



**Contributos da metodologia Building Information Modelling na gestão de pontes ferroviárias metálicas**

Miguel Araújo

UMinho | 2022



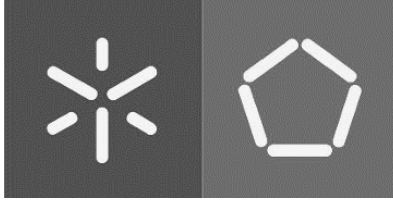
**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Miguel Freitas de Araújo

**Contributos da metodologia Building Information Modelling na gestão de pontes ferroviárias metálicas. Um caso de estudo**

fevereiro de 2022





**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Miguel Freitas de Araújo

**Contributos da metodologia Building  
Information Modelling de pontes  
ferroviárias metálicas. Um caso de  
estudo**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do  
**Professor Doutor José Campos e Matos**  
e do  
**Doutor Mário Rui Freitas Coelho**

## **Direitos de autor e condições de utilização do trabalho por terceiros**

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### ***Licença concedida aos utilizadores deste trabalho***



#### **Atribuição**

**CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Professor Doutor José Campos e Matos, por todo o apoio, orientação, conhecimento partilhado, e pela constante disponibilidade ao longo deste trabalho.

Ao meu coorientador, Doutor Mário Rui Freitas Coelho, pela sua disponibilidade, apoio, conselhos e pela colaboração no solucionar de dúvidas.

À minha família, pelos seus conselhos, suporte e afeto constante ao longo do meu percurso académico.

A todo o corpo docente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho por todo o acompanhamento e conhecimento partilhado ao longo destes cinco anos académicos.

E, por fim, a todos os meus colegas, em especial à Maria Eduarda e ao Miguel Santos por todos os momentos passados em conjunto no meu percurso académico.

## **Declaração de integridade**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

# **Contributos da metodologia Building Information Modelling na gestão de pontes ferroviárias metálicas. Um caso de estudo**

## **Resumo**

O conteúdo discutido nesta dissertação visa analisar o impacto do uso do Building Information Modelling (BIM) no contexto de gestão de pontes ferroviárias metálicas. Assim, importa perceber o processo de gestão de ativos, por um lado, e a metodologia BIM, por outro. Só depois é possível combinar estas duas temáticas no contexto da gestão de pontes ferroviárias metálicas.

Foi primeiro feita uma abordagem da temática da gestão de ativos, com um foco no caso das pontes ferroviárias em Portugal. Abordaram-se as metodologias utilizadas nos processos de inspeção, gestão de informação e planeamento a curto, médio e longo prazo. Foi também enquadrada a ligação destes processos de gestão com a metodologia BIM.

Em seguida, foi realizada uma análise da metodologia BIM, definindo os benefícios da sua aplicação para o setor da construção civil, com ênfase na utilização do BIM, bem como das ferramentas e softwares inerentes para pontes ferroviárias metálicas. Abordam-se os métodos utilizados para a modelação BIM de pontes existentes, com recurso a novas técnicas de inspeção, e como estes podem ser explorados no processo de gestão das pontes.

É finalizada a dissertação com a aplicação dos conceitos abordados anteriormente na criação de um modelo BIM de uma ponte ferroviária metálica com a informação disponível.

Palavras-chave: Building Information Modelling (BIM); Ferrovia; Gestão de ativos; Pontes Metálicas.

# **Contributions of the Building Information Modelling methodology in the management of metallic railway bridges. A case study**

## **Abstract**

The content discussed in this dissertation aims to analyze the impact of using Building Information Modeling (BIM) in the context of metallic railway bridges management. Thus, it is important to understand the asset management process, on the one hand, and the BIM methodology, on the other. Only then is it possible to combine these two themes in the context of the management of metallic railway bridges.

An approach to the topic of asset management was first made, with a focus on the case of railway bridges in Portugal. The methodologies used in inspection processes, information management and short, medium and long-term planning were discussed. The connection of these management processes with the BIM methodology was also framed.

Then, an analysis of the BIM methodology was carried out, defining the benefits of its application for the civil construction sector, with an emphasis on the use of BIM, as well as the tools and software inherent to metallic railway bridges. The methods used for the BIM modeling of existing bridges, using new inspection techniques, are discussed, as well as how these can be explored in the bridge management process.

The dissertation is concluded with the application of the concepts discussed above in the creation of a BIM model of a metallic railway bridge with the available information.

Keywords: Building Information Modeling (BIM); Metallic Bridges; Railroad; Asset Management.



## Índice

Direitos de autor e condições de utilização do trabalho por terceiros.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Declaração de integridade .....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas .....	xiii
Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos .....	xiv
1. Introdução.....	1
2. Gestão de ativos em infraestruturas de transporte .....	3
2.1. Plano de gestão de ativos.....	5
2.2. Sistema de Gestão de Pontes.....	7
2.2.1. Inspeções .....	10
2.2.2. Estado de conservação.....	13
2.2.3. Gestão de ponte com recurso ao GOA .....	14
2.2.4. Estratégias de Gestão.....	16
2.2.5. Obras de Arte Especiais.....	16
2.2.6. Medidas.....	17
2.3. Gestão de pontes em contexto BrIM .....	18
3. Conceitos de Building e Bridge Information Modeling.....	21
3.1. Conceito de BIM .....	21
3.1.1. Vantagens.....	21
3.1.2. Desvantagens.....	23
3.1.3. Níveis de BIM.....	24

3.1.4.	Dimensões do BIM .....	24
3.1.5.	LOIN .....	25
3.1.6.	Ferramentas .....	27
3.1.7.	Exemplo de aplicação do BIM em projetos de ferrovia .....	30
3.2.	BIM em projetos de pontes .....	31
3.2.1.	OpenBrim .....	32
3.2.2.	LandXML .....	34
3.2.3.	IFC .....	34
3.2.3.1.	Técnicas de modelação .....	35
3.2.3.2.	Informação não geométrica .....	36
3.2.3.3.	Model Views .....	38
3.2.4.	Soluções proprietárias .....	40
3.3.	Detalhes específicos das pontes metálicas.....	41
3.4.	Detalhes específicos da ferrovia.....	43
4.	Metodologia de gestão de pontes ferroviárias metálicas com modelos BIM.....	45
4.1.	Utilização da informação cadastral existente .....	45
4.1.1.	Laser scanning.....	46
4.1.2.	VANTS .....	47
4.1.3.	Modelação e parâmetros .....	49
4.1.4.	Modelação de defeitos.....	50
4.1.5.	IFC com inclusão de defeitos.....	53
4.2.	Utilização do modelo BIM para gerir a ponte.....	55
4.3.	Análise estrutural .....	59
5.	Caso de estudo.....	61
5.1.	Modelação da estrutura metálica.....	62
5.2.	Modelação da via-férrea .....	64

5.3.	Modelação de defeitos .....	68
5.4.	Modelação paramétrica.....	71
5.5.	Plugins .....	72
5.6.	Modelo temporal.....	74
5.7.	Classificação IFC.....	76
5.8.	Análise estrutural .....	79
5.9.	Softwares alternativos .....	80
5.9.1.	Modelação da estrutura metálica .....	81
5.9.2.	Modelação da ferrovia .....	83
5.9.3.	IFC .....	84
5.9.4.	Modelação de defeitos.....	85
5.9.5.	Apreciação do software para gestão de pontes.....	85
6.	Conclusões.....	88
6.1.	Conclusões gerais .....	88
6.2.	Futuros Desenvolvimentos.....	89
7.	Referências Bibliográficas .....	91

## Índice de Figuras

Figura 1 - Evolução dos custos de manutenção para diferentes planos de investimentos (Adaptado de Grossinho et al., 2018).....	6
Figura 2 - Resumo do Processo de Gestão (Adaptado de IP, 2019).....	7
Figura 3 - Aplicativo GOA - Vista Geral (Retirado de Mendonça et al., 2013) .....	9
Figura 4 - Aplicativo GOA – Georreferenciação (Retirado de Mendonça et al., 2013) .....	10
Figura 5 - Aplicativo GOA - Inspeções de Rotina (Retirado de Mendonça et al., 2013).....	11
Figura 6 - Aplicativo GOA - Registo Fotográfico (Retirado de Mendonça et al., 2013).....	12
Figura 7 - Aplicativo GOA – Consulta (Retirado de Mendonça et al., 2013).....	15
Figura 8 - Modelos de cada especialidade (retirado de Azhar et al., 2007) .....	22
Figura 9 - Exemplo de dimensões do BIM 7D (retirado de Ramos, 2020).....	25
Figura 10 – Distribuição de responsabilidades num projeto BIM (retirado de UK BIM Alliance, 2020).	27
Figura 11 - Exemplo de visualização avançada de um modelo BIM .....	28
Figura 12 - Exemplo análise estrutural .....	29
Figura 13 - Exemplo de modelação de estrutura complexa com o Dynamo (Retirado de OS, 2021) ....	30
Figura 14 - Esquema de relação do IFC Rail (BuildingSMART, 2019) .....	40
Figura 15 - Exemplos de ligações (Retirado de tekla.com).....	42
Figura 16 - Exemplo de uma asna (Retirado de Yang et al., 2020) .....	42
Figura 17 - Introdução das travessas.....	44
Figura 18 - Exemplo de modelação da ferrovia (Neves et al., 2019) .....	44
Figura 19 - Comparação entre nuvem de pontos (a) e modelo as-designed (b) (Retirado de Isailović et al., 2020).....	45
Figura 20 - Nuvem de pontos de uma rodovia (Retirado de Justo et al., 2021).....	46
Figura 21 – Proposta de automatismo de um sistema de inspeção de pontes (Retirado de Perry et al., 2020).....	48
Figura 22 - Exemplo de modelação de ponte (Retirado de Wan et al., 2019) .....	49
Figura 23 - "Cubos de dano" (Retirado de Perry et al., 2020) .....	51
Figura 24 - Visualização de "cubos de dano" (Retirado de Sacks et al., 2018) .....	52
Figura 25 - Exemplo de utilização de surface feature (Retirado de Isailović et al., 2020) .....	53
Figura 26 – Esquema de hierarquia IFC (Retirado de Sacks et al., 2018) .....	54
Figura 27 - Exemplo de cronograma em Navisworks (Retirado de Kaewunruen et al., 2020) .....	56

Figura 28 - Exemplo de tarefas modeladas no Synchro Pro: (a) Remoção do solo; (b) Instalação do balastro (Retirado de Matejov & Šestáková, 2021).....	57
Figura 29 - Exemplo de cálculo do impacto ambiental de uma ponte em Revit (Kaewunruen et al., 2020) .....	58
Figura 30 - Módulos do BMS (Pregolato, 2019) .....	59
Figura 31 - Exemplo análise estrutural .....	59
Figura 32- Ponte da linha de cascais (fonte Google Maps) .....	61
Figura 33 - Modelo Revit desenvolvido.....	62
Figura 34 - Estrutura metálica.....	63
Figura 35 – Exemplo de ligação (fonte Google Maps) .....	63
Figura 36 - Edição da ligação .....	64
Figura 37 - Modelação do perfil dos carris: a) Geometria dos carris; b) Perfil em Revit .....	65
Figura 38 – Travessas; (a) imagem real (fonte Google Maps); (b) modelo BIM .....	66
Figura 39 - Travessas em “Metric Baluster” .....	66
Figura 40 - Edição dos carris .....	67
Figura 41 - Edição das travessas.....	67
Figura 42 - Catenária.....	68
Figura 43 - Exemplo de anomalia na ponte (fonte Google Maps) .....	68
Figura 44 - Parâmetros do cubo de dano .....	69
Figura 45 - Visualização do cubo de dano; (a) usando esquema de cores por tipo de dano; (b) usando a imagem real do dano na superfície do cubo .....	70
Figura 46 - Visualização no projeto: (a) usando esquema de cores por tipo de dano; (b) usando a imagem real do dano na superfície do cubo .....	71
Figura 47- Parametrização de um perfil metálico.....	72
Figura 48 - Folha de cálculo (parâmetros do projeto) .....	73
Figura 49 - Seleção de parâmetros no plugin SheetLink.....	73
Figura 50 - Ferramenta de definição de fases.....	75
Figura 51 - Fases de criação e demolição dos elementos .....	75
Figura 52 - Criação de parâmetros IFC.....	76
Figura 53 - Inserir parâmetro em famílias.....	77
Figura 54 - Plugin NBS .....	78
Figura 55 - Parâmetros dos cubos de dano (a) e caminhos de ferro (b) .....	79

Figura 56 - Modelo de elementos finitos .....	80
Figura 57 - Eixo de referência; a) planta; b) perfil .....	81
Figura 58 - Perfil transversal das vigas longitudinais inferiores .....	82
Figura 59 – Modelação das vigas longitudinais.....	82
Figura 60 – Modelação das vigas intermédias.....	83
Figura 61 – Modelação das travessas e carris.....	84
Figura 62 - Classificação IFC.....	85
Figura 63 – Propriedades de um elemento tipo Deck .....	86

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Matriz Probabilidade x Impacto (Baseado de IP, 2017a) .....	5
Tabela 2 - Escalões de nível de risco .....	5
Tabela 3 - Estados de Conservação adotados na avaliação de pontes (IP, 2017b).....	14
Tabela 4 - Exemplo de mapa de quantidades .....	28
Tabela 5 - Tipos de propriedades para Obj em OpenBrim (Adaptado de Chipman et al., 2016) .....	33
Tabela 6 - Tipos de informação em LandXML (Adaptado de Chipman et al., 2016) .....	34
Tabela 7 - Tipos de informação em "IfcElement" (Chipman et al., 2016) .....	37
Tabela 8- Proposta de parâmetros para "cubos de dano" (Adaptado Perry et al., 2020) .....	51
Tabela 9 - Propriedades possíveis de atribuir a um defeito de fendilhação (Excerto de Sacks et al., 2018) .....	55

## **Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos**

2D – Bidimensional

3D – Tridimensional

BIM – Building Information Modeling

BMS – Bridge Management Systems

BrIM – Bridge Information Modeling

CAD – Computer-Aided Design

CDE – Common Data Environment

COBie – Construction Operations Building Information Exchange

GIS – Geographic Information System

IFC – Industry Foundation Classes

IP – Infraestruturas de Portugal

LOD – Level of Development

LOIN – Level of Information Need

MR&R – Manutenção, Reparação e Reabilitação

PCNBS – Precast Concrete National BIM Standard

PGA – Plano de Gestão de Ativos

SGOA – Sistema de Gestão de Obras de Arte

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado



## **1. Introdução**

O acompanhamento de obras de arte ao longo do seu ciclo de vida é essencial para garantir o seu correto funcionamento e segurança da estrutura. É essencial a realização de inspeções periódicas por forma a programar ações de manutenção atempadas.

Os tempos recentes têm dado visibilidade a uma digitalização no setor da construção civil. Cada vez mais projetos, em particular projetos de pontes, utilizam modelos BIM como base para a sua conceção e posterior gestão devido às vantagens que o BIM apresenta nestas tarefas. Com isto, é necessário que a gestão de pontes passe a utilizar modelos BIM para guardar os dados já existentes nas bases de dados atuais e outras informações que são possíveis de visualizar nestes modelos.

Dada a escassez de estudos específicos sobre a implementação do BIM em pontes ferroviárias metálicas, esta dissertação tem como objetivo estudar como o BIM pode ser utilizado para a gestão de uma ponte deste tipo, tendo em conta a informação disponível sobre a implementação do BIM em outras estruturas semelhantes. Por um lado, é necessário perceber os requisitos específicos para uma implementação BIM deste género. Por outro lado, é necessário perceber como a informação cadastral e os registos de inspeções e intervenções podem ser introduzidos no modelo resultante.

Para consolidar os conceitos discutidos, aplicaram-se as metodologias estudadas na modelação de uma ponte ferroviária metálica e introdução de informação adicional no modelo, com a exploração de automação deste processo.

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, dos quais, o primeiro corresponde á presente Introdução, na qual é realizado o enquadramento do tema acompanhado dos diferentes aspetos a desenvolver ao longo do documento.

No segundo capítulo, realiza-se uma apresentação dos métodos atualmente utilizados na gestão de pontes, com um foco em inspeções, métodos e ferramentas utilizados para armazenar a informação obtida e como esta informação é utilizada para uma boa gestão da ponte. São apresentadas algumas situações em que a utilização do Bridge Information Modelling (BrIM) é uma vantagem relativamente aos métodos atuais.

No terceiro capítulo, aprofunda-se o tema do BIM, apresentando vantagens e desvantagens da sua utilização na construção civil, analisando a sua aplicação a pontes. São comparados quatro dos

esquemas de dados utilizados na gestão de pontes e apresentados alguns detalhes específicos de pontes metálicas e pontes ferroviárias.

No quarto capítulo, são abordadas as formas de introdução da informação cadastral num modelo BIM e como este pode ser utilizado para a gestão da ponte. Primeiramente são analisados os métodos como os veículos aéreos não tripulados (VANT) e o laser scanning podem ser utilizados para obter a informação geométrica de uma ponte e os métodos de introdução desta informação e da proveniente de inspeções num modelo. A isto segue-se uma apresentação de diferentes métodos em que o modelo digital é utilizado para gerir uma ponte.

No quinto capítulo, é apresentada a aplicação prática dos conceitos desenvolvidos ao longo desta dissertação, através da modelação de uma ponte ferroviária metálica pertencente á linha de Cascais proporcionando uma discussão sobre os métodos existentes para introduzir a informação cadastral num modelo BIM e a possível automatização de alguns destes métodos de introdução. É feita uma análise comparativa das capacidades dos softwares Revit e Allplan Bridge para a modelação da mesma ponte.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões resultantes do trabalho realizado, assim como aspetos do tema que podem ser aprofundados por forma a dar continuidade no futuro ao trabalho iniciado nesta dissertação.

## **2. Gestão de ativos em infraestruturas de transporte**

As infraestruturas de transporte são conjuntos de elementos vitais em termos socioeconómicos para qualquer comunidade, permitindo a movimentação da população e bens. A eficaz gestão e manutenção é imperativa para o sucesso destas infraestruturas a longo prazo, no que se segue será dado maior enfoque ao caso de Portugal para ilustrar os principais aspetos relacionados com a gestão de ativos em infraestruturas de transporte.

Em Portugal, a gestão da rede de infraestruturas de transporte está a cargo da Infraestruturas de Portugal (IP), com a função de gerir este ativo promovendo a verificação das condições das várias componentes das infraestruturas, É ainda responsável pelas intervenções necessárias por forma a garantir a sua segurança e comodidade tendo sempre em consideração o impacto socioeconómico a curto, médio e longo prazo das possíveis intervenções a realizar.

A IP gere em separado as redes rodoviária e ferroviária e utiliza sistemas de gestão específicos para cada tipo de ativo, como por exemplo, sistema de gestão de obras de arte, sistema de gestão de pavimentos, entre outros. Esta dissertação foca-se em particular na ferrovia.

Para uma correta gestão, as infraestruturas são divididas em diferentes sistemas que se especializam numa dada área para relatar quaisquer problemas relacionados com a mesma, com informação não apenas sobre qualquer tipo de patologias que se venham a desenvolver com o passar do tempo, mas também mudanças no comportamento dos materiais. A compilação das informações relacionadas com todas as áreas e a atribuição da devida importância de cada uma é o que permite uma alocação de recursos mais eficiente. Esta alocação é um dos principais objetivos de uma boa gestão das infraestruturas, permitindo priorizar o investimento em ativos mais importantes, ou que necessitem com maior celeridade de reparações, para garantir um bom funcionamento da rede de infraestruturas.

A infraestrutura ferroviária é dividida em 4 tipos de ativos:

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

Portugal conta com cerca de 2.600 km de linha férrea, embora esta seja muito pouco explorada. No entanto, apresenta um dos piores desempenhos na Europa, em termos de segurança, mas também de utilização e qualidade do serviço, segundo o ranking estabelecido pela Boston Consulting Group em 2017 (Duranton et al., 2018).

A IP utiliza um valor entre 0 e 8 para poder classificar o estado de funcionamento de cada ativo presente na rede de infraestrutura ferroviária, estes são separados em 4 graus qualitativos. Esta classificação permite uma gestão mais adequada face às condições de funcionamento em que cada ativo se encontra e aos recursos disponíveis.

Para todos os ativos é preparada uma previsão da sua degradação ao longo do seu ciclo de vida. Isto possibilita a programação de reparações perante as necessidades previstas pelos modelos implementados fazendo assim uma estimativa dos custos associados com a exploração de cada ativo. Estes modelos são adaptados consoante exista nova informação sobre as condições do ativo no decorrer da sua utilização. Isto inclui desde mudanças no fluxo de tráfego ao aparecimento de patologias que podem afetar a sua vida útil remanescente na visão a curto prazo (Grossinho et al., 2018).

Além do mais, pode ser realizada uma análise dos possíveis riscos associados a anomalias existentes, que tem especial interesse em infraestruturas que se encontrem num estado mais deteriorado, que relaciona a probabilidade de ocorrência de um dado risco com as suas consequências. Geralmente tratam-se de danos materiais, humanos ou por vezes ambientais, originando assim um valor quantitativo do nível de risco. A Tabela 1 ilustra a matriz de risco resultante.

Segundo Grossinho et al., (2018), os riscos, mediante a classificação estabelecida anteriormente, são agrupados em escalões, cada um com uma resposta apropriada. Na Tabela 2 é possível ver os referidos escalões, bem como a frequência de monitorização em cada escalão, onde é possível verificar que os riscos mais elevados requerem as respostas mais céleres.

Nível de Risco		Probabilidade				
		1 Muito Baixo	2 Baixo	3 Médio	4 Alto	5 Muito Alto
Impacto	5 Muito Alto	5	10	15	20	25
	4 Alto	4	8	12	16	20
	3 Médio	3	6	9	12	15
	2 Baixo	2	4	6	8	10
	1 Muito Baixo	1	2	3	4	5

Tabela 1 - Matriz Probabilidade x Impacto (Baseado de IP, 2017a)

Nível de risco	Ação	Frequência de monitorização
<b>1-4</b>	Aceitar	Anual
<b>5-9</b>	Aceitar; Mitigar	Anual
<b>10-16</b>	Restrições à exploração; Intervenção no curto prazo	Semestral
<b>17-25</b>	Restrições severas à exploração; Intervenções no curto prazo e urgentes	Trimestral

Tabela 2 - Escalões de nível de risco

## 2.1. Plano de gestão de ativos

O Plano de gestão de ativos, ou PGA, é um plano atualizado anualmente em que constam todas as intervenções a serem realizadas a curto prazo, bem como o impacto que estas intervenções irão causar a longo prazo bem como os custos associados. Através de vários critérios que relacionam custos, riscos e o desempenho de diversas soluções, ou seja, com auxílio dos estudos realizados aos ativos e a classificação destes, é possível prever o impacto destas soluções ao longo do tempo. A análise gráfica dos custos de manutenção, nível de risco, estado de condição e passivo de renovação, nos primeiros 5 anos para diferentes hipóteses de investimento é o que permite a escolha mais apropriada.

A *Figura 1* exemplifica o impacto em termos de custos durante os primeiros cinco anos de três cenários de investimento distintos. É possível verificar que o cenário de manutenção base apresenta uma redução nos custos. No entanto, é imprescindível analisar do impacto de outros fatores (e.g. estado de condição, nível de risco) para verificar qual o cenário mais vantajoso no cômputo geral.

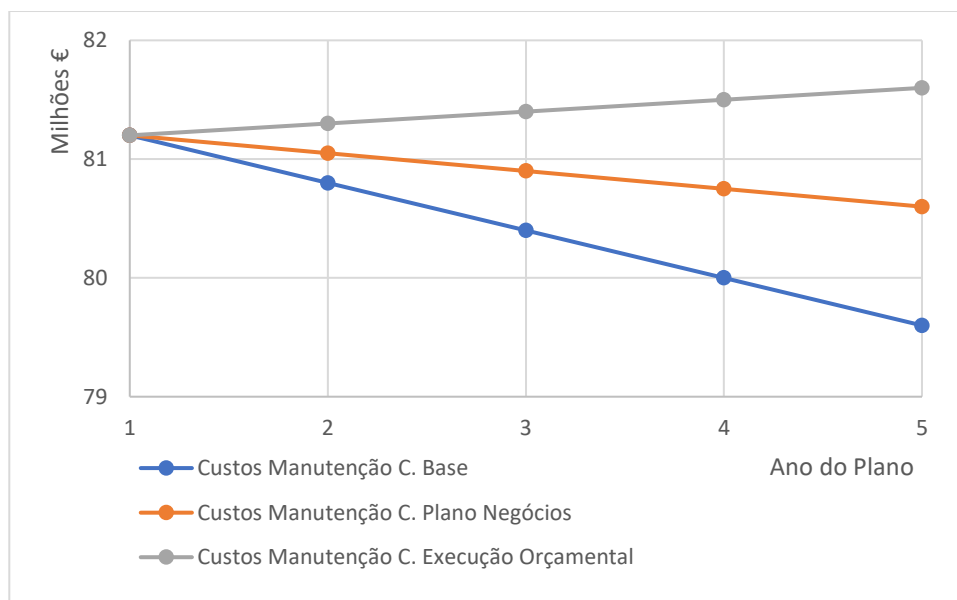


Figura 1 - Evolução dos custos de manutenção para diferentes planos de investimentos (Adaptado de Grossinho et al., 2018)

No longo prazo, é estudado principalmente a evolução do passivo de renovação para cada cenário visto que os restantes fatores se comportam relativamente a este indicador. Ou seja, o nível de risco aumenta com o aumento do passivo de renovação e o estado de condição segue a tendência oposta, permitindo assim ter uma visão do ativo a longo prazo.

De uma forma geral, é dada prioridade a intervenções em ativos mais importantes para a rede, ou que acarretem maior nível de risco associado à infraestrutura tendo em conta sempre o impacto económico de tal intervenção. A análise a curto, médio e longo prazo é importante para perceber o tipo de intervenção a realizar pois, eventualmente, torna-se economicamente mais vantajoso a renovação de um ativo ao invés da sua manutenção uma vez que esta acarreta custos mais elevados consoante o seu período de vida e o seu estado de utilização. A *Figura 2* esquematiza o processo de gestão.

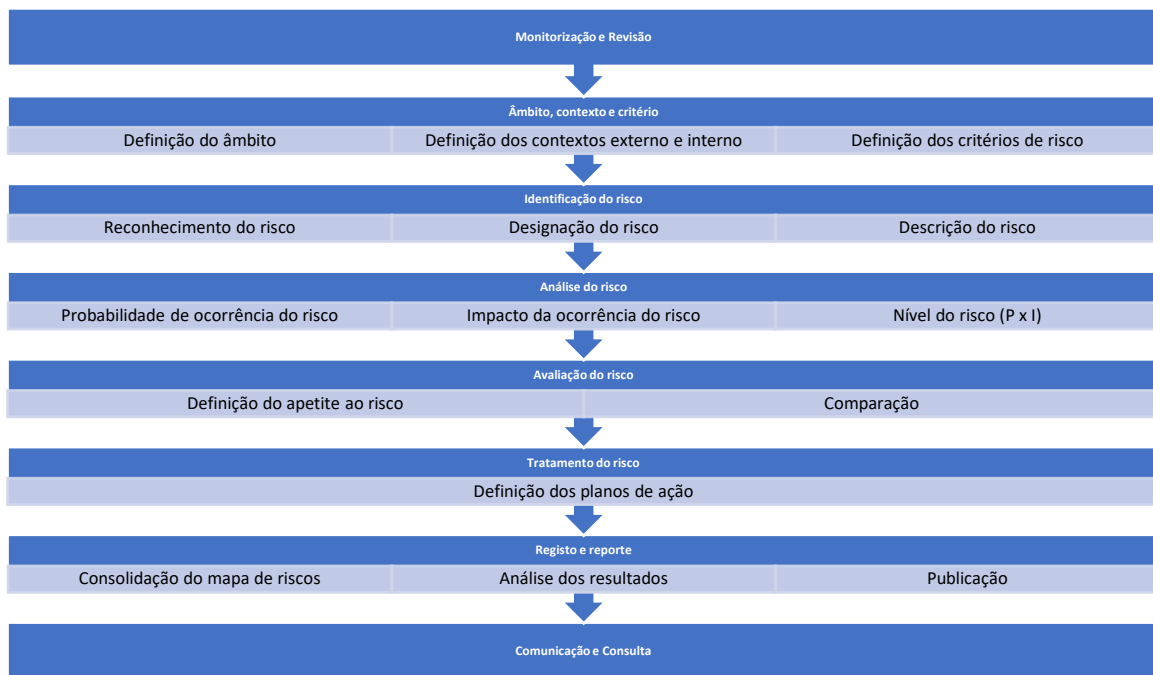


Figura 2 - Resumo do Processo de Gestão (Adaptado de IP, 2019)

Os diferentes ativos presentes na rede são geridos por sistema de gestão independentes. Cada sistema está otimizado para os ativos que abrange promovendo os objetivos da empresa tanto em termos de desempenho, como segurança e custos.

Segundo Pregnotato (2019), os sistemas de gestão de ativos podem ainda ser divididos em 4 módulos:

- Módulo de inventário
- Módulo de inspeções
- Módulo de manutenção, reparação e reabilitação (MR&R)
- Módulo de otimização

Segundo o mesmo, o módulo de inventário foca-se no registo da informação sobre o património existente, o módulo de inspeção é focado em reunir informação necessária á avaliação do estado de condição, o módulo de MR&R é responsável pelas diversas intervenções a realizar no ativo e o módulo de otimização é responsável pela previsão de custos associados com os restantes módulos.

## 2.2. Sistema de Gestão de Pontes

O Sistema de Gestão de Obras de Arte (SGOA) é o sistema utilizado pela IP para a gestão de diversas obras de arte desde tuneis e pontes até passagens hidráulicas, entre outras, com função de

manter atualizada a informação relativa ao estado de funcionamento e condição das obras de arte, como também promover as intervenções mais eficientes em termos de custo, risco e desempenho. Nas secções seguintes serão detalhados alguns dos aspetos mais relevantes do SGOA da perspetiva relevante para a presente dissertação, ou seja, na ótica da gestão de pontes.

O sistema tem 4 objetivos principais: identificar anomalias presentes numa ponte, predefinição dos trabalhos de manutenção e reparação necessários, estabelecer medidas complementares e a priorização das pontes mais degradadas.

De acordo com Mendonça et al. (2013), o sistema é dividido nos seguintes módulos:

- Tabelas Auxiliares
- Gestão de Permissões
- Módulo de Inventário
- Módulo de Inspeções Principais
- Módulo de Inspeções de Rotina
- Módulo de Inspeções Subaquáticas
- Módulo de Batimetria
- Módulo de Histórico
- Módulo de Consultas
- Módulo de Registo de Transportes Especiais
- Módulo de Relatórios

Estes módulos podem ser utilizados, ignorados no caso de não serem necessários (exemplo: o módulo de batimetria não será relevante se a ponte não atravessa um curso de água) ou adaptados para melhor se ajustarem á ponte em estudo a fim de tornar mais fácil e eficiente a sua gestão.

A primeira fase para uma boa gestão de uma ponte é a de conceção do inventário, ou seja, o levantamento e organização das propriedades da ponte que são relevantes para os trabalhos de manutenção. Esta surge como um pilar fulcral para as etapas seguintes no processo de gestão pois reúne muita da informação que estas necessitam. O sistema de gestão apenas será eficiente se deste inventário constar toda a informação completa, correta e acessível às partes intervenientes.



Segundo Monteiro et al., (2019), a base de dados criada para aglomerar as propriedades da ponte deve conter as seguintes informações:

- i. Todos os dados administrativos relativos à ponte;
- ii. Informação técnica descrevendo a estrutura e o seu comportamento estrutural;
- iii. Descrição detalhada dos materiais e quantidades afetas, chamados Dados de Constituição, estruturados em elementos discretos chamados Componentes.

A aplicação GOA é um exemplo de uma plataforma informática (*Figura 3*) onde toda esta informação pode ser devidamente armazenada e organizada facilitando a sua consulta e partilha. Aqui deve ser alocada toda a informação escrita e descritiva incluindo desenhos de projeto, mapas da sua georreferenciação (*Figura 4*), fotogrametria e detalhes técnicos.

