

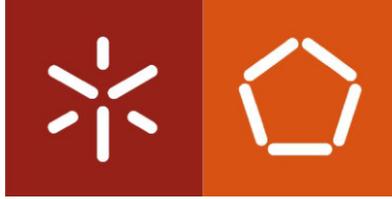


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

António Alexandre Fernandes Marques

**Implementação de metodologias BIM na
Direção de Engenharia de Barragens da
EDP: Casos de estudo de projeto de
estruturas em obras Hidroelétricas**





Universidade do Minho

Escola de Engenharia

António Alexandre Fernandes Marques

**Implementação de metodologias BIM na
Direção de Engenharia de Barragens da
EDP: Casos de estudo de projeto de
estruturas em obras Hidroelétricas**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do

**Professor Doutor Miguel Ângelo Dias Azenha
e do**

Engenheiro Nuno André Costa Ferreira

DECLARAÇÃO

Nome: António Alexandre Fernandes Marques

Endereço eletrónico: a63334@alunos.uminho.pt Telefone: +351 915 923 102

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14155339

Título da dissertação: Implementação de metodologias BIM na Direção de Engenharia de Barragens da EDP: Casos de estudo de projeto de estruturas em obras Hidroelétricas

Orientador/a/es:

Professor Doutor Miguel Ângelo Dias Azenha

Engenheiro Nuno André Costa Ferreira

Ano de conclusão: 2015

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Miguel Azenha, cujas ideias brilhantes, entusiasmo, profissionalismo, dedicação, apoio e motivação foram essenciais na elaboração da dissertação. Foi um enorme privilégio e prazer poder trabalhar com alguém por quem nutro profunda admiração.

Ao Eng.º André Ferreira um muito obrigado será sempre pouco tendo em conta todo o apoio, paciência, amizade e ensinamentos transmitidos ao longo últimos meses, sendo para mim uma referência como pessoa e como Engenheiro.

Ao Eng.º Celso Lima todo o apoio e confiança demonstrados ao longo da elaboração da dissertação.

À EDP Produção, o facto de ter permitido a realização do estágio curricular numa empresa de renome, onde tive oportunidade de desenvolver competências extracurriculares e contactar com profissionais de excelência. Não posso ainda deixar de realçar o apoio e amizade do Artur Andrade, do Filipe Cerqueira, do José Nuno Figueiredo, da Magda Queralt e da Mónia Ribeiro ao longo do estágio, estando sempre dispostos a ajudar.

Ao Eng.º José Carlos Lino e ao Eng.º Bruno Caires, por serem os responsáveis pelo despertar do meu interesse pela temática do BIM e pelos ensinamentos e conselhos transmitidos durante o meu percurso académico.

Aos meus amigos Vito Lopes e Carlos Gomes, pela agradável convivência e apoio diário ao longo dos últimos meses.

Aos todos os meus amigos que me acompanharam durante todo o percurso académico, tenho a agradecer todo o companheirismo, materializando este documento a conclusão de uma etapa muito feliz.

À minha mãe e à minha irmã, cujo apoio, paciência e confiança são essenciais, não apenas na elaboração deste trabalho, mas em todas as etapas da minha vida. Ao meu pai, a quem gostaria de dedicar o presente trabalho.

Por último, mas não menos importante, à Andreia, todo o amor e amizade, que são para mim essenciais.

RESUMO

A indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) está progressivamente a optar por soluções modernizadas e automatizadas, nomeadamente através da aplicação de tecnologias de informação nos seus processos. Assim, verificam-se mudanças a nível de colaboração, representação, análise e fabricação, com a proliferação do *Building Information Modeling* (BIM), que tem vindo a transformar a metodologia com que os edifícios são projetados e construídos. Apesar de a indústria ter vindo a constatar os benefícios que se obtêm com a adoção do BIM, a sua implementação segue um lento processo, quando comparado com a incorporação de tecnologias de informação por parte de outras indústrias. Os principais condicionantes a esta adoção são de natureza técnica aliados a uma necessidade de mudança cultural.

O presente trabalho, realizado em ambiente empresarial no departamento de Fundações e Estruturas na Direção de Engenharia de Barragens da EDP, tem como objetivo avaliar os principais desafios à implementação do BIM na fase de projeto de obras hidroelétricas. Assim, são elaborados modelos BIM deste tipo de empreendimentos, nomeadamente componentes de Venda Nova III e Fridão. Relativamente a Venda Nova III são modelados a central, a tomada de água e túnel de adução, ao passo que de Fridão é modelada a restituição. Para modelação dos complexos corpos sólidos envolvidos recorreu-se à sinergia entre a linguagem de programação visual *Dynamo* e a plataforma BIM *Revit*. Os modelos criados foram explorados para diversos ‘usos BIM’, nomeadamente para obtenção de desenhos de projeto, mapas de quantidades, exploração do modelo de armaduras, geração de conteúdo multimédia, sendo ainda discutidas as vantagens do modelo BIM na compreensão, comunicação e discussão da estrutura de um aproveitamento hidroelétrico.

