • Tensões medidas experimentalmente para validação dos modelos numéricos (Sensores) • Monitorização a longo prazo do efeito das cargas de serviço
Módulo de cálculo	<p>Os inputs dos Módulos de Base de dados são utilizados para calcular o consumo de fadiga e a estimativa da vida de fadiga restante com base numa das duas abordagens mencionadas no módulo de resistência à fadiga.</p>

5.3 Processo

O sistema de análise de fadiga é um conjunto de processos encadeados com o objetivo de avaliar a vida de fadiga útil de uma ponte. Podem se considerar quatro processos principais dentro do sistema de análise de fadiga, o processo denominado base de dados, o processo de inspeção e testes experimentais, o processo de cálculo e o processo de rotura por fadiga.

O processo de base de dados considera 4 módulos diferentes, o geral, o das propriedades dinâmicas, o das cargas aplicadas e o da resistência à fadiga. É o processo de recolha de informações que irá auxiliar o processo de cálculo. Insere-se neste processo todos ou inputs referidos no capítulo 5.2. Estes inputs são obtidos através da base de dados da organização, dos modelos numéricos da ponte como também de normas. De forma a validar e completar estes inputs, o processo de inspeção e testes experimentais funciona em paralelo com o processo de base dados, validando e completando as lacunas de informações que possa haver.

O processo de cálculo utiliza os inputs obtidos do processo de base de dados e é neste processo que é calculado o consumo de fadiga e a estimativa da vida de fadiga restante com base numa das abordagens, local ou global, referida no capítulo 4.2 no módulo resistência à fadiga.

Por fim, o processo de rotura por fadiga inclui um módulo de suporte à tomada de decisão que organiza os resultados de cada análise e faz as apreciações apropriadas com base nos resultados dos cálculos e/ou nos dados provenientes das inspeções. Os seguintes dados devem ser destacados entre os dados registados neste processo:

- Os inputs que foram utilizados para calcular os danos estimados (características dinâmicas, condições de cargas aplicadas e hipóteses de fadiga), ou seja, o método de cálculo da análise específica.
- Valor dos danos acumulados e vida útil estimada da estrutura ou de um componente.

Os resultados de cada avaliação realizada pelo sistema e armazenada neste processo podem ser utilizados para averiguar o potencial de reabilitação, reparação ou reforço de operações para prolongar a vida útil da estrutura.

5.4 Outputs

Ao efetuar cálculos dinâmicos com base nos cenários de tráfego em consideração, o sistema de análise de fadiga permite estimar a vida de fadiga útil da ponte das Várzeas através de uma abordagem global S-N, onde foi utilizado a curva S-N 71 da EN 1993-1-9 para ligações com rebites de forma conservadora. Os cenários de tráfego normativos destinam-se a simular o tráfego para projetar novas pontes e não para estudar as existentes e assim utilizando estes cenários extremamente

conservadores, há alguns pormenores que mostram ser propensos à fadiga. No entanto, é preciso mencionar que esta ponte está situada numa linha com pouco tráfego onde a tonelagem por ano é significativamente mais baixa do que a dos cenários normativos. Além disso a curva S-N adotada é certamente conservadora, uma vez que a mesma curva está a ser utilizada para todos os detalhes. Testes experimentais para determinar uma curva S-N mais adequada à ponte em estudo, com uma representação mais fomentada, bem como uma avaliação profunda do tráfego histórico da ponte de várzeas contribuiriam certamente para uma redução dos danos avaliados.

O output principal deste caso de estudo é a vida útil restante da ponte das Várzeas, ou seja 47 anos, assim sendo é importante referir que apesar de falarmos em processo de tomada de decisão, este output por si só referencia a necessidade de intervenção, não mencionando o prazo, nem considerando outras variáveis, devendo no facto ser considerado um subprocesso de tomada de decisão.

5.5 Monitorização contínua

No sistema de avaliação de fadiga não é referido nenhum sistema de monitorização contínua por ter sido um estudo pontual. Podendo este ser repetido periodicamente definido pela IP, ou consoante a necessidade.

6. Discussão da aplicação do modelo ao caso de estudo

6.1 Contributos do estudo

Com uma rede de transporte envelhecida e um volume de tráfego cada vez maior, tanto nas estradas como nos caminhos-de-ferro, a Infraestrutura de Portugal confronta-se atualmente com um grande desafio: o estado das estruturas de pontes antigas deve ser avaliado com precisão, devem ser realizados trabalhos de manutenção adequados e atempados, as pontes existentes devem ser reparadas ou substituídas, e devem ser construídas novas vias de transporte para satisfazer as exigências atuais.

À luz das questões atuais da nossa sociedade, o objetivo de uma infraestrutura robusta deve ser equilibrado com as restrições orçamentais, a conservação dos recursos humanos e materiais, e a redução da pegada de carbono. Isto pode ser conseguido através do prolongamento da vida útil dos bens existentes, mantendo simultaneamente critérios elevados de segurança e fiabilidade para o funcionamento das infraestruturas, tanto agora como no futuro.

O caso de estudo da ponte de Várzeas, apesar de ser considerado um subprocesso de tomada de decisão, não consegue por si só fornecer uma decisão final, consegue proporcionar uma decisão de referenciação. O sistema de análise de fadiga que avalia a vida de fadiga útil de uma ponte, no módulo de tomada de decisão organiza os resultados da análise e faz apreciações apropriadas com base nos resultados dos cálculos. Apesar disso a decisão final de requalificação, manutenção ou substituição da obra de arte não fica definida. O processo aplicado tendo em conta os níveis organizacionais, a hierarquia de decisão e a escala temporal apresentada no capítulo 2.3.3, encontra-se situado transversalmente excluindo o nível operacional (de decisões reativas feitas entre horas e dias). É uma decisão que deve ser tomada tanto a nível administrativo, ou seja, uma decisão estratégica a uma escala temporal alargada, mas também ao nível de gestores, por depender de questões técnicas e de implementação. De facto, a sua requalificação ou substituição não só tem valores de investimento muito diferentes, que ainda não foram considerados no sistema de análise de fadiga, como também tem um impacto muito grande na circulação. É preciso para uma decisão adequada, um conjunto de fatores monetários, de constrangimentos, de alternativas, de impacto ambiental que ainda não foram tidos em conta.