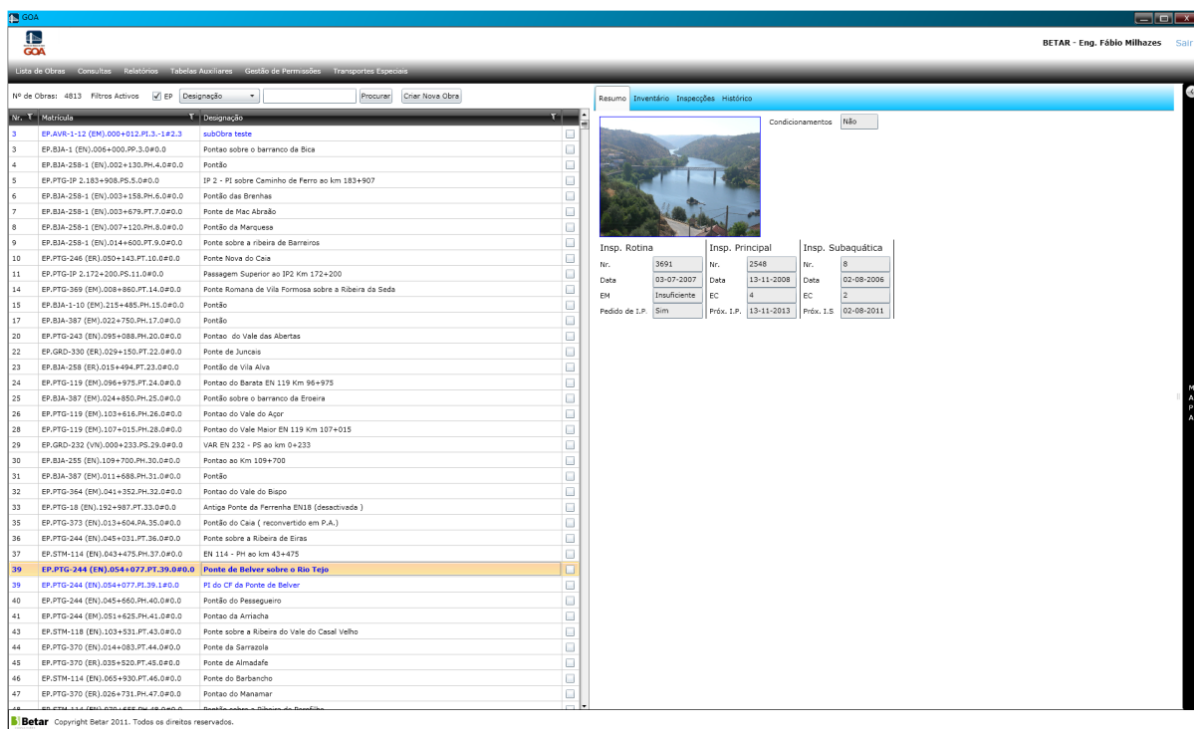


Figura 3 - Aplicativo GOA - Vista Geral (Retirado de Mendonça et al., 2013)

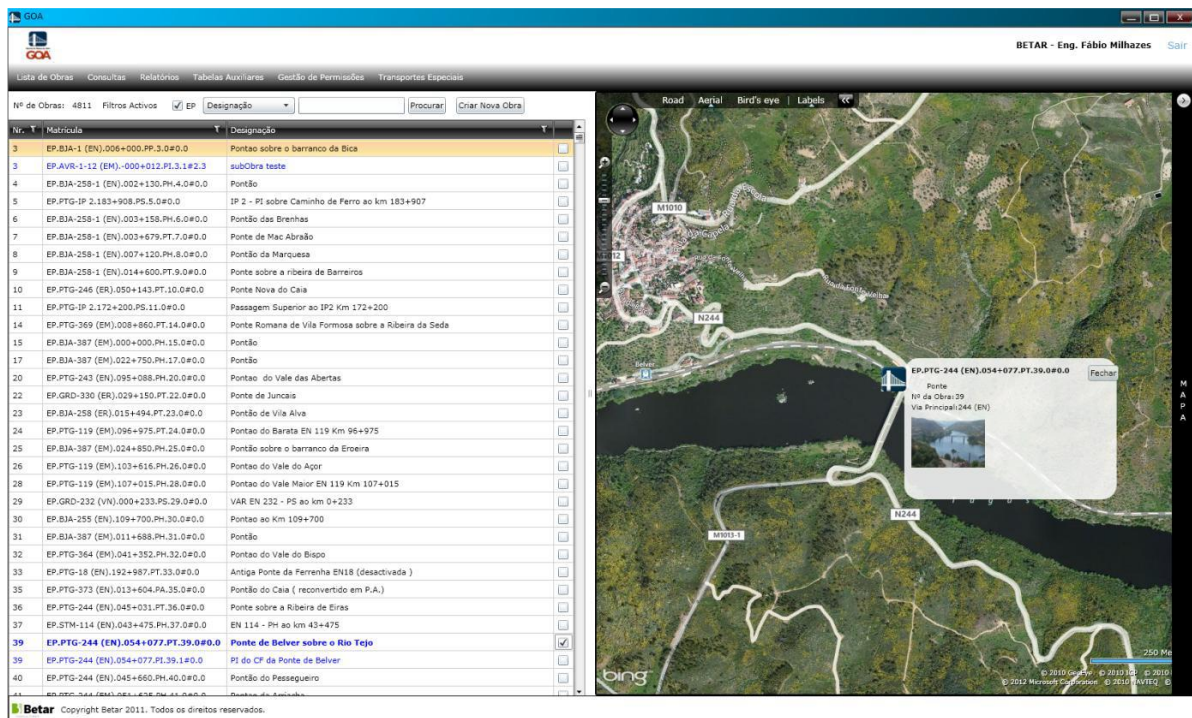


Figura 4 - Aplicativo GOA – Georreferenciação (Retirado de Mendonça et al., 2013)

### 2.2.1. Inspeções

A obtenção da informação supramencionada é realizada com recurso ao projeto inicial da ponte, bem como às telas finais quando disponíveis. Adicionalmente, com as diversas inspeções realizadas, a informação existente vai sendo progressivamente atualizada. As inspeções são categorizadas pelo GOA em 4 tipos:

- i. Rotina;
- ii. Principal;
- iii. Subaquática;
- iv. Vistoria.

#### ***Inspeção de rotina***

Uma inspeção de rotina consiste na determinação do estado de manutenção para ser possível estabelecer os trabalhos de manutenção necessários para garantir as condições de segurança e serviço para essa ponte. Este tipo de inspeções tem uma periodicidade de cerca de 1 ano. Estes trabalhos são

apenas de limpeza ou de reparação de pequenos elementos com caráter periódico que permitem manter o bom funcionamento dos componentes da ponte e desacelerar o processo de degradação dos materiais.

O GOA permite, como se observa na *Figura 5*, escolher os trabalhos a realizar. Este tem um Caderno de Encargos associado o que permite automaticamente ter uma visão dos custos unitários associados a todas as componentes dos trabalhos.

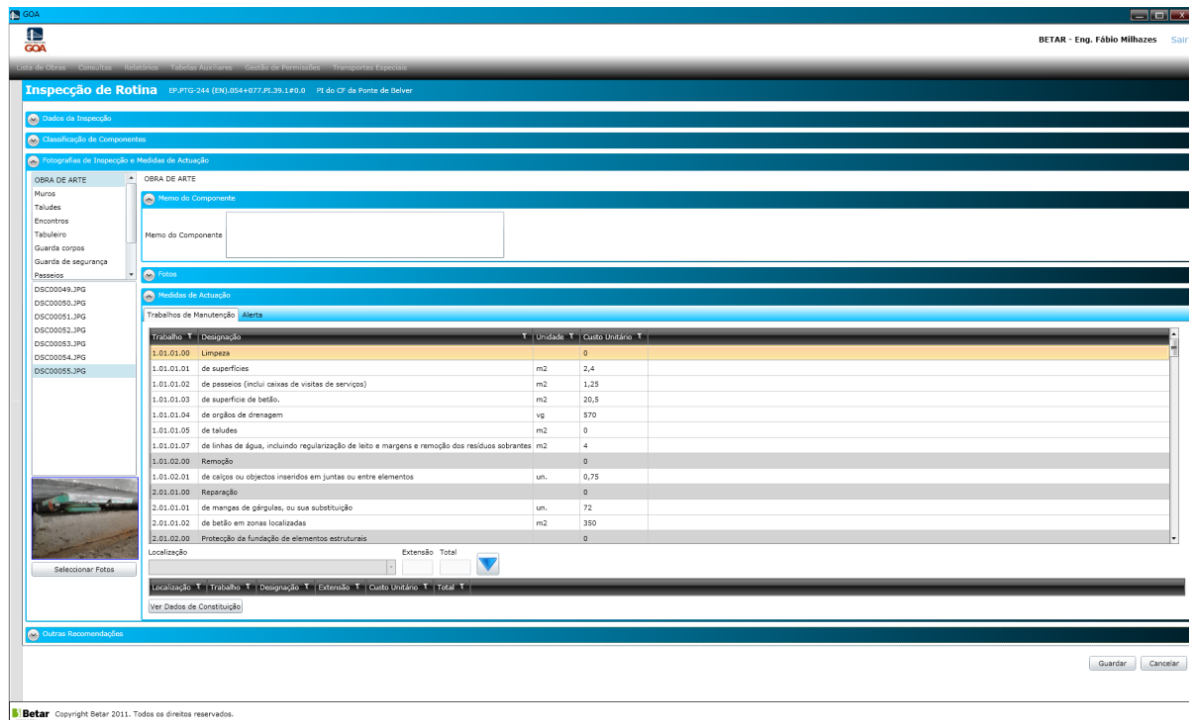


Figura 5 - Aplicativo GOA - Inspeções de Rotina (Retirado de Mendonça et al., 2013)

### ***Inspeções principais***

As inspeções principais são semelhantes às inspeções de rotina, no entanto, estas são focadas na análise das condições de funcionamento global da ponte, procurando descrever as anomalias que apresentem maior risco para o desempenho e segurança da estrutura, sendo estas realizadas de 6 em 6 anos.

No aplicativo, os trabalhos de reparação seguem o mesmo conceito que os trabalhos de rotina, diferenciando-se no facto de os primeiros poderem estar associados a um ano de reparação ótima, ou seja, serem programados para serem realizados antes do fim da vida útil da componente alvo de intervenção, maximizando a utilização desse mesmo componente. É ainda possível requerer um acompanhamento das anomalias detetadas durante as inspeções de rotina ou qualquer tipo de ensaio

que permita perceber melhor o comportamento e os efeitos que esta anomalia possa ter para a ponte (Figura 6).

Em inspeções principais, é fundamental o levantamento fotográfico de todas as imperfeições que ponham em risco a segurança e o desempenho de uma estrutura. O GOA permite o alojamento de todo o registo fotográfico e ainda a fácil referenciação deste nos relatórios quer de rotina quer principal.

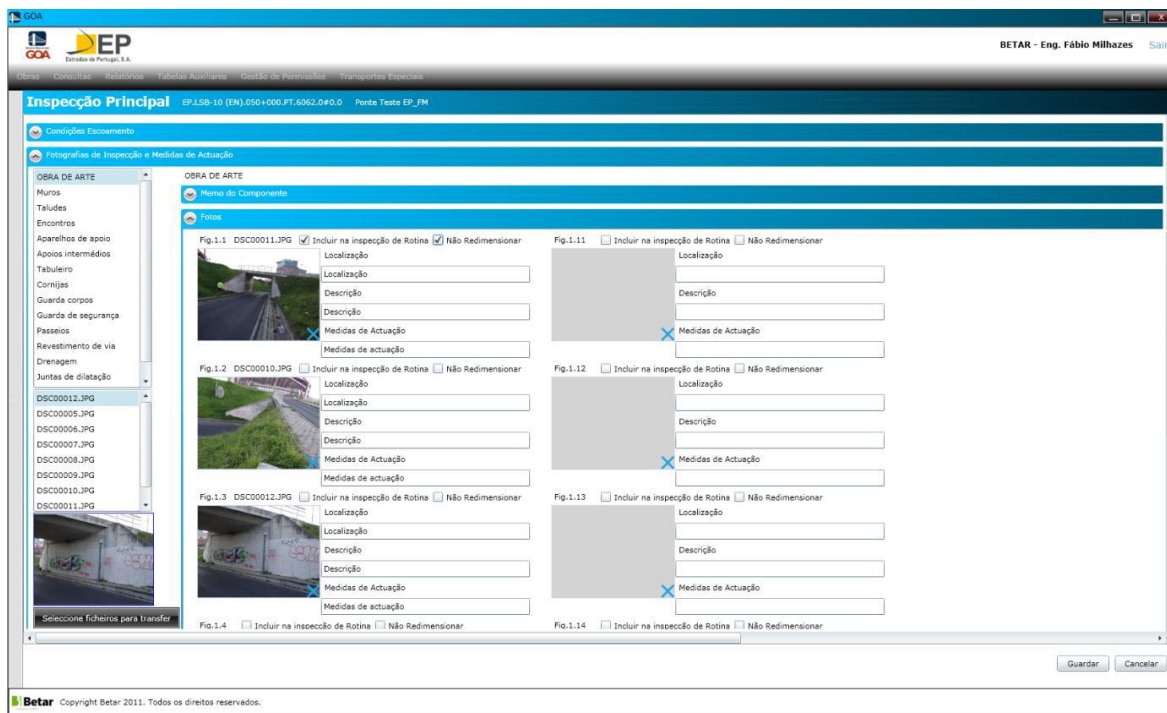


Figura 6 - Aplicativo GOA - Registo Fotográfico (Retirado de Mendonça et al., 2013)

### ***Inspeções subaquáticas***

As inspeções subaquáticas são inspeções realizadas a elementos submersos com recurso a equipamentos específicos para o efeito como sondas ou com pessoal qualificado para tal, como mergulhadores, sempre com supervisão de engenheiros especializados em construção subaquática.

Este tipo de inspeção é uma vertente das inspeções principais, que acarreta todas as exigências das mesmas, sendo que os responsáveis pela inspeção devem ter em consideração a maior dificuldade deste tipo de inspeção, mas também se deve ter em atenção que qualquer tipo de patologia pode ter efeitos mais graves por se encontrar em zona submersa.

### ***Inspeções de vistoria***

Este tipo de inspeções não apresenta qualquer regularidade, pelo que se efetuam sempre que seja necessário a inspeção de uma ponte por um motivo extraordinário, como, por exemplo, um acidente, a ocorrência de um sismo, entre outros, verificando assim as condições de funcionamento e segurança da estrutura.

É um processo semelhante a uma inspeção principal, e utiliza a informação da inspeção principal mais recente para efetuar comparações entre o estado de conservação da obra de arte, ou o estado das patologias ou anomalias detetadas nessa inspeção com o seu estado atual. Isto permite a tomada de medidas excecionais para garantir o cumprimento dos objetivos tanto de segurança como desempenho desejados para a ponte.

#### **2.2.2. Estado de conservação**

O indicador do estado de conservação correspondente a cada componente constituinte de uma ponte requer a interpretação da anomalia e da sua evolução ao longo do tempo em conjunto com a avaliação do seu impacto em termos de gravidade e propagação. É importante perceber o impacto do componente ou componentes afetados e o seu estado de conservação para perceber o estado da obra de arte como um todo (IP, 2017b).

Este indicador transpõem a gravidade das anomalias detetadas nas inspeções avaliando o estado de funcionamento, utilização, deterioração e segurança, servindo como indicador principal para a prioridade de intervenção dada á Ponte. A *Tabela 3* apresenta a definição de cada nível do estado de conservação.

<b>Índice</b>	<b>Estado de Conservação</b>	<b>Definição</b>	<b>Seguimento</b>
<b>NI</b>	<b>Não Inspeccionado</b>	Não inspecionado por dificuldade de acesso ou por se encontrar oculto.	Propor ou promover medidas de atuação para resolução do impedimento que motivou a impossibilidade de observação.
<b>0</b>	<b>Excelente</b>	Estado exemplar de conservação. Admitem-se anomalias insignificantes.	Não é necessário efetuar qualquer trabalho de reparação.
<b>1</b>	<b>Bom</b>	Estado normal de conservação. Existência de anomalias que ainda não afetam o comportamento, mas comprometem a durabilidade.	É dispensável efetuar qualquer trabalho de reparação.
<b>2</b>	<b>Regular</b>	Estado de conservação satisfatório. Existência de anomalias com alguma importância na durabilidade e/ou na funcionalidade, mas com impacto insignificante no seu comportamento.	São definidos trabalhos de reparação não prioritários, para realização a longo prazo (recomendável 6 a 10 anos). Podem ser recomendadas ações complementares de diagnóstico ou monitorização, para aferição da evolução no médio e longo prazo das anomalias detetadas.
<b>3</b>	<b>Irregular</b>	Estado de conservação deficitário. Existência de anomalias que reduzem significativamente a durabilidade e/ou condicionam o comportamento, ou cuja rápida evolução possa vir a afetar a segurança.	São definidos trabalhos de reparação para realização no médio prazo (recomendável 2 a 6 anos). Se for expectável rápida evolução que comprometa o comportamento e a capacidade resistente da ponte, deve ser especificada a realização de avaliação técnica. Caso não seja expectável evolução significativa da sua condição ou capacidade de serviço, a intervenção poderá ser reavaliada na próxima inspeção principal. A opção quanto à data de intervenção ou de reavaliação na próxima inspeção deverá ser expressamente indicada e devidamente justificada. Podem ser recomendadas ações complementares de diagnóstico ou monitorização, para aferição da evolução no curto e médio prazo das anomalias detetadas.
<b>4</b>	<b>Deficiente</b>	Estado de conservação muito grave. Existência de anomalias que afetam de forma gravosa o comportamento, a capacidade resistente e a segurança estrutural, com importância na integridade. Não cumpre os requisitos mínimos para desempenhar a função para a qual foi concebido.	Deve ser especificado o início de intervenção a curto prazo (recomendável até 2 anos). Deve ser especificada a necessidade de um Projeto reforço/reabilitação. Pode ser restringida a sua exploração através de condicionamentos à circulação, ou desencadeadas outras intervenções de carácter preventivo tais como escoramentos ou reforços temporários. Devem ser recomendadas ações complementares de diagnóstico ou monitorização, para aferição da evolução no curto prazo das anomalias detetadas.
<b>5</b>	<b>Mau</b>	Estado de ruína ou de falha iminente. Existência de anomalias que colocam em causa a integridade e segurança estrutural. A sua capacidade resistente está severamente afetada.	Deve ser especificado o início de intervenção com urgência ou a muito curto prazo (recomendável até 1 ano). Deve ser especificada a necessidade de um Projeto reforço/reabilitação. Devem ser implementadas medidas restritivas da circulação, em termos de carga, velocidade ou modo de circulação ou outras intervenções de carácter preventivo que mitiguem o risco de exploração, tais como escoramentos ou reforços temporários. No caso limite, a circulação pode ser interdita.

Tabela 3 - Estados de Conservação adotados na avaliação de pontes (IP, 2017b)

### **2.2.3. Gestão de ponte com recurso ao GOA**

O aplicativo GOA permite obter um caderno de encargos com todas as tarefas e custos relacionados com as intervenções pretendidas. Além do mais, com a fácil consulta tanto das propriedades da obra de arte em estudo, mas também do seu historial, ou seja, todas as alterações que sofreu ao longo do seu ciclo de vida, tanto por efeitos de degradação, evolução de patologias e efeitos ou

alterações causadas por intervenções realizadas anteriormente (Figura 7), permite estimar os seus efeitos tanto a curto e medio prazo como a longo prazo.

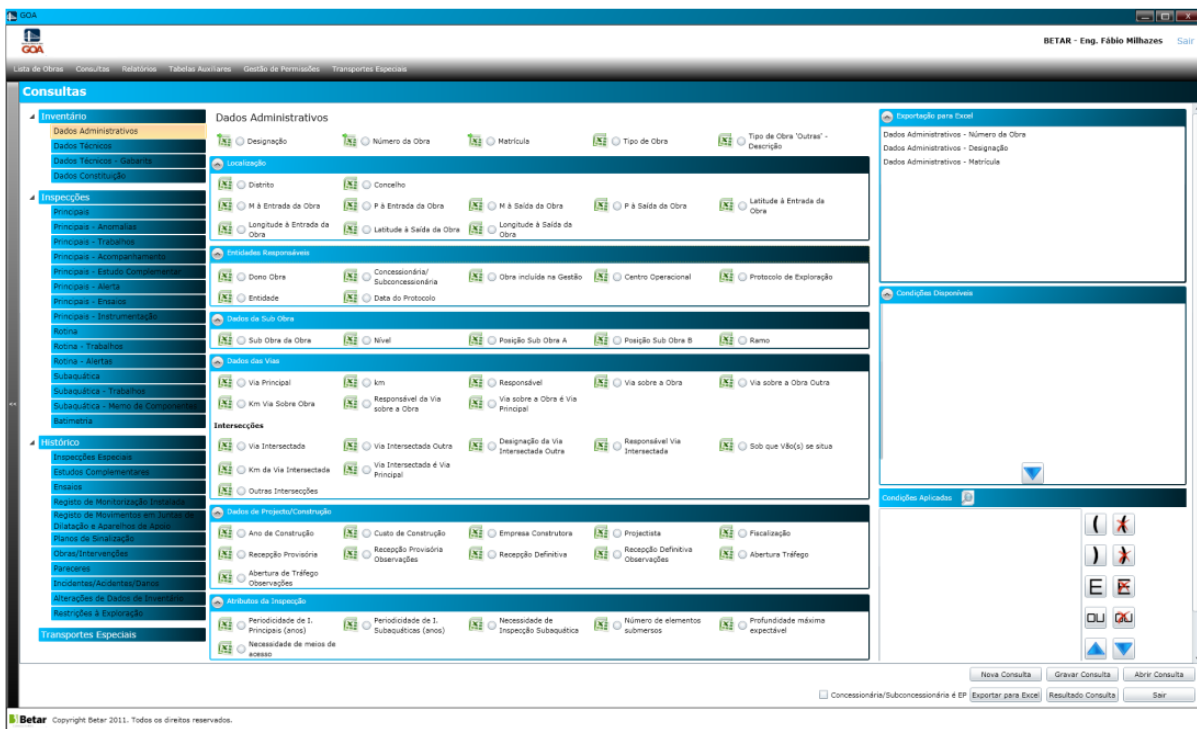


Figura 7 - Aplicativo GOA – Consulta (Retirado de Mendonça et al., 2013)

Isto é fundamental para uma boa gestão pois permite a alocação dos recursos económicos e materiais da forma mais eficiente, garantindo os níveis de desempenho e segurança desejados, minimizando os custos.

Devido á utilização extensiva deste aplicativo pela IP, este tornou-se uma base para a geração do plano interno de controlo de qualidade da IP. O estabelecimento de limites de incidência de Estado de Conservação elevados das Obras de Arte, ou seja, o estado limite de degradação aceitável definido pela IP, ajuda a priorizar obras que já ultrapassaram este limite, sendo possível ainda estabelecer prazos limites para as intervenções nesses ativos devido ao seu estado.

Com as prioridades estabelecidas é possível a criação do Plano Interno de Controlo de Qualidade da IP, do qual constam todos os objetivos para cada ativo, as intervenções necessárias para atingir esses objetivos e o resultado final esperado, ou seja, o estado de comportamento que o ativo deve apresentar para garantir a sua segurança.

A utilização do GOA e de Planos de Controlo de Qualidade tem sido desenvolvida e aperfeiçoada desde a presença das entidades que antecedem a IP e é bastante utilizada por outras entidades e concessionárias, podendo assim desenvolver-se cada vez mais e tornar-se numa ferramenta cada vez mais eficaz na gestão de ativos.

#### **2.2.4. Estratégias de Gestão**

Na gestão dos diversos ativos da rede, são utilizados alguns princípios base que garantem um melhor investimento dos recursos existentes. Ativos comuns, por apresentarem menor complexidade estrutural, não necessitam de inspeções exaustivas e podem apresentar intervalos maiores entre inspeções. (Monteiro et al., 2019)

Toda a atividade planeada é analisada em duas fases distintas. Uma primeira fase focada no planeamento estratégico a médio prazo, onde são analisadas as diversas propostas de intervenções originárias das inspeções e das anomalias detetadas. A finalidade é organizar e elaborar o plano com as intervenções a realizar, sempre com o objetivo de minimizar custos ao garantir o desempenho e segurança dos ativos, tendo em conta o orçamento disponível. O orçamento é um dos grandes limitadores para as intervenções pois pode ou não limitar o número de intervenções possíveis, sendo por vezes impossível a manutenção necessária de algumas obras de arte.

A segunda fase visa uma gestão operacional, focada no planeamento tático, com um plano operacional como resultado final. Este contém informação detalhada sobre ações de manutenção, inspeções e até mesmo elementos de uma obra de arte a serem acompanhados ao longo do ciclo de vida do ativo. Estas ações são fundamentais para manter a informação da obra de arte o mais atualizada possível que é fulcral para a gestão da mesma.

#### **2.2.5. Obras de Arte Especiais**

Ao contrário das Obras de Arte Correntes, que envolvem os processos anteriormente referidos, as Obras de Arte Especiais são ativos de bastante importância patrimonial, grande valor monetário e, por vezes, design notável e único. Estes requerem um acompanhamento mais peculiar devido ao seu valor. Apresentam pelo menos uma das seguintes características (IP, 2017b):

- i. têm sistema de monitorização estrutural instalado;



- ii. estão equipadas com dispositivos especiais;
- iii. têm solução estrutural não corrente.

Estas Obras de Arte são analisadas individualmente e utilizam uma Especificação Técnica Complementar com informação detalhada sobre os seus requisitos de manutenção, monitorização e inspeção.

### **2.2.6. Medidas**

Segundo o manual de gestão de obras da IP (2017b), as medidas possíveis de tomar face às anomalias encontradas durante uma inspeção podem ser das seguintes géneses:

- i. Trabalhos
- ii. Situação de alerta
- iii. Meios de inspeção complementares
- iv. Pedido de avaliação técnico-económica
- v. Realização de Ensaios
- vi. Monitorização

Os trabalhos podem dividir-se pela sua periodicidade e o seu âmbito em: Manutenção Corrente, Reparação Corrente, Reabilitação e Reforço/Substituição.

As situações de alerta dividem-se em: Alerta de Segurança de Circulação, Alerta de Segurança Estrutural, Alerta de Proteção Anticorrosiva e Alerta de Proteção de Fundações. Estas situações ocorrem quando se verificam anomalias que colocam em perigo a segurança de uma estrutura e obrigam a uma intervenção imediata no caso de perigos estruturais ou a curto prazo para os casos de necessidade de proteção, tendo um carácter urgente.

Sempre que algum elemento fundamental para o comportamento de uma obra de arte não possa ser devidamente inspecionado, deve-se solicitar uma inspeção complementar dedicada ao elemento em causa e tornar possível estabelecer o Estado de Conservação da Obra de Arte.

No decorrer de uma inspeção, devido a incertezas quanto á natureza ou impacto de certas anomalias, podem requerer-se estudos mais aprofundados.

As situações onde se pode realizara um estudo técnico-económico são (IP, 2017b):

- i. Alteração da capacidade resistente da estrutura;
- ii. Alteração de sobrecargas;
- iii. Impossibilidade de estimar a área ou o tipo de reparação pretendido.

Quando se verificam incertezas quanto á evolução de uma patologia e o seu possível impacto na estrutura, é necessário recorrer a ensaios para estudar os possíveis fenómenos.

Por fim, para qualquer anomalia encontrada podem ser definidas medidas de monitorização para estudar os seus efeitos ao longo do tempo. As medidas de monitorização dividem-se em três grupos (IP, 2017b):

- i. Monitorização de Evolução de Anomalias que avalia as mudanças de uma anomalia ao longo do tempo comparando com o espectável segundo a inspeção realizada;
- ii. Nivelamentos de Precisão que foca na monitorização de deslocamentos e deformações da Obra de Arte detetando qualquer deslocamento mais elevado que o previsto;
- iii. Monitorização Estrutural Especial que é dedicado a Estruturas Especiais e é individualizado para melhor se adaptar á Obra de Arte em questão.

### **2.3. Gestão de pontes em contexto BrIM**

O *Building Information Modeling* (BIM) é uma metodologia cada vez mais utilizada na gestão de infraestruturas, e em particular de Obras de Arte. Esta já é bastante utilizada na conceção de estruturas devido às várias vantagens da sua utilização desde os projetos iniciais, passando pela fase de construção e terminando com a fase de exploração da infraestrutura construída. No caso de uma ponte, é costume designar-se esta metodologia de *Bridge Information Modeling* (BrIM) de modo a diferenciar do cenário em que o BIM é utilizado no contexto dos edificios correntes.

Esta metodologia é bastante apelativa para a gestão de pontes devido á possibilidade da representação tridimensional da estrutura e também da sua envolvente, podendo alocar toda a informação visual atualizada. Permite guardar toda a informação imprescindível á gestão num único ficheiro facilitando a partilha e o acesso.

Um fator importante na gestão de pontes é a garantia de que a informação existente se encontra o mais atualizada possível. O BrIM, graças á sua interoperabilidade com muitas das novas tecnologias existentes utilizadas nas inspeções, permite uma fácil introdução de imagens de quaisquer anomalias

encontradas nas inspeções diretamente no modelo, incluindo, diretamente ou através de hiperligação, acesso aos relatórios de inspeção. As informações mais importantes para o processo de gestão devem ser introduzidas diretamente no modelo para que possam ser processadas por ferramentas BrIM. Já os detalhes menos relevantes ou com estruturas de dados mais pesadas (e.g. bases de dados) podem ser acedidos através de ficheiros auxiliares ligados ao modelo principal.

Como o processo de gestão e manutenção é um trabalho coletivo, envolvendo diversas entidades, o BrIM tem de possibilitar a consulta e atualização, preferencialmente em tempo real, de toda a informação inerente a uma ponte. Tendo em consideração a possibilidade de integração do BrIM com vários sistemas e softwares, é possível ver a utilidade de haver um modelo como centro de congregação de informação relativa a uma ponte. Esta inclui desde informação de projeto, passando por informação obtida em inspeções, até informação obtida em tempo real através de sensores colocados na ponte.

Existem hoje em dia várias plataformas desenvolvidas para a gestão de pontes com recurso a BrIM focadas em centralizar a informação de projeto, monitorização e planeamento. Este tipo de plataforma serve de CDE (*Common Data Environment*) onde é utilizada uma *cloud* como base para alojar um modelo BrIM e toda a informação adjacente a este (e.g. documentação, imagens, gráficos). Utilizam aplicações próprias que permitem aceder ao modelo através da internet, o que ajuda a manter a informação mais atualizada sempre disponível.

Ao longo do ciclo de vida das pontes é cada vez mais frequente o uso de dispositivos móveis, como por exemplo smartphones, com capacidade de processamento inferior aos tradicionais computadores. Neste contexto, têm sido desenvolvidas ferramentas que permitem o acesso ao CDE a partir desses dispositivos. A utilização de uma interface como o Web-BIM é um exemplo de uma alternativa que permite o acesso ao modelo BrIM a partir de qualquer dispositivo (incluindo dispositivos móveis) pois dispensa a existência de software pesado e/ou instalação de aplicações dedicadas (Wan et al., 2019).

O Web-BIM utiliza as capacidades de processamento de uma plataforma *cloud* para guardar e processar qualquer informação que seja introduzida no modelo, podendo incluir análises estruturais, avaliações de segurança, entre outras. Este pode facilmente ser exportado em formato OBJ, que pode ser visualizado como um objeto 3D em qualquer tipo de *browser*, sem limitações quanto á capacidades de processamento desse dispositivo. Estes modelos normalmente são simplificados para evitar demasiado detalhe, mas mantendo a informação importante. (Wan et al., 2019)

A maioria dos sistemas de BrIM ainda utiliza um servidor como base de dados em que cada colaborador se conecta ao servidor para partilhar a sua informação. Apesar de ser um sistema eficiente em termos de organização e de distribuição de tarefas, ainda é limitado a pequenos grupos por obrigar a uma conexão direta ao servidor. Contrariamente, ferramentas como o Web-BIM permitem o seu acesso em qualquer local através da internet.

Tendo como referência modelos BrIM 3D que podem ser acedidos pela internet e podem ser divididos em várias componentes, todos os trabalhos de manutenção e inspeção tornam-se mais fáceis e intuitivos de preparar e realizar. Esta preparação pode ser realizada diretamente neste tipo de ferramentas organizando mapas de trabalhos e mapas de quantidades necessárias.

No capítulo seguinte, são detalhadas as principais características do BrIM de modo a melhor se perceber a sua utilização na gestão de pontes.

### **3. Conceitos de Building e Bridge Information Modeling**

Na secção que segue detalham-se alguns dos conceitos mais relevantes associados à metodologia BIM. Nota-se que, na grande maioria dos aspetos, o que se apresenta sobre o BIM é igualmente válido para o caso BrIM em pontes. Com efeito, o BrIM pode ser visto como uma especialização do BIM, pelo que é natural que tal aconteça. No entanto, a disponibilidade de informação na literatura sobre BrIM é substancialmente menor.

Na segunda secção deste capítulo, abordam-se então alguns dos aspetos mais específicos do BrIM de modo a que, em conjunto com a primeira secção, seja possível perceber esta metodologia que será mais tarde aplicada na gestão de uma ponte ferroviária metálica.

#### **3.1. Conceito de BIM**

BIM, do inglês *Building Information Modeling* é uma metodologia que se baseia em criar um modelo multidimensional no qual é possível introduzir e visualizar informação relativa a um edifício ou estrutura. A visualização 3D é um fator apelativo para a análise da informação e o facto de se poder associar aos objetos 3D outras informações relevantes não geométricas permite a criação de um modelo muito mais rico em informação.

Por não se limitarem á informação geométrica dos edifícios, os modelos tornam-se multidimensionais, dependendo da informação que se pretende introduzir no modelo. A informação presente num modelo BIM pode dividir-se entre informação geométrica ou visual, que se designa por objeto e informação não geométrica, ou seja, propriedades, que se designam por parâmetros. A associação destas propriedades com o seu objeto correspondente é a principal evolução em relação aos métodos tradicionais. Controlos temporais, gestão de custos, organização da exploração são exemplos de parâmetros que se podem associar aos objetos ou famílias de objetos que constituem um modelo.

##### **3.1.1. Vantagens**

Ao contrário do tradicional CAD 2D que apenas permite a visualização do projeto em vistas seletivas, o BrIM permite uma visão orbital do projeto o que torna a sua visualização muito mais simples e perceptível graças á sua representação evoluir de elementos gráficos, como retas, para objetos

tridimensionais, como paralelepípedos, aos quais se pode associar a sua função para o projeto (e.g. pilares, paredes, lajes).

Graças á possibilidade de visualização 3D do BrIM, este torna-se muito importante durante a conceção de uma estrutura, sendo que quaisquer alterações que realizem se tornam bastante simples de refletir no projeto. Um projeto em CAD 2D iria requerer modificar todos os desenhos para refletir as alterações enquanto um projeto em BIM atualiza as vistas 2D escolhidas no projeto automaticamente.

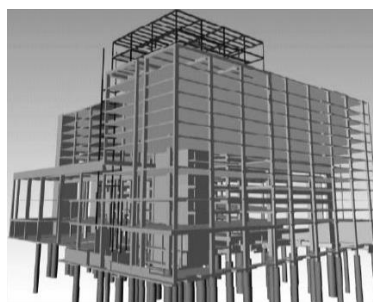
O CAD 3D é visto como uma melhoria do CAD 2D por apresentar as mesmas vantagens em termos de visualização do BrIM, no entanto continua a ser baseado em elementos gráficos, transmitindo apenas informação geométrica. A visualização 3D destes modelos torna-se bastante útil para diferentes entidades envolvidas. Por exemplo, no caso dos bombeiros, esta visualização facilitará análises de segurança dos edifícios, acesso e evacuação dos espaços. Por outro lado, como a modelação é baseada em objetos, é ainda possível a exportação destes elementos individuais para serem utilizados na pré-fabricação exata dos mesmos.