Adicionalmente à elaboração e exploração de modelos, é realizada uma proposta de Plano de Execução BIM, que tem como finalidade impulsionar e facilitar a implementação de metodologias BIM no departamento, sendo esta complementada com documentos que se entendem relevantes no apoio a colaboradores.

Com a elaboração dos modelos virtuais e do Plano de Execução BIM, entende-se que esta metodologia já se revela vantajosa na fase de projeto deste tipo de empreendimentos, sendo viável a sua implementação.

Palavras-Chave: Building Information Modeling (BIM); Obras Hidroelétricas; Modelação Paramétrica; Plano de Execução BIM.

ABSTRACT

The Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry is progressively opting for modernized and automated solutions, namely through the increasing application of information technologies in their processes. Thereby, relevant changes can be seen at the level of collaboration, representation, analysis and manufacturing, with the proliferation of Building Information Modeling (BIM), which has been transforming the methodologies for design and construction of buildings. While the industry has come to see the benefits that accrue from the adoption of BIM, its implementation follows a slow process when compared to the incorporation of information technologies from other industries. The main constraints to this adoption are related to technical issues, together with the need for a cultural change.

This work, developed in the department of Foundations and Structures of the Dam Engineering Division of EDP (Energies of Portugal), aims to assess the main challenges to the implementation of BIM in the design phase of hydroelectric developments (including power plants). Thereby, prototype BIM models of such type of projects were made, namely components of the hydroelectric developments of Venda Nova III and Fridão. For Venda Nova III the developed BIM models included the powerhouse, the intake and the headrace tunnel. For Fridão, only the outlet was modelled. The synergy between the visual programming language Dynamo and the BIM platform Revit was used for the modelling of complex solid bodies. The created models were explored for different ‘BIM uses’, namely: to obtain design drawings, quantity take-offs, rebar modelling (preparation and constructability issues), production of multimedia content.

In addition to developing and operating models, a specific BIM Execution Plan is proposed, which aims to promote and facilitate the implementation of BIM methodologies in the department (within EDP), which is supported by several additional documents that are meant to assist in several practical concerns.

With the development of virtual models and the BIM Execution Plan, as well as the several lessons learned in the process, it is considered that the BIM methodology proved to be advantageous in the design phase of projects related to hydroelectric developments, and its implementation is feasible.

KEYWORDS: Building Information Modeling (BIM); Hydroelectric Power Plant; Parametric Modeling; BIM Execution Plan.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract.....	v
Índice.....	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xix
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento Geral.....	1
1.2 Âmbito e objetivos.....	2
1.3 Organização da Dissertação.....	3
2. Obras hidroelétricas e BIM.....	5
2.1 Projeto de obras hidroelétricas.....	5
2.1.1 Aspetos gerais sobre o funcionamento de um aproveitamento hidroelétrico.....	5
2.1.2 Principais componentes de um aproveitamento hidroelétrico.....	9
2.1.3 Metodologia atual de trabalho no projeto de estruturas de aproveitamentos hidroelétricos.....	16
2.2 BIM.....	18
2.2.1 Enquadramento.....	18
2.2.2 Modelação Paramétrica.....	20
2.2.3 Interoperabilidade.....	25
2.2.4 Níveis de desenvolvimento (LOD).....	27
2.2.5 Sistemas de classificação de informação.....	28
2.3 BIM aplicado a obras hidroelétricas.....	29
2.3.1 Levantamento de casos aplicados.....	29
2.3.2 Desafios à implementação.....	32

