



Modelos Digitais de Ponte Ferroviárias: Tecnologias de Reality Capture e Modelação BIM

ROGÉRIO LOPES OLIVEIRA

novembro de 2022



Modelos Digitais de Ponte Ferroviárias: Tecnologias de Reality Capture e Modelação BIM

ROGÉRIO LOPES OLIVEIRA

Outubro de 2022

MODELOS DIGITAIS DE PONTES FERROVIÁRIAS

TECNOLOGIAS DE REALITY CAPTURE E MODELAÇÃO BIM

Rogério Lopes Oliveira

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS

Orientador: Prof. Diogo Rodrigo Ferreira Ribeiro

Co-Orientadores: Prof. Miguel Ângelo Dias Azenha (Universidade do Minho)

Prof. Ricardo Manuel Pereira Santos

OUTUBRO DE 2022

Eu, Rogério Lopes Oliveira, estudante nº 1070814, do Mestrado em Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto, declaro que não fiz plágio nem auto-plágio, pelo que o trabalho intitulado “MODELOS DIGITAIS DE PONTES FERROVIÁRIAS - TECNOLOGIAS DE REALITY CAPTURE E MODELAÇÃO BIM” é original e da minha autoria, não tendo sido usado previamente para qualquer outro fim. Mais declaro que todas as fontes usadas estão citadas, no texto e na bibliografia final, segundo as regras de referência adotadas na instituição.

Porto e ISEP, 2022/10/27

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tabelas.....	xxi
CAPÍTULO 1 Introdução.....	1
CAPÍTULO 2 As tecnologias e metodologias digitais na indústria da construção	4
CAPÍTULO 3 Building Information Modelling (BIM) nas infraestruturas	9
CAPÍTULO 4 Técnicas de Reality Capture	27
CAPÍTULO 5 Caso de Estudo: Descrição	49
CAPÍTULO 6 Caso de Estudo: Modelo BIM.....	57
CAPÍTULO 7 Caso de Estudo: Reality Capture	71
CAPÍTULO 8 Considerações Finais.....	95
Referências Bibliográficas	97
Anexo I – Levantamento Topográfico	101
Anexo II – Aparelho de apoio tipo 3.....	103
Anexo III – Relatório de qualidade do levantamento – Laser Scan.....	105
Anexo IV – Relatório de qualidade da aerotriangulação – Fotogrametria.....	107

RESUMO

Os transportes ferroviários são meios de locomoção altamente eficientes para transporte intraurbano e suburbano em países desenvolvidos ou em vias de desenvolvimento.

Milhões de pessoas em todo o mundo utilizam transportes ferroviários para viajar, seja na sua deslocação diária de trabalho, deslocação excepcional ou sazonal, por exemplo por lazer. O transporte de mercadorias pode também ser realizado por meio ferroviário, tendo inúmeras vantagens face a outros transportes terrestres, nomeadamente o transporte rodoviário. Por isso a importância da ferrovia no desenvolvimento económico e social das sociedades é clara, sendo fundamental manter a sua segurança. Para manter os padrões de segurança ferroviária, entidades responsáveis fazem inspeções regulares para evitar possíveis acidentes devido à fadiga ou avarias das linhas ferroviárias, manter a normal conservação do estado da linha e corrigir o desgaste devido à exploração do serviço. Uma das ferramentas mais importantes e úteis para esta finalidade e que tem recebido muita atenção nos últimos anos, é a utilização de metodologias de sensores óticos associadas ao uso de veículos aéreos não tripulados. Assim, com a modelação da informação obtida com estas metodologias, é possível produzir modelos tridimensionais, com informação geométrica e semântica do corredor ferroviário, nomeadamente os elementos constituintes das linhas férreas (carris, travessas, laje de fundação da via, entre outros) e restantes infraestruturas associadas (catenária, guardas corpos, sinalização, entre outros).

Esses modelos podem ser usados como base para fins de execução, planeamento, inspeção e monitorização. Para estudos, projetos de execução e planeamento um modelo realizado com recurso a metodologias baseadas em *Building Information Modelling*, pode oferecer uma melhoria económica em termos de prazos, erros e omissões e uma melhoria qualitativa em termos de produção de projeto e entrega de informação. As vantagens da utilização de modelos 3D para inspeção e monitorização assente na utilização de metodologias de *Reality Capture* incluem a identificação de distorções e deformações de trilhos, medição de folgas de gabaritos por simulação de trânsito de vários veículos ao longo da rota, resposta rápida a problemas com a via e a criação de um histórico de dados atualizado para manutenção e registo de ocorrências em ferrovias.

Palavras-chave: Infraestruturas de Transporte, Modelos Digitais, *Reality Capture*, *Building Information Modelling*.

ABSTRACT

Rail transport is a highly efficient means of transportation for intra-urban and suburban transport in developed and developing countries.

Millions of people all over the world use rail transport to travel, whether on their daily commute for work, exceptional or seasonal travel, for example for leisure. The transport of goods can also be carried out by rail transport, having numerous advantages compared to other land transport, namely road transport. Therefore, the importance of the railway infrastructure in the economic and social development of societies is clear, and it is essential to maintain its safety. To maintain railway safety standards, stakeholders carry out regular inspections to avoid possible accidents due to fatigue or damage to railway lines, maintain the normal condition of the line and correct wear and tear due to operating of the service. One of the most important and useful tools for this purpose, which has received a lot of attention in recent years, is the application of optical sensor methodologies associated with the use of unmanned aerial vehicles. Thus, with the modelling of the information obtained with these methodologies, it is possible to produce three-dimensional models, with geometric and semantic information of the railway corridor, namely the railway lines (rails, sleepers, track foundation slab, among others) and other associated infrastructures (catenary, guardrails, signalling, among others).

These models can be used as a basis for execution, planning, inspection and monitoring purposes. For studies, execution and planning projects, a model made using methodologies based on Building Information Modelling, can offer an economic improvement in terms of deadline abidance or reduction, errors and omissions and a qualitative improvement in terms of project production and information delivery. The advantages of using 3D models for inspection and monitoring based on the use of Reality Capture methodologies include the identification of distortions and deformations of tracks, measurement of clearances of templates by simulating the traffic of several vehicles along the route, quick response to problems on the track and creating an up-to-date data history for infrastructure maintenance and event recording.

Keywords: Transport Infrastructures, Digital Models, Reality Capture, Building Information Modelling.

AGRADECIMENTOS

A realização do presente trabalho apenas foi possível com o auxílio de diferentes intervenientes, aos quais aproveito para expressar os meus mais sinceros agradecimentos.

Primeiramente agradecer aos meus orientadores, Engenheiro Diogo Ribeiro, Engenheiro Miguel Azenha e ao Engenheiro Ricardo Santos, pela disponibilidade, orientações, sugestões e contributos essenciais para atingir os objetivos propostos,

Ao colega Engenheiro Rafael Cabral, pelas trocas de ideias e discussões permitindo evoluir tecnicamente e profissionalmente, assim com as condições técnicas e o trabalho que disponibilizou,

Aos colegas Engenheiros Tiago Campelo, Óscar Moreira e Manuel Silva pela ajuda prestada na realização dos diferentes levantamentos de informação e pelo apoio prestado durante a realização desta dissertação,

Ao Engenheiro Hugo Patrício das Infraestruturas de Portugal e Engenheira Joana Delgado da AP Engenharia por toda a informação disponibilizada,

Ao projeto ID Ferrovia 4.0 (Projeto de Investigação e Desenvolvimento Ferrovia 4.0, financiado pela Agência da Inovação) pelo apoio,

À STRENG, em especial ao Engenheiro Alípio Ferreira, por todas as oportunidades que me proporcionou ao longo da minha carreira profissional, aos colegas que sempre me ajudaram,

Aos meus amigos pelo apoio, amizade e paciência ocorridas ao longo da dissertação,

Por fim, e sendo eles o elemento mais importante dos mencionados, agradecer ao meu pai, à minha mãe, à minha irmã, cunhado, sobrinhos e à restante família, pelo apoio e ânimo incondicional transmitidos ao longo do meu percurso académico e pelos valores transmitidos desde sempre.

A todos os mencionados anteriormente, o meu muito obrigado.

ÍNDICE DE TEXTO

CAPÍTULO 1	Introdução.....	1
1.1	Considerações Iniciais.....	1
1.2	Âmbito e Objetivos.....	2
1.3	Estrutura do documento.....	2
CAPÍTULO 2	As tecnologias e metodologias digitais na indústria da construção.....	4
CAPÍTULO 3	Building Information Modelling (BIM) nas infraestruturas.....	9
3.1	Relação do BIM com outras metodologias.....	10
3.2	BrIM - <i>Bridge Information Modelling</i>	12
3.3	Requerimentos BIM.....	15
3.4	Partilha de informação.....	21
CAPÍTULO 4	Técnicas de Reality Capture.....	27
4.1	Modelos digitais.....	27
4.2	Fotogrametria.....	30
4.3	Laser scanning.....	34
4.4	Deteção automática de objetos.....	38
4.5	Digital Twins.....	41
4.6	Software.....	45
CAPÍTULO 5	Caso de Estudo: Descrição.....	49
5.1.1	Pilares / Fundações.....	51
5.1.2	Encontro.....	52
5.1.3	Tabuleiro.....	53
5.1.4	Aparelhos de apoio.....	54

5.1.5	Ligadores Hidráulicos.....	54
CAPÍTULO 6 Caso de Estudo: Modelo BIM.....		57
6.1	Modelação do traçado ferroviário.....	57
6.1.1	Terreno.....	57
6.1.2	Traçados em planta e alçado.....	58
6.1.3	Secção transversal.....	60
6.2	Modelação do Viaduto.....	61
6.2.1	Tabuleiro.....	62
6.2.2	Pilares / Fundações.....	63
6.2.3	Encontro.....	65
6.2.4	Pré-esforço.....	66
6.2.5	Aparelhos de apoio.....	66
6.3	Análise estrutural – RM Bridge.....	67
6.4	Exportação em formato IFC.....	67
CAPÍTULO 7 Caso de Estudo: Reality Capture.....		71
7.1	Equipamento.....	71
7.2	Aquisição de Dados.....	76
7.2.1	Levantamento topográfico.....	77
7.2.2	Laser Scan.....	77
7.2.3	Fotogrametria.....	79
7.3	Processamento dos dados.....	80
7.3.1	Laser Scan.....	81
7.3.2	Fotogrametria.....	83
7.4	Resultados.....	84
7.4.1	Laser Scan.....	84
7.4.2	Fotogrametria.....	86
7.4.3	Laser Scan + Fotogrametria.....	90

CAPÍTULO 8	Considerações Finais.....	95
8.1	Conclusões	95
8.2	Desenvolvimentos Futuros	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Impacto da construção na economia (adaptado de Agarwal e Sridhar, 2016).....	4
Figura 2.2: Estado da digitalização nas diferentes indústrias (Agarwal e Sridhar, 2016).....	5
Figura 2.3: Diferentes tecnologias de levantamento de informação (adaptado de Agarwal e Sridhar, 2016)	6
Figura 3.1: Eficiência dos processos (adaptado de Minagawa e Kusayanagi, 2015).....	10
Figura 3.2: Sistema para manutenção preventiva BIM (Dang e Shim, 2018).....	11
Figura 3.3: Arquitetura do modelo de informação de pontes (adaptado de Lee <i>et al.</i> , 2012)	14
Figura 3.4: Processo orientado por dados (Dang <i>et al.</i> , 2020).....	15
Figura 3.5: “ <i>Level of development</i> ” dum modelo de viga transversal (Dang, Rho e Shim, 2020)	16
Figura 3.6: Conceito BIM aplicado a ponte estaiada (Shim e Roh, 2021)	17
Figura 3.7: Documentos de suporte, formulários e templates (Rail Baltica, 2019)	18
Figura 3.8: “ <i>The BIM Deliverable</i> ” (Rail Baltica, 2019)	19
Figura 3.9: Ciclo da documentação (PAS 1192-2, 2013)	20
Figura 3.10: Workflow geral da modelação BIM (Rail Baltica, 2019).....	20
Figura 3.11: Exemplo de dum objeto com geometria e informação não gráfica (Rail Baltica, 2019).....	21
Figura 3.12: Versões atuais do formato IFC (https://technical.buildingsmart.org/).....	23
Figura 3.13: Dependências das representações geométricas (buildingSmart International, 2018)	24
Figura 3.14: Exemplo de diagramas de instâncias em IFC-Bridge (buildingSmart International, 2018)	25
Figura 3.15: Esquema estrutural das diferentes disciplinas na ferrovia	26
Figura 4.1: Desempenho de métodos de aquisição de estruturas 3D (Popescu <i>et al.</i> , 2019)	29
Figura 4.2: Principio básico da fotogrametria (Bentley Systems, 2019)	30
Figura 4.3: Algoritmo genérico da fotogrametria (adaptado de Chumak <i>et al.</i> , 2022).....	31

Figura 4.4: Sobreposição recomendada entre imagens (Bentley Systems, 2019)	32
Figura 4.5: Exemplos de aquisição de imagens para fotogrametria (Bentley Systems, 2019).....	32
Figura 4.6: Exemplos de durações de processos (Bentley Systems, 2019)	33
Figura 4.7: Componentes dum corredor ferroviário urbano (Arastounia e Oude Elberink, 2016)	34
Figura 4.8: Fluxograma da metodologia proposta (Arastounia e Oude Elberink, 2016).....	35
Figura 4.9: Princípio básico dum laser scanner (Fontana <i>et al.</i> , 2003).....	35
Figura 4.10: Processo de medições de pontos por Laser Scanning (Tang et al., 2010).....	37
Figura 4.11: Esquema da metodologia apresentada por Lu e Brilakis, (2019)	38
Figura 4.12: Exemplo de deteção automática numa ponte real (Lu, Brilakis e Middleton, 2019).....	39
Figura 4.13: Fluxograma do processamento de informação apresentado por Tang <i>et al.</i> , (2010).....	39
Figura 4.14: Obtenção automática da geometria do tabuleiro (Mehranfar <i>et al.</i> , 2021)	40
Figura 4.15: Deteção automática de carris (Sahebdivani, Arefi e Maboudi, 2020).....	41
Figura 4.16: Plano de voo da <i>St. Croix Crossing Bridge</i> (Lovelace e Wells, 2021)	42
Figura 4.17: Tabuleiro da <i>Bridge 27831A</i> (Lovelace e Wells, 2021)	42
Figura 4.18: Nota de Inspeção da <i>Blatnik Bridge</i> (Lovelace e Wells, 2021)	43
Figura 4.19: Vista geral da <i>Stone Arch Bridge</i> (Lovelace e Wells, 2021)	43
Figura 4.20: Modelo Digital da <i>Stone Arch Bridge</i> (Lovelace e Wells, 2021).....	44
Figura 4.21: Deteção de fendas com AI no <i>ContextCapture Insights</i> (Lovelace e Wells, 2021)	44
Figura 4.22: Interoperabilidade do modelo BIM com modelo numérico de elementos finitos (Shim <i>et al.</i> , 2019)	45
Figura 4.23: Soluções Bentley para modelação BrIM (Mysore, 2018)	46
Figura 4.24: Interoperabilidade de dados das soluções Bentley (Mysore, 2018)	46
Figura 4.25: OpenBridge Modeler Connect Edition (Mysore, 2018).....	47
Figura 5.1: Implantação das obras de arte no ramal ferroviário (Delgado, 2013)	49
Figura 5.2: Vista área do ramal ferroviário (Delgado, 2013)	50
Figura 5.3: Viaduto Poente (Delgado, 2013)	50
Figura 5.4: Corte longitudinal do Tramo T9 (adaptado Refer, 2005)	51

Figura 5.5: Pilares na zona da junta	52
Figura 5.6: Alçados encontro E2 (Refer, 2005).....	52
Figura 5.7: Secção transversal tipo (Delgado, 2013).....	53
Figura 5.8: Carlingas extremas	53
Figura 5.9: Localização dos aparelhos de apoio e ligadores hidráulicos (adaptado Refer, 2005).....	54
Figura 5.10: Ligador hidráulico.....	55
Figura 6.1: Triangulação do terreno (a vermelho) sobre imagem de satélite da Microsoft Bing	58
Figura 6.2: Traçado em planta com curvas de nível do terreno.....	59
Figura 6.3: Perfil longitudinal	60
Figura 6.4: Perfil transversal.....	60
Figura 6.5: Diferentes vistas do corredor ferroviário.....	61
Figura 6.6: Workflow do OpenBridge.....	61
Figura 6.7: Alinhamentos de apoio e junta	62
Figura 6.8: Secções do tabuleiro	62
Figura 6.9: Algumas propriedades do elemento tabuleiro “DECK”	63
Figura 6.10: Template dos pilares estaca.....	64
Figura 6.11: Definições dos pilares.....	64
Figura 6.12: Template do encontro.....	65
Figura 6.13: Informação não gráfica do encontro.....	65
Figura 6.14: Aparelho de apoio do P158.....	66
Figura 6.15: Exemplo de aparelhos de apoio de fornecedores.....	67
Figura 6.16: Formatos de ifc no OpenRail.....	68
Figura 6.17: Ficheiro em formato ifc2x3 - OpenRail.....	68
Figura 6.18: Ficheiro em formato ifc4 - OpenRail	69
Figura 6.19: Ficheiro ifc no ProjectWise.....	69
Figura 6.20: Ficheiro em formato ifc2x3 - OpenBridge	70
Figura 7.1: Drones utilizados no levantamento	72

Figura 7.2: Configurações de Hardware para o Context Capture (Bentley).....	72
Figura 7.3: Drone DJI Mini SE.....	74
Figura 7.4: Drone DJI Mavic 2 Enterprise Advanced	74
Figura 7.5: Laser scanner Leica BLK360	75
Figura 7.6: Levantamento topográfico	77
Figura 7.7: Laser scanner Leica BLK 360	78
Figura 7.8: Levantamento com laser scanner.....	78
Figura 7.9: Pormenor do drone	79
Figura 7.10: Drone a realizar o levantamento.....	80
Figura 7.11: Modelos criados no ContextCapture.....	81
Figura 7.12: Ligações entre levantamentos do laser scanner	82
Figura 7.13: Referenciação dos pontos levantados no Cyclone REGISTER 360.....	82
Figura 7.14: Posição obtida para cada fotografia.....	83
Figura 7.15: Superfície calculada com diferentes apresentações	84
Figura 7.16: Modelo completo do tramo 9 – Laser Scan.....	84
Figura 7.17: Pormenor de um vão – Laser Scan	85
Figura 7.18: Extrato da modelação do arranque dum pilar	86
Figura 7.19: Posições das fotos	87
Figura 7.20: Marcação dos GCP e CP.....	88
Figura 7.21: Identificação dos targets (QR Codes)	88
Figura 7.22: Modelo completo do tramo 9 – Fotogrametria	89
Figura 7.23: Pormenor de um vão – Fotogrametria.....	89
Figura 7.24: Ortomosaico	90
Figura 7.25: Detetor automático de objetos da linha férrea.....	90
Figura 7.26: Faces duplas.....	91
Figura 7.27: Dimensões do tabuleiro levantado	91
Figura 7.28: Comparação entre secções	92

Figura 7.29: Vista geral do modelo BIM sobreposto com o modelo realizado com fotogrametria.....	92
Figura 7.30: Pormenor em planta da ligação entre modelos.....	93
Figura 7.31: Pormenor da ligação do encontro nos modelos	93

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Influência dos sensores GNSS + IMU, adaptado de (Bentley, 2018)	33
Tabela 2: Resumo dos softwares utilizados	48
Tabela 3: Aparelhos de apoio (adaptado Refer, 2005)	54
Tabela 4: Características dos drones utilizados	73
Tabela 5: Características do laser scanner	75
Tabela 6: Características do iPad Pro	76
Tabela 7: Características dos computadores	76
Tabela 8: Duração das produções	86

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria da construção está pronta para a disrupção tecnológica. Grandes projetos de construção normalmente demoram mais 20% de tempo a serem concluídos do que o planeado e custam até 80% acima do orçamentado. A produtividade na construção diminuiu em alguns locais desde a década de 1990 e os retornos financeiros para os empreiteiros tendem a ser relativamente baixos e incertos. Embora o setor da construção tenha demorado a adotar algumas inovações metodológicas e de tecnologia, também há um desafio contínuo quando se trata de evolução do básico. O planeamento de projetos, por exemplo, permanece ainda descoordenado entre o escritório e a obra, pois a sua comunicação ainda é feita com recurso ao papel (Agarwal e Sridhar, 2016).

Pode-se considerar que as infraestruturas de transporte são a espinha dorsal de qualquer país, pois um transporte fiável, seguro e eficiente de bens e cidadãos potencia um desenvolvimento económico e social sustentável. Uma falha do sistema de transportes poderia originar um efeito em cascata com repercussões a outras infraestruturas, tendo por isso um impacto direto nesse desenvolvimento. Recentemente a pandemia de COVID-19 demonstrou rápidas mudanças na procura que tiveram de ser atendidas urgentemente, e suportadas por essas infraestruturas (Justo *et al.*, 2021). Também a Guerra na Ucrânia, demonstra a importância das infraestruturas de transportes, pois pontes continuam a ser destruídas, quer por ações de defesa ou ataque com o intuito de impedir a progressão das tropas adversárias no terreno.

Com a globalização, o desenvolvimento de novas tecnologias de informação e a sua proliferação fácil, conjugado com o envelhecimento das infraestruturas ferroviárias e rodoviárias, requer a necessidade crescente do desenvolvimento de tecnologias e metodologias mais eficientes e mais económicas aplicadas à construção civil para a sua execução, monitorização, manutenção e reparação (Costin *et al.*, 2018). O uso de modelos digitais é ainda uma tecnologia recente na indústria da construção de pontes e viadutos que oferece melhorias para a qualidade da elaboração do processo em termos de precisão, exequibilidade e colaboração, embora ainda existam bastantes limitações e constrangimentos (Shim, Yun e Song, 2011).

1.2 ÂMBITO E OBJETIVOS

A presente dissertação visa apresentar todo o trabalho desenvolvido no âmbito da unidade curricular de DIPRE (Dissertação/Projeto/Estágio) para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Ramo de Estruturas, pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto. O seu objetivo é apresentar soluções técnicas e metodologias para a modelação de modelos digitais de Pontes Ferroviárias, recorrendo a tecnologias de *Reality Capture* e a conceitos de modelação BIM.

O forte crescimento da digitalização no sector da construção requer que os profissionais tenham de adquirir novas competências e conhecimentos digitais, nomeadamente ao nível da digitalização e do *Building Information Modelling*, BIM. Internacionalmente existem várias nações que já recorrem a novas tecnologias para economizar tempo e dinheiro no sector. Desta forma pretendeu-se estudar algumas dessas novas metodologias, exploradas e utilizadas mundialmente e apresentar as suas aplicações num contexto adequado nacional, contribuindo desta forma para a divulgação, padronização e aceleração da utilização desses métodos a nível nacional. Além do estudo da parte conceptual, a definição de processos para a aplicação prática foi um dos objetivos desta dissertação, definindo possíveis *workflows* para a execução de modelos digitais de obras de infraestruturas de transporte. Assim, foram abordados modelos para diferentes propósitos e funcionalidades, tanto na conceção e materialização da solução adotada para a obra, como ao levantamento geométrico e digitalização da obra já executada.

Para além das outras razões citadas, a necessidade pessoal de reciclagem e aquisição de novos conhecimentos técnicos também tiveram importância na decisão por esta temática, assim como um complemento das formações em BIM (orientadas para edifícios) até aqui realizadas.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A dissertação encontra-se organizada em sete capítulos. Inicia-se com o Capítulo 1 em que se realiza uma introdução da temática, o seu âmbito e os objetivos propostos, além de apresentada a estrutura da dissertação. No Capítulo 2 descreve-se o estado da arte, enquadrando-se o assunto no sector da construção civil e integrando as metodologias estudadas em diferentes usos e contextos. No Capítulo 3 abordam-se as tecnologias estudadas, onde se faz uma descrição pormenorizada das suas funções, vantagens, desvantagens, dando exemplos das suas aplicações em obras já realizadas. Resumem-se também algumas conclusões obtidas em outros estudos, do ponto de vista da duração e dificuldade no emprego destas metodologias, assim como da qualidade dos resultados obtidos. O Capítulo 5 caracteriza o caso de estudo, onde é apresentado o Viaduto Sul de acesso à Ponte da Pirâmides em Aveiro. Nos

Capítulo 6 e Capítulo 7 são descritas as tarefas e procedimentos realizados para modelação e levantamento do Viaduto Sul de acesso à Ponte da Pirâmides, utilizando respetivamente tecnologias de *Building Information Modelling* e de *Reality Capture*. O Capítulo 8 finalmente resume o trabalho realizado, sendo apresentadas as considerações finais e propostas de melhorias futuras.

CAPÍTULO 2

AS TECNOLOGIAS E METODOLOGIAS DIGITAIS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

A indústria da construção civil ainda não adotou de forma generalizada novas tecnologias digitais. Estas tecnologias requerem um investimento inicial geralmente considerável, mesmo sabendo que os benefícios a longo prazo são significativos. Estas tecnologias podem tornar a atividade mais competitiva e apelativa para investimento, e assim contrariar a atual tendência decrescente que a indústria da construção tem no impacto da economia (Figura 2.1). Os custos com Investigação e Desenvolvimento na construção ficam atrás de outras indústrias, menos de 1% das receitas, contra 3,5% a 4,5% para a indústria automóvel e aeroespacial. Também é válido para os custos associados à tecnologia de informação, que representa menos de 1% das receitas da construção, isto apesar de uma série de novas soluções dedicadas de *software* estarem a ser desenvolvidas (Agarwal e Sridhar, 2016).

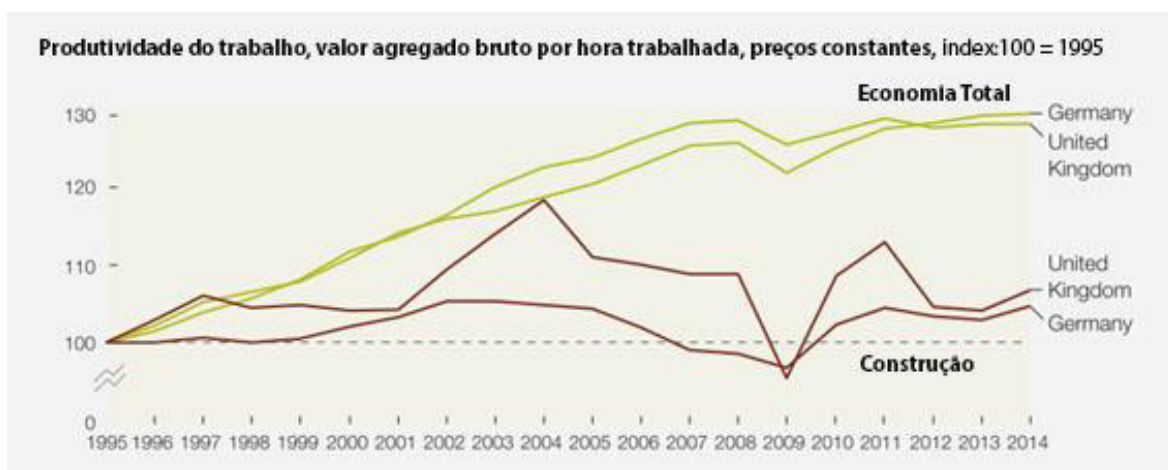


Figura 2.1: Impacto da construção na economia (adaptado de Agarwal e Sridhar, 2016)

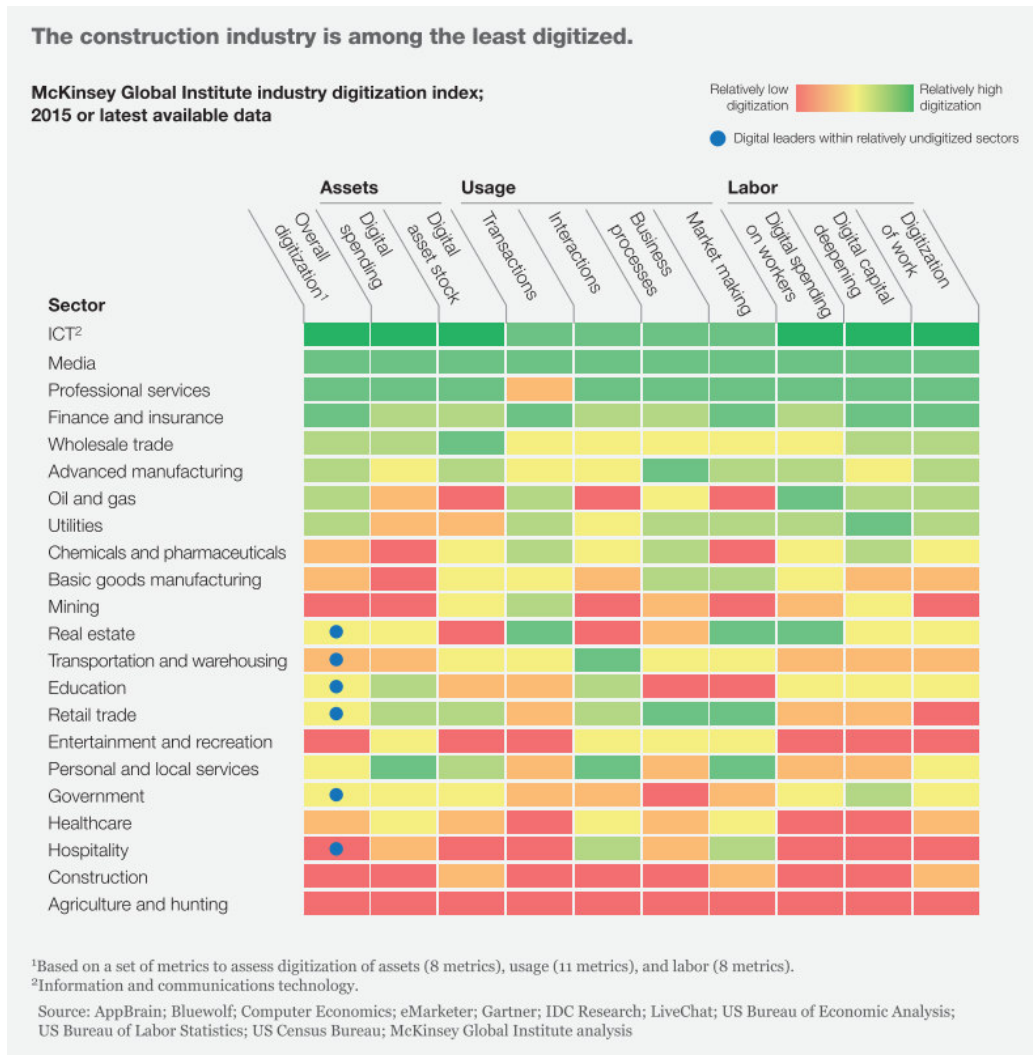


Figura 2.2: Estado da digitalização nas diferentes indústrias (Agarwal e Sridhar, 2016)

Na Figura 2.2 podemos verificar que a indústria da construção encontra-se bastante atrasada em termos de digitalização quando comparada com outros setores de atividade que se encontram em fase de transição ou em fase de maturação na implementação de soluções digitais. Os desafios técnicos específicos do setor da construção são responsáveis pelo ritmo lento da evolução da digitalização no sector. A implementação de soluções digitais em variados tipos obras torna-se difícil, como por exemplo quando comparamos os elementos e as metodologias empregues na execução de um oleoduto com as da execução de um aeroporto. Também as pequenas empresas de construção que a maior parte das vezes funcionam como subcontratadas, devido aos seus baixos níveis de sofisticação, são outro desafio para a construção de novos recursos em escala. Os projetos são cada vez mais complexos e de maior escala. A crescente procura por construções ambientalmente sustentáveis requiere uma alteração das práticas tradicionais, e a escassez de mão de obra qualificada e de pessoal de fiscalização só vai piorar a situação. São questões profundas que exigem novas formas de pensar e trabalhar. Tradicionalmente, o setor tende a realizar melhorias incrementais, em parte porque muitos acreditam que cada projeto é único, que não

é possível escalar novas ideias e que abraçar novas tecnologias é impraticável. É por isso necessário um grande incentivo para os intervenientes da indústria na construção identificarem soluções que permitam aumentar a produtividade e entrega de projetos por meio de novas tecnologias e práticas aprimoradas (Agarwal e Sridhar, 2016). Os poucos avanços no emprego de tecnologias digitais focaram-se na gestão de projetos de construção baseada numa abordagem de *Building Information Modelling*, no entanto, esta abordagem foi desenvolvida principalmente em torno de projetos de construção de edifícios e pouco esforço foi dedicados a projetos relacionados a infraestruturas, nomeadamente pontes. Para esses projetos, muitas vezes há variações geométricas e semânticas significativas entre as estruturas, dificultando o uso de esquemas de dados e metodologias BIM existentes. Trabalhos recentes indicam que a modelação paramétrica pode representar uma solução proporcionando uma maior eficiência no processo de conceção do projeto e interoperabilidade, mas a literatura sobre este assunto ainda é extremamente escassa (Girardet e Botton, 2021).

As incertezas geológicas são um dos principais motivos pelos quais os projetos apresentam atrasos e ultrapassam o orçamento. As discrepâncias entre as condições do solo e as estimativas iniciais do levantamento podem exigir mudanças dispendiosas de última hora, que podem até mudar o âmbito ou a conceção do projeto. Novas técnicas que integram fotografia de alta-definição, laser scan 3D e sistemas de informação geográfica, possibilitadas por melhorias recentes na tecnologia de veículos aéreos não tripulados (UAV), permitiram melhorar drasticamente a precisão e a velocidade de execução dos estudos.

A fotogrametria, por exemplo, fornece imagens de alta qualidade e definição de grandes áreas de levantamento, mas leva tempo para ser convertida num formato utilizável. A tecnologia de deteção e alcance de luz (LIDAR) é mais rápida do que as tecnologias convencionais e fornece modelos 3D de alta qualidade que podem ser integradas com ferramentas de planeamento de projeto, de que é exemplo o BIM, como mostra a Figura 2.3.

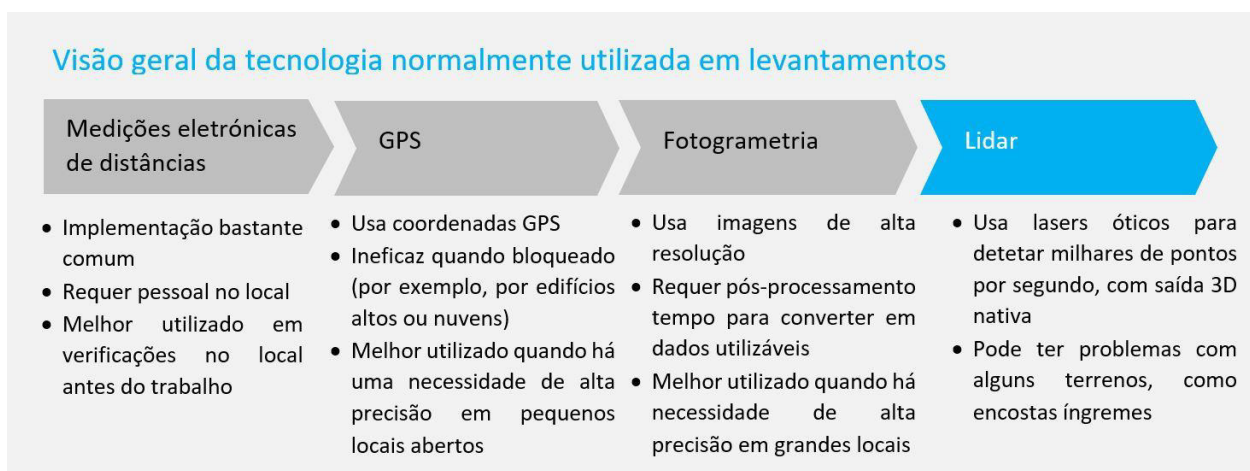


Figura 2.3: Diferentes tecnologias de levantamento de informação (adaptado de Agarwal e Sridhar, 2016)

Estas técnicas avançadas de levantamento são complementadas por sistemas de informação geográfica que permitem sobrepor mapas, imagens, medições de distância e geolocalizações retiradas de *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Essas informações podem ser carregadas noutros sistemas analíticos e de visualização para uso no planeamento e na execução das construções.

Estas novas tecnologias de levantamento estão mais acessíveis pois o seu custo tem vindo a reduzir-se substancialmente. O LIDAR e o GNSS cinemático em tempo real (RTK/PPK) continuam com preços bastante altos e dificilmente acessíveis ou justificáveis em muitos empreendimentos, mas as câmaras de alta-resolução que são agora mais pequenas e leves possibilitam serem montadas em drones o que torna a operacionalidade mais rápida e mais barata (por ex. em comparação com as câmaras montadas em helicópteros para levantamentos aéreos) (Agarwal e Sridhar, 2016).

CAPÍTULO 3

BUILDING INFORMATION MODELLING (BIM) NAS INFRAESTRUTURAS

A dissertação tem como principal finalidade o estudo de metodologias para criação de modelos digitais de pontes e viadutos, recorrendo ao uso de tecnologias de captura de objetos reais e ao uso de princípios BIM (*Building Information Modelling*) para diferentes usos e aplicações. Atualmente a importância da informação nas várias etapas do ciclo de vida de uma construção, tais como projeto, construção e manutenção não pode ser ignorada e tornou-se essencial (Chen *et al.*, 2015). Segundo Chen *et al.*, (2015) a U.S. National Building Information Model Standard Project Committee define o BIM como “*a digital representation of physical and functional characteristics of a facility and a shared knowledge resource for information about a facility forming a reliable basis for decisions during its life-cycle*”. Eastman *et al.*, (2011) descreve o BIM como a atividade de modelar a informação do edifício. A definição de BIM apresentada por Shim *et al.* (2012) refere um desenvolvimento e uso de um modelo digital para simular a construção e utilização de uma infraestrutura, baseado em dados, orientado a objetos e paramétrico.

A definição atribuída na ISO 29481-1, (2016) de BIM é “*use of a shared digital representation of a built object (including buildings, bridges, roads, process plants, etc.) to facilitate design, construction and operation processes to form a reliable basis for decisions*”. A ISO/DIS 19650-1.2 (2018) estabelece os conceitos e princípios para a gestão da informação num estado de maturidade descrito com “*building information modelling*” (BIM). O documento fornece recomendações de metodologias para troca, gravação, revisão e organização de informação utilizada por cada interveniente nas várias etapas do processo da construção, entre as quais o planeamento, conceito, projetos, construção, operação, manutenção, reparação e demolição.

O termo BIM tem assim várias definições e usos, sendo citado como um produto, um processo colaborativo ou mesmo um requisito de gestão para o ciclo de vida de uma instalação (Costin *et al.*, 2018). Quando visto como apenas um modelo 3D de uma edificação com atributos e funções adicionais, BIM pode originar confusão e levar a más práticas, pois BIM representa informação e o modelo 3D é apenas uma forma de representação possível dessa informação. Nas etapas iniciais, o uso BIM era distinguido pela capacidade de representar elementos ao invés de linhas, curvas, arcos, etc., mas evoluiu para uma

ferramenta poderosa de análise de modelos digitais, capaz de detetar colisões entre objetos, escolha de produtos e conceção integral do projeto (Blanco e Chen, 2014).

3.1 RELAÇÃO DO BIM COM OUTRAS METODOLOGIAS

A tecnologia BIM possibilita o desenvolvimento de uma construção virtual e uma partilha de informações entre as diferentes fases da obra. A Figura 3.1 ilustra o modo como o BIM aumenta a eficiência dos projetos de construção (Minagawa e Kusayanagi, 2015). As alterações de projeto na fase de construção ou um projeto deficiente da estrutura a construir diminuem drasticamente a eficiência nas fases de operação e manutenção. No caso de um projeto tradicional, uma alteração não prevista em projeto causa um atraso no cronograma, redução da produtividade e custos não orçamentados. Se usarmos um processo de projeto BIM, o custo do projeto aumenta de alguma forma, mas o impacto na redução do custo total é maior do que o aumento do custo no projeto.

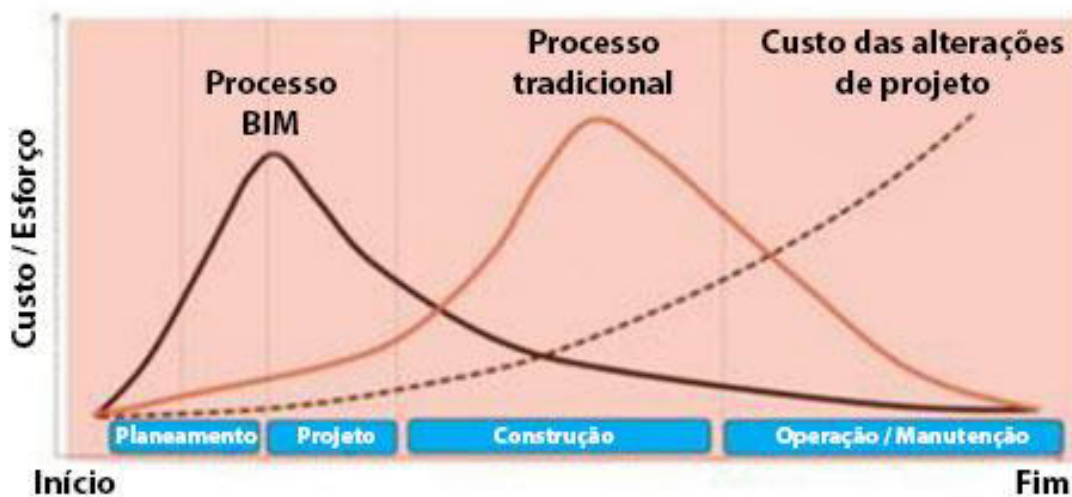


Figura 3.1: Eficiência dos processos (adaptado de Minagawa e Kusayanagi, 2015)

Liu *et al.* (2017) refere que o BIM inclui informações de construção muito ricas e detalhadas, tanto geométricas quanto semânticas, no entanto, não inclui as informações circundantes. Os mesmos autores ilustraram também as limitações do BIM no ordenamento do território para a construção. Às vezes, informações espaciais são necessárias num sistema BIM para uma avaliação ambiental, um arranjo de recursos ou uma análise de segurança. Por exemplo, informações topográficas, que são essenciais para o planeamento espacial da construção de barragens por gravidade, só podem ser obtidas por *Geographic Information System* (GIS). A otimização da localização de gruas em estaleiros de obras é outro exemplo clássico de que o BIM requer informações espaciais circundantes.

Um sistema de integração de BIM e GIS permite a gestão eficaz da informação em diversas etapas do ciclo de vida de um projeto, em particular, no planeamento, projeto, construção, operação e manutenção. As informações em qualquer escala espacial e temporal podem estar disponíveis nesse sistema para diferentes aplicações. A gestão eficaz das informações de diferentes fontes também pode fornecer suportes essenciais para a tomada de decisões.

A necessidade de modelos avançados para suportar a integração de dados digitais de várias fontes torna o *Building Information Modelling* uma ferramenta fundamental para diferentes áreas. Os projetos de infraestruturas também podem ser relacionados ao BIM, exigindo múltiplas fontes de dados provenientes de diferentes domínios, entre os quais a Informação Geográfica, tecnologias de levantamento digital e modelação de diferentes especialidades. Por exemplo, técnicas de fotogrametria e laser scanning (com base em plataformas do tipo satélite, aviões, drones ou terrestres) são a principal fonte de informações métricas para os projetos (Barazzetti, Previtali e Scaioni, 2020).

Dang e Shim (2018) referem que tecnologia baseada em modelação BIM está-se a tornar cada vez mais numa tendência inovadora na indústria da construção a nível global, e que os seus processos estão a ser utilizados na criação e gestão de construções durante o seu ciclo de vida. Referem também que o BIM representa digitalmente o processo de construção em termos de facilitar a troca e interoperabilidade das informações do modelo. Além disso, abrange todas as informações geométricas e não geométricas, restrições espaciais ou geográficas, quantidades e características físicas da estrutura. Os autores apresentam ainda um sistema de manutenção preventiva apoiado num modelo BIM (Figura 3.2).

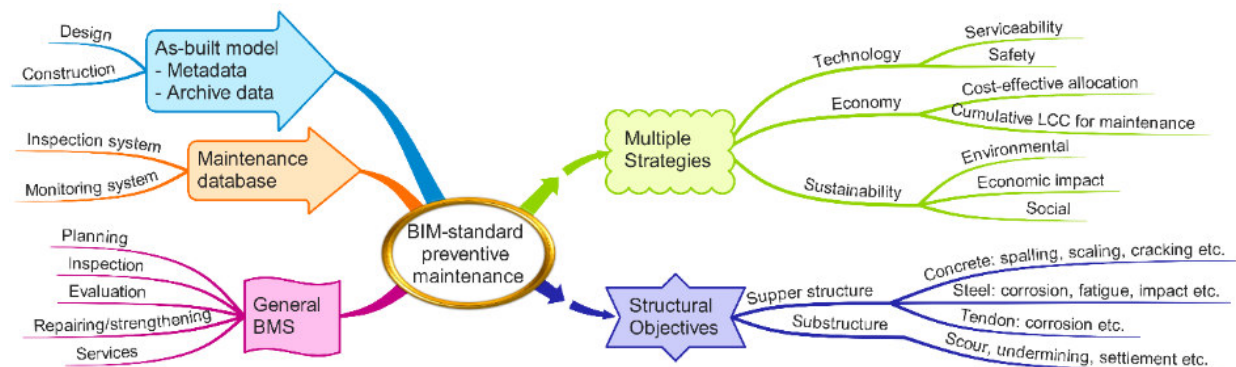


Figura 3.2: Sistema para manutenção preventiva BIM (Dang e Shim, 2018)

Um projeto integrado de construção de pontes utilizando informação tridimensional associada a informação não gráfica será uma inovação da metodologia convencional e bidimensional de projeto, construção e manutenção. Atualmente, a indústria da construção depende de desenhos em papel 2D como a principal representação dos documentos de execução, enquanto que outras indústrias já implementaram com excelentes resultados processos integrados de projeto e fabricação baseados em

CAD 3D, com a conseqüente redução de custos, entrega mais rápida e melhoria da qualidade e interoperabilidade (Lee *et al.*, 2012).

BIM é o processo de produzir e gerir dados sobre a construção durante o seu ciclo de vida (Lee *et al.*, 2012). O termo BIM foi popularizado por vários fornecedores de software como a Autodesk, a Bentley Systems, a Graphisoft entre outros, como uma representação digital do processo de construção para facilitar a troca e a interoperabilidade das informações em formato digital. Como referido anteriormente o BIM abrange geometria, relações espaciais, informações geográficas, quantidades e propriedades dos componentes do edifício. Através desta metodologia as quantidades e propriedades compartilhadas de materiais podem ser facilmente extraídas. O BIM é capaz de alcançar essas melhorias por meio da modelação de representações dos vários componentes que formam a estrutura. Esta é uma mudança substancial do método tradicional de desenho assistido por computador, isto é, do desenho com linhas vetoriais que se combinam para representar objetos, para um método em que os objetos têm informação não gráfica.