O modelo final pode ser dividido pelas várias especialidades vinculadas em modelos específicos. Torna-se assim imprescindível o uso de ferramentas para interligar a informação dos diferentes modelos num único para verificar a compatibilidade entre todos através de deteção de colisões possibilitando a visualização e resolução antecipada de incompatibilidades e colisões entre as várias especialidades. Este tipo de abordagem permite reduzir os riscos e imprevistos a decorrer da construção e ciclo de vida de uma estrutura (Vignali et al., 2021).

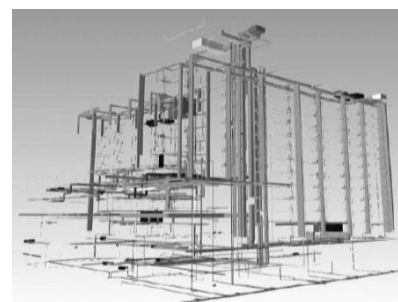
No caso dos edifícios correntes, a forma mais comum de divisão é entre as áreas de arquitetura, estrutura e mecânica, eletricidade e tubagens e esgotos (MEP), como se visualiza na *Figura 8*, em que cada modelo contém a informação pertinente para cada especialidade.



Modelo de Arquitetura



Modelo Estrutural



Modelo MEP

Figura 8 - Modelos de cada especialidade (retirado de Azhar et al., 2007)

De forma geral, o BIM apresenta-se como um conceito mais preciso, rápido e efetivo que, conjuntamente com as vantagens já apresentadas, possibilita conceções inovadoras e melhoradas, previsões de custos iniciais e de manutenção mais precisas, melhor controlo de qualidade de elementos produzidos, manter informações atualizadas sobre a construção e operação e melhorar o apoio ao dono de obra com a visualização 3D.

### **3.1.2. Desvantagens**

Apesar das diversas vantagens, a adoção de processos BIM nas diversas fases da construção e utilização de uma estrutura, e a mudança do sistema tradicional de trabalho para o BIM não é bem-recebida por todos, nomeadamente engenheiros veteranos que preferem manter os métodos tradicionais. Por outro lado, por ser uma metodologia que apenas tem ganho tração nos tempos mais recentes, ainda existe dificuldade em contratar engenheiros especializados em BIM e as formações na área ainda são escassas.

Segundo Chan et al., (2019), existem várias barreiras na globalização do BIM para a construção que incluem:

- custos iniciais elevados com licenças e hardware para possibilitar a utilização do BIM numa empresa
- a diversidade existente de *softwares* disponíveis no mercado e a incompatibilidade entre eles, sendo o sistema IFC a melhor ferramenta para partilha de informação global
- a falta de departamentos especializados em BIM
- a falta de subempreitadas capazes de trabalhar em BIM
- o facto do uso do BIM ser bastante recente e por sua vez, ainda não estar totalmente regulamentado em alguns aspetos da sua utilização
- é ainda difícil avaliar corretamente o impacto do BIM no sucesso de projetos e ainda se verifica um baixo nível de desenvolvimento (LOD ou *Level Of Development* na notação Inglesa) utilizado na fase de construção.

Um dos problemas emergentes do uso do BIM é em termos da informação dos modelos, nomeadamente a questão dos direitos de autor e proteção contra cópia. Quem está a investir no desenvolvimento do modelo pode assumir que seja o proprietário desse modelo. No entanto, outros elementos da equipa responsável pelo modelo podem considerar o mesmo para informação por eles

introduzida, o que torna o processo de proteção contra cópia e direitos de autor mais complicado e variável de projeto para projeto.

### **3.1.3. Níveis de BIM**

O nível de maturidade do uso BIM é uma forma de avaliar a utilização de recursos BIM. Segundo Bouška, (2016), este é dividido em 4 níveis entre 0 e 3. Estes distinguem-se da seguinte forma:

- Nível 0 – Não é utilizado qualquer recurso BIM, apenas é utilizado o CAD 2D
- Nível 1 – Trata-se de um nível apenas com informação 3D ao qual cada entidade pode associar alguma informação como custos. No entanto não existe qualquer interação entre os colaboradores nem um modelo centralizado.
- Nível 2 – Indica uma exploração das possibilidades do BIM utilizando modelos para as diferentes especialidades com informação específica. Existe ainda a utilização do COBie (*Construction Operations Building Information Exchange*) como método de partilha de informação entre as especialidades e favorecendo a cooperação.
- Nível 3 – Representa um estado de colaboração em tempo real do modelo seguindo as normas do IFC e verificando-se interoperabilidade entre o modelo e softwares utilizados pelos diferentes intervenientes. Neste nível surge a necessidade de criação de bibliotecas de objetos licenciados e ainda adaptação dos modelos para a gestão da estrutura durante o seu ciclo de vida.

### **3.1.4. Dimensões do BIM**

Koutamanis, (2020) sugere que dimensões do BIM é a terminologia utilizada para descrever a presença de vários tipos de informação num modelo. Tem as suas origens na distinção do BIM como sendo 3D, ou seja, trabalhar os objetos no espaço, comparado ao tradicional CAD 2D que trabalha principalmente no plano. No entanto, a capacidade do BIM alocar informação para além da informação geométrica, ou seja, o 3D, este tornou-se no BIM nD, em que n corresponde ao número de informações adicionais existentes no modelo.

Existe um consenso em considerar o tempo a quarta dimensão e os custos a quinta dimensão, no entanto, dimensões além das referidas variam de modelo para modelo, consoante o objetivo do modelo. A cada tarefa pretendida do modelo BIM corresponde uma dimensão adicional. Sustentabilidade,



desempenho acústico e térmico, segurança, entre outros, são algumas das dimensões que podem ser introduzidas num modelo e podem ainda depender da informação existentes noutras dimensões.

Na Figura 9, são apresentadas as dimensões que geralmente constituem o BIM 7D, no entanto, não existe restrição no número de dimensões nem na tarefa que essa dimensão constitui. A ordem das dimensões dá luz á hierarquia existente entre dimensões, em que a informação existente nas dimensões mais pequenas (3D e 4D) pode servir de base para a informação relativa às dimensões maiores (7D).

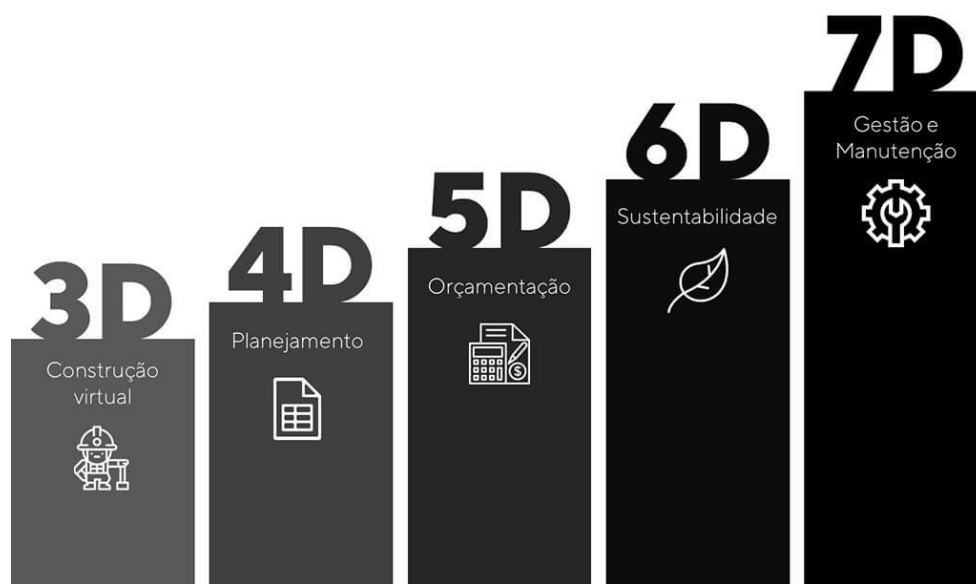


Figura 9 - Exemplo de dimensões do BIM 7D (retirado de Ramos, 2020)

### 3.1.5. LOIN

O LOIN, ou *Level of Information Need* na notação Inglesa, é o novo indicador proposto pela UK BIM Alliance, discretizado na norma ISO 19650 (2019) para substituir o LOD, que era o mais utilizado para definir a quantidade e qualidade da informação presente num determinado modelo BIM. Ao contrário do seu antecessor que utilizava um valor para definir a precisão geométrica e não geométrica do modelo desenvolvido quanto á realidade, o LOIN propõe que o modelo não deve ter informação suficiente para pretender alcançar um certo valor de LOD, mas sim de ter a informação necessário para os fins do modelo. Assim, em vez de se definir um LOD que se pretende alcançar, deve-se estabelecer a finalidade do modelo, ou seja, em que fases de um ativo se pretende utilizar o BIM, e dependendo disso, estabelecer as informações que são necessárias para que possa ser utilizado.

Segundo a UK BIM Alliance (2019), as normas ISO 19650 definem princípios e requisitos de informação, incluindo geometrias, trocas de informação, certificados de administração ou até programa para construção. Na visão da norma, o BIM deve conter informação suficiente quanto á conceção, construção, operação e manutenção aplicável a estruturas, infraestruturas e equipamentos.

A definição das informações necessárias deve ser estabelecida desde o início do processo BIM seguindo as necessidades do proprietário do ativo em questão, bem como das restrições e obrigações dos métodos, protocolos e prazos que são necessários cumprir. Deve-se assim evitar introduzir informação desnecessária uma vez que não apresenta qualquer benefício. A UK BIM Alliance reforça ainda a necessidade de existirem formas eficientes de trocas de informação de diversas especialidades e entidades bem como a necessidade de realizar decisões informadas e atempadas durante o desenvolvimento do projeto.

É defendida uma estratégia de *Feedback Loop*, em que primeiro se estabelece a informação necessária, seguido do planeamento do levantamento dessa informação. Com estes passos concluídos, entra-se num ciclo em que se obtém informação, que deve ser validada de acordo com as necessidades estabelecidas. Se a informação não for suficiente, repete-se o ciclo de recolha de informação até satisfazer as necessidades estabelecidas inicialmente.

Destaca-se também a importância da distribuição das diversas componentes de um modelo BIM a grupos especializados em cada área, nomeadamente o caso das especialidades de arquitetura, estruturas e MEP. A *Figura 10* ilustra como o responsável de um projeto BIM pode distribuir as diversas componentes por várias equipas responsáveis pela sua especialidade, que consecutivamente distribuem tarefas entre os elementos do grupo. No entanto, é fundamental garantir que o sistema BIM a implementar permita a interação e partilha de informação entre as diversas especialidades bem como a coordenação entre as mesmas (Li et al., 2021).

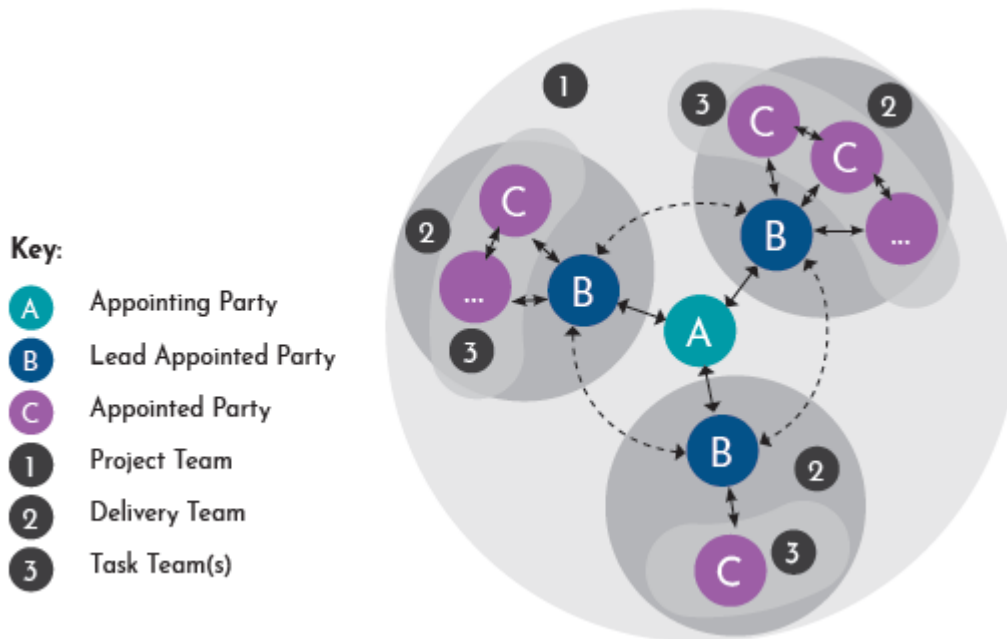


Figura 10 – Distribuição de responsabilidades num projeto BIM (retirado de UK BIM Alliance, 2020)

### 3.1.6. Ferramentas

Onde o BIM se distancia do CAD 3D é na sua capacidade dos modelos serem utilizados por diferentes ferramentas que ajudam a processar a informação que estes possuem. É compreendido como ferramenta qualquer aplicação com um objetivo específico que utiliza o modelo BIM como base de informação. Inclui todo o tipo de utilizações desde geração de desenhos, mapas de trabalhos, orçamentos, análises estruturais ou energéticas, visualização, entre outras. É na exploração destas ferramentas e nos benefícios que estas têm no desenvolvimento de qualquer projeto que se verificam as possibilidades e potencial do BIM e a importância da sua utilização em qualquer tipo de obra.

Como a sua criação é realizada através de objetos, estes podem ser contabilizados e detalhados através das ferramentas de planeamento. Nestas ferramentas é possível não só contabilizar quantidades e custos e criar os mapas respetivos, mas também associar a dimensão temporal aos diferentes elementos do projeto, uma funcionalidade relevante para as fases de fabricação, transporte e construção dos elementos. Assim se gera um mapa de quantidades com orçamentação e um mapa de trabalhos associado automaticamente.

Uma das melhores formas de visualizar uma estrutura é através da visualização avançada, que permite ver a partir de qualquer localização o modelo com efeitos de luz (*Figura 11*) e como este se

enquadra na paisagem. Tecnologias como realidade aumentada começam a ser cada vez mais utilizadas para a visualização.



Figura 11 - Exemplo de visualização avançada de um modelo BIM

Na Tabela 4 é possível visualizar um mapa de quantidades de aço gerado automaticamente em que os diferentes tipos de armaduras estão divididos pelo seu tipo. Este pode servir de base para preparar mapas de trabalhos e realizar estimativas dos custos.

<b>Calendário de barras de reforço</b>					
<b>Diâmetro</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Contagem</b>	<b>Uniclass2015Code</b>	<b>Volume de reforço</b>	<b>Forma</b>
6 mm	1260821 mm	118	Pr_20_96_71_67	83211.65 cm <sup>3</sup>	00
8 mm	1359529 mm	126	Pr_20_96_71_67	167771.60 cm <sup>3</sup>	00
10 mm	502319 mm	130	Pr_20_96_71_67	255924.35 cm <sup>3</sup>	00
12 mm	1209938 mm	380	Pr_20_96_71_67	642130.48 cm <sup>3</sup>	00
<b>Total</b>	<b>4332608 mm</b>	<b>754</b>		<b>1149038.08 cm<sup>3</sup></b>	

Tabela 4 - Exemplo de mapa de quantidades

Existem ainda ferramentas para integrar o modelo com um programa de cálculo automático para efetuar uma análise estrutural do edifício, permitindo visualizar o comportamento de toda a estrutura e sendo possível visualizar eventuais localizações críticas que devem ser alteradas ainda no processo de

dimensionamento ou mesmo num processo de manutenção e reparação (Figura 12). Esta informação pode constar no modelo final como forma de visualização do comportamento expectável da estrutura

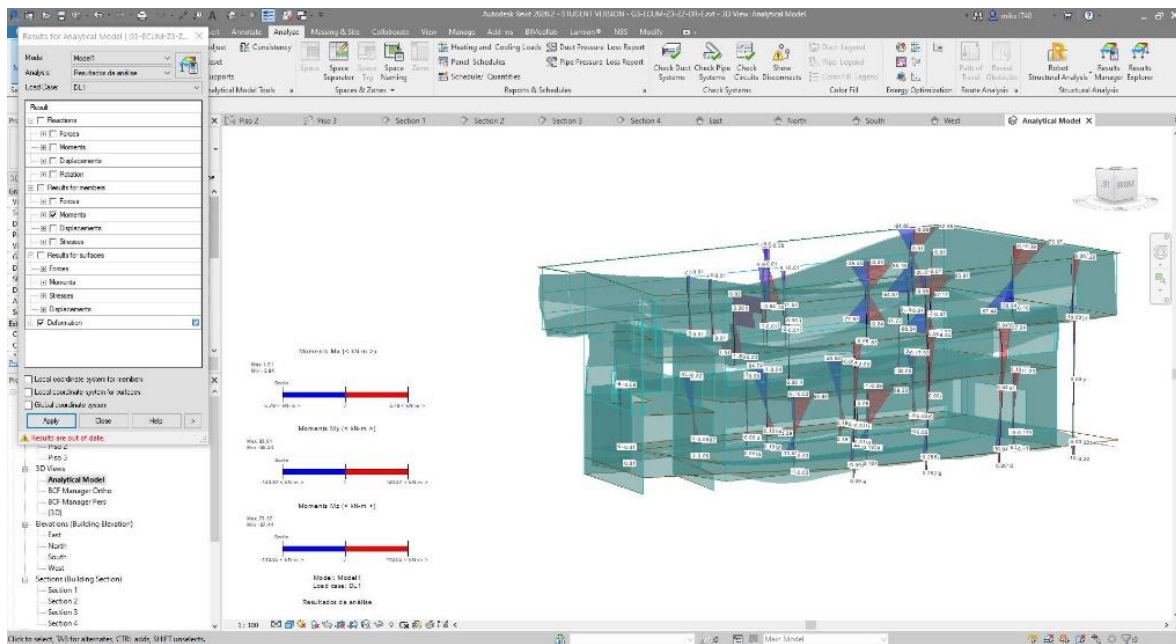


Figura 12 - Exemplo análise estrutural

É de referir ainda o BIM FM, ou Facility Management, uma ferramenta focada na gestão de ativos, onde o modelo BIM é utilizado como base para gerir a utilização e exploração de um ativo, sendo principalmente utilizado em edifícios com divisões para diferentes fins, podendo também ser utilizado em obras de arte pontualmente.

No contexto das ferramentas de suporte ao BIM podem ainda ser referidas as ferramentas de *scripting*, que permitem uma manipulação avançada dos modelos BIM. Um exemplo destas ferramentas é o *Dynamo*, um *add-on* específico para o software *Revit* que permite a utilização de linguagem de programação visual, através de nódulos de código (Figura 13). Em estruturas ou objetos que requerem ações repetitivas e monótonas durante a modelação ou objetos mais complexos, como elementos curvos, o *Dynamo* permite criar um *script* que executa essas instruções tornando o processo de modelação muito mais eficiente ou no caso de elementos complexos, torna possível a sua modelação devido à predominância de formas simples nos softwares de modelação. O domínio de tarefas desta natureza é uma mais-valia em projetos de grandes dimensões devido à existência de inúmeros elementos e presença de elementos complexos.

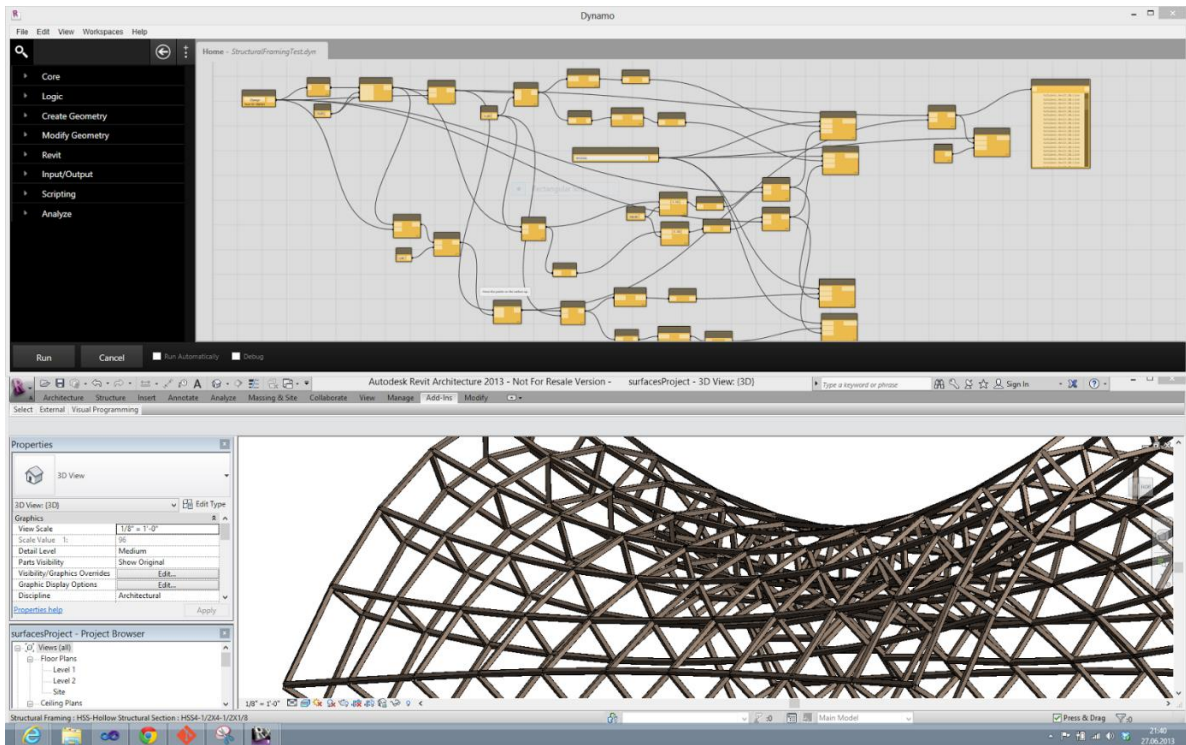


Figura 13 - Exemplo de modelação de estrutura complexa com o Dynamo (Retirado de OS, 2021)

Uma outra grande utilidade do *Dynamo* é a sua capacidade de criar ou alterar objetos presentes num modelo usando informação contida em ficheiros externos ou lendo diretamente outros programas (por exemplo o Excel). Isto permite a atualização do modelo automaticamente baseada nas alterações realizadas a estes ficheiros/programas.

No entanto, a ferramenta mais importante em qualquer projeto BIM é o *Common Data Environment* (CDE), que é o espaço onde toda a informação relativa a um projeto é reunida (incluindo modelos, dados gráficos e documentação) e pode ser partilhada entre todos os intervenientes no projeto. É importante no início de qualquer projeto que sejam estabelecidas as regras de utilização do CDE para garantir a organização de toda a informação para que a evolução do projeto seja o mais fluida possível. Estas devem impor a correta organização dos ficheiros bem como da sua nomenclatura para que todos os envolvidos percebam os conteúdos de cada ficheiro partilhado. Ainda não existe normalização deste tipo de ferramenta, portanto as regras devem ser estabelecidas para cada projeto BIM.

### 3.1.7. Exemplo de aplicação do BIM em projetos de ferrovia

Tendo em conta os aspetos ilustrados acima, são vários os exemplos de aplicações disponíveis na literatura. Várias empresas implementam a tecnologia do BIM nos seus projetos e revelam diversos benefícios.

Um caso em específico e com relevo para a presente dissertação é o da China Railway Engineering Consulting, uma das principais construtoras mundiais de infraestruturas, bem como outras áreas. Decidiram juntar-se á comunidade iTWO e em parceria com a empresa RIB software, utilizam a plataforma iTWO 4.0 desde 2017. Esta plataforma BIM 5D permitiu a gestão e coordenação de vários processos entre as várias entidades envolvidas nos projetos chegar ao mesmo nível de outras empresas de renome.

Liao (2021) apresenta 10 projetos de estações ferroviárias de alta velocidade como exemplos do sucesso da implementação do BIM, com um destes projetos a resultar numa redução dos custos em 10M RMB (aproximadamente 1,4 milhões de euros).

Este autor indica que a optimização destes projetos deveu-se a:

- Desenvolvimento de um plugin que permite a sincronização de modelos entre Revit e iTWO para a utilização de vários modelos principais
- A base de dados da plataforma iTWO 4.0 permitiu a junção de todos os mapas de quantidades das diversas especialidades;
- A análise do BIM 5D (3D, tempo e custos) permitiu organizar de forma eficiente os recursos disponíveis, poupando até um mês do tempo de projeto
- O software permitiu realizar verificações da qualidade da execução dos projetos, permitindo aos responsáveis pela construção enviarem equipas para a resolução dos defeitos;
- Mudanças dos projetos, devido a mudanças de investimento ou atrasos, poderem ser facilmente avaliadas e ajustes nos trabalhos poderam facilmente ser realizados

Com esta implementação BIM, originou-se uma redução de 5% do tempo e custos de projeto, uma redução de 30% em alterações no projeto e os erros nos mapas de quantidades foram reduzidos para uma margem de 1% (Liao, 2021).

### **3.2. BIM em projetos de pontes**

Conforme referido anteriormente, a aplicação do BIM em contexto de projetos de pontes mantém a maioria das vantagens, desvantagens, ferramentas e outros aspetos referidos anteriormente para o caso geral dos edifícios. Existem, no entanto, pelo menos duas grandes diferenças, motivo suficiente

para que a designação da metodologia passe a ser BrIM. A primeira diz respeito ao número de especialidades associadas, que neste caso é menor já que por exemplo AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) ou MEP (instalações Mecânicas, Elétricas e Hidráulicas) apenas existem em alguns casos. A segunda diz respeito ao tipo de elementos construtivos que é necessário modelar. Se alguns são comuns aos dos edifícios (e.g. pilares, vigas), outros são exclusivos deste tipo de estrutura (e.g. aparelhos de apoio). Adicionalmente, e apesar de serem infraestruturas pontuais quando comparadas com outras infraestruturas de transporte (e.g. pavimentos), apresentam ainda assim um desenvolvimento horizontal que difere do desenvolvimento tendencial vertical dos edifícios.

Neste sentido, existem hoje em dia várias iniciativas com o intuito de abordar a forma como as pontes devem ser modeladas tendo em consideração as suas especificidades. Já no passado foram vários os esquemas de dados que foram propostos neste contexto.

Chipman et al. (2016) apresenta uma análise comparativa entre quatro esquemas de dados utilizados na gestão de pontes:

- OpenBrIM
- LandXML
- IFC
- Soluções proprietárias

Nas secções que se seguem apresenta-se um resumo dessa análise, verificando como cada esquema de dados organiza a informação e qual a informação que cada esquema considera essencial para definir todo o modelo.

### **3.2.1. OpenBrIM**

O OpenBrIM é um esquema de dados desenvolvido para a modelação de componentes de pontes. Neste sistema, todos os elementos são definidos como objetos, que incluem os atributos representados na *Tabela 5*.

Outras informações podem ser adicionadas ao modelo, mas devem ser identificadas como parâmetros, que o sistema define com 5 atributos: Name, Label, Type, Description e Value. Todos estes parâmetros podem ser definidos por valores ou fórmulas dependentes de outros parâmetros ou objetos.



<b>Atributo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
<b>Name</b>	String	Nome identificativo do objeto para o utilizador
<b>ID</b>	String	Identificação do objeto para o software
<b>Type</b>	String	Define o tipo de objeto, dentro dos tipos comuns
<b>RelObj</b>	String	Refere o modelo de valores que define o objeto
<b>Alignment</b>	String	Refere o alinhamento a que o objeto se associa
<b>X, Y, Z, RX, RY, RZ, AboutX, AboutY, AboutZ</b>	String	Sistema de coordenadas que define o objeto no espaço
<b>Units</b>	Obj []	Define unidades utilizadas no objeto
<b>Parameter</b>	Parameter []	Parâmetros opcionais sobre a origem dos tipos
<b>Obj</b>	Obj []	Decomposição de objetos opcional
<b>Repeat</b>	Repeat	Descreve padrões da posição de objetos
<b>Surface</b>	Surface	Representação 3D de uma superfície
<b>Circle</b>	Circle	Superfícies redondas
<b>Line</b>	Line	Segmentos retos
<b>Volume</b>	Volume	Representação 3D de um volume fechado

Tabela 5 - Tipos de propriedades para Obj em OpenBrIM (Adaptado de Chipman et al., 2016)

Segundo Jeong et al. (2017), o esquema OpenBrIM considera uma ponte como um conjunto de objetos ou famílias de objetos que representam os componentes de uma ponte com parâmetros a representarem as propriedades desses mesmos objetos. Qualquer objeto deve conter informação relativa ao seu nome e localização (coordenadas e rotação). Por sua vez, os parâmetros devem conter informação do valor, tipo, descrição, sistema de unidades e tipo de unidades. Estes conjuntos de informação base devem ser expandidos para todos os objetos e parâmetros para melhor descrever o objeto ou conjunto de objetos a que estejam associados.

Para Bartholomew et al. (2015), uma ponte divide-se nos componentes base em tabuleiros, guarda-corpos, vigas, apoios intermédios, aparelhos de apoios, pilares e encontros. Estes podem ser compostos por componentes mais pequenos, em particular no caso de pilares e encontros em que podem ser constituídos por colunas, sapatas, armaduras, entre outros. Todos os elementos devem conter o mínimo de parâmetros para determinar a sua geometria e o tipo de componente que o objeto representa.

### 3.2.2. LandXML

É um esquema de dados preparado para descrever terreno, alinhamentos de estradas, redes de tubagens e outras informações relevantes ao estudo do terreno. Este esquema foca na descrição dos diversos objetos, sem utilizar atributos exatos (Chipman et al., 2016). Os ficheiros que utilizam esta esquema, requerem informação referente a unidades, localização no espaço e grupos de elementos que representam tipos de informação (*Tabela 6*).

<b>Tipo de informação</b>	<b>Descrição</b>
<b>Alignments</b>	Alinhamentos horizontais como referência para outros elementos
<b>Grade Models</b>	Indica a geometria do terreno
<b>Amendments</b>	Indica mudanças dos nomes de elementos
<b>Parcels</b>	Define as margens legais de cada região
<b>Plan Features</b>	Refere estruturas adicionais de menor relevância, utilizados para contexto
<b>Pipe Networks</b>	Indica tubos abertos e fechados existentes, com alinhamentos como referência
<b>Roadways</b>	Indica a existência de estradas, pontes, tuneis e outras estruturas, com descrição das mesmas em termos de faixas, velocidades, tráfego, entre outras

Tabela 6 - Tipos de informação em LandXML (Adaptado de Chipman et al., 2016)

### 3.2.3. IFC

O IFC é o esquema de dados mais utilizado no mercado para trocas de informação entre softwares BIM. Este encontra-se padronizado e descrito na ISO 16739. Atualmente encontra-se na versão 4. A sua mais recente extensão, versão 4.3, é já focada em modelos de infraestruturas, algo que estará disponível oficialmente na versão 5 (Christian Erismann, 2021).

Este esquema utiliza um modelo único como base para toda a informação que se pretende guardar. Neste modelo são definidas as unidades base para o projeto todo, como unidades e sistemas

de coordenadas, e define a hierarquia de todos os objetos que constituem o projeto (Chipman et al., 2016).

### **3.2.3.1. Técnicas de modelação**

Dentro do formato IFC, a modelação dos objetos é descrita da mesma forma que as estruturas geométricas são modeladas em software, aumentando a consistência deste formato. Estas estruturas geométricas incluem modelos desenvolvidos usando as técnicas de modelação constructive solid geometry (CSG) e boundary representation (B-Rep) (Chipman et al., 2016).

Constructive solid geometry (CSG) utiliza sólidos simples (e.g. prismas, cones, esferas) e utiliza união, interseção ou subtração entre eles para formar novos objetos. O resultado destas operações origina uma boundary representation.

Boundary representation (B-Rep) é o conjunto de faces unidas que representam o objeto criado, que respeitam as regras que definem um sólido.

Segundo Saygi et al., (2013), a representação de um objeto segundo a técnica B-Rep é obtida através da fronteira do volume que define o objeto. Para tal efeito, é necessário estabelecer a geometria do objeto, através de pontos, curvas e superfícies que servem de base para a topologia de vértices, arestas e faces, respetivamente, utilizados para definir a fronteira do volume.

Em contrapartida, a técnica CSG constrói objetos complexos através da combinação de vários objetos simples de acordo com certas regras. Esta técnica utiliza volumes com formas simples (e.g. prismas, cones, esferas) aos quais são aplicadas operações lógicas, realçando-se a utilização de união, interseção e subtração, para estabelecer o volume do objeto final.

Objetos definidos por B-Rep distinguem-se pelo facto de serem definidos por um ou mais polígonos que formam a sua superfície criando um objeto oco que, apesar ser de fácil representação, pode nem sempre ser válida (e.g. descontinuidade na sua fronteira). Por outro lado, objetos definidos por CSG tomam a sua forma a partir de um ou mais volumes que garante ser um objeto válido, mas requer operações adicionais de verificação de redundâncias e aproximação entre os objetos.

### 3.2.3.2. Informação não geométrica

Juntamente com a caracterização geométrica, cada objeto pode ser associado informação adicional relevante nos campos de engenharia e construção. Os elementos físicos podem ter caracterizados os seus materiais constituintes, incluindo propriedades relativas ao seu comportamento. Também é possível caracterizar a sua ligação com outros elementos, como armaduras, aberturas, conexões, entre outros. O IFC também transporta modelos secundários associados ao modelo principal, sendo um exemplo disso o modelo analítico utilizado para análise estrutural.

Dentro do esquema IFC, a informação principal de um objeto, “IfcElement”, é constituída pelos atributos apresentados na *Tabela 7* (Chipman et al., 2016).

É de referir que existem mais tipos de informação definidos dependendo da classificação do objeto (e.g. IfcBeam, IfcSlab, IfcWall) ou entidades abstratas (e.g. IfcProduct, IfcObject, IfcObjectDefinition, IfcRoot) (Chipman et al., 2016).

O IFC oferece também formas de guardar informação necessária para análise estrutural, com o recurso *IfcStructuralLoadResources* que contem entidades representativas de condições de fronteira, cargas e conexões. *IfcBoundaryCondition* é utilizado representar condições de fronteira, incluindo nódulos, arestas e faces enquanto *IfcStructuralLoad* é utilizado para guardar cargas, incluindo ações e reações. Em termos de conexões, entramos no domínio do *IfcStructuralAnalysisDomain*, em que é utilizado um modelo de *IfcStructuralAnalysisModel*, ao qual é associada toda a informação relativa a engenharia estrutural, incluindo as conexões (Park et al., 2020).