3.	Modelação.....	35
3.1	Estratégia global	35
3.2	Testes preliminares/Aprendizagem	36
3.3	Central de Venda Nova III.....	39
3.3.1	Descrição da geometria	39
3.3.2	Estratégia de modelação da central	40
3.3.3	Modelação	40
3.4	Tomada de água de Venda Nova III.....	56
3.4.1	Descrição da geometria	56
3.4.2	Estratégia de modelação.....	58
3.4.3	Modelação	59
3.4.4	Modelação de armaduras.....	84
3.5	Restituição de Fridão	89
3.5.1	Descrição de geometria	89
3.5.2	Estratégia de modelação.....	89
3.6	Ferramenta de modelação de falhas.....	91
4.	Usos do BIM no contexto das componentes modeladas.....	93
4.1	Geração de peças desenhadas	95
4.2	Mapas de quantidades.....	99
4.3	Exploração do modelo de armaduras para deteção de colisões e CAD/CAM	101
4.4	Compreensão, comunicação e discussão dos modelos.....	104
4.5	Geração de conteúdos multimédia.....	106
5.	Estratégias e planos de implementação/execução.....	109
5.1	Âmbito do documento	109
5.2	Objetivos e Usos BIM	111
5.3	Identificação de membros de equipa e responsabilidades.....	113
5.4	Mapeamento de processos	114

5.5	Trocas de informação	116
5.6	Estrutura de pastas e nomenclatura de ficheiros.....	118
5.6.1	Estrutura de pastas e gestão de conteúdo	119
5.6.2	Nomenclatura de ficheiros	122
5.7	Documentos auxiliares	123
5.7.1	Proposta de controlo de qualidade de modelos	124
5.7.2	Documento de especificações LOD	124
5.7.3	Auxiliar de modelação	125
6.	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	127
6.1	Considerações finais	127
6.2	Perspetivas futuras	129
	Referências	131
	Anexos.....	141
	Anexo 1 – Explicação detalhada de algoritmos de modelação	A1.1
	Anexo 2 – Desenhos obtidos a partir do modelo BIM.....	A2.1
	Anexo 3 – Proposta de Plano de Execução BIM	A3.1

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processo de produção de eletricidade de um aproveitamento hidroelétrico (Leitão, 2015a).....	6
Figura 2.2 - Constituintes de um alternador: rotor e estator. Adaptado de (SWCPPhysics30, 2012).....	6
Figura 2.3 - Central junto à barragem - circuito hidráulico curto.	7
Figura 2.4 - Central afastada da barragem - circuito hidráulico longo.	8
Figura 2.5 - Exemplo de solução de central em caverna.....	8
Figura 2.6 - Bombagem de reservatório inferior para superior. Adaptado de (Clean Balance Power, 2012).	9
Figura 2.7 - Barragem do Carrapatelo – gravidade (Douro valley, 2011b).	10
Figura 2.8 - Barragem do rio Gordon (Austrália) – arco (Panoramio, 2011).	10
Figura 2.9 - Barragem do Alto-Lindoso - abóbada de dupla curvatura (Eido do Luou, 2015).	11
Figura 2.10 - Descarregador de cheia de barragem do Baixo Sabor. Adaptado de (EDP, 2015a).....	12
Figura 2.11 - Circuito hidráulico do Baixo Sabor. Adaptado de (EDP, 2012).	12
Figura 2.12 - Construção de chaminé de equilíbrio do aproveitamento hidroelétrico de Canedo (Leitão, 2015a; Renewable Technology, 2015).	13
Figura 2.13 - Barragem da Valeira – central inserida na barragem, adaptado (Douro valley, 2011a).....	14
Figura 2.14 - Barragem de Alqueva - central pé-de-barragem, (EDP, 2009).	14
Figura 2.15 - Central de Lindoso – central de margem (Olhares, 2009).....	15
Figura 2.16 - Central em poço (cima - Bemposta II) e central em caverna (baixo - Picote II). Adaptado de (EDP, 2015c) e (EDP, 2015)......	15
Figura 2.17 - Turbinas Pelton, Francis, Kaplan e Bolbo (da esquerda para a direita). Adaptado de (Landeskraftwerke, 2015) e (Leitão, 2015b).....	16
Figura 2.18 - Desenho 2D da central de Venda Nova III.....	17
Figura 2.19 - BIM nas diferentes fases do ciclo de vida de um edifício (Autodesk, 2015a). ..	19
Figura 2.20 - Modelo do estádio definido por Moretti (PGR, 2010).	21
Figura 2.21 - Modelação de componente mecânica no software CATIA (GrabCAD, 2012)..	22