O processo de base de dados apresentado no caso de estudo, é suportado por dados provenientes da base de dados da Infraestruturas de Portugal, mais especificamente pelos relatórios de inspeção e levantamento de patologia da ponte das Várzeas realizado em 2018. Posteriormente foram realizadas diversas visitas à ponte para confirmar a coerência entre o relatório de inspeção e a estrutura real. De facto, verificou-se que parte da informação disponível nos relatórios de inspeção, especialmente a informação relativa ao levantamento geométrico, não estava de acordo com a real geometria da ponte, razão pela qual foi pedido um novo levantamento geométrico. Para além disto foram utilizados, por falta de informação disponível, propriedades baseadas em elementos de projetos disponíveis de outras pontes, com sistema estrutural muito semelhante, construídas na mesma altura e projetada pela mesma empresa, como é o caso da ponte de Trezói, localizada perto da ponte das Várzeas. Como

referido anteriormente, também foram utilizados cenários de tráfego regulamentares, por falta de dados concretos sobre o tráfego real que passa na Ponte de Várzeas. De forma a calibrar e otimizar o modelo global foram realizados ensaios de vibração ambiental, global e local, de forma pontual, com utilização de sensores, de acelerómetros e de extensómetros, cujo número disponível era limitado. As condições que foram assumidas, devido à elevada falta de dados disponíveis revelam-se ser uma base de incertezas relevantes que influenciam as respetivas características dinâmicas. A lacuna de dados precisos sobre propriedades geométricas e materiais levam a imprecisões relevantes na análise deste tipo de estruturas. O aumento e o aglomerar da complexidade das questões estruturais em causa requerem o desenvolvimento de modelos numéricos precisos, cuja melhoria, diante das incertezas existentes, dificilmente poderá ser colmatada com base em suposições de engenharia, algo que hoje em dia é muito recorrente, tornando-se o poder de argumentação mais relevante que os próprios dados no momento da tomada de decisão. O dano calculado para a vida residual à fadiga foi de 47 anos, tendo em conta os valores normativos, considerando tráfego pesado, muito superiores ao tráfego real que atravessou e atravessa e tendo em conta cargas e frequência de passagens de comboios muito superiores ao que realmente atravessa a ponte das Várzeas.

A transformação digital em gestão de ativos e as tecnologias emergentes já referidas anteriormente no documento conseguem proporcionar uma análise de fadiga constante ao longo dos tempos através da obtenção de dados em tempo real. Começando pela obtenção de um modelo BIM, de forma a caracterizar a geometria da ponte como base para uma avaliação fidedigna em todos os aspetos. Para além de um modelo BIM, a criação de um modelo SIG também é essencial de forma a caracterizar toda a envolvente de uma ponte. As tecnologias referidas no capítulo 2.2.2, como os scanners 3D, em particular a tecnologia LIDAR e os UAV são essenciais para conseguir captar a geometria da ponte e, para além disso, estas tecnologias auxiliadas por algoritmos de inteligência artificial conseguem durante o mapeamento da estrutura detetar anomalias, como pontos de particular fragilidade. Estas tecnologias, juntamente com sensores e de RFID conseguem obter os dados em falta para análise da vida de fadiga útil da ponte de Várzeas.

Embora as atuais abordagens de cálculo de fadiga sejam amplamente aceites, há que admitir que as lacunas existentes nestas abordagens tornam difícil a fiabilidade das mesmas.

Para o cálculo da vida útil remanescente, a transformação digital e a conseqüente criação de um DT, utiliza a tecnologia emergente para não só realizar o mapeamento em tempo real das pontes físicas em pontes virtuais, que passa a conter toda a informação e conhecimento, como também é capaz de realizar o diagnóstico de danos por fadiga para que a previsão da vida útil das pontes possa ser executada de forma eficiente e conseqüentemente que a tomada de decisão seja feita atempadamente.

É essencial, a existência de uma ligação virtual para que os dados obtidos em tempo real, quer através de sensores, nas próprias pontes, como também através de aparelhos de monitorização acoplados aos comboios sejam transmitidos para o sistema virtual. Ao mesmo tempo que o sistema físico é reparado a partir da informação em tempo real reportado pelo sistema virtual, como eventuais danos ou a vida de fadiga útil remanescente de pontos particulares.

Isto é possível com a existência de um modelo altamente preciso da ponte física e das cargas aplicadas. Assim por um lado, estes modelos têm um sistema altamente fidedigno da configuração real da ponte com a sua geometria estrutural, dimensões físicas, tipos de materiais, tanto a uma escala macro como micro, defeitos de fadiga, anomalias de fabrico etc. Por outro lado, o modelo é capaz de simular com precisão comportamentos físicos da ponte sobre a influência de cargas aplicadas provenientes das mais variadas fontes. Mais precisamente podem ter capacidade de simular o crescimento de fissuras de fadiga sob as complexas interações do sistema veículo-vento-ponte-temperatura etc. durante a vida útil da ponte. Entretanto, a degradação ao nível do material, da estrutura e do sistema durante toda a vida útil da ponte é considerada nos modelos para desenvolver resultados de simulação mais fiáveis do comportamento de fadiga. Além da capacidade de simulação, o sistema consegue fazer ajustes atempados ao modelo, tendo em conta os dados fornecidos em tempo real pelos sistemas de sensores acoplados, ou mesmo com dados provenientes do sistema de inteligência artificial que irá ser mencionado.