<b>Atributo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
<b>GlobalId</b>	IfcGloballyUniqueId (String)	Identificação do objeto no software
<b>OwnerHistory</b>	IfcOwnerHistory	Determina o acesso ao objeto
<b>Name</b>	IfcLabel (String)	Nome de identificação para o utilizador
<b>Description</b>	IfcText (String)	Descrição do objeto para o utilizador
<b>HasAssociations</b>	IfcRelAssociates[]	Informação paramétrica ou externa (documentos, classificações, bibliotecas, delimitações, aprovação, material e parâmetros de forma)
<b>HasAssignments</b>	IfcRelAssigns[]	Ligações para informação que depende deste objeto (e.g. tarefas, modelos estruturais)
<b>IsNestedBy</b>	IfcRelNests[]	Componentes externos configuráveis
<b>IsAggregatedBy</b>	IfcRelAggregates[]	Componentes existentes no interior (e.g. armaduras)
<b>ObjectType</b>	IfcIdentifier (String)	Identificador de tipo para objetos não standardizados
<b>IsTypedBy</b>	IfcRelDefinesByType[]	Definição do tipo de objeto
<b>IsDefinedBy</b>	IfcRelDefinesByProperties[]	Parâmetros extensíveis para o objeto
<b>ObjectPlacement</b>	IfcObjectPlacement	Posição e orientação 3D
<b>Representation</b>	IfcProductRepresentation	Geometrias de vários níveis paramétricos (e.g. eixos, perfis, caixas, superfícies, luz)
<b>ConnectedTo</b>	IfcRelConnects[]	Ligação a objetos ancorados neste objeto
<b>IsInterferedBy</b>	IfcRelInterferes[]	Ligação a objetos intercetantes com este objeto
<b>HasProjections</b>	IfcRelProjectsElement[]	Projeções situadas nas bordas deste objeto
<b>HasOpenings</b>	IfcRelVoidsElement[]	Aberturas existentes no volume deste objeto
<b>HasCoverings</b>	IfcRelCoversBldgElements[]	Coberturas colocadas na superfície do objeto

Tabela 7 - Tipos de informação em "IfcElement" (Chipman et al., 2016)

### **3.2.3.3. Model Views**

Chipman et al. (2016) indica que os modelos IFC pode ser derivados, expandidos ou delimitados, criando os chamados “Model Views”, que são focados em alojar um determinado tipo de informação. Os autores salientam a existência de 3 model views: Precast Concrete National BIM Standard, Reinforced Concrete BIM Model e BIMsteel.

Precast Concrete National BIM Standard (PCNBS) é um model view do IFC focado nos fabricantes de elementos pré-fabricados, com o intuito de facilitar a passagem de informação necessária para a conceção, produção e montagem. O PCNBS inclui, além dos elementos mais comuns em construção (e.g. pilares, vigas, lajes, escadas), as componentes mais pequenas (e.g. acessórios, componentes, elementos de reforço) que fazem parte dos elementos principais. Este formato suporta a representação de diversos elementos de reforço (e.g. armaduras) e a aplicação de um material destinado a cobrir faces dos elementos (e.g. adesivos).

Suportes ou outros elementos temporários associados ao processo de montagem não são incluídos neste formato, uma vez que este não permite a simulação do BIM 4D, apesar do IFC base suportar tal simulação. O PCNBS retêm apenas a informação indispensável em termos de terreno e elementos externos.

O Reinforced Concrete BIM Model é focado na caracterização e produção de betão armado. A existência de várias tarefas na produção e a presença de outros elementos como reforço, cofragem e andaimes, acabamentos, volumes de elementos intercetantes, entre outros, aumenta a complexidade do betão armado.

Referem que é comum a presença de muitos elementos de reforço dentro de um modelo, tornando-o pesado em particular no processamento gráfico, mas a utilização de padrões de repetição tornam o modelo mais leve. Os autores sugerem a divisão da modelação de armaduras nos seguintes níveis:

1. Peças individuais de reforço - utiliza apenas uma linha composta por retas e semicírculos e um diâmetro para definir as peças. Pode incluir atributos como diâmetro nominal, área de secção, tipo de superfície, entre outros;

2. Conjuntos de reforços – é a definição de um grupo principal de reforços composto por elementos individuais ou conjuntos de reforços mais pequenos;
3. Matriz de armadura – utiliza o objeto principal, vetor de alinhamento, número de varões, material e geometria para gerar a disposição de vários varões;
4. Conjunto de reforço superior – é uma entidade que engloba as propriedades dos conjuntos de armaduras a serem utilizadas num elemento de betão. Este elemento inclui os diversos grupos de armadura, material, revestimento, quantidades, detalhe da dobragem, entre outros;
5. Elementos muito grandes podem necessitar de ser compactados. É possível representar um conjunto de objetos iguais como um único objeto com um atributo referente ao número de objetos existentes.

O BIMsteel, desenvolvido pela American Institute of Steel Construction (AISC) foi pensado para melhorar a transferência de informação relativa a estruturas metálicas, em particular no que diz respeito a Automating Steel Fabrication e Design and detailing, para o qual existem model views específicos. A maioria da modelação dos elementos deriva de extrusões que utilizam a geometria da extrusão e o perfil associado ou através da soldagem de várias peças individuais (Chipman et al., 2016).

O model view de automating steel fabrication é dedicado a aumentar a produtividade de linhas de produção automatizadas de elementos metálicos. Recorre a perfis parametrizados existentes nas bases de dados da AISC, entre outras, para definir os elementos. As soldaduras e parafusos utilizam valores paramétricos e são utilizadas curvas 3D como referência para a sua geometria, sem necessitar da representação 3D concreta. Estas otimizações permitem reduzir a quantidade de informação enquanto aumentam a precisão da mesma (Chipman et al., 2016).

O model view relativo a design and detailing é um modelo estrutural que, comparativamente ao anterior, troca os detalhes menos importantes quando se trata de análise estrutural para poder alojar informação relativa ao comportamento dos elementos necessários, às conexões estruturais, aos membros estruturais, a cargas e às reações.

Além dos model views mencionados anteriormente, existem muitos outros que podem ser referidos. Em finais de 2021, aparecem no site da BuildingSmart (organização responsável pelo desenvolvimento e manutenção do formato IFC) 38 model views diferentes. De entre estes, destacam-se o Bridge Construction View que será utilizado nas fases de projeto e manutenção de pontes e o Rail

Construction View que será utilizado para ferrovias. No entanto, estes ainda se encontram numa versão draft, pelo que ainda não é possível utilizá-los.

Estes model views visam adaptar o esquema do IFC para que suporte elementos específicos de pontes e ferrovias (IFC Bridge e IFC Rail). Estes esquemas pretendem estabelecer a hierarquia dos componentes, criando grupos para os mesmos como designar um conjunto de elementos de “superestrutura” para perceber as informações essenciais para cada elemento individual. A Figura 14 exemplifica como alguns dos elementos da ferrovia serão manuseados pelo esquema IFC.

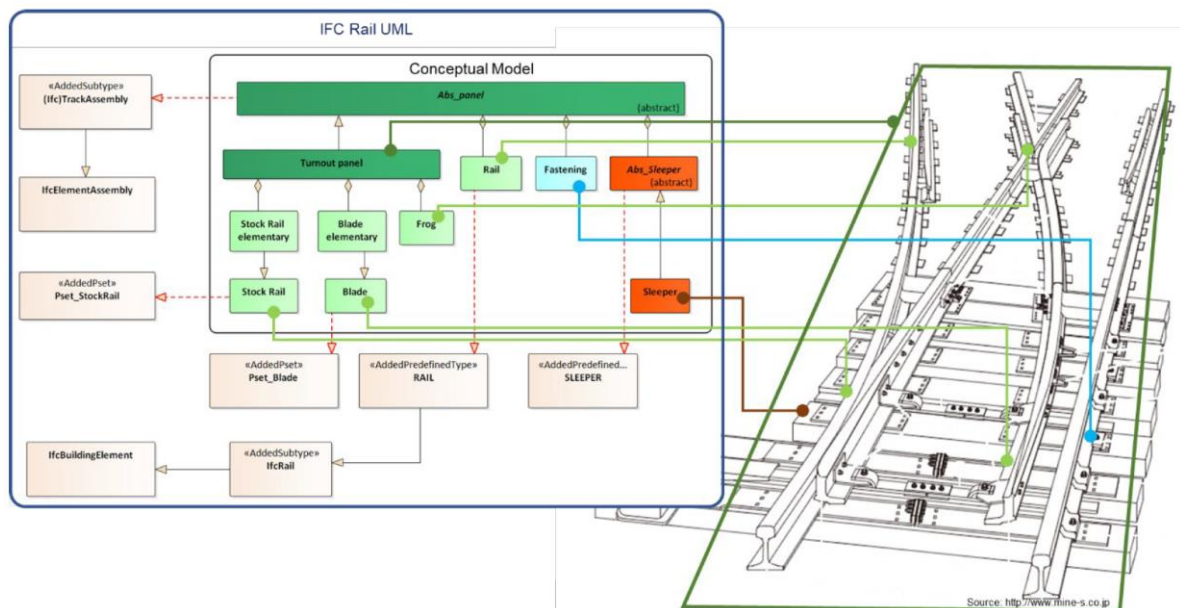


Figura 14 - Esquema de relação do IFC Rail (BuildingSMART, 2019)

### 3.2.4. Soluções proprietárias

Para além dos esquemas de dados que têm sido utilizados no contexto do BIM aplicado a pontes, existem também soluções proprietárias que os principais desenvolvedores de software BIM disponibilizam. Em particular, destaca-se a solução proposta pela Bentley. Esta grande empresa desenvolveu o formato Bentley OpenBridge iModel destinado a possibilitar as trocas de informação e de dados entre diferentes ferramentas BIM, dentro do ecossistema das ferramentas Bentley.

A plataforma iModel 2.0 é o esquema utilizado para a interoperabilidade dentro do ecossistema da Bentley, nomeadamente o LEAP Bridge Concrete, criada para ser um serviço *cloud* e foi desenvolvido para manter os modelos desenvolvidos neste software disponíveis em softwares de terceiros (Bentley & Mullen, 2017).



Adicionalmente, o esquema apresenta diversas propriedades que tornam a sua utilização apelativa. As suas vantagens incluem:

- Apresenta um formato aberto, que permite outros fornecedores de programas e plugins tirem proveito do formato;
- Os modelos partilhados são apenas de leitura e retêm a informação dos autores, tornando a sua informação mais segura;
- Os modelos apresentam flexibilidade para cumprirem com normas específicas ou para incorporar com bases de dados externas;
- Os modelos são otimizados para a sua partilha e distribuição, permitindo a sua visualização sem necessitar o software em que são modelados.

### **3.3. Detalhes específicos das pontes metálicas**

Visto que a aplicação dos conceitos desenvolvidos nesta dissertação se foca nas pontes ferroviárias metálicas, é importante conhecer melhor os detalhes específicos da utilização de modelos BIM aplicados a este tipo de pontes. Comparativamente com as pontes em betão armado, estas são constituídas maioritariamente por elementos em aço, unidos por soldaduras ou por aparafusamento em que são estes os elementos responsáveis por transmitir as cargas para os apoios.

A modelação de elementos em aço é geralmente simples, tratando-se maioritariamente de vigas e pilares de secção constantes, que se repetem múltiplas vezes em toda a estrutura. A principal complexidade prende-se com a modelação das ligações entre os diversos elementos. Dependendo do detalhe pretendido, poderá ser necessário a modelação dos parafusos e/ou chapas de ligação.

Para auxiliar nesta tarefa, normalmente morosa e repetitiva, os principais softwares de modelação BIM fornecem ferramentas auxiliares para modelar e editar estas ligações. A maioria dos softwares propõe ligações genéricas (ver exemplo na *Figura 15*) que podem ser editadas. A modelação da ligação entre elementos tem especial importância quando se pretende realizar análises estruturais em estruturas metálicas. Em muitos softwares é possível utilizar diretamente o modelo BIM com a ligação devidamente definida, para calcular a resistência de uma ligação e verificar a segurança da estrutura.

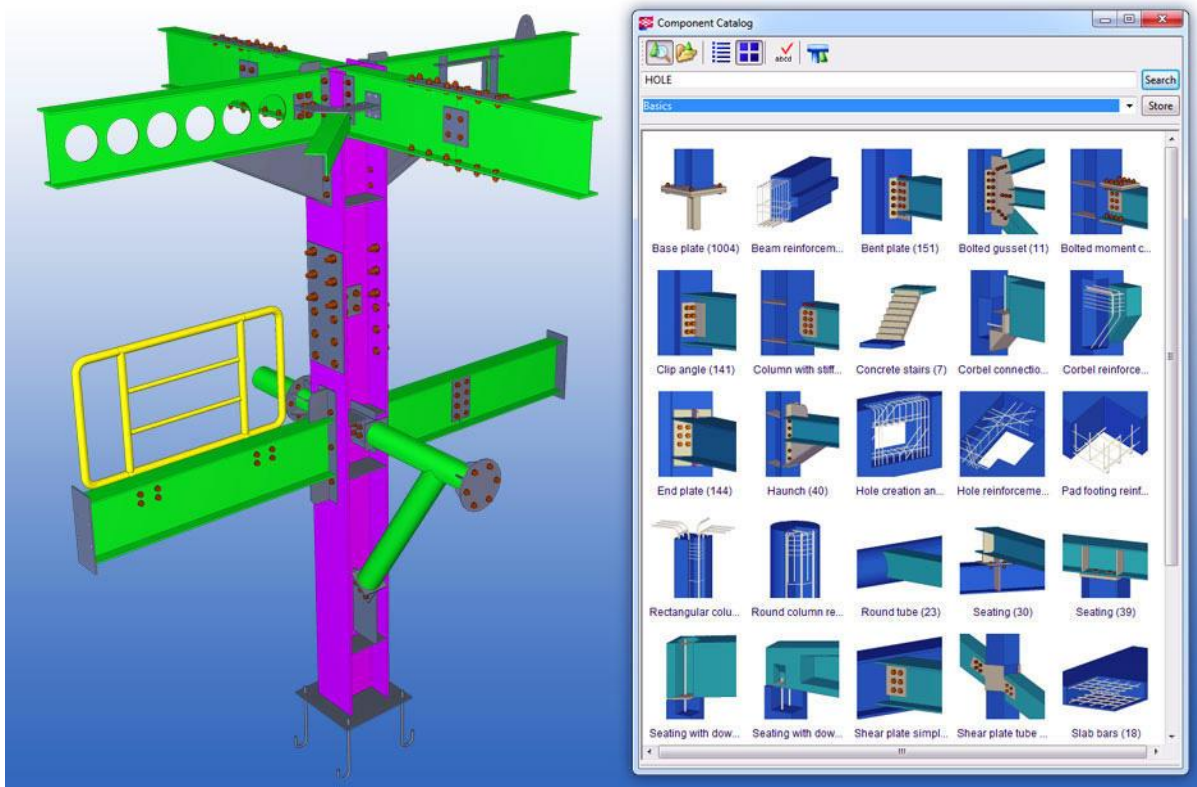


Figura 15 - Exemplos de ligações (Retirado de tekla.com)

A *Figura 16* exemplifica a modelação de uma asna metálica. Neste tipo de estrutura, são modelados as escoras e banzos inferiores e superiores, juntamente com o detalhe da ligação entre todos estes elementos, neste caso através de chapas soldadas.

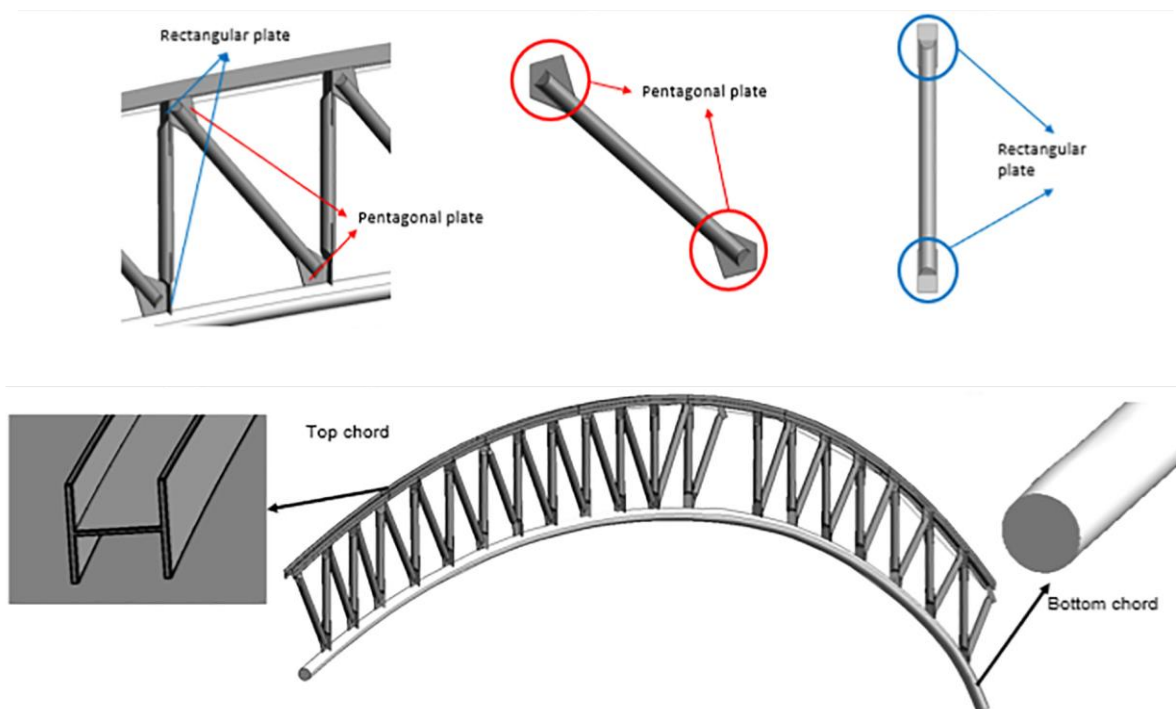


Figura 16 - Exemplo de uma asna (Retirado de Yang et al., 2020)

### 3.4. Detalhes específicos da ferrovia

Pontes ferroviárias e pontes rodoviárias distinguem-se principalmente pelo seu tipo de pavimentação. Pontes rodoviárias são cobertas com betão betuminoso para a circulação de automóveis. As pontes ferroviárias podem ser construídas diretamente sobre a estrutura metálica ou recorrer ao uso de um balastro, necessitando neste caso de um pavimento sobre o qual este assentará. O esquema estrutural é semelhante a qualquer outra ponte, quer em betão armado ou metálica, apenas mudando tipo de elementos ferrovia modelar. Estes incluem: os carris e as catenárias e, caso existam, o balastro e o sub-balastro.

Não é necessário a existência de todos estes elementos, mas são os mais comuns. No caso de pontes metálicas, é comum o sistema de carris e catenárias estarem apoiados na estrutura metálica diretamente sem necessidade de balastro ou qualquer tipo de geotêxtil.

Nem todas os softwares disponibilizam por defeito bibliotecas com todos os objetos necessários para a modelação de ferrovias. No caso do Revit, por exemplo, é necessário a modelação dos objetos a utilizar primeiro. Depois dos objetos criados, é possível recorrer a ferramentas como o *Railling* para facilitar a sua modelação.

Para a modelação da linha férrea, é preciso modelar primeiro o perfil da via. Este é criado incluindo os elementos já referidos, bem como a forma e posição dos elementos relativamente ao alinhamento da via. Portugal utiliza a bitola ibérica de 1668 mm, ou seja, a distância entre os carris de 1,668 m, pelo que é esta a distância a modelar.

Após o estabelecimento do perfil é necessário estabelecer as travessas e sistema de fixação, modelando o formato de cada. Estas podem ser introduzidas no modelo definindo a distância entre cada um (*Figura 17*).

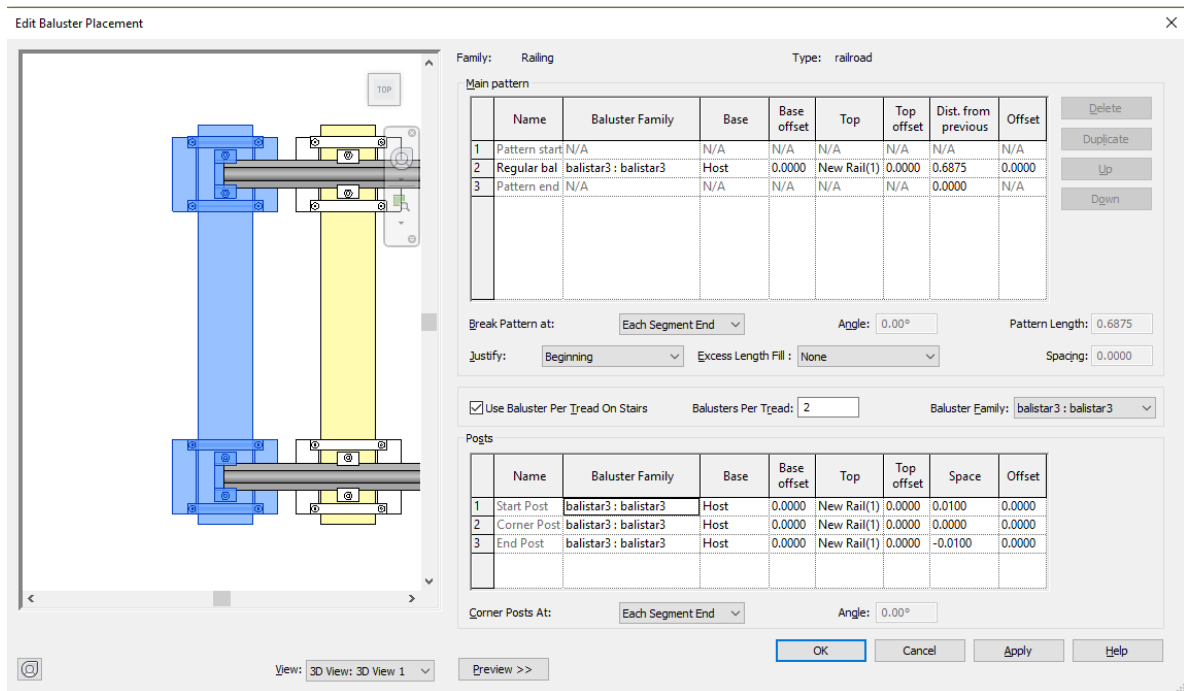


Figura 17 - Introdução das travessas

Para a modelação do balastro, sub-balastro, geotêxtil e geogrelha, são utilizados objetos do tipo laje como forma de representar esses elementos. Devem-se introduzir as informações corretas em termos do tipo de material e dimensões de espessura correspondentes. Para a sua modelação pode ser necessário utilizar duas geometrias de secção distintas, uma retangular para o suporte das travessas e uma rampa de cada lado, que corresponde ao prisma lateral. A *Figura 18* apresenta o culminar da modelação destes elementos.



Figura 18 - Exemplo de modelação da ferrovia (Neves et al., 2019)

## 4. Metodologia de gestão de pontes ferroviárias metálicas com modelos BIM

### 4.1. Utilização da informação cadastral existente

Dados os diversos benefícios oferecidos pelo BIM, desde a fase de conceção das infraestruturas até à fase de exploração e manutenção, são cada vez mais os projetos que recorrem ao BIM como forma de alojar toda a informação inerente ao seu ciclo de vida.

No entanto, para as estruturas existentes ainda são utilizando os formatos tradicionais (e.g. papel, bases de dados) para preservar informação sobre o projeto inicial, registo de inspeções e de ações de manutenção e/ou intervenção. Neste contexto, a maioria das pontes existentes ainda não possui um modelo BIM em que se possa visualizar a informação cadastral atualizada necessária para a sua gestão e exploração.

Segundo Hüthwohl et al. (2018), as atuais regras de inspeções e modelos dos relatórios de inspeção são focados em permitir flexibilidade aos inspetores de reportarem as condições existentes. No entanto, isto entra em conflito com os princípios do BIM, que utiliza princípios mais restritos em termos de informação, permitindo apenas o uso de conceitos e formas pré-estabelecidas.

Romanovich et al. (2021) sugere que o desenvolvimento de um modelo inicial deve ser baseado nos desenhos de projeto iniciais. No entanto, estes desenhos podem ter detalhes em falta ou pouco perceptíveis, ou podem não representar exatamente a realidade, por alterações realizadas na fase de construção ou em ações de manutenção/intervenção, pelo que a utilização de uma nuvem de pontos é um dos principais métodos para comparar o modelo com a estrutura *as-built*. Na *Figura 19* é possível analisar as diferenças entre um modelo baseado nos desenhos de projeto em relação à representação *as-built* por via de nuvem de pontos.

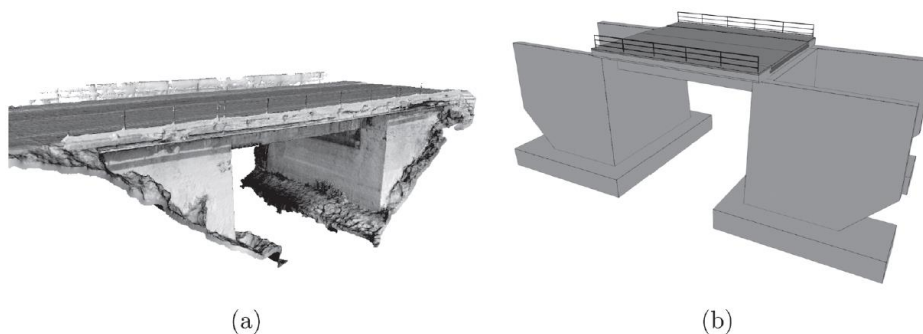


Figura 19 - Comparação entre nuvem de pontos (a) e modelo *as-designed* (b) (Retirado de Isailović et al., 2020)

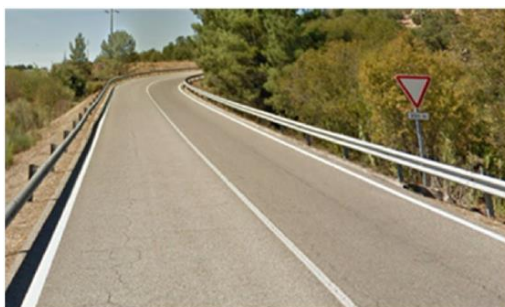
Assim sendo, é recomendado a realização de novos levantamentos topográficos da ponte em questão, para se poder começar a modelação a partir da informação mais atualizada. Existem diferentes métodos para a obtenção destes registos, incluindo VANTs (Veículos aéreos não tripulados), estações laser, fotogrametria, entre outros. Nas secções que se seguem detalham-se dois dos métodos mais comuns

#### 4.1.1. Laser scanning

O *laser scanning* é uma técnica que consiste em utilizar uma estação laser que projeta raios de luz em todo o redor e calcula a distância entre os obstáculos em que a luz colide e a estação laser e também analisa a refletividade do obstáculo. Através do processamento desta informação é possível obter uma nuvem de pontos que cria uma representação 3D dos elementos ao redor da estação laser. Esta nuvem de pontos é um dos principais métodos para a inicialização da modelação de uma estrutura pois é uma representação da posição exata dos diferentes elementos da estrutura.

Segundo Romanovich et al., (2021), a obtenção de levantamentos em diversos pontos específicos de uma estruturas permite o reconhecimento de pontos comuns, quer automaticamente ou pelo especialista, conseguindo-se assim criar uma nuvem de pontos mais fiável. As nuvens de pontos obtidas devem ser introduzidas no software de modelação escolhido para certificar que estas apresentam a precisão necessária para o projeto.

A *Figura 20* exemplifica a aplicação deste tipo de levantamento numa rodovia, em que estão destacados o pavimento e outros componentes relevantes ao funcionamento da via na nuvem de pontos.



(a)



(b)

Figura 20 - Nuvem de pontos de uma rodovia (Retirado de Justo et al., 2021)

Cada equipamento deve ser escolhido mediante a precisão necessária, dependendo do tamanho da estrutura e da precisão pretendida para a nuvem. Estações fixas apresentam, no geral, maior precisão em relação as estações moveis.

#### **4.1.2. VANTS**

Os veículos aéreos não tripulados (VANTS), frequentemente designados por *drones*, são uma das formas cada vez mais frequentes de realizar levantamento fotográfico de uma estrutura. O facto destes equipamentos serem capazes de fotografar locais de difícil acesso para um inspetor e a possibilidade de programar rotas são alguns dos fatores responsáveis pelo aumento da procura de *drones*.

Também se utiliza cada vez mais câmaras fotográficas 360°, que permitem a visualização ao redor do VANT no momento da fotografia. Comparado com o método de fotografia normalmente utilizado que é bastante focado em anomalias detetadas e outros detalhes que possam ser importantes na análise de uma ponte, as fotografias 360° permitem incluir informação quanto á envolvente do que se pretende fotografar e ainda permitem uma visualização mais realista do ativo a partir do modelo digital.

Segundo Perry et al. (2020), a informação fotográfica ou de video juntamente com informação GPS pode ser processada automaticamente para criação de um modelo *as-built* onde o sistema pode detetar e identificar anomalias nas superfícies e identifica-las no modelo. Este autor recomenda a utilização de:

- voos pré-programados para a extração eficiente da fotogrametria
- controlos automáticos do plano de voo, preferivelmente em linha reta
- intervalos de tempo regulares entre fotografias por forma a que exista uma sobreposição de pelo menos 50% entre fotografias para ser possível a automatização da modelação.

A preparação deste tipo de voos pode ser mais dispendiosa inicialmente, mas pode ser repetida em futuras inspeções, o que acabará por trazer ganhos no médio/longo prazo. Adicionalmente refere que fotografias das zonas inferiores podem ser dificultadas por perdas de sinal de GPS e a incapacidade da maioria das câmaras de criarem um ângulo vertical suficiente para a extração de imagens. Estes podem ser corrigidos através de pós-processamento, mas existe perda de qualidade das imagens.

Para a criação da nuvem de pontos, existem sobretudo dois processos, LiDAR e fotogrametria. O LiDAR é um sistema utilizado por VANTs mais avançados que utilizam sensores laser juntamente com câmaras óticas e dados GPS para criar a nuvem de pontos quase instantaneamente. A fotogrametria apenas necessita da coletânea de imagens e coordenadas GPS para criar a nuvem, requerendo neste caso processamento por computador. O sistema LiDAR genericamente cria nuvens de pontos mais ricas e precisas comparando com as obtidas por fotogrametria (Romero-Jarén & Arranz, 2021).

Estão a ser desenvolvidas técnicas para identificar elementos de uma estrutura automaticamente através da identificação de planos e linhas retas. No entanto, no caso de pontes, devido às formas mais complexas, o processo deve ser realizado por um modelador qualificado, sendo a nuvem de pontos utilizada apenas como referência. A *Figura 21* representa uma proposta de automatismo na modelação. No entanto, o sucesso deste processo depende do facto de ser realizado por especialistas em pontes.

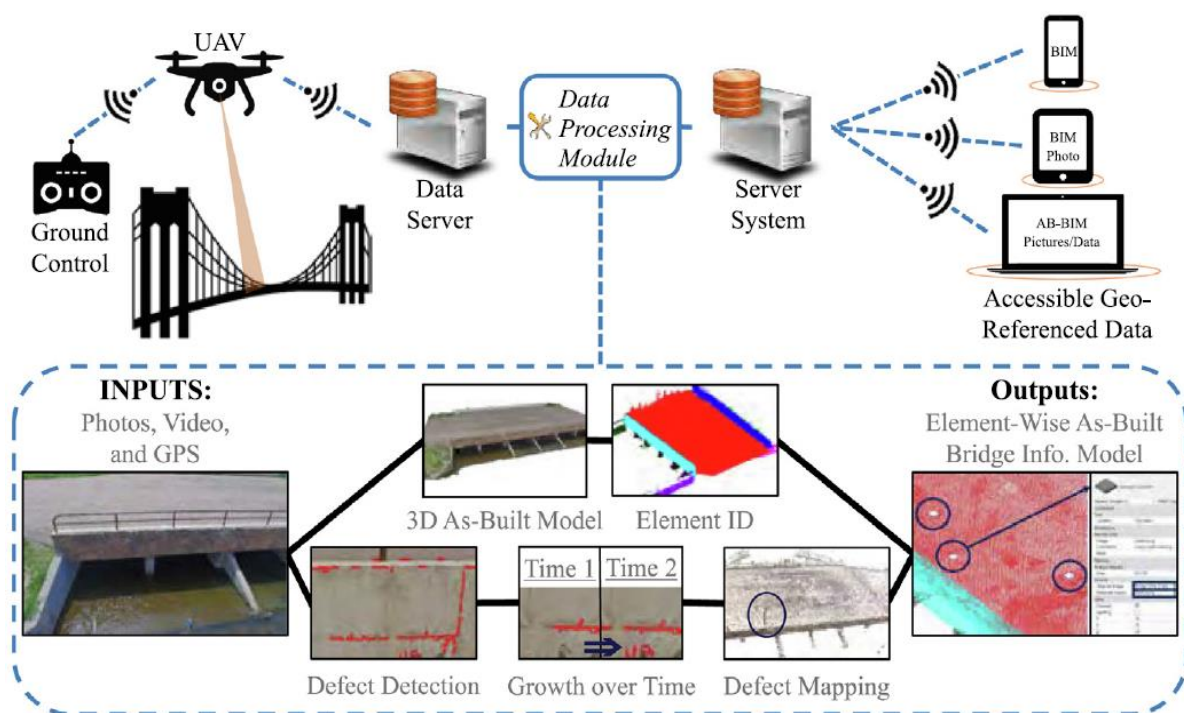


Figura 21 – Proposta de automatismo de um sistema de inspeção de pontes (Retirado de Perry et al., 2020)

Dependendo do ativo que se pretende modelar, é necessário estabelecer previamente o equipamento de levantamento mais apropriado. Os equipamentos de *laser scanning* revelam-se otimizados para espaços interiores ou para elementos com pouca altitude. Os VANTs revelam-se excepcionais para elementos/estruturas mais avultados.