3.2 BRIM - BRIDGE INFORMATION MODELLING

Nos últimos anos, o BIM tem-se mostrado uma ferramenta válida para apoiar projetos na arquitetura e na indústria da construção. A maioria dos pacotes de software BIM disponíveis no mercado são usados principalmente para edifícios e para os seus componentes. Embora o BIM tenha sido desenvolvido principalmente para edifícios, os conceitos podem ser estendidos a infraestruturas, desde o projeto até as fases de construção à manutenção. De acordo com Liu *et al.* (2017), as aplicações no âmbito das infraestruturas incluem cinco categorias principais:

- Infraestruturas de transporte (rodovia, ferrovia, pontes, túneis, aeroportos, portos, etc.)
- Infraestruturas de energia (estações de produção de energia, refinarias, minas, etc.)
- Infraestruturas de redes (oleodutos, redes elétricas, redes de águas, etc.)
- Infraestruturas de recreio (parques, estádios, etc.)
- Infraestruturas ambientais (barragens, diques, aterros, etc.)

Lee *et al.* (2012) refere que a modelação de pontes baseada na metodologia *Bridge Information Modelling* (BRIM) foi proposta com uma inovação dos processos de construção de pontes desde o planeamento até a operação. BRIM é a organização de todos os dados de componentes necessários para suportar o ativo da ponte ao longo do seu ciclo de vida. O conceito é o mesmo do BIM, mas está intimamente relacionado com um eixo do projeto rodoviário ou ferroviário. Para cada processo de construção, desde o

planeamento até a manutenção, o modelo precisa ser revisto e precisa ter a geometria e informações diferentes para todos os componentes da ponte.

O BrIM deve se adequar ao projeto rodoviário e deve permitir a análise estrutural da ponte. Todas as entidades específicas precisam ser colocadas em relação ao eixo da estrada ao longo da linha de referência e para todas as definições de seção em cada ponto. Entre os parâmetros de geometria, as restrições dos requisitos de detalhe de armadura são muito importantes para pontes, pois são os parâmetros que permitem a disposição automática de armaduras provenientes dos programas de cálculo. Para revisão e reutilização eficientes dos dados de projeto, é essencial a utilização de uma modelação paramétrica para construção de modelos BIM de pontes. Embora a técnica de modelação paramétrica seja prática comum em *Computer Assisted Engineering (CAE)*, não é tão comum na indústria da construção. Anteriormente à modelação das pontes em 3D é necessário definir os principais parâmetros de projeto e as suas relações. As dimensões de um modelo paramétrico dependem das suas restrições, de modo a que uma revisão de uma dimensão pode automaticamente alterar dimensões subsequentes de acordo com a sua relação. Os elementos base do modelo são construídos e os outros elementos serão adicionados, relacionados aos elementos base. Os modelos 3D têm restrições hierárquicas em termos de localização ou dimensão. Quando o modelo 3D possui uma quantidade significativa de detalhes e dimensões, as restrições podem ser muito complexas e originar uma menor eficiência para o projeto e para a construção. Portanto, os parâmetros precisam ser cuidadosamente definidos pelo projetista do projeto.

O *Bridge Information Modelling (BrIM)* tem sido mais lento para se desenvolver no setor de infraestrutura de transporte do que o *Building Information Modelling (BIM)* no setor de edifícios. Em Dezembro de 2015 foi apresentado um projeto financiado pelos Estados Unidos da América para a investigação de standards para BrIM (Bartholomew *et al.*, 2015). Foi realizado com vista à exploração de novos métodos para a engenharia de pontes e para aproveitar os rápidos avanços na tecnologia da informação computacional. Outro objetivo do projeto foi investigar maneiras de padronizar as informações à medida que são passadas entre os vários participantes nos projetos, desde o conceito inicial do projeto até ao final da vida útil. Há muitos interlocutores envolvidos e muitas trocas de informação que ocorrem durante este ciclo de vida. O objetivo final é alcançar a interoperabilidade entre todas essas entidades com a menor quantidade de recriação de dados e, finalmente, avançar na prática da engenharia de pontes. Chamado de “openBrIM”, trata-se dum sistema de modelação de informações paramétricas, não proprietário, aberto e orientado para a comunidade. No entanto, previram a possibilidade de que o sistema IFC da indústria da construção fosse a escolha padrão na comunidade, podendo haver a oportunidade de fundir os dois sistemas. A estrutura de dados IFC seria então o padrão para intercâmbio e o OpenBrIM, uma

interface lógica, usado para desenvolver objetos, bibliotecas e componentes da ponte (Bartholomew *et al.*, 2015).

Atualmente, o formato padrão para um modelo de BIM de pontes como IFC-BRIDGE ainda não está disponível para aplicação prática. A classificação e a nomenclatura são importantes para a reutilização dos modelos e os modelos 3D podem incluir informações em várias camadas para os diferentes utilizadores, como o projetista, o empreiteiro e o dono de obra. Conforme ilustrado na Figura 3.3, cada elemento ou componente é primeiro construído como um modelo 3D e depois utilizado para construir um sistema ou módulo.

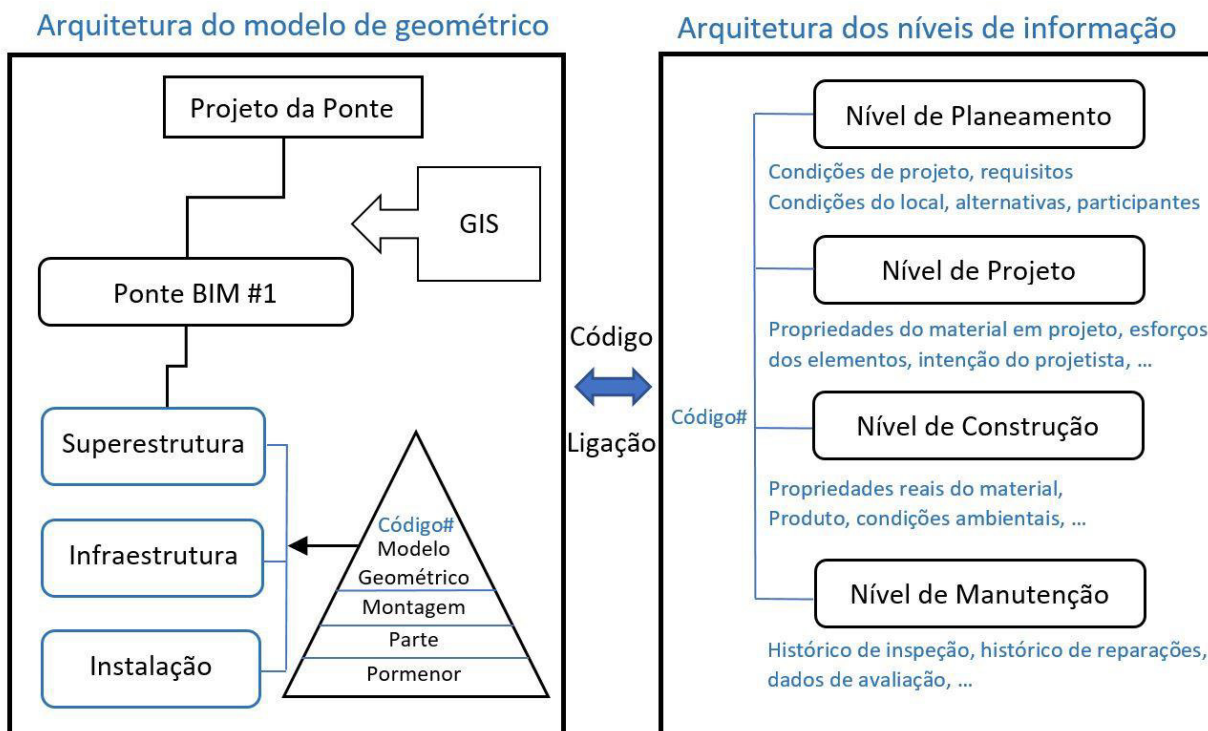
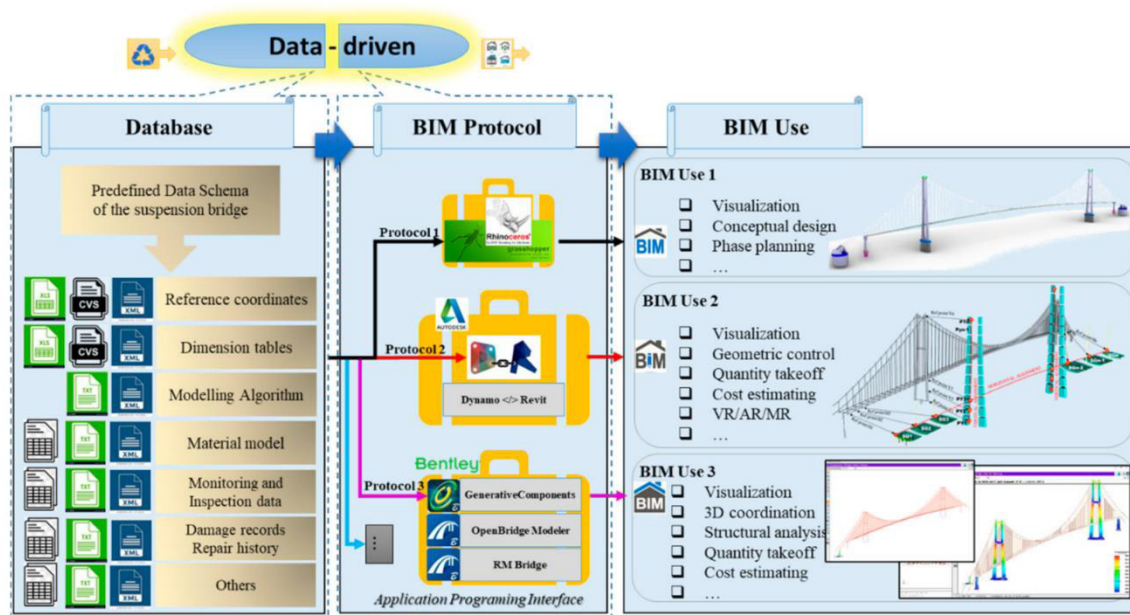


Figura 3.3: Arquitetura do modelo de informação de pontes (adaptado de Lee *et al.*, 2012)

Do ponto de vista de um projetista, um desenho orientado para dados ajuda a atingir vários propósitos. A Figura 3.4 demonstra o processo geral do projeto orientado a dados para vários usos BIM. A base de dados é recolhida respeitando um esquema de dados, que é pré-definido pelos engenheiros, incluindo todas as informações conhecidas. A base de dados pode ser armazenada em arquivos num servidor BIM para que todos intervenientes tenham fácil acesso, podendo encontrá-la e manipulá-la se necessário. A partir desta única fonte de informação, vários protocolos BIM podem ser usados para permitir diferentes aplicações de acordo com o uso BIM desejado. Num software BIM comercial, é possível exportar qualquer documentação de projeto gerada, como desenhos, levantamentos de quantidades, solicitações de informações (RFIs), cronogramas de obras, etc. (Dang *et al.*, 2020).


 Figura 3.4: Processo orientado por dados (Dang *et al.*, 2020)

3.3 REQUERIMENTOS BIM

A ISO/DIS 19650-1.2, (2018) define o nível de desenvolvimento, incluindo o nível de detalhe (LOD) e o nível de informação (LOI), e é agora referido coletivamente como “*level of information need*”. Um modelo BIM de uma ponte suspensa compreende uma grande quantidade de informações. Para economizar recursos durante a tarefa de produção de informações, surge um desafio crítico em termos de gestão do nível de desenvolvimento do modelo. Dependendo das várias aplicações do BIM durante os diferentes estágios do ciclo de vida da ponte, o “*level of detail*” (LOD) e o “*level of information*” (LOI) devem ser razoavelmente mantidos. O LOD, que se relaciona com o conteúdo gráfico dos modelos, define o procedimento pelo qual a geometria 3D do modelo da ponte pode atingir diferentes níveis de refinamento. Dependendo de cada estágio de desenvolvimento da construção, ou seja, desde a concepção/projeto e construção até a operação e manutenção, a parte líder exige um LOD diferente para garantir que o projeto seja desenvolvido com detalhes suficientes. Ele visa criar uma premissa para a tomada de decisões sobre o desenvolvimento do projeto e para operar o projeto concluído de forma eficiente. Em contraste, a LOI para cada entrega de informação deve ser determinada de acordo com sua finalidade. Isso deve incluir a determinação apropriada da qualidade, quantidade e segmentação das informações. Neste caso, o projetista pode selecionar entre os parâmetros acima mencionados as informações mínimas necessárias para responder e cumprir cada requisito relevante, incluindo as informações exigidas pelos outros intervenientes no processo. Informações adicionais além desse mínimo são consideradas um desperdício. O LOD e o LOI estão intimamente alinhados, pois é necessário que eles

se desenvolvam simultaneamente. Dang *et al.*, (2020) apresentam um exemplo de “level of development” para uma viga transversal numa ponte suspensa (Figura 3.5).

Level of Detail <i>Definition for different stages</i>		Level of Information Need for a Stiffening Girder		Level of Information <i>Definition for different BIM Uses</i>	
		LOD	vs. LOI		
LOD 100	Conceptual - Alignment (point, curve, line, level...)		 - Approximate objects - Environmental conditions - Load conditions - Material	LOI 100	Plan - Cost estimation - Phase planning - Programming - Site analysis
LOD 200	Schematic Design - Approximate objects (quantities, size, shape, location, orientation, environmental/loading conditions, material...)		 - Object integration with details - Objects with high precision - Archive - Database	LOI 200	Design - Structural/mechanical analysis - Lighting/energy analysis - Sustainability evaluation - Code validation
LOD 300	Detailed Design - Objects with key features (quantities, size, shape, location, orientation, environmental/loading conditions, material...)		 - Object integration with details - Objects with high precision - Archive - Database	LOI 300	Detailed Design - 3D coordination - Site utilization planning - Construction system design
LOD 400	Construction, Fabrication, Assembly - Object integration with details (detailing for manufacture, fabrication, installation...)		 - Object integration with details - Objects with high precision - Archive - Database	LOI 400	Construct - Digital fabrication - 3D control and planning - Record modeling
LOD 500	As-built - Field verified representation (damage record, repair history, current condition assessment...)		 - Object integration with details - Objects with high precision - Archive - Database	LOI 500	Operate - Maintenance scheduling - Building system analysis - Asset/space management - Disaster planning and management

Figura 3.5: “Level of development” dum modelo de viga transversal (Dang, Rho e Shim, 2020)

Shim e Roh (2021) apresentam um conceito para modelo digital de uma ponte estaiada (Figura 3.6).

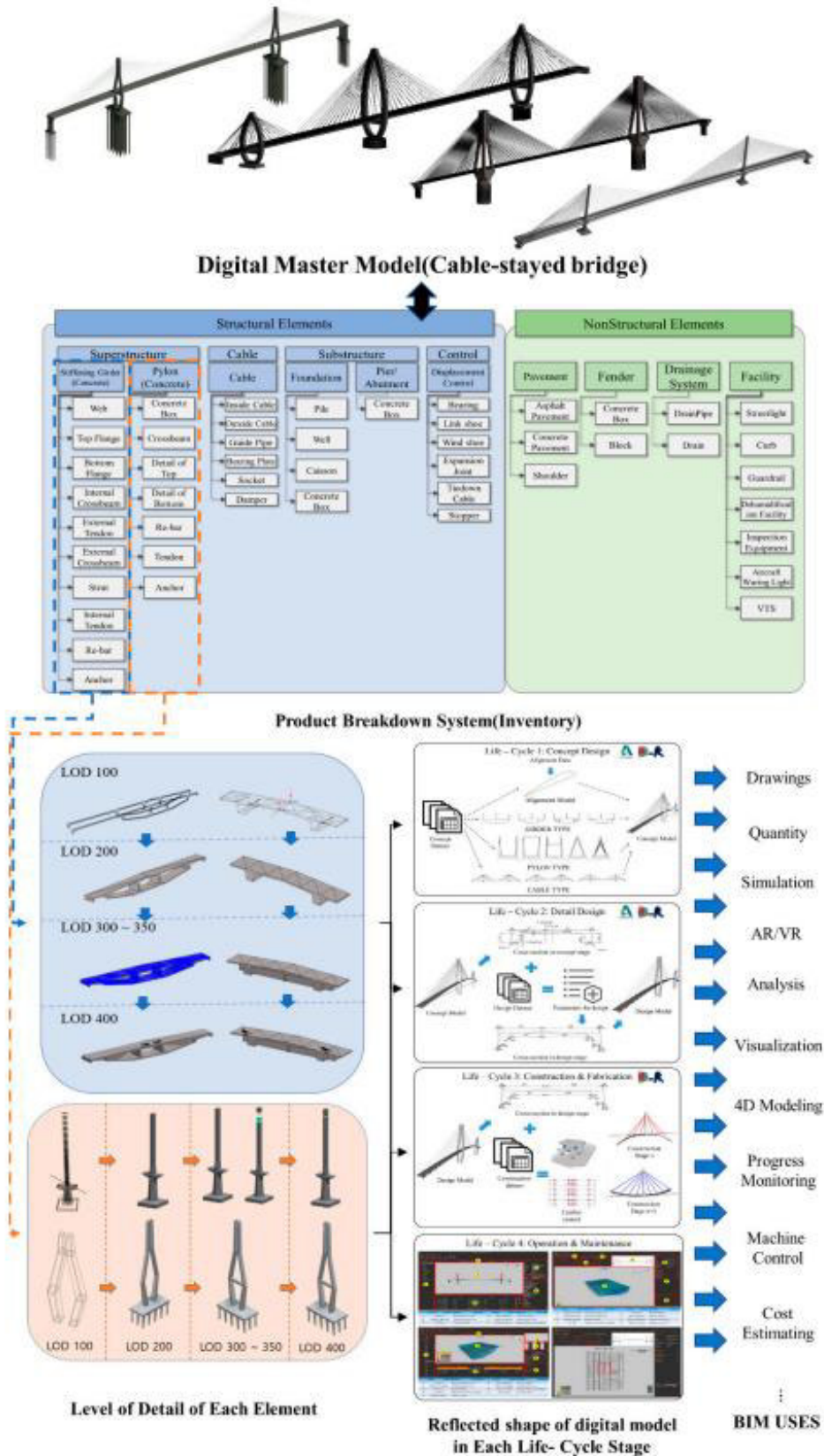


Figura 3.6: Conceito BIM aplicado a ponte estaiada (Shim e Roh, 2021)

A *Rail Baltica* é uma ferrovia de alta velocidade em construção entre Varsóvia (Polónia) e Tallinn (Estónia), onde os comboios irão operar a velocidades máximas de 240 km/hora entre 2026 e 2030. Os governos da Estónia, Lituânia e Letónia decidiram, estudar e implementar metodologias de BIM para a execução e manutenção desta linha de grande escala com 780km de extensão. Fizeram-no seguindo a diretiva europeia 2014/24/EU, esperando um acréscimo na eficiência de dinheiros públicos e determinar a solução economicamente mais vantajosa, assim como o menor custo tendo em conta o ciclo de vida da obra. Assim, a RB Rail AS é uma parceria entre os três Estados Bálticos estabelecida em outubro de 2014. Os processos BIM fornecerão à RB Rail AS um ativo digital que pode ser usado para entender melhor o projeto, melhorar a tomada de decisão, o envolvimento com as principais partes interessadas, o planeamento e a gestão aprimorada de ativos. Criaram para isso documentação que tem como função detalhar e especificar todas abordagens BIM, suas estratégias, manuais e standards denominado de “Design Guidelines – BIM Manual” (Rail Baltica, 2019) com apoio numa série de documentos de suporte entre os quais “Design Guidelines - Codification & Data Management” (Rail Baltica, 2019), “Design Guidelines - CAD Standards” (Rail Baltica, 2019) e “Building Information Management (BIM) Employer’s Information Requirements” (Rail Baltica, 2018) (Figura 3.7).

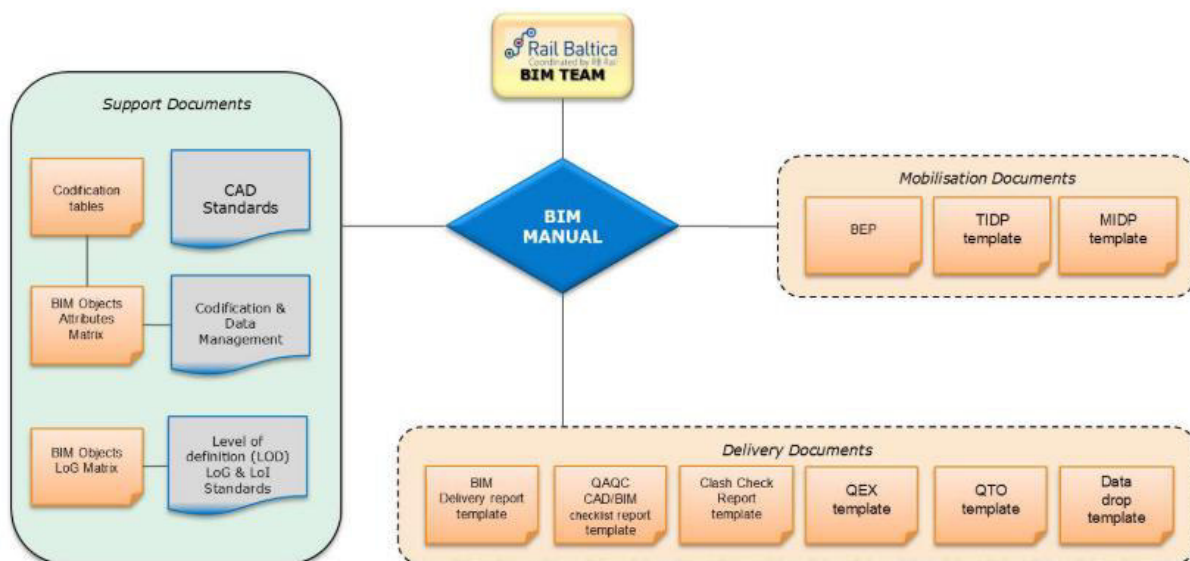


Figura 3.7: Documentos de suporte, formulários e templates (Rail Baltica, 2019)

O processo iniciado pela RB Rail AS introduz um novo tipo de entregas no projeto de infraestruturas de transporte, a entrega BIM, que é o elemento central do projeto das obras e a fonte de outras entregas tanto em desenhos 2D como em tabelas de informação de objetos (Figura 3.8).

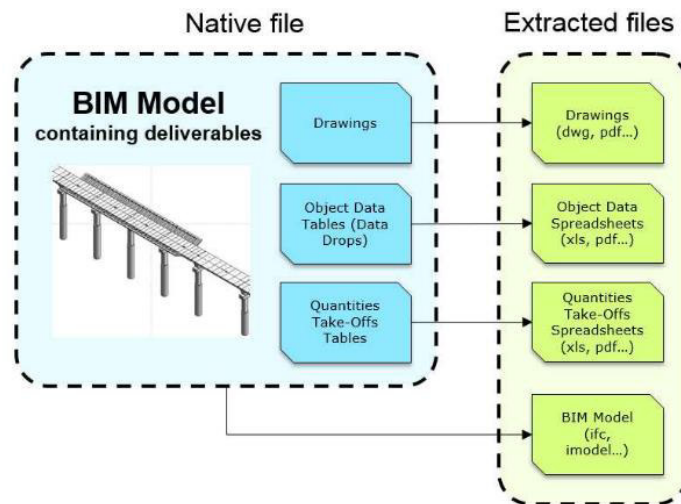


Figura 3.8: “The BIM Deliverable” (Rail Baltica, 2019)

O manual distingue a diferença entre um modelo 3D e um modelo BIM. Os modelos 3D contêm apenas informação geométrica, enquanto que os modelos BIM contêm essa mesma informação geométrica, complementada com dados de informação anexados aos objetos. Os primeiros, definem a geometria dos elementos, objetos e montagens que permitem uma coordenação 3D por meio de deteção de colisões, mas não fornecem um conjunto completo de informações do objeto como a metodologia BIM pretende, estando portando esses modelos 3D limitados a objetos não edificáveis. A Estratégia BIM da *Rail Baltica* pretende seguir a abordagem estabelecida na norma europeia ISO 19650-1, que se enquadra nas Normas Internacionais de entrega de documentos da buildingSMART. Define ainda, com base na PAS 1192-2:2013 o que é o BEP, *BIM Execution Plan*, fornecendo templates e diretivas para a sua aplicação (Figura 3.9). O Plano de Execução BIM é um plano elaborado pelos fornecedores para explicar como serão realizados os aspetos de modelação das informações no projeto. O plano é preparado como uma resposta direta aos Requisitos de Informação e Especificações Técnicas do Dono de Obra (EIR/TS) e deverá detalhar as entregas do projeto estipuladas pelo contrato e os requisitos de troca de informações descritos no Manual BIM. Este plano deverá ser preparado no início do projeto, mas deve ser atualizado posteriormente para cada etapa do projeto. Independentemente das entregas solicitadas nas diferentes etapas da Fase de Projeto, o fluxo de trabalho geral colaborativo e iterativo deve prevalecer. Os projetistas devem desenvolver os modelos BIM e as entregas relacionadas de forma colaborativa, gerando em determinados momentos um modelo de entrega BIM federado, que durante as reuniões de Revisão de Projeto deve obter entradas internas ou externas para corrigir numa próxima iteração. Em determinado momento será a Entrega final e estará sujeito à Aprovação do Dono de Obra (Figura 3.10).

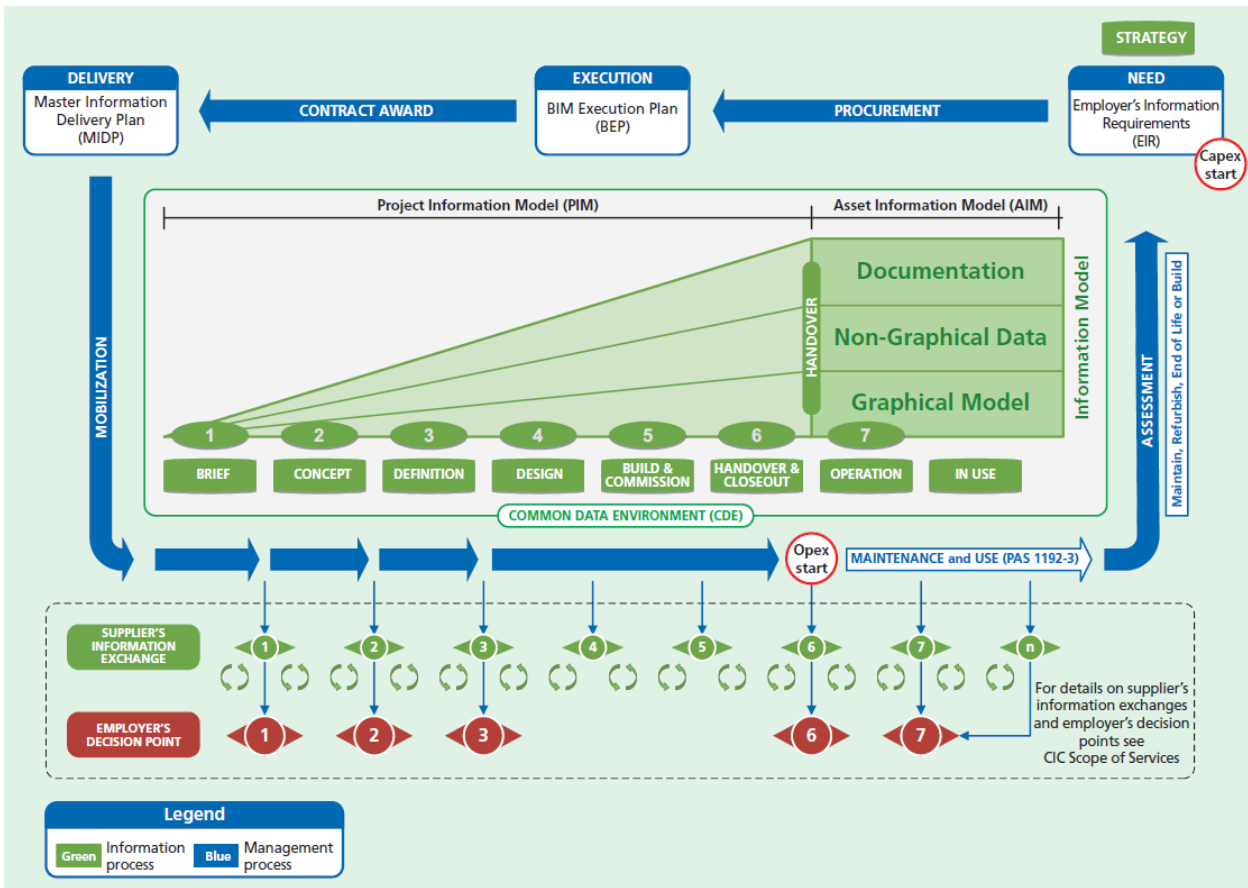


Figura 3.9: Ciclo da documentação (PAS 1192-2, 2013)

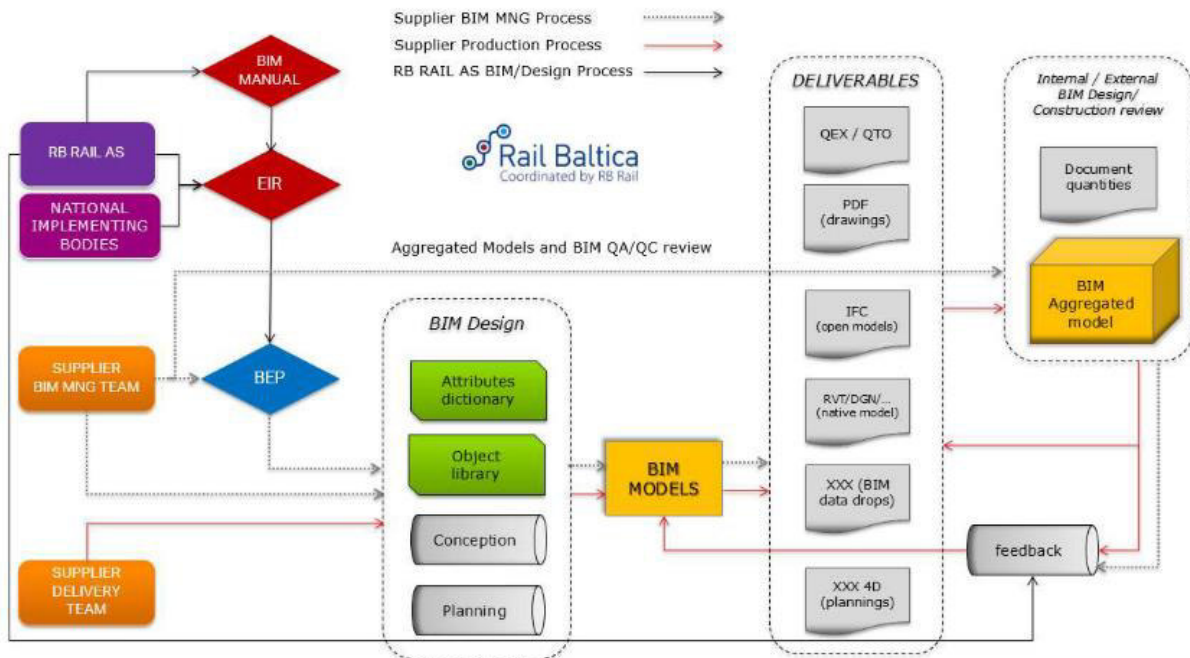


Figura 3.10: Workflow geral da modelação BIM (Rail Baltica, 2019)

Define ainda o LOD, *Level of Definition* como um termo coletivo usado para gerir as expectativas de detalhe duma categoria de objeto modelado, para um determinado propósito, normalmente relacionado às etapas do projeto. Este termo é usado para descrever tanto o nível de detalhe geométrico (LoG, *Level of Geometric*) como o nível de informação (LoI, *Level of Information*). O nível de detalhe geométrico é a descrição da qualidade do conteúdo gráfico de um objeto num ponto durante a entrega do projeto. Relaciona-se com a quantidade de detalhes incluída no modelo Espaço, Sistema ou Elemento. O nível de informação é a descrição da qualidade do conteúdo não gráfico de um objeto num momento durante a entrega do projeto. Refere-se às informações que estão incluídas nos elementos do modelo e que estão contidas nos atributos dos elementos (Figura 3.11).

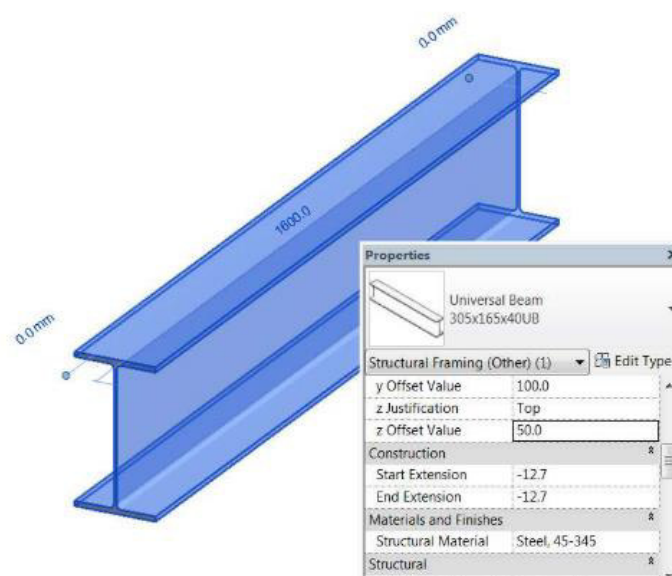


Figura 3.11: Exemplo de dum objeto com geometria e informação não gráfica (Rail Baltica, 2019)

3.4 PARTILHA DE INFORMAÇÃO

O *Industry Foundation Classes* (IFC) é um formato aberto projetado para partilha de dados nos setores de construção e gestão de instalações. É o padrão de dados definido na ISO 16739 que é desenvolvido e mantido pela buildingSMART International. Este padrão define três formatos de dados IFC, IFC, IFCXML e IFCZIP.

O IFC possui diferentes versões ou esquemas, nem todos são criados ou suportados por todas as ferramentas de modelação. A buildingSMART certifica que todas as ferramentas de BIM são compatíveis com IFC em cada versão. O BEP deverá definir qual formato IFC a ser usado no projeto. É importante levar em consideração que qualquer formato IFC definido para o projeto dentro do BEP deve incluir não apenas

a geometria 3D, mas também as informações de conjuntos de propriedades. De entre as correntes versões de IFC destaca-se as seguintes:

- IFC4: a versão mais recente e avançada, mas ainda não totalmente suportada pelas ferramentas de modelação, contudo as ferramentas de gestão BIM suportam,
- IFC2x3: este é o formato mais suportado e estável até hoje. Ele deverá ser usado se a versão IFC4 não for suportada por nenhuma parte interessada. Além disso, algumas ferramentas permitem configurar o IFC com subformatos como o “IFC2x3 Coordination View Version 2.0”, o “IFC2x3 CoBie 2.4 Design Deliverable” ou interagir com a configuração de mapeamento interno,
- IFC2x2: esta versão só é proposta no caso de nenhuma das outras acima referidas ser suportada.

Na Figura 3.12 estão assinaladas as atuais versões do formato IFC, assim como o seu estado e data de publicação. Podemos verificar que apesar de existirem versões mais recentes do formato, as versões oficiais e estáveis são as acima mencionadas.

Version	Name (HTML Documentation)	ISO publication	Published (yyyy-mm)	Current Status	HTML	EXPRESS	XSD	pSet XSD	OWL HTML	RDF	TTL
4.4 - dev	IFC 4.4.0 development	not started		Extension of 4.3.0. Adding additional functionality (mainly for Tunnels). Currently under development in the Standards & Solutions program							
4.3.1.0	IFC4.3.1.x dev	Updates from 4.3.1.x might be used as input into the ISO DIS process.	Updates after 4.3.0.1 coming from the Implementer Forum.	Focussed on documentation improvement, clarifications and further detailing of implementation.	Latest HTML	GitHub output		PSD output			
4.3.0.1	IFC4.3 TC1 (zip)	Under ISO DIS Voting		under ISO DIS Voting	HTML						
4.2.0.0	IFC4.2	-	2019-04	Withdrawn	ZIP	EXP	IFC4x2.xsd	-			
4.1.0.0	IFC4.1	-	2018-06	Withdrawn	ZIP	EXP	IFC4x1.xsd	-	ifcOWL IFC4.1	RDF	TTL
4.0.2.1	IFC4 ADD2 TC1	ISO 16739-1:2018	2017-10	Official	ZIP	EXP	IFC4.xsd	-	ifcOWL IFC4 ADD2 TC1	RDF	TTL
4.0.2.0	IFC4 ADD2	-	2016-07	Retired	ZIP	EXP	IFC4_ADD2.xsd	-	ifcOWL IFC4 ADD2	RDF	TTL
4.0.1.0	IFC4 ADD1	-	2015-06	Retired	ZIP	EXP	IFC4_ADD1.xsd	-	ifcOWL IFC4 ADD1	RDF	TTL
4.0.0.0	IFC4	ISO 16739:2013	2013-02	Retired	ZIP	EXP	ifcXML4.xsd	PSD_IFC4.xsd	ifcOWL IFC4	RDF	TTL
2.3.0.1	IFC2x3 TC1	ISO/PAS 16739:2005	2007-07	Official	ZIP	EXP	IFC2X3.xsd	PSD_R2x3.xsl	ifcOWL IFC2x3 TC1	RDF	TTL
2.3.0.0	IFC2x3	-	2005-12	Retired	ZIP	EXP	-	-	ifcOWL IFC2x3	RDF	TTL
2.2.1.0	IFC2x2 ADD1	-	2004-07	Retired	ZIP	EXP	-	-	-	-	-
2.2.0.0	IFC2x2	-	2003-05	Retired	ZIP	EXP	-	-	-	-	-
2.1.1.0	IFC2x ADD1	-	2001-10	Retired	ZIP	EXP	-	-	-	-	-
2.1.0.0	IFC2x	-	2000-10	Retired	ZIP	EXP	-	-	-	-	-
2.0.0.0	IFC2.0	-	1999-10	Retired	-	-	-	-	-	-	-

Figura 3.12: Versões atuais do formato IFC (<https://technical.buildingsmart.org/>)

Como um formato aberto, o IFC tornou-se numa das ferramentas interoperáveis de maior sucesso para troca de informações entre diferentes plataformas. No entanto, algumas limitações foram identificadas em termos de usos de expressões, segmentação de informação e interpretação dessa mesma informação (Liu *et al.*, 2017). A importância do BIM para as infraestruturas é também confirmada pelas melhorias introduzidas na *Industry Foundation Class* (IFC). As versões atuais possuem novas ferramentas para apoiar projetos de infraestrutura, como o uso de sistemas de coordenadas georreferenciadas, a separação entre local e terreno ou a introdução de novos recursos geográficos. Espera-se que a próxima versão IFC5 inclua suporte completo para vários domínios de infraestrutura e mais recursos paramétricos (Barazzetti *et al.*,

2020). O IFC *Alignment Project* visa fornecer o primeiro formato IFC adequado para projetos de infraestrutura, introduzindo um fluxo de trabalho de padronização de alinhamento focado em estradas, ferrovias, pontes e túneis. Algumas ferramentas avançadas já estão disponíveis no IFC 4.1 para projetar recursos lineares usando uma representação paramétrica baseada em curvas.

Em 2018 a buildingSmart publicou os “IFC-Bridge Fast Track Project Report WP1: Requirements analysis” (buildingSmart International, 2018) e “IFC Bridge Fast Track Project Report WP2: Conceptual Model” (buildingSmart International, 2018). O projeto IFC-Bridge tem como objetivo estender o modelo de dados IFC para permitir a descrição exata da semântica e geométrica de pontes. Inicialmente foram tidos em conta os contributos de várias iniciativas nacionais:

- China: projeto CRBIM
- França: projeto MINnD
- Alemanha: Grupo de Especialistas IFC-Bridge
- Estados Nórdicos: Grupo de Especialistas IFC-Bridge
- EUA: projeto FHWA

Os requisitos básicos para a extensão IFC-Bridge foram determinados de casos de uso identificados, focando em representações geométricas e descrições semânticas. Como pode ser visto na Figura 3.13, os casos de uso nesse âmbito exigem uma quantidade limitada de representações geométricas. Essas representações geométricas devem descrever suficientemente como construir e as relações entre os diferentes componentes de pontes (Figura 3.14), incluindo a geometria explícita baseada na representação das fronteiras e/ou a geometria implícita baseada em sólidos. O desenvolvimento do IFC-Bridge pode, portanto, concentrar-se num conjunto limitado de representações geométricas.

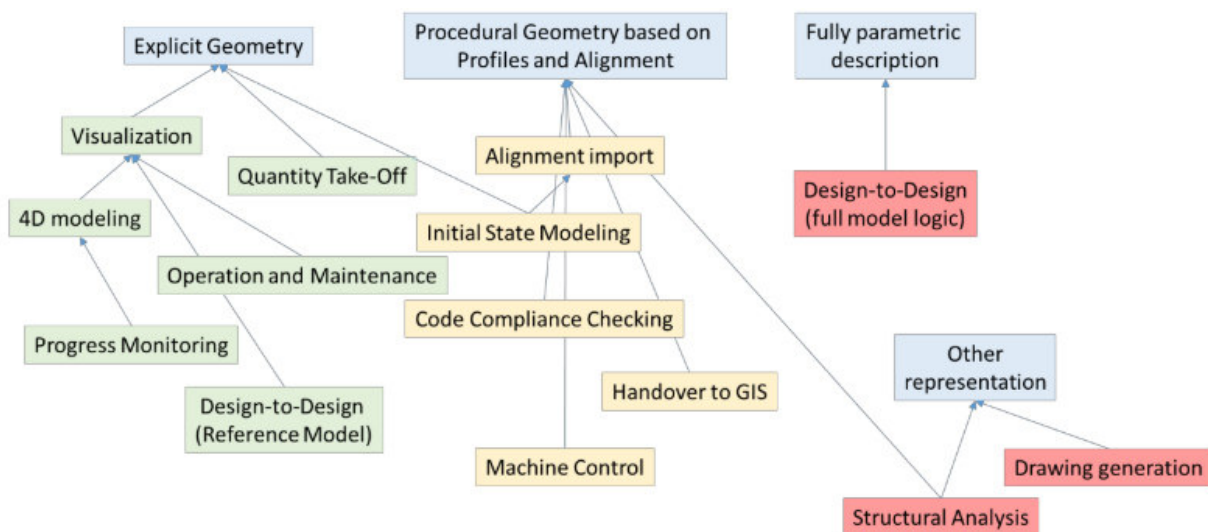


Figura 3.13: Dependências das representações geométricas (buildingSmart International, 2018)

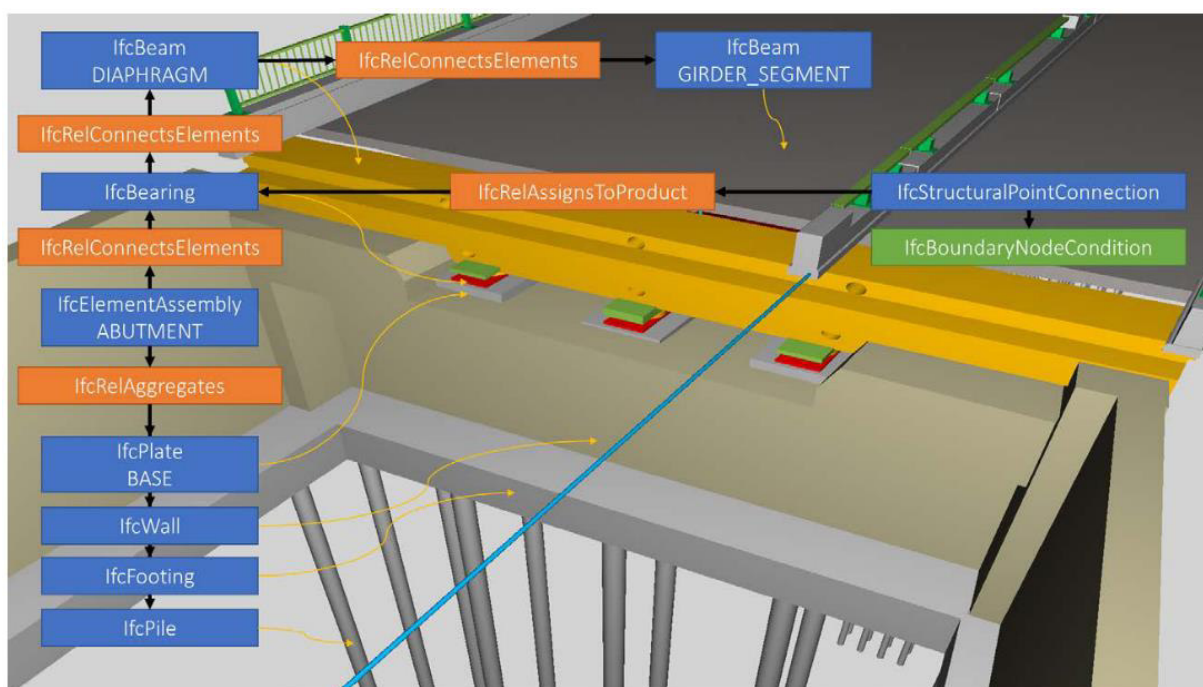


Figura 3.14: Exemplo de diagramas de instâncias em IFC-Bridge (buildingSmart International, 2018)

A buildingSmart tem várias equipes dedicadas a diferentes áreas de investigação de forma a definir estratégias para normalizar processos e metodologias relacionadas com a modelação do BIM e do formato IFC. Uma dessas equipes é a “Infrastructure Room”, uma sala composta por elementos de várias nacionalidades e várias áreas entre as quais projetistas, *software houses*, empreiteiros, instituições académicas. Têm como objetivo combinar, aprimorar e desenvolver padrões abertos para a utilização de dados inteligentes, permitindo a integração de processos e dados para projetos de infraestrutura. O âmbito do grupo inclui ainda a troca de informações, definição de métodos padrão para processos de forma apoiar a eficaz gestão do ambiente construído e por fim relacionar e integrar metodologias BIM e GIS. A sala de Infraestrutura lidera os esforços da buildingSMART em várias áreas, incluindo estradas, pontes, túneis, portos e hidrovias.