De forma a analisar as simulações, como por exemplo as de fissura de fadiga, que possam ser efetuadas e os variadíssimos dados provenientes dos sistemas de monitorização, tal como os provenientes de sensores acoplados aos comboios, é essencial um sistema de análise que consiga ligar as informações tais como o tipo de veículo e a sua carga às fissuras previstas pelas simulações, para que através de métodos probabilísticos consiga executar com fiabilidade a avaliação de fadiga de pormenores.

A IA permite que o DT seja um modelo autónomo que atualiza continuamente os modelos digitais e devolve atempadamente informação que seja considerada essencial para a manutenção de problemas relacionados com a fadiga, para além disso é capaz de fornecer um plano diário de pequenas correções ao serviço que possam atenuar os problemas de fadiga, sendo capaz em último caso, ou seja em situações de emergência, alertar os gestores da ponte. Considerando os vários fatores estocásticos que uma ponte pode sofrer durante a sua vida útil, a IA reduz significativamente a carga dos gestores da ponte.

Uma das grandes características das tecnologias num DT é a interação com os utilizadores. Este é capaz de transformar a informação proveniente das avaliações realizadas, com as de fadiga, em informação que seja de leitura pertinente aos utilizadores. Esta interface permite aos utilizadores controlarem e operarem o DT de forma conveniente e eficiente conseguindo uma interação bidirecional de gestão de uma ponte, com utilização plena de todo o hardware e software. Esta interação dos utilizadores juntamente com IA permite uma redução da carga de trabalho aos utilizadores, pois permite que a IA execute a maior parte das decisões ao mesmo tempo que os utilizadores supervisionam e executam as tarefas que estão fora do domínio da IA.

O poder computacional é a característica central de um DT, pois fornece um poder de cálculo muito superior àquele que é atualmente utilizado para análise de fadiga das pontes. A característica de alta velocidade deste poder computacional assegura que a simulação de fadiga conduzida por um DT

possa ser consistente com o serviço real de uma ponte, ou seja um serviço de 1 hora possa ser simulado num tempo real de 1 hora ou menos. (Tuegel et al., 2011).

A enorme quantidade de informação e de dados gerados é um dos problemas inerentes à criação de um DT. Durante a fase de operação e manutenção, os dados provenientes de sensores, relatórios de manutenção, histórico de simulações e resultados de análises etc. são introduzidos numa grande base de dados. Este é um dos grandes problemas, pois o crescimento contínuo destes dados estruturados e não estruturados, bem com a diversificação das fontes de dados faz com que os procedimentos tradicionais como o armazenamento em bloco ou em ficheiro tenham que ser modificados.

Através da implementação de um DT, tendo em conta todos os fatores referidos anteriormente, o modelo DT tem a capacidade de prever de forma contínua a possibilidade de fissuração por fadiga, o estado da fadiga, incluindo a sua localização e o tempo de iniciação, e o tempo remanescente de vida útil por fadiga de uma ponte.

Como referido anteriormente, o caso de estudo e os outputs que este garante não podem por si só ser objeto para a tomada de decisão. Na figura 24 encontram-se as várias opções de intervenção assim como os variados fatores que influenciam a tomada de decisão em pontes ferroviárias e rodoviárias.