Figura 2.22 - Programação visual na aplicação Microsoft Visual Programming Language (Microsoft, 2012).	23
Figura 2.23 - Modelação paramétrica com recurso ao Grasshopper (Grasshopper, 2015).	23
Figura 2.24 - Modelação paramétrica de uma ponte com recurso ao Dynamo.....	24
Figura 2.25 - Nó "Point.ByCoordinates".	25
Figura 2.26 - Fios condutores estabelecem o curso do programa visual (The Dynamo Primer, 2015b).....	25
Figura 2.27 - Formato IFC na partilha de informação de um projeto (Intelligent BIM Solutions, 2015)	26
Figura 2.28 - Diferentes níveis de desenvolvimento (Structure magazine, 2013)	28
Figura 2.29 - Modelo tridimensional do aproveitamento hidroelétrico de Tuoba (Bentley, 2012)	31
Figura 2.30 - Integração de diferentes especialidades no aproveitamento hidroelétrico de Huangdeng (Infrastructure, 2015).	32
Figura 3.1 - Representação dos parâmetros em planta (esquerda) e em alçado (direita).	37
Figura 3.2 - Objeto no Revit.....	38
Figura 3.3 - Código Dynamo que leva à criação do objeto.....	39
Figura 3.4 - Cortes da central de Venda Nova III (EDP, 2015d).	40
Figura 3.5- Desenho tridimensional da espiral.....	41
Figura 3.6 - Vista em planta da espiral.....	41
Figura 3.7 - Secção tipo da espiral.	41
Figura 3.8 - Definição dos pontos centrais de cada secção.	42
Figura 3.9 - Definição do ângulo de início da secção da espiral.....	43
Figura 3.10 - Diferentes secções em ambiente Dynamo.	43
Figura 3.11 - Secções após definição de reta entre ponto inicial e final de cada arco.	44
Figura 3.12 - Sólido envolvente da espiral e o respetivo algoritmo em Dynamo	45
Figura 3.13 - Espiral em Revit	45
Figura 3.14 - Algoritmo Dynamo de modelação da espiral.	46
Figura 3.15 - Equipamento no Inventor	47
Figura 3.16 - Corte do tubo de aspiração.	48
Figura 3.17 - Secção-tipo do tubo de aspiração.	48
Figura 3.18 - Definição da origem das coordenadas para o modelo do tubo de aspiração.	49
Figura 3.19 - Parâmetros das diferentes secções do tubo de aspiração.....	49
Figura 3.20 - Pontos que definem cada secção do tubo de aspiração	50

Figura 3.21 - Diferentes secções do tubo de aspiração	51
Figura 3.22 - Sólido do tubo de aspiração, em Dynamo	51
Figura 3.23 - Representação realista do tubo de aspiração, em Revit.....	51
Figura 3.24 - Algoritmo Dynamo de modelação do tubo de aspiração.....	52
Figura 3.25 - Corte do maciço de suporte da turbina, com identificação de algumas das aberturas também modeladas	53
Figura 3.26 - Algoritmo e representação tridimensional do maciço de suporte do alternador.	54
Figura 3.27 - Modelo da Central.	55
Figura 3.28 - Corte tridimensional da central.	56
Figura 3.29 - Tomada de água de Venda Nova III, à esquerda (EDP, 2014).....	57
Figura 3.30 - Zona de entrada do bocal da tomada de água de Venda Nova III (EDP, 2014).	58
Figura 3.31 - Divisão da tomada de água por elementos de modelação: bocal (1), maciço de suporte (2) e túnel de adução (3).	59
Figura 3.32 - Divisão da tomada de água por elementos de modelação: torre de manobra (4) e pórtico de apoio (5).	59
Figura 3.33 - Representação das aberturas do bocal em planta (esquerda) e em corte (direita)	60
Figura 3.34 - Apresentação detalhada da abertura 2, com identificação de alguns parâmetros	61
Figura 3.35 - Superfície, em Dynamo, que define o segmento 2.1.....	62
Figura 3.36 - Algoritmo e sólido que definem o vazio 2.	63
Figura 3.37 - Sólido em Revit resultante da subtração dos vazios exteriores.....	64
Figura 3.38 - Interseção entre os vazios Interior - Corte e Interior - Planta.....	64
Figura 3.39 - Resultado da interseção entre vazios.....	64
Figura 3.40 - Sólido em Revit resultante da subtração dos vazios exteriores e interiores.	65
Figura 3.41 - Parâmetros relativos ao septo	65
Figura 3.42 - Parte do algoritmo que define o sólido correspondente ao septo horizontal.....	66
Figura 3.43 - Representação tridimensional do Bocal no Revit.....	66
Figura 3.44 - Algoritmo Dynamo de modelação do bocal.	67
Figura 3.45 - Representação tridimensional do exterior do maciço que realiza a transição entre o bocal e o maciço confinado pelo terreno.....	68
Figura 3.46 - Secção de base (vermelho) e topo (azul) do maciço confinado pelo terreno	69
Figura 3.47 - Corte tridimensional do maciço de suporte, em Revit	69
Figura 3.48 – Cortes do túnel de adução: longitudinal (esquerda) e pelo eixo (direita).	70