### 4.1.3. Modelação e parâmetros

Com base nas peças desenhadas existentes (e.g. desenhos de projeto, telas finais) e com auxílio das nuvens de pontos, é possível realizar a modelação dos diversos elementos estruturais de uma ponte. É importante estabelecer primeiro os objetos a serem utilizados no modelo. Este processo pode desenvolver-se em conjunto com o modelo mediante as suas necessidades. Realça-se a importância da utilização da modelação paramétrica para possibilitar a utilização de um único objeto múltiplas vezes, uma prática comum na construção de pontes.

A *Figura 22* serve de exemplo dos vários elementos necessários (objetos) para modelar a estrutura completa (*assembly*).

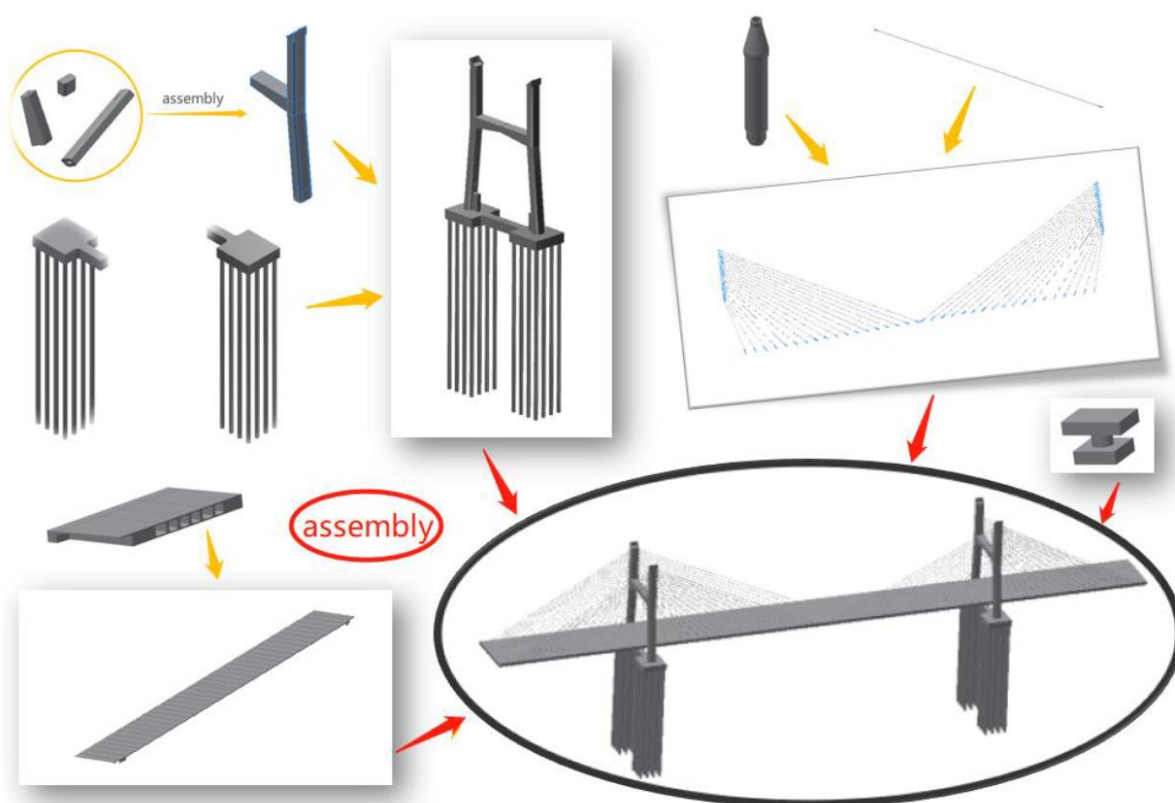


Figura 22 - Exemplo de modelação de ponte (Retirado de Wan et al., 2019)

Como já referido anteriormente, todos os objetos presentes num modelo contêm parâmetros associados aos mesmos. Estes devem sempre incluir material e dimensões, bem como quaisquer informações adicionais que sejam necessárias de acordo com o LOIN definido (e.g. fabricante, referências aos relatórios de inspeção existentes na CDE).

No caso de se utilizar objetos extraídos de uma biblioteca de objetos, é imperativo verificar os parâmetros, em particular, os parâmetros geométricos, para garantir que estes representam corretamente o elemento *as-built* de acordo com o LOIN estabelecido.

#### **4.1.4. Modelação de defeitos**

Um aspeto fundamental para a perceção do estado de condição *as-built* de uma ponte, está nas anomalias encontradas em inspeções. Devido á elevada complexidade de modelação de, por exemplo, fissuras presentes nos elementos, Perry et al. (2020) sugere a utilização do conceito de “cubos de dano” como forma de modelar as diversas patologias detetadas. Neste tipo de modelação, são utilizados paralelepípedos para indicar a superfície onde se identificou um defeito, e utilizam-se parâmetros para identificar o tipo de defeito e referenciar os documentos relativos á sua inspeção.

Este mesmo autor sugere ainda a utilização do *Dynamo* para a criação automática destas formas, indicando a posição e tamanho exato destes defeitos, com base nos ficheiros de dados (no caso, em formato .csv) proveniente do relatório de inspeção realizado. Qualquer alteração a este ficheiro é refletida diretamente no modelo.

As fotografias das anomalias podem ser utilizadas como textura especifica para estes elementos “cubo de dano”. Na visualização da estrutura, estes defeitos destacam-se e é possível selecionar um destes cubos para visualizar informação detalhada acerca da anomalia em questão.

Os “cubos de dano” devem igualmente respeitar as normas do IFC, classificando o tipo de defeito e as propriedades necessárias para descrever esse defeito juntamente com os valores correspondentes, criando o chamado atlas de dano sobre o defeito em questão. A *Figura 23* mostra o resultado da aplicação destes cubos para identificar os locais exatos destes defeitos, incluindo informações intrínsecas na tabela de propriedades (direita) de uma destas anomalias mostrando as diferentes propriedades inseridas. Perry et al. (2020) propõe a utilização dos parâmetros apresentados na *Tabela 8* para descrever estes cubos de dano.

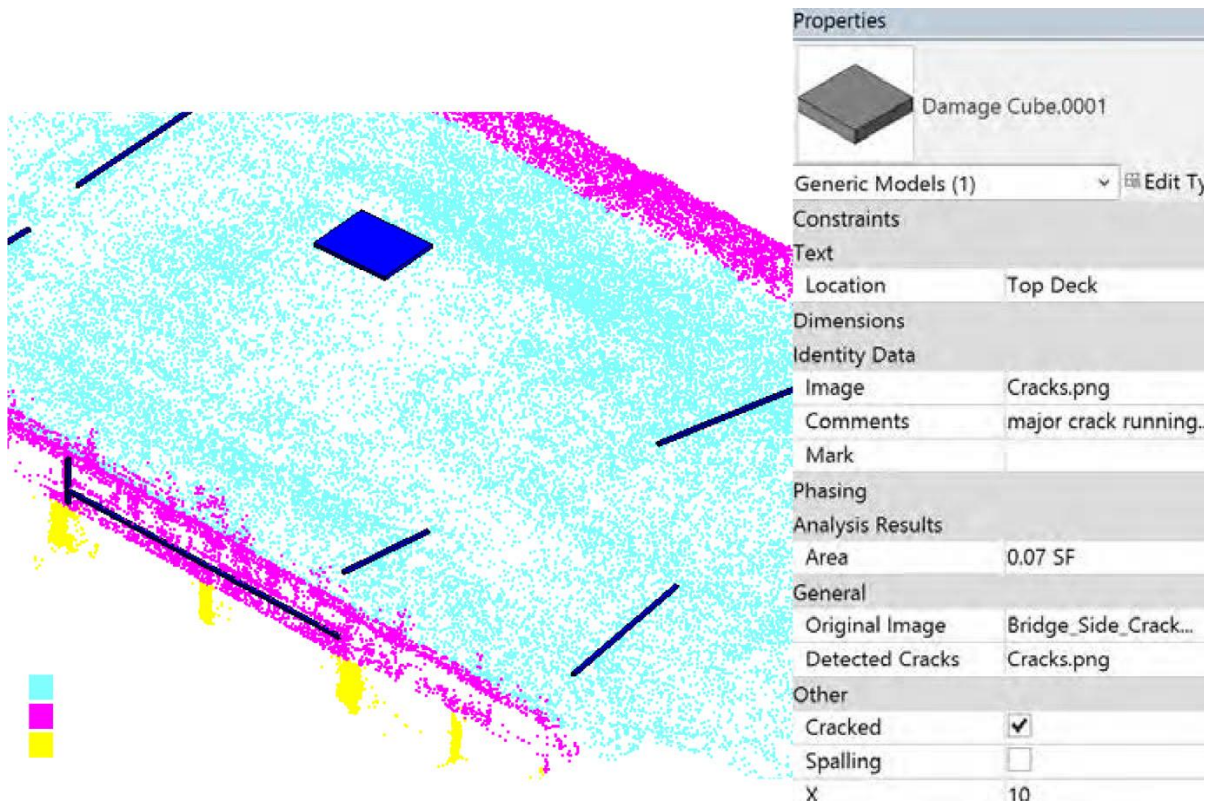


Figura 23 - "Cubos de dano" (Retirado de Perry et al., 2020)

Parâmetros propostos	Valores possíveis
<b>Comentário</b>	"Possível delaminação"
<b>Área do defeito (in²)</b>	1728
<b>Largura do defeito (in)</b>	N/A
<b>Fendilhação</b>	Não
<b>Delaminação</b>	Sim
<b>Fragmentação</b>	Não
<b>Dimensão em visualização</b>	5 feet x 4 feet x 2 in
<b>Localização relativa</b>	"Tabuleiro"
<b>Localização global</b>	(-2.5091, 15.2083, 0.5000)
<b>Imagem original</b>	"C:\0716.JPEG"
<b>Imagem do dano</b>	"C:\0716_DD.JPEG"
<b>Link do relatório</b>	"C:\FCPALM_201506.PDF"

Tabela 8- Proposta de parâmetros para "cubos de dano" (Adaptado Perry et al., 2020)

A *Figura 24* exemplifica a utilização deste método na visualização de diferentes tipos de dano em vigas de betão armado. Nesta é possível verificar dois tipos de dano através da utilização de cores distintas nos objetos que identificam cada dano.

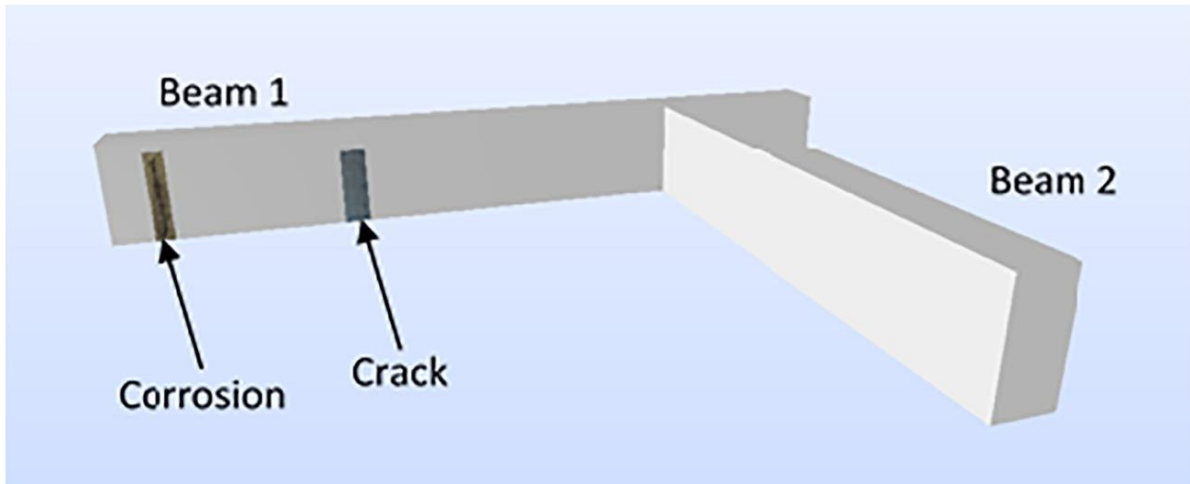


Figura 24 - Visualização de "cubos de dano" (Retirado de Sacks et al., 2018)

Em alternativa, é possível a modelação de defeitos detetados através da utilização de *surface features*. Estas são modelações mais exatas das anomalias encontradas, provenientes do levantamento através de nuvem de pontos dedicada ao elemento em questão, produzindo um *void*, ou vazio, que representa o desgaste do material da peça. A *Figura 25* exemplifica a aplicação desta técnica a uma viga de betão armado onde se verifica a remoção de betão através do *void*, causando a exposição das armaduras, informação importante na gestão da estrutura.

Note-se, no entanto, que a utilização desta estratégia é essencialmente adequada nos tipos de danos que resultam em perda de material. No caso de danos em que tal não aconteça (e.g. eflorescências) esta técnica não será a mais adequada, sendo a combinação das duas técnicas abordadas uma possível solução.

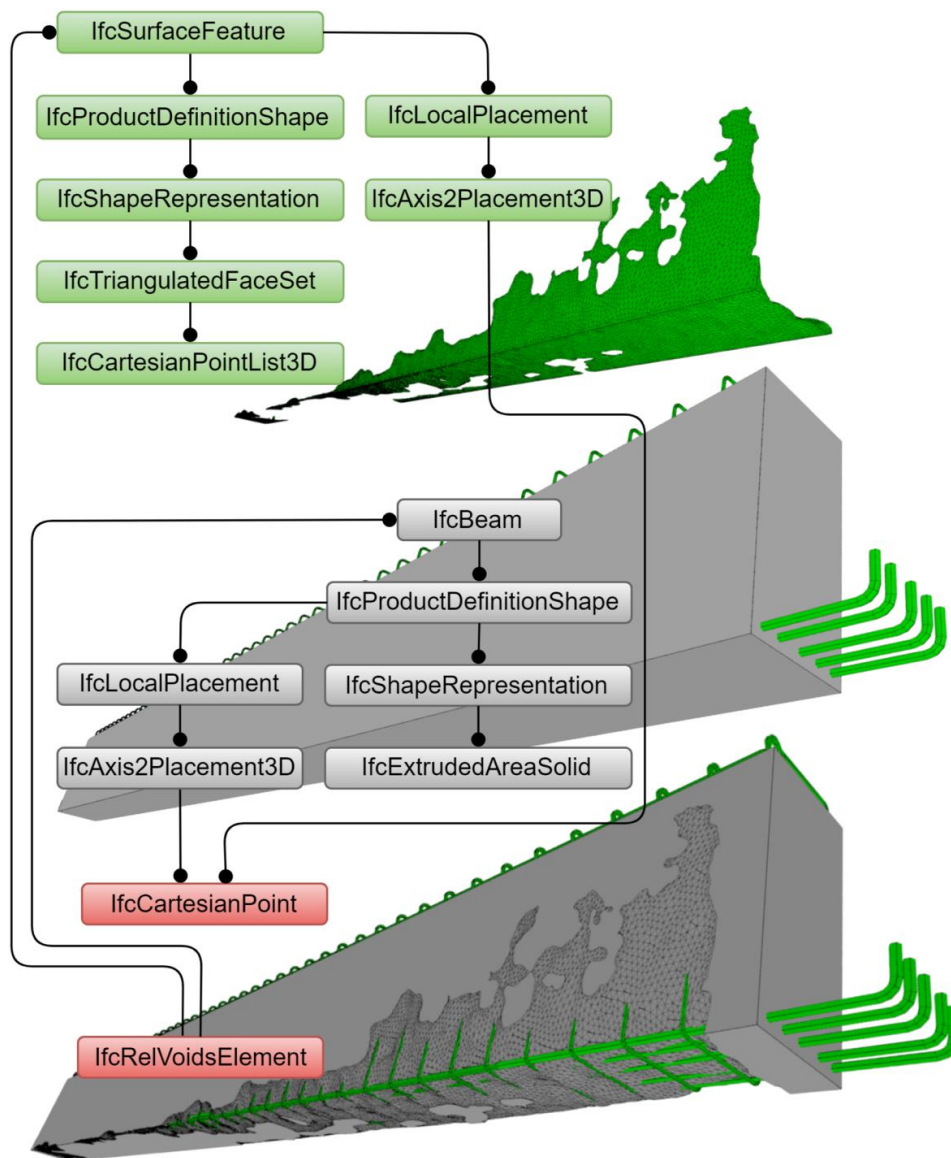


Figura 25 - Exemplo de utilização de *surface feature* (Retirado de Isailović et al., 2020)

#### 4.1.5. IFC com inclusão de defeitos

Independentemente de se utilizar a técnica dos “cubos de dano”, das *surface features* ou outras, de modo a garantir a interoperabilidade do modelo, devem igualmente respeitar as normas IFC, classificando o tipo de defeitos e as propriedades necessárias para descrever esse defeito juntamente com os valores correspondentes.

Uma proposta para o enriquecimento semântico dos ficheiros IFC que considera a inclusão dos defeitos foi apresentada no projeto *SeeBridge* (Sacks et al., 2018). A classificação dos defeitos corresponde a subcategorias de grupos maiores. Os defeitos são classificados como *ElementDefect*, que são uma subcategoria de *BridgeElement*, o elemento em que esta inserido, bem como *Defect*, o conjunto

de defeitos, ambos estes são subcategorias do elemento ponte. A *Figura 26* demonstra esta hierarquia que existe dentro de um modelo, em que uma ponte pode ser dividida entre os seus diversos elementos ou os seus diversos defeitos, que convergem nos defeitos individuais.

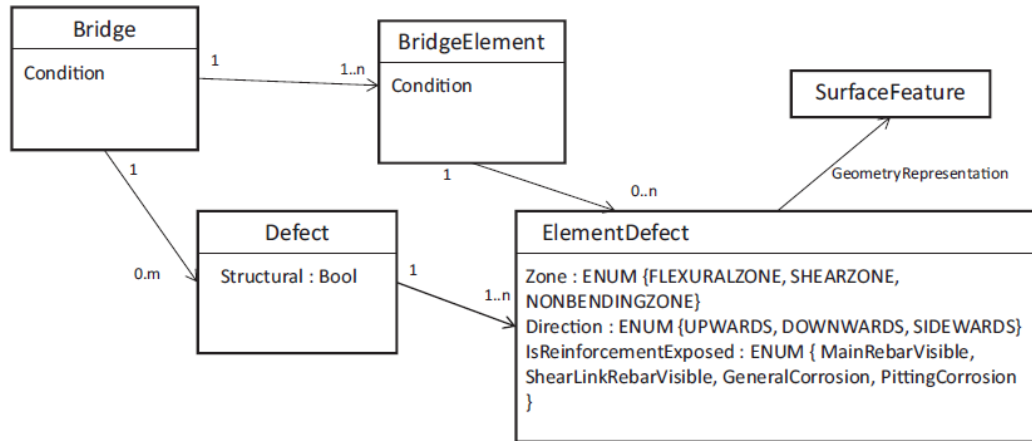


Figura 26 – Esquema de hierarquia IFC (Retirado de Sacks et al., 2018)

Sacks et al., (2018) indica que na definição do model view do *SeeBridge*, os defeitos na superfície dos elementos são modelados como *IfcElementAssembly* com *PredefinedType='USERDEFINED'* e *ObjectType='DEFECT'*, enquanto que os defeitos nos próprios elementos são modelados como *IfcSurfaceFeature*. Os defeitos podem, além disso, ser classificados pelo tipo de defeito indicados de seguida:

- Fragmentação / Exposição de armaduras / Corrosão
- Fendilhação
- Delaminação
- Gelo-degelo
- Eflorescência
- Escamação
- Abrasão/Desgaste

Dependendo do tipo de defeito a modelar, estes devem ser caracterizados, descrevendo as suas propriedades, podendo estas assumir valores numéricos ou valores booleanos, ou seja, sim ou não. A *Tabela 9* apresenta um exemplo das diferentes propriedades necessárias de caracterizar num defeito do tipo “fendilhação”, não limitadas a esta seleção. Os autores também propõem características diferentes para cada tipo de defeito, pelo que devem ser estudados cada defeito para as características necessárias de descrever.

<b>Tipo de defeito</b>	<b>Propriedade</b>	<b>Intervalo de valores</b>
<b>Fendilhação</b>	Largura	0.3 mm, 1 mm, 2mm
	Decrescente	Sim/Não
	Crescente	Sim/Não
	Orientação relativa ao suporte	$\pi/2, \pi/4, 0, -\pi/4$
	Área de comportamento é flexão	Sim/Não
	Áres de comportamento ao corte	Sim/Não
	Perto do suporte	Sim/Não

Tabela 9 - Propriedades possíveis de atribuir a um defeito de fendilhação (Excerto de Sacks et al., 2018)

## 4.2. Utilização do modelo BIM para gerir a ponte

Com a informação cadastral de uma ponte devidamente aglomerada num modelo BIM, e utilizando as diferentes ferramentas disponíveis, esta pode ser a base para a gestão da ponte, entrando no mundo do BIM multidimensional. Temáticas obrigatórias na gestão de uma ponte além da informação 3D incluem, mas não se limitam a tempo e custos. Outras dimensões podem ser abordadas se forem do interesse das entidades gestoras, sendo que Kaewunruen et al. (2020) utiliza o BIM 6D como uma forma de representar as dimensões estudadas mais frequentemente, incluindo agendamentos, custos e uma temática que tem cada vez mais relevância que é o impacto no meio ambiente de uma ponte no seu período de vida útil.

O modelo BIM pode ser considerado uma base de dados onde se podem aferir todas as anomalias. Gestores da infraestrutura podem utilizar a informação sobre o tipo de defeito bem como o(s) elemento(s) que este atinge, podendo verificar quais as anomalias mais importantes de solucionar.

Ding et al. (2012) sugere que a base para um modelo BIM de várias dimensões é o modelo 3D. A representação precisa dos objetos fundamentais de uma ponte é necessária para que as informações inerentes a esses elementos possam ser associadas ao modelo. O tempo é a primeira dimensão a adicionar ao modelo BIM 3D, passando este a ser considerado um modelo BIM 4D. É especialmente fulcral na fase de organização da construção de uma estrutura, mas pode ser utilizada nos trabalhos de manutenção ou intervenção ocasional durante o seu ciclo de vida.

O *Navisworks* é um exemplo de um software possível de utilizar para preparar uma intervenção, organizar os diferentes trabalhos necessários e simular as suas operações ao longo do tempo bem como a verificação de sobreposições entre as mesmas. É possível importar esta informação de volta para o modelo BIM onde a informação, em formato de calendário, pode ser conferida e/ou utilizada para outros fins. A *Figura 27* exemplifica um cronograma realizado no software *Navisworks*.

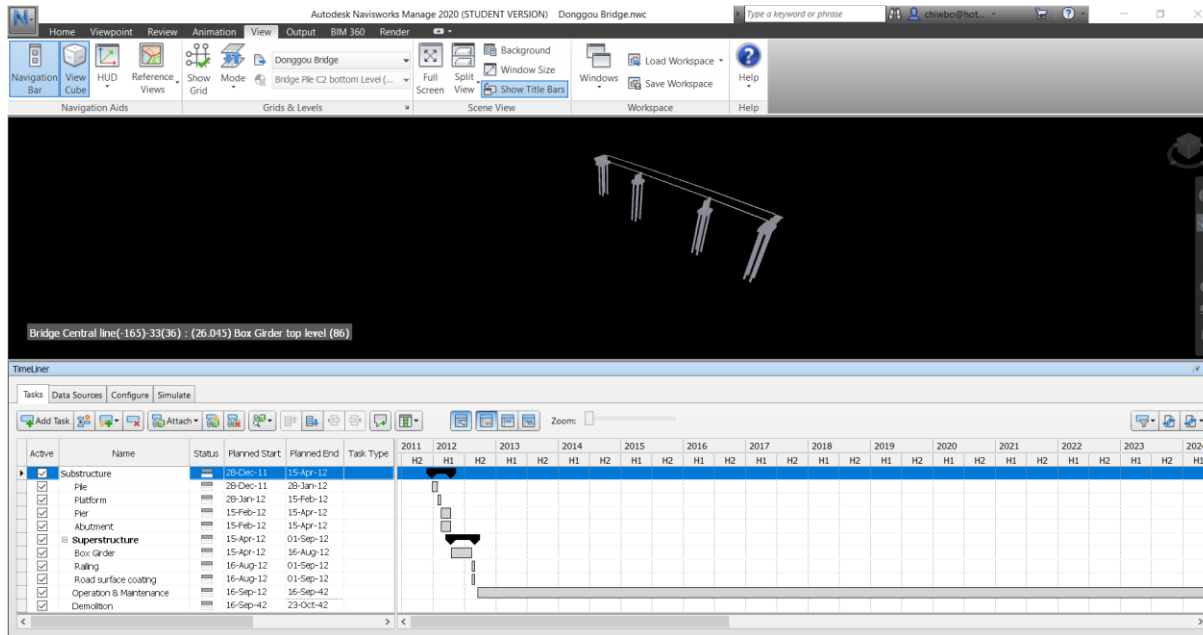


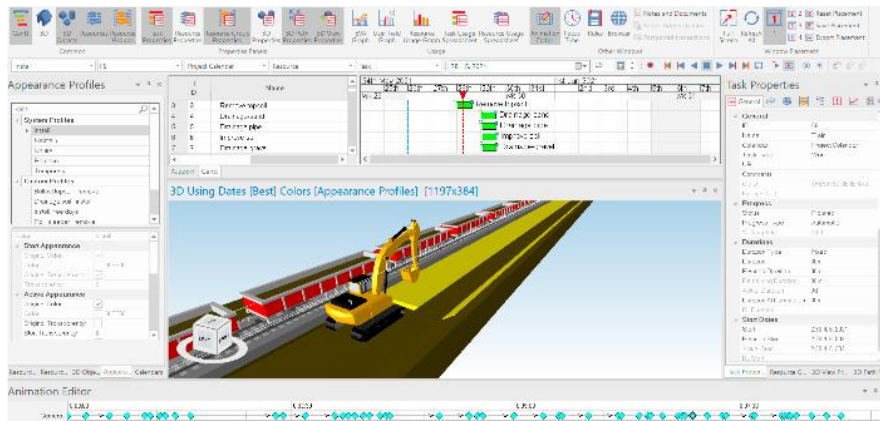
Figura 27 - Exemplo de cronograma em *Navisworks* (Retirado de Kaewunruen et al., 2020)

Matejov & Šestáková (2021) sugere que estes softwares de BIM 4D utilizam como base um diagrama de Gantt para estabelecer as diversas tarefas a realizar durante uma intervenção. Programas como o Synchro Pro permitem, baseados no modelo, nos procesos construtivos e no diagrama de Gantt, preparar seqüências de vídeo a demonstrar as diversas tarefas a realizar, bem como a direção em que os trabalhos são realizados (*Figura 28*).

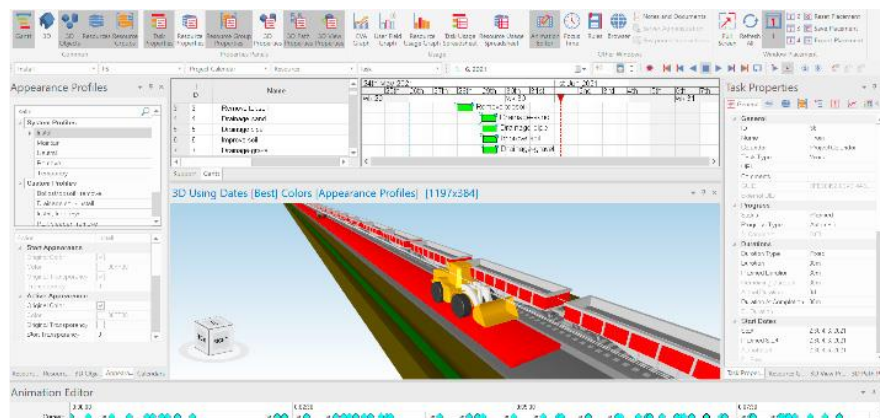
Podem ser assim gerados mapas de quantidades e de trabalhos automatizados para preparar uma intervenção. O Web-BIM surge como uma eficiente forma de partilhar esta informação bem como a informação geométrica acerca da intervenção por todo o pessoal envolvido nos trabalhos.

Com base nas operações regulares sobre a estrutura e das intervenções ocasionais, é possível calcular os custos associados à sua exploração e os materiais, mão-de-obra e maquinaria necessários nas intervenções para realizar uma estimativa do custo total para um determinado período de tempo, entrando assim no BIM 5D.





(a)



(b)

Figura 28 - Exemplo de tarefas modeladas no Synchro Pro: (a) Remoção do solo; (b) Instalação do balastro (Retirado de Matejov & Šestáková, 2021)

Dada a possibilidade de cálculo de diferentes formas de intervir na ponte, é possível analisar o custo associado a cada uma por forma a optar pela forma de intervenção economicamente mais viável. No caso das emissões de gases carbónicos devido á atividade de Engenharia Civil, e o aumento da preocupação com os mesmos, o estudo do impacto que uma nova construção, intervenção ou simples exploração de uma ponte é essencial.

Com uma intervenção numa estrutura, Kaewunruen et al., (2020) foca a exploração da produção de gases carbónicos na questão dos materiais e na maquinaria. É possível utilizar a produção de carbono para uma dada quantidade de todos os materiais, principalmente em termos de betão e armaduras, e utilizando o total obtido no modelo BIM, calcular o impacto destes mesmos.

Para o caso da maquinaria, este inclui toda a utilização de maquinaria ao longo do ciclo de vida de uma ponte, quer a utilizada para construção e intervenção, mas também a maquinaria utilizada na exploração da mesma. Dados os consumos de todos estes equipamentos e a duração de utilização

estabelecida no modelo BIM 4D, é possível calcular o total de emissões provenientes destes equipamentos. A *Figura 29* exemplifica uma lista em *Revit* com o total de custos e de massa de gases carbónicos resultantes associados aos materiais utilizados numa superestrutura.

<Bridge Superstructure Cost & Carbon emission Schedule>								
A	B	C	D	E	F	G	H	I
Family	Type	Count	Volume	Structural Material	Unit Cost	Total Cost	Embodied CO2 coefficient	Embodied carbon emission
Box Girder - 2nd S	1# segment	1	34.93 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥19382.42	362.40 kg/m³	12659.39 kg
Box Girder - 2nd S	2# segment	1	32.75 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥18169.10	362.40 kg/m³	11866.92 kg
Box Girder - 2nd S	3# segment	1	35.26 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥19566.46	362.40 kg/m³	12779.59 kg
Box Girder - 2nd S	4# segment	1	33.51 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥18593.64	362.40 kg/m³	12144.21 kg
Box Girder - 2nd S	5# segment	1	32.34 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥17945.50	362.40 kg/m³	11720.89 kg
Box Girder - 2nd S	6# segment	1	31.76 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥17621.89	362.40 kg/m³	11509.52 kg
Box Girder - 2nd S	Box Girder - 2nd S	1	7.90 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥4385.34	362.40 kg/m³	2864.23 kg
Box Girder - 1st &	segment 1#	1	34.83 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥19325.36	362.40 kg/m³	12622.12 kg
Box Girder - 1st &	segment 2#	1	32.66 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥18119.61	362.40 kg/m³	11834.60 kg
Box Girder - 1st &	segment 3#	1	35.18 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥19519.30	362.40 kg/m³	12748.79 kg
Box Girder - 1st &	segment 4#	1	33.44 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥18555.33	362.40 kg/m³	12119.19 kg
Box Girder - 1st &	segment 5#	1	32.29 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥17915.15	362.40 kg/m³	11701.06 kg
Box Girder - 1st &	segment 6#	1	31.33 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥17381.09	362.40 kg/m³	11352.25 kg
Box Girder - 1st &	Closure segment	1	15.79 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥8761.47	362.40 kg/m³	5722.44 kg
Box Girder - On Sit	Box Girder - On Sit	1	88.46 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥49083.28	362.40 kg/m³	32058.14 kg
Box Girder - Segm	Box Girder - Segm	1	152.24 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥84474.32	362.40 kg/m³	55173.37 kg
Box Girder - 1st &	segment 1#	1	34.83 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥19325.36	362.40 kg/m³	12622.12 kg
Box Girder - 1st &	segment 2#	1	32.66 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥18119.61	362.40 kg/m³	11834.60 kg
Box Girder - 1st &	segment 3#	1	35.18 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥19519.30	362.40 kg/m³	12748.79 kg
Box Girder - 1st &	segment 4#	1	33.44 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥18555.33	362.40 kg/m³	12119.19 kg
Box Girder - 1st &	segment 5#	1	32.29 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥17915.15	362.40 kg/m³	11701.06 kg
Box Girder - 1st &	segment 6#	1	31.33 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥17381.09	362.40 kg/m³	11352.25 kg
Box Girder - 1st &	Closure segment	1	15.79 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥8761.47	362.40 kg/m³	5722.44 kg
Box Girder - On Sit	Box Girder - On Sit	1	88.46 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥49083.28	362.40 kg/m³	32058.14 kg
Box Girder - 2nd S	Box Girder - 2nd S	1	47.42 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥26312.02	362.40 kg/m³	17185.37 kg
Box Girder - 2nd S	1# segment	1	34.93 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥19382.42	362.40 kg/m³	12659.39 kg
Box Girder - 2nd S	2# segment	1	32.75 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥18169.10	362.40 kg/m³	11866.92 kg
Box Girder - 2nd S	3# segment	1	35.26 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥19566.46	362.40 kg/m³	12779.59 kg
Box Girder - 2nd S	4# segment	1	33.51 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥18593.64	362.40 kg/m³	12144.21 kg
Box Girder - 2nd S	5# segment	1	32.34 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥17945.50	362.40 kg/m³	11720.89 kg
Box Girder - 2nd S	6# segment	1	31.76 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥17621.89	362.40 kg/m³	11509.52 kg
Box Girder - Segm	Box Girder - Segm	1	152.24 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥84474.32	362.40 kg/m³	55173.37 kg
Bridge Deck	Bridge Deck	1	109.60 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥60813.10	362.40 kg/m³	39719.33 kg
Bridge Deck	Bridge Deck	1	73.98 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥41048.84	362.40 kg/m³	26810.55 kg
Bridge Deck	Bridge Deck	1	73.98 m³	Concrete, C55	¥554.86	¥41048.84	362.40 kg/m³	26810.55 kg
Grand total: 35			1626.42 m³			¥902435.96		589414.97 kg

Figura 29 - Exemplo de cálculo do impacto ambiental de uma ponte em *Revit* (Kaewunruen et al., 2020)

Investidores e gestores podem exigir mais dimensões para o modelo BIM, de acordo com o pretendido no LOIN. Dada a capacidade de cálculo do BIM, é possível estudar diferentes abordagens para o ativo em questão, e as entidades responsáveis podem escolher a forma de intervenção mais eficiente em termos de custos mais baixos garantindo as necessidades de segurança e exploração da obra de arte exigidos. Autores como Guillen et al. (2016) defendem a utilização do BIM 7D, que engloba as questões do BIM FM, planeamento e execução de operações e manutenção para o ciclo de vida de uma estrutura.