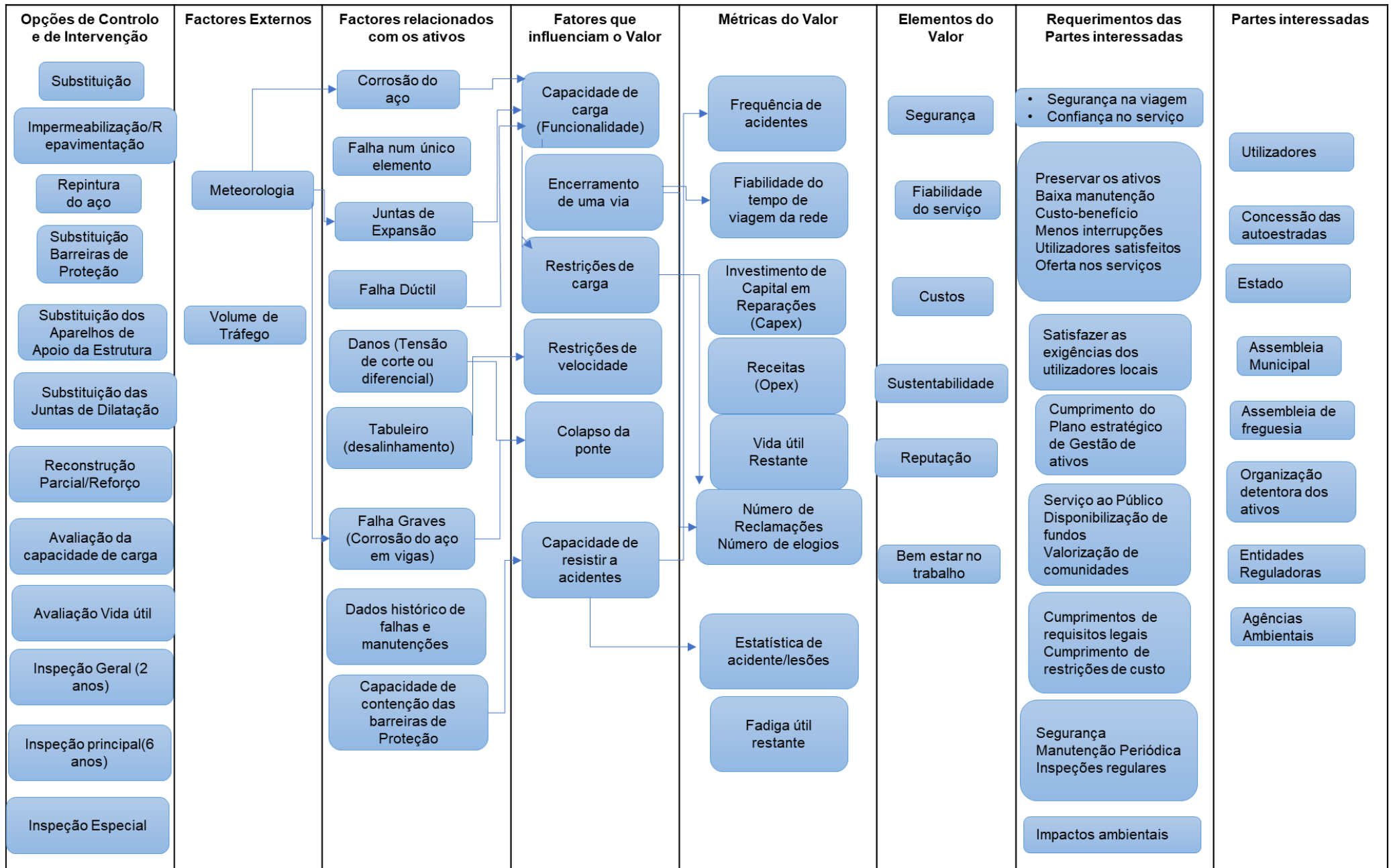


Figura 24 - Fatores que influenciam a tomada de decisão em pontes ferroviárias e rodoviária

Os diferentes fatores apresentados são alguns daqueles que são precisos para que a tomada de decisão seja o mais informada possível. O conjunto de tecnologias e soluções apresentadas ao longo desta dissertação conseguem colmatar praticamente todas estas informações necessárias.

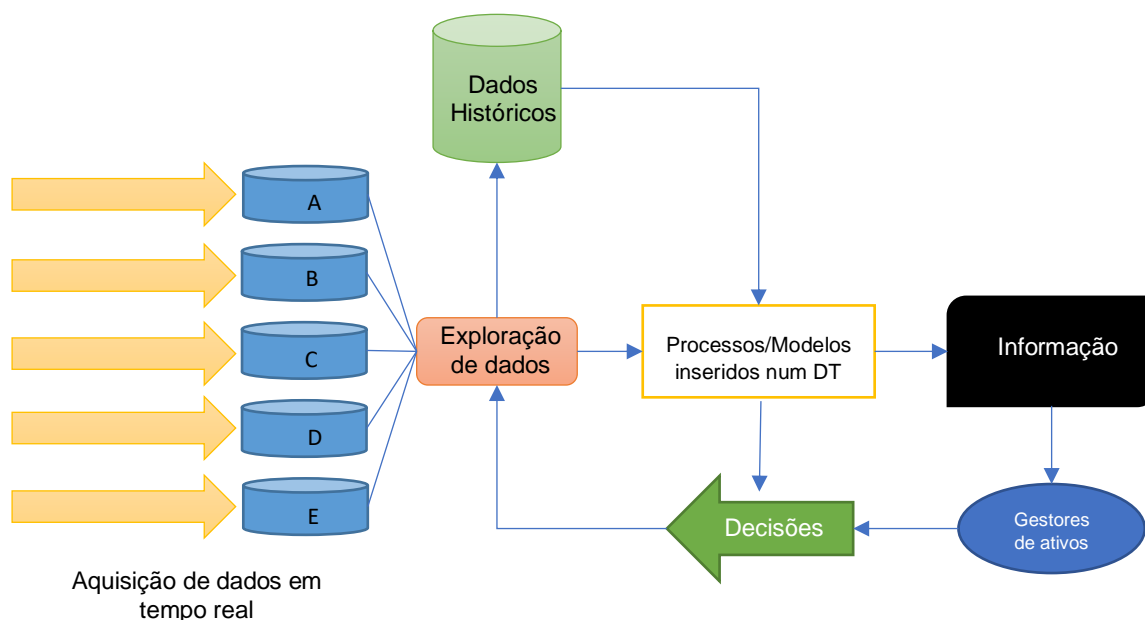


Figura 25 - Proposta de inserção de um modelo CIPO num contexto de transformação digital e implementação de um DT

A figura 25 é uma proposta de inserção de um modelo CIPO num contexto de transformação digital e implementação de um DT. A proposta refere como ponto de partida a aquisição de dados em tempo real, onde depois de explorados e juntamente com os dados históricos, alimentam processos e modelos inseridos num DT. Na sequência, os processos e modelos devolvem a informação necessária de suporte às decisões tomadas pelos gestores. Estas decisões juntam-se aos dados históricos e à exploração de dados que são incorporados em novos processos e modelos inseridos num DT, evidenciando assim que os processos de tomada de decisão dentro de uma organização são sequenciais.

6.2 Limitações do estudo

Um dos objetivos da aplicação do modelo CIPO, tal como referido pela comissão técnica para a gestão de ativos, é de implementar um sistema de tomada de decisão que baseado no contexto organizacional, nos objetivos e resultados esperados, definir inputs para a tomada de decisão. Ao aplicar o modelo ao caso de estudo é evidente que sendo o sistema de análise de fadiga, um caso bastante concreto no seu objetivo, este por si consegue referenciar apenas que existe algo que deve ser tido em conta aquando da tomada de decisão final de reparação, requalificação ou substituição da ponte. Sendo assim apenas considerado, um subprocesso de decisão, onde o modelo CIPO cumpre os objetivos.