A sala “Railway Room” tem como objetivo acelerar e explorar novas oportunidades digitais para sistemas ferroviários, criando uma representação digital abrangente e aplicável de todo o ecossistema ferroviário que apoiará todas as fases do ciclo de vida. Isso fornece a base de sistemas de suporte interoperáveis, complexidade reduzida, soluções seguras e custos reduzidos para todas as partes interessadas. Permitindo ter como base a informação da linha férrea e seus diversos componentes e relacionando-os com a infraestrutura a executar. Para atender a estas expectativas a sala de Via Férrea está a executar um

projeto intitulado de “Applying IFC 4.3 for Rail (aIFC4Rail)” de forma a disponibilizar o formato IFC 4.3 nas diferentes soluções de software.

Geralmente a modelação requer um trabalho colaborativo entre vários intervenientes, que necessitam produzir vários modelos IFC para constituírem um modelo federado ferroviário multidisciplinar, que pode também ser federado num modelo de infraestrutura como pontes, estradas, túneis, terraplenagem, drenagem, serviços públicos, geotecnia, entre outros. Na Figura 3.15 encontra-se esquematizada a estrutura desenvolvida pela “Railway Room”.

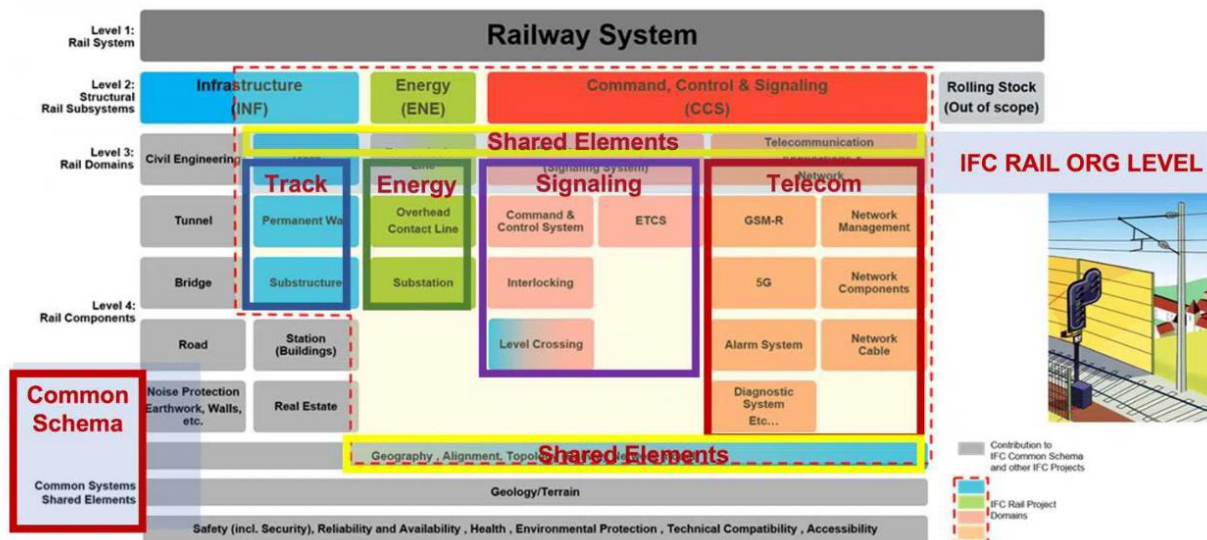


Figura 3.15: Esquema estrutural das diferentes disciplinas na ferrovia

CAPÍTULO 4

TÉCNICAS DE REALITY CAPTURE

A dissertação visa estudar metodologias para a utilização e execução de modelos digitais aplicados a Pontes ou Viadutos Ferroviários. Estas abordagens deverão ser aplicáveis a qualquer tipo de Obra de Arte, mesmo que rodoviária ou pedonal, mas sem dúvida que na ferroviária existiram aspetos específicos. Após leitura de alguma bibliografia denotou-se a existência de dois métodos para a geração de modelos, associados a usos distintos. Assim identificaram-se modelos criados a partir de informação espacial de obras já executadas “*as-built*”, que consiste na aquisição de pontos da estrutura através de técnicas de levantamento com base na fotogrametria, laser scanning ou levantamento topográfico clássico. Outra forma para execução de modelos é “*as-design*” e consiste numa modelação paramétrica e orientada para o objeto, com informação não gráfica anexa ao mesmo. Os usos de ambas as abordagens podem ser bastante distintas, mas podem coexistir e até complementar-se. Tanto o AEC (*Architecture, Engineering and Construction*), FM (*Facilities Management*) e BMS (*Bridge Management System*) atribuem usos específicos às metodologias BIM, entre as quais nas fases de projeto, construção, monitorização e inspeção. Segundo Brilakis *et al.* (2010) pode ser até uma boa ferramenta para solucionar problemas complexos tais como desvios na construção relativamente ao projeto, medições, monitorização em tempo real do estado da construção, simulações 3D e 4D, manutenção nas diferentes fases do ciclo de vida.

Shim *et al.* (2019) afirma que a digitalização tridimensional é uma técnica usada para analisar e capturar a forma de um objeto do mundo real usando um scanner 3D. Os resultados são dados legíveis por um computador, que podem ser salvos, editados e até impressos em 3D. Vários métodos podem ser usados para digitalização 3D de objetos e ambientes, mas cada método confronta-se com as suas próprias limitações e custos tecnológicos, que precisam de ser considerados.

4.1 MODELOS DIGITAIS

A abordagem mais atual para recolher, organizar e integrar os dados constituintes de uma estrutura executada ou projetada, numa única estrutura de dados é modelá-la usando ferramentas de modelação BIM. Esta abordagem gera modelos tridimensionais paramétricos produzindo objetos de construção

lógicos e relações paramétricas entre eles. O processo começa pela recolha de dados espaciais no local por meio de tecnologias de levantamento de última geração, como laser scan (LIDAR) e fotogrametria. Os dados espaciais resultantes devem então ser trabalhados manualmente para se obter uma superfície 3D. Os pontos na superfície 3D podem ser então substituídos por objetos, fazendo com que um modelador observe os dados, identifique cada tipo de objeto, procure-o num banco de dados de objetos padronizados e ajuste-o à superfície com alguma ajuda de algoritmos de ajuste para uma sobreposição ideal. Depois disso, qualquer característica incorporada pode ser atribuída a cada objeto manualmente. Embora este processo seja significativamente auxiliado por tecnologias recentes, a maior parte permanece manual. Mais de dois terços dos esforços necessários para modelar instalações simples são gastos na conversão manual dos dados de superfície para um modelo digital. A adoção do BIM está em crescimento em países como EUA, Dinamarca, Finlândia e Noruega. No entanto, para pequenos projetos de construção, as poupanças mal justificam a adoção e utilização desta tecnologia. Como resultado, a penetração de tecnologias inovadoras de modelação espacial em projetos e empresas menores nos setores de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) é lenta e assim se espera até que reduções significativas possam ocorrer (Brilakis *et al.*, 2010).

O estudo de Popescu *et al.* (2019) compara distintas tecnologias de levantamento de informação espacial realizadas por três diferentes métodos de sensores óticos, o *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), *Infrared Scanning* (IS) e *Close-range Photogrammetry* (CRP). No TLS, ou *Laser Scanning*, a estrutura tridimensional é adquirida por meio de emissão de luz e deteção da sua reflexão, determinado assim a distância do emissor até ao objeto. Relativamente à CRP, ou *Photogrammetry*, a estrutura é fotografada com recurso a câmaras digitais e através de software de *Structure from Motion* (*SfM*) é possível estimar a estrutura 3D, com base em pontos coordenados, padrões e características inerentes nas imagens, sejam eles naturais (arestas, contraste de cores, etc.) ou artificiais (alvos topográficos). A metodologia de IS, infravermelhos utiliza camaras de RGB-D combinada com camaras de infravermelhos para determinar através da reflexão da luz a distância ao objeto. Popescu *et al.* (2019) conclui que todos os métodos podem fornecer bons resultados capazes de permitir medições gerais tais como, vãos entre apoios, largura de tabuleiro, gabarito vertical, dimensões de pilares, entre outras. Refere ainda que as nuvens de pontos geradas por TLS e CRP eram muito mais densas que as geradas por IS. Nuvens de pontos mais densas permitem uma melhor visualização ao custo de maior tempo computacional e requisitos de armazenamento, bem como maiores dificuldades no manuseio dos modelos. Os modelos 3D que usam imagens CRP ou IS apresentam boa qualidade sem grande esforço de aprendizagem. No entanto, um maior nível de familiaridade com o software de processamento pode aumentar consideravelmente a precisão dos modelos gerados pelo método CRP. O método IS é altamente automatizado, o que é benéfico em muitos aspetos, mas reduz o controle do modelador na qualidade final do modelo. O método IS terá um potencial considerável, desde que sejam feitas melhorias adicionais nas soluções de alcance. Por último, conclui que os modelos 3D

possam ser melhorados combinando fotogrametria terrestre e aérea, o que torna possível capturar tanto elementos primários (a própria estrutura) como elementos secundários que podem justificar uma investigação (vegetação, acessos, etc.). A Figura 4.1 ilustra as principais conclusões de Popescu *et al.* (2019) no seu trabalho, em relação a custo de equipamento, tempo de aquisição, alcance, mobilidade, precisão e automatização.

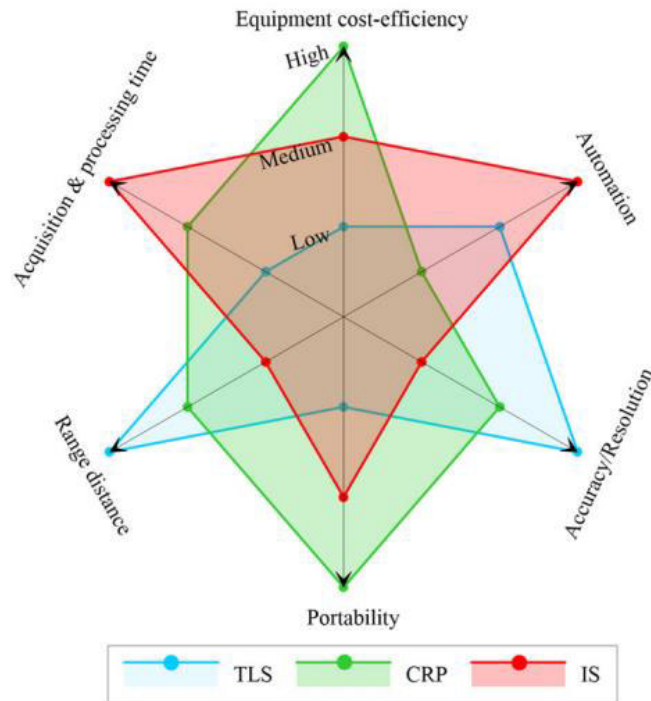


Figura 4.1: Desempenho de métodos de aquisição de estruturas 3D (Popescu *et al.*, 2019)

El-Omari e Moselhi (2008) apresentam no seu trabalho um método de automatização de aquisição de dados através de laser scanning com suporte da fotogrametria. O método utiliza, em conjunto as duas tecnologias para suportar relatórios de progresso e documentação de informações. O método desenvolvido contorna um conjunto de limitações associadas ao uso separado de laser scanner e imagem digitais.

Apesar de algumas desvantagens, as tecnologias de imagem 3D têm muitas vantagens que as tornam cada vez mais atrativos para as entidades de gestão de infraestruturas de transporte. O uso destas novas tecnologias pode melhorar os procedimentos de avaliação reduzindo significativamente o tempo de ocupação dos locais de trânsito, garantindo a segurança das pessoas que a operam ou inspecionam. Estes métodos também ajudariam a melhorar a precisão e a eficiência das inspeções de pontes, minimizando o erro humano e oferecendo oportunidades para criar registros históricos do progresso da deterioração. Desenvolvimentos atuais e futuros podem incluir detecção automatizada de danos usando inteligência artificial e métodos para enriquecer modelos 3D incorporando informações adicionais sobre variáveis como propriedades do material e geometria interna (Popescu *et al.*, 2019).

4.2 FOTOGRAMETRIA

A tecnologia de laser scanner é reconhecida como uma metodologia confiável e exata na produção de nuvens de pontos de alta resolução, mas tem algumas limitações na aquisição de características espectrais dos objetos, sendo o equipamento geralmente dispendioso. Em contraste, os métodos fotogramétricos para produção de nuvens de pontos ou superfícies são muito económicos e podem ser criados e processados utilizando vários tipos de câmaras e softwares. No entanto, para produzir pontos tridimensionais, eles precisam de processos computacionais que reduzem a sua automação. Em áreas sombreadas ou escuras não se mostra tão capaz. Associados ao uso de veículos aéreos não tripulados são técnicas aceites por especialistas para obter dados de mapeamento precisos, de alta qualidade e rápidos. Ao usar a tecnologia UAV, os projetos de mapeamento ferroviário podem ser controlados de fora da área ferroviária, evitando assim a interrupção dos serviços ferroviários, bem como salvando as pessoas do perigo (Sahebdivani *et al.*, 2020).

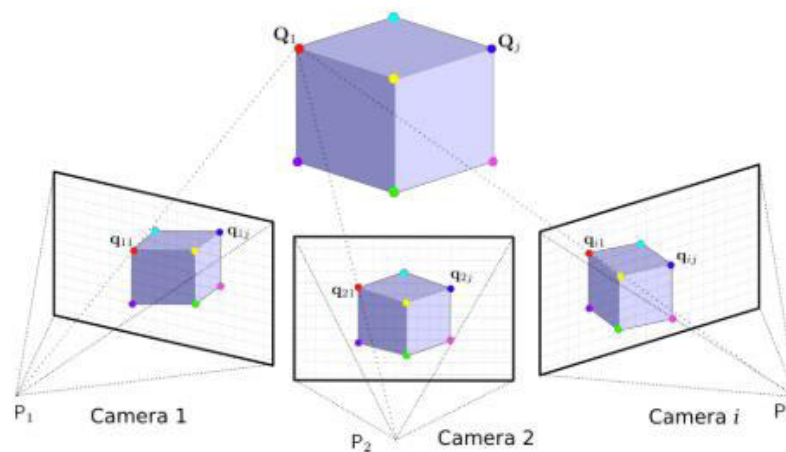


Figura 4.2: Princípio básico da fotogrametria (Bentley Systems, 2019)

O princípio da fotogrametria é a medição de distâncias entre objetos ou pontos numa imagem (Figura 4.2). Para realizar medições fotogramétricas de alta qualidade, é necessário seguir certas regras e boas práticas sobre configurações, posicionamento e orientação das câmaras em relação ao objeto 3D, de forma a fornecer informação mais corretas e úteis minimizando o erro no processamento das distâncias. O levantamento é tão bom quanto a informação que lhe deu origem. Recentes avanços tecnológicos em câmaras digitais, processadores de computador e técnicas computacionais, como correspondência de imagens subpixel, tornam a fotogrametria uma técnica portátil e poderosa. Ele produz dados de superfície 3D extremamente densos e precisos com um número adequadamente limitado de fotos, capturadas com

equipamento de fotografia digital padrão e num período de tempo relativamente curto (Bentley Systems, 2019).

O procedimento adotado para este tipo de metodologias assenta em três fases, podendo as seis subfases indicadas na Figura 4.3, ser agrupadas duas a duas, pois tratam-se de operações interligadas e em muitos softwares são interpretadas com uma fase apenas.

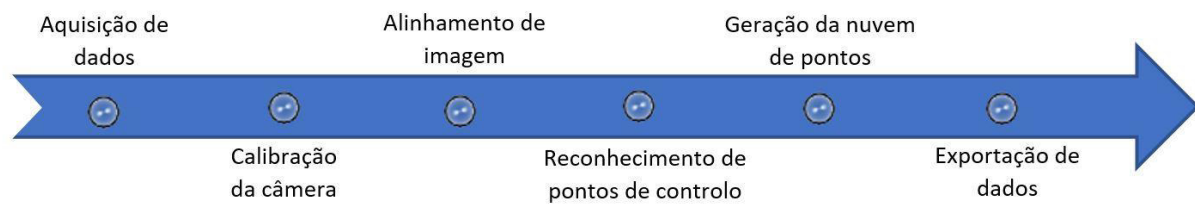


Figura 4.3: Algoritmo genérico da fotogrametria (adaptado de Chumak *et al.*, 2022)

Como a Bentley Systems, (2019) que no manual de boas praticas do seu software *Context Capture* indica apenas três operações sendo elas:

- Importação dos dados (imagens, localizações das imagens, pontos georreferenciados, etc.)
- Aerotriangulação (determinação das localizações das imagens, procura de pontos em comum)
- Reconstrução (criação e exportação de uma mesh, ortofoto, ou nuvem de pontos)

Recomenda como boa pratica que exista uma superposição das imagens de 80% entre fotos consecutivas e 60% em alinhamentos de imagens (Figura 4.4), e uma transição gradual entre diferentes alinhamentos de imagem num máximo de 15° na diferença de ângulo. A cobertura da estrutura deverá de ser homogénea, mantendo a mesma distância entre imagens, e caso seja necessário mais detalhe, deverão ser obtidas imagens a diferentes distâncias do objeto. Por último, aconselha a circunscrever o alvo de forma adquirir e completar zonas escondidas noutras passagens (Figura 4.5).

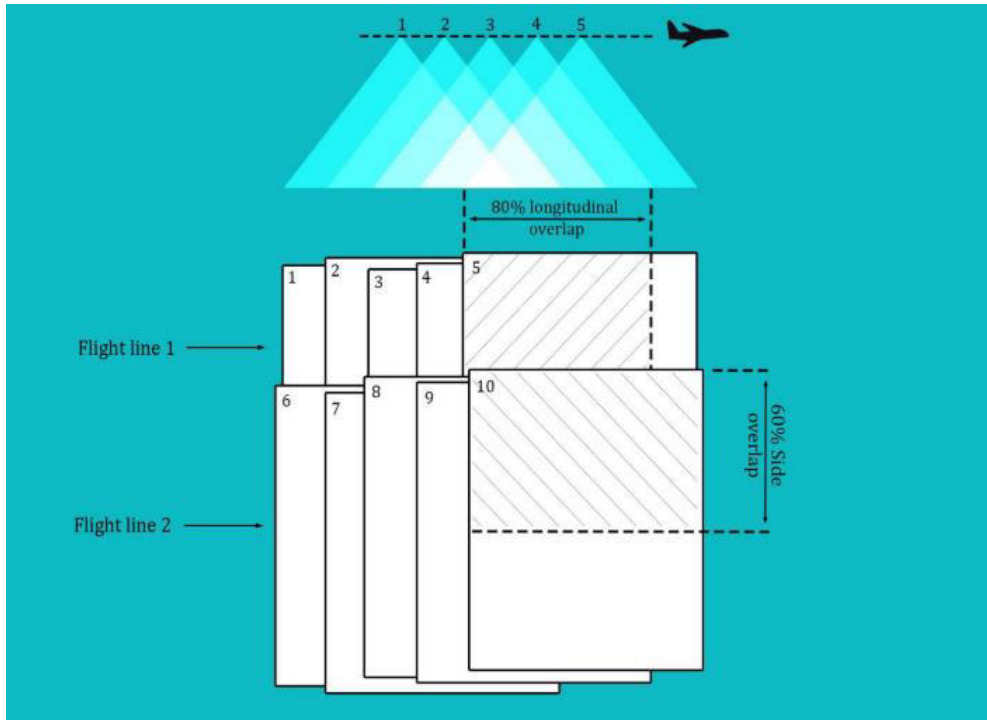


Figura 4.4: Sobreposição recomendada entre imagens (Bentley Systems, 2019)

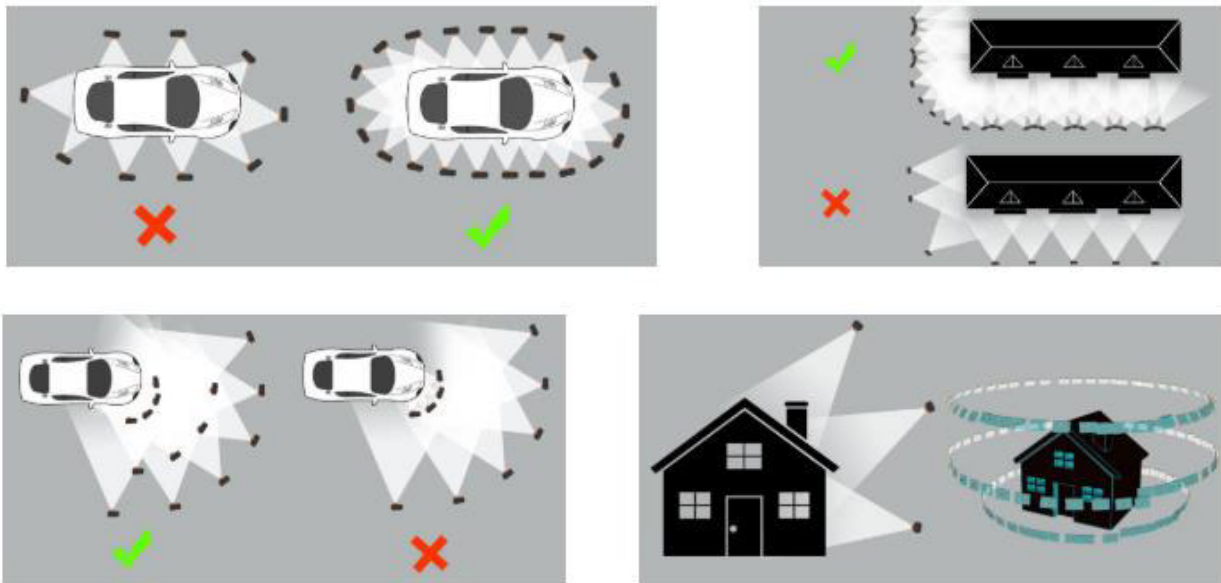


Figura 4.5: Exemplos de aquisição de imagens para fotogrametria (Bentley Systems, 2019)

É importante também fazer um planeamento do trajeto para aquisição das imagens, pois permite economizar no tempo de trabalho em gabinete e no processamento das imagens, relatando poupanças na ordem de 30% na duração global do projeto (Figura 4.6).



<u>Well managed capture</u> 			<u>Poorly managed capture</u> 	
Processing stage		Processing time	Processing time	
Capture	1- Planification	1h	0min	0min
	2- On-site checking	10min	0min	0min
	3- Image shooting	8h00min	6h 00min	6h 00min
Processing	1- Manual processing	45min	20h 00min	20h 00min
	2- Automatic processing	20d 0h 0min	30d 0h 0min	30d 0h 0min
Summary	Project analysis	20min	20min	20min
TOTAL		20d 10h 15min	31d 2h 20min	

Figura 4.6: Exemplos de durações de processos (Bentley Systems, 2019)

A alta precisão conseguida na utilização deste tipo de metodologia é obtida com o recurso a sistemas de navegação por satélite (GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou) e sensores inerciais (IMU). Para os sensores de GNSS, existem dois tipos de opções o GNSS básico e os RTK (*Real Time Kinematic*) ou PPK (*Post Processes Kinematic*). Relativamente aos IMU apenas existem os básicos e os de alta-precisão. Na Tabela 1 está resumido as diferentes combinações de uso das diferentes tecnologias, as suas vantagens e as precisões esperadas, pois todos os sensores diferem entres eles.

Tabela 1: Influência dos sensores GNSS + IMU, adaptado de (Bentley, 2018)

Configuração	Precisão da Georeferenciação	Vantagens	Comentários
Sem GNSS + Sem IMU	Sem Georeferenciação Sem Escala	Sem Vantagens	Se a georeferenciação for importante, devem ser utilizados GCP's.
GNSS Básico + Sem IMU	Aprox. 1-2m	Georeferenciação aproximada Ligeira ajuda na fase de aerotriangulação	Recomendado para pequenas aquisições onde a localização do local é importante, mas a escala e a precisão da georeferenciação não são importantes.
GNSS Básico + IMU Básico	Aprox. 1-2m	Georeferenciação aproximada Ligeira ajuda na fase de aerotriangulação Ajuda importante para registro de GCP (Ground Control Points)	Recomendado para pequenas aquisições onde a localização do local é importante, mas a escala e a precisão da georeferenciação não são importantes. A combinação de sensores GNSS + IMU ajudará no registro dos GCP's, a computação não será mais rápida.
GNSS RTK/PPK + IMU Básico	Aprox. 5cm	Georeferenciação de alta precisão Ajuda importante para o registro de GCP's (Ground Control Points)	Recomendado para qualquer aquisição em que se espera uma georeferenciação precisa. A combinação de sensores GNSS + IMU ajudará no registro dos GCP's, a computação não será mais rápida.
GNSS RTK/PPK + IMU Alta Precisão	Aprox. 5cm	Georeferenciação de alta precisão Ajuda importante para o registro de GCP's (Ground Control Points)	Recomendado para qualquer aquisição em que se espera uma georeferenciação precisa. A combinação de sensores GNSS + IMU ajudará no registro dos GCP's, a computação será mais rápida.

4.3 LASER SCANNING

Um sistema de varredura a laser fornece medições tridimensionais exatas dos objetos num contexto espacial. A nuvem de pontos gerada é uma ferramenta comum para detetar e reconstruir carris, passeios, sistemas de drenagem e todos os acessórios inerentes a uma via férrea. Existem vários métodos para deteção e modelagem automática de carris, postes e linhas de catenária usando dados de laser scanner, entre eles o proposto por Arastounia e Oude Elberink (2016). Esse estudo propõe um método para classificação automática de nuvens de pontos de ferrovias urbanas em três classes: carris, cabo de contato e cabo da catenária (Figura 4.7). O algoritmo por eles desenvolvido é capaz de classificar nuvens de pontos quer com uma configuração mais complexa quer com uma amostragem de pontos mais baixa, preservando uma alta eficiência computacional. Os resultados obtidos indicam que todos os objetos de interesse são reconhecidos separadamente e o tipo de objeto também é identificado. Os cabos de contato alcançam o melhor resultado de classificação devido à sua maior taxa de amostragem e à sua posição isolada em relação a outros objetos de interesse. Os cabos da catenária obtêm a menor precisão devido aos falsos positivos nas interseções com os Postes. Além disso, a alta precisão obtida nos carris (98,4%) indica o grande impacto do método *model-driven (template matching)* na exclusão dos falsos positivos. No algoritmo desenvolvido, nenhuma suposição é feita e nenhum conhecimento *a priori* é utilizado em relação à localização, orientação ou curvatura dos objetos de interesse. Na Figura 4.8, está representado o *workflow* proposto.

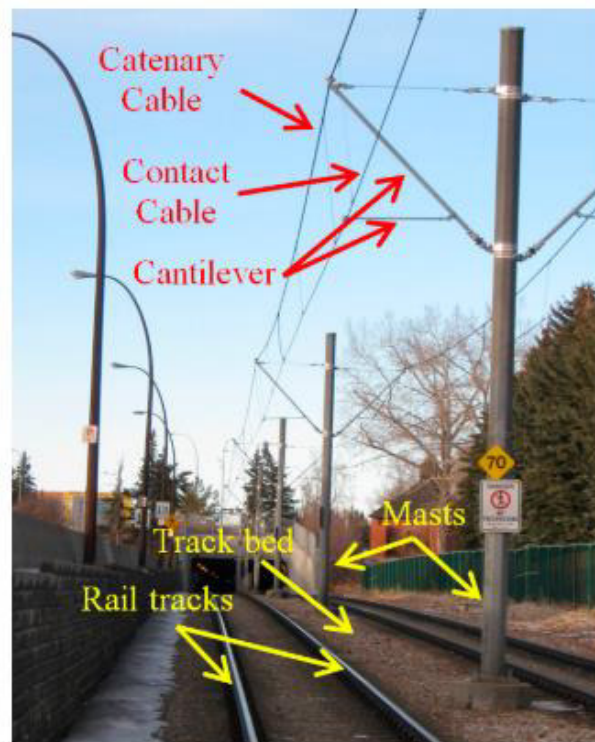


Figura 4.7: Componentes dum corredor ferroviário urbano (Arastounia e Oude Elberink, 2016)

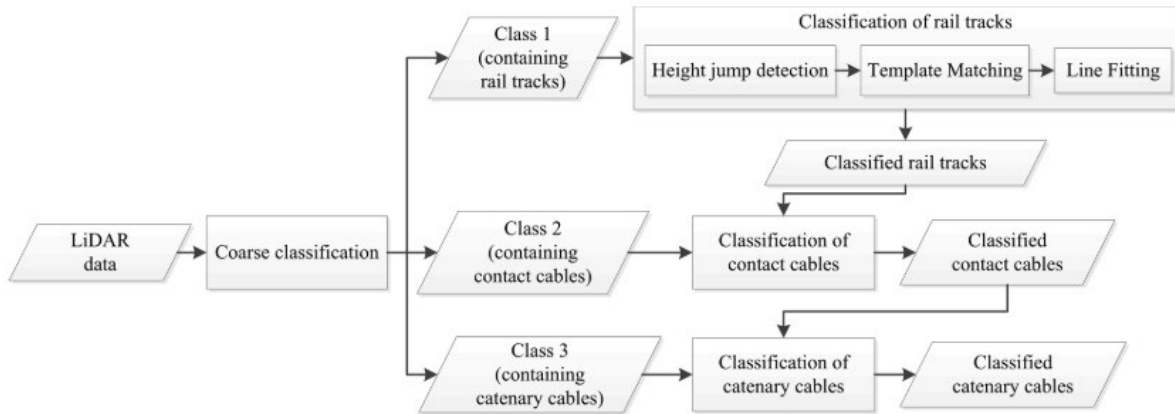


Figura 4.8: Fluxograma da metodologia proposta (Arastounia e Oude Elberink, 2016)

O laser scanner é provavelmente o que melhor combina a alta resolução com boa versatilidade, tornando-se particularmente adequado para aplicações “*in situ*”, sob condições de iluminação ou superfície difíceis e em ambientes adversos. Captura uma enorme quantidade de pontos num curto espaço de tempo, produzindo uma nuvem de pontos densa. Múltiplos scans de diferentes posições devem ser feitos para obter todas as faces e detalhes do objeto num ambiente 3D (Sedek e Serwa, 2016).

O princípio de funcionamento do scanner a laser, baseia-se na triangulação ótica, que é obtida pela projeção de um feixe de laser incidido sobre um alvo e adquirindo a forma do perfil com um dispositivo de imagem (CCD) que deve ser colocado num determinado e conhecido ângulo. Na Figura 4.9 está representada a geometria típica deste instrumento.

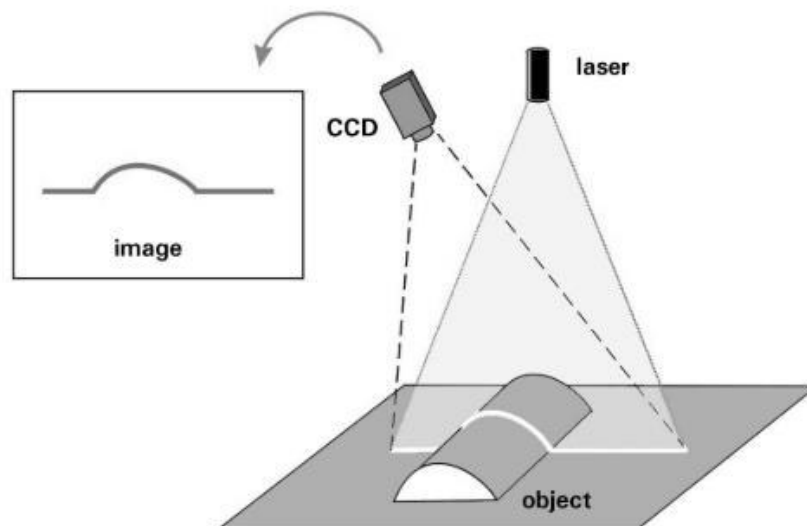


Figura 4.9: Princípio básico dum laser scanner (Fontana *et al.*, 2003)

O processo é descrito por Fontana *et al.* (2003) como uma tarefa contínua que à medida que o objeto é percorrido através do feixe de luz emitida por um laser, a câmara CCD, localizada numa posição conhecida regista o perfil definido no objeto pela luz do laser. As posições espaciais dos pontos pertencentes ao perfil são obtidas por triangulação. O modelo 3D é completo pela aquisição que é obtida pela varredura do objeto e pela aquisição de perfis paralelos bem espaçados, sendo a terceira dimensão do volume dada pela direção de varredura.

Atualmente, os softwares de projeto BIM não tem a capacidade de converter elementos primitivos geométricos criadas com ferramentas de engenharia reversa em objetos BIM automaticamente. Portanto, normalmente remodela-se a geometria num software BIM usando o modelo de engenharia reversa como orientação. Os scanners a laser estão cada vez mais a ser mais utilizados nas indústrias da construção e da manutenção para a criação de modelos BIM, pois eles permitem medir com rapidez e precisão a forma geométrica do ambiente. O processo de criação de um BIM “*as-built*” usando scanners a laser pode ser dividido em três etapas principais:

- Aquisição de dados, na qual medições pontuais densas da instalação são recolhidas usando laser scanning, tiradas de locais-chave de toda a estrutura,
- Pré-processamento de dados, no qual os conjuntos de medições de pontos (designadas como nuvens de pontos) dos scans são filtrados para remover artefactos e combinados numa única nuvem de pontos ou superfície, tendo um sistema de coordenadas comum,
- Modelação do modelo BIM, em que a nuvem de pontos ou superfície é transformada num modelo BIM semanticamente rico.

Tang *et al.* (2010) refere que outros métodos de levantamento de pontos, tais como o uso de uma estação total, fitas métricas, ou mesmo câmaras comuns, são muito demorados ou imprecisos para serem práticos em larga escala. Apesar dos resultados recentes usando fotogrametria, os scanners a laser medem a distância do sensor às superfícies próximas com precisão de milímetro a centímetro em velocidades de milhares a centenas de milhares de medições individuais por segundo, originando mais informação e mais rapidamente. Uma única varredura pode conter vários milhões de pontos 3D (Figura 4.10). Uma vez que nenhum scan individual pode visualizar todas as superfícies de uma edificação, as varreduras devem ser obtidas de vários locais.

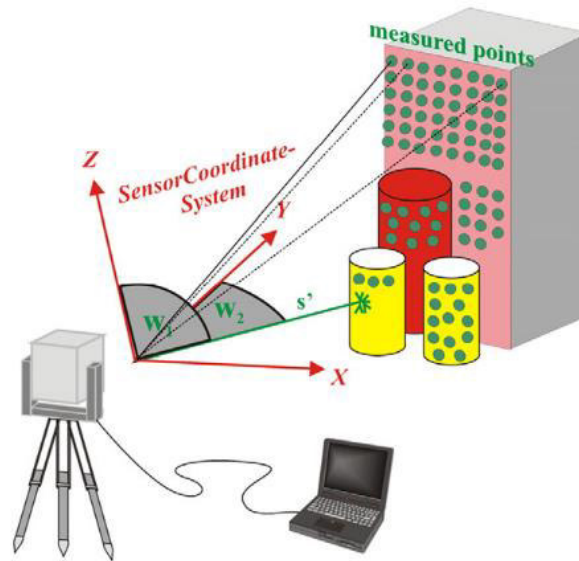


Figura 4.10: Processo de medições de pontos por Laser Scanning (Tang et al., 2010)

As nuvens de pontos são inicialmente representadas num sistema de coordenadas local e relativo. Todos os dados precisam ser alinhados num sistema de coordenadas global e comum, através de um processo conhecido como registro. Embora métodos automatizados de registro tenham sido desenvolvidos, na prática atual, o registro ainda é um processo semiautomático. Normalmente, o utilizador deve identificar manualmente, nos dados 3D, as localizações aproximadas dos alvos especialmente colocados no ambiente para auxiliar no registro. O pré-processamento de dados também pode incluir filtragem manual ou automatizada para remover dados indesejados, como pontos de objetos em movimento, reflexos ou artefatos dos sensores.

Dada uma nuvem de pontos, a modelação de um modelo BIM envolve três tarefas: modelar a geometria dos componentes (“Qual é a forma desta parede?”), atribuir uma categoria de objeto e propriedades de material a um componente (“Este objeto é uma parede de tijolos”) e estabelecer relações entre os componentes (“Wall1 está conectado à Wall2 neste local.”). Essas tarefas não ocorrem necessariamente em sequência e, dependendo do fluxo de trabalho, podem ser intercaladas. O objetivo da tarefa de modelação geométrica é criar representações de componentes da construção ajustando primitivas geométricas aos dados da nuvem de pontos. As primitivas geométricas podem ser superfícies individuais ou formas volumétricas. Assim a criação do modelo BIM “*as-built*” depende de três tipos de informação que precisam ser representados: informação sobre as formas dos objetos, informação sobre as identidades dos objetos e informação sobre as relações entre os objetos (Tang et al., 2010).

4.4 DETEÇÃO AUTOMÁTICA DE OBJETOS

A geometria dos elementos de uma ponte é um fator importante na avaliação da sua capacidade de carga, portanto, é necessário desenvolver um método de reconstrução 3D para modelar com precisão os diferentes elementos de uma ponte (Mehranfar *et al.*, 2021). O custo e o esforço de modelação de pontes existentes a partir de nuvens de pontos superam os benefícios recebidos pelo modelo 3D, havendo uma necessidade imediata de automatizar esse processo. Estudos nesta área alcançaram a criação automática de primitivas de superfície combinadas com classificação baseada em regras para criar cuboides e cilindros a partir de nuvens de pontos. Embora esses métodos funcionem bem para conjuntos de dados sintéticos ou em casos idealizados, encontram enormes desafios ao utilizar nuvens de pontos referentes a pontes reais, que geralmente são distribuídas de forma desigual e sofrem oclusões. Além disso, geometrias de pontes reais são complexas. Lu e Brilakis (2019) propõem um novo método analisando a estrutura de cima para baixo para enfrentar esses desafios na detecção de tabuleiros, pilares, vigas de apoio e componentes de vigas em pontes de betão armado. Este método usa um algoritmo de secionamento para separar o conjunto de pontos dos pilares dos pontos do tabuleiro. Os resultados de 10 experiências com nuvens de pontos obtidas a partir de pontes reais indicam que o método por eles apresentado alcança um desempenho de detecção muito alto, alcançando uma detecção robusta para os quatro tipos de componentes em pontes betão armado e produzindo diretamente clusters de pontos classificados (Figura 4.11 e Figura 4.12).

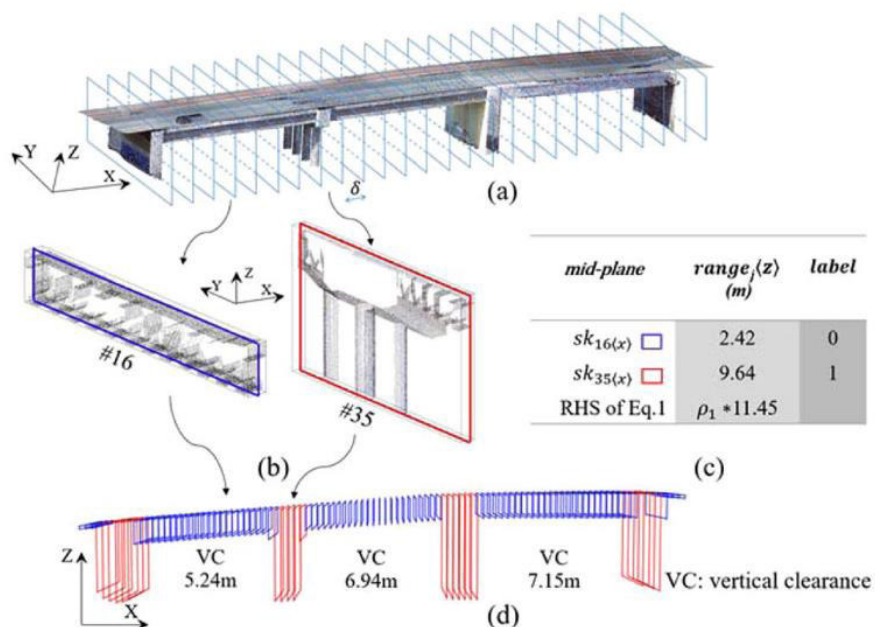


Figura 4.11: Esquema da metodologia apresentada por Lu e Brilakis, (2019)

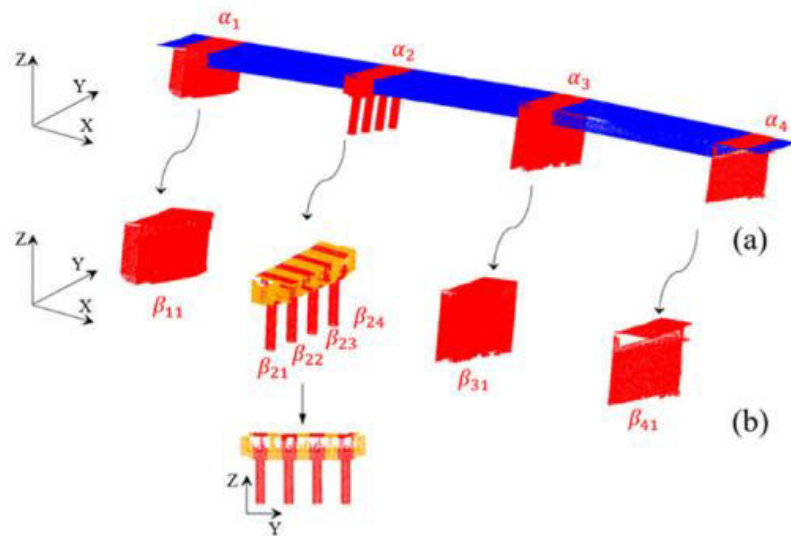


Figura 4.12: Exemplo de detecção automática numa ponte real (Lu, Brilakis e Middleton, 2019)

Chen *et al.* (2018) no seu estudo compara duas metodologias para detecção automática de tabuleiros em pontes, um método de agrupamento de pontes baseado em *machine learning* (*K-means*) e outro com uma abordagem de segmentação envolvendo um algoritmo de crescimento de região (*Region Growing*) (Figura 4.13). O artigo apresenta um fluxo de trabalho completo para caracterização de tabuleiros de pontes, que envolve etapas anteriores de reconstrução de nuvem de pontos 3D, redução de ruído e finalmente extração do tabuleiro. Adicionalmente, os dois métodos de segmentação de tabuleiros de pontes (métodos *K-means* e *Region Growing*) foram comparados, onde o método *Region Growing* foi capaz de gerar um *F-score* próximo a 95% para extração do tabuleiro de ponte, enquanto o *K-means* atingiu apenas 76%. *F-score* é uma medição da precisão do modelo num conjunto de dados, serve para avaliar sistemas de classificação binária, classificando em exemplos “positivo” ou “negativo”.

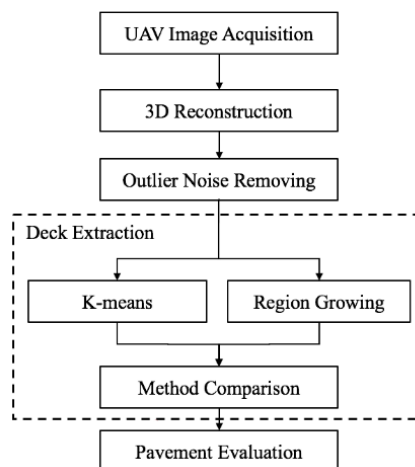


Figura 4.13: Fluxograma do processamento de informação apresentado por Tang *et al.*, (2010)

Mehranfa *et al.* (2021) abordam a questão noutra prisma, usando o conhecimento entre relações geométricas dos elementos da ponte e desenvolver um algoritmo baseado em projeção para diminuir os desafios na modelação 3D convertendo os dados desta forma num espaço 2D. O método proposto é um *framework* automático para modelação de diferentes formas de elementos constituintes de pontes com um erro médio global de cerca de 0,025 m. Ao contrário de abordagens acima referidas, os resultados deste método proposto são modelos CAD e não modelos de superfície, que podem fornecer medidas geométricas de diferentes elementos da ponte em software geoespacial (Figura 4.14).

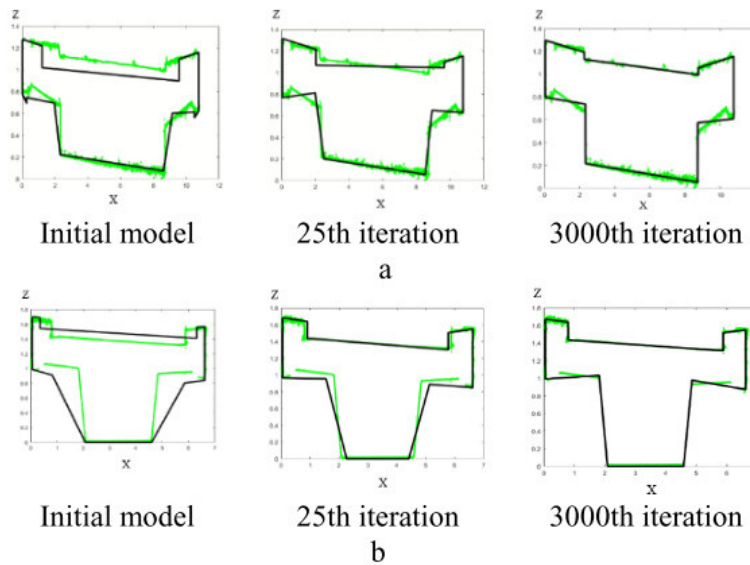


Figura 4.14: Obtenção automática da geometria do tabuleiro (Mehranfar *et al.*, 2021)

Sahebdivani *et al.* (2020) com base no algoritmo de RANSAC conseguiram detetar automaticamente carris numa ferrovia e assim modelar autonomamente os perfis do carril com bastante precisão e confiança, conforme ilustrado na Figura 4.15. Concluíram que o algoritmo baseado em projeção 2D proposto por eles, ao projetar a nuvem de pontos 3D no plano perpendicular à orientação principal do segmento ferroviário, eliminavam uma dimensão e, portanto, o processamento é no espaço 2D em vez do espaço 3D. A redução de uma dimensão aumenta a velocidade de processamento. Como um dos problemas mais desafiadores nas nuvens de pontos de corredores ferroviários é a enorme quantidade de ruído, ao projetar a nuvem de pontos no espaço 2D, aumentam a quantidade de pontos internos que alivia o impacto da incoerência dos dados no resultado detalhado do modelo. Por sua vez, cria um modelo 2D e depois um modelo 3D mais robusto do segmento ferroviário, embora esta metodologia seja apenas possível quando o traçado é retilíneo ou com grande curvatura.