Figura 3.49 - Corte do túnel de adução não explodido (esquerda) e do maciço de suporte (direita).....	71
Figura 3.50 - Diferentes secções do túnel de adução.	72
Figura 3.51 - Parâmetros da transição entre secção retilínea e curvilínea	73
Figura 3.52 - Pontos que definem a secção retangular.....	73
Figura 3.53- Pontos que definem secções de transição	74
Figura 3.54 – Algoritmo Dynamo de modelação do quadrado redondo.....	75
Figura 3.55 - Vista tridimensional da parte inicial do túnel de adução.....	76
Figura 3.56 - Corte da torre de manobra	77
Figura 3.57 - Diferentes secções da torre de manobra	77
Figura 3.58 - Vista tridimensional da torre de manobra após importação para o Revit.....	78
Figura 3.59 - Corte tridimensional da torre de manobra	79
Figura 3.60 - Problema de apresentação na interface entre o túnel de adução e o terreno.	80
Figura 3.61 - Algoritmo Dynamo que permite gerar uma superfície de acordo com o terreno	81
Figura 3.62 - Vista em Revit do prisma sobre o terreno	81
Figura 3.63 - Terreno com túnel.....	82
Figura 3.64 - Modelo da tomada de água, em Revit	83
Figura 3.65 - Corte tridimensional da tomada de água, em Revit.....	83
Figura 3.66 - Bocal, como sólido, no Tekla 21	85
Figura 3.67 - Utilização do comando "Clip Plane" para modelação de armaduras	86
Figura 3.68 - Modelo de armaduras do bocal.....	87
Figura 3.69 - Modelo de armaduras do bocal - vista a jusante.....	88
Figura 3.70 - Modelo de armaduras do bocal - septos vertical e horizontal.	88
Figura 3.71 - Diferentes constituintes da restituição - bocal (1), torre de apoio à movimentação da comporta (2) e túnel (3) - em corte (esquerda) e em planta (direita)	89
Figura 3.72 - Modelo da restituição	90
Figura 3.73 - Corte tridimensional da restituição.....	91
Figura 3.74 - Terreno e falhas geológicas, em Revit.	93
Figura 4.1 – Pormenor da folha em Revit.	96
Figura 4.2 - Cota padrão no Revit.	97
Figura 4.3 - Cota no template da empresa.....	97
Figura 4.4 - Cotagem de distâncias padrão no Revit.....	97
Figura 4.5 - Cotagem de distâncias no template da empresa.	97
Figura 4.6 - Desenho de execução segundo a metodologia tradicional.	98

Figura 4.7 - Desenho obtido a partir do modelo BIM.....	98
Figura 4.8 - Modelação sem cuidados para extração de quantidades.	99
Figura 4.9 - Modelação para extração rigorosa de quantidades.	99
Figura 4.10 - Menu de criação de regra para deteção de colisões, no Tekla BIMsight.	101
Figura 4.11 - Colisão entre diferentes varões no septo vertical.	102
Figura 4.12 - Colisão entre diferentes varões, no septo horizontal.	102
Figura 4.13 - Exemplo de máquina de controlo numérico (Rhocan, 2015).	103
Figura 4.14 - Desenho tradicional.	105
Figura 4.15 - Corte tridimensional obtido a partir do modelo BIM.	105
Figura 4.16 - Visualização de modelo Tekla em obra (Tekla, 2014).	106
Figura 4.17 - Vista frontal da tomada de água.	107
Figura 4.18 - Vista da zona de movimentação das comportas.	108
Figura 5.1 – Constituintes/bases do plano de execução BIM.	111
Figura 5.2 - Relação entre objetivos e usos BIM.	112
Figura 5.3 - Mapeamento de processos (Ultra Consultants, 2015).	115
Figura 5.4 - Estrutura de pastas proposta.	120
Figura 5.5 - Percurso da informação de “Trabalho em Curso” para “Compartilhada”.....	121
Figura 5.6 - Produção de informação para a pasta "Documentação Publicada"	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Excerto do mapa de quantidades gerado.	100
Tabela 5.1 - Definição dos usos BIM.	112
Tabela 5.2 - Exemplo de preenchimento da tabela de definição de usos BIM.....	113
Tabela 5.3 - Tabela de definição de trocas de informação.	117
Tabela 5.4 - Troca de informação correspondente aos dados de entrada para produção de desenhos e mapas de quantidades.....	118
Tabela 5.5 - Código para os diferentes tipos de ficheiro.	123