A monitorização contínua, como evidenciado anteriormente, não se encontra desenvolvido no sistema de análise de fadiga, sendo que este é essencial para o processo de tomada de decisão. Embora algumas situações diretamente relacionadas com a implementação do modelo CIPO possam ser resolvidas através da análise pontual do funcionamento do mesmo, algumas situações permanecerão por resolver ou com um certo grau de incerteza tendo em conta a constante grande quantidade de dados que a transformação digital irá trazer, que fará com que a avaliação não seja feita dentro de prazos admissíveis. Algumas das situações identificadas serão mais importantes do que outras, havendo então uma necessidade de priorização de forma a não afetar a capacidade de tomada de decisão, e para que esta continue a ser a mais informada e acertada possível. Tanto a seleção e priorização das alternativas a serem tidas em conta como a capacidade de obter soluções para as mesmas dependerão cada vez mais de uma exploração honesta da incerteza e de um compromisso formal de aprendizagem ao longo do tempo. Isto significa cada vez mais que o regime de gestão pós implementação do modelo deverá ser acompanhado de uma abordagem adaptativa, onde se insere a monitorização contínua. As incertezas não se limitam a elementos científicos ou relacionados com o impacto da decisão, com o tempo as condições iram mudar e novas informações apareceram. Um bom processo implicará o desenvolvimento de ferramentas analíticas e a criação de processos de revisão que tanto reduzem a incerteza como respondem a novas informações ao longo do tempo. O último passo no processo de decisão é então identificar mecanismos de monitorização contínua para assegurar a responsabilização no que respeita aos resultados no terreno, investigação para melhorar a base de informação para futuras decisões, e um mecanismo de revisão para que novas informações possam ser incorporadas em futuras decisões. Um processo de decisão rigoroso quanto à sua sustentabilidade é um processo que criará um histórico de aprendizagem e adaptação, levando a uma maior capacidade em termos de informação técnica, recursos humanos e capacidade organizacional para tomar melhores decisões no futuro. Um desafio fundamental será tanto a redução das incertezas consideradas críticas como a criação de flexibilidade organizacional para responder a novas informações, sem que a gestão e o poder argumentativo sobre uma decisão se sobreponham.

Em relação à transformação digital como suporte à tomada de decisão em gestão de ativos, com o aparecimento das novas tecnologias, como o IoT e a ligação dos diferentes sensores aos modelos digitais, a diversidade e a sobrecarga de dados e informação irá ser um problema. As fontes de dados heterógenas entre as diferentes partes interessadas, os dados em domínios diferentes, os dados ao longo de todas as fases de um ciclo de vida de uma infraestrutura precisam de ser processados de forma diferentes para fins diferentes. Para além disso, como a quantidade de dados aumenta drasticamente ao longo do tempo, é importante assegurar a consistência, rastreabilidade e o armazenamento a longo prazo. A normalização da formatação dos dados para integração em BIM e IoT surge como um problema.

7. Conclusão

Devido a elevados níveis de deterioração, crescentes exigências de tráfego, ou conceção estrutural em desuso, uma parte considerável da infraestrutura existente em Portugal apresenta desafios importantes no que diz respeito à sua longevidade.

As técnicas de manutenção atuais são frequentemente incapazes de acompanhar as crescentes exigências provenientes do aumento do tráfego, das novas normas de segurança e do elevado nível de deterioração presentes nas infraestruturas. Como resultado, é fundamental melhorar os atuais processos de manutenção das infraestruturas, reforçando a avaliação estrutural e facilitando a passagem da manutenção reativa à manutenção preditiva, principalmente auxiliado pela transformação digital.

A implementação de um modelo tradicional de tomada de decisão proposto (CIPO) demonstrou que é possível otimizar estes processos se for integrado num ambiente de transformação digital, por exemplo no contexto da criação de um DT. O contexto será obtido através da criação dos modelos digitais e da ligação entre ativos de uma organização assim como a inserção de dados históricos e objetivos organizacionais. Os inputs serão provenientes de todas as tecnologias referidas para o efeito, tal como os UAV's, RFID's e os sensores, tanto fixos nas infraestruturas como acoplados aos veículos. Os processos serão inseridos no poder computacional inerente ao DT, e outputs serão as decisões suportadas pela IA conforme apropriado e assim como a melhoria na qualidade da informação transmitida aos gestores de ativos de forma a suportar todas as decisões.

A transformação digital em engenharia civil, vem trazer um impacto significativo na tomada de decisão em infraestruturas. A possibilidade de equipar os ativos com sensores, ligados a sistema IoT juntamente com as inspeções tradicionais, permite sintetizar os dados gerados automaticamente com os medidos, de forma a gerar um histórico de dados suficientes que possibilitem a avaliação com precisão do estado atual assim como a previsão da sua evolução. Os avanços tecnológicos combinados com o crescente interesse e consciencialização das organizações resultam num crescimento significativo da transformação digital como suporte à tomada de decisão em gestão de ativos.

Os requisitos de informação são essenciais à implementação de um sistema de tomada de decisão eficaz. Como demonstrado, existem variadíssimos dados e informações que têm de ser obtido e organizados para alimentar um processo de decisão com o objetivo de garantir que os resultados esperados por uma organização sejam cumpridos.