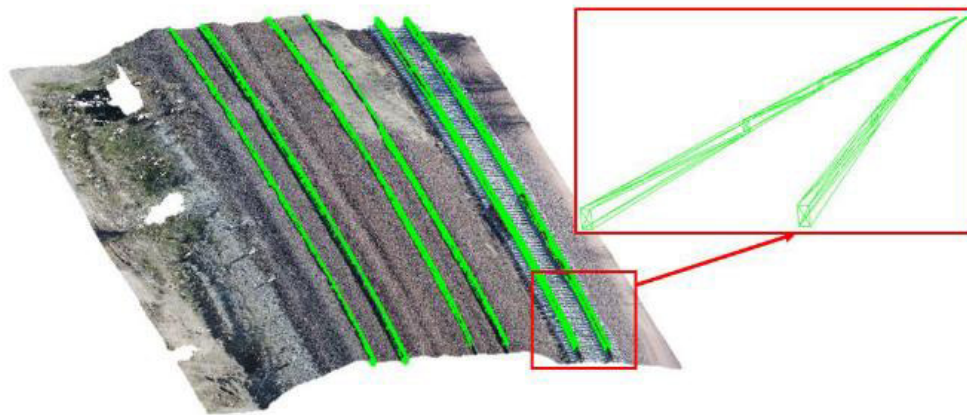


Figura 4.15: Detecção automática de carris (Sahebdivani, Arefi e Maboudi, 2020)

4.5 DIGITAL TWINS

Lu e Brilakis, (2019) definem o *Digital Twin* (DT) como uma réplica digital de um ativo ao mundo real. O ativo pode ser um túnel, um edifício, uma ponte ou qualquer outro ativo construído pelo homem. Um DT difere e é muito mais do que o desenho assistido por computador tradicional. Baseia-se em medições de dados massivos, cumulativos, em tempo real e do mundo real numa variedade de dimensões e de uso consequente dum modelo digital em todo o ciclo de vida de uma infraestrutura. O modelo compreende a geometria 3D dos componentes da infraestrutura, bem como um conjunto abrangente de informações semânticas, incluindo material, funções e relações entre os componentes. Pode ser ainda enriquecido com outras informações, como dados de sensores. Isso é particularmente útil para a prática de inspeção, que atualmente se baseia na recolha manual de dados no local e na avaliação visual.

A tecnologia de *Digital Twin Model* (DTM) foi usada pela primeira vez pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) para corrigir, atualizar e monitorizar a estação espacial Apollo 13, que é uma estação espacial sem a presença física humana, onde engenheiros e astronautas podem usar o DTM para simular todos os erros técnicos e corrigi-los ou manuseá-los remotamente. A GE Power também investiu na tecnologia de *digital twin*, onde milhares de parques eólicos “digitais” foram simulados com cada turbina eólica antes da sua construção, o que lhes permitiu ganhar mais de 20% de eficiência devido à análise mais eficiente de dados. Recentemente, na construção de cidades inteligentes, o conceito de *Digital Twin* mostrou um potencial fundamental na previsão de operações e anomalias futuras (Shim *et al.*, 2019). Como é exemplo o projeto da cidade de Helsinki, Finlândia, que usando um DT consegue saber o que está a acontecer, onde e quando, fornecendo uma base para serviços mais direcionados aos cidadãos, promovendo os objetivos estratégicos da cidade e apoiando a inovação e a pesquisa por meio da partilha de informação.

Também a empresa Águas do Porto passou a tomar decisões orientadas por dados. A empresa de abastecimento de água melhorou todo o ciclo de fornecimento de água urbana ao comissionar uma plataforma inteligente de gestão de água, denominada H2Porto. O DTM ajudou a melhorar a mobilidade operacional e criou ganhos operacionais de 23%. (Bentley, 2022).

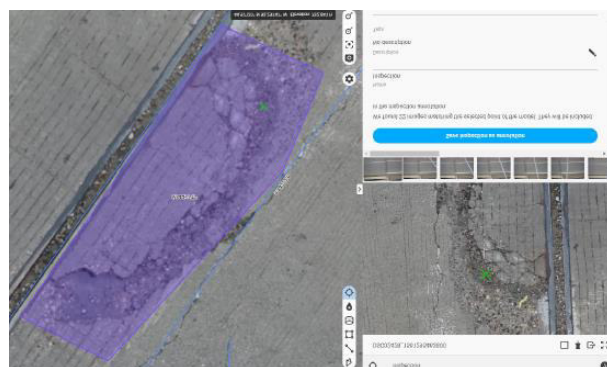
Em maio do ano passado foi publicado pelo DOT (*Department of Transportation*) de Minnesota, EUA, um relatório de inspeções (Lovelace e Wells, 2021), com metodologias (Figura 4.16), resultados e conclusões do levantamento de 6 Pontes realizados entre 2015 e 2017. Com o recurso a esta tecnologia foi possível detetar avarias (Figura 4.17) nas estruturas em pouco tempo e com uma equipa no local bastante reduzida.



Figura 4.16: Plano de voo da *St. Croix Crossing Bridge* (Lovelace e Wells, 2021)



a) Medição de fendas



b) Detalhe de inspeção

Figura 4.17: Tabuleiro da *Bridge 27831A* (Lovelace e Wells, 2021)

Devido ao uso de drones, foi possível realizar uma inspeção detalhada à *Blatnik Bridge* e assinalar várias anomalias importantes (Figura 4.18) que poderiam colocar em causa a sua operacionalidade, sem que fosse necessário recorrer a equipamentos pesados e dispendiosos e sem afetar o tráfico normal na ponte.



Figura 4.18: Nota de Inspeção da *Blatnik Bridge* (Lovelace e Wells, 2021)

O mesmo relatório descreve as operações de levantamento, criação de um modelo de *Digital Twin* e inspeção com base no modelo da *Stone Arch Bridge* (Figura 4.19), uma Ponte de 1883 construída em pedra com a função de servir tráfico ferroviário, mas convertida nos anos 90's para tráfico pedonal. Tem um grande significado histórico sendo um monumento da cidade de Minneapolis no estado de Minnesota, EUA.

Na Figura 4.20 podemos ver o modelo digital da Ponte à esquerda, e à direita o mesmo modelo, mas contendo notas de inspeções visuais realizadas com base na análise do modelo digital original.

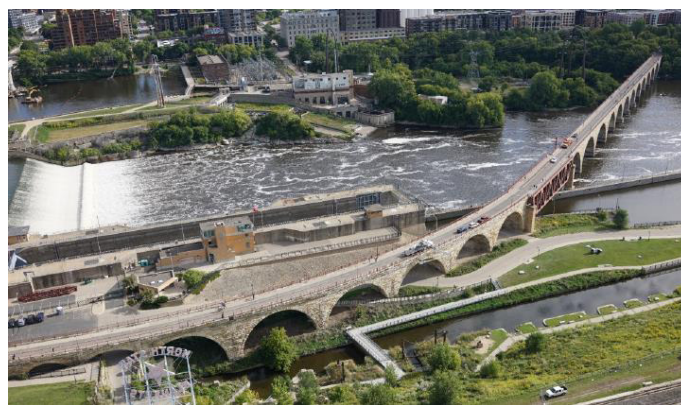
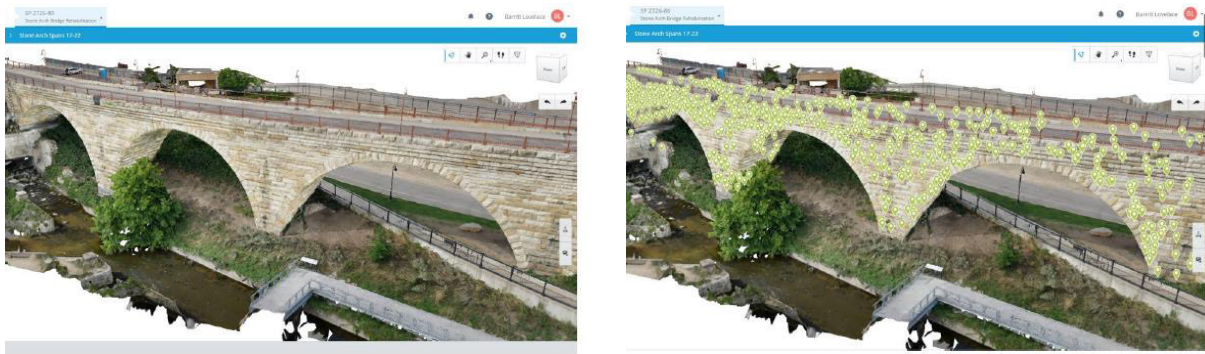


Figura 4.19: Vista geral da *Stone Arch Bridge* (Lovelace e Wells, 2021)



a) Reality Model

b) Reality Model com notas de inspeção

Figura 4.20: Modelo Digital da Stone Arch Bridge (Lovelace e Wells, 2021)

O modelo digital da Stone Arch Bridge foi analisado recorrendo à inteligência artificial (AI) e ao *Machine Learning* para detetar fendas na alvenaria. O software *ContextCapture Insights* foi utilizado para encontrar e delinear as fissuras automaticamente. Embora os algoritmos não sejam perfeitos, são já impressionantes e esta tecnologia oferece aos engenheiros uma maneira rápida de encontrar e quantificar fissuras que são difíceis de detetar em campo usando ferramentas manuais (Figura 4.21).

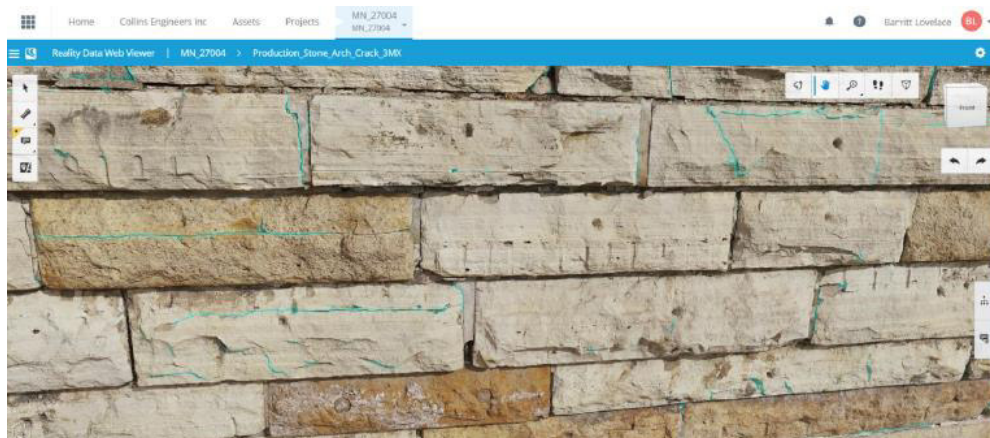


Figura 4.21: Detecção de fendas com AI no ContextCapture Insights (Lovelace e Wells, 2021)

É assim demonstrado que o uso de metodologias BIM desde o início ao fim do ciclo de vida da obra, atualizando a evolução do estado e funções da construção (Figura 4.22), permite ter uma base para a elaboração de um *Digital Twin* da obra que poderá ajudar na tomada de decisões presentes e futuras, com significantes melhorias quer no tempo para tomada de decisão quer na própria execução dos trabalhos, face aos métodos praticados atualmente.

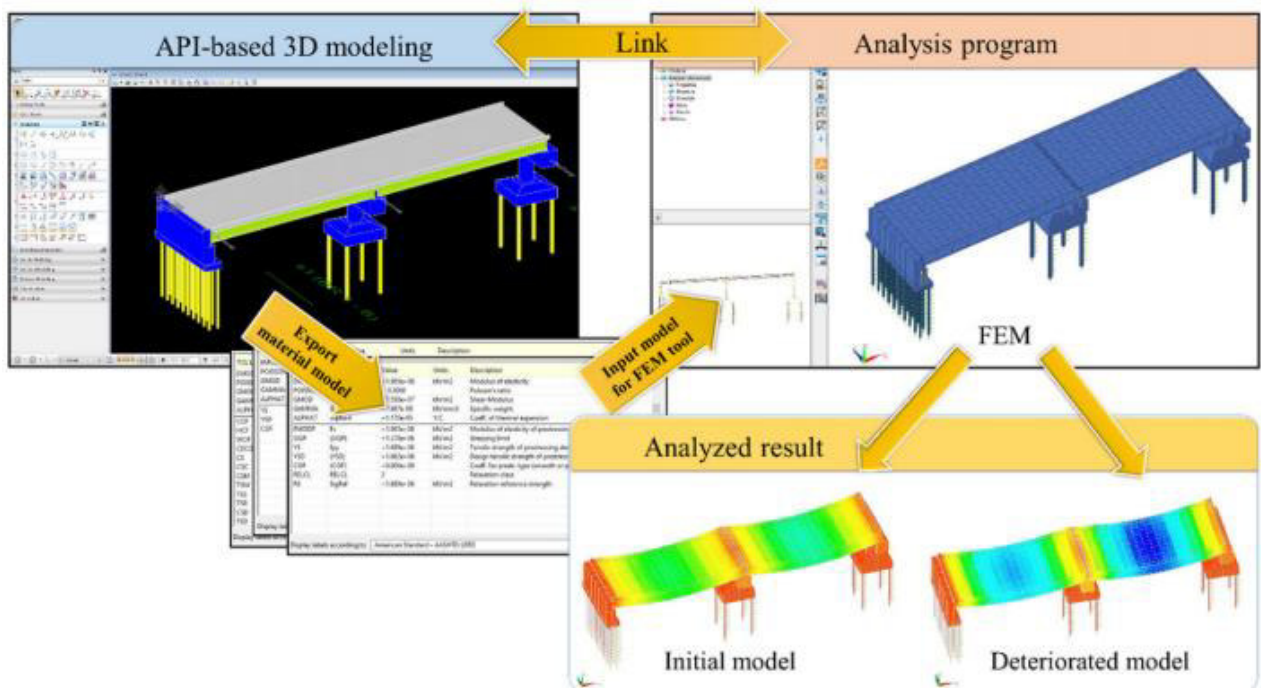


Figura 4.22: Interoperabilidade do modelo BIM com modelo numérico de elementos finitos

(Shim *et al.*, 2019)

4.6 SOFTWARE

No âmbito do trabalho foi necessário procurar software que de forma capaz e de acordo com os conceitos acima descritos, desse resposta aos requisitos básicos para proceder tanto ao *Reality Capture* como à modelação BIM. Devido a fato de ser referido em vários artigos e à facilidade de aprendizagem dos programas, pois os ambientes gráficos são transversalmente idênticos, foram escolhidos *workflows* assentes em software da Bentley (Figura 4.23). Desta forma é possível ter apenas um modelo que é acedido e referenciado por todos os softwares (Figura 4.24).

Bentley Solutions for Railway/Roadway & Bridge Workflows

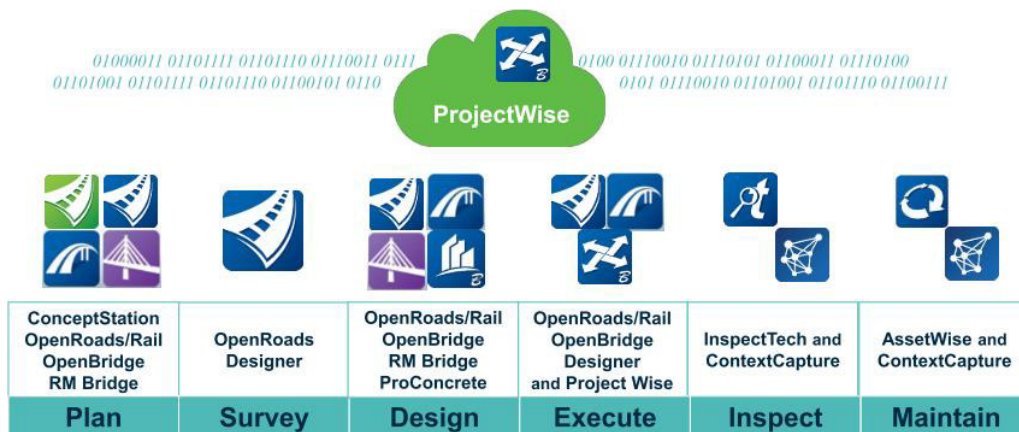


Figura 4.23: Soluções Bentley para modelação BrIM (Mysore, 2018)

Integrated Data Flow With BIM/BrIM

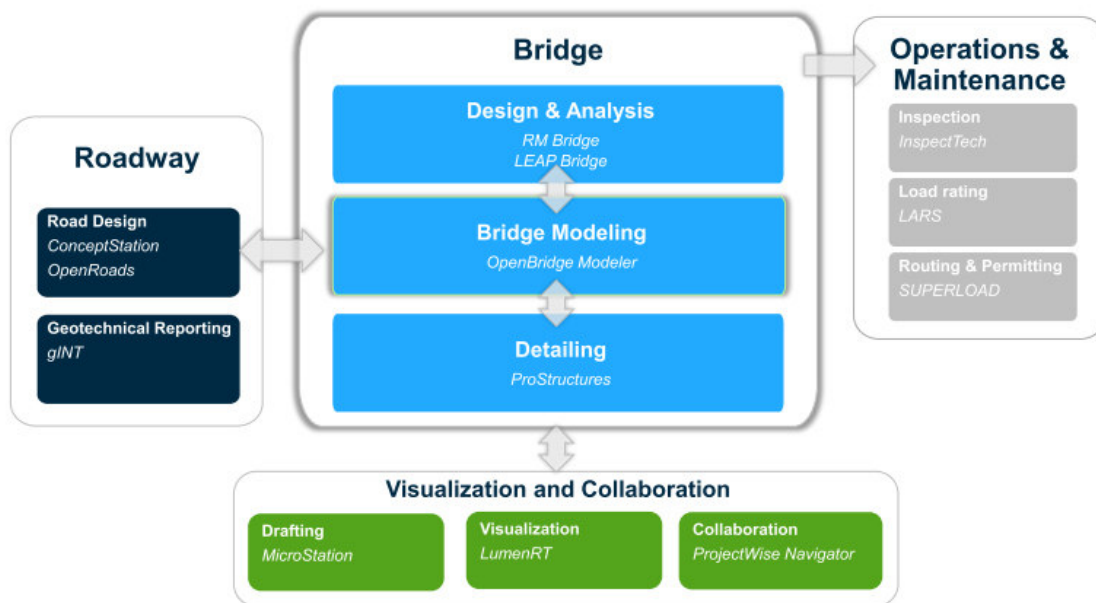


Figura 4.24: Interoperabilidade de dados das soluções Bentley (Mysore, 2018)

O ContextCapture e o OpenBridge Modeler (Figura 4.25) foram os softwares mais utilizados. O primeiro para a obtenção do modelo digital real do caso de estudo, enquanto o segundo será utilizado conjuntamente com o OpenRail para modelação BIM, seguindo os desenhos e informações existentes do projeto de execução. Todas as aplicações utilizam utilizar a *cloud* como solução de armazenamentos de dados. O ProjectWise que além do armazenamento, disponibiliza ferramentas de colaboração entre os vários intervenientes, como visualizar, anotar e até recurso ao *Clash Detection* para verificar colisões e tolerâncias. O Microstation também foi utilizado para leitura e comparação de modelos, pois trata-se de

uma aplicação genérica que serve de base ao OpenRail e OpenBridge. Para análise estrutural de pontes existe o RM Bridge, programa que neste trabalho não foi utilizado devido à sua complexidade e falta de tempo.

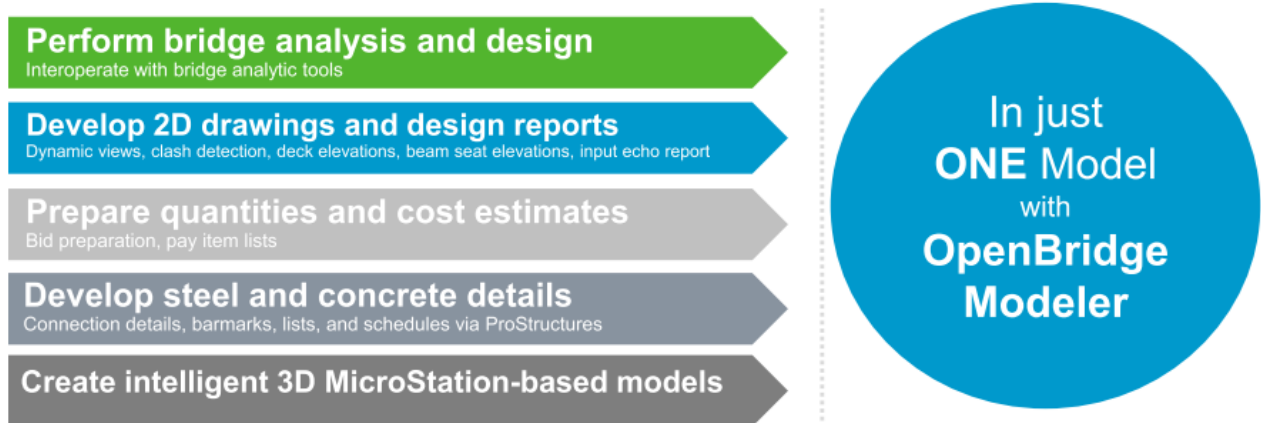


Figura 4.25: OpenBridge Modeler Connect Edition (Mysore, 2018)

Becker *et al.* (2018) comparam três softwares de fotogrametria entre eles o Bentley ContextCapture, o Pix4Dmapper e o Agisoft PhotoScan, e chegaram às seguintes conclusões: o ContextCapture tinha o menor erro nos pontos de controlo, o Pix4Dmapper o menor erro nos pontos de verificação e o ContextCapture tinha a maior resolução, obtida com os mesmos datasets.

Como parte da solução de captura de realidade 3D do Laser Scan utilizado, foram utilizados também as aplicações Leica Cyclone FIELD 360, para vincular a aquisição dos dados 3D diretamente no campo com as imagens do BLK360 laser scanner e Leica Cyclone REGISTER 360 para o registo final dos dados com o software de pós-processamento.

A Tabela 2 resume os softwares utilizados assim como indica a sua respetiva versão.

Tabela 2: Resumo dos softwares utilizados

Software	Versão	Função
Microstation 	10.17.01.58	O MicroStation é usado por engenheiros, arquitetos, profissionais de GIS e construtores para projetar, modelar, visualizar, documentar, mapear e sustentar projetos de infraestrutura pois oferece um conjunto integrado e comprovado de recursos de desenho intuitivos, interativos e altamente interoperáveis.
OpenRail 	10.11.00.115	A implementação CONNECT na linha de produtos de desenho ferroviário consolida Bentley Rail Track, Bentley Rail Track Suite, PowerRail Track no OpenRail Designer.
OpenBridge 	10.11.00.310	O OpenBridge Modeler fornece ferramentas intuitivas para modelação de pontes paramétricas 3D com objetos inteligentes. Apresenta interoperabilidade avançada, permitindo uma forte integração com os dados de aplicações Bentley, bem como uma conexão perfeita com os aplicativos de análise e projeto de pontes da Bentley.
ContextCapture 	10.20.00.4169	O ContextCapture é um software para produção de modelos 3D de alta resolução, com base em fotografias tiradas de diferentes pontos de vista.
Leica Cyclone REGISTER 360 	2022.0.0	O Cyclone REGISTER 360 traz recursos totalmente novos, desde fluxos de trabalho simples e guiados até registro automatizado e entregas prontas para o cliente com o clique de um botão.

CAPÍTULO 5

CASO DE ESTUDO: DESCRIÇÃO

Para aplicação das tecnologias apresentadas foi objeto de estudo o último tramo do Viaduto Poente de Acesso à Ponte das Pirâmides em Aveiro inserida no ramal ferroviário de acesso ao porto de Aveiro.

Com uma extensão aproximada de 9 km, a ligação ferroviária entre a plataforma multimodal de Cacia (km 276+400 – Linha do Norte) e o porto de Aveiro, possibilita a circulação de comboios de mercadorias a uma velocidade de 60 km/h e carga máxima de 25 toneladas por eixo. Inaugurada em março de 2010, tem o seu traçado paralelo à autoestrada A25, intersetando vários canais (Esgueira, São Roque e Pirâmides) e o rio Bouco (Delgado, 2013).

Na Figura 5.1 verifica-se que o ramal é constituído além da plataforma térrea, por duas pontes, uma sobre o canal das pirâmides designada por Ponte das Pirâmides e outra sobre o rio Bouco designada por Ponte da Gafanha. Além das pontes o ramal ainda possui três viadutos, um de acesso à Ponte da Gafanha e dois de acesso à Ponte das Pirâmides, o Viaduto Nascente (do canal da Esgueira à Ponte) e o Viaduto Poente.

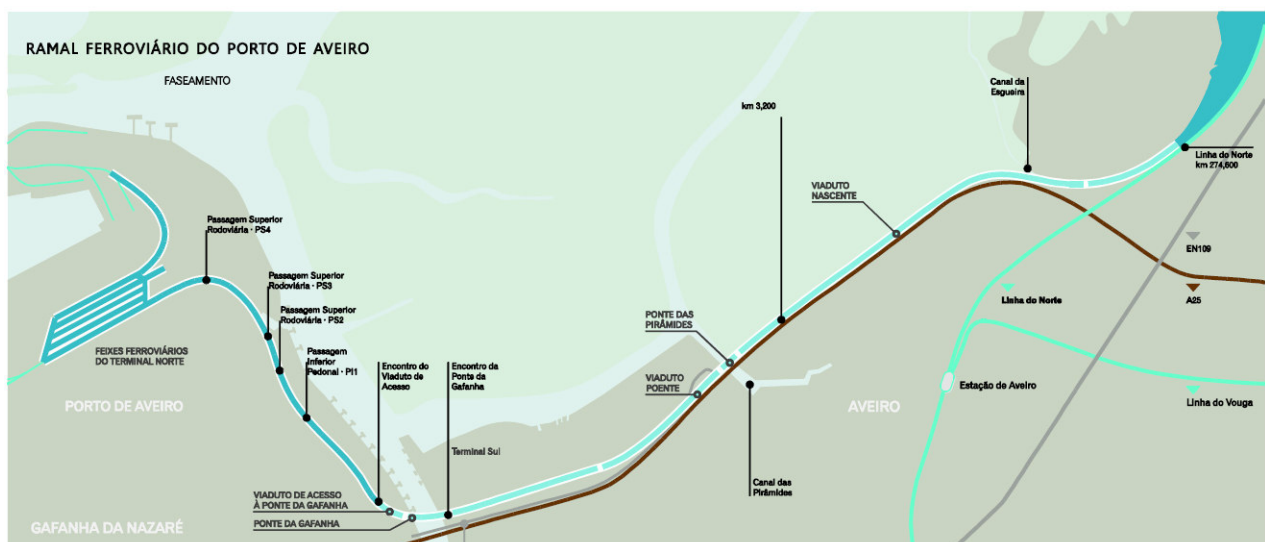


Figura 5.1: Implantação das obras de arte no ramal ferroviário (Delgado, 2013)

O Viaduto de Acesso Poente à Ponte das Pirâmides (Figura 5.2), desenvolve-se entre os km 3+675 e km 4+651, tendo uma extensão total de 976m divididos em nove tramos variáveis, designados de T1 a T9

(Figura 5.3). A dissertação tem com objetivo o estudo do tramo T9, num desenvolvimento de 100m entre os km 4+551 e km 4+461.



Figura 5.2: Vista área do ramal ferroviário (Delgado, 2013)



Figura 5.3: Viaduto Poente (Delgado, 2013)

O tramo T9 apresenta 4 vãos de 25m, totalizando os 100m de extensão. O tabuleiro apoia nos alinhamentos de pilar P155 ao P158 e no encontro E2 (Figura 5.4).

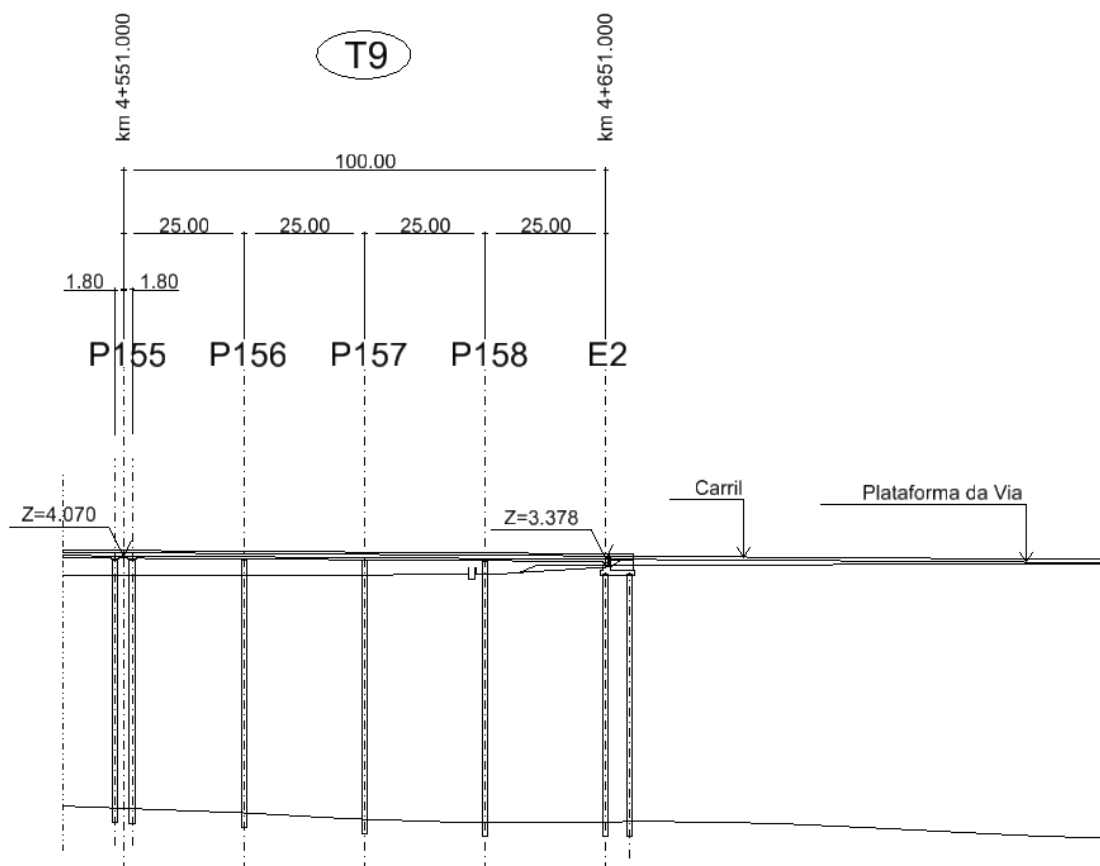


Figura 5.4: Corte longitudinal do Tramo T9 (adaptado Refer, 2005)

Em planta o traçado da ferrovia apresenta na zona do viaduto estudado uma curva de raio 800m com curvas de transição em coloide com extensão de 40m. O perfil longitudinal na localização da obra tem uma inclinação descendente constante de 0.68%.

5.1.1 Pilares / Fundações

Para determinar o tipo de fundações a adotar foi realizada uma prospeção geotécnica, que indicou a existência de lodos e areias bastantes compressíveis, o que obrigou à utilização de fundações indiretas com extensões suficientes para atingir formações compactas. Considerando que este sistema de fundações teria de obrigar à execução de um corredor de acesso, ainda que temporário, para a passagem e funcionamento dos equipamentos necessários à construção das estacas e maciços de encabeçamento, executado em todos os alinhamentos de pilares em terrenos da ria de Aveiro, complicando assim a sua construção e remoção, optaram por uma solução de pilar-estaca. A solução foi construída por avanços sucessivos, recorrendo uma plataforma móvel apoiada em estacas já executadas, permitindo o acesso de máquinas e pessoal necessário à execução dos pilar-estacas seguintes. Assim a geométrica da secção dos pilar-estacas é circular com diâmetro de 1.10m e afastados transversalmente a eixo de 5.50m e atingindo

profundidades variáveis de 40 a 50m. O alinhamento de junta (P155) possui 4 pilares-estaca afastados em 4.0m longitudinalmente mantendo a restante geometria (Figura 5.5).



Figura 5.5: Pilares na zona da junta

5.1.2 Encontro

O encontro E2 é do tipo cofre com muros alas, fundados por meios de estacas e maciço de encabeçamento. Transversalmente têm 3 alinhamentos de estacas de diâmetro de 1.00m e afastadas de 3.00m, longitudinal possui dois alinhamentos distanciados de 5.00m, totalizando 6 estacas (Figura 5.6).

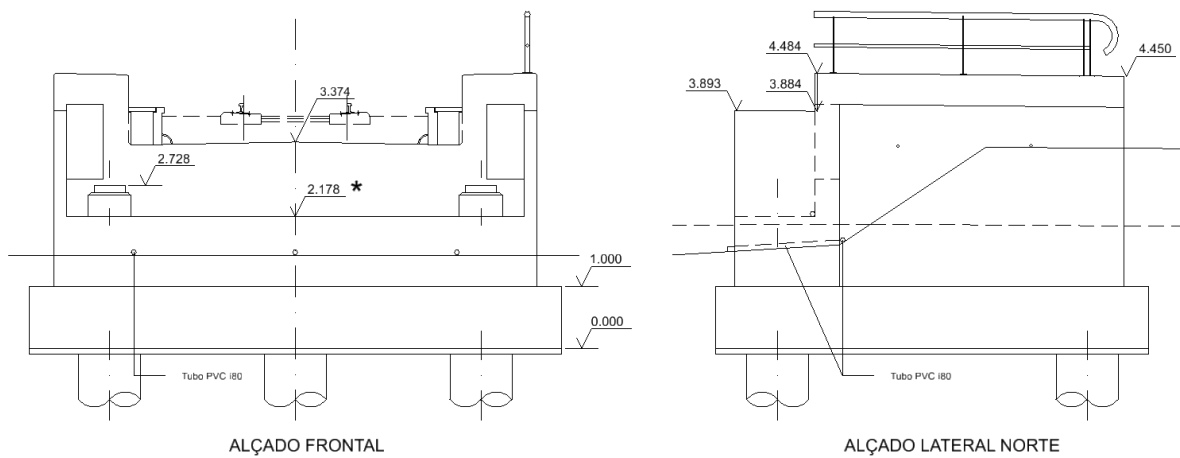


Figura 5.6: Alçados encontro E2 (Refer, 2005)

5.1.3 Tabuleiro

A solução de tabuleiro adotada pelo projetista é do tipo laje vigada. Duas vigas longitudinais ligadas inferiormente por uma laje que permite o suporte da plataforma ferroviária composta por travessas monoblocos em betão apoiadas em balastro (Figura 5.7). O tabuleiro tem uma largura total de 7.80m e uma altura de 1.60m. A plataforma é composta por dois passeios de 1.20m cada, 4.30m pela via férrea, restando 0.55m de cada lado da via para caleiras. A volumétrica inferior do tabuleiro tem uma largura de 6.60m e a laje inferior tem um mínimo de 0.40m de espessura. No projeto de execução das obras estava previsto guarda corpo apenas do lado oposto à A25, não estando prevista a eletrificação da via.

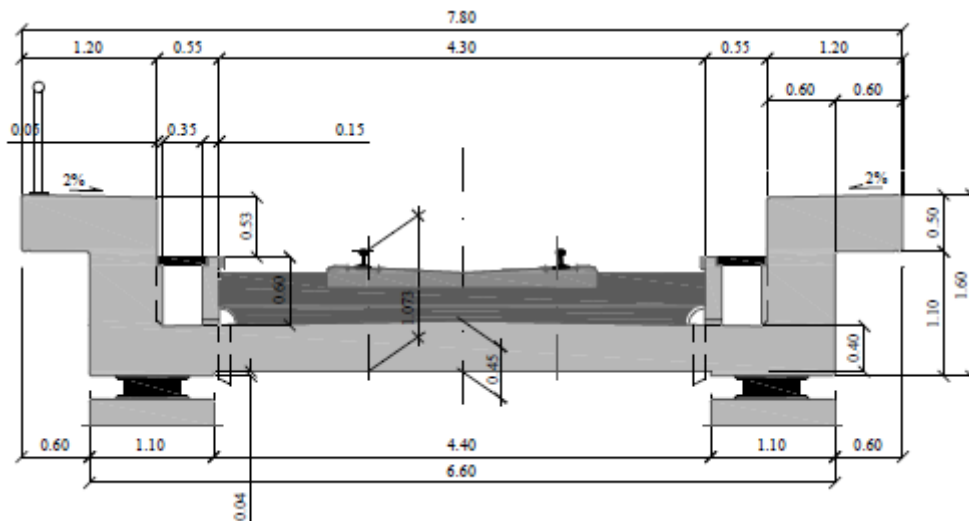


Figura 5.7: Seção transversal tipo (Delgado, 2013)

Trata-se de uma estrutura em betão-armado pré-esforçado, sendo o pré-esforço aplicado nas vigas longitudinais e caso seja necessário o reforço da resistência do viaduto, foram deixadas nas carlingas extremas, bainhas e ancoragens permitindo a aplicação de pré-esforço exterior (Figura 5.8).



Figura 5.8: Carlingas extremas

5.1.4 Aparelhos de apoio

Os aparelhos de apoio são do tipo “pot-bearing” incorporando discos de elastômero confinado. Foram utilizados três tipos de aparelho de apoio para o tramo modelado, dois tipos de aparelhos de apoio fixos e um tipo de aparelho de apoio guiado. Os fixos mais fortes têm capacidade de resistência vertical máxima de 4000kN e mínima de 2000kN e capacidade resistente horizontal de 400kN. Os fixos menos fortes resistem a forças máximas verticais de 2000kN e mínimas de 750kN e horizontais de 350kN. Os aparelhos de apoio moveis têm uma capacidade de 750kN a 2000kN na resistência vertical e de 200kN na resistência horizontal permitindo deslocamentos longitudinais de ± 100 mm. Na Tabela 3, encontram-se resumidas as características destes aparelhos de apoio e na Figura 5.9 a sua localização.

Tabela 3: Aparelhos de apoio (adaptado Refer, 2005)

Aparelhos de Apoio		Referencia	Carga Vertical (kN)	Carga Horizontal (kN)	Deslocamento (mm)	Rotação (rad)	Quantidade (uni)
F	Fixo	1	máx. - 2000 min. - 750	350	-	> 0.01	2
		2	máx. - 4000 min. - 2000	400	-		6
	M	Movel	3	máx. - 2000 min. - 750	200		± 100

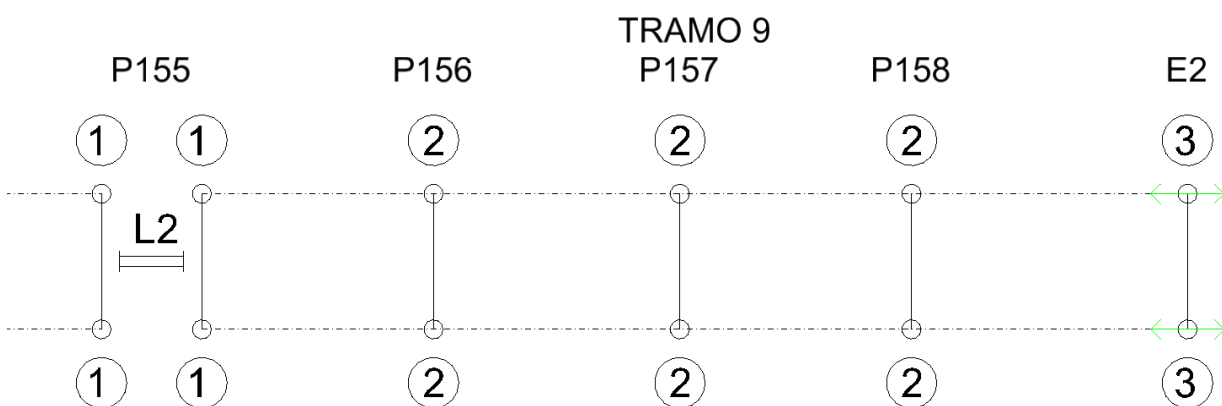


Figura 5.9: Localização dos aparelhos de apoio e ligadores hidráulicos (adaptado Refer, 2005)

5.1.5 Ligadores Hidráulicos

Foram utilizados também ligadores hidráulicos para unir os vários troços de tabuleiro, funcionando como um conjunto e assim permitir deformações longitudinais dentro de valores aceitáveis e evitar

complicações ao nível da exploração da via férrea. Os ligadores (*Shock Transmitters Units, STU*) permitem deslocamentos devidos a ações lentas, como variações de temperatura, mas impedem os deslocamentos relativos entre troços para ações rápidas como a frenagem ou o sismo. O dispositivo (Figura 5.10) utilizado permite uma força longitudinal de até 2500kN, com um deslocamento de $\pm 100\text{mm}$.



Figura 5.10: Ligador hidráulico

CAPÍTULO 6

CASO DE ESTUDO: MODELO BIM

A modelação da via férrea foi realizada com recurso ao OpenRail, sendo o resultado um modelo geométrico tridimensional com alguma informação não-gráfica referente às características dos elementos do terreno assim como a sua geolocalização. O viaduto foi modelado no OpenBridge com base no modelo da linha ferroviária do OpenRail. Neste modelo do viaduto não consta a totalidade da informação semântica, pois seria demasiado moroso a aprendizagem dos “*items types*” de forma a criar e a implementar *data-templates* para os diversos objetos do modelo. Um “*item type*” é um conjunto de propriedades definido pelo utilizador de Microstation, usado para descrever um objeto ou elemento. Depois de anexado, as características de um “*item type*” serão exibidas nas propriedades junto às propriedades geométricas do objeto ou elemento. Isto permite que os “*items types*” sejam utilizados para armazenar informações não-gráficas dos elementos na forma de propriedades, podendo obter-se quantidades e características de determinados elementos em listagens automáticas.

O processo de modelação do modelo BIM como uma parte integrante da fase de projeto começa com a modelação do terreno circundante. Os passos e métodos seguidamente descritos, serão “cópias” das geometrias e características já definidas pelo projeto de execução para os componentes necessários para à modelação. Este trabalho consistirá na reprodução dessa informação, mas num projeto novo a projetar, os processos são idênticos.

6.1 MODELAÇÃO DO TRAÇADO FERROVIÁRIO

6.1.1 Terreno

Com base na descrição da obra acima realizada, importou-se quer o levantamento realizado para este trabalho (Anexo I), quer o disponibilizado no projeto de execução. Utilizando o OpenRail produziu-se uma superfície que representa a volumetria do terreno existente (Figura 6.1). Foi possível incluir informação não gráfica no modelo do terreno na medida em que as curvas de nível, as linhas de quebra e os limites do levantamento têm diferentes características, e, por isso, distintas relações para cálculo da superfície.

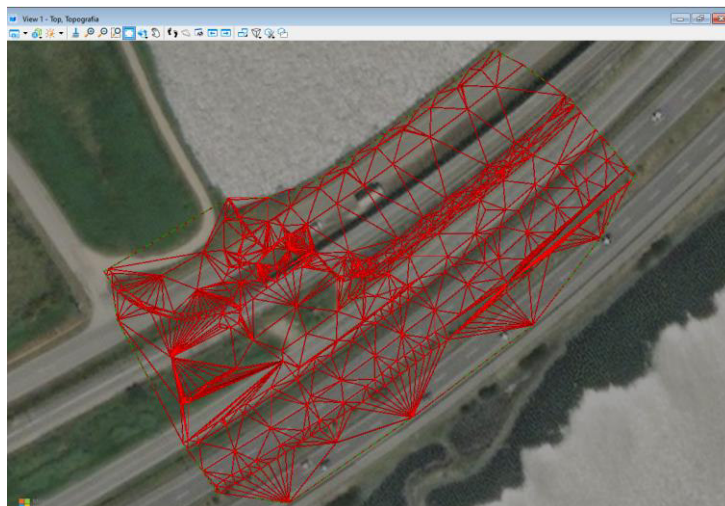


Figura 6.1: Triangulação do terreno (a vermelho) sobre imagem de satélite da Microsoft Bing

6.1.2 Traçados em planta e alçado

Com o terreno modelado, projetou-se a diretriz da linha férrea nas coordenadas indicadas no projeto de execução. Como não havia necessidade de projetar toda a extensão da linha férrea optou-se por iniciar o traçado ao pk 4+400 e terminar aproximadamente ao pk 4+760, desta forma o modelo seria mais facilmente trabalhável em termos de recursos computacionais e abrangia na mesma a totalidade da obra estudada. Na Figura 6.2 encontra-se as características do traçado em planta implementadas no OpenRail. Uma grande parte da obra desenvolve-se em alinhamento curvilíneo circular de raio 800m, com transições em clóide com extensão de 40m para ambos os lados, concordando com alinhamentos retos nas extremidades.