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
AIA	<i>American Institute of Architects</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
BEP	<i>BIM Execution Plan</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BPMN	<i>Business Process Model and Notation</i>
bSa	<i>buildingSMART alliance</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CN	Controlo numérico
DEB	Direção de Engenharia de Barragens
EDP	Energias de Portugal
GW	<i>Gigawatts</i>
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
LOD	<i>Level of Development</i>
MW	<i>Megawatts</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento Geral

O BIM – ‘*Building Information Modeling*’ - constitui um passo importante no desenvolvimento da indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC). Esta metodologia de projeto consiste na construção virtual de infraestruturas, ou seja, mais do que desenhos, são realizados modelos munidos de informação que oferecem suporte ao projeto ao longo das suas fases, permitindo melhor análise e controlo que os processos manuais (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2011). Esta informação descreve a geometria dos diferentes elementos/objetos envolvidos mas não só, traduzindo também outras propriedades e atributos, sejam eles propriedades físicas, ou relacionados com custo, tempo de construção, etc. O conjunto resultante de informação permite aos utilizadores transcender a visualização tridimensional e explorar também o BIM 4D (planeamento construtivo), o BIM 5D (estimativa de custos), o BIM 6D (análise energética) e o BIM 7D (*facility management*, manutenção/operação), entre outros possíveis usos.

A nível internacional, as empresas que implementaram esta metodologia têm apontado diversos benefícios com a mudança nomeadamente na gestão de cronogramas, estimativas e análises de risco, nos processos colaborativos e numa gestão mais eficaz de instalações. Além destes fatores, o BIM oferece também a oportunidade de testar diversas soluções antes da execução da infraestrutura, visto que a modelação é parametrizada, e permite uma melhor integração das diferentes especialidades de um projeto, podendo facilmente ser detetados e corrigidos problemas relacionados com erros e incompatibilidades.

A nível nacional, já é possível encontrar casos de aplicação da metodologia BIM com sucesso embora, numa análise global, se possa concluir que a implementação e a adoção do BIM segue um lento processo (Lino, Azenha, & Lourenço, 2012). Este lento processo é justificado pelas limitações que as empresas têm encontrado quando tentam implementar esta metodologia, dos quais se podem salientar a inércia à significativa mudança de procedimentos, a limitada capacidade de trabalho em equipa, o investimento adicional em *software* e formação de profissionais competentes, entre outros.

Se, a nível de obras correntes, a adoção do BIM a nível nacional sofre uma lenta implementação, quando se tratam de obras especiais, concretamente de aproveitamentos hidroelétricos, o

número de casos implementados é ainda mais reduzido. No entanto, o BIM tem despertado o interesse de empresas que possuem, operam e mantêm aproveitamentos hidroelétricos, reconhecendo os benefícios a longo prazo do modelo BIM na operação e em intervenções futuras na obra. A nível internacional, já é possível encontrar relatos de projetos que incorporaram modelação BIM em projeto (como por exemplo o aproveitamento hidroelétrico de *Huangdeng*), sendo o modelo explorado para extração de quantidades e ligação entre especialidades. Os balanços destas implementações são positivos, com melhoria na ligação entre especialidades, decréscimo do desperdício de recursos com alterações no projeto, melhor compreensão da obra por parte dos diferentes intervenientes, entre outros. Embora neste tipo de empreendimentos ainda não seja viável a exploração do BIM em todas as suas dimensões, principalmente devido à complexidade das obras, a expectativa é que no futuro se atinjam os mesmos resultados que em obras correntes (Infrastructure, 2015).

1.2 Âmbito e objetivos

No contexto de aproveitamentos hidroelétricos, devido à elevada extensão e complexidade associada a este tipo de empreendimentos, os desafios de natureza técnica à implementação do BIM são agravados relativamente ao cenário correspondente a edifícios correntes, para os quais a generalidade dos esforços BIM tem sido direccionada. Estes desafios procuram ser ultrapassados pelas *software houses* embora, no panorama atual, não seja possível explorar todas as potencialidades do BIM da mesma forma que em estruturas comuns (Infrastructure, 2015). O trabalho da presente dissertação surge da vontade de avaliar estes desafios e desenvolver estratégias para os atenuar/ultrapassar. Assim, pretende-se efetuar a modelação de componentes relevantes destes empreendimentos, nomeadamente a nível de circuito hidráulico (como tomada de água e restituição) e central.

A presente dissertação, desenvolvida em ambiente empresarial no departamento de Fundações e Estruturas da Direção de Engenharia de Barragens da EDP, tem como objetivo a avaliação dos principais desafios anteriormente referidos e permitir demonstrar as vantagens diretas que o departamento em questão pode obter com a implementação de metodologias BIM. Para isso, pretende-se explorar os modelos BIM de forma a obter documentação e informação relevante para obra, tal como desenhos de execução ou mapas de quantidades.