É de extrema relevância numa entidade gestora de ativos de infraestruturas como a Infraestruturas de Portugal a criação de uma estratégia de gestão de ativos no âmbito da transformação digital. Esta estratégia não pode ser suportada apenas pela aquisição de novas tecnologias, mas sim suportada por uma colaboração transversal a toda a organização orientada pelos objetivos definidos pela administração. Esta colaboração deverá ser constituída pelos variados departamentos, de forma a estabelecer todas os requisitos de informação como os recursos financeiros, humanos, de engenharia,

de operação e manutenção, de tecnologia etc. Isto assegurará que todos os departamentos dentro da organização compreendem os objetivos por detrás da estratégia de gestão de ativos no âmbito da transformação digital e que todos os problemas serão abordados. O órgão responsável pela criação da estratégia deverá tomar decisões e definir quais os dados e informações que deverão ser abrangidos e quais aqueles que não deverão ser incluídos. Isto porque há um custo acrescido à gestão de grandes quantidades de dados que se revelam não serem adequados ao cumprimento dos objetivos estabelecidos na estratégia. Para isto é fundamental que os dados recolhidos e explorados tenham uma finalidade e uma utilização definida.

A estratégia definida deverá referenciar normas que a organização utilizará para gestão dos seus ativos digitais. Estas deverão incluir normas de nomenclatura em documentos de engenharia, de entrega de projetos, etc. A estratégia também deverá ser um facilitador ao acesso remoto a dados e informações de forma organizada e prontamente disponível.

A estratégia de gestão de ativos no âmbito da transformação digital juntamente com as normas e sistema tecnológicos de apoio deverá incluir auditorias do estado atual dos dados em relação às normas e deverá determinar todos os dados e informações em falta ou suspeitos de não estarem corretos e completos de forma a determinar quais as tecnologias necessárias para colmatar as lacunas identificadas. Assim permitirá à organização a construção de um calendário realista conforme a exigência de recursos tanto financeiros como humanos.

A organização deverá ter em conta também o custo de recolha de dados em falta versus o valor que estes poderão trazer. Deverá haver uma compreensão do risco de não ter esses dados, pois pode ser preferível considerar os dados antigos e garantir que as normas estão de acordo com estes mesmos dados.

O caso de estudo analisado é um exemplo como pode ser preferível implementar a estratégia de gestão de ativos no âmbito da transformação digital por fases. Começar com um projeto piloto, com recolha de dados e definição de objetivos permite identificar melhores formas de recolha e análise de dados e mais importante, demonstrará o valor de ter dados e informações precisos e corretos.

Com dados e informações apropriados recolhidos, uma entidade gestora de ativos de infraestruturas pode aproveitar e utilizar em pleno ferramentas como a análise do custo de ciclo de vida, o planeamento de investimento de capital e inspeções baseadas no risco. Tendo toda a informação disponível, as organizações podem verdadeiramente avaliar planos de investimento de capital e justificar o adiamento de decisões de manutenção ou substituição. Isto proporciona um novo nível de transparência e confiança entre a organização, os clientes, os reguladores e as partes interessadas.

A transformação digital e a implementação de um DT são essenciais para chegar a este patamar de automatização de um processo decisório.

Bibliografia

- Adam Mussomeli, Aaron Parrott, Brian Umbenhauer, L. W. (2020). *Digital twins*. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/tech-trends/2020/digital-twin-applications-bridging-the-physical-and-digital.html>
- Ahmadi, M., Kaleybar, H. J., Brenna, M., Castelli-Dezza, F., & Carmeli, M. S. (2021). Adapting Digital Twin Technology in Electric Railway Power Systems. *2021 12th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference, PEDSTC 2021*. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC52094.2021.9405876>
- Akinosho, T. D., Oyedele, L. O., Bilal, M., Ajayi, A. O., Delgado, M. D., Akinade, O. O., & Ahmed, A. A. (2020). Deep learning in the construction industry: A review of present status and future innovations. *Journal of Building Engineering*, 32, 101827. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101827>
- Alaloul, W. S., Liew, M. S., Zawawi, N. A. W. A., & Mohammed, B. S. (2018). Industry Revolution IR 4.0: Future Opportunities and Challenges in Construction Industry. *MATEC Web of Conferences*, 203, 1–7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820302010>
- Asadi, K., Kalkunte Suresh, A., Ender, A., Gotad, S., Maniyar, S., Anand, S., Noghabaei, M., Han, K., Lobaton, E., & Wu, T. (2020). An integrated UGV-UAV system for construction site data collection. *Automation in Construction*, 112(June 2019), 103068. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103068>
- Automation in Construction-Preface. (2013). Special issue on the applications of augmented reality in architecture, engineering, and construction. *Automation in Construction*, 33(2013), 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.003>
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114(January), 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
- Bolton, R. N., McColl-Kennedy, J. R., Cheung, L., Gallan, A., Orsingher, C., Witell, L., & Zaki, M. (2018). Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms. In *Journal of Service Management* (Vol. 29, Issue 5). <https://doi.org/10.1108/JOSM-04-2018-0113>
- Bowers, K., Buscher, V., Dentten, R., Edwards, M., England, J., Enzer, M., Parlikad, A. K., & Schooling, J. (2018). *Smart Infrastructure: Getting more from strategic assets*. 12. <https://www-smartinfrastucture.eng.cam.ac.uk/files/the-smart-infrastructure-paper>
- Chong, H. Y., Wong, J. S., & Wang, X. (2014). An explanatory case study on cloud computing applications in the built environment. *Automation in Construction*, 44, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.04.010>