Este processo vai de encontro aos módulos de gestão de uma ponte, em que é realizado um estudo de intervenções no módulo de Manutenção, Reparação e Reabilitação, e a decisão final da intervenção mais apropriada refere-se ao módulo de otimização de recursos. (*Figura 30*)



Figura 30 - Módulos do BMS (Pregolato, 2019)

### 4.3. Análise estrutural

Um aspecto importante de uma ponte é o seu desempenho ao longo do seu ciclo de vida, sendo a análise estrutural a disciplina responsável por assegurar o comportamento desejado e seguro da estrutura. O modelo BIM serve como base perfeita para a análise estrutural de uma ponte que devido ao aparecimento de anomalias e defeitos não apresenta o mesmo desempenho para o qual foi concebida, devendo-se verificar a sua segurança apesar da diminuição da sua capacidade de carga.

Muitos softwares de modelação BIM, nomeadamente o *Revit*, permitem a criação de um modelo analítico juntamente com a modelação 3D que serve como fonte para criação de um modelo de elementos finitos utilizado por softwares dedicados a análise estrutural como por exemplo o *Robot*, para verificar a segurança da estrutura comparativamente ao projeto original, (*Figura 31*).

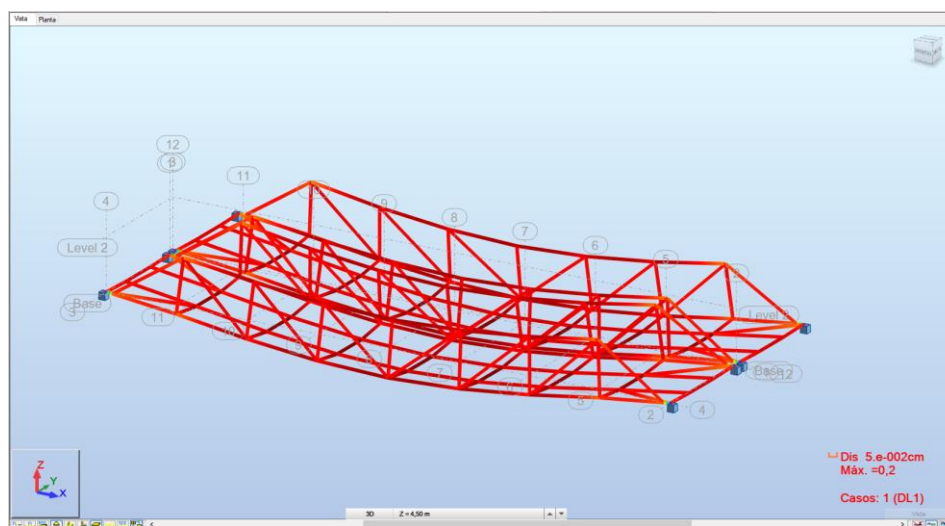


Figura 31 - Exemplo análise estrutural

Segundo (Omar & Nehdi, 2018), é possível utilizar a diferença de desempenho de uma peça não danificada com uma peça danificada para estudar a capacidade de carga residual na peça devido aos danos ocorridos ao longo do ciclo de vida. Estas previsões podem ser obtidas de diversas formas, incluindo sensores instalados na ponte ou cálculo através da informação obtida nas inspeções visuais. Os autores também indicam a possibilidade de comparação entre as deformações esperadas e as que

atualmente existem na estrutura para identificar a zona mais crítica para segurança da ponte, definindo a fiabilidade da estrutura e a necessidade de uma intervenção.

Efeitos como o processo de construção, montagem, propriedades dos materiais, precisão geométrica, condições ambientais e a presença de defeitos são o foco principal no que diz respeito a desenvolver um modelo de análise estrutural robusto (Omar & Nehdi, 2018). A análise estrutural pode também ser utilizada para o estudo do seu desempenho estrutural quando existe alguma alteração em relação ao estabelecido no projeto, por exemplo, quando se pretende substituir elementos danificados por elementos diferentes, ou aplicação de soluções de reforço, é importante estudar os efeitos no comportamento estrutural que este tipo de ações de manutenção pode ter.

Por fim, com o estudo do desenvolvimento destas anomalias, é possível analisar o impacto no desempenho dos elementos que cada anomalia pode ter ao longo do tempo. Existem softwares dedicados ao estudo da degradação de elementos, capazes de prever a variação da capacidade de carga dos elementos afetados ao longo do tempo. A análise estrutural pode assim ser utilizada para estudar o comportamento da ponte em diversos níveis de degradação e prever a necessidade absoluta de intervenção na estrutura.

Esta análise pode ser utilizada pelas entidades gestoras para estabelecerem diferentes estratégias de intervenção em termos de diferentes zonas que devem ser intervencionadas e quando devem ser. A utilização do BIM 5D, relacionado com custos, é obrigatória para analisar a forma mais economicamente viável consoante o orçamento disponível.

## 5. Caso de estudo

Para demonstrar a aplicabilidade das ferramentas BIM em obras já construídas que não utilizam estes recursos, foi escolhida uma ponte ferroviária pertencente á linha de Cascais (Figura 32) como exemplo de criação de um modelo por forma a estabelecer um exemplo de processo de criação de modelo, introdução das informações cadastrais e as possibilidades de exploração deste modelo para a gestão da estrutura.



Figura 32- Ponte da linha de cascais (fonte Google Maps)

Esta estrutura foi escolhida previamente pela possibilidade de acesso á informação referente á ponte, incluindo os desenhos de projeto e os relatórios de inspeções e manutenções. Adicionalmente, existia a possibilidade de participar numa ação de inspeção com recurso a *laser scanning*. Os desenhos de projetos seriam utilizados para modelar a estrutura inicial ao qual se pretendia introduzir as informações proveniente tanto dos relatórios anteriores bem como a informação resultante do *laser scanning*. O objetivo seria a aplicação das metodologias discutidas utilizando um exemplo concreto.

Apesar do contacto estabelecido com a entidade gestora da obra em causa, não foi possível obter informação mais detalhada da mesma, nomeadamente peças desenhadas. Em todo o caso, e para efeitos de demonstração, o que se segue vai ser baseado na informação obtida via Google Maps. Conforme será possível de verificar, mesmo com uma fonte de informação limitada, é possível ilustrar a aplicação do BIM na gestão de pontes. No futuro, havendo informação mais detalhada acerca da ponte, seria apenas necessário atualizar o modelo desenvolvido, pelo que tudo o que se segue continuaria válido.

Assim sendo, considerando as limitações, pretende-se utilizar um modelo para demonstrar os métodos de modelação e de introdução de informação com a informação disponível e estabelecer alguns exemplos em como o modelo pode ser utilizado nos processos de gestão atualmente utilizados.

Nesta secção, haverá uma ênfase no processo e detalhes de modelação da estrutura e da informação adquirida por inspeções visuais (neste caso através de Google Maps). Também serão abordados os requisitos do modelo para que possa ser utilizado em conjunto com outros softwares relacionados com a gestão de pontes.

Devido à informação disponível relativa a esta ponte estar limitada à informação fotográfica via Google Maps, o objetivo em termos de LOIN deste modelo é explorar a modelação dos diversos componentes de uma ponte metálica ferroviária e as suas utilizações na gestão da ponte, bem como algumas ferramentas disponíveis.

Foi escolhido o software Revit para a modelação devido à existência de experiência prévia, ao facto de este ser um dos softwares mais utilizados na construção civil e apresentar métodos de interoperabilidade mais simples com outros softwares (e.g. Robot). O modelo resultante pode ser visualizado na Figura 33.

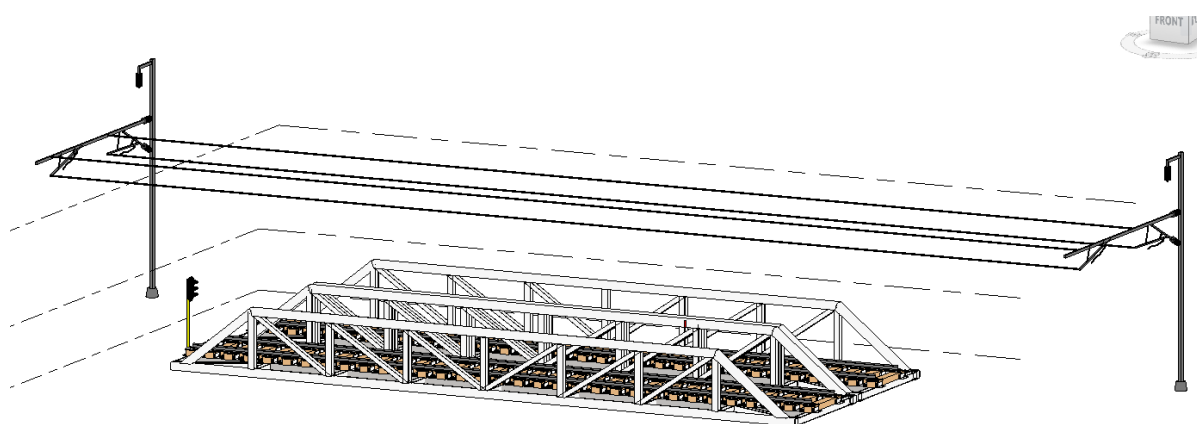


Figura 33 - Modelo Revit desenvolvido

## 5.1. Modelação da estrutura metálica

A modelação dos elementos metálicos estruturais baseia-se em estabelecer no espaço o início e o fim de cada elemento, bem como a sua secção (*Figura 34*).

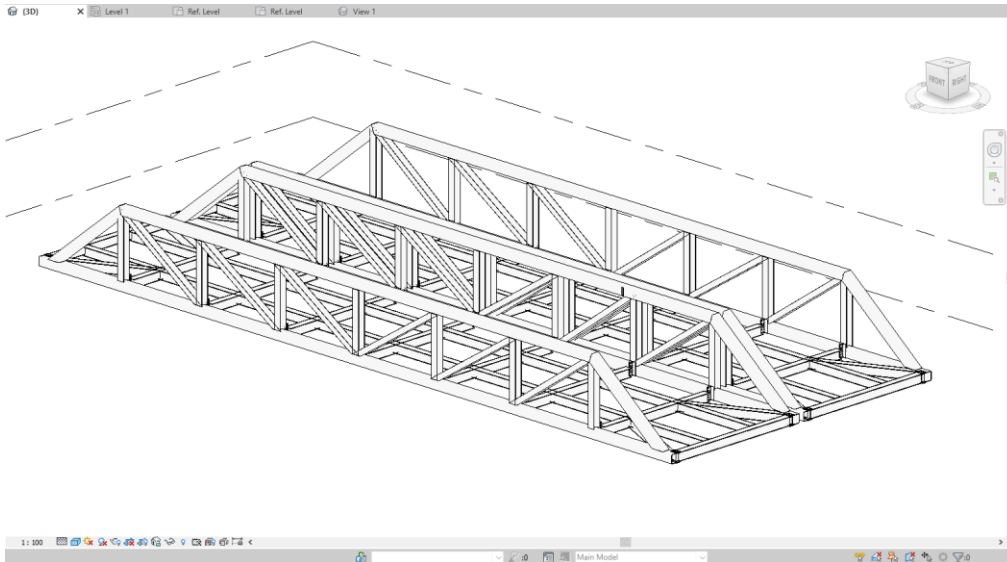


Figura 34 - Estrutura metálica

Um aspeto importante em situações de modelação sem acesso á informação geométrica exata é a utilização de modelação paramétrica. Com a geometria da estrutura a ser definida por parâmetros, é possível alterar estes quando a informação geométrica fica disponível.

O aspeto mais importante numa estrutura metálica é a ligação entre os diversos elementos. O Revit permite seleccionar 2 ou mais elementos para estabelecer uma ligação personalizada entre estes. A ponte em questão apresenta algumas dessas ligações que foram modeladas (*Figura 35*).



Figura 35 – Exemplo de ligação (fonte Google Maps)

No software, é necessário escolher o tipo de ligação que mais se assemelha à conexão existente para editar os seus parâmetros para refletir a realidade. O nível de detalhe destas conexões deve ir de encontro ao LOIN estabelecido. A correta modelação das ligações é o fator mais importante na aptidão do modelo para análise estrutural. O Revit permite detalhar chapas, parafusos e/ou soldaduras como indica a *Figura 36*.

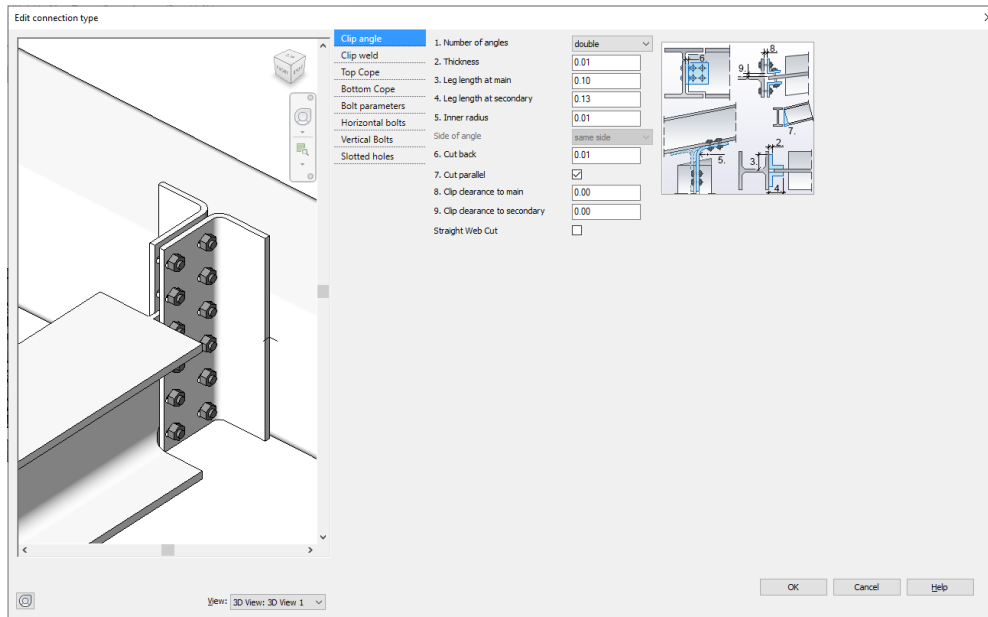


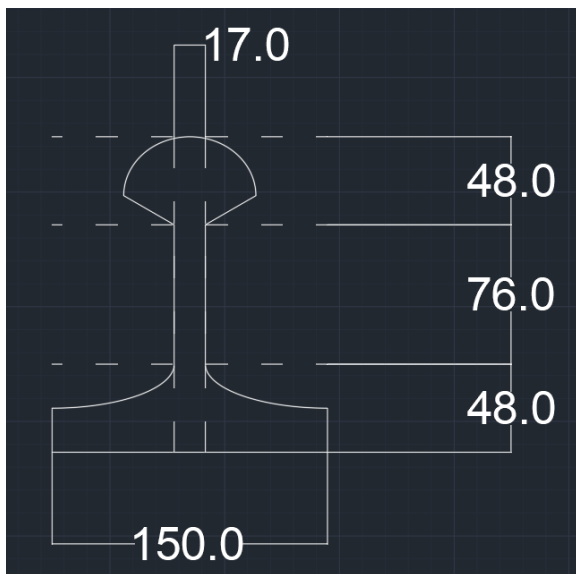
Figura 36 - Edição da ligação

## 5.2. Modelação da via-férrea

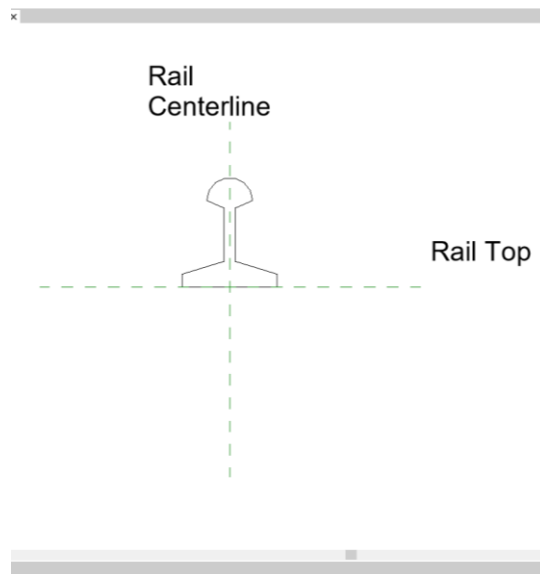
Uma vez que o Revit não oferece forma direta de introdução de uma linha férrea no modelo, foi necessário a modelação de 2 famílias para o efeito. Como se vai recorrer à ferramenta de *railing* para a modelação da linha férrea, serão necessários modelar os carris em si e as travessas.

Para a modelação dos carris, é necessário a criação de uma família do tipo “Metric Profile Rail”. No editor, é necessário estabelecer o perfil dos carris e guardar a família (*Figura 37*).





(a)



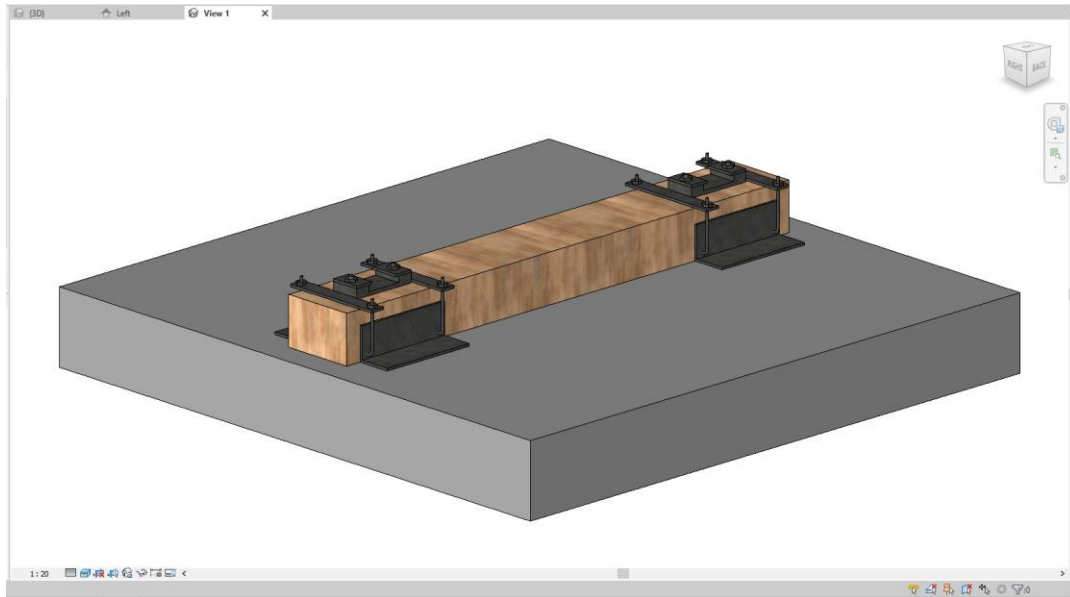
(b)

Figura 37 - Modelação do perfil dos carris: a) Geometria dos carris; b) Perfil em Revit

Para a modelação da travessa é necessário a criação de outra família, desta vez, no tipo “Metric Generic Model face based”. Neste editor, é necessário a modelação inteira do balastro, incluindo as travessas, os suportes e amarrações dos carris, bem como as ligações das travessas á estrutura. Todos estes elementos devem atender às dimensões existentes na via-férrea segundo o LOIN estabelecido (Figura 38).



(a)



(b)

Figura 38 – Travessas; (a) imagem real (fonte Google Maps); (b) modelo BIM

Para aumentar as possibilidades de utilização destas travessas, é possível a criação de mais uma família, do tipo “Metric Baluster”, que permite a rotação das travessas. Para este efeito, foi necessário introduzir a família criada anteriormente no editor e bloquear a sua posição relativamente á guia inferior, como demonstra a *Figura 39*.

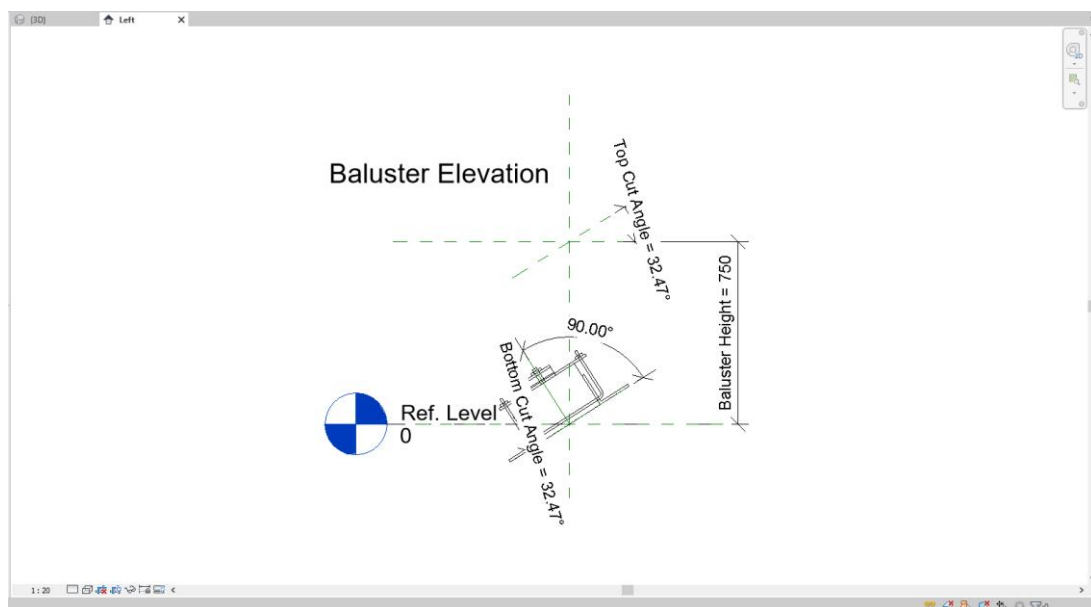


Figura 39 - Travessas em “Metric Baluster”

Feito isto, é necessário a introdução dos elementos no projeto. Primeiramente, as novas famílias devem ser carregadas para o projeto, e de seguida, utilizando a ferramenta *railing*, é necessário estabelecer o eixo da linha férrea.

É necessário editar este elemento para introduzir os balastros, bem como a localização dos carris em relação ao eixo. No “Railling structure” é necessário introduzir dois carris e estabelecer as suas posições sendo a altura da travessa e metade da bitola ibérica respetivamente, como indica a *Figura 40*.

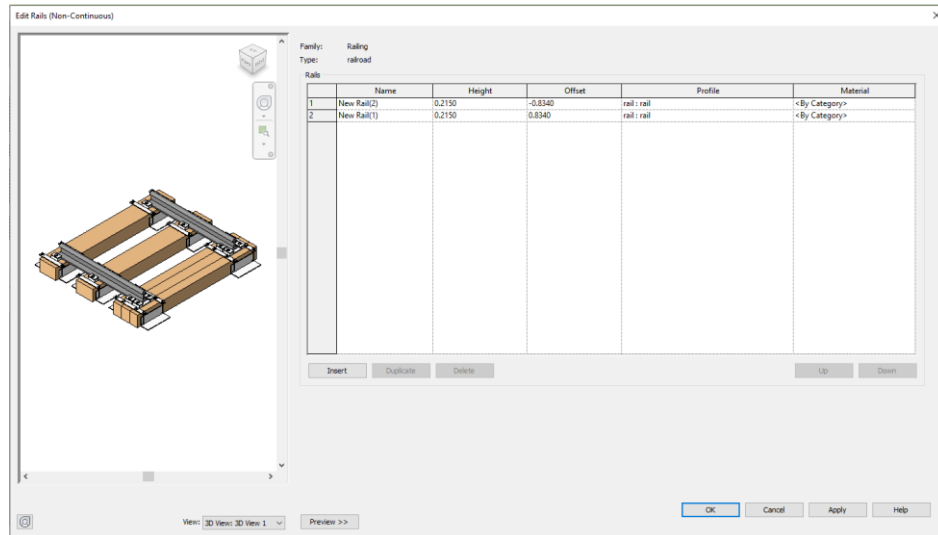


Figura 40 - Edição dos carris

No “Baluster placement” é necessário selecionar a família das travessas e estabelecer o espaçamento entre estas (*Figura 41*)

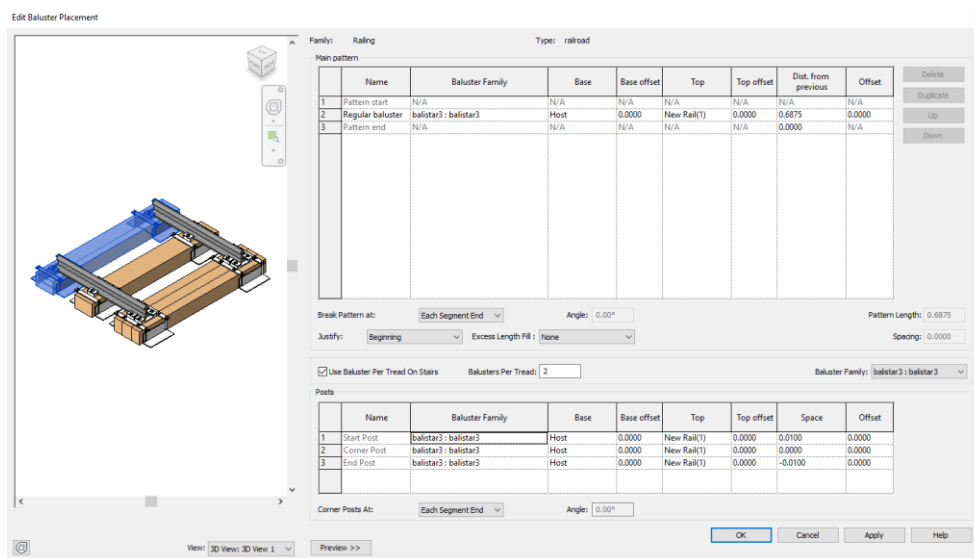


Figura 41 - Edição das travessas

Quanto á modelação dos acessórios na envolvente da via-férrea, estes foram obtidos por meio do repositório de objetos RevitCity.com, sendo necessário ter em conta os direitos de autor destes objetos antes de os utilizar no modelo. Uma vez que estes objetos não têm tanta importância no contexto da ponte, foram utilizados objetos padrão existentes. Caso o LOIN requeresse informação exata destes

elementos, seria necessário a modelação de uma nova família e/ou a adaptação dos objetos padrão de modo a ir de encontro aos requisitos de informação definidos.

Neste caso concreto, foi apenas necessário adaptar o objeto obtido para que abrangesse ambas as linhas férreas. A edição teve de ser realizada manualmente uma vez que o objeto em causa não continha qualquer parametrização (Figura 42).

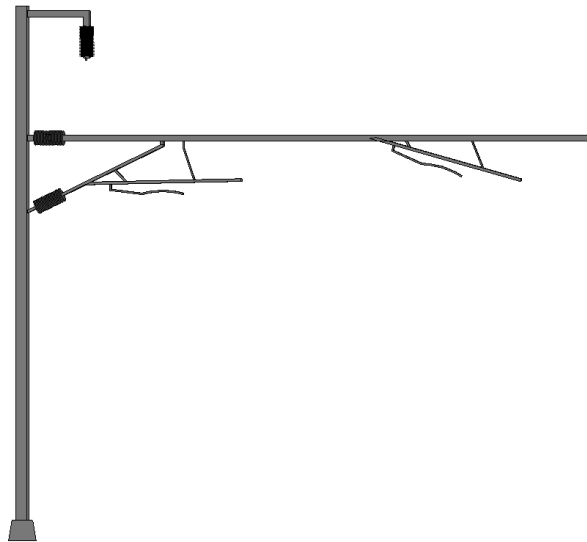


Figura 42 - Catenária

### 5.3. Modelação de defeitos

Através das imagens acessíveis via Google Maps, foi possível verificar a existência de corrosão (Figura 43) na estrutura metálica. O método dos “cubos de dano” é o mais apropriado para modelar este defeito existente na superfície da estrutura.



Figura 43 - Exemplo de anomalia na ponte (fonte Google Maps)

Para cada anomalia detetada, seguindo a estratégia dos “cubos de dano”, é necessário criar uma nova família genérica para alojar a informação da anomalia. Nesta família é possível introduzir as informações pertinentes relativamente á anomalia, bem como introduzir como textura a imagem da mesma, podendo esta ser visualizada no modelo.

Na *Figura 44* estão apresentados os diversos parâmetros utilizados para descrever o “cubo de dano”, seguindo a proposta de Perry et al. (2020), adaptada para a situação. É necessária devida atenção ao tipo de informação a introduzir para cada parâmetro, para defini-los com o tipo correto, neste caso, variando entre texto, valores, sim/não, ficheiros e links.

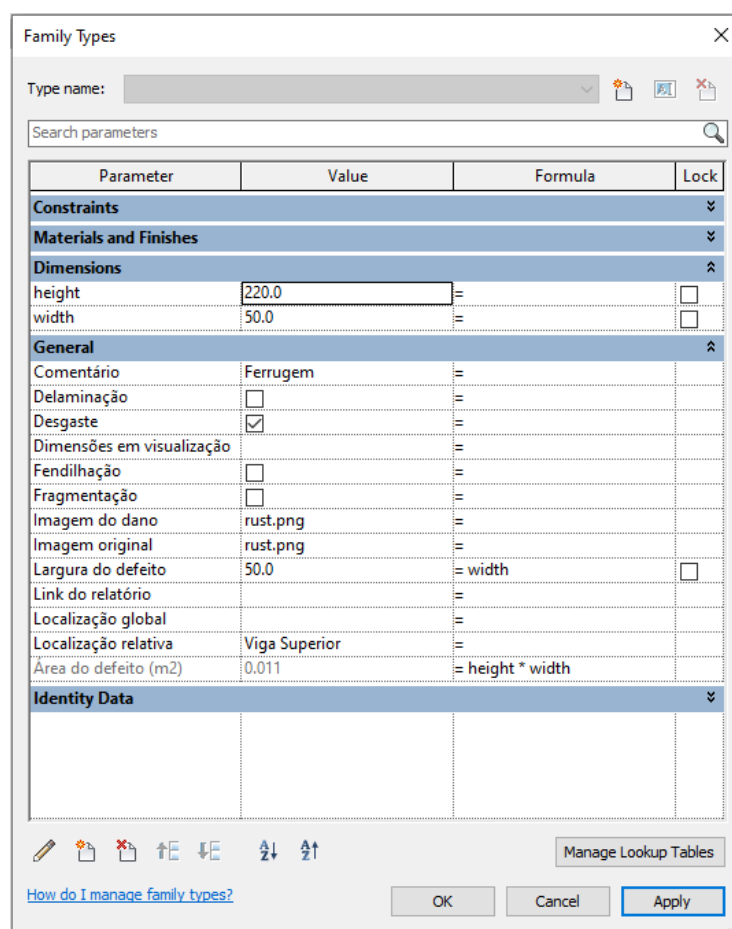
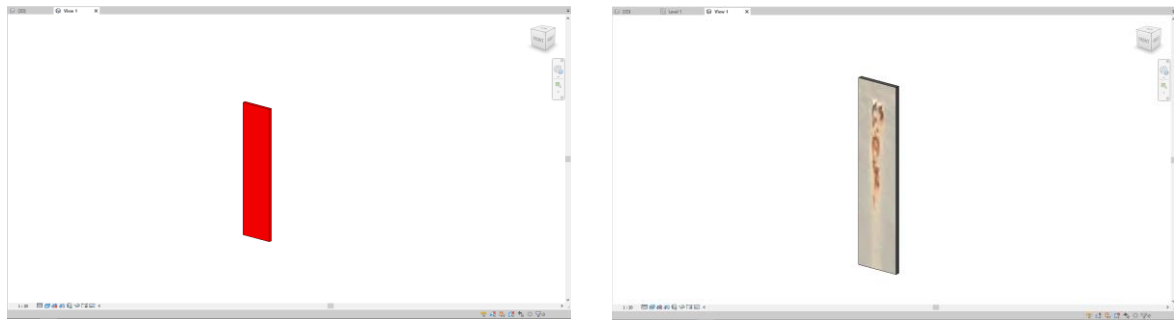


Figura 44 - Parâmetros do cubo de dano

Em termos de visualização, é possível atribuir a este elemento uma cor base (*Figura 45(a)*) que é visível no modo de cores consistentes, e aplicar a fotografia obtida por inspeção ao elemento (*Figura 45 (b)*) para que este seja visível no modo realista.