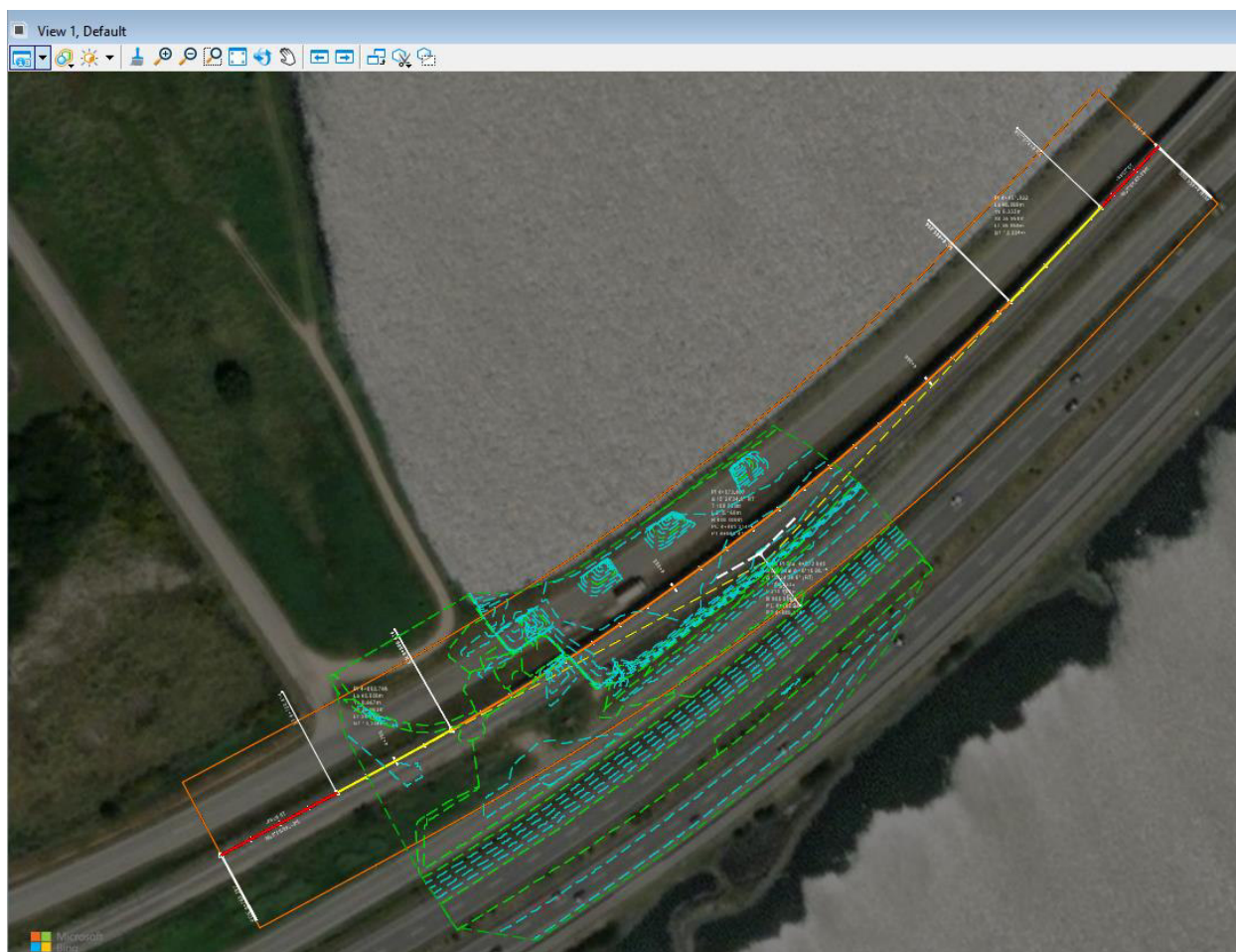


Figura 6.2: Traçado em planta com curvas de nível do terreno

Com esta informação modelada foi possível fazer um corte longitudinal pela diretriz com o terreno, onde se projetou a rasante da linha férrea retirada do projeto de execução. Na Figura 6.3 verifica-se o desenho da altimétrica do eixo dos carris no perfil longitudinal. Ainda se introduziu aos dados da rasante o excesso de escala obtidos também do projeto da linha férrea, embora exista a possibilidade de o programa calcular os valores relacionados com as escalas respeitando as normas americanas. Julga-se possível editar e até adicionar valores padrões de forma a respeitar outros regulamentos além do americano.

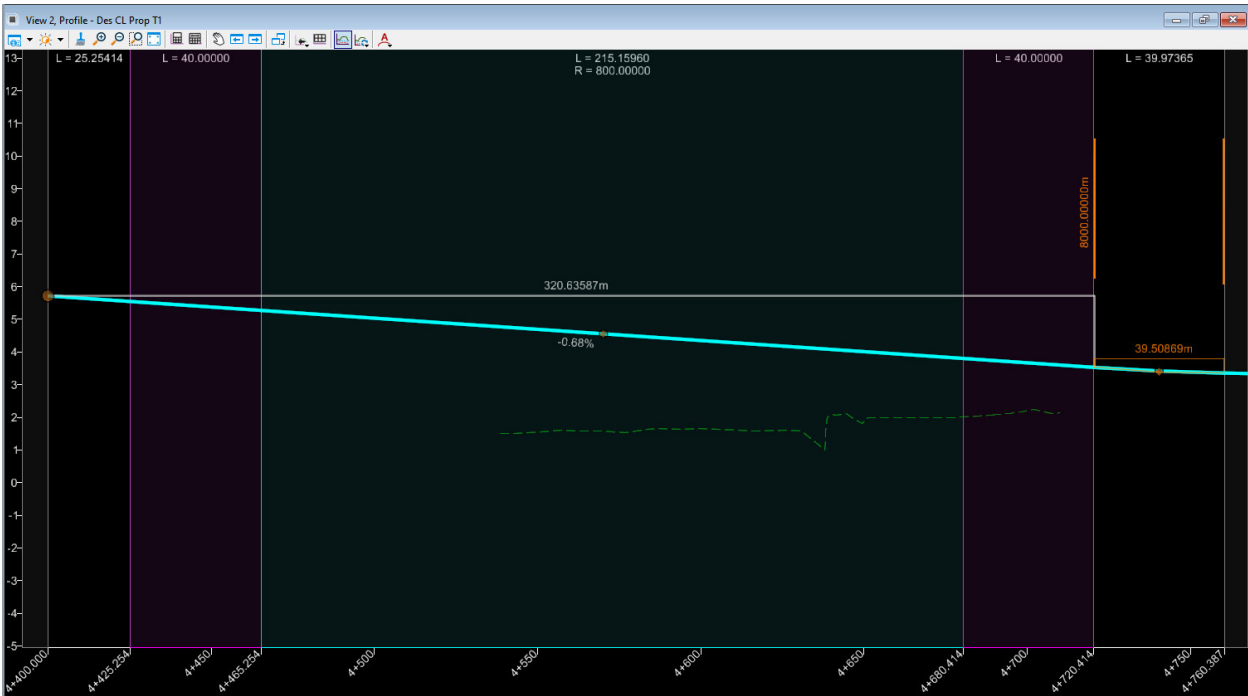


Figura 6.3: Perfil longitudinal

O perfil longitudinal da rasante desenvolve-se em tranel descendente com uma pendente de 0.68%, com uma concordância côncava com raio de 8000m para outro tranel descendente com 0.19% de inclinação.

6.1.3 Secção transversal

Relativamente ao perfil transversal, foi adotado o definido no projeto de execução em termos de larguras e espessuras, admitiu-se uma inclinação para os taludes de aterro de 2:3 (V:H) conforme representado na Figura 6.4. Com base nestas informações foi possível produzir um corredor com a geometria do terreno e da plataforma, respeitando o traçado planimétrico e altimétrico apresentado no projeto da linha férrea. Na Figura 6.5 estão representadas algumas vistas do traçado modelado.



Figura 6.4: Perfil transversal

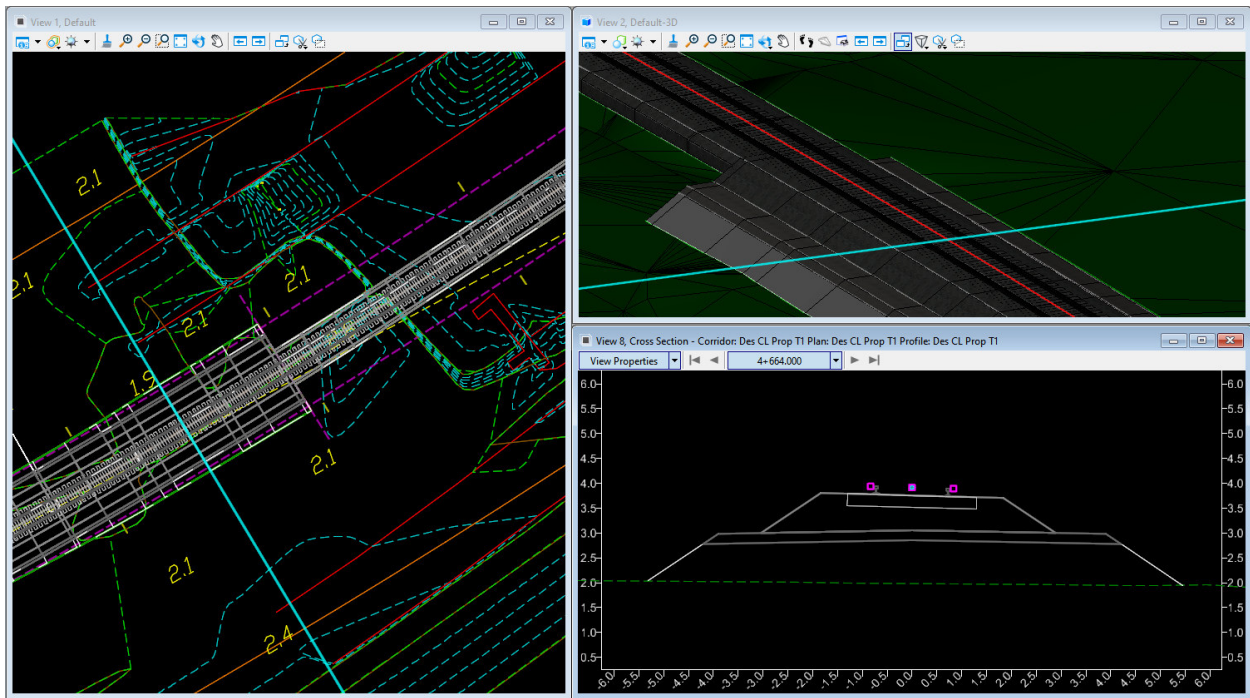


Figura 6.5: Diferentes vistas do corredor ferroviário

6.2 MODELAÇÃO DO VIADUTO

O OpenBridge permite um *workflow* BIM (Figura 6.6) com ferramentas necessárias para cada fase da modelação da obra de arte, entre elas modelação do modelo, análise estrutural e extração de desenhos. Assim começou-se por definir os alinhamentos de apoio, correspondentes aos aparelhos de apoio e aos limites longitudinais do viaduto, linhas cor-de-rosa transversais ao eixo na Figura 6.7.

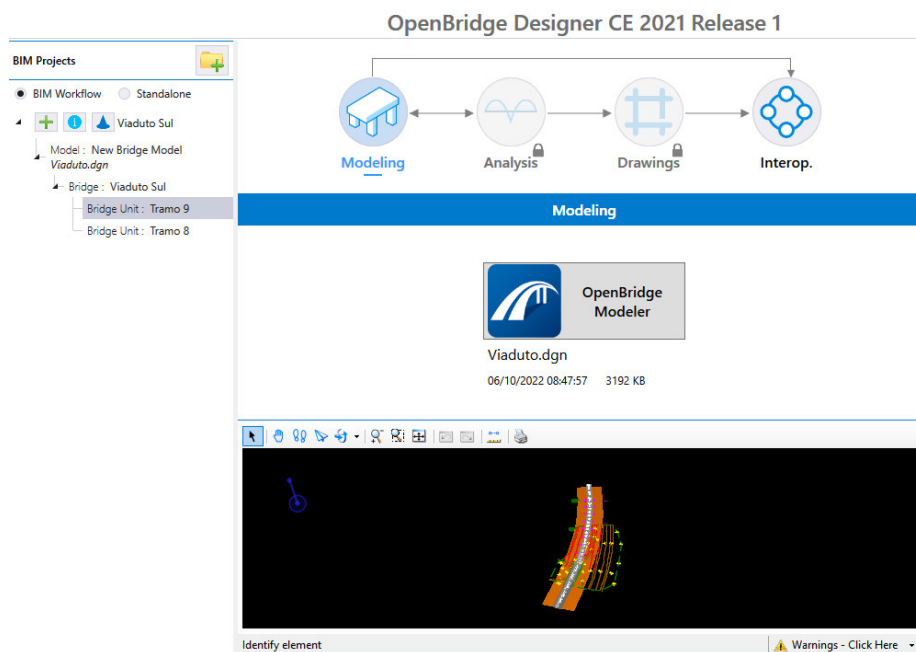


Figura 6.6: Workflow do OpenBridge

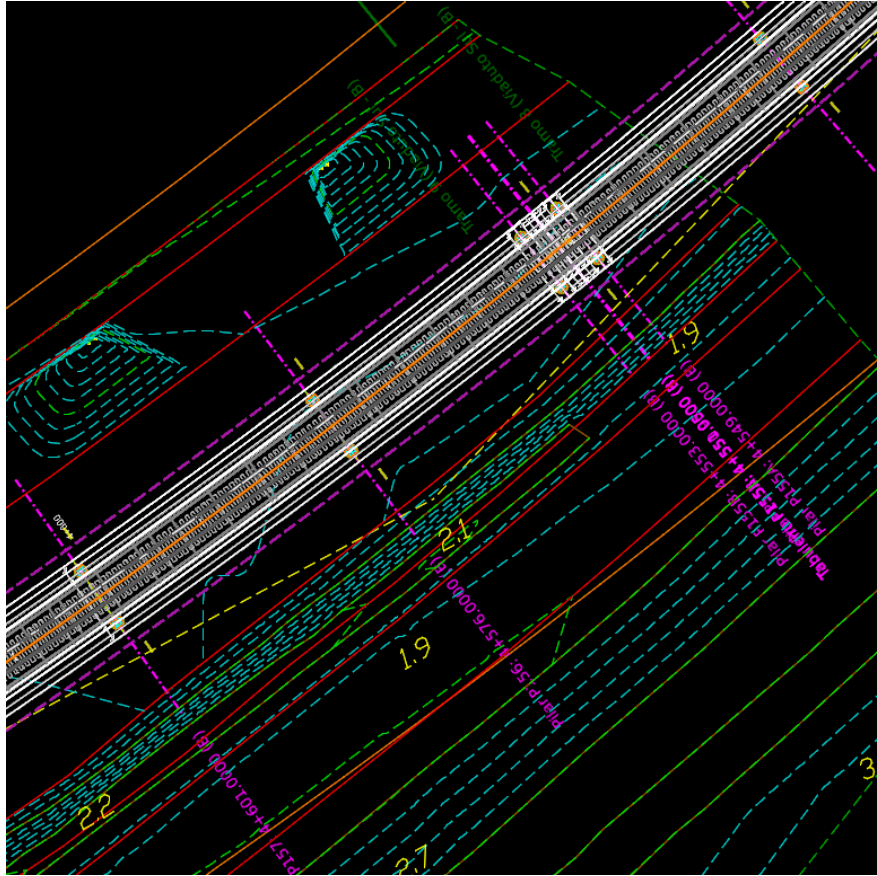
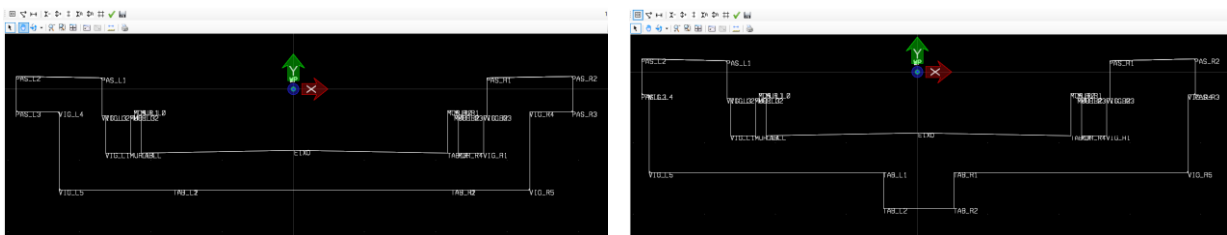


Figura 6.7: Alinhamentos de apoio e junta

6.2.1 Tabuleiro

Modeladas as condições do terreno, da plataforma férrea e definidas as linhas de apoio, criaram-se três templates para a secção transversal do tabuleiro (Figura 6.8). Aplicando estes templates ao tabuleiro conseguiu-se modelar tanto o tabuleiro na zona corrente como nas zonas das carlingas. A parametrização neste caso não foi necessária, mas seria possível parametrizar a secção de forma a respeitar funções acrescentadas pelo utilizador. Na colocação do tabuleiro é possível ainda definir o material assim como outras características da secção ou do material de modo a essa informação ficar anexa ao objeto criado (Figura 6.9).



a) Zona corrente

b) Zona de ancoragem do ligador hidráulico

Figura 6.8: Secções do tabuleiro

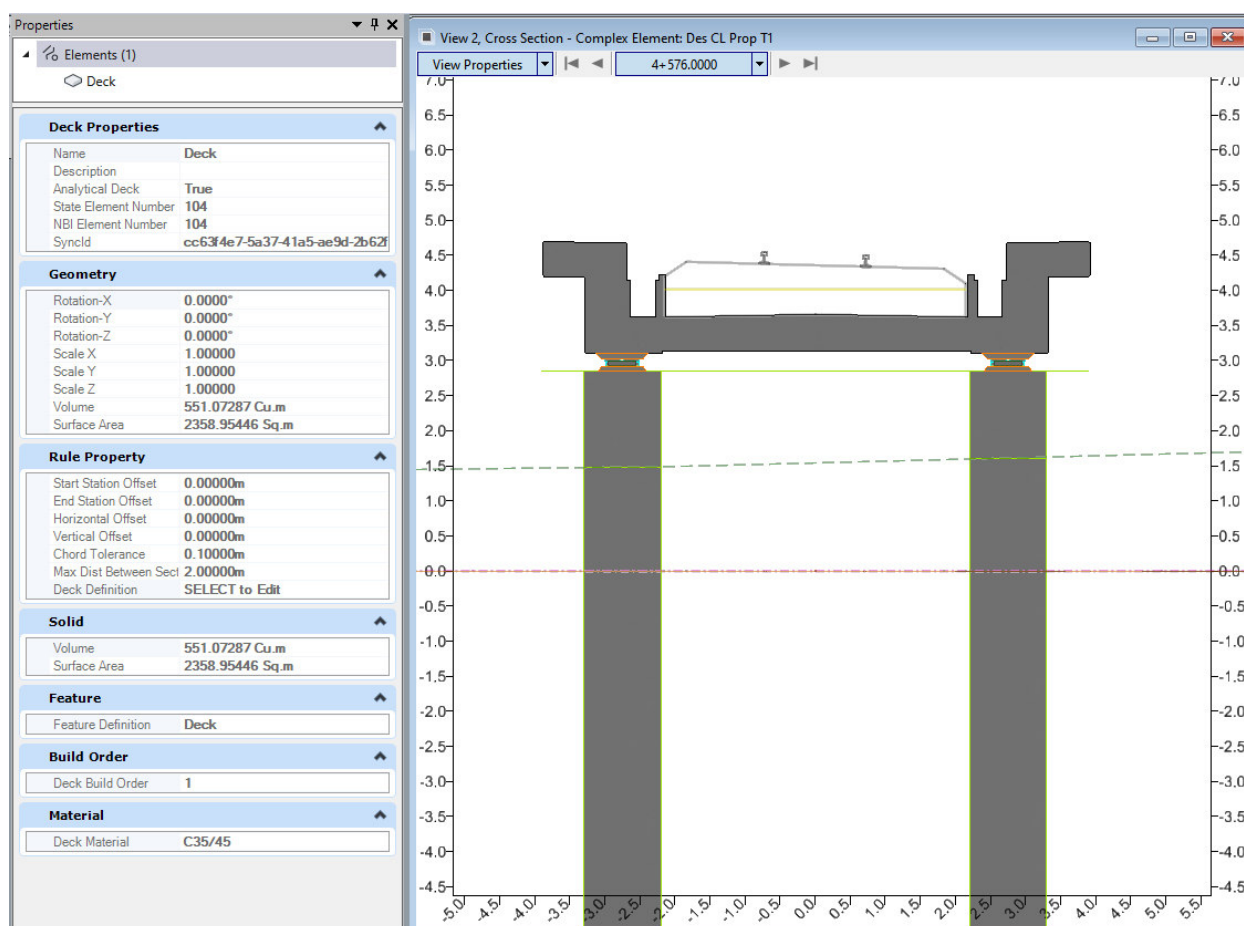


Figura 6.9: Algumas propriedades do elemento tabuleiro “DECK”

6.2.2 Pilares / Fundações

Nesta obra as fundações e os pilares são os mesmos e o software trata os dois como complementares, sendo que a ferramenta para definição dos pilares é a mesma das fundações. À semelhança do tabuleiro também existem templates (Figura 6.10) para a modelação dos pilares e das fundações, mas ao invés de serem tratados como uma seção que é repetida segundo um eixo, são tratados como elementos volumétricos que podem ou não existir. Neste caso o elemento sapata não existe pelo que podemos desligar esse elemento do template e dessa forma não são requeridas as suas dimensões nem características. Isto permite então ter muitas composições com o mesmo princípio e não ser necessário recomeçar sempre do zero. Os elementos são totalmente paramétricos e assumem relações perante os outros. Exemplo disso é a cota do topo dos pilares que é definida como uma distância até à face inferior do tabuleiro, e estando dinamicamente restringida a essa face. Outro exemplo é o caso da cota de fundação, pois se modelarmos os estratos geológicos recolhidos pela prospeção geotécnica poderemos referenciar a cota a um determinado estrato. Tal com no tabuleiro é possível definir o material e a ordem de construção dos elementos constituintes dos apoios (Figura 6.11).

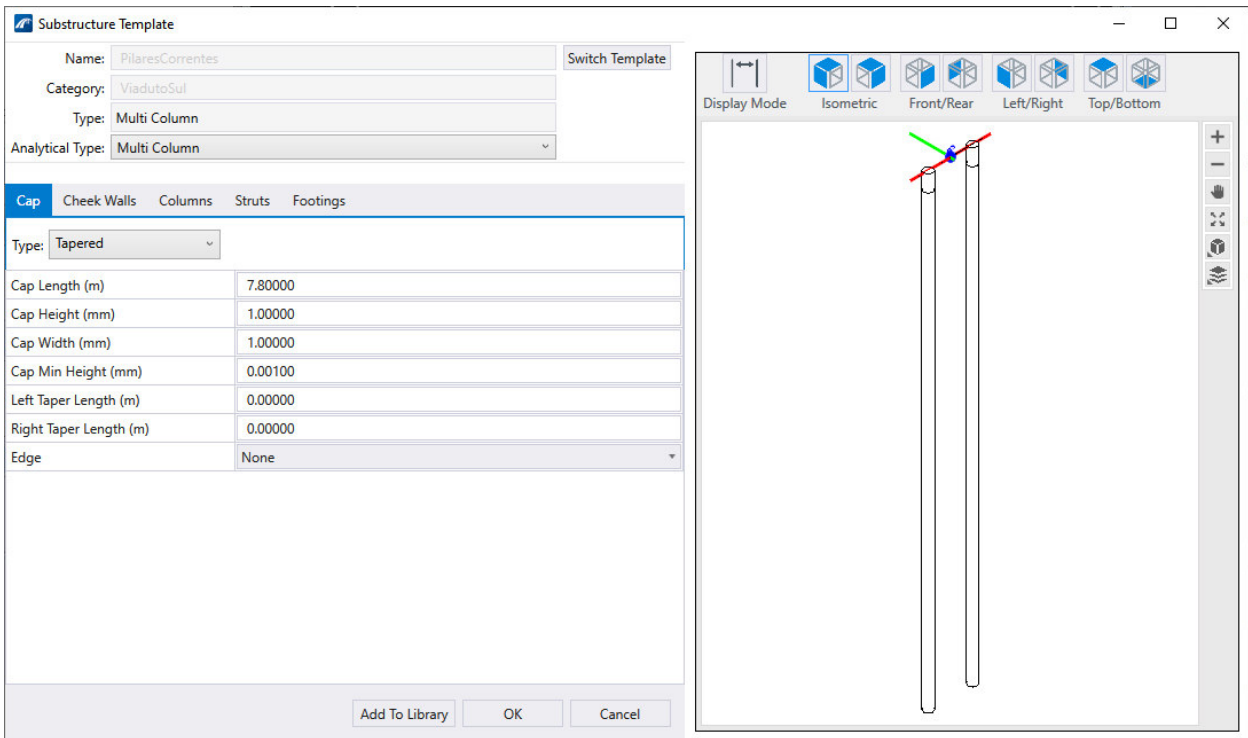


Figura 6.10: Template dos pilares estaca

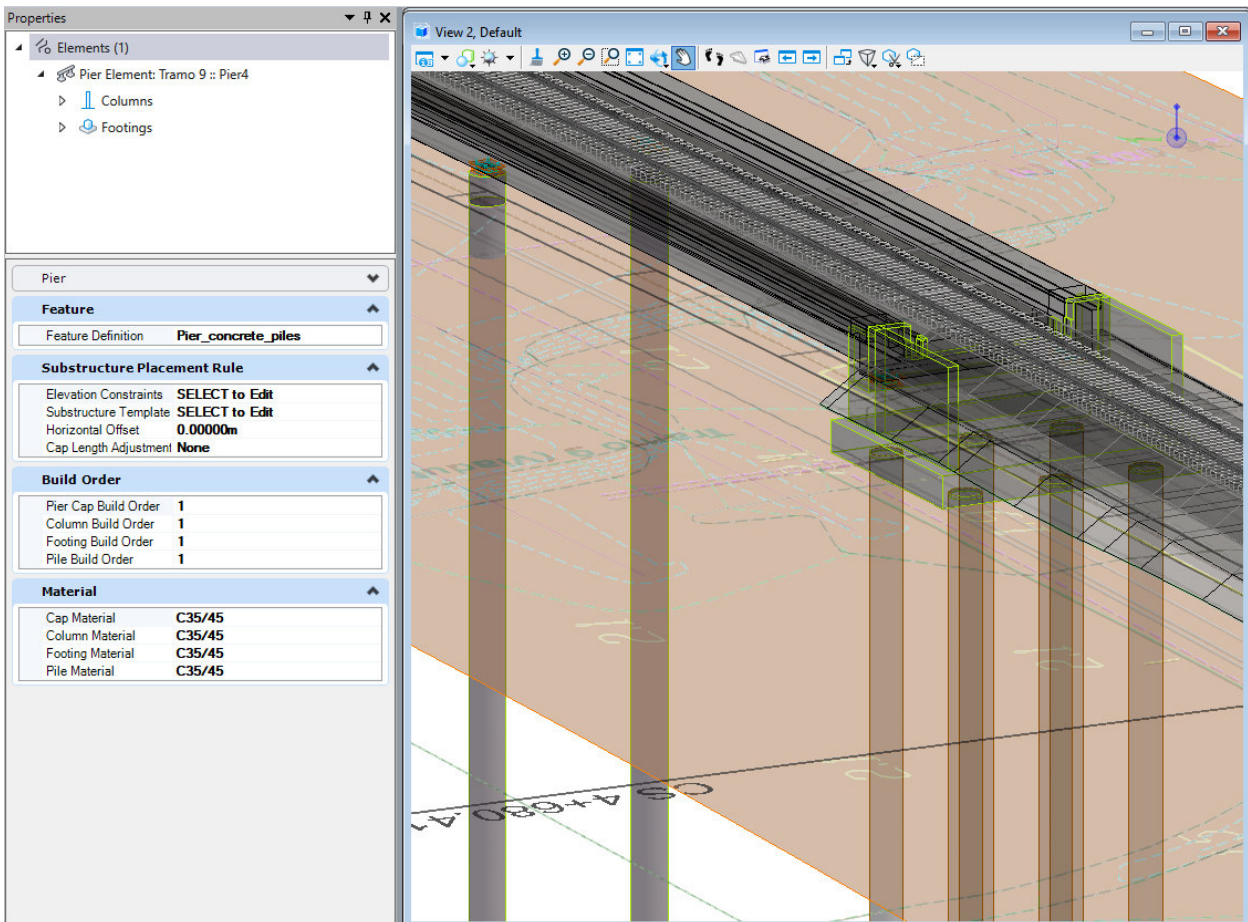


Figura 6.11: Definições dos pilares

6.2.3 Encontro

Na Figura 6.11 além dos pilares apresenta-se também o encontro. O encontro segue a mesma metodologia aplicada aos pilares, possuindo apenas mais elementos (Figura 6.12 e Figura 6.13).

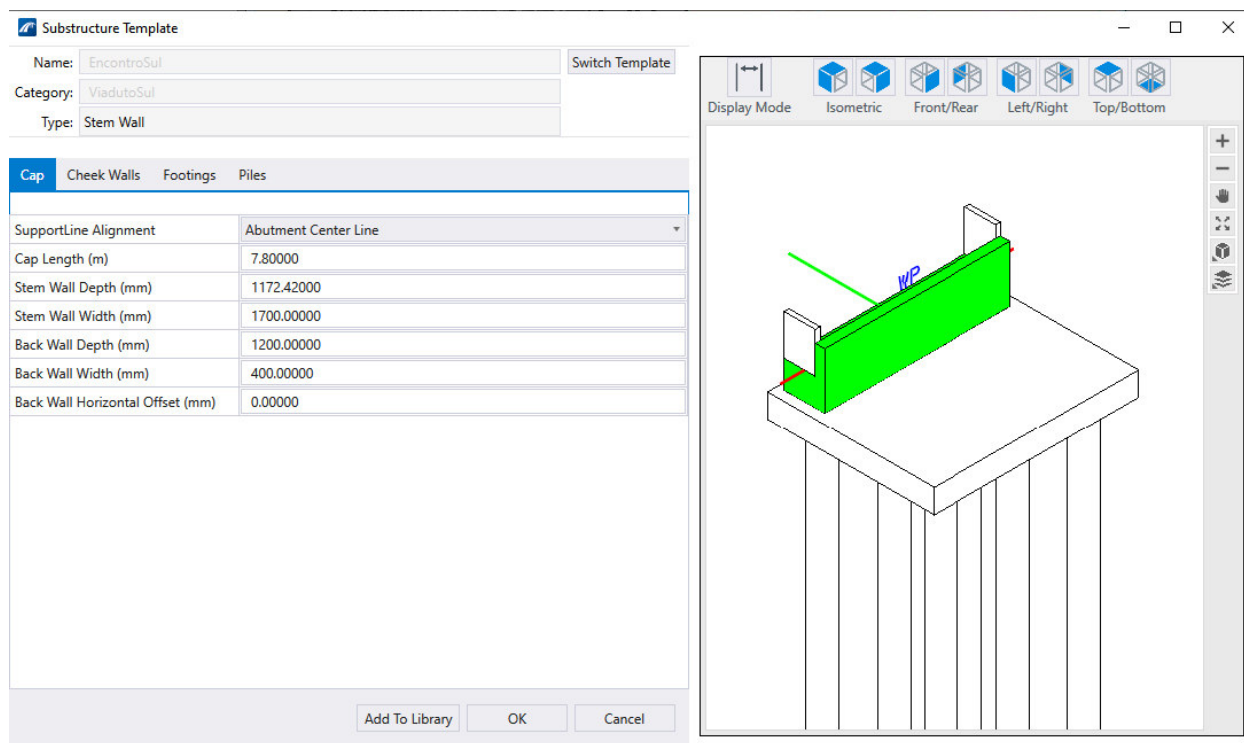
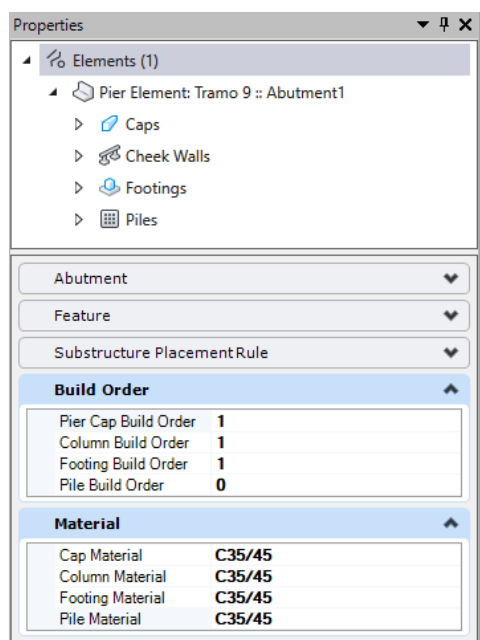
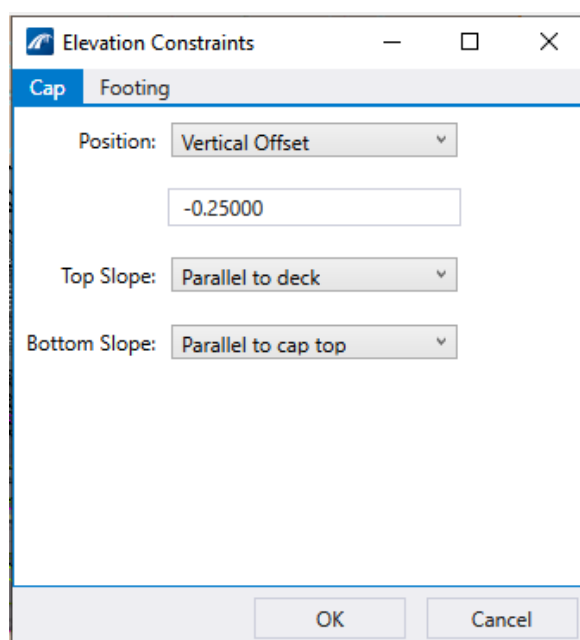


Figura 6.12: Template do encontro



a) Propriedades do encontro



b) Restrição da face da viga de apoio

Figura 6.13: Informação não gráfica do encontro

6.2.4 Pré-esforço

O OpenBridge não dispõe neste momento de ferramentas para modelação ou detalhe dos equipamentos para pré-esforço (cabeças, bainhas, etc.), mas após contato com o suporte da Bentley foi fornecido um workflow que permite ter no modelo físico essa informação. O método consiste em passar o modelo físico para o RM Bridge (programa de análise estrutural), modelando na estrutura importada os traçados dos cabos. Além da geometria e características do sistema de pré-esforço, é possível, posteriormente, anexar essa informação gráfica assim como a informação não gráfica, tais como operações de tensionamento, valores de esticamento, valores de perdas e alongamentos previstos. Neste processo o modelo analítico do RM Bridge e o modelo do OpenBridge ficam interligados e qualquer alteração num pode ser observada no outro. Inclusive depois da análise estrutural se a geometria dos pilares, encontros ou tabuleiro necessitar de ajustes pode ser efetuada automaticamente no OpenBridge.

6.2.5 Aparelhos de apoio

Para modelação dos aparelhos de apoio existe uma biblioteca com alguns fornecedores embora seja possível executar modelos paramétricos próprios. Para este exemplo foram modelados os aparelhos de apoio (Figura 6.14) mas sem todas as características apresentadas na biblioteca (Figura 6.15). Na Figura 6.14 verifica-se também a incorporação no modelo dum ficheiro pdf com as características do aparelho de apoio da autoria do fornecedor de aparelhos de apoio e que se encontra no Anexo II.

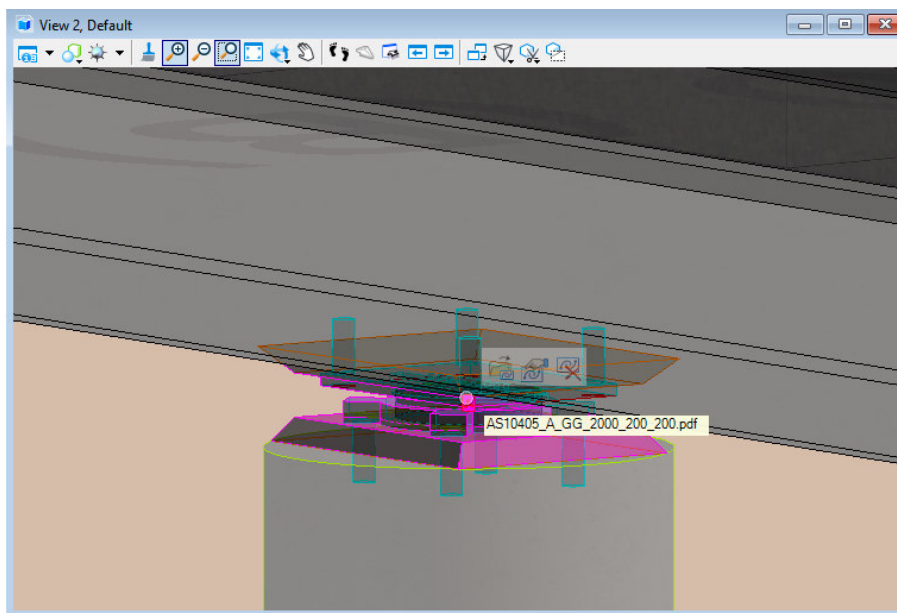


Figura 6.14: Aparelho de apoio do P158

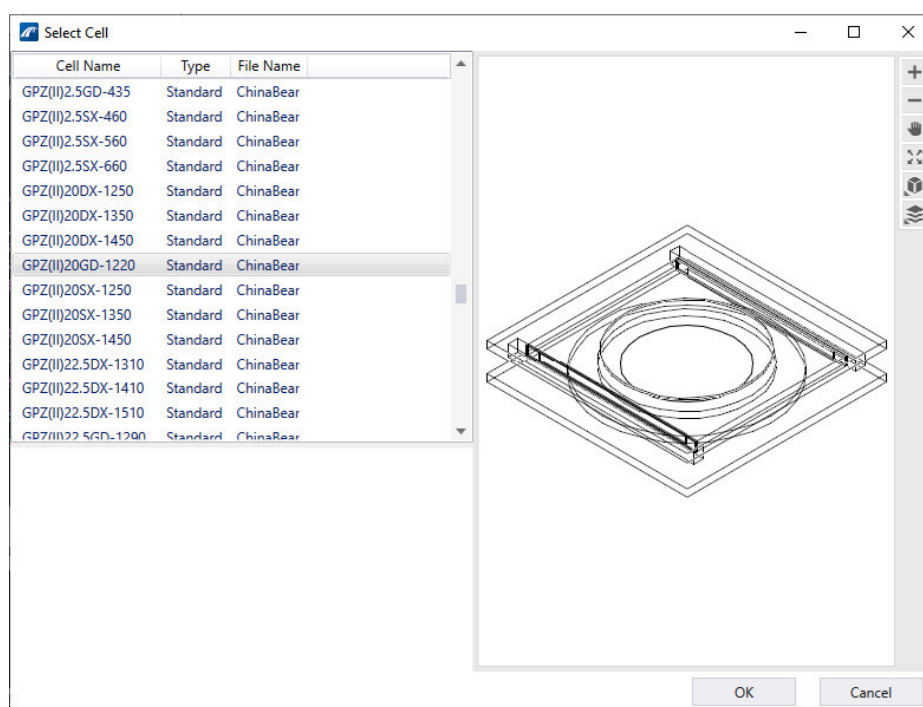


Figura 6.15: Exemplo de aparelhos de apoio de fornecedores

6.3 ANÁLISE ESTRUTURAL – RM BRIDGE

Como já referido, a metodologia BIM proposta pela Bentley permite que o modelo geométrico completo passe para um modelo analítico. Completando o modelo com a definição da geométrica dos cabos de pré-esforço, características do sistema de pré-esforço aplicado e as atividades decorrentes da sua aplicação. O faseamento também poderá ser iniciado no modelo de OpenBridge com a indicação da ordem de construção das diferentes fases, mas terá de ser complementado no RM Bridge como é exemplo a duração das etapas para considerar os efeitos de retração e fluência no betão. Neste trabalho não foi abordada a análise estrutural, pois, o RM Bridge é um software bastante complexo e não muito *user friendly*, o que demoraria bastante tempo adquirir conhecimentos de forma a ter um modelo minimamente aceitável. A interoperabilidade entre o ficheiro de OpenBridge e o ficheiro do RM Bridge não foi testada, mas crê-se que seja robusta e estável por fazer parte do workflow (Figura 6.6).

6.4 EXPORTAÇÃO EM FORMATO IFC

Em relação à interoperabilidade dos ficheiros com outros softwares ou formatos neutros, foi testado apenas o uso do formato ifc. Apesar do OpenBridge permitir a exportação para bastantes formatos entre eles dwg, fbx, dae, etc. não foi possível testar a exportação pois não se possui licenças para os respetivos softwares. Para a obtenção do ifc exportou-se quer o modelo do corredor ferroviário, apenas a informação relativa ao traçado no OpenRail, quer o modelo do viaduto no OpenBridge.

O modelo em OpenRail dispõe de três formatos (Figura 6.16) permitindo assim avaliar a conversão e a solidez de cada versão.

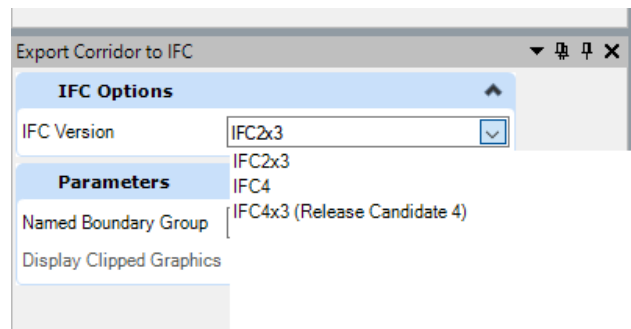


Figura 6.16: Formatos de ifc no OpenRail

A versão ifc2x3 converteu a geometria toda sem qualquer falha aparente, mas não detém qualquer informação semântica (Figura 6.17). Isto permite uma troca de informação correta, mas apenas informação geométrica. O formato ifc 4 além de interpretar e escrever a informação gráfica consegue converter parte da informação semântica, mas colocou todos os elementos como ifc elements proxys (Figura 6.18). O ifc 4x3_RC4 produziu um ficheiro, mas que não se consegue abrir, poderá ser pelo fato de ser uma versão *Release Candidate* e não estar devidamente desenvolvida. Assim, concluiu-se que para o projeto de vias a solução proposta não apresenta a solidez desejada e que deverá de ser melhor desenvolvida para permitir troca de informação de forma neutra.

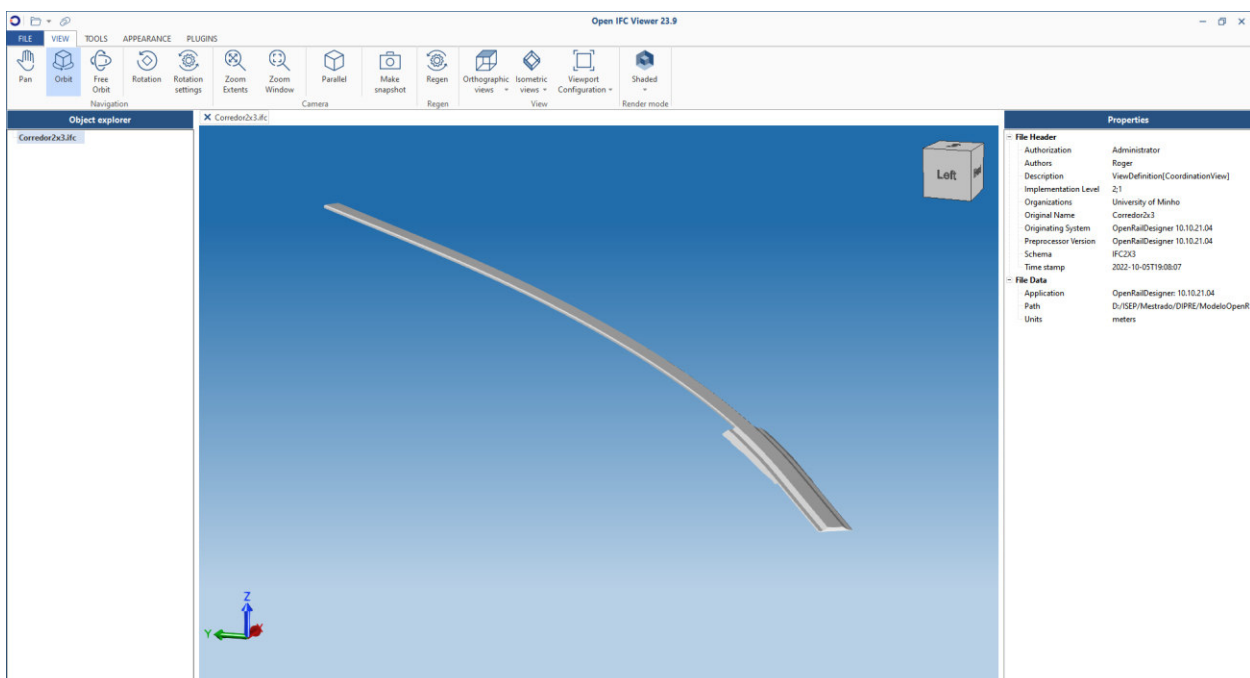


Figura 6.17: Ficheiro em formato ifc2x3 - OpenRail

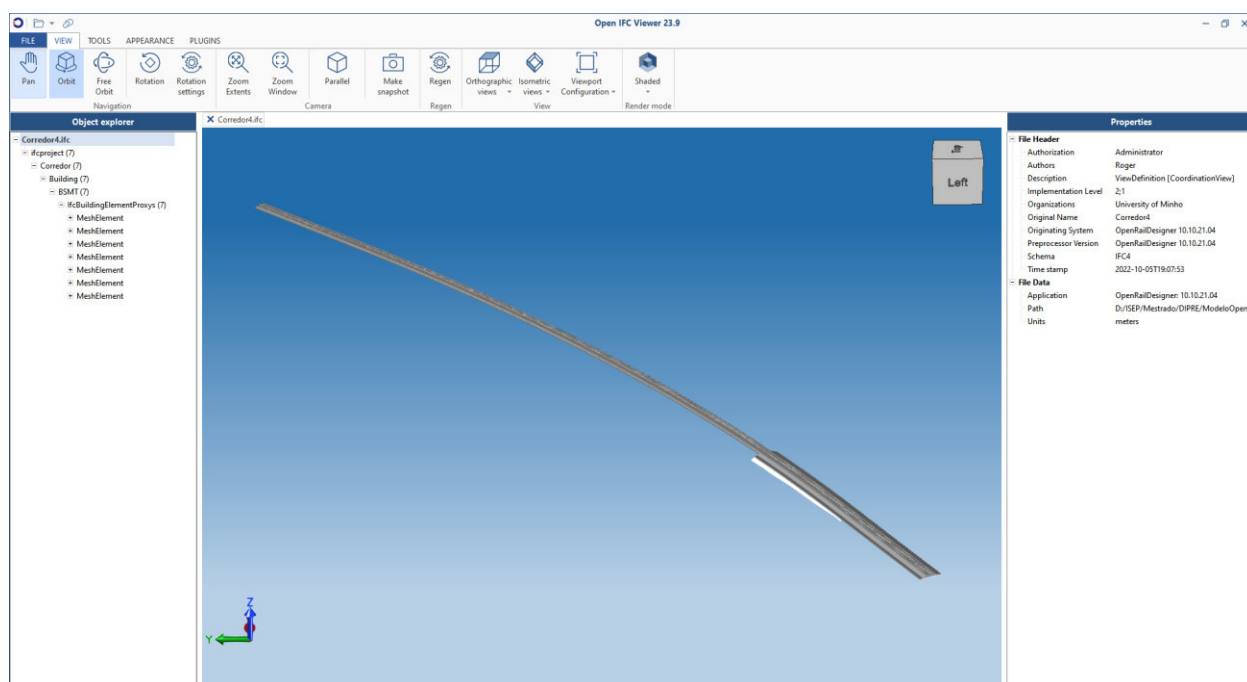


Figura 6.18: Ficheiro em formato ifc4 - OpenRail

O OpenBridge não fornece uma ferramenta local como o OpenRail, apenas fornece uma ferramenta online associada ao ProjectWise (Figura 6.19) para conversão em formato ifc e permite dois formatos o ifc 2x3 e o ifc 4x3_RC1.