- Chow, J. K., Su, Z., Wu, J., Li, Z., Tan, P. S., Liu, K. fu, Mao, X., & Wang, Y. H. (2020). Artificial intelligence-empowered pipeline for image-based inspection of concrete structures. *Automation in Construction*, 120(November 2019), 103372. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103372>
- Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J. (2019). Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. *Automation in Construction*, 103(March), 251–267. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011>
- EFCA. (2019). *EFCA (2019) BIM and ISO 19650 from a project management perspective - Booklet on ISO Standard 19650. European Federation of Engineering Consultancy Associations. ISBN: 9789075085075.*
- European Commission. (2018). Mobility and Transport Transport in the European Union Current Trends and Issues BACKGROUND INFORMATION. *European Commission, April*, 144. <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2018-transport-in-the-eu-current-trends-and-issues.pdf>
- Grossinho, A., Patricio, H., Pinheiro, M. M., & Coutinho, R. (2018). *Princípios de gestão de ativos na sustentabilidade económica das soluções de investimento.* 1–10.
- Han, K. K., & Golparvar-Fard, M. (2017). Potential of big visual data and building information modeling for construction performance analytics: An exploratory study. *Automation in Construction*, 73, 184–198. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.11.004>
- IP. (2020). *Relatório e contas 2020.*
- Jaud, S., Esser, S., Muhic, S., & Borrmann, A. (2020). Development of IFC Schema for Infrastructure. *Structured Data Are New Gold.*
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Kurwi, S., Demian, P., & Hassan, T. M. (2017). Integrating BIM and GIS in railway projects: A critical review. *Association of Researchers in Construction Management, ARCOM - 33rd Annual Conference 2017, Proceeding*, 45–53.
- Lu, Q., Xie, X., Heaton, J., Parlikad, A. K., & Schooling, J. (2020). From BIM towards digital twin: Strategy and future development for smart asset management. *Studies in Computational Intelligence*, 853(January), 392–404. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1_30
- Macchi, M., Roda, I., Negri, E., & Fumagalli, L. (2018). Exploring the role of Digital Twin for Asset Lifecycle Management. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 790–795. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.415>

- Mantha, B. R. K., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2018). Robotic data collection and simulation for evaluation of building retrofit performance. *Automation in Construction*, 92(March), 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.026>
- McEwen, A., & Cassimally, H. (2013). The Internet of Things: An Overview. *Designing the Internet of Things*, October, 8.
- MSc. Thesis Kasper Tijs. (2020). *Digital Tunnel Twin -Enriching the Maintenance & Operation of Dutch Tunnels*.
- National Rail. (2014). *Asset Management Strategy October 2014*. October.
- Oecd. (2000). Asset Management for the Roads Sector (DSTI/DOT/RTR/IM1(2000)1. *Group*, 1, 111.
- Peeters, E. (2018). The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research Works with Digital Twin in Real Life. *Ercim News*, 115, 41.
- Pillai, N., Shih, J. Y., & Roberts, C. (2021). Evaluation of numerical simulation approaches for simulating train–track interactions and predicting rail damage in railway switches and crossings (S&cs). *Infrastructures*, 6(5). <https://doi.org/10.3390/infrastructures6050063>
- Porto, M. F., Falcão, P. C., Franco, J. R. Q., & Nunes, N. T. R. (2015). Automatic analysis of standards in rail projects. *WMSCI 2015 - 19th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Proceedings*, 2(4), 182–187.
- Ramatlo, D. A., Long, C. S., Loveday, P. W., & Wilke, D. N. (2020). A modelling framework for simulation of ultrasonic guided wave-based inspection of welded rail tracks. *Ultrasonics*, 108(September 2019), 106215. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106215>
- Roberts, C. (2020). *S-CODE : Switch and Crossing Optimal Design and Evaluation S-CODE partners • University of Birmingham lead • Total budget 5M €. 730849*.
- Sun, L., Shang, Z., Xia, Y., Bhowmick, S., & Nagarajaiah, S. (2020). Review of Bridge Structural Health Monitoring Aided by Big Data and Artificial Intelligence: From Condition Assessment to Damage Detection. *Journal of Structural Engineering*, 146(5), 04020073. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002535](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002535)
- Sun, Y., Fidge, C., & Ma, L. (2008). A generic split process model for asset management decision-making. *Proceedings of the 3rd World Congress on ...*, March. https://www.researchgate.net/profile/Lin_Ma11/publication/228436164_A_GENERIC_SPLIT_PROCESS_MODEL_FOR_ASSET_MANAGEMENT_DECISION-MAKING/links/0deec533497c636b7e000000.pdf
- Tang, S., Shelden, D. R., Eastman, C. M., Pishdad-Bozorgi, P., & Gao, X. (2019). A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and

- future trends. *Automation in Construction*, 101(January), 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020>
- Tavares, P., Costa, C. M., Rocha, L., Malaca, P., Costa, P., Moreira, A. P., Sousa, A., & Veiga, G. (2019). Collaborative Welding System using BIM for Robotic Reprogramming and Spatial Augmented Reality. *Automation in Construction*, 106(December 2018), 102825. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.04.020>
- The Institute of Asset Management. (2015). *Asset Management – an anatomy (v3)*. December, 1–84. www.theIAM.org/AMA
- Tuegel, E. J., Ingraffea, A. R., Eason, T. G., & Spottswood, S. M. (2011). Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/154798>
- Vatn, J. (2018). *Industry 4.0 and real-time synchronization of operation and maintenance*. 681–686.
- Volt, Rebekka; Stengel, Julian Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – literature review and future needs. *Automation in Construction*, 57(12), 557–560. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>.Abstract
- Wang, X., Love, P. E. D., Kim, M. J., Park, C. S., Sing, C. P., & Hou, L. (2013). A conceptual framework for integrating building information modeling with augmented reality. *Automation in Construction*, 34, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.012>
- Wang, X., Truijens, M., Hou, L., Wang, Y., & Zhou, Y. (2014). Integrating Augmented Reality with Building Information Modeling: Onsite construction process controlling for liquefied natural gas industry. *Automation in Construction*, 40, 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.12.003>
- Wenner, M., Westphal, M. M., Herbrand, M., & Ullerich, C. (2021). *The Concept of Digital Twin to Revolutionise Infrastructure Maintenance : the Pilot Project smartBRIDGE Hamburg*. October, 11–15.
- Wolfartsberger, J. (2019). Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review. *Automation in Construction*, 104(February), 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.018>
- Xiong, X., Adan, A., Akinci, B., & Huber, D. (2013). Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. *Automation in Construction*, 31, 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.006>
- Xu, L. Da, Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941–2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Xue, F., Chen, K., Lu, W., Niu, Y., & Huang, G. Q. (2018). Linking radio-frequency identification to Building Information Modeling: Status quo, development trajectory and guidelines for practitioners.