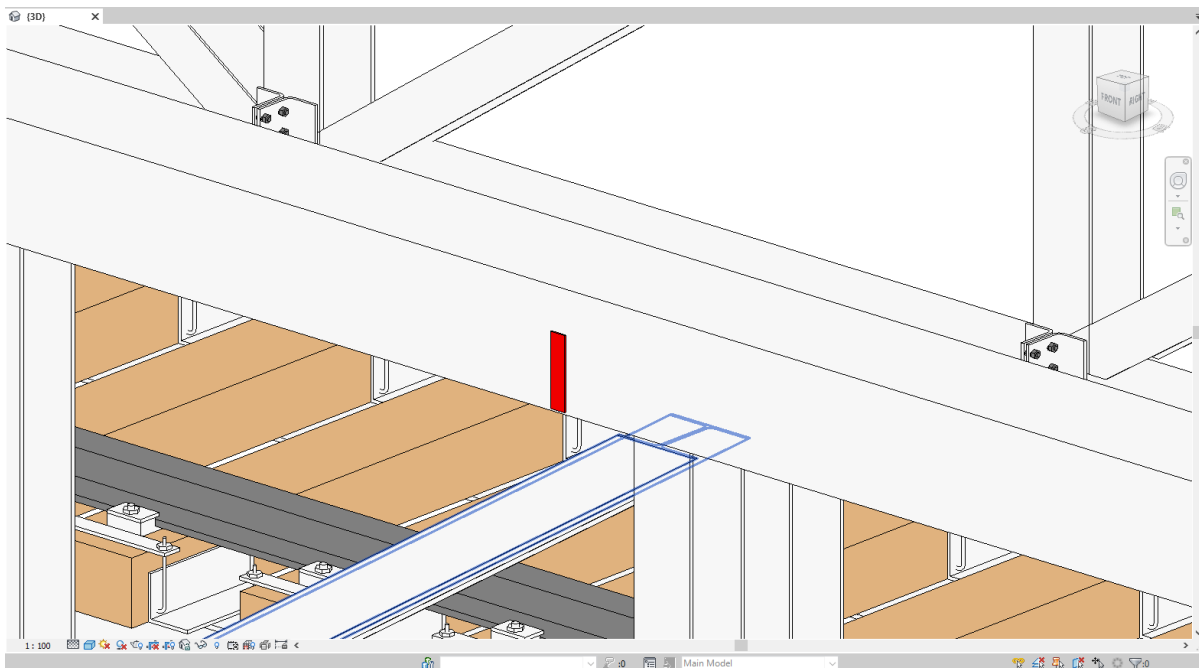


(a)

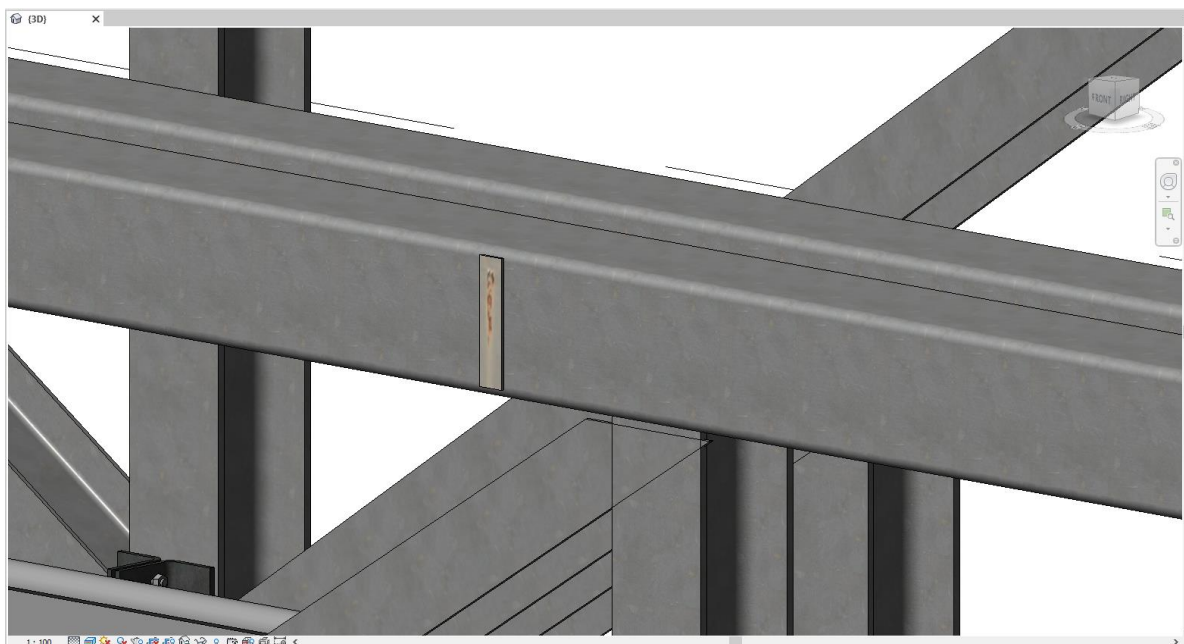
(b)

Figura 45 - Visualização do cubo de dano; (a) usando esquema de cores por tipo de dano; (b) usando a imagem real do dano na superfície do cubo

Esta família pode então ser carregada no projeto e colocada na sua posição. A exatidão deste procedimento deve ir sempre de encontro com o LOIN pretendido. No modo de cores consistentes, as anomalias existentes são facilmente identificadas pela sua cor (*Figura 46(a)*) e no modo realista é possível visualizar a sua aparência real (*Figura 46(b)*).



(a)



(b)

Figura 46 - Visualização no projeto: (a) usando esquema de cores por tipo de dano; (b) usando a imagem real do dano na superfície do cubo

É importante garantir que estes “cubos de dano” estejam colocados no local certo relativamente ao elemento que contém as anomalias que representam. Este é um fator importante para a organização do modelo, permitindo inferir os elementos com mais prioridade de intervenção.

#### 5.4. Modelação paramétrica

Visto que todos os elementos foram modelados apenas com informação fotográfica, ou seja, sem informação geométrica exata, a modelação definida por parâmetros é um dos princípios mais importantes para garantir que o modelo possa ser atualizado quando a informação geométrica esteja disponível.

Todos os objetos base disponíveis no Revit, como os perfis metálicos utilizados na estrutura, apresentam parâmetros que definem a sua geometria, pelo que, com a informação exata dos perfis, é possível introduzir a qualquer altura essa informação no modelo (*Figura 47*).

É de referir que a modelação paramétrica também pode ser aplicada á estrutura em si com recurso a, por exemplo, linhas de referência, para definir a localização no espaço dos diferentes objetos que compõem a estrutura. Em estruturas mais complexas, torna-se mais importante a utilização de parâmetros para definir os elementos para facilitar a sua alteração.

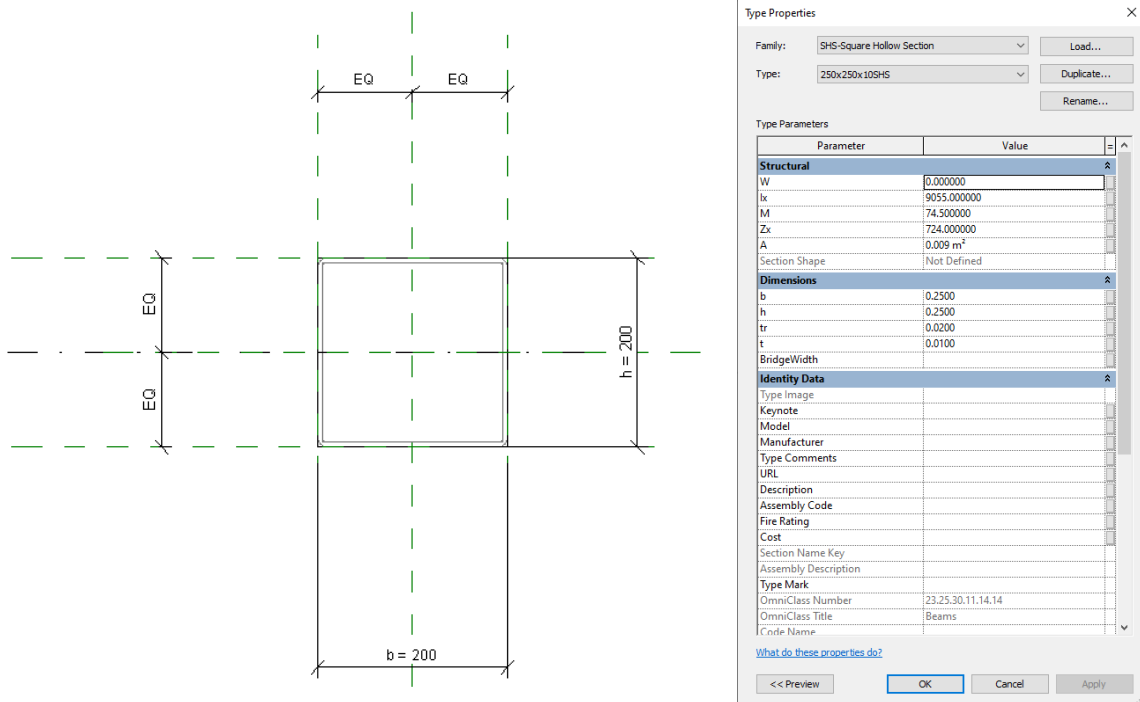


Figura 47- Parametrização de um perfil metálico

## 5.5. Plugins

De modo a automatizar o processo de inserção da informação das inspeções no modelo BIM, foi explorado um plugin do Revit chamado SheetLink. Este permite exportar e importar informação paramétrica relativa a um projeto entre o modelo Revit e uma folha de cálculo (Excel ou Google Spreadsheets). É capaz de exportar para folha de cálculo informação relativa ao projeto em si, os elementos constituintes, parâmetros relativos aos mesmos, calendários e mapas de quantidades, entre outros.

Um fator importante é a capacidade de importação de folhas de cálculo para o modelo Revit. Os ficheiros exportados com este plugin podem ser modificados, tanto manualmente como por outros softwares autónomos para atualizar essas informações no projeto.

Esta capacidade torna-se relevante para processos repetitivos de modificação ou caracterização de muitos objetos, deixando de ser necessária a utilização de ferramentas tipo *Dynamo* para automatizar tal processo, que exigem algum conhecimento de programação. Pode, em alternativa, ser realizado em Excel que promove um ambiente dedicado ao processamento em massa de células.

Existem dois tipos de folhas de calculo possíveis de extrair. Um primeiro tipo, associado às propriedades do projeto, contendo as informações base do projeto e anotações incluídas no modelo. Esta



folha também contém informações gráficas sobre os objetos (*Figura 48*) e modelos analíticos, bem como a listagem das diversas famílias incorporadas no projeto.

Category Name	Line Weight Projection Instance	Line Weight Cut Instance	Line Color (R, G, B)
3 Air Systems	1		0, 0, 0
4 Air Terminals	1		0, 0, 0
5 Analysis Display Style	1		255, 192, 0
6 Analysis Results	1		0, 0, 0
7 Areas	1		0, 0, 0
8   --- Color Fill	1		0, 0, 0
9   --- Interior Fill	1		0, 0, 0
10   --- Reference	1		0, 0, 0
11 Bridge Abutments	1	1	0, 0, 0
12 Bridge Arches	1	1	0, 0, 0
13 Bridge Bearings	1	1	0, 0, 0
14 Bridge Cables	1	1	0, 0, 0
15 Bridge Decks	1	1	0, 0, 0
16 Bridge Foundations	1	1	0, 0, 0
17 Bridge Girders	1	1	0, 0, 0
18 Bridge Piers	1	1	0, 0, 0
19 Bridge Towers	1	1	0, 0, 0
20 Cable Tray Fittings	1		0, 0, 0
21   --- Center line	1		0, 0, 0
22 Cable Tray Runs	1		0, 0, 0
23 Cable Trays	1		0, 0, 0
24   --- Center line	1		0, 0, 0
25   --- Drop	1		0, 127, 0
26   --- Rise	1		0, 127, 0
27 Casework	1	1	0, 0, 0
28   --- Hidden Lines	1	1	0, 0, 0
29 Ceilings	2	2	0, 0, 0
30   --- Common Edges	2	2	0, 0, 0
31   --- Cut Pattern	1	1	0, 0, 0
32   --- Finish 1 (d)	2	2	0, 0, 0
33   --- Finish 2 (d)	2	2	0, 0, 0
34   --- Hidden Lines	2	2	0, 0, 0
35   --- Membrane Layer	1	2	0, 0, 0

Figura 48 - Folha de cálculo (parâmetros do projeto)

Esta folha de cálculo é principalmente utilizada para modificar a aparência de determinados elementos e para melhorar a estética do projeto. Por outro lado, é possível a extração de informação relativa aos elementos que compõem o projeto ou de mapas de quantidades preparados em Revit. A *Figura 49* exemplifica a seleção de parâmetros associados a elementos estruturais para que estes sejam extraídos para uma folha de cálculo.

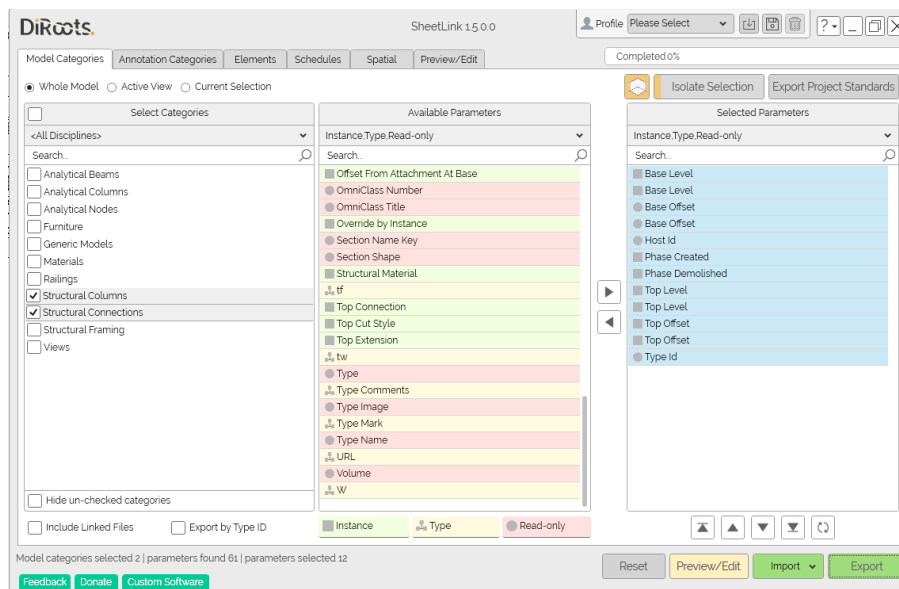


Figura 49 - Seleção de parâmetros no plugin SheetLink

Este tipo de folha de calculo é geralmente utilizada para a edição de parâmetros específicos de elementos semelhantes. Com a listagem de todos os elementos ou o agrupamento de elementos de iguais dimensões em mapas de quantidades, é possível editar todos os elementos ao mesmo tempo e importar esta informação diretamente para o modelo Revit através do plugin.

Este tipo de folha de cálculo pode, em particular, ser utilizada como meio de transferência da informação existente nos ficheiros de dados (e.g. .csv) para o modelo. As informações existentes neste tipo de ficheiros, como por exemplo as dimensões das anomalias detetadas, podem ser introduzidas na folha de cálculo, manual ou automaticamente, para poderem ser importadas para o modelo sem ser necessário a utilização de ferramenta mais complexas como o *Dynamo*.

Vista a capacidade deste plugin de extrair parâmetros específicos de um modelo, isto pode ser utilizado na gestão da ponte. Permite extrair parâmetros pertinentes à gestão (e.g. quantidades de materiais) para poderem ser devidamente analisados, e assim, estabelecer o plano de ação mais eficiente.

## **5.6. Modelo temporal**

Para demonstrar as diversas alterações ocorridas ao longo do ciclo de vida da ponte, a ferramenta “phases” pode ser utilizada para definir as diferentes fases do modelo, ou seja, delimitar cada intervenção ocorrida. Isto é utilizado para definir os elementos que sofrem alterações em cada fase a modelar.

No Revit, a ferramenta de “phasing” pode ser utilizada para definir a ocorrência destas intervenções (*Figura 50*). A cada fase do modelo pode ser atribuído um nome e descrição, sendo normalmente a primeira fase dedicada ao modelo original, e as restantes fases dedicadas a eventos posteriores, tanto de inspeção como de intervenção. A descrição pode ser utilizada para indicar a data e outras informações pertinentes a essa fase. A *Figura 50* ilustra a utilização do nome para identificar o tipo de evento com a devida data e a descrição inclui um resumo dos trabalhos realizados nesse evento que foi aplicada no modelo. Apesar da informação não ser exata, representa a forma como este tipo de informação deve ser introduzida.

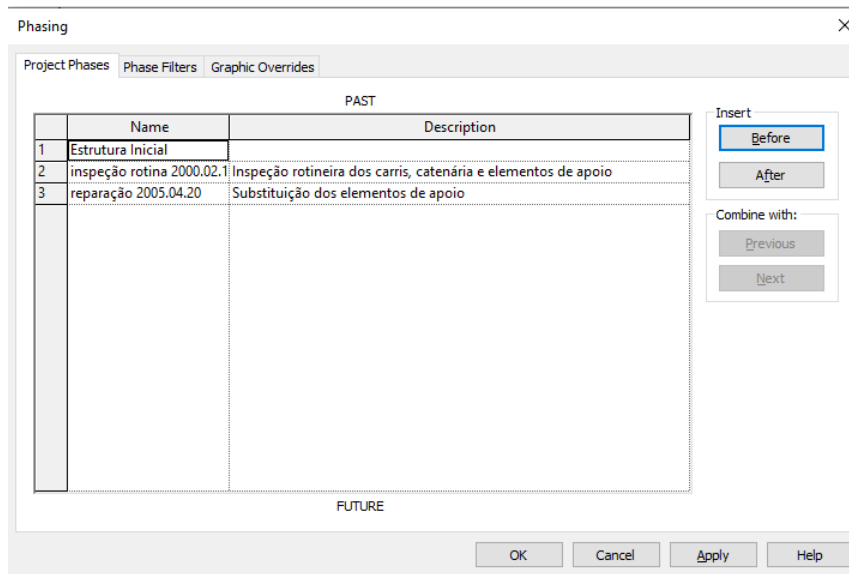


Figura 50 - Ferramenta de definição de fases

A cada elemento pode então ser atribuída uma destas fases para a sua construção e demolição (Figura 51). Elementos existentes desde a conceção da ponte devem ser atribuídos à fase inicial de criação do modelo e percorrer todas as restantes fases até à sua eventual demolição e retirada do modelo. Elementos introduzidos na ponte, após a sua construção devem ter atribuída a fase em que foram criados. Os “cubos de dano” e outros elementos representativos de anomalias devem estar associados à fase de inspeção/intervenção em que as anomalias foram identificadas/solucionadas. Na Figura 51 apresenta-se um exemplo da introdução de um elemento onde se indica a fase em que foi criado (introduzido no modelo) e a fase em que será demolido (neste caso tal não está previsto, logo a fase de demolição mantém o valor de “nenhuma” por defeito).

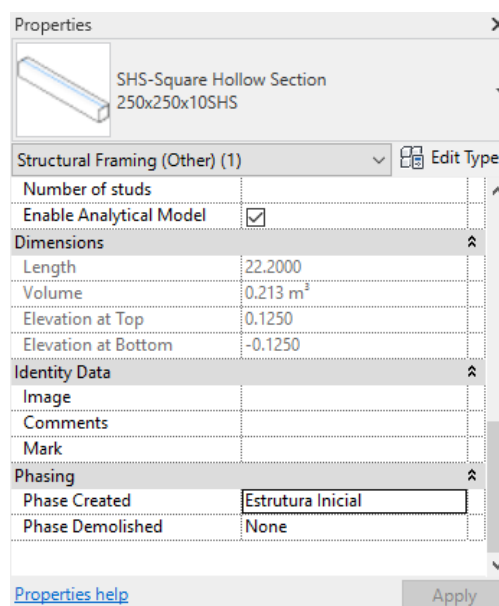


Figura 51 - Fases de criação e demolição dos elementos

Na visualização do Revit, é possível especificar a fase que se pretende visualizar, bem como aplicar filtros para destacar os elementos que sofrem alterações em cada fase. O sistema de fases pode ser utilizado para criar possíveis métodos de intervenção e serem calculados os custos associados á sua utilização. Um exemplo de aplicação do SheetLink foi aqui utilizado para realizar a atribuição da fase correta (Estrutura inicial) a todos os elementos.

## 5.7. Classificação IFC

É importante, para garantir a interoperabilidade do modelo com outros softwares, que os elementos sejam corretamente classificados no formato IFC para garantir que todas as informações essenciais de cada elemento sejam corretamente transmitidas entre softwares.

Ao exportar para IFC, o Revit tem a capacidade de atribuir a correta classificação IFC para as suas famílias nativas. Porém, quando são utilizadas famílias externas, ou as famílias nativas são utilizadas para modelar elementos diferentes, é necessário a classificação destes elementos.

Para isto, é necessário a criação de dois novos parâmetros: “IfcExportAs” e “IfcExportType” (Figura 52). Este processo pode ser realizado manualmente ou automaticamente.

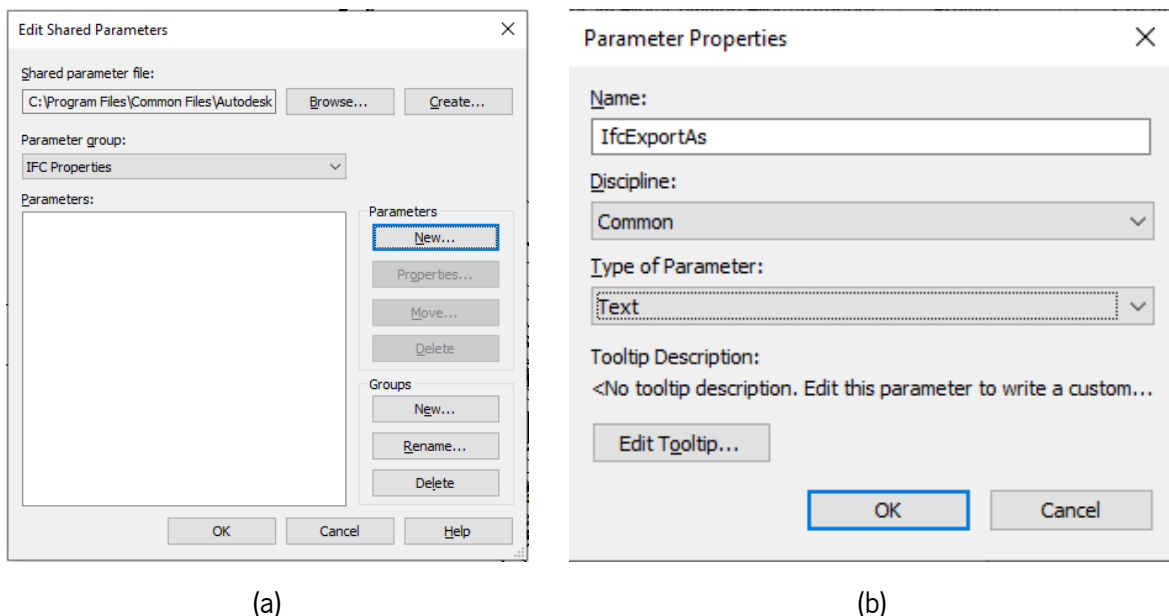


Figura 52 - Criação de parâmetros IFC

O parâmetro IfcExportAs define o sub-esquema do IFC que rege as diferentes propriedades que vão integrar o modelo em formato IFC para definir o objeto. O IfcExportType define o tipo de objeto dentro do sub-esquema.

A cada família criada devem ser adicionados novos parâmetros do tipo “shared parameter” a pertencer ao grupo “IFC Parameters”. Para classificar as famílias nativas do Revit, é necessário a criação de novos parâmetros de projeto semelhante ao processo das famílias criadas. A *Figura 53* apresenta a seleção dos diversos elementos aos quais vai ser atribuído este parâmetro de projeto criado.

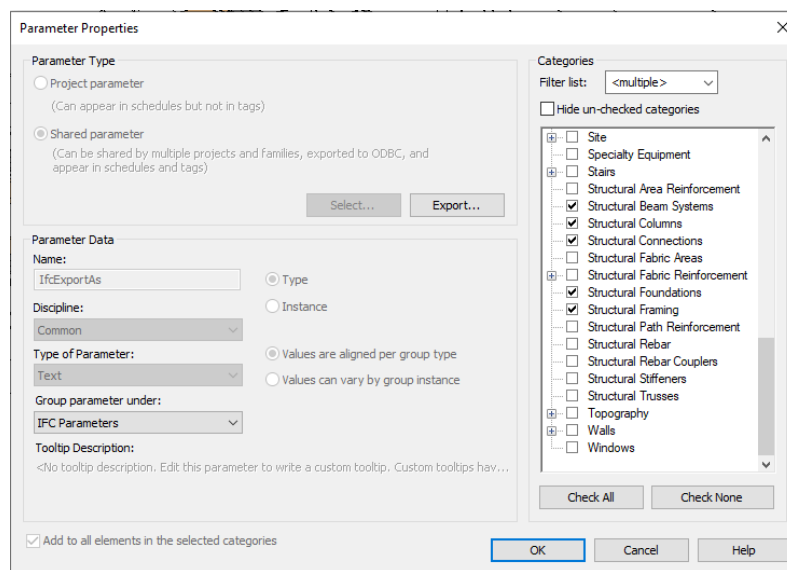


Figura 53 - Inserir parâmetro em famílias

Adicionalmente, a National Building Specification (NBS) oferece um plugin para Revit que permite adicionar parâmetros a todos ou selecionados elementos de um projeto, para garantir que estes cumprem os requisitos da NBS para a partilha de objetos. Isto inclui por exemplo classificação em omniclass e uniclass, sendo o mais relevante, o facto de incorporar classificação IFC dentro da especificação NBS, como mostra a *Figura 54*. Este plugin foi utilizado para realizar este processo automaticamente, escolhendo todos os elementos e a especificação NBS, o que atribui os parâmetros IFC para todos os objetos no modelo.

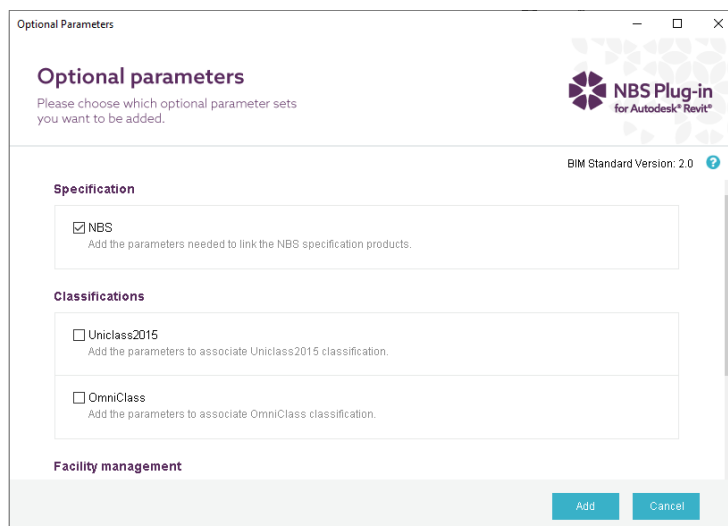


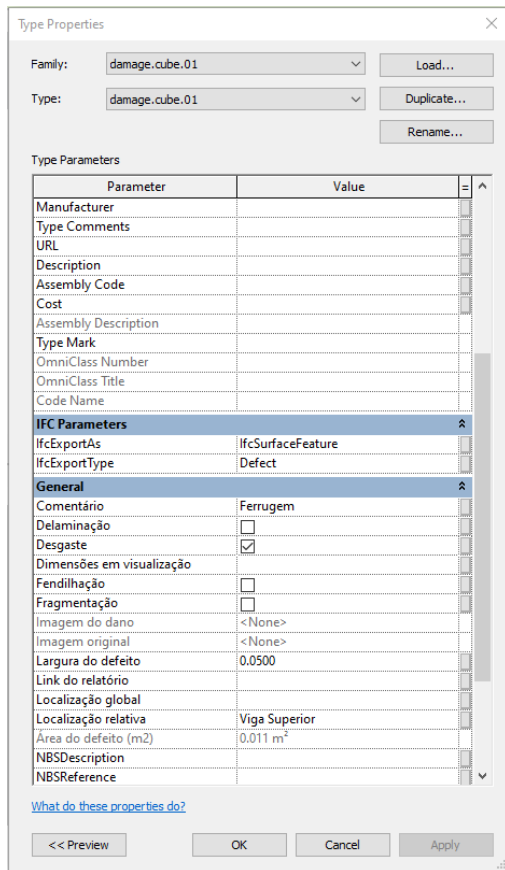
Figura 54 - Plugin NBS

Para completar a classificação, estes parâmetros necessitam ser preenchidos para os elementos criados ou que estão a ser utilizados para representar um elemento diferente. O plugin SheetLink pode ser utilizado quando o modelo apresenta muitos elementos nestas condições.

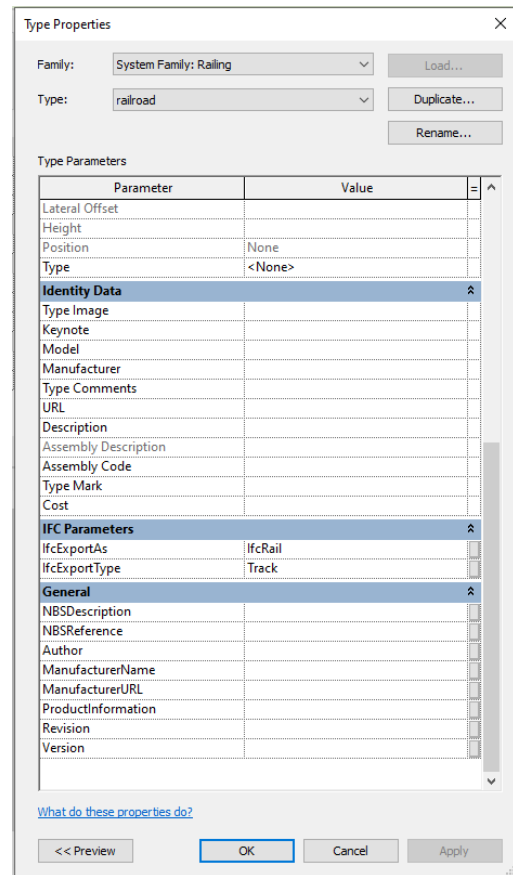
Neste caso de estudo, tanto os carris, que foram modelados com a ferramenta de *railing*, e os cubos de dano, baseados num objeto genérico, necessitam de ser classificados em IFC.

A BuildingSMART disponibiliza a lista das diferentes classificações para *IfcExportAs* e *IfcExportType*. No entanto, como a extensão 4.3 ainda não faz está incorporada numa versão oficial do esquema, nem toda a informação sobre estes parâmetros para pontes e ferrovias está disponível.

Sendo assim, foi possível classificar os cubos de dano, para *IfcExportAs* e *IfcExportType*, como *IfcSurfaceFeature* e *Defect* (*Figura 55a*), e o segmento de caminho de ferro que foi classificado segundo a nova extensão do IFC como *IfcRail* e *Track* (*Figura 55b*), respetivamente. Toda a estrutura metálica é classificada dentro do *IfcBridge*.



(a)



(b)

Figura 55 - Parâmetros dos cubos de dano (a) e caminhos de ferro (b)

## 5.8. Análise estrutural

Em termos de análise estrutural, o Revit permite a criação de um modelo analítico, designado por Analytical Model. Este pode ser transferido para um software de análise estrutural, sendo o Robot, pertencente à Autodesk, capaz de realizar a transferência do modelo diretamente.

Tal como referido, este utiliza os diversos elementos estruturais criados no modelo para estabelecer o modelo de elementos finitos correspondente que pode ser visualizado e editado para melhor representar o comportamento da estrutura, incluindo informação geométrica e não geométrica.

Apesar de ser um processo maioritariamente autónomo, certos aspetos devem ser verificados ou introduzidos. Existe sempre a necessidade de verificar a geometria e, em especial, as conexões entre os diversos elementos e estabelecer as condições de fronteira e cargas.

As condições de fronteira, ou, os diversos pontos de ancoragem e/ou fundação devem ser definidos no modelo analítico, bem como caracterizar as diversas sobrecargas que regem o comportamento da estrutura. O Revit atribui automaticamente o peso próprio dos elementos, bem como estabelece as cargas para efeitos de vento e sismos segundo a norma estrutural seleccionada, no entanto, as sobrecargas a que uma ponte está sujeita precisam ser definidas. As combinações de limite de serviço e de utilização também podem ser definidas. A *Figura 56* apresenta o resultado da aplicação das condições de fronteira e aplicação de uma carga de exemplo a simular a passagem de um comboio.

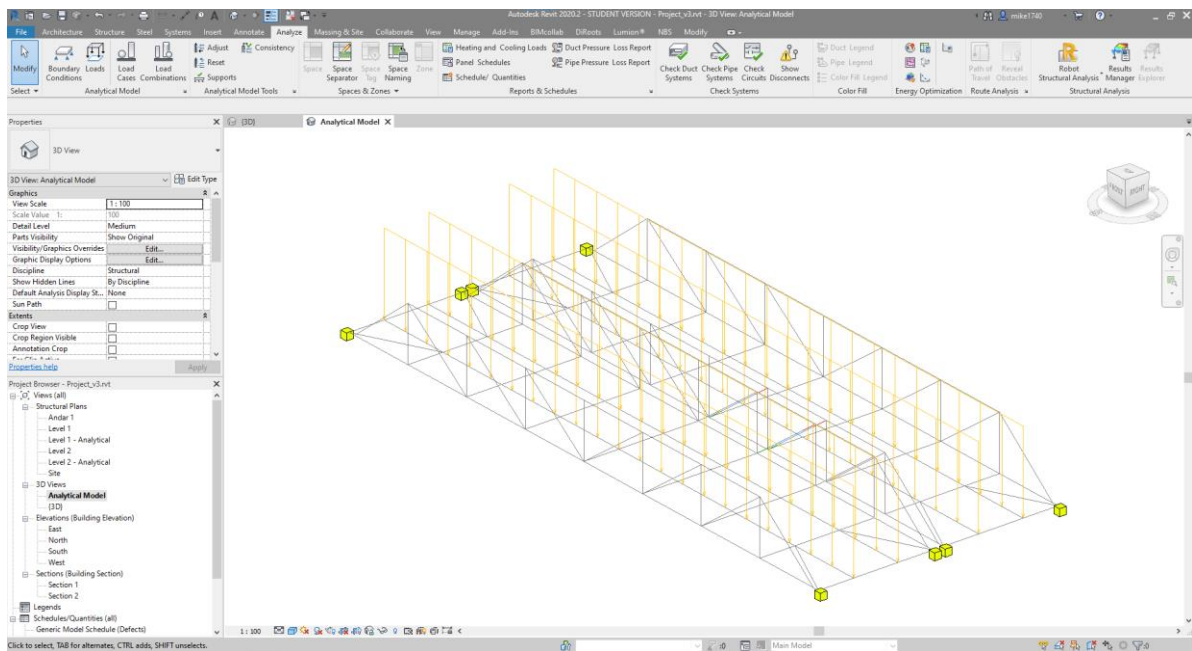


Figura 56 - Modelo de elementos finitos

O modelo pode assim ser exportado para o software de análise estrutural desejado para a realização dos cálculos estruturais. O Robot permite a importação direta do modelo, enquanto outros softwares requerem a utilização de um esquema de interoperabilidade como o IFC. Adicionalmente, os resultados do cálculo estrutural podem ser transferidos de volta para o Revit, onde podem ser visualizados sem necessidade de softwares adicionais, garantindo que toda a informação está reunida no mesmo ficheiro.