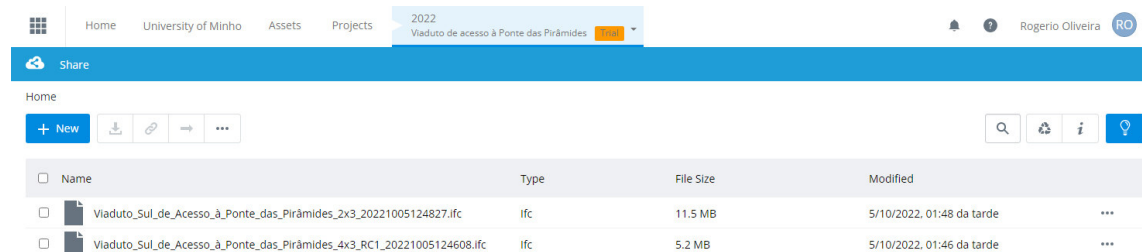


Figura 6.19: Ficheiro ifc no ProjectWise

À semelhança do OpenRail o formato ifc 4x3 encontra-se vazio ou corrupto não permitindo a sua abertura. O ifc 2x3 obtido pela aplicação online apresenta mais informação como seria de esperar, mas ainda não se encontra totalmente desenvolvido pois todos os elementos são colocados como ifc elements proxys embora com mais informação semântica, como é exemplo o sistema de localização geográfica. Na Figura 6.20 pode-se observar do lado esquerdo os elementos convertidos e do lado direito algumas características do “site”.

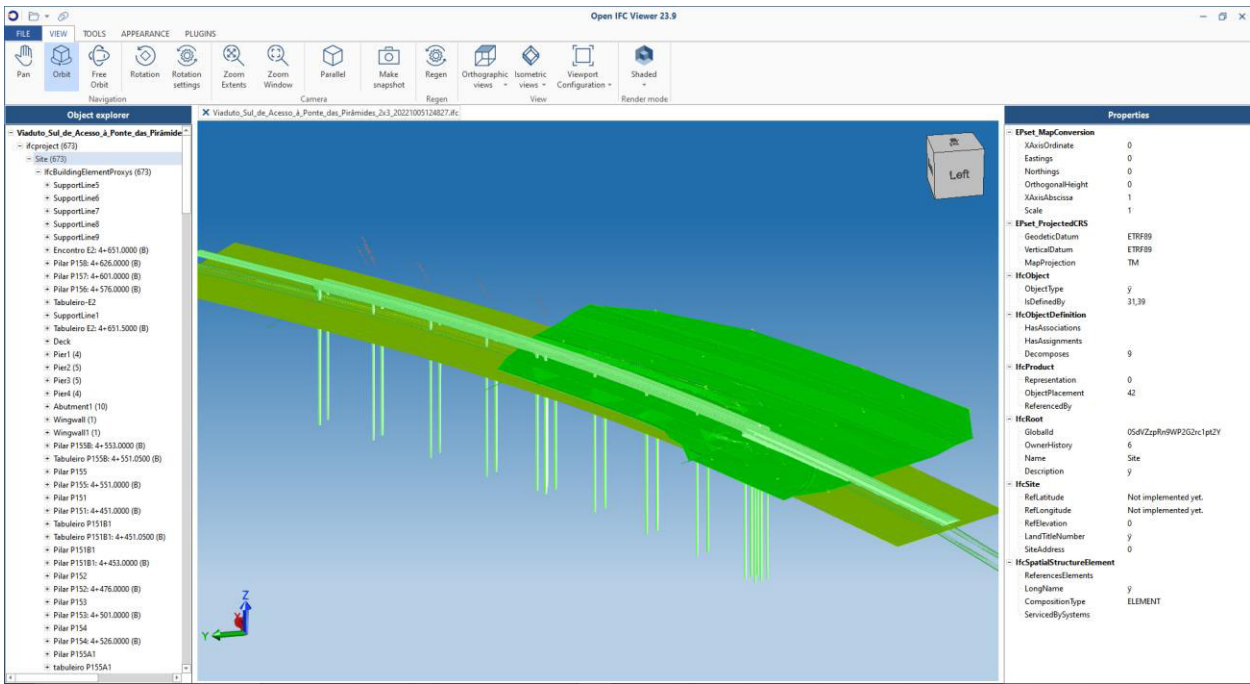


Figura 6.20: Ficheiro em formato ifc2x3 - OpenBridge

CAPÍTULO 7

CASO DE ESTUDO: REALITY CAPTURE

Neste capítulo serão descritos os equipamentos disponíveis, os procedimentos adotados, os resultados obtidos e análise dos modelos gerados recorrendo a metodologias de captura da realidade. Desta forma os modelos retratam o objeto viaduto como está executado, com base na informação visual levantada e não na informação do projeto de execução, como era o caso do modelo do capítulo anterior.

7.1 EQUIPAMENTO

Para execução de um modelo baseado em *Reality Capture* é necessário hardware específico, quer seja em termos de aquisição de dados quer seja para processamento de dados. O software utilizado foi anteriormente descrito no Capítulo 3, pelo que agora apresentam-se os equipamentos utilizados. Foram utilizados em campo dois drones (Figura 7.1, Figura 7.3 e Figura 7.4), um mais ligeiro com menor resolução de imagem e devido ao seu menor peso, menor estabilidade face ao vento, e outro mais pesado, estável e com melhor qualidade nos dados recolhidos. Em termos de autonomia ambos se igualam embora o fato do maior (DJI Mavic 2 EA) ter várias baterias e assim permitir uma maior autonomia global. A esta particularidade foi adicionada outra, um gerador capaz de carregar até duas baterias simultaneamente além de fornecer carga ao iPad necessário para gerir a informação e comandar o laser scan. O drone maior apresenta também uma câmara térmica, conseguindo desta forma além da imagem RGB uma imagem térmica. A Tabela 4 apresenta características mais detalhadas dos dois drones. Em relação ao Laser Scanner, foi utilizado um equipamento criado pela Leica intitulado de BLK360. Trata-se dum laser scanner fixo de varredura em 360°, capaz de ler 360000 pontos por leitura. A Tabela 5 apresenta as principais características do Leica BLK360.

Para processamento e manuseamento da informação levantada foi necessário um computador com grande capacidade de processamento, bastante memória RAM e uma placa gráfica potente para minimizar o tempo de cálculo. A Bentley aconselha as configurações apresentadas na Figura 7.2.



a) DJI Mini



b) DJI Mavic 2 EA

Figura 7.1: Drones utilizados no levantamento

CONTEXTCAPTURE
Minimum Hardware

At least 8 GB of RAM and NVIDIA or AMD graphics card, or Intel integrated graphics processor compatible with OpenGL 3.2 with at least 1 GB of dedicated memory.

Recommended Hardware

Microsoft Windows 7/8/10
Professional 64-bit running on a PC with at least 64 GB of RAM, an Intel I9, 4+ Cores, 4.0+GHz CPU. Hyper-threading should be enabled. Nvidia GeForce RTX2080/2080Ti GPU. Data should preferably be stored on fast storage.

Figura 7.2: Configurações de Hardware para o Context Capture (Bentley)

Tabela 4: Características dos drones utilizados

	DJI Mini SE	DJI Mavic 2 Enterprise Advanced
Drone		
peso de arranque	< 249g	1100 g
dimensões	245x289x56 mm (LxWxH)	322x242x125mm (LxWxH)
autonomia	30 minutes	between 24 and 31 minutes
GNSS	GPS + GLONASS	GPS + GLONASS
Estabilizador		
estabilização	3-axis (tilt, roll, pan)	3-axis (tilt, roll, pan)
faixa de utilização	Tilt: -110° to 35° Pan: -20° to 20° Roll: -35° to 35°	Tilt: -135° to 45° Pan: -100° to 100°
Camera Visual		
sensor	1/2.3" CMOS, Effective Pixel: 12 MP FOV: 83°	1/2" CMOS, Effective Pixels: 48 M FOV: 84°
lentes	35 mm Format Equivalent: 24 mm Aperture: f/2.8 Shooting Range: 1 m to ∞	35 mm format equivalent: 24 mm Aperture: f/2.8 Focus: 1 m to ∞
resolução imagem	4:3: 4000x3000 16:9: 4000x2250	4:3 : 8000x6000
resolução video	2.7K : 2720x1530@30fps FHD : 1920x1080@60 fps	4k : 3840x2160@30fps FHD : 1920x1080@30fps
formato imagem	JPEG	JPEG
formato video	MP4 (H.264/MPEG-4 AVC)	MP4 (H.264/MPEG-4 AVC)
Camera Térmica		
sensor	-	Uncooled VOx Microbolometer
distância focal	-	Approx. 9mm 35 mm format equivalent: Approx. 38mm
resolução sensor	-	640x512 @30Hz
resolução video	-	4k : 3840x2160@30fps FHD : 1920x1080@30fps
precisão da temperatura	-	Measurement: ±2°C or ±2%, whichever is greater
limite de utilização	-	-40 °C to 150 °C (High Gain) -40 °C to 550 °C (Low Gain)
Controle remoto e transmissão de vídeo		
controle remoto	DJI Fly App for iOS or Android	Remote Controller
transmissão de vídeo	Enhanced Wi-Fi	-
qualidade da live view	720p@30fps	720p@30fps / 1080p@30fps
bateria	-	Built-in Battery Approx. 2.5 hr
peso	-	Approx. 630 g
Bateria		
capacidade	2250 mAh	3850 mAh
tipo de bateria	LiPo 2S	LiPo
peso da bateria	82.5 g	297 g
Modulo RTK		
dimensões	-	69 mm x 69 mm x 59mm
conectividade	-	Micro USB Port
precisão	-	In RTK FIX 1cm+1ppm (Horizontal) 1.5cm+1 ppm (Vertical)



Figura 7.3: Drone DJI Mini SE



Figura 7.4: Drone DJI Mavic 2 Enterprise Advanced

Tabela 5: Características do laser scanner

LEICA BLK360	
Geral	
scanner	3D scanner with integrated spherical imaging system and thermography panorama sensor system
dimensões	Height: 165 mm / Diameter: 100 mm
peso	1kg
mecanismo de montagem	Button-press quick release
Bateria	
tipo	Internal, rechargeable Li-Ion battery (Leica GEB212)
capacidade	Typically >40 setups
Scanner	
classe do laser	1 (in accordance with IEC 60825-1:2014)
comprimento de onda	830 nm
campo de visão	360° (horizontal) / 300° (vertical)
alcance	min. 0.6 - up to 60 m
taxa de medição de pontos	up to 360'000 pts / sec
precisão de alcance	4mm @ 10m / 7mm @ 20m
Imagem	
camara visual	15 Mpixel 3-camera system, 150Mpx full dome capture, HDR, LED flash Calibrated spherical image, 360° x 300°
camara termica	FLIR technology based longwave infrared camera Thermal panoramic image, 360° x 70°



Figura 7.5: Laser scanner Leica BLK360

Para controlo do laser scanner (Figura 7.5) é necessário um equipamento com conectividade sem fios, com grande capacidade de armazenamento e algum processamento, assim foi utilizado um iPad Pro com as características assinaladas na Tabela 6.

Tabela 6: Características do iPad Pro

iPad Pro	
capacidade	128 GB
dimensões	247.6x178.5x5.9mm
ecrã	Liquid Retina display 11-inch (diagonal) LED backlit Multi-Touch display with IPS technology 2388-by-1668-pixel resolution at 264 pixels per inch (ppi)
processador	Apple M1 chip 8-core CPU with 4 performance cores and 4 efficiency cores 8-core GPU, 16-core Neural Engine, 8GB RAM
camera	Pro camera system: Wide and Ultra Wide cameras Wide: 12MP, f/1.8 aperture Ultra Wide: 10MP, f/2.4 aperture, and 125° field of view 2x optical zoom out, Digital zoom up to 5x Five-element lens (Wide and Ultra Wide)
localização	Built-in GNSS
sensores	Face ID, LiDAR Scanner, Three-axis gyro Accelerometer, Barometer, Ambient light sensor
bateria	Built-in 28.65-watt-hour rechargeable lithium-polymer

Para processamento dos dados foram utilizados dois computadores, um porque tinha o software necessário para edição e verificação das nuvens de pontos obtidas pelo laser scanner (PC1) e outro para o cálculo das superfícies (PC2). O PC1 possui um bom processador e bastante memória RAM, componentes essenciais para manusear o grande tamanho dos ficheiros relativos às nuvens de pontos, aprox. 62Gb de informação foram criados pelas 113 leituras. O PC2 possui além de um bom processador uma das mais potentes unidades gráficas, essencial para o processamento realizado pelo software ContextCapture. Na Tabela 7 estão assinaladas as principais características de ambos os computadores.

Tabela 7: Características dos computadores

	PC1	PC2
processador	Intel Core i9 101920X (12-core)	Intel Core i7 11700 (8-core)
memória	64 GB	32 GB
placa gráfica	NVIDIA Geforce GTX1660S 6GB	NVIDIA GeForce RTX 3090 24GB

7.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados foi realizada em 30-04-2022 (Visita 1), tendo sido realizados voos de drones para obtenção de imagens para a fotogrametria, levantamentos de laser scan e um levantamento topográfico a clássico de pontos assinalados na estrutura e pontos relevantes. Anteriormente, em 08-04-2022 (Visita preparatória), foi realizada uma visita ao local e onde se utilizou o drone mais ligeiro (DJI Mini) para fazer

um reconhecimento da área envolvente e averiguar se existiriam condicionantes, tais como vento ou objetos que pudessem de alguma forma impedir o voo ou aquisição de fotos.

Após de algumas experiências e produção de modelos, verificou-se que seriam necessárias mais imagens para uma melhor qualidade no modelo e decidiu-se fazer um levantamento fotográfico complementar no dia 30-05-2022 (Visita 2).

7.2.1 Levantamento topográfico

Para se obterem modelos escalados e corretamente posicionados geograficamente, foi realizado um levantamento topográfico clássico (Figura 7.6) onde foram levantadas as coordenadas de 190 pontos no sistema de referência geodésica recomendado pela EUREF (*European Reference Frame*) PT-TM06/ETRS89. Desses 190 pontos foram identificados e marcados a tinta 44 pontos entre pilares, faces laterais e superior do tabuleiro e encontro de forma a determinar a escala e localização dos modelos de laser scanner e de fotogrametria.



a) Estação total para levantamento



b) Ponto pintado na estrutura

Figura 7.6: Levantamento topográfico

7.2.2 Laser Scan

Os trabalhos realizados com o laser scanner (Figura 7.7 e Figura 7.8) iniciaram-se na visita do dia 08-04-2022 onde levantou-se o primeiro vão, com o intuito de verificar toda a funcionalidade quer do equipamento quer do software. Como tudo correu dentro do esperado, estas leituras foram utilizadas para o trabalho evitando a sua repetição no dia 30-04-2022.



a) Pormenor do laser scanner



b) Laser scanner a realizar a leitura

Figura 7.7: Laser scanner Leica BLK 360

No total dos dois dias foram realizados 113 scanners ou levantamentos. Estes foram preposicionados em campo com recurso ao software Leica Cyclone FIELD 360, uma aplicação instalada no Ipad Pro que permite controlar o laser scanner assim como relacionar aproximadamente os lasers entre si e assim adiantar trabalho que de outra forma seria realizado em gabinete.



Figura 7.8: Levantamento com laser scanner

7.2.3 Fotogrametria

O levantamento de informação mais moroso e complicado foi o das imagens com recurso aos drones. Na visita preparatória, apenas voou o drone mais ligeiro, e como a qualidade das imagens e a qualidade da localização fornecida pelo GNSS do DJI Mini (Figura 7.9) não eram as melhores estes dados não foram utilizados nos modelos calculados. Na Visita 1 o drone utilizado foi o DJI Mavic 2 EA (Figura 7.10) com o auxílio do RTK, que juntamente como o GNSS deu uma precisão muito maior as localizações das imagens e desta forma permitiu um cálculo mais eficiente da superfície.



Figura 7.9: Pormenor do drone



Figura 7.10: Drone a realizar o levantamento

Mais à frente será explicada a razão pela qual se realizou um segundo levantamento com drone. Esta segunda visita ao campo foi, contudo mais rápida do que a inicial e apenas serviu para tirar algumas fotos de diferentes posições das inicialmente adquiridas.

O voo e a aquisição das fotos foram realizados por elementos detentores de licença de voo de drones. Mesmo com boas condições meteorológicas em ambos os dias constatou-se que não é muito fácil controlar o drone ao mesmo tempo que se regista as fotos. Seria mais cómodo e eficaz planejar o voo num software de planeamento e aquisição para drones, mas ao fim de algumas tentativas e contatos com fornecedores deste tipo de software, entre os quais a *Drone Harmony*, mas não foi possível utilizar essa metodologia. Para trabalhos futuros seria uma mais valia antes de arrancar com o levantamento com recurso a drones, averiguar por softwares de planeamento que fossem compatíveis com o drone DJI Mavic 2 EA.

7.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados foi realizado em gabinete com o recurso do PC1 para a edição de localização das nuvens de pontos, e com recurso ao PC2 para criação das superfícies tendo como base as nuvens de pontos e as fotografias tiradas pelo drone. Foram criados vários modelos (Figura 7.11) em que inicialmente apenas se calculou pequenas zonas para amostra, com *inputs* e *settings* diferentes.

Seguidamente criaram-se modelos gerais e completos tendo como dados de entrada o laser scan e a fotogrametria separadamente. Um modelo com ambos inputs foi também tentado, mas devido a um erro de georreferenciação os dados não coincidiram originando assim a pequenos erros e pontuais nas superfícies. Mesmo assim foi realizado um modelo com ambos os dados, mas apenas numa zona da obra, que será descrito mais à frente.

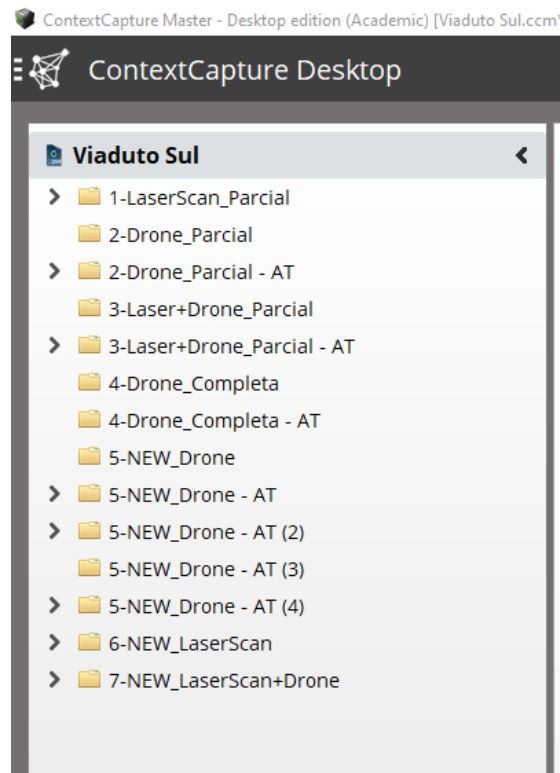


Figura 7.11: Modelos criados no ContextCapture

7.3.1 Laser Scan

Relativamente aos dados adquiridos pelo laser scanner, e visto algum do trabalho ter sido realizado em campo, foram apenas verificadas as ligações entre varreduras e editado quando necessário as ligações. Na Figura 7.12 é possível verificar as ligações estabelecidas entre as varreduras e a sua qualidade, mas no Anexo III encontra-se um relatório mais detalhado.

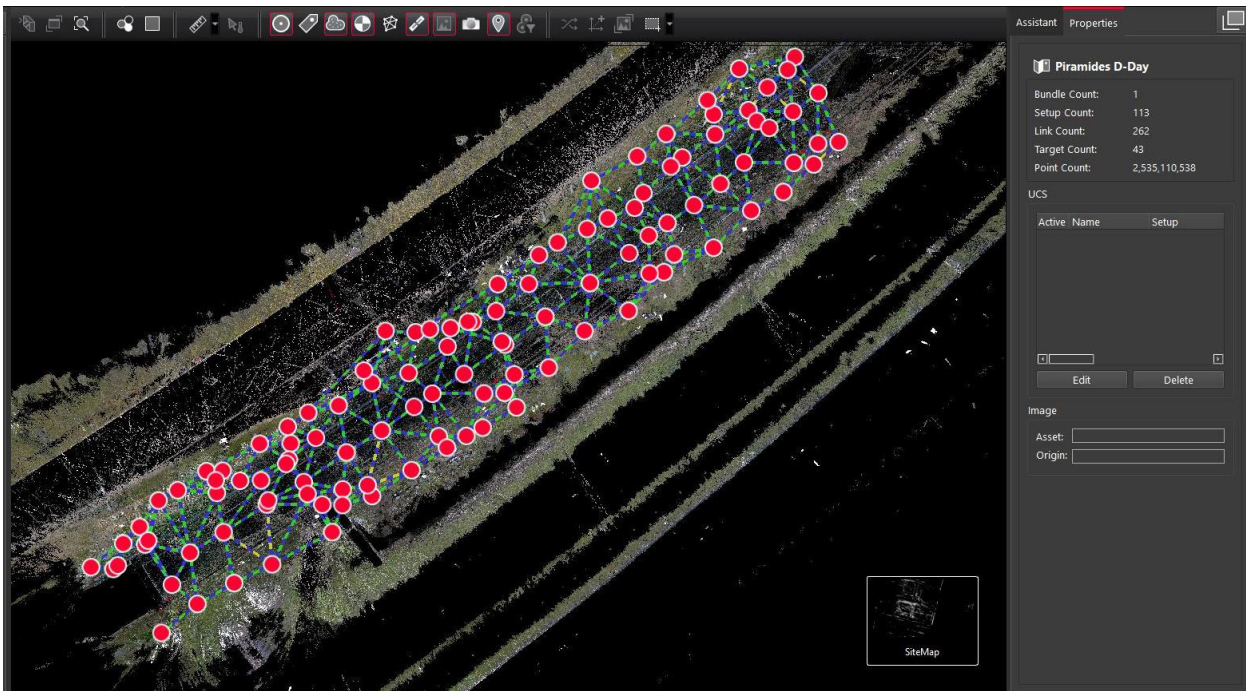
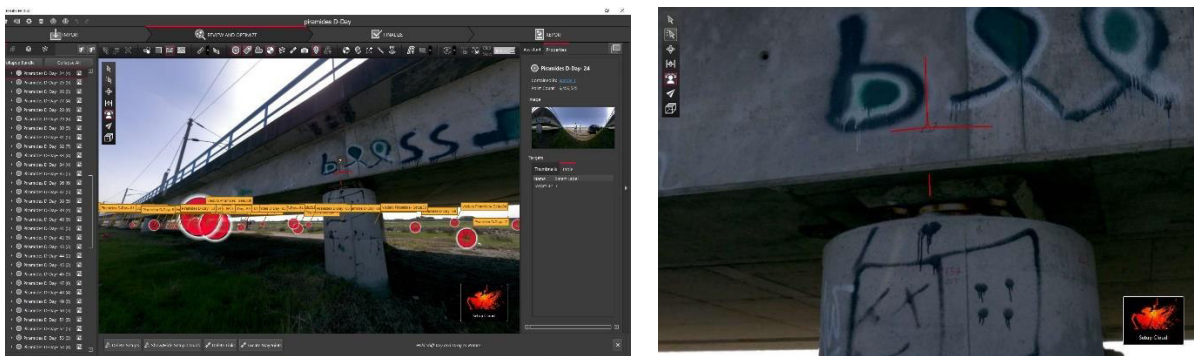


Figura 7.12: Ligações entre levantamentos do laser scanner

Isto permite exportar e ter apenas uma nuvem de pontos, em que esta união representa a soma das diferentes varreduras, ou seja, nenhuma informação se perde. Isto é útil apenas porque permite trabalhar o levantamento como um elemento em vez de trabalhar cada varredura com um elemento individual e assim ter 113 levantamentos. Tendo uma só nuvem com os distintos scans relacionados, falta uma georreferenciação da nuvem total. O Leica Cyclone REGISTER 360 permite através de imagens obtidas pelo laser scanner, dar as coordenadas de pontos conhecidos, como foi realizado o levantamento topográfico e assinalados pontos na estrutura antes da realização das varreduras, é possível referenciar esses pontos nas imagens e desta forma o software rodar e transladar a nuvem para a posição geográfica correta. Na Figura 7.13 podemos verificar um ponto (ponto 7) correspondido entre a fotografia e o levantado topograficamente.



a) Vista geral

b) Ponto 7 localizado

Figura 7.13: Referenciação dos pontos levantados no Cyclone REGISTER 360

Para utilização dos dados da nuvem de pontos na criação da superfície exportou-se dois ficheiros únicos nas extensões LAS e E57. Ambas as opções não foram importadas pelo ContextCapture, talvez derivado ao tamanho dos ficheiros, pois ocupavam 62GB. Foram então exportadas as nuvens de pontos separadamente em formato E57. Como já se encontravam georreferenciadas foram facilmente importadas para a posição correta, e embora o tamanho fosse o mesmo (62GB, somando todas as 113 nuvens) o software conseguiu importar todas as nuvens de forma rápida e eficiente.

7.3.2 Fotogrametria

Utilizando as fotografias e os seus metadados o processamento das imagens iniciou-se importando as 2135 fotos da Visita 1, para o ContextCapture. Seguidamente procedeu-se à triangulação para obtenção das posições das fotos e pontos em comuns entre as diferentes imagens, este processo é chamado de aerotriangulação pelo software e pode ser verificado na Figura 7.14.

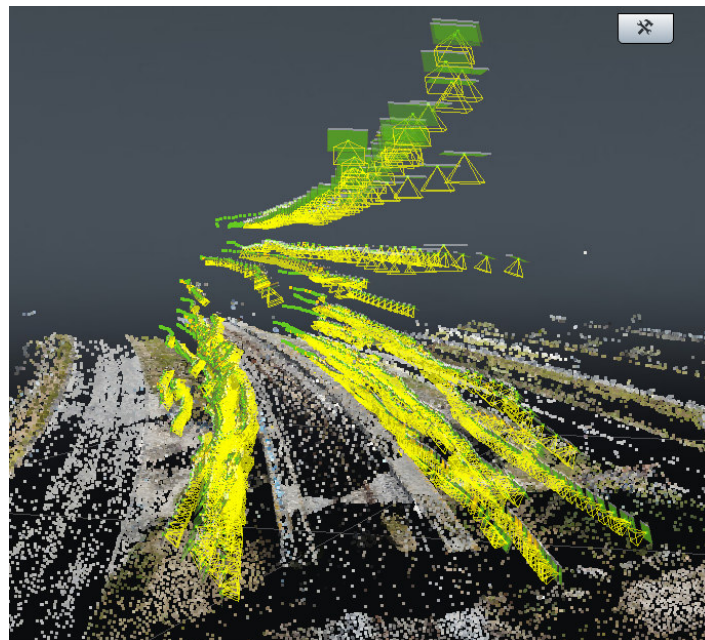
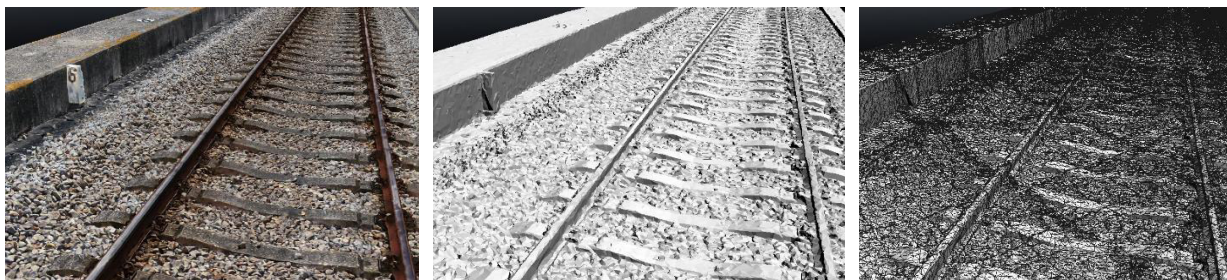


Figura 7.14: Posição obtida para cada fotografia

O passo seguinte foi criar a superfície, com base nas posições dos pontos em comum entre as diferentes fotos, exportando a superfície para um formato 3MX ou 3SM (*3D multiresolution Mesh eXchange* e *Bentley Scalable Mesh* respetivamente). O resultado pretendido era uma superfície, mas o software permite obter também uma ortofoto ou uma nuvem de pontos. O resultado final de uma superfície calculada pelo ContextCapture pode ser observado na Figura 7.15.



a) Mesh texturada

b) Mesh sem textura

c) Mesh com triângulos

Figura 7.15: Superfície calculada com diferentes apresentações

7.4 RESULTADOS

7.4.1 Laser Scan

O modelo criado no ContextCapture com os dados do laser scanner (Figura 7.16 e Figura 7.17), apresenta grande definição nas superfícies, embora a sua textura não seja tão apelativa como a criada com a fotogrametria. Verificou-se também que em algumas zonas a geometria não coincide com o que era espectável, pelo que se atribui este aspeto ao processo de sobreposição das varreduras ser manual e visual. Poderá existir processos mais automatizados e mais eficientes para a georreferenciação dos scans, mas à altura foi o processo possível. Apesar disso o resultado obtido demonstra muitas potencialidades no uso da metodologia.



Figura 7.16: Modelo completo do tramo 9 – Laser Scan



Figura 7.17: Pormenor de um vão – Laser Scan

Outro processo para execução da superfície foi abordado. Importou-se as nuvens de pontos para o Microstation, que possui ferramentas para modelar superfícies e sólidos a partir de nuvens de pontos. Assim com base na nuvem de pontos foi criado um sólido (cilindro) que representa um pilar da obra estudada (Figura 7.18). O mesmo poderia ser feito ao nível do tabuleiro caso a nuvem de pontos fosse também levantada na face superior do tabuleiro e dessa forma obtida a geometria global do tabuleiro. Este método é bastante demoroso e menos exato do que o obtido com o ContextCapture mas permite um maior controle no que se pretende modelar, pois o trabalho é manual. Consiste em criar cortes de zonas tipo da geometria e extrudir o corte ao longo do seu eixo normal.

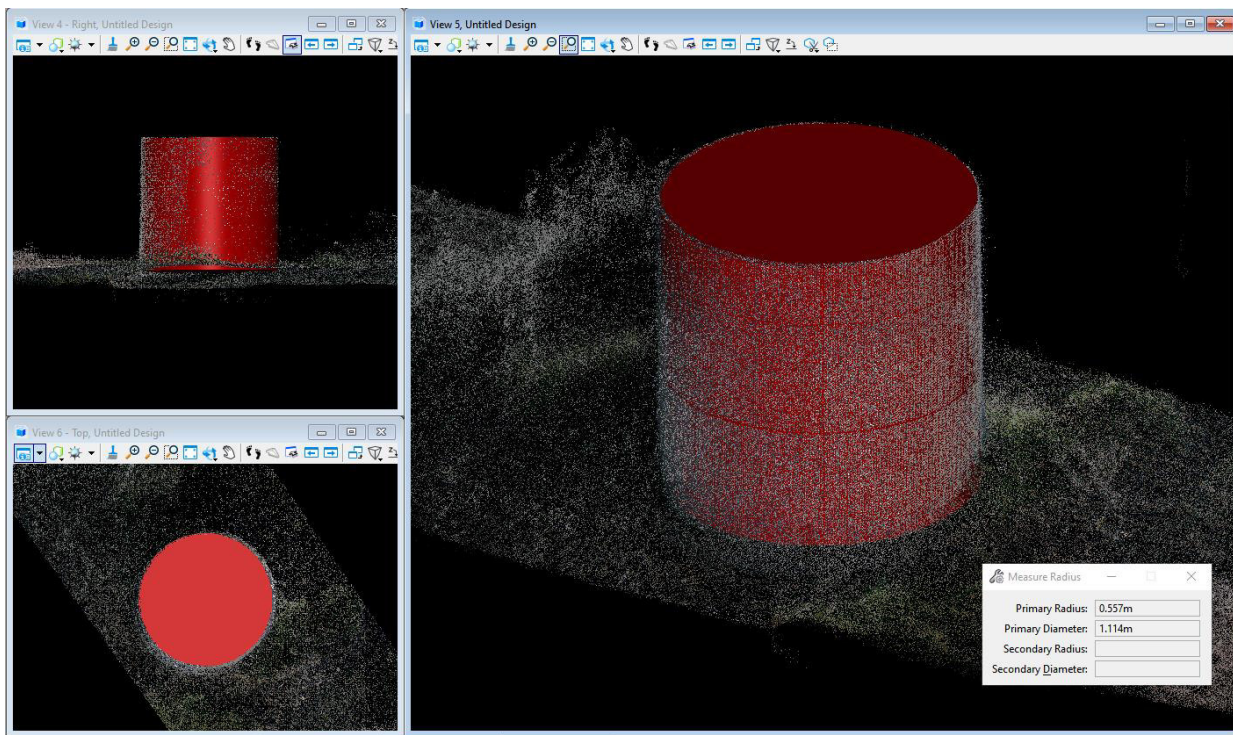


Figura 7.18: Extrato da modelação do arranque dum pilar

7.4.2 Fotogrametria

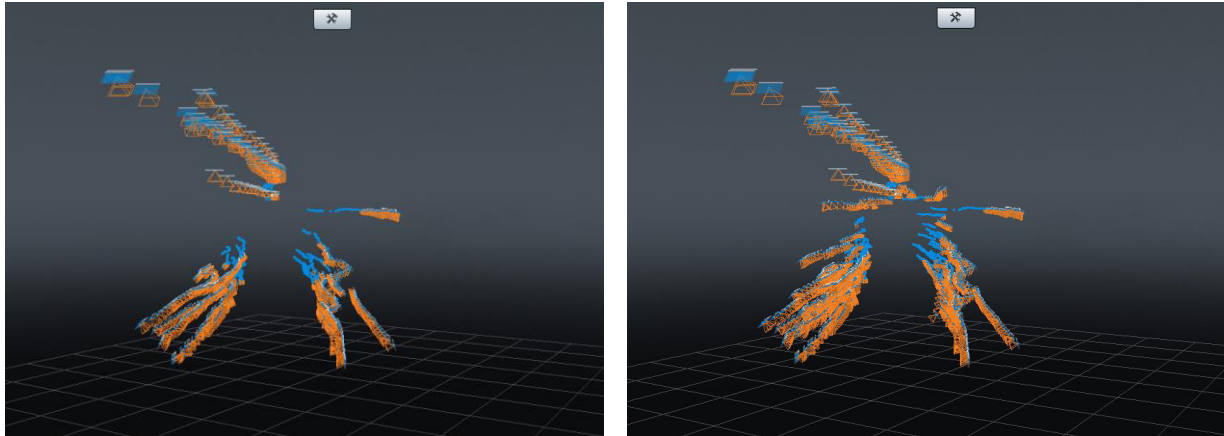
Como já foi referido foram criados inicialmente modelos parciais com o intuito de verificar definições e avaliar os resultados preliminarmente sem ter de aguardar o cálculo demoroso duma solução total. Na Tabela 8 estão presentes alguns tempos que demoraram os modelos a ser criados. Estas durações reportam o uso do computador PC2.

Tabela 8: Duração das produções

Duração do calculo das produções		
Tipo	Parcial	Completa
Laser	1d 02h 45m	12d 01h 23 m
Fotos	14h 4m	7d 13h 5m
Laser+Fotos	1d 17h 51m	-
Insights	-	1h 5m
OrtoFoto	-	32m 13s

O primeiro modelo experimental de fotogrametria teve como dados as imagens adquiridas na Visita 1, e mostrou-se deficiente em termos de obtenção de resultados, pois o programa não tinha a informação necessária para convergir numa malha calculada e representativa da superfície, inclusive havia zonas em que não conseguindo detetar pontos em comum, nem utilizava alguns conjuntos de fotos para calcular. Decidiu-se então complementar o primeiro levantamento com mais uma recolha de fotos (1398 fotografias complementares), estrategicamente localizadas nas zonas em que o software apresentava

problemas. Na Figura 7.19 podemos comparar as posições das fotos do primeiro levantamento (Visita 1) e as posições da soma dos dois levantamentos (Visita 1 + Visita 2, 3533 fotos).



a) Visita 1 – 2135 fotos

b) Visita 1 e 2 – 3533 fotos

Figura 7.19: Posições das fotos

Para a georreferenciação destes modelos e visto que só a informação das fotos não é suficiente para calcular um modelo corretamente escalado e localizado, definiu-se *Ground Control Points* (GCP) e *Check Points* (CP) (Figura 7.20), de forma a obter um modelo georreferenciado com informação do levantamento topográfico. *Ground Control Points* ou pontos de controlo de solo são pontos levantados no terreno com coordenadas conhecidas para calcular com precisão a localização das fotografias do levantamento, os *Check Points* ou pontos de verificação são igualmente pontos levantados no terreno com coordenadas conhecidas, mas que apenas servem para avaliar e verificar a localização das fotos. No modelo obtido com toda a informação existia ainda assim algumas zonas com a presença de duplas faces e triângulos diferentes com texturas iguais. Após contato com o suporte da Bentley e por sugestão foram criados além dos já referidos GCP e CP, *Tie Points* (TP) e *Targets* (QR codes) afixados na estrutura (Figura 7.21). *Tie Points* ou pontos de ligação são correspondências manuais em distintas fotografias ao mesmo ponto físico com coordenadas desconhecidas. *Targets* são alvos impressos com base em códigos QR, *Chili tags* ou *April tags* que podem ser extraídos automaticamente das fotos pelo software, dispensando a localização manual dos mesmos. Estes pontos serviram para auxiliar em determinadas zonas (as que tinham problemas) o programa a encontrar pixéis iguais em imagens diferentes. Esta solução mostrou-se muito adequada produzindo assim um modelo bastante coerente e homogêneo (Figura 7.22 e Figura 7.23).

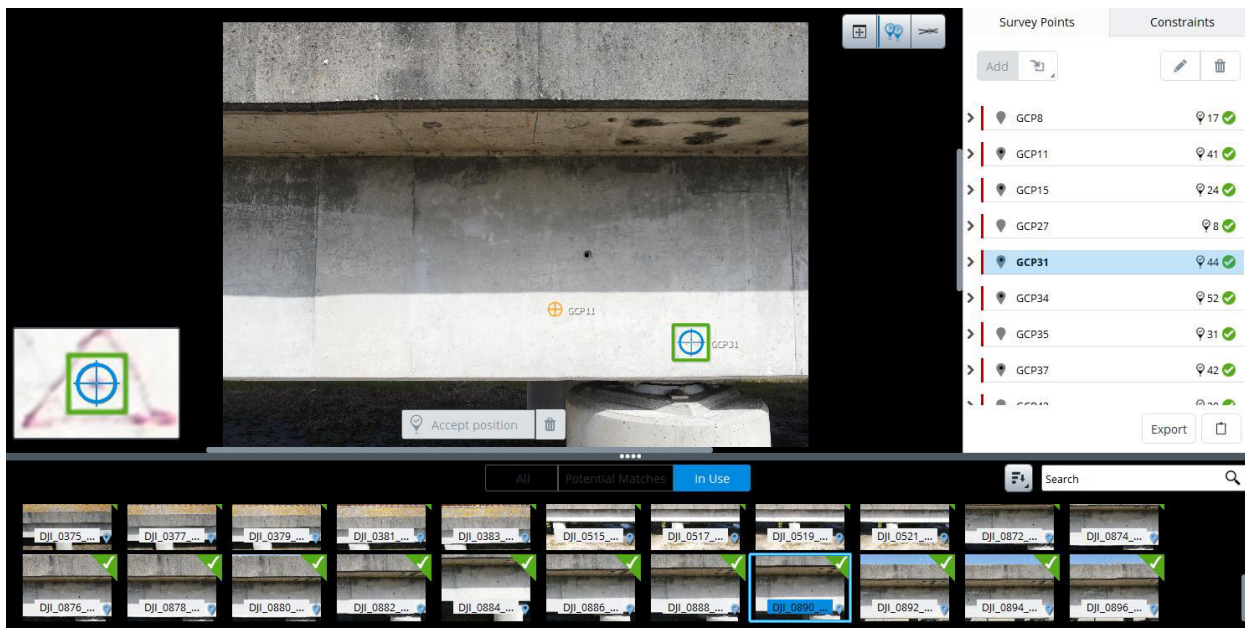


Figura 7.20: Marcação dos GCP e CP

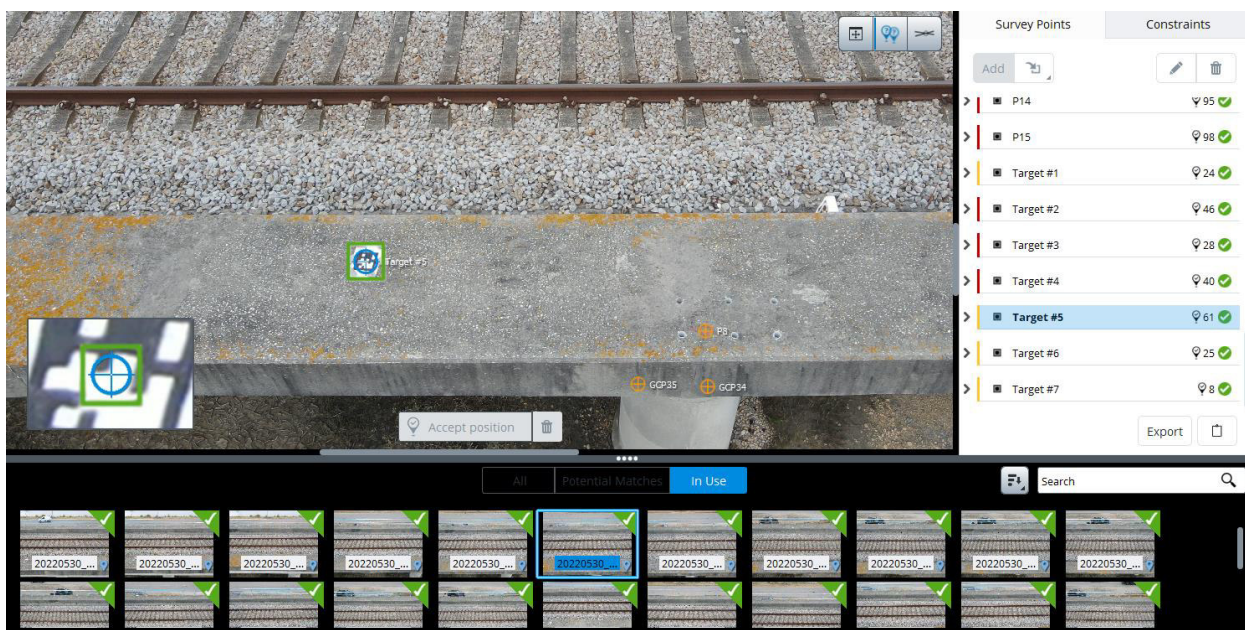


Figura 7.21: Identificação dos targets (QR Codes)



Figura 7.22: Modelo completo do tramo 9 – Fotogrametria



Figura 7.23: Pormenor de um vão – Fotogrametria

Nas opções de exportações é possível ainda produzir ortofotos, e correr um algoritmo de inteligência artificial para deteção de algumas características. A ortofoto ou ortomosaico (Figura 7.24) é uma fotografia aérea realizada à escala e sem distorções. Este tipo de fotografia possibilita medições de distâncias, com as posições geográficas e valores exatos.



a) Ortomosaico completo

b) Pormenor do ortomosaico

Figura 7.24: Ortomosaico

O ContextCapture Insights é uma solução de modelação de Reality Capture que deteta e localiza automaticamente objetos usando a metodologia de *machine learning* 3D. Com o ContextCapture Insights, o utilizador pode correr facilmente um detetor automático, existente ou criar o seu próprio usando os seus próprios dados de realidade. Neste trabalho foi aplicado um detetor de elementos de caminhos de ferro, mas sem sucesso (Figura 7.25). Encontra-se neste momento em treino um detetor para deteção de objetos ajustado ao nosso workset por parte da Bentley, mas sem conclusões em tempo útil.

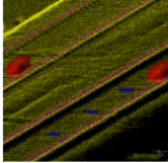
Name	Detector Type	Description	Illustration	Links
Rail	Pointcloud Segmentation	Detect 13 classes for usual rail assets: signals, sensors, rails, etc... Dataset used: RGB - Mobile mapping system Resolution: 3cm Geographic area: Western Europe		<ul style="list-style-type: none"> • ContextCapture Update 19 • ContextCapture Update 20 • Orbit 3DM FE Pro 22.07 • RDAS

Figura 7.25: Detetor automático de objetos da linha férrea

7.4.3 Laser Scan + Fotogrametria

Foi criado um modelo com ambas as aquisições para desta forma se obter um modelo com a informação das faces superior e inferior com bastante detalhe, visto que a metodologia de laser scan permitiu obter uma superfície detalhada da face inferior e laterais do tabuleiro, assim como do solo por debaixo do tabuleiro. Por sua vez, a metodologia de fotogrametria forneceu uma superfície da face superior e faces

laterais com bastante detalhe. A junção da informação proveniente de ambas tecnologias de aquisição não se mostrou totalmente eficaz, devido a alguns dos erros anteriormente referidos, não tendo sido possível obter um modelo totalmente coerente sobretudo visível na coincidência das faces laterais (Figura 7.26). Desta forma o estudo focou-se sobretudo na zona central do módulo T9 onde os erros foram menores.

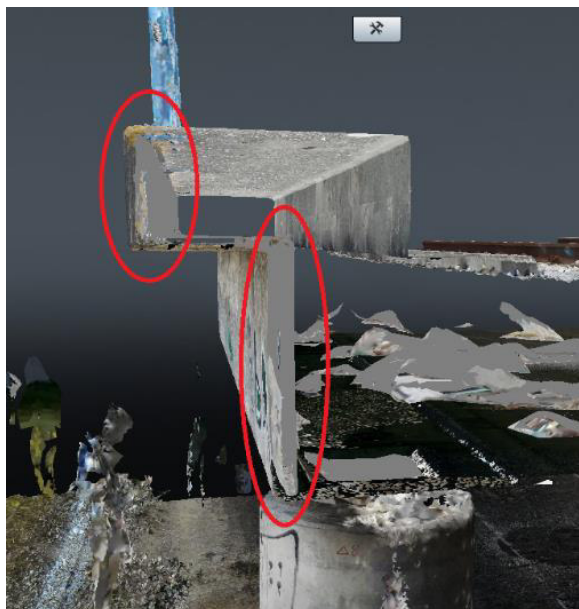


Figura 7.26: Faces duplas

Acréscimo que estas metodologias forneceram resultados muito promissores na verificação aproximada das dimensões da secção transversal do tabuleiro existente e a sua comparação com a solução projetada (Figura 7.27 e Figura 7.28).