Automation in Construction, 93(April), 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.023>

Yuan, X., Anumba, C. J., & Parfitt, M. K. (2016). Cyber-physical systems for temporary structure monitoring. *Automation in Construction*, 66, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.02.005>

Zhang, Y., Liu, H., Kang, S. C., & Al-Hussein, M. (2020). Virtual reality applications for the built environment: Research trends and opportunities. *Automation in Construction*, 118(January), 103311. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103311>

Zhu, J., Wang, X., Chen, M., Wu, P., & Kim, M. J. (2019). Integration of BIM and GIS: IFC geometry transformation to shapefile using enhanced open-source approach. *Automation in Construction*, 106(May), 102859. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102859>

Anexos

Anexo I - Detalhes da pesquisa bibliográfica

Base de dados	Palavras-chaves	Refinamento	Título	Autor
Semantic Scholar	BIM; Railway Project	-	Integrating BIM and GIS in railway projects: A critical review.	Kurwi, S., Demian, P., & Hassan, T. M.
Semantic Scholar	digital physical twin, management	nº de citações	Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms.	Bolton, R. N.
Web of Science	BIM; Digital Twins	asset management; operations and maintenance	From BIM towards digital twin: Strategy and future development for smart asset management	Lu, Q
Web of Science	Asset management Digital twin; Lifecycle management	-	Exploring the role of Digital Twin for Asset Lifecycle Management	Macchi, M., Roda,
b-on	digital construction twin,		Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research	Boje
b-on	Industry 4.0	nº de citações	Industry 4.0: State of the art and future trends.	Xu, L. Da, Xu, E. L., & Li, L.
Web of Science	BIM; Building Information Modelling, Construction	nº de citações	Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – literature review and future needs	Volt, Rebekka; Stengel, Julian Schultmann, Frank
b-on	BIM; Building Information Modelling; IoT; Internet of things	nº de citações	A review of building information modeling (BIM) and the internet of things(IoT) devices integration: Present status and future trends	Shu Tang
Science Direct	Cyber Physical Systems	Automation in Construction	Cyber-physical systems for temporary structure monitoring	Xiao Yuan; Chimay J. Anumba; M. Kevin Parfitt
Science Direct	Building Information Modeling (BIM) ; Geographic information system	Automation in Construction	Integration of BIM and GIS: IFC geometry transformation to shapefile using enhanced open-source approach	Zhu, Junxiang
Science Direct	Artificial intelligence; construction	Automation in Construction	Artificial intelligence-empowered pipeline for image-based inspection of concrete structures	Chow, Jun Kan
Science Direct	Virtual Reality; construction	Automation in Construction	Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review	Josef Wolfartsberger
Science Direct	Virtual Reality; construction	Automation in Construction	Virtual reality applications for the built environment: Research trends and opportunities	Yuxuan Zhang
Science Direct	Augmented Reality, Building information modelling; Construction	Automation in Construction	A conceptual framework for integrating building information modeling with augmented reality	Wang, Xiangyu
Science Direct	Augmented Reality, Building information modelling; Construction	Automation in Construction	Integrating Augmented Reality with Building Information Modeling: Onsite construction process controlling for liquefied natural gas industry	Wang, Xiangyu
Science Direct	Augmented Reality, Building information modelling; Construction	Automation in Construction	Special issue on the applications of augmented reality in architecture, engineering, and construction	Automation in Construction-Preface
Science Direct	UAV, Construction	Automation in Construction	An integrated UGV-UAV system for construction site data collection	Khashayar Asadi
Science Direct	Robotics, BIM, Construction	Automation in Construction	Robotic data collection and simulation for evaluation of building retrofit performance	Mantha, Bharadwaj R.K.
Science Direct	Robotics, BIM, Construction	Automation in Construction	Collaborative Welding System using BIM for Robotic Reprogramming and Spatial Augmented Reality	Tavares, Pedro

Science Direct	laser scanner; building models	Automation in Construction	Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data	Xiong, Xuehan
Science Direct	Radio frequency identification; building information modelling	Automation in Construction	Linking radio-frequency identification to Building Information Modeling: Status quo, development trajectory and guidelines for practitioners	Xue, Fan
Science Direct	additive manufacturing construction	Automation in Construction	Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0	Craveiro, Flávio
Science Direct	deep learning, construction	nº de citações	Deep learning in the construction industry: A review of present status and future innovations	Akinosho, Taofeek D.
Science Direct	Big data analytics	Automation in Construction	Potential of big visual data and building information modeling for construction performance analytics: An exploratory study	Han, Kevin K.; Golparvar-Fard, Mani
Science Direct	Cloud Computing	Automation in Construction	An explanatory case study on cloud computing applications in the built environment	Chong, Heap Yih

Tabela anexo 1 - Principais resultados da pesquisa bibliográfica de artigos científicos

Base de dados	Palavras-chaves	Refinamento	Título	Autor
Google Scholar	Asset Management	-	Asset Management Strategy	National Rail
Google Scholar	Asset Management; roads	-	Asset Management for the Roads Sector	Oecd

Tabela anexo 2 - Principais resultados da pesquisa bibliográfica de normas e guias técnicos