Complementarmente ao trabalho prático de modelação e exploração de modelos, também se pretende explorar a vertente organizacional e de gestão ligadas à implementação do processo

BIM no departamento, designadamente através do Plano de Execução BIM. Muito simplificado, o Plano de Execução BIM, ou BEP - *BIM Execution Plan* - constitui um documento que descreve a estratégia de implementação do BIM num projeto por parte da empresa. Assim, neste documento são definidos aspetos essenciais para a implementação, tais como as responsabilidades dos diferentes membros de equipa, os processos que visam garantir a produção de *deliverables* e outros aspetos organizacionais.

Assim, no final da presente dissertação espera-se ter realizado o modelo BIM de componentes relevantes dos aproveitamentos hidroelétricos em estudo, nomeadamente da central e tomada de água de Venda Nova III e da restituição de Fridão. Estes modelos são obtidos com recurso à plataforma BIM *Revit*, sendo este *software* complementado com a ferramenta de programação visual *Dynamo*, sendo que os modelos devem estar acompanhados de uma biblioteca parametrizada de objetos específicos a este tipo de empreendimentos, de forma a facilitar a sua utilização no projeto de outros aproveitamentos no futuro. Diferentes *deliverables* são obtidos a partir dos modelos virtuais, como desenhos de execução e mapas de quantidades, embora em obras de complexidade e dimensão elevadas a existência do modelo tridimensional assuma uma preponderância notável a nível de compreensão, comunicação e discussão de projetos por parte dos diferentes intervenientes no projeto, pretendendo-se também discutir a utilização dos modelos tendo em conta essa finalidade. Pretende-se ainda promover a implementação de processos BIM no departamento através da proposta de Plano de Execução BIM e complementar este com documentos que se entendem relevantes no apoio a colaboradores do departamento, tais como procedimentos para controlo de qualidade de modelos BIM, documento de especificações de níveis de desenvolvimento (LOD) e um auxiliar de modelação para os *softwares* explorados. No final do presente trabalho, espera-se ter identificado e ultrapassado os principais desafios à implementação do BIM no projeto de aproveitamentos hidroelétricos, comprovando as vantagens que se obtêm com a mudança de paradigma.

1.3 Organização da Dissertação

A estrutura da dissertação desenvolve-se em seis capítulos, sendo o primeiro a presente introdução.

No **capítulo 2** é apresentada uma revisão bibliográfica relativa a obras hidroelétricas, BIM, bem como à integração destes dois setores. Relativamente a obras hidroelétricas são apresentados os princípios e aspetos gerais sobre o funcionamento de um aproveitamento, as suas principais

componentes e é ainda discutida a metodologia atual de elaboração e partilha de projeto. São depois apresentados conceitos relacionados com o BIM, levantados casos de implementação desta metodologia no projeto de obras hidroelétricas e são avaliados os principais desafios a esta implementação.

O **capítulo 3** é dedicado à descrição da geometria, estratégias e processos de modelação de diferentes componentes de um aproveitamento hidroelétrico. Assim são discutidas as modelações da central e da tomada de água (incluindo armaduras do bocal e terreno) de Venda Nova III e restituição de Fridão. É ainda descrito o processo de obtenção da ferramenta que permite a modelação de falhas geológicas na plataforma BIM adotada (*Revit*).

No **capítulo 4** são explorados/discutidos usos do BIM no contexto das componentes modeladas, nomeadamente para geração de peças desenhadas, extração de mapas de quantidades, deteção de colisões e CAD/CAM, sendo estes dois últimos relativos ao modelo de armaduras. É ainda discutida a importância do modelo tridimensional na compreensão, comunicação e discussão do projeto e, por último, a geração de conteúdo multimédia a partir do modelo BIM.

Os principais aspetos da proposta de Plano de Execução BIM são relevados no **capítulo 5**. Neste são discutidos os aspetos tidos em conta na definição dos principais campos do plano (objetivos e usos BIM, membros de equipa e responsabilidades, mapeamento de processos e trocas de informação) e ainda dos documentos de apoio à implementação, nomeadamente a proposta de controlo de qualidade de modelos, documento de especificações LOD e auxiliar de modelação.

Por último, no **capítulo 6** são apresentadas as conclusões da dissertação e ainda sugeridos futuros desenvolvimentos.