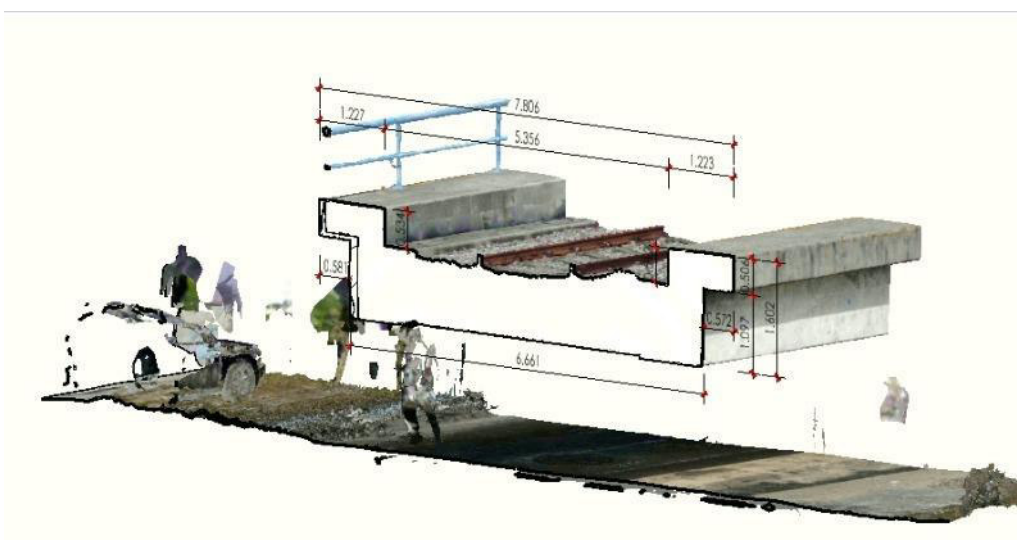
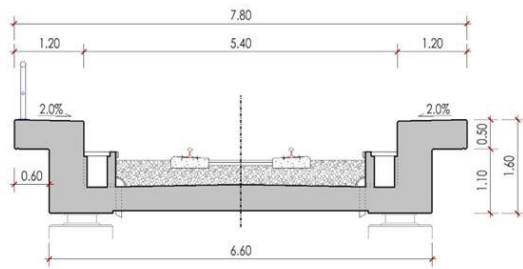
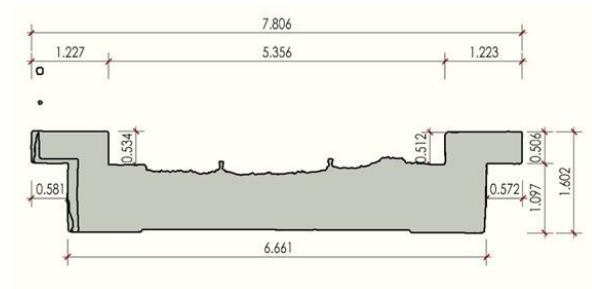


Figura 7.27: Dimensões do tabuleiro levantado



a) Seção projetada



b) Seção levantada

Figura 7.28: Comparação entre secções

Foi realizada ainda uma sobreposição entre os modelos geométricos do “*as-designed*” BIM e o modelo de Reality Capture “*as-built*”. Nas seguintes figuras observa-se então algumas comparações do projetado e do realizado em obra. Na Figura 7.29 apresenta-se uma vista geral do tramo 9 do viaduto com os modelos de BIM, modelados segundo o projeto de execução do viaduto e o modelo resultante da fotogrametria. Na Figura 7.30 verifica-se a ligação entre os dois modelos na extremidade do modelo de fotogrametria, enquanto que na Figura 7.31 mostra-se o localização do encontro em que se pode verificar o levantamento do existente com textura e a linhas o contorno do encontro, especialmente o maciço de encabeçamento das estacas e estacas.

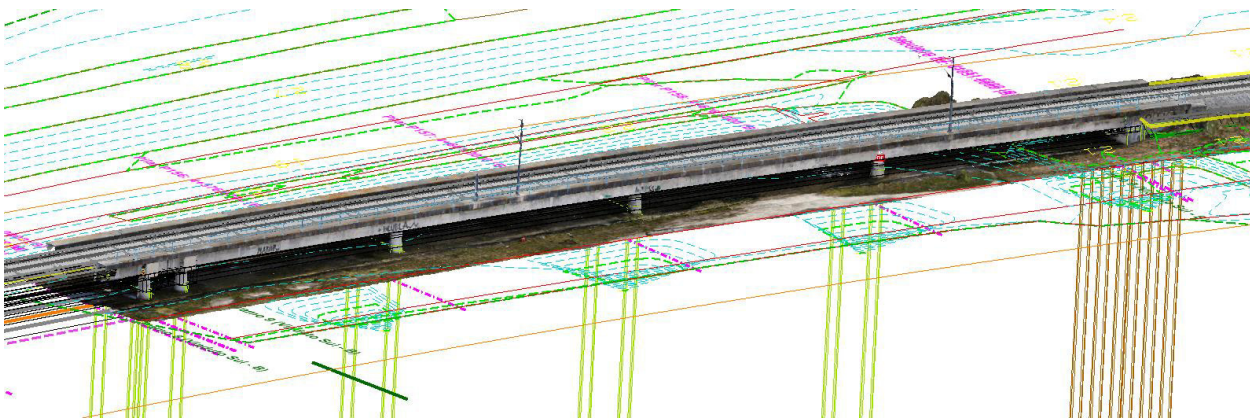


Figura 7.29: Vista geral do modelo BIM sobreposto com o modelo realizado com fotogrametria

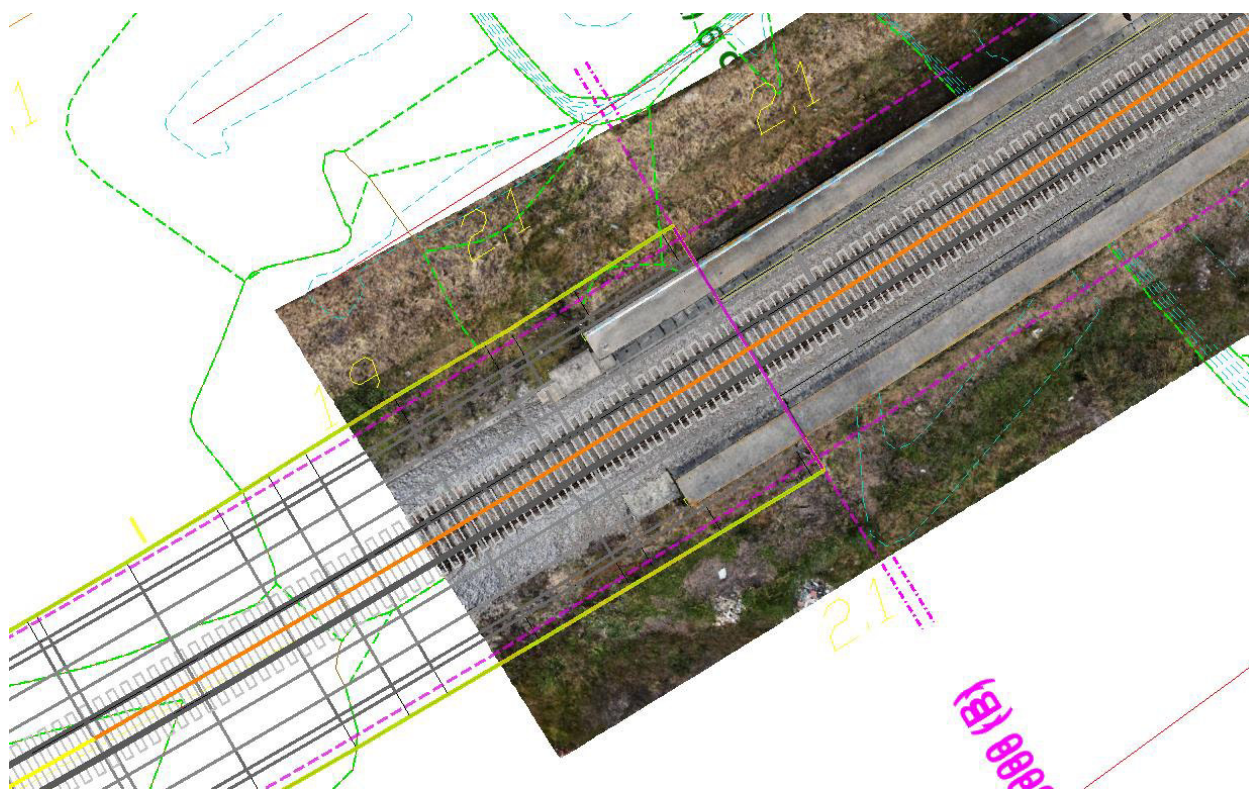


Figura 7.30: Pormenor em planta da ligação entre modelos

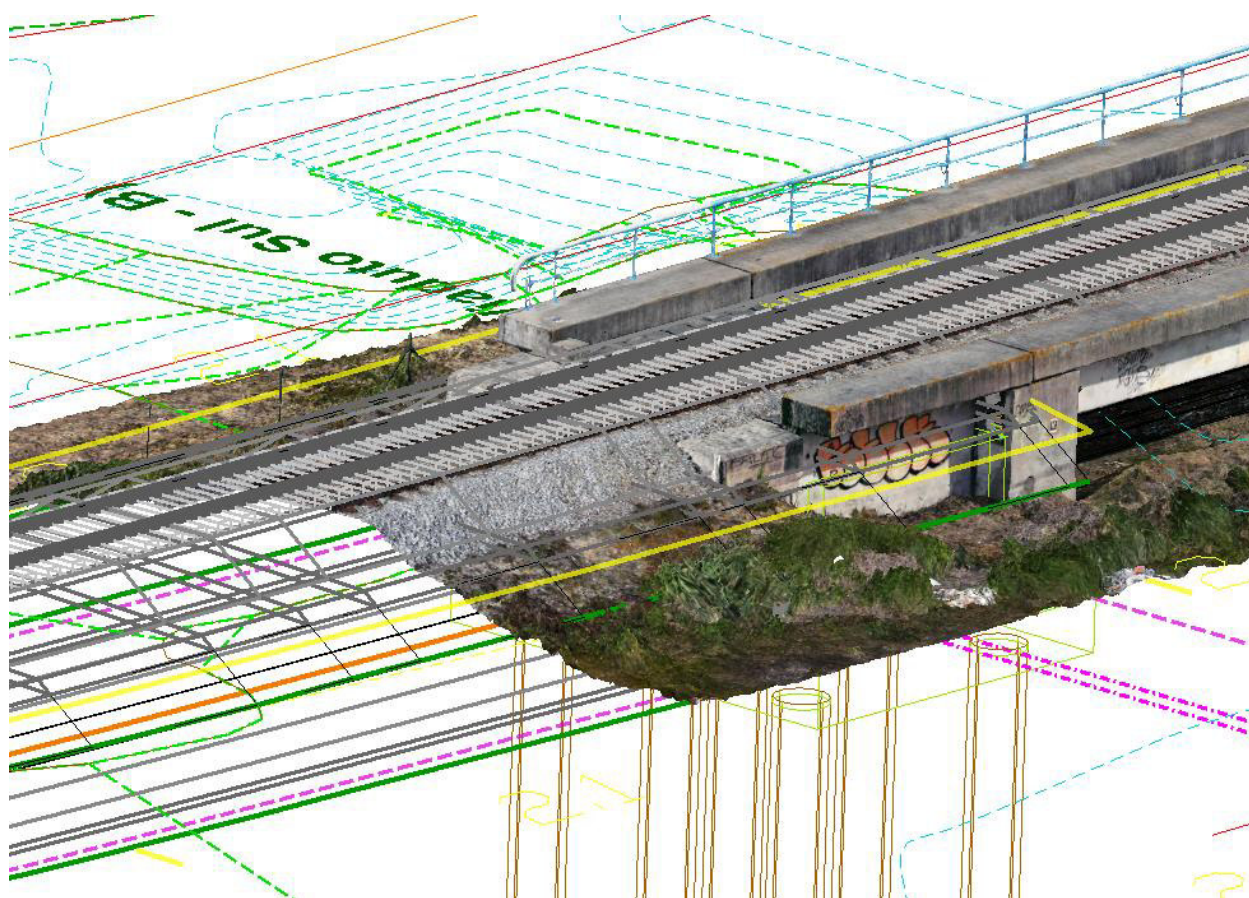


Figura 7.31: Pormenor da ligação do encontro nos modelos

CAPÍTULO 8

CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 CONCLUSÕES

Perante o contexto socioeconómico internacional atual e em particular perante o contexto na área da construção civil no nosso país, é necessário o emprego de novas metodologias e tecnologias em todas as fases da vida útil das construções. Desta forma os métodos aqui apresentados visam promover essa inovação na construção, num período onde a aposta forte na ferrovia está iminente sendo importante adaptar, dominar e implementar estes conceitos na nossa área.

Os modelos criados mostram-se bastante uteis para avaliações de geometria e troca dessa informação. Ainda não dispõem de maturidade suficiente para servirem para outros fins tais como troca de informação semântica, embora sejam bastante eficientes se usados dentro da família de *software* da Bentley, que fornece ferramentas tanto de projeto como de gestão para vários tipos de estruturas e ramos. A publicação de um formato ifc para este tipo de obras, como já existe para a parte de edifícios, será um grande avanço e parece lícito prever que as empresas de *software* iriam adotar e explorar esse formato rapidamente com bastantes benefícios em geral para a construção de infraestruturas de transporte.

A aplicação das metodologias estudadas foi conseguida produzindo modelos aceitáveis, mas com margem para progressão e desenvolvimento, mesmo no contexto atual de evolução.

A construção do modelo BIM, mostrou-se bastante moroso e complexa se se pretender obter modelos ricos em informação. Embora a informação semântica não seja extensa existe em quantidade necessária e poderia ser complementada utilizando os “*item types*” criados para os requisitos necessários. Algumas operações mostraram-se complexas, mas foram ultrapassadas com a ajuda disponibilizada pela Bentley.

A aquisição de informação para a realização dos modelos de *Reality Capture* foi o passo mais moroso e que originou mais erros e dificuldades. Atribui-se esse facto à falta de experiência na utilização da metodologia, mas o seu desenvolvimento permitiu uma maior aprendizagem destes métodos e tecnologias. Pensa-se que os modelos apresentados cumprem com o propósito, tendo em consideração o longo tempo de cálculo e o *hardware* necessário para efetuar o completar.

A metodologia apresentada neste relatório serve o seu objetivo, mas necessita de ser desenvolvida e os processos amadurecidos e alguns até aprofundados.

Para finalizar, a nível pessoal, o trabalho proporcionou um cumprimento dos objetivos inicialmente propostos, bem como um preenchimento das expectativas de aprendizagem, uma vez que possibilitou fomentar conhecimentos técnicos aplicados à digitalização da construção civil. Abriu também a necessidade de continuar o trabalho nesta área, acompanhando o trabalho efetuado internacionalmente.

8.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Ao longo do trabalho efetuado surgiram sempre hipóteses de melhoramento nos processos e que seriam numa próxima fase redefinidos. Exemplo disso é a aquisição de informação com o laser scan, em que será possível automatizar o processo de georreferenciação e dessa maneira reduzir a incerteza da qualidade e precisão desse levantamento. Outra melhoria futura seria o uso de *software* para a automatização do voo e aquisição de imagens com recurso a drones, controlando desta forma alguns aspetos fundamentais para uma boa obtenção de modelos. No campo da deteção automática de objetos e suas características existe muito ainda a fazer e seria muito interessante desenvolver soluções nesta área.

Relativamente à modelação BIM os melhoramentos estão dependentes dos avanços fornecidos pelo *software* embora existam ainda campos que podem ser melhor explorados e obtendo-se desta forma modelos mais exatos, de que são exemplos a modelação dos aparelhos de apoio, juntas de dilatação e outros equipamentos presentes na linha férrea.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, Rajat; SRIDHAR, Shankar Chandrasekaran Mukund - Imagining construction's digital future. **McKinsey & Company**. 2016).

ARASTOUNIA, Mostafa; OUDE ELBERINK, Sander - Application of template matching for improving classification of urban railroad point clouds. **Sensors (Switzerland)**. . ISSN 14248220. 16:12 (2016). doi: 10.3390/s16122112.

BARAZZETTI, Luigi; PREVITALI, Mattia; SCAIONI, Marco - Roads Detection and Parametrization in Integrated BIM-GIS Using LiDAR. **Infrastructures**. . ISSN 24123811. 5:7 (2020). doi: 10.3390/infrastructures5070055.

BARTHOLOMEW, Michael; BLASEN, Benjamin; KOC, Ali - Bridge Information Modeling (BrIM) Using Open Parametric Objects. **Us Department of Transportation**. 1:2015) 296.

BECKER, R. E.; GALAYDA, L. J.; MACLAUGHLIN, M. M. - Digital photogrammetry software comparison for rock mass characterization. **52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium**. 2018).

BENTLEY - Reality Modeling Drone Capture Guide. 2018) 1–10.

BENTLEY - **Digital Twins** [Em linha], atual. 2022. Disponível em WWW:<URL:https://www.bentley.com/pt/products/product-line/digital-twins>.

BENTLEY SYSTEMS - Context Capture: Acquisition best practices. 2019).

BLANCO, Fernando G. Bañuelos; CHEN, Haibo - The Implementation of Building Information Modelling in the United Kingdom by the Transport Industry. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. . ISSN 18770428. 138:0 (2014) 510–520. doi: 10.1016/j.sbspro.2014.07.232.

BRILAKIS, Ioannis *et al.* - Toward automated generation of parametric BIMs based on hybrid video and laser scanning data. **Advanced Engineering Informatics**. . ISSN 14740346. 24:4 (2010) 456–465. doi: 10.1016/j.aei.2010.06.006.

BUILDINGSMART INTERNATIONAL - IFC-Bridge Fast Track Project. 2018) 1–72.

BUILDINGSMART INTERNATIONAL - IFC - Bridge Report WP2: Conceptual Model. 2018) 1–77.

CHEN, Ke *et al.* - Bridging BIM and building: From a literature review to an integrated conceptual

framework. **International Journal of Project Management**. . ISSN 02637863. 33:6 (2015) 1405–1416. doi: 10.1016/j.ijproman.2015.03.006.

CHEN, Siyuan *et al.* - Automated Bridge Deck Evaluation through UAV Derived Point Cloud. **2018 Civil Engineering Research in Ireland conference**. August (2018) 735–740.

CHUMAK, Olga; GORKOVCHUK, Julia; GORKOVCHUK, Denys - Research of algorithms for generating point clouds with various software tools on the example of the monument to Bohdan Khmelnytsky Research of Algorithms for Generating Point Clouds with Various Software Tools on the Example of the Monument to Bohdan Khm. September (2022) 11–15.

COSTIN, Aaron *et al.* - Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. **Automation in Construction**. . ISSN 09265805. 94:October 2017 (2018) 257–281. doi: 10.1016/j.autcon.2018.07.001.

DANG, N. S.; SHIM, C. S. - BIM authoring for an image-based bridge maintenance system of existing cable-supported bridges. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. . ISSN 17551315. 143:1 (2018). doi: 10.1088/1755-1315/143/1/012032.

DANG, Ngoc Son; RHO, Gi Tae; SHIM, Chang Su - A master digital model for suspension bridges. **Applied Sciences (Switzerland)**. . ISSN 20763417. 10:21 (2020) 1–22. doi: 10.3390/app10217666.

DELGADO, Joana - *Interação Via-Ponte em Linhas Ferroviárias*. 2013).

EASTMAN, Chuck *et al.* - **BIM Handbook, a Guide to Building Information Modelling 2nd ed.** ISBN 9780470541371.

EL-OMARI, Samir; MOSELHI, Osama - Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work. **Automation in Construction**. . ISSN 09265805. 18:1 (2008) 1–9. doi: 10.1016/j.autcon.2008.05.006.

FONTANA, Raffaella *et al.* - High-resolution 3D digital models of artworks. **Optical Metrology for Arts and Multimedia**. 5146:June 2014 (2003) 34–43. doi: 10.1117/12.501248.

GIRARDET, Alexis; BOTON, Conrad - A parametric BIM approach to foster bridge project design and analysis. **Automation in Construction**. . ISSN 09265805. 126:2021) 103679. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103679.

ISO/DIS 19650-1.2 - Organization of information about construction works — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and Principles. **The International Organization for Standardization (ISO)**. 2018:2018).

ISO 29481-1 - Building information models — Information delivery manual — Part 1: Methodology and

format. **The International Organization for Standardization (ISO)**. 2016:2016).

JUSTO, Andrés *et al.* - 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**. . ISSN 09265805. 127:2021). doi: 10.1016/j.autcon.2021.103703.

LEE, K. M. *et al.* - Bridge information models for construction of a concrete box-girder bridge. **Structure and Infrastructure Engineering**. . ISSN 15732479. 8:7 (2012) 687–703. doi: 10.1080/15732471003727977.

LIU, Xin *et al.* - A state-of-the-art review on the integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS). **ISPRS International Journal of Geo-Information**. . ISSN 22209964. 6:2 (2017) 1–21. doi: 10.3390/ijgi6020053.

LOVELACE, Barritt; WELLS, Jennifer - **Unmanned Aircraft Systems (UAS) - Metro District Bridge Inspection Implementation**

LU, Ruodan; BRILAKIS, Ioannis - Generating bridge geometric digital twins from point clouds. **Proceedings of the 2019 European Conference on Computing in Construction**. 1:2019) 367–376. doi: 10.35490/ec3.2019.182.

LU, Ruodan; BRILAKIS, Ioannis; MIDDLETON, Campbell R. - Detection of Structural Components in Point Clouds of Existing RC Bridges. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**. . ISSN 14678667. 34:3 (2019) 191–212. doi: 10.1111/mice.12407.

MEHRANFAR, M.; AREFI, H.; ALIDOOST, F. - A PROJECTION-BASED RECONSTRUCTION ALGORITHM for 3D MODELING of BRIDGE STRUCTURES from DRONE-BASED POINT CLOUD. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. . ISSN 16821750. 46:4/W1-2021 (2021) 77–83. doi: 10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W1-2021-77-2021.

MINAGAWA, Masaru; KUSAYANAGI, Shunji - Study on BIM utilization for design improvement of infrastructure project. **Procedia Engineering**. . ISSN 18777058. 125:2015) 431–437. doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.113.

MYSORE, Vinay - OpenBridge Modeler 3D Parametric Bridge Modeling. 2018).

PAS 1192-2:2013 - **Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling: PAS 1192-2:2013**.

POPESCU, Cosmin *et al.* - 3D reconstruction of existing concrete bridges using optical methods. **Structure and Infrastructure Engineering**. . ISSN 17448980. 15:7 (2019) 912–924. doi: 10.1080/15732479.2019.1594315.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RAIL BALTICA - Building Information Management (BIM) Employer ' s Information Requirements. 2018).

RAIL BALTICA - BIM Manual 24-07-2019. 2019).

RAIL BALTICA - Codification & Data Management. 2019).

RAIL BALTICA - CAD Standards 24-07-2019. 2019).

REFER - Projeto de Execução - Ramal Ferroviário de Acesso ao Porto de Aveiro. 2005).

SAHEBDIVANI, Shima; AREFI, Hossein; MABOUDI, Mehdi - Rail track detection and projection-based 3D modeling from UAV point cloud. **Sensors (Switzerland)**. . ISSN 14248220. 20:18 (2020) 1–15. doi: 10.3390/s20185220.

SEDEK, M.; SERWA, A. - Development of new system for detection of bridges construction defects using terrestrial laser remote sensing technology. **Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**. . ISSN 20902476. 19:2 (2016) 273–283. doi: 10.1016/j.ejrs.2015.12.005.

SHIM, C. S.; YUN, N. R.; SONG, H. H. - Application of 3D bridge information modeling to design and construction of bridges. **Procedia Engineering**. . ISSN 18777058. 14:2011) 95–99. doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.010.

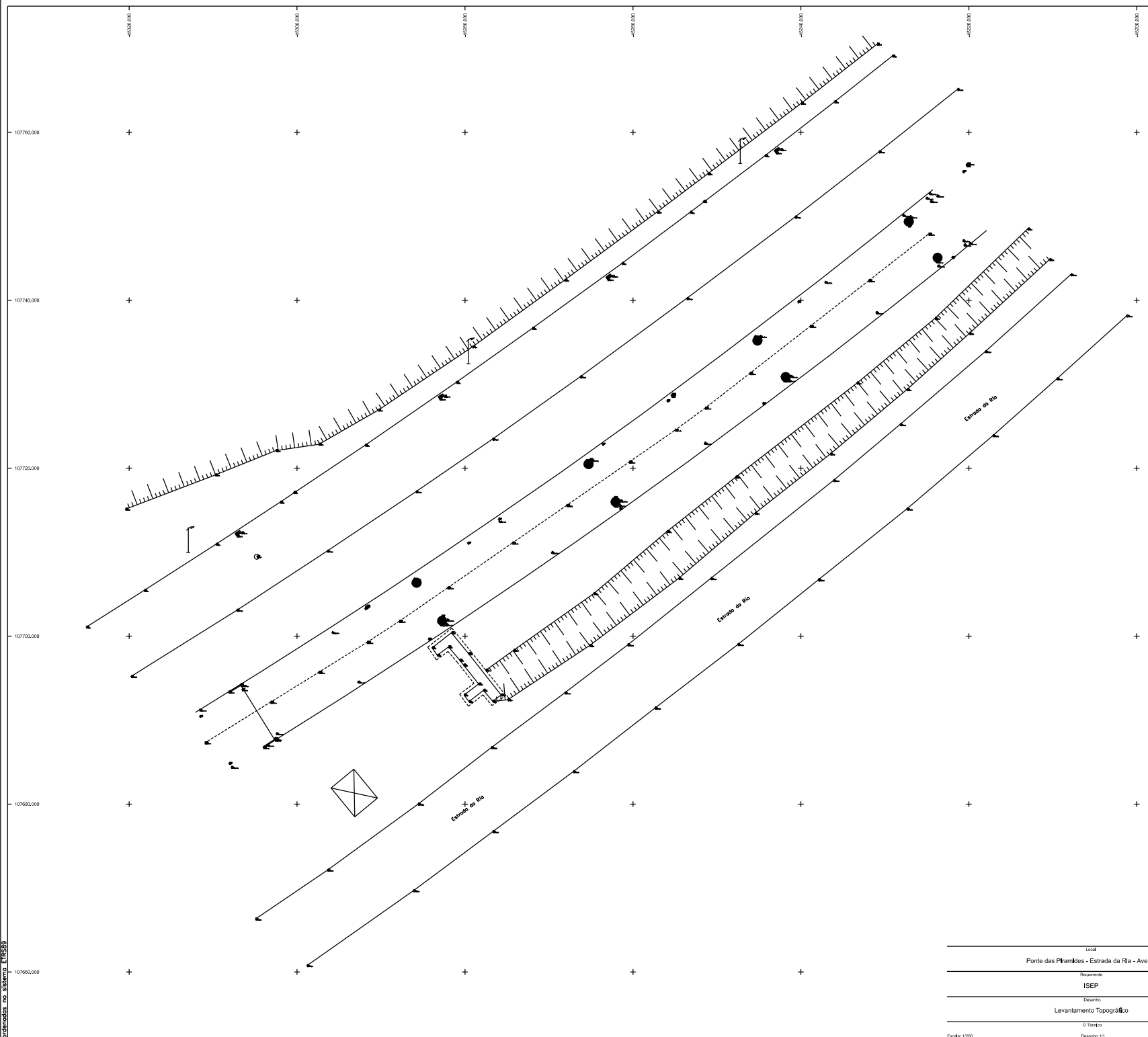
SHIM, Chang Su *et al.* - Three-dimensional information model-based bridge engineering in Korea. **Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)**. . ISSN 10168664. 22:1 (2012) 8–13. doi: 10.2749/101686612X13216060212834.

SHIM, Chang Su *et al.* - Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model. **Structure and Infrastructure Engineering**. . ISSN 17448980. 15:10 (2019) 1319–1332. doi: 10.1080/15732479.2019.1620789.

SHIM, Chang Su; ROH, Gi Tae - Data-driven modeling algorithms for cable-stayed bridges considering mechanical behavior. **Applied Sciences (Switzerland)**. . ISSN 20763417. 11:5 (2021) 1–22. doi: 10.3390/app11052266.

TANG, Pingbo *et al.* - Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. **Automation in Construction**. . ISSN 09265805. 19:7 (2010) 829–843. doi: 10.1016/j.autcon.2010.06.007.

ANEXO I – LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

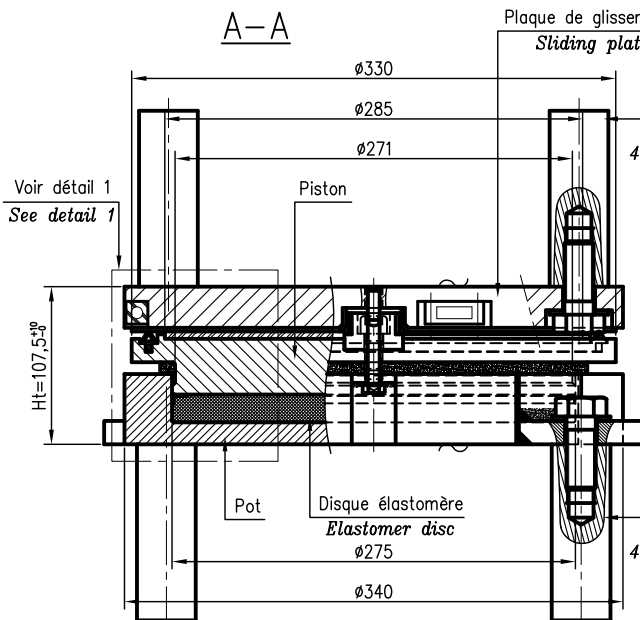


Local	Ponte das Pirâmides - Estrada da Ria - Aveiro
Requerente	ISEP
Desenho	Levantamento Topográfico
Ó Tercio	
Escala: 1:200	Desenho: 1/1
	6/8/2022

Coordenadas do Sistema ETRS89

ANEXO II – APARELHO DE APOIO TIPO 3

A-A



Voir détail 1
See detail 1

Ht=107,5 mm

Plaque de glissement
Sliding plate

Structure béton
4 vis H M20-50 Cl. 10.9 Zn12c
+ 4 rondelles M20 U - Zn12c
4 douilles Ø40-120

Concrete structure
4 screws H M20-50 Cl.10.9 Zn12c
+ 4 washers M20 U - Zn12c
4 sockets Ø40-120

Structure béton
4 vis H M20-50 Cl. 10.9 Zn12c
+ 4 rondelles M20 U - Zn12c
4 douilles Ø40-120

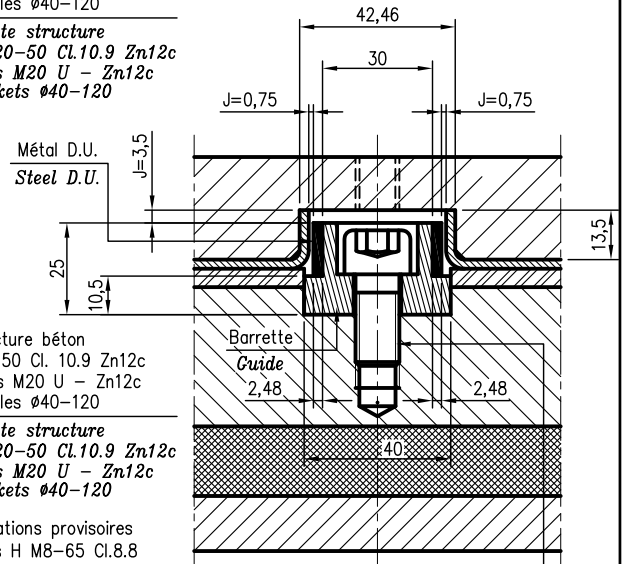
Concrete structure
4 screws H M20-50 Cl.10.9 Zn12c
+ 4 washers M20 U - Zn12c
4 sockets Ø40-120

Fixations provisoires
2 vis H M8-65 Cl.8.8
+ 2 rondelles M8 U
(A enlever sur chantier)

Temporary fixings
2 screws H M8-65 Cl.8.8
+ 2 washers M8 U
(To remove on site)

B-B ECHELLE: 1/1

SCALE: 1/1



Métal D.U.
Steel D.U.

Structure béton
4 vis H M20-50 Cl. 10.9 Zn12c
+ 4 rondelles M20 U - Zn12c
4 douilles Ø40-120

Concrete structure
4 screws H M20-50 Cl.10.9 Zn12c
+ 4 washers M20 U - Zn12c
4 sockets Ø40-120

Fixations provisoires
2 vis H M8-65 Cl.8.8
+ 2 rondelles M8 U
(A enlever sur chantier)

Temporary fixings
2 screws H M8-65 Cl.8.8
+ 2 washers M8 U
(To remove on site)

Barrette
Guide
2,48

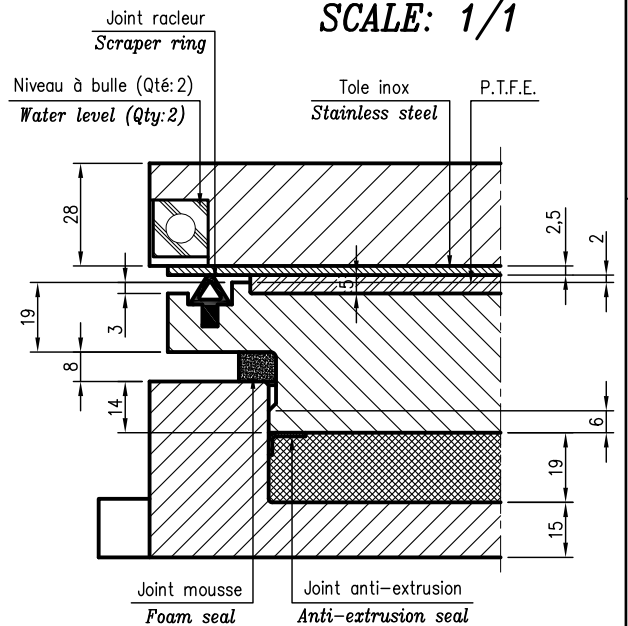
Structure béton
4 vis H M20-50 Cl. 10.9 Zn12c
+ 4 rondelles M20 U - Zn12c
4 douilles Ø40-120

5 vis CHc, M12-25 Cl.12.9 Zn12c
Couple de serrage 13,70daN.m

5 screws CHc, M12-25 Cl.12.9 Zn12c
Screwing torque 13,70daN.m

DETAIL 1 ECHELLE: 1/1

SCALE: 1/1



Joint racleur
Scraper ring

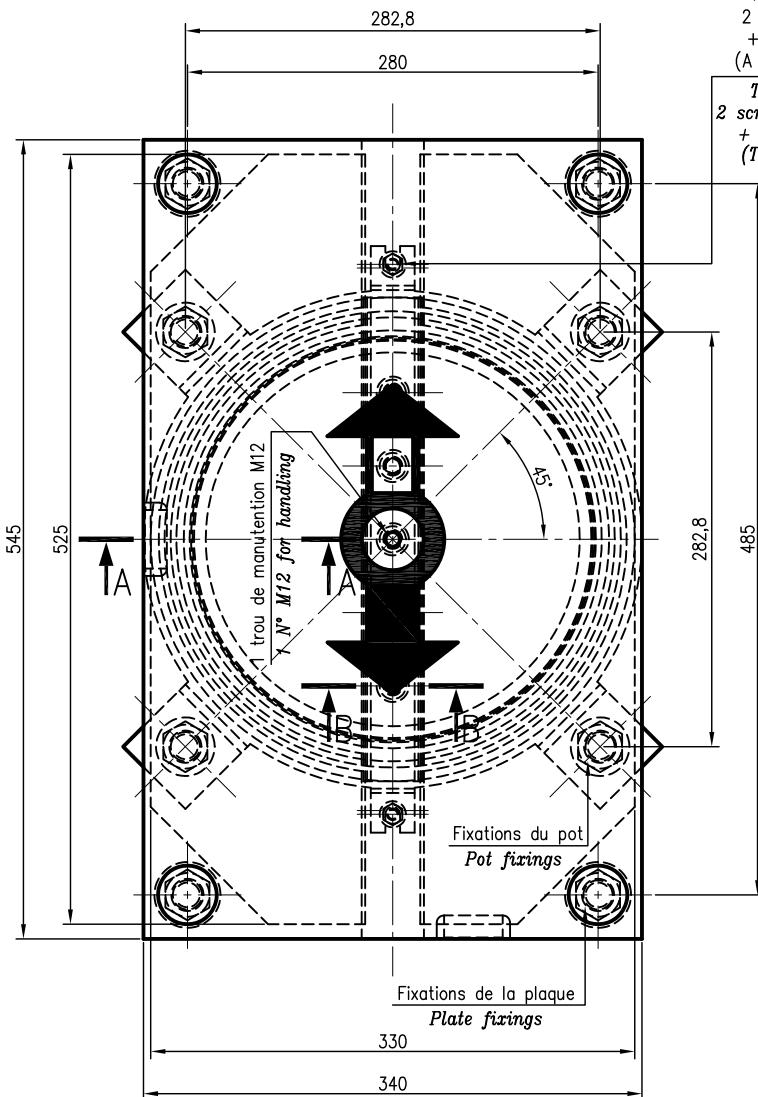
Niveau à bulle (Qté:2)
Water level (Qty:2)

Toile inox
Stainless steel

P.T.F.E.

Joint mousse
Foam seal

Joint anti-extrusion
Anti-extrusion seal



Marquage: CE

PPC INTERNAL SPECIFICATION

- * Découpe élastomère: Ø275x19
- * Découpe P.T.F.E.: Ø285x122,5 Ep:5
- * Découpe inox:
 - 2 tôles: 525x156 Ep:2,5
 - 2x2 chanfreins: 80x80
- * Découpe métal D.U.:
 - 2 tôles: Ep:2,48

VIADUTO ACESSO
Qty: 3

VIADUTO POENTE
Qty: 2

VIADUTO NASCENTE
Qty: 2

- Acier
Steel
- Acier Inoxydable
Stainless Steel

VIADUTO PYRAMIDES
Qty: 4

VIADUTO GAFANHA
Qty: 4

- P.T.F.E. Pur
Pure P.T.F.E.
- Elastomère
Elastomer

A	20/11/07	OBT	GBX	PRZ	PREMIERE DIFFUSION / FIRST ISSUE
INDEX	DATE	DESSINE	VERIFIE	STATUT	MODIFICATIONS
		DRAWING	CHECKED	STATUS	
MATIERE / MATERIAL					POIDS Appui
S355 JO					88 kg
TRAITEMENT / TREATMENT					POIDS Usines
Fiche: STANDARD					9,4 kg

AFFAIRE / PROJECT	LIGACAO FERROVIARIA AO PORTO DE AVEIRO - PORTUGAL	N° Cote/Ref. Order	AEIRO
CLIENT / CUSTOMER			

PRODUCTS	DESIGNATION DOSSIER / FILE DESIGNATION	Numero Dossier / File Number
TETRON	APPUI TETRON CD® GG 2000_200_200 CD SERIES TETRON BEARINGS	

DESIGNATION ARTICLE / REF. DESIGNATION	Code Article / Product Ref.
ENSEMBLE / ASSEMBLY	
APPUI GLISSANT GUIDE CENTRAL/CENTRAL SLIDING GUIDED BEARING	

Distributeur / Distributor:	FORMAT	ECHELLE
TERRA ARMADA PORTUGAL	A2	2:5
PLAN / DRAWING N°	AS10405	IND./REV.
		A

Fournisseur / Supplier:	Z.A. DU MONAY 7120 - SAINT EUSEBE	REPRODUCTION ET MODIFICATION INTERDITE
PPC	Tel : (33) 03.85.73.69.00 - Fax : (33) 03.85.73.69.01	COPYRIGHT & MODIFICATION RESERVED

ANEXO III – RELATÓRIO DE QUALIDADE DO LEVANTAMENTO – LASER SCAN

Cyclone REGISTER 360 (BLK Edition)

Registration Report

May 30, 2022

Certified by:

Rogério

Civil Engineer

ISEP

Overall Quality

Error Results for Bundle 1

Setup Count: 113

Link Count: 262

Strength: 33 %

Overlap: 71 %

Bundle Error

0.009 m ✓

Overlap

71 % ✓

Strength

33 %

Cloud-to-Cloud

0.009 m ✓

Target Error

--

 Max error of 0.015 m.

 Max error of 0.020 m.

 Error greater than 0.020 m.

Survey Report

Abs. Mean Error of Control to 'Bundle 1': **0.017 m**

Bundle Name	Setup	Label	Error
Bundle 1	Piramides D-Day- 01	20	0.020 m
	Piramides D-Day- 02	21	0.018 m
	Piramides D-Day- 03	17	0.027 m
	Piramides D-Day- 03	15	0.024 m
	Piramides D-Day- 52	22	0.017 m
	Piramides D-Day- 52	23	0.025 m
	Piramides D-Day- 53	24	0.022 m
	Piramides D-Day- 55	26	0.019 m
	Piramides D-Day- 55	27	0.020 m
	Piramides D-Day- 57	28	0.020 m
	Piramides D-Day- 03	19	0.015 m
	Piramides D-Day- 03	18	0.024 m
	Piramides D-Day- 14	13	0.006 m
	Piramides D-Day- 15	12	0.004 m
	Piramides D-Day- 15	11	0.008 m
	Piramides D-Day- 05	16	0.017 m
	Piramides D-Day- 23	9	0.006 m
	Piramides D-Day- 24	7	0.012 m
	Piramides D-Day- 25	8	0.017 m
	Piramides D-Day- 33	4	0.022 m
	Piramides D-Day- 36	5	0.024 m
	Piramides D-Day- 43	1	0.031 m
	Piramides D-Day- 47	2	0.017 m
	Piramides D-Day- 60	29	0.016 m
	Piramides D-Day- 61	31	0.014 m
	Piramides D-Day- 62	30	0.010 m
	Piramides D-Day- 64	32	0.014 m
	Piramides D-Day- 66	33	0.007 m
	Piramides D-Day- 67	34	0.014 m
	Piramides D-Day- 69	35	0.011 m
	Piramides D-Day- 71	36	0.014 m
	Piramides D-Day- 09	14	0.013 m

Piramides D-Day- 74	38	0.015 m
Piramides D-Day- 76	37	0.017 m
Piramides D-Day- 77	39	0.028 m
viaduto Piramides- Setup22	3	0.022 m
viaduto Piramides- Setup28	6	0.011 m
viaduto Piramides- Setup16	40	0.019 m
viaduto Piramides- Setup18	41	0.022 m
viaduto Piramides- Setup18	42	0.019 m

**ANEXO IV – RELATÓRIO DE QUALIDADE DA AEROTRIANGULAÇÃO –
FOTOGRAMETRIA**

Contents

- [Project Summary](#)
- [Camera Calibration](#)
- [Photo Positions](#)
- [Photo Matching](#)
- [Surveys](#)
 - [Control Points](#)
 - [User Tie Points](#)

For more information, please see our online manual: <https://www.acute3d.com/QualityReportManual/en/v2.0/index.html>

Project Summary

Project:	Viaduto Sul
Number of photos:	3533
Ground coverage:	27672.7038 square meters
Average ground resolution:	1.03668 mm/pixel
Scale:	1 : 3
Camera model(s):	DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED
Processing date:	8/26/2022 3:20 PM
Processing time:	40min 2s

Quality Overview

Dataset:	3529 of 3533 photos calibrated (100%)
Keypoints:	Median of 42830 keypoints per image
Tie points:	490932 points, with a median of 597 points per photo.
Reprojection error (RMS):	0.94 pixels
Positioning / scaling:	Georeferenced using control points

Camera Calibration

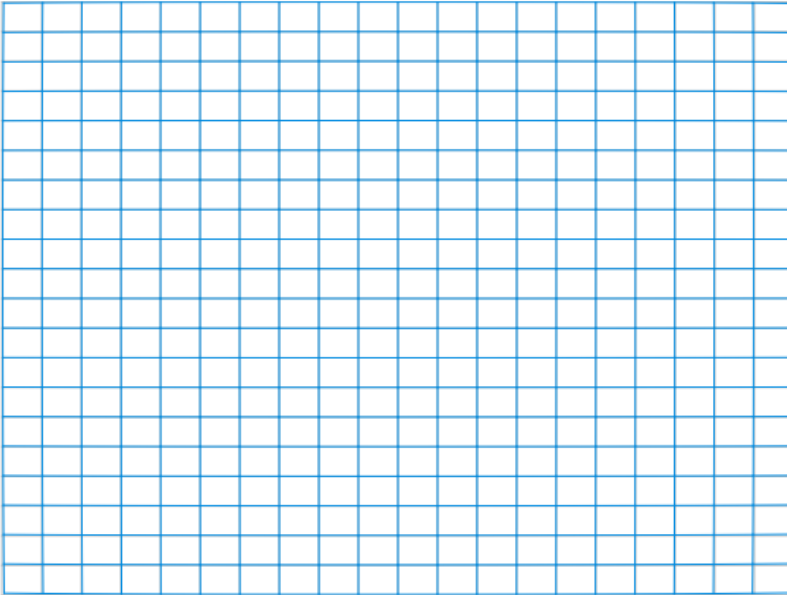
DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED 4.5mm 8000x6000

Name:	DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED
Model type:	Perspective
Image dimensions:	8000x6000 pixels
Sensor size:	6.4 mm
Number of photos:	38

Calibration Results

	Focal Length [mm]	Focal Length Equivalent 35 mm [mm]	Principal Point X [pixels]	Principal Point Y [pixels]	K1	K2	K3	P1	P2
Previous Values	4.99436	28.0933	3912.82	2979.73	-0.00368896	0.0002225	-0.0234385	-0.000197388	4.72678e-05
Optimized Values	4.9837	28.0333	3920.53	2974.76	-0.00842213	0.0175238	-0.0422589	-0.000137772	-0.000570095
Difference Previous / Optimized	-0.01066	-0.06	7.72	-4.97	-0.00473317	0.0173013	-0.0188204	5.9616e-05	-0.000617363

Distortion Grid



Camera Lens Distortion: Gray lines represent the zero distortion grid, and blue lines represent the real camera values.