## 5.9. Softwares alternativos

Com vista a avaliar a possibilidade de utilizar outros softwares para a modelação de uma ponte ferroviária metálica, foi criado um modelo da mesma ponte num outro software, o Allplan Bridge. Este é um software criado para a modelação de pontes em betão armado, pelo que seria interessante a



exploração da sua utilidade para a modelação de pontes metálicas. Este novo modelo foi realizado para dar visão sobre as vantagens, desafios e limitações que este software apresenta comparado ao Revit.

A criação de um novo projeto neste software incita o utilizador a seleccionar as normas para os cálculos estruturais que pretende seguir, sendo um destes o Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (REBAP) que foi um dos regulamentos utilizados no projeto de várias das pontes atualmente existentes. Este é utilizado pelo software para definir as diversas cargas e métodos de calculo segundo o regulamento escolhido.

### 5.9.1. Modelação da estrutura metálica

Como já foi referido, este é um software criado para modelação de pontes em betão armado, pelo que a modelação dos diversos elementos estruturais requer a modelação tanto do eixo como do perfil dos elementos.

Assim sendo, a modelação começa em estabelecer o eixo principal da ponte, estabelecendo a sua planta e o perfil. É necessário estabelecer as coordenadas do ponto inicial e estabelecer o alinhamento para a planta (*Figura 57a*), e estabelecer a variação de altitudes no seu perfil (*Figura 57b*).

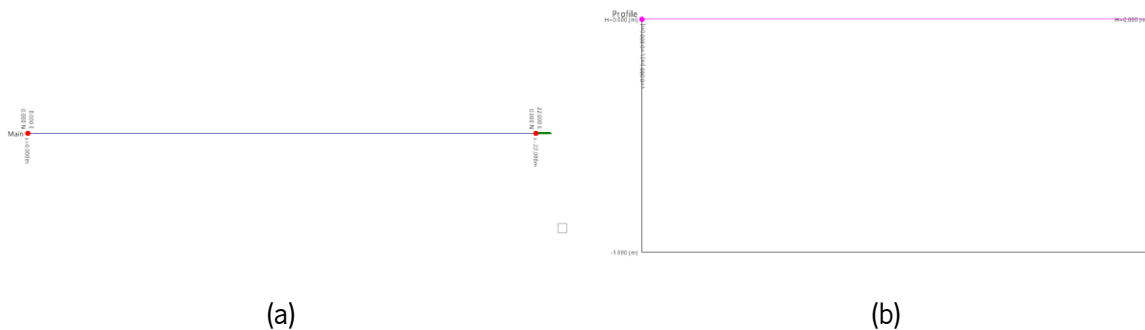


Figura 57 - Eixo de referência; a) planta; b) perfil

Com o eixo estabelecido, é necessário modelar o perfil transversal da ponte, o que, no caso de uma ponte metálica, corresponde aos elementos longitudinais. Na *Figura 58* é possível visualizar o perfil das vigas inferiores na ponte. É de notar que, neste software, todos os elementos requerem linhas de referência para serem desenhados.

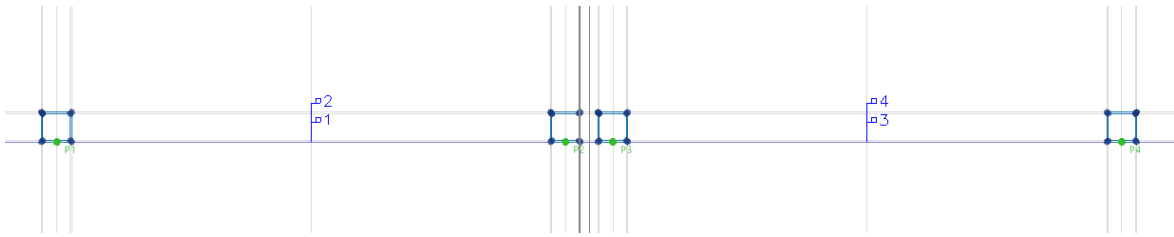


Figura 58 - Perfil transversal das vigas longitudinais inferiores

Para a modelação das vigas longitudinais recorre à criação de “Girders” no software que utiliza um eixo de referência, neste caso, o eixo principal para criar as vigas segundo as secções criadas. O menu de Stationing pode ser utilizado para definir intervalos periódicos que servem de referência para a posterior introdução de outros elementos e definir o comprimento exato dos elementos longitudinais (Figura 59).

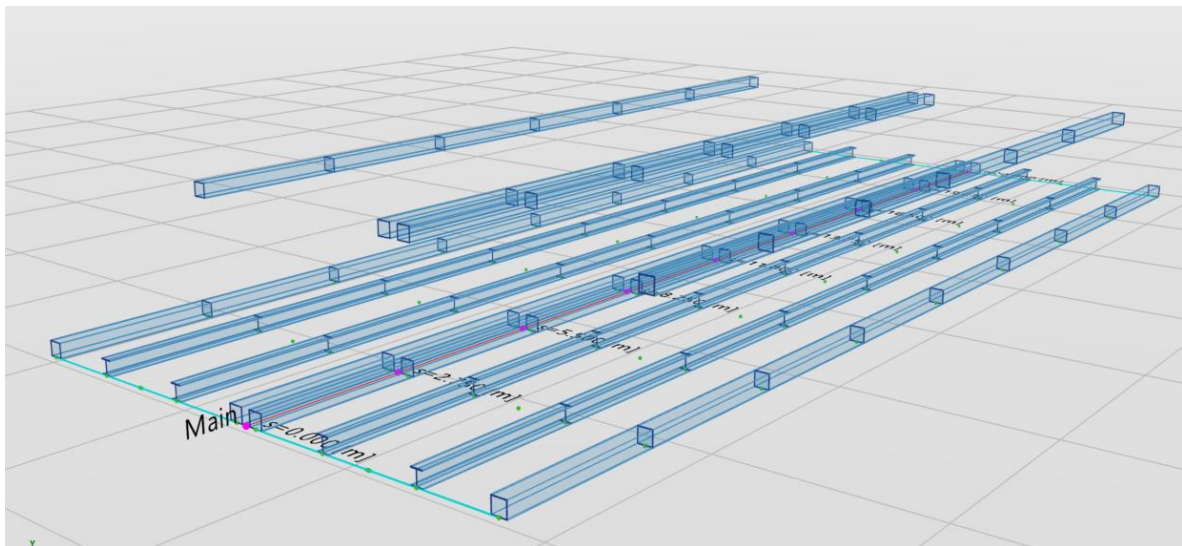


Figura 59 – Modelação das vigas longitudinais

Para completar a ligação destes elementos, é necessário criar Piers para pilares e Girders para as restantes vigas metálicas, sendo que os pilares requerem o perfil transversal, ponto de referência e altura, enquanto as vigas requerem o perfil transversal e mais eixos de referência. O software permite criar eixos transversais ao eixo principal para facilitar a introdução de vigas transversais, enquanto as restantes vigas apenas necessitam de ser definidos os pontos extremos, relativamente ao eixo principal (Figura 60).

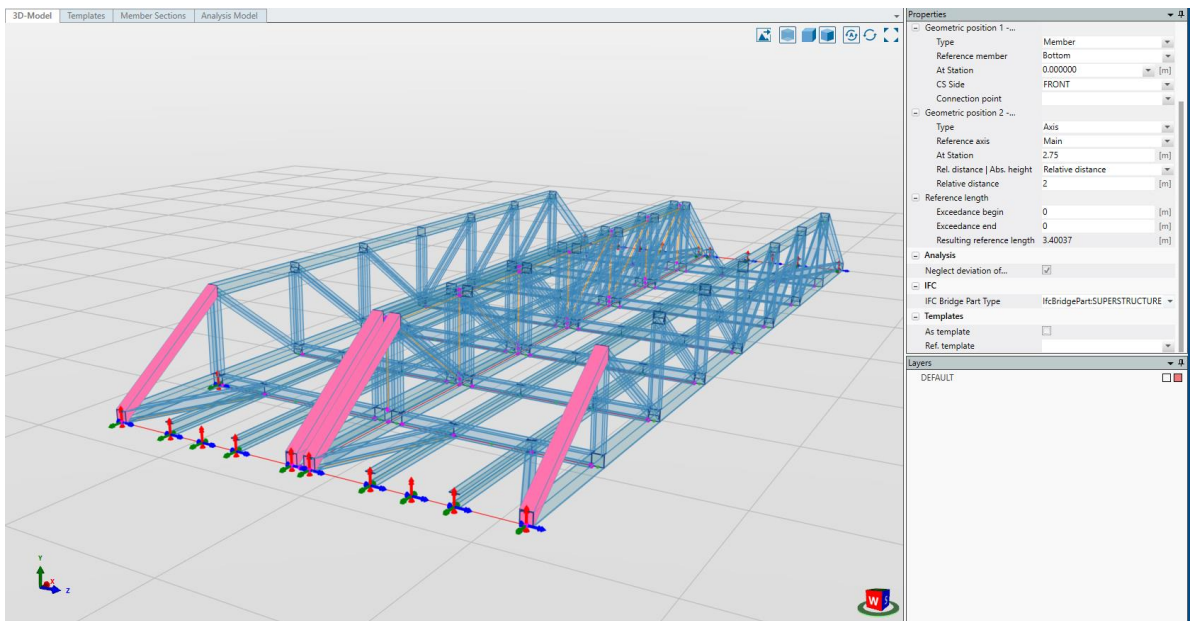


Figura 60 – Modelação das vigas intermédias

Adicionalmente, é possível utilizar Link Girders para representar elementos não estruturais, que apenas requer os pontos de referência em vez de um novo eixo de referência.

Em termos de modelação das conexões, o software apenas permite a introdução de ligações rígidas ou do tipo Bearing, em que é possível introduzir a resistência oferecida pela ligação, no entanto isto exige o cálculo manual da resistência da conexão. A introdução de encontros é necessária para estabelecer os pontos onde a estrutura se assenta no solo.

Neste aspeto, o Revit evidencia-se como uma melhor ferramenta para modelar estruturas metálicas comparado ao Allplan, graças a ter acesso a conexões metálicas pré-modeladas que podem ser alteradas pelo utilizador.

### 5.9.2. Modelação da ferrovia

Para a modelação da ferrovia, a criação de dois elementos do tipo Deck foi necessária para modelar tanto os carris como as travessas. Estas utilizam cada uma o seu perfil transversal e assentam no eixo principal da ponte. No caso das travessas, foi necessário criar várias estações para criar a repetição do elemento. A *Figura 61* apresenta o modelo resultante.

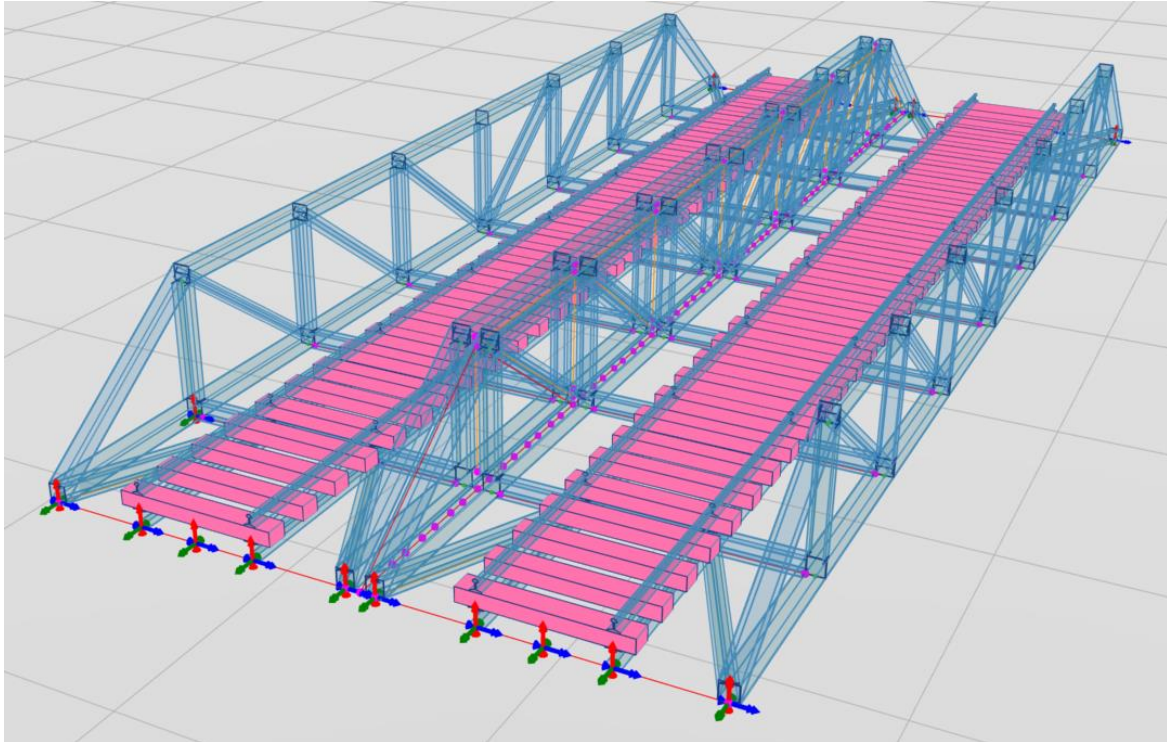


Figura 61 – Modelação das travessas e carris

Novamente se verifica como o Revit, apesar de não ter uma ferramenta dedicada para carris, apresenta ferramentas com o Railing que permite ao utilizador introduzir elementos que se repetem periodicamente de uma forma não só mais simples, mas também mais detalhada, graças á liberdade que apresenta na modelação das travessas.

### 5.9.3. IFC

No Allplan Bridge, todos os elementos apresentam uma propriedade que possibilita o utilizador classificar o elemento segundo o IFC (*Figura 62*). Podem ser seleccionados vários elementos para classificar todos ao mesmo tempo e, contrariamente ao Revit, em que o utilizador tem de saber a classificação exata e criar parâmetros para introduzir esta informação, o Allplan Bridge apresenta as classificações possíveis segundo o IFCBridge, sendo esta uma vantagem comparativamente ao Revit.

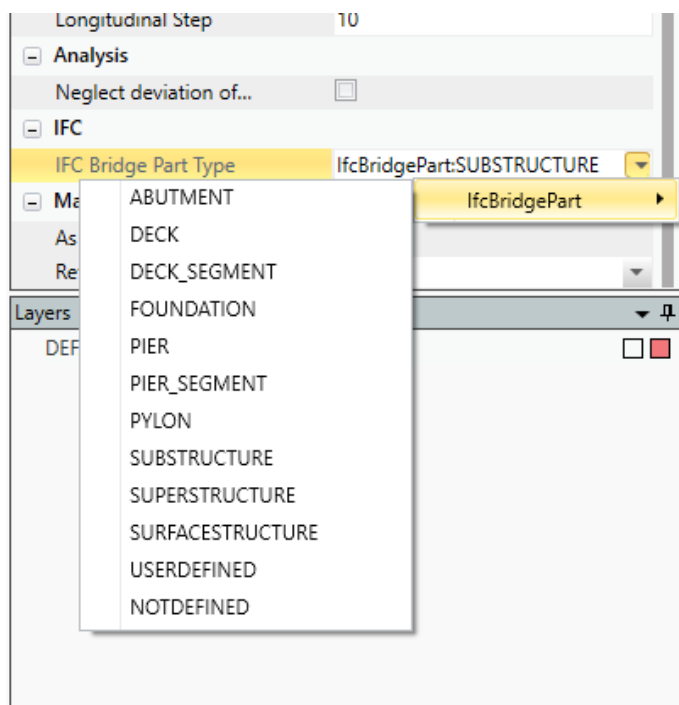


Figura 62 - Classificação IFC

#### 5.9.4. Modelação de defeitos

Para que o modelo criado no Allplan possa ser utilizado como base para a gestão, este necessita de permitir o utilizador introduzir a informação que é pretendida do modelo. Os já referidos “cubos de dano” são uma forma de enriquecer o modelo, no entanto este software não apresenta uma forma simples de criar este tipo de representação.

O programa aparenta ser bastante baseado no esquema IFC em termos de organização e parametrização dos elementos, o que torna difícil a modelação de elementos que não constam dos tipos pré-programados e não permite a criação de parâmetros adicionais para caracterizar os mesmos, sendo assim difícil a modelação de defeitos.

Considerando estas limitações, torna-se difícil a utilização deste software para a gestão nesta fase. O modelo sem a informação adicional das inspeções torna impossível a correta análise do estado de conservação da ponte, dificultando a gestão da mesma. Os benefícios do software encontram-se limitados a análise estrutural, que não é a principal necessidade de um modelo BIM na fase de gestão.

#### 5.9.5. Apreciação do software para gestão de pontes

Através da exploração deste software descrita nesta secção, foi possível compreender, pela forma de modelar os elementos, que é um software direccionado para pontes de betão armado.

Apesar de não apresentar diferenças significativas entre modelar uma ferrovia ou uma rodovia, o sistema de modelação favorece estruturas com um único perfil longitudinal que pode variar ao longo do seu desenvolvimento. Isto torna-se um problema na modelação de estruturas metálicas pois estas requerem a criação de vários eixos, perfis e elementos que requerem a inserção de vários dados por parte do utilizador.

Finalmente, a modelação neste software foi realizada com o objetivo de perceber o seu potencial para criar modelos que possam ser utilizados como base para a gestão de uma ponte, no entanto, verificou-se que para além de não apresentar formas explícitas de modelar os danos (por exemplo, os já referidos “cubos de dano”), todos os outros elementos apresentam propriedades fixas pré-programadas no software, que não dão liberdade ao utilizador de introduzir a informação que achar pertinente. A *Figura 63* apresenta as únicas propriedades que o software permite alterar para um elemento do tipo Deck.

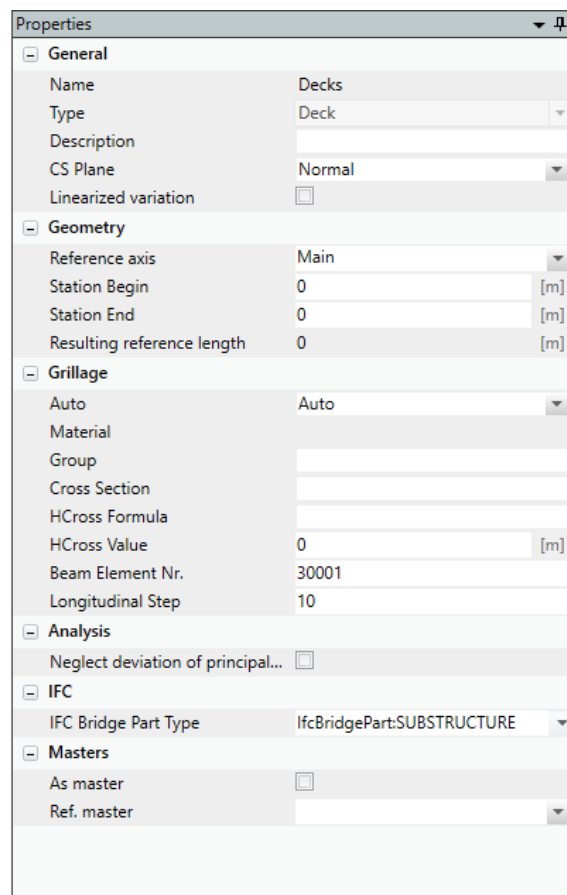


Figura 63 – Propriedades de um elemento tipo Deck

Em suma, o Allplan não se mostrou como uma melhor alternativa ao Revit no que diz respeito a criar um modelo para ser utilizado na gestão de uma ponte ferroviária metálica.

## **5.10. Aplicação do modelo na gestão**

A aplicação da informação angariada no modelo deve ser utilizada para analisar o estado de conservação da ponte. Neste caso, a informação existente está limitada a informação visual, que é insuficiente para efetuar uma avaliação precisa sobre o estado de conservação da ponte.

Mesmo assim, a análise das anomalias detetadas revela alguma ferrugem em elementos estruturais o que pode ser considerado como um risco com um impacto médio (3) por se tratar de elementos estruturais, mas com uma probabilidade de ocorrer muito baixa (1). Segundo a matriz de risco (*Tabela 1*), isto equivale a um risco baixo (3) pelo que nenhuma ação necessita de ser tomada.

## 6. Conclusões

### 6.1. Conclusões gerais

Ao longo desta dissertação, foram discutidas as diversas formas como o BIM facilita a gestão de uma ponte, discutindo os benefícios que oferece comparativamente aos métodos tradicionais. Foram assim estabelecidos alguns princípios de como preparar um modelo BIM, e como se pode tirar proveito da sua informação para melhorar a gestão de uma ponte ferroviária metálica.

Os seguintes pontos resumem as principais conclusões a retirar desta dissertação:

A gestão de uma ponte é um processo focado em manter a segurança da estrutura, programando ações de inspeção e manutenção ao longo do seu ciclo de vida da forma mais economicamente viável possível.

O BIM apresenta-se como uma plataforma centralizada para guardar toda a informação referente a uma ponte, substituindo as tradicionais bases de dados, ao proporcionar maior organização, acesso e visualização da informação disponível.

A capacidade de manipular esta informação é outro dos fatores importantes da utilização do BIM, uma vez que torna possível e mais eficiente a utilização de outros softwares relacionados com o processo de gestão.

Apesar de apresentar dificuldades de implementação, nomeadamente em termos de custos iniciais associados ao processo de aprendizagem, a implementação do BIM como base de informação de uma ponte apresenta lucros a médio e longo prazo.

Foi possível analisar como diversas ferramentas podem ser utilizadas em contexto BIM para demonstrar ou estudar melhor o estado de conservação de uma ponte. Exemplo disto é a capacidade de estudar o comportamento estrutural de uma ponte, dadas alterações na sua composição ao longo do seu ciclo de vida.

Verificou-se que as novas tecnologias de inspeção, como VANTs e laser scanning, beneficiam de um modelo digital da ponte onde podem colocar a informação obtida, nomeadamente em forma de fotogrametria e/ou nuvem de pontos. Comparações podem ser feitas entre o modelo e a ponte *as-built* o que permite uma melhor organização e gestão da ponte.



Foram analisadas duas técnicas de modelação de defeitos, cubos de dano e *surface features*, das quais se verificou que os cubos de dano são uma forma mais simples de modelar focada na descrição através de parâmetros e texturas. Por outro lado, as *surface features* podem ser utilizadas quando existe detalhe 3D do defeito, proveniente, por exemplo, das nuvens de pontos, descrevendo assim vários dos parâmetros existentes nos cubos de dano.

O elevado número de softwares referenciados ao longo da dissertação demonstra a importância da interoperabilidade entre os mesmos, pelo que é essencial um modelo BIM estar de acordo com o esquema IFC, uma vez que é o mais comum e internacionalmente aceite, para que o modelo possa ser utilizado como base para outros softwares.

Isto revela-se especialmente importante para softwares de organização da construção pois estes são utilizados para preparar intervenções e estudar os custos relacionados com as mesmas, ou seja, as múltiplas dimensões do BIM, que é uma das questões mais importantes na gestão de uma ponte.

Foi ainda possível, através da aplicação prática dos conceitos estudados, perceber como é efetuado o processo de modelação 3D e introdução de informação não geométrica através de parâmetros, em particular na modelação da informação cadastral relativa a inspeções.

Muitos destes métodos de modelação podem interligar-se com plugins que permitem acelerar tarefas mais monótonas e demoradas, como é o caso de criar parâmetros e a alteração dos mesmos em modelos de maior complexidade.

Foi ainda possível comparar o Revit com outro software existente e verificar como a sua flexibilidade permite que um modelo BIM possa alocar toda a informação importante para a boa gestão de uma ponte.

## **6.2. Futuros Desenvolvimentos**

Tal como foi o objetivo desta dissertação, foi possível estudar a utilização do BIM e dos recursos que existem em redor desta temática aplicados á gestão de pontes metálicas ferroviárias. Foram estabelecidas as bases utilizadas para um bom sistema de gestão de pontes, foi analisado o impacto que o BIM tem na gestão de uma ponte e como este pode ser implementado e foi realizada uma aplicação pratica dos conceitos discutidos.

No entanto, certos tópicos não foram mencionados ou foram pouco aprofundados:

- Converter informação cadastral existente para o BIM;
- Comparar os resultados com uma nuvem de pontos;
- Aumentar as dimensões do modelo construído, nomeadamente em termos de tempo e custos;
- Explorar as capacidades do modelo em áreas de análise estrutural e planeamento de intervenções;
- Aprofundar o tema da gestão com o recurso ao modelo desenvolvido.

Adicionalmente, seria interessante o estudo do IFC tendo em conta o lançamento da sua nova versão que incorpora os sub-esquemas de infraestruturas.

Estes são alguns dos assuntos que podiam ser estudados, por forma a dar continuidade e aprofundar os objetivos estabelecidos. No tempo limitado da elaboração da presente dissertação não foi possível abordá-los essencialmente por falta de informação. Se a informação necessária vier a estar disponível no futuro, será possível atualizar o trabalho presente neste documento e aprofundar alguns dos tópicos identificados acima.

## 7. Referências Bibliográficas

- Azhar, S., Hein, M., & Sketo, B. (2007). *Building Information Modeling ( BIM ): Benefits , Risks and Challenges*.
- Bartholomew, M., Blasen, B., & Koc, A. (2015). Bridge Information Modeling (BrIM) Using Open Parametric Objects. *Us Department of Transportation, 1*, 296.
- Bentley, K., & Mullen, C. (2017). *Bentley ' s iModel*.
- Bouška, R. (2016). *Evaluation of Maturity of BIM Tools across Different Software Platforms*. Procedia Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.648>
- BuildingSMART. (2019). *IFC Rail Project: Abstract. 2*. <http://www.buildingsmart.org/ifc-rail-candidate-standard-is-available-for-review-and-comment/>
- Chan, D. W. M., Olawumi, T. O., & Ho, A. M. L. (2019). Perceived benefits of and barriers to Building Information Modelling (BIM) implementation in construction: The case of Hong Kong. *Journal of Building Engineering, 25*, 100764. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100764>
- Chipman, T., Eastman, C., & Liebich, T. (2016). Bridge Information Model Standardization Volume II: Schema Analysis. *BIM-Infra, 11*(April), 143. <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/pubs/hif16011/hif16011c.pdf>
- Christian Erismann, J. P. (2021). *IFC 4.3 Implementation and Validation Report*. <https://app.box.com/s/1nm5qqyn9jw2nopbr1952f58b90spdrm>
- Ding, L. Y., Zhou, Y., Luo, H. B., & Wu, X. G. (2012). Using nD technology to develop an integrated construction management system for city rail transit construction. *Automation in Construction, 21*(1), 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.05.013>
- Duranton, S., Langhorn, M. P., & Gauche, V. (2018). *The 2017 European Railway Performance Index*. 1–14.
- Grossinho, A., Patricio, H., Pinheiro, M. M., & Coutinho, R. (2018). *Princípios de gestão de ativos na sustentabilidade económica das soluções de investimento*. 1–10.
- Guillen, A. J., Crespo, A., Gómez, J., González-Prida, V., Kobbacy, K., & Shariff, S. (2016). Building Information Modeling as Asset Management Tool. *IFAC-PapersOnLine, 49*(28), 191–196.

<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.033>

Hüthwohl, P., Brilakis, I., Borrmann, A., & Sacks, R. (2018). Integrating RC Bridge Defect Information into BIM Models. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *32*(3), 04018013.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000744](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000744)

IP, I. de P. (2017a). *Relatório de sustentabilidade 2017. Infraestruturas de Portugal*. 1–107.

IP, I. de P. (2017b). *Sistema de Gestão de Obras de Arte da IP (SGOA IP) - Bases do Sistema*. 1–10.

IP, I. de P. (2019). *Relatório e contas*.

Isailović, D., Stojanovic, V., Trapp, M., Richter, R., Hajdin, R., & Döllner, J. (2020). Bridge damage: Detection, IFC-based semantic enrichment and visualization. *Automation in Construction*, *112*, 103088. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103088>

Jeong, S., Hou, R., Lynch, J. P., Sohn, H., & Law, K. H. (2017). An information modeling framework for bridge monitoring. *Advances in Engineering Software*, *114*, 11–31.

<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.05.009>

Justo, A., Soilán, M., Sánchez-Rodríguez, A., & Riveiro, B. (2021). Scan-to-BIM for the infrastructure domain: Generation of IFC-complaint models of road infrastructure assets and semantics using 3D point cloud data. *Automation in Construction*, *127*, 103703.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103703>

Kaewunruen, S., Sresakoolchai, J., & Zhou, Z. (2020). Sustainability-based lifecycle management for bridge infrastructure using 6D BIM. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(6).

<https://doi.org/10.3390/su12062436>

Koutamanis, A. (2020). Dimensionality in BIM: Why BIM cannot have more than four dimensions? *Automation in Construction*, *114*(February), 103153.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103153>

Li, L., Yuan, J., Tang, M., Xu, Z., Xu, W., & Cheng, Y. (2021). Developing a BIM-enabled building lifecycle management system for owners: Architecture and case scenario. *Automation in Construction*, *129*, 103814. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2021.103814>

Liao, L. (2021). *How 5D BIM powers the high speed of high-speed railway projects in North China*.

Matejov, A., & Šestáková, J. (2021). The Experiences with utilization of BIM in railway infrastructure in

- Slovak Republic and Czech Republic. *Transportation Research Procedia*, 55, 1139–1146.  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.084>
- Mendonça, T., Brito, V., & Milhazes, F. (2013). *APLICAÇÃO DE GESTÃO DE OBRAS DE ARTE - GOA - NOVA GERAÇÃO*.
- Monteiro, M., Consultores, B., & Consultores, B. (2019). Gestão integrada de activos. *BETAR Consultores Lda*, 1–10.
- Neves, J., Sampaio, Z., & Vilela, M. (2019). A case study of BIM implementation in rail track rehabilitation. *Infrastructures*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/infrastructures4010008>
- Omar, T., & Nehdi, M. L. (2018). Condition assessment of reinforced concrete bridges: Current practice and research challenges. *Infrastructures*, 3(3). <https://doi.org/10.3390/infrastructures3030036>
- OS, T. (2021). *Improving BIM workflow with dynamo revit plugin*. Construction Review Online. <https://constructionreviewonline.com/2019/08/improving-bim-workflow-with-dynamo-revit-plugin/>
- Park, S. I., Lee, S. H., Almasi, A., & Song, J. H. (2020). Extended IFC-based strong form meshfree collocation analysis of a bridge structure. *Automation in Construction*, 119, 103364. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103364>
- Perry, B. J., Guo, Y., Atadero, R., & van de Lindt, J. W. (2020). Streamlined bridge inspection system utilizing unmanned aerial vehicles (UAVs) and machine learning. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 164, 108048. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108048>
- Pregolato, M. (2019). Bridge safety is not for granted – A novel approach to bridge management. *Engineering Structures*, 196(October). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.035>
- Ramos, T. (2020). *Pedra, papel, BIM*. Plus Arquitetura. <https://www.plusarquitetura.com/pedra-papel-bim/>
- Romanovich, M., Kuzmenkova, M., Breskich, V., & Kulakov, K. (2021). Using the laser scanning method in the reconstruction of metro stations. *Transportation Research Procedia*, 54, 819–826. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.135>
- Romero-Jarén, R., & Arranz, J. J. (2021). Automatic segmentation and classification of BIM elements

- from point clouds. *Automation in Construction*, 124, 103576.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103576>
- Sacks, R., Kedar, A., Borrmann, A., Ma, L., Brilakis, I., Hühwohl, P., Daum, S., Kattel, U., Yosef, R., Liebich, T., Barutcu, B. E., & Muhic, S. (2018). SeeBridge as next generation bridge inspection: Overview, Information Delivery Manual and Model View Definition. *Automation in Construction*, 90, 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.033>
- Saygi, G., Agugiaro, G., Hamamcioğlu-Turan, M., & Remondino, F. (2013). 3DOM) unit, Bruno Kessler Foundation (FBK). *Pdfs.Semanticscholar.Org*, 11(September), 38123.  
<https://pdfs.semanticscholar.org/4909/32800fbfb0259f03449af8cd136fbb03ef1d.pdf>
- UK BIM Alliance. (2019). Information Management according to BS EN ISO 19650 - Guidance Part 1: Concepts. *UK BIM Alliance*, July, 42. <https://www.ukbimalliance.org/stories/information-management-according-to-bs-en-iso-19650/>
- UK BIM Alliance. (2020). Information management according to BS EN ISO 19650 - Guidance Part 2: Processes for Project Delivery. *UK BIM Alliance*, 1–159.  
<https://www.ukbimalliance.org/stories/information-management-according-to-bs-en-iso-19650/>
- Vignali, V., Acerra, E. M., Lantieri, C., Di Vincenzo, F., Piacentini, G., & Pancaldi, S. (2021). Building information Modelling (BIM) application for an existing road infrastructure. *Automation in Construction*, 128(April), 103752. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103752>
- Wan, C., Zhou, Z., Li, S., Ding, Y., Xu, Z., Yang, Z., Xia, Y., & Yin, F. (2019). Development of a bridge management system based on the building information modeling technology. *Sustainability (Switzerland)*, 11(17), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su11174583>
- Yang, L., Cheng, J. C. P., & Wang, Q. (2020). Semi-automated generation of parametric BIM for steel structures based on terrestrial laser scanning data. *Automation in Construction*, 112, 103037. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103037>