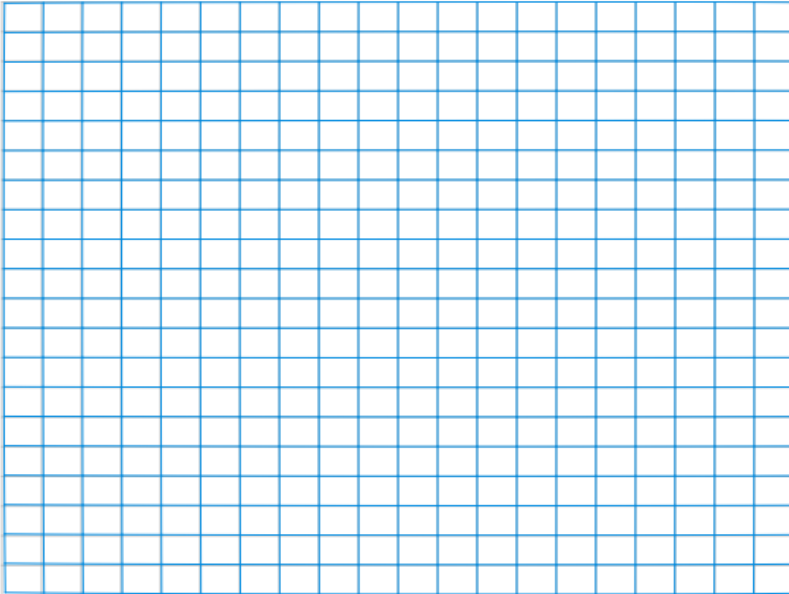
DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED 4.5mm 8000x6000

Name:	DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED
Model type:	Perspective
Image dimensions:	8000x6000 pixels
Sensor size:	6.4 mm
Number of photos:	499

Calibration Results

	Focal Length [mm]	Focal Length Equivalent 35 mm [mm]	Principal Point X [pixels]	Principal Point Y [pixels]	K1	K2	K3	P1	P2
Previous Values	4.9905	28.0716	3975.60	2976.43	-0.00420036	0.00291877	-0.0226925	0.000678184	2.10779e-05
Optimized Values	4.98279	28.0282	3984.11	2972.89	-0.0138137	0.0375419	-0.0553383	0.0012958	-0.000927915
Difference Previous / Optimized	-0.00771	-0.0434	8.51	-3.54	-0.00961334	0.0346231	-0.0326458	0.000617616	-0.000948993

Distortion Grid



Camera Lens Distortion: *Gray lines represent the zero distortion grid, and blue lines represent the real camera values.*

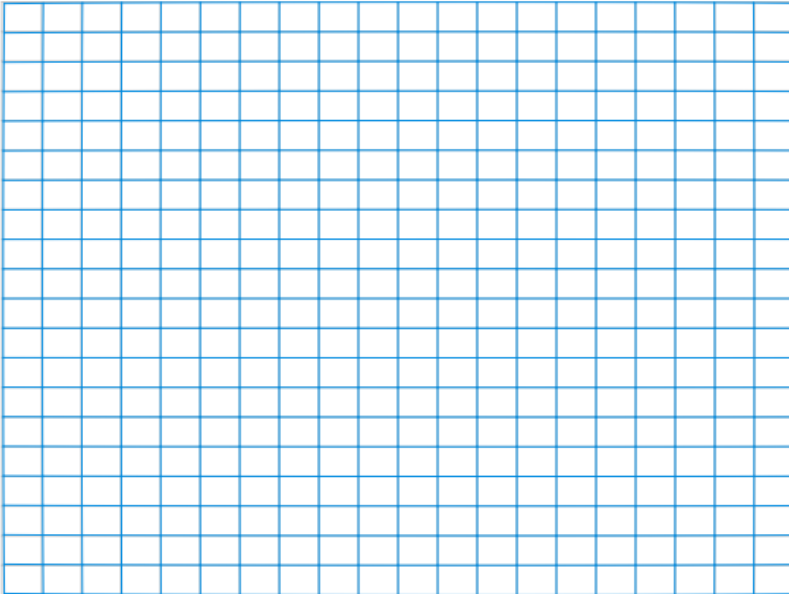
DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED 4.5mm 8000x6000

Name:	DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED
Model type:	Perspective
Image dimensions:	8000x6000 pixels
Sensor size:	6.4 mm
Number of photos:	494

Calibration Results

	Focal Length [mm]	Focal Length Equivalent 35 mm [mm]	Principal Point X [pixels]	Principal Point Y [pixels]	K1	K2	K3	P1	P2
Previous Values	4.98714	28.0527	3968.26	2977.50	-0.00387662	0.000373097	-0.0192183	0.000206945	6.36929e-05
Optimized Values	4.98648	28.0489	3977.25	2978.20	-0.00193614	-0.00694575	-0.0119008	0.000721428	0.000146497
Difference Previous / Optimized	-0.00066	-0.0038	8.99	0.69	0.00194048	-0.00731885	0.0073175	0.000514483	8.28041e-05

Distortion Grid



Camera Lens Distortion: *Gray lines represent the zero distortion grid, and blue lines represent the real camera values.*

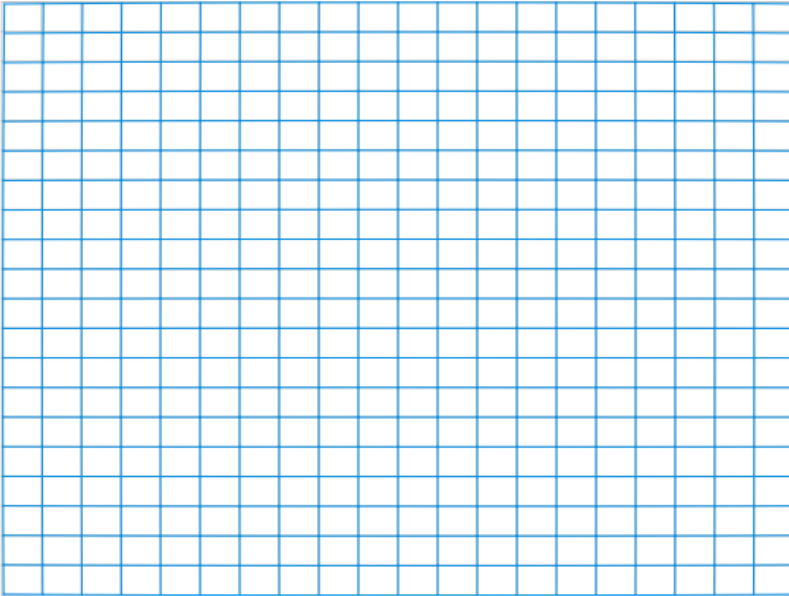
DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED 4.5mm 8000x6000

Name:	DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED
Model type:	Perspective
Image dimensions:	8000x6000 pixels
Sensor size:	6.4 mm
Number of photos:	496

Calibration Results

	Focal Length [mm]	Focal Length Equivalent 35 mm [mm]	Principal Point X [pixels]	Principal Point Y [pixels]	K1	K2	K3	P1	P2
Previous Values	4.98402	28.0351	3973.52	2987.62	-0.0034417	-0.00081021	-0.0179669	0.000148385	0.000303696
Optimized Values	4.98596	28.046	3985.45	2989.08	0.00180665	-0.0296715	0.0166632	0.000286186	0.00112836
Difference Previous / Optimized	0.00194	0.0109	11.93	1.47	0.00524835	-0.0288613	0.0346301	0.000137801	0.000824664

Distortion Grid



Camera Lens Distortion: *Gray lines represent the zero distortion grid, and blue lines represent the real camera values.*

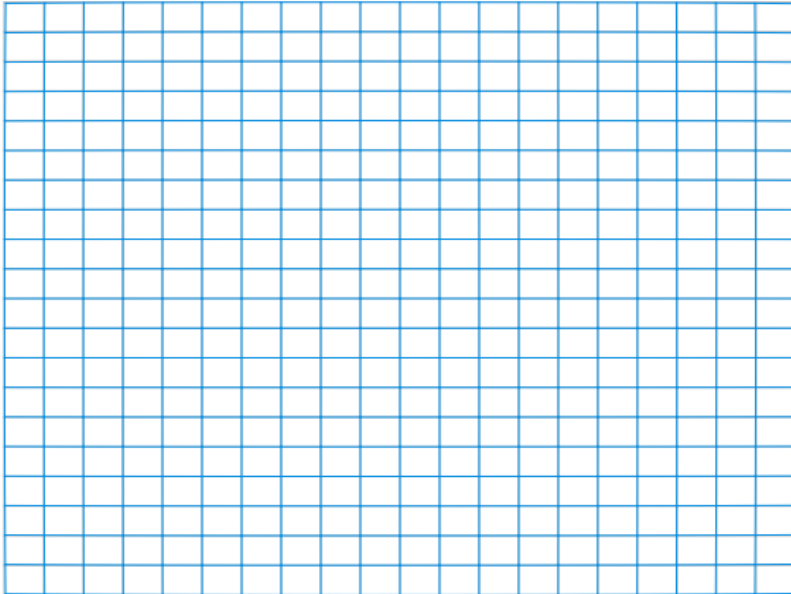
DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED 4.5mm 8000x6000

Name:	DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED
Model type:	Perspective
Image dimensions:	8000x6000 pixels
Sensor size:	6.4 mm
Number of photos:	461

Calibration Results

	Focal Length [mm]	Focal Length Equivalent 35 mm [mm]	Principal Point X [pixels]	Principal Point Y [pixels]	K1	K2	K3	P1	P2
Previous Values	4.98164	28.0217	3972.93	2989.59	-0.00405394	0.000486456	-0.0187963	-0.000326197	0.000171674
Optimized Values	4.98509	28.0411	3984.32	2986.17	-0.00322103	-0.00356909	-0.0152498	-0.000304924	0.000221896
Difference Previous / Optimized	0.00345	0.0194	11.38	-3.42	0.00083291	-0.00405555	0.0035465	2.1273e-05	5.0222e-05

Distortion Grid



Camera Lens Distortion: *Gray lines represent the zero distortion grid, and blue lines represent the real camera values.*

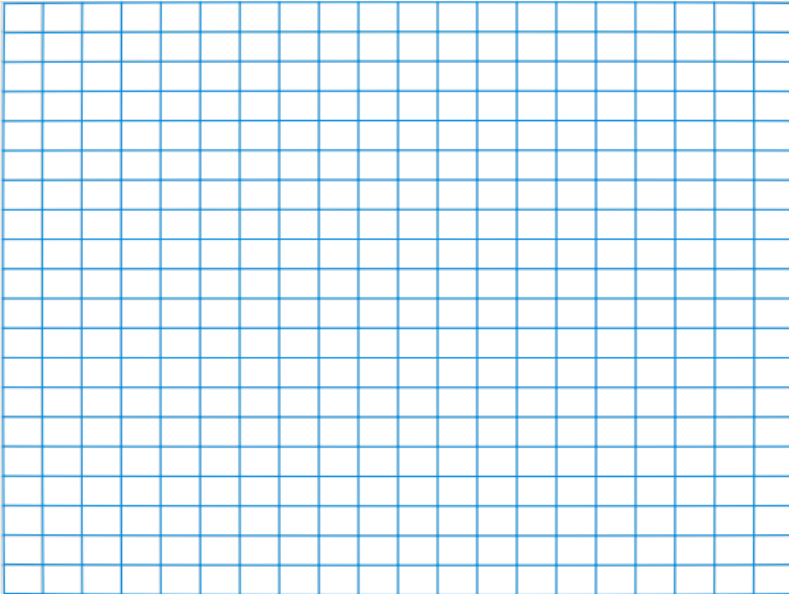
DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED 4.5mm 8000x6000

Name:	DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED
Model type:	Perspective
Image dimensions:	8000x6000 pixels
Sensor size:	6.4 mm
Number of photos:	147

Calibration Results

	Focal Length [mm]	Focal Length Equivalent 35 mm [mm]	Principal Point X [pixels]	Principal Point Y [pixels]	K1	K2	K3	P1	P2
Previous Values	4.97822	28.0025	3979.44	2985.93	-0.00352779	-0.00164329	-0.0184919	0.000232654	-0.000266782
Optimized Values	4.98837	28.0596	3988.20	2987.42	-0.00259055	-0.0062191	-0.0132572	0.000535679	0.00015882
Difference Previous / Optimized	0.01015	0.0571	8.77	1.49	0.00093724	-0.00457581	0.0052347	0.000303025	0.000425602

Distortion Grid



Camera Lens Distortion: Gray lines represent the zero distortion grid, and blue lines represent the real camera values.

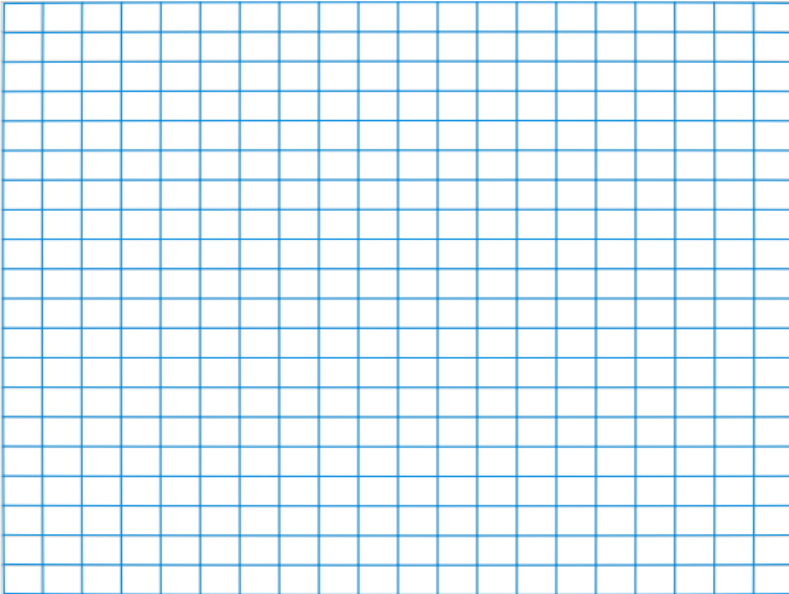
DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED 4.5mm 8000x6000

Name:	DJI MAVIC2-ENTERPRISE-ADVANCED
Model type:	Perspective
Image dimensions:	8000x6000 pixels
Sensor size:	6.4 mm
Number of photos:	1398

Calibration Results

	Focal Length [mm]	Focal Length Equivalent 35 mm [mm]	Principal Point X [pixels]	Principal Point Y [pixels]	K1	K2	K3	P1	P2
Previous Values	4.98649	28.049	3970.07	2984.60	-0.00594286	0.00502714	-0.0217695	0.000122946	0.000102949
Optimized Values	4.98607	28.0466	3979.93	2981.28	-0.00491781	0.000542747	-0.0168652	0.000405871	0.000123075
Difference Previous / Optimized	-0.00042	-0.0024	9.86	-3.31	0.00102505	-0.00448439	0.0049043	0.000282925	2.0126e-05

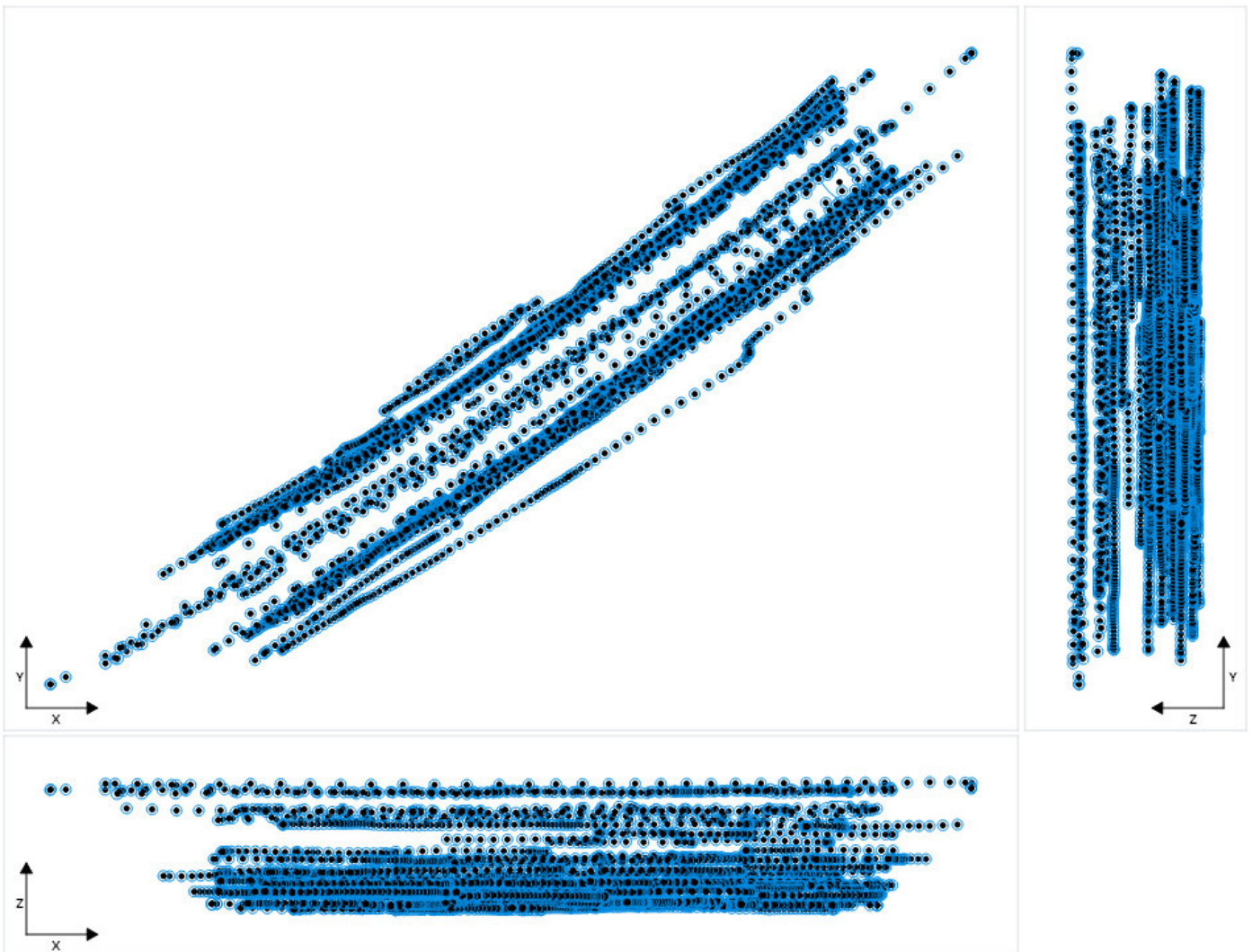
Distortion Grid



Camera Lens Distortion: Gray lines represent the zero distortion grid, and blue lines represent the real camera values.

Photo Positions

Photo Position Uncertainties

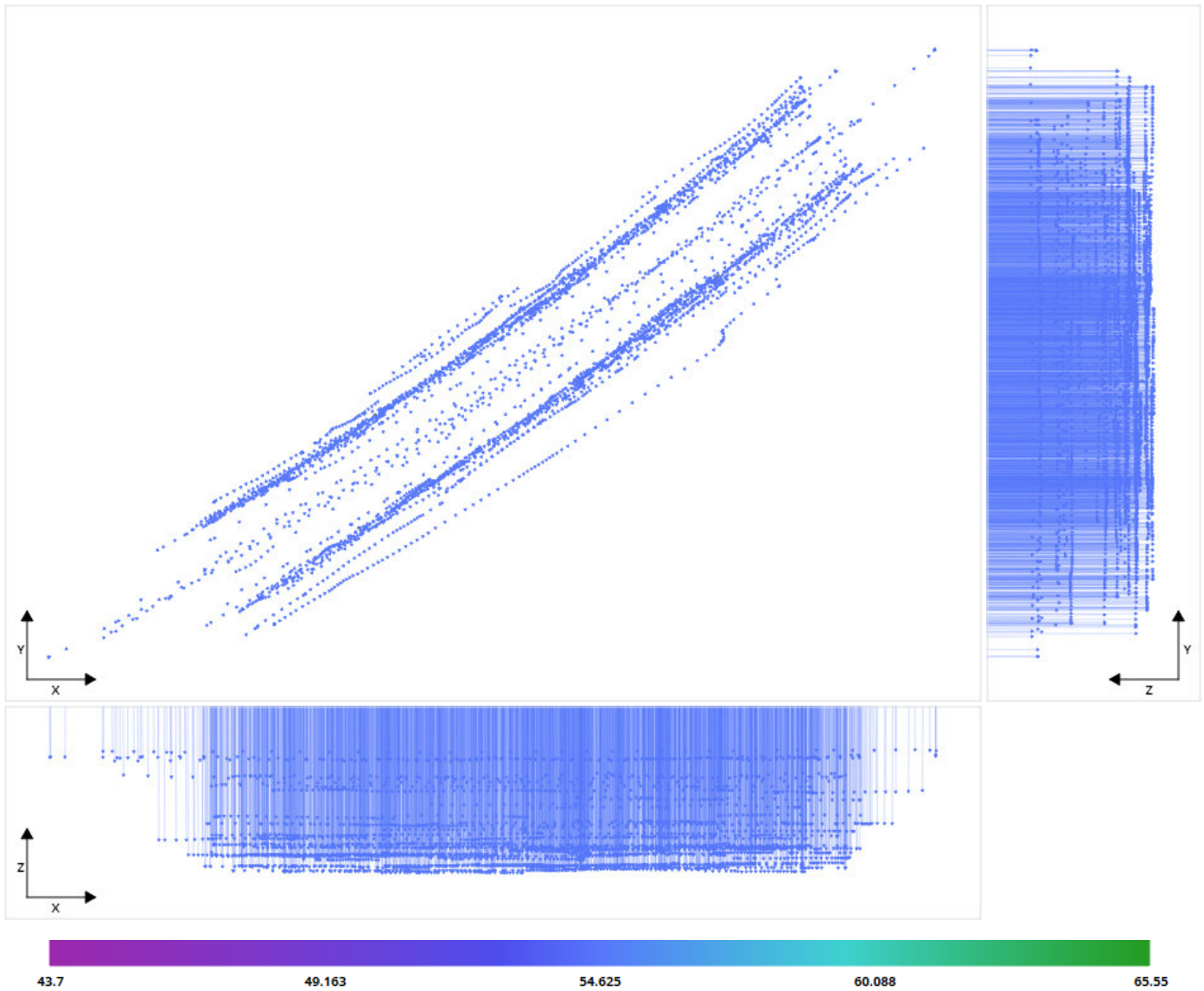


Position Uncertainties: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) of computed photo positions (black dots). Blue ellipses indicate the position uncertainty, scaled for readability. The minimum and maximum values, as well as the average value, can be found in the table below.

Position Uncertainties			
	X [meters]	Y [meters]	Z [meters]
Minimum	0.00002	0.00002	0.00003
Mean	0.00023	0.00023	0.00018
Maximum	0.1113	0.10956	0.02528

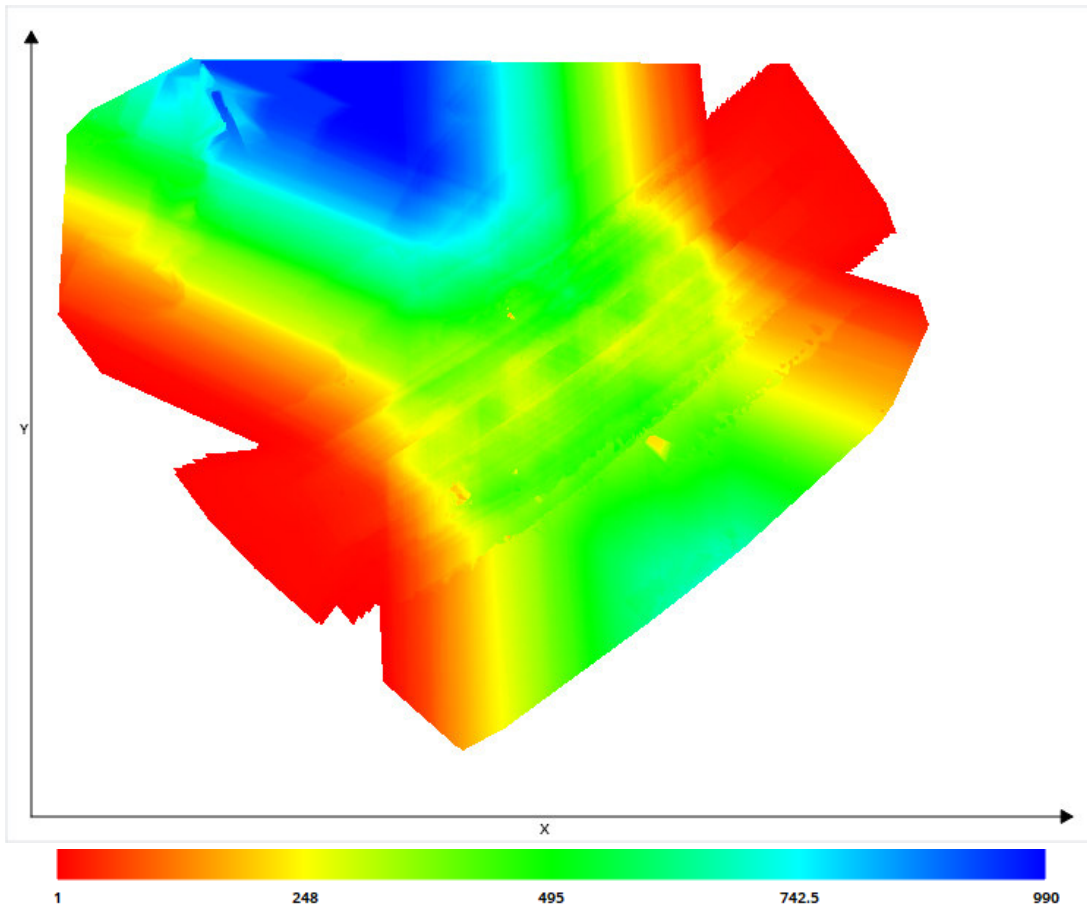
For more information on individual photos, please refer to the [Photos Report](#).

Distance to Input Positions



Position Distance to Metadata: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane), with arrows indicating the offset between the metadata positions and the computed photo positions; all arrows start from the metadata positions and point toward the computed positions. Gray points • indicate uncalibrated photos that have metadata. Pink points • indicate calibrated photos that have no metadata. The values are in meters, with a minimum distance of **54.47014 meters** and a maximum of **54.79632 meters**. The median position distance equals **54.62521 meters**.

Scene Coverage



Number of photos seeing the scene: Top view (XY plane) display of the scene, with colors indicating the number of photos that potentially see each area.

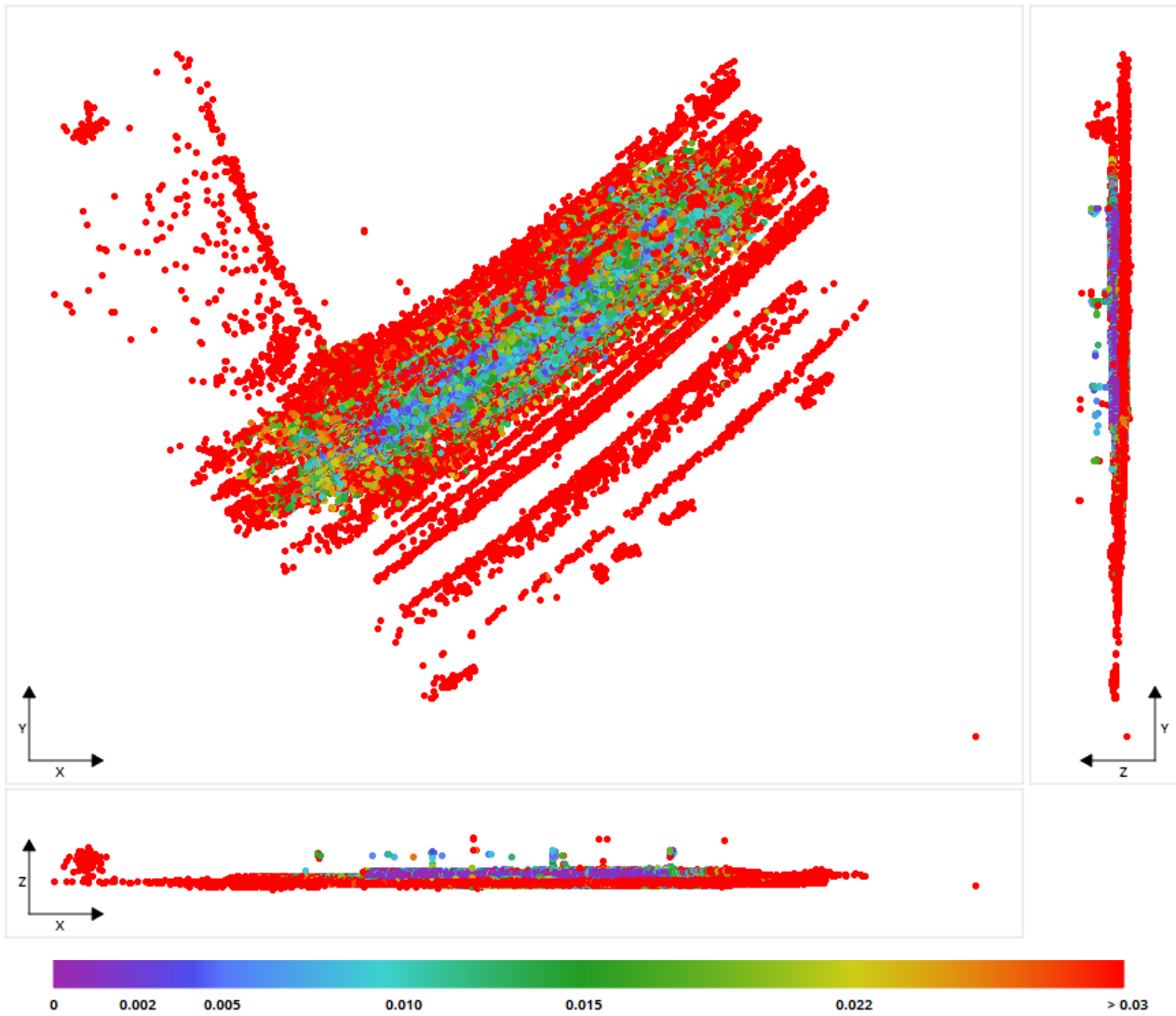
Photo Matching

Quality Measures on Tie Points

Generated Tie Points						
	Number of Points	Median Number of Photos per Point	Median Number of Points per Photo	Median Reprojection Error [pixels]	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]
Previous Values	513080	4	656	0.68	0.85	0.00269
Processed Values	490932	4	597	0.73	0.94	0.00496

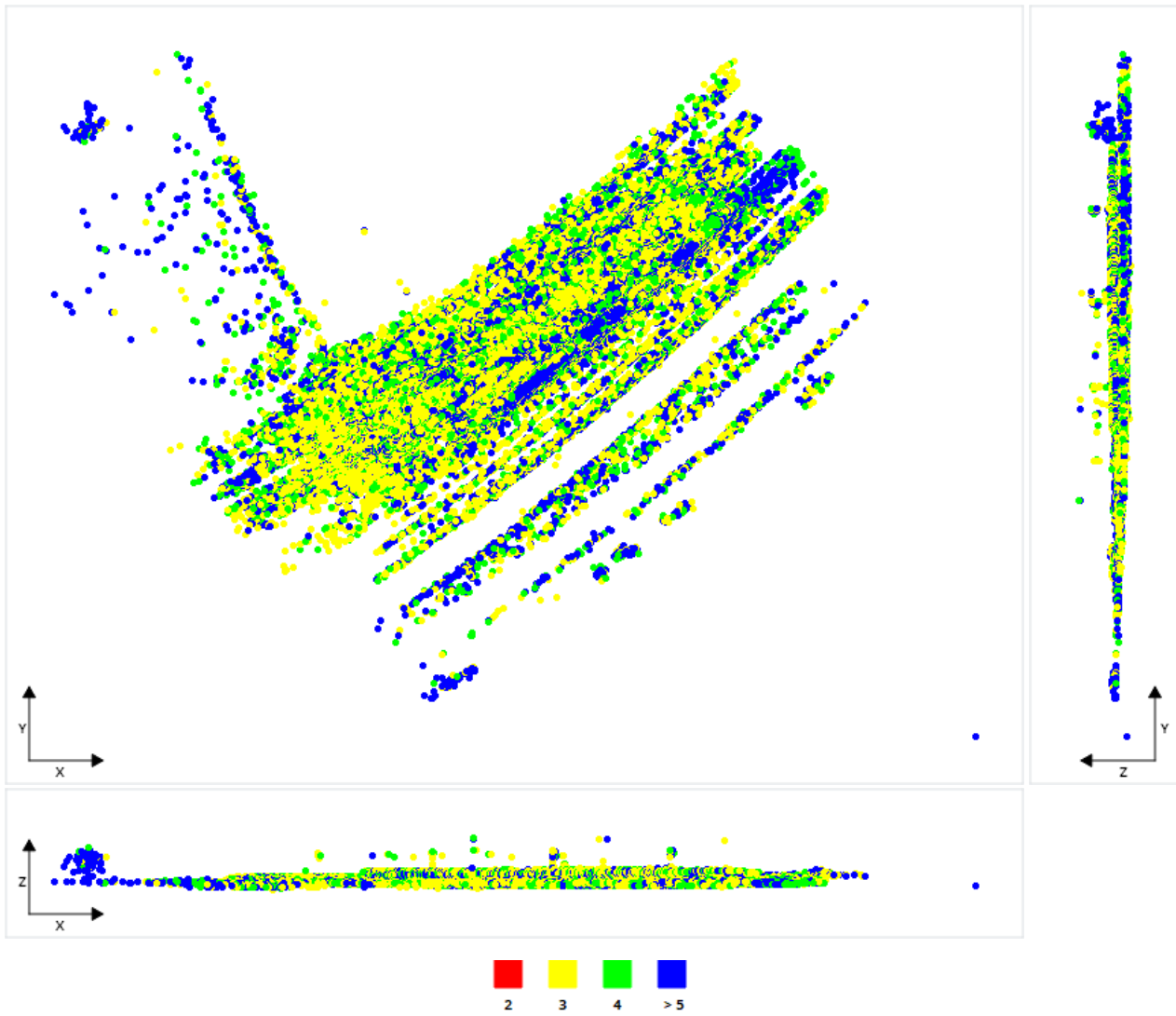
For more information on individual photos, please refer to the [Photos Report](#).

Tie Point Position Uncertainties



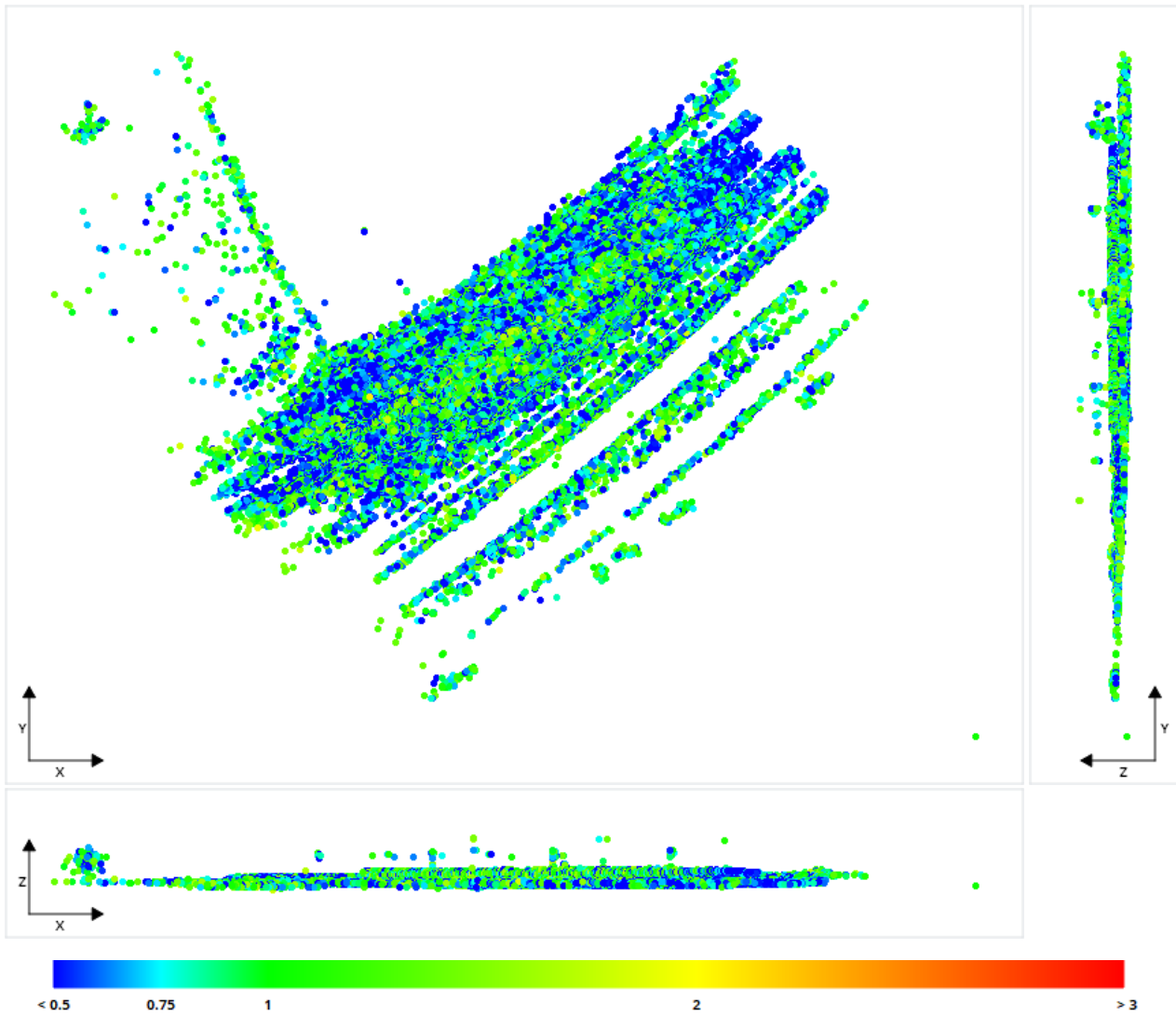
Position Uncertainties: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing uncertainty in the individual point position. The values are in meters, with a minimum uncertainty of **0.00011 meters** and a maximum of **0.63838 meters**. The median position uncertainty equals **0.00471 meters**.

Number of Photos Observing the Tie Points



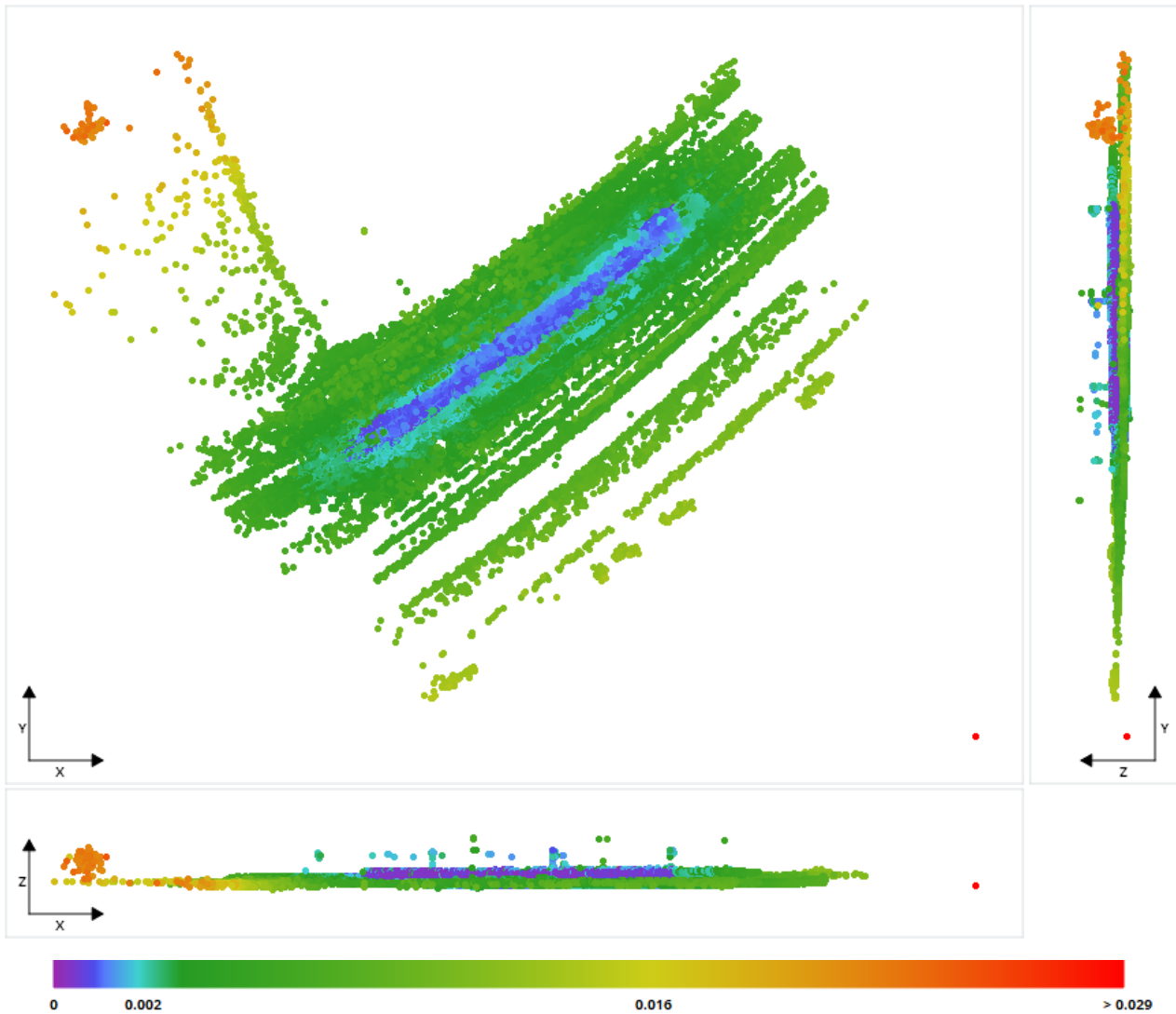
Number of Observations per Tie Point: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing the number of photos that have been used to define each point. The minimum number of photos per tie point is 2 and the maximum is 46. The average number of photos observing a tie point is 5.

Reprojection Error



Reprojection Errors per Tie Point: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing the reprojection error in pixels. The minimum reprojection error is **0.01 pixels** and the maximum is **2.19 pixels**. The average reprojection error is **0.87 pixels**.

Tie Point Resolution



Resolution: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing resolution in the individual point position. The values are in meters/pixel, with a minimum resolution of 0.00023 meters/pixel and a maximum of 0.0292 meters/pixel. The median resolution equals 0.00136 meters/pixel.

Surveys

Number of control points: 13, out of which 5 are used as check points.

Number of user tie points: 22. No tie point is used as check point.

Number of positioning constraints: 0

Control Points

Control Points Errors									
Name	Category	Accuracy [meters]	Number of Calibrated Photos	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]	3D Error [meters]	Horizontal Error [meters]	Vertical Error [meters]	
GCP4	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	41 (42 marked photos)	4.47	0.00321	0.00276	X: 0.0005; Y: 0.00249	-0.00107	⚠
GCP7	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	50 (50 marked photos)	46.64	0.02296	0.02693	X: -0.02542; Y: -0.00496	-0.0074	⚠
GCP1	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	14 (14 marked photos)	51.24	0.02648	0.03808	X: 0.03586; Y: -0.01202	0.0044	⚠
GCP11	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	40 (41 marked photos)	14.33	0.00738	0.008	X: -0.00626; Y: -0.00422	-0.00264	⚠
GCP15	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	24 (24 marked photos)	90.93	0.05582	0.06075	X: 0.05863; Y: 0.01499	0.00528	⚠

GCP31	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	43 (44 marked photos)	45.6	0.01804	0.02154	X: -0.02011; Y: -0.00668	0.00386	
GCP34	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	52 (52 marked photos)	51.06	0.02702	0.03719	X: -0.03688; Y: 0.00394	-0.0027	
GCP37	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	42 (42 marked photos)	6.64	0.00546	0.00409	X: 0.00009; Y: 0.00393	0.00112	
Global RMS				47.47	0.02621	0.03123	X: 0.02994; Y: 0.00786	0.00409	
Median				46.64	0.02296	0.02693	X: 0.00009; Y: 0.00249	0.00112	

Check Points Errors for Control Points									
Name	Category	Accuracy [meters]	Number of Calibrated Photos	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]	3D Error [meters]	Horizontal Error [meters]	Vertical Error [meters]	
GCP43	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	23 (23 marked photos)	70.93	0.03493	0.04751	X: 0.04252; Y: -0.00475	0.02065	
GCP27	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	8 (8 marked photos)	105.78	0.05632	0.0572	X: 0.04923; Y: -0.00388	0.02886	
GCP8	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	17 (17 marked photos)	28.47	0.01945	0.02068	X: -0.01676; Y: -0.00911	-0.00798	
GCP35	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	31 (31 marked photos)	47.82	0.0294	0.03556	X: -0.03514; Y: 0.00014	-0.00547	
GCP42	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	20 (20 marked photos)	61.8	0.03688	0.04454	X: 0.04189; Y: -0.0013	0.0151	
Global RMS				68.03	0.0374	0.04291	X: 0.03873; Y: 0.00494	0.01778	
Median				61.8	0.03493	0.04454	X: 0.04189; Y: -0.00388	0.0151	

Horizontal and vertical errors are given according to each control point respective spatial reference system

User Tie Points

User Tie Points Errors				
Name	Number of Calibrated Photos	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]	
Target #1	24 (24 marked photos)	2.12	0.00199	
Target #2	46 (46 marked photos)	6.03	0.00946	
Target #3	28 (28 marked photos)	3.33	0.00795	
Target #4	40 (40 marked photos)	3.31	0.00857	
Target #5	61 (61 marked photos)	2.32	0.00452	
Target #6	25 (25 marked photos)	2.7	0.00214	
Target #7	8 (8 marked photos)	2.59	0.00821	
P1	63 (63 marked photos)	5.7	0.01013	
P2	69 (69 marked photos)	4.13	0.00685	
P3	60 (60 marked photos)	3.67	0.00542	
P4	82 (82 marked photos)	10.88	0.00821	
P5	60 (60 marked photos)	3.58	0.00616	
P6	59 (59 marked photos)	2.79	0.00569	
P7	89 (89 marked photos)	4.81	0.00771	
P12	76 (76 marked photos)	5.01	0.00783	
P13	98 (98 marked photos)	5.38	0.01175	

P14	95 (95 marked photos)	5.85	0.00978	⚠
P8	86 (86 marked photos)	9.78	0.01037	⚠
P9	99 (99 marked photos)	5.15	0.00988	⚠
P10	88 (88 marked photos)	4.16	0.00791	⚠
P11	53 (53 marked photos)	4.17	0.00948	⚠
P15	98 (98 marked photos)	4.03	0.00653	⚠
Global RMS		5.08	0.00796	
Median		4.16	0.00795	

No data are available

Horizontal and vertical errors are given according to each control point respective spatial reference system