2. OBRAS HIDROELÉTRICAS E BIM

2.1 Projeto de obras hidroelétricas

2.1.1 Aspetos gerais sobre o funcionamento de um aproveitamento hidroelétrico

Há milhares de anos que a energia da água é aproveitada para diferentes fins, dependendo das condições sociais e políticas dos tempos (Gulliver & Arndt, 2003). A civilização Grega, por exemplo, usava a energia da água para moer trigo, transformando-o em farinha (Brookshier, 2004). Ao longo dos tempos, outros usos foram obtidos a partir da energia da água tais como o auxílio na produção de tecidos, a moldagem de ferro e até a produção de eletricidade (Cleveland & Morris, 2014).

A eletricidade é gerada por aproveitamento do ciclo da água cuja força motriz é a radiação solar. A radiação solar atinge a superfície da Terra e aquece as superfícies livres de água (oceanos, rios, lagos, etc), o que intensifica a evaporação de vapor de água. Na atmosfera este vapor de água condensa e leva à formação de nuvens, que por sua vez podem gerar precipitação quando se reúnem as condições necessárias, nomeadamente ao nível da temperatura. Parte da água que precipita escorre novamente até ao oceano, por influência da gravidade, gerando os rios (Killingtonveit, 2014). O Sol, tal como referido anteriormente, é o grande motor deste ciclo, o que justifica que a energia associada a este ciclo seja renovável e sustentável. No entanto, a grande variabilidade deste ciclo (períodos de cheias e secas) pode levar à necessidade de construção de barragens, com o objetivo de formar uma reserva de água, permitindo que a energia potencial acumulada no reservatório seja aproveitada de acordo com as necessidades da sociedade (Gulliver & Arndt, 2003).

Um aproveitamento hidroelétrico tem como objetivo o aproveitamento da energia potencial de uma massa de água, num dado desnível topográfico, transformando-a em energia elétrica. Assim, as zonas preferenciais para a produção de energia são zonas montanhosas, zonas de elevada pluviosidade e bacias hidrográficas de maior dimensão (Leitão, 2015a).

O processo para produção de eletricidade baseia-se na conversão sucessiva de energia de acordo com o processo ilustrado de forma esquemática na Figura 2.1. A energia potencial gravítica da água armazenada pela barragem é convertida em energia cinética com o seu escoamento para níveis inferiores onde se encontra uma turbina, na central. A passagem da água na turbina move

as lâminas desta em um movimento rotacional, ou seja, há conversão para energia mecânica. Já a energia mecânica é convertida em energia elétrica através da ação do alternador, que é constituído por dois elementos: o rotor e o estator. O movimento do rotor é gerado pela movimentação da lâmina das turbinas, sendo que o movimento relativo entre o rotor e o estator leva à geração de eletricidade. Este processo é demonstrado na Figura 2.2 A tensão é depois elevada por transformadores de forma a permitir o transporte da energia (Bhatia, 2014).

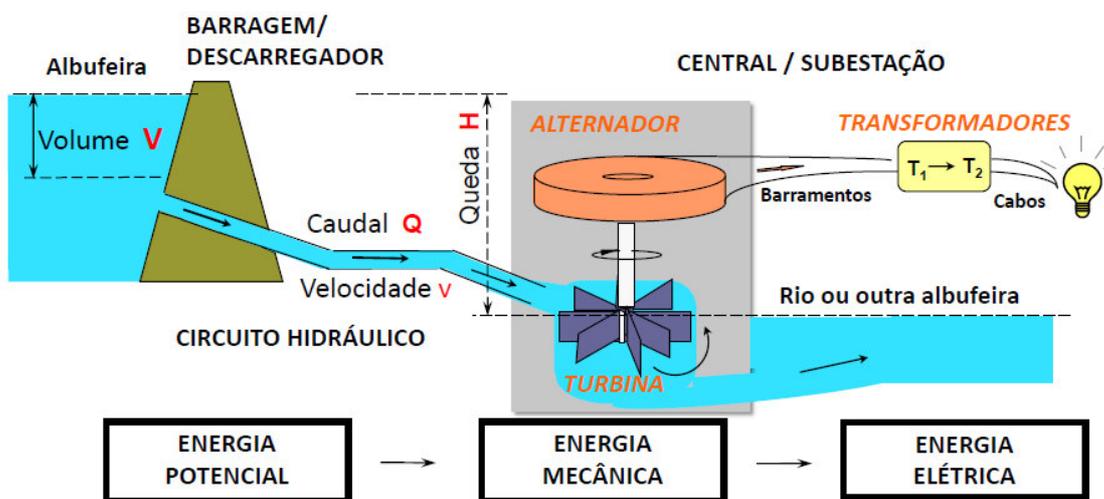


Figura 2.1 - Processo de produção de eletricidade de um aproveitamento hidroelétrico (Leitão, 2015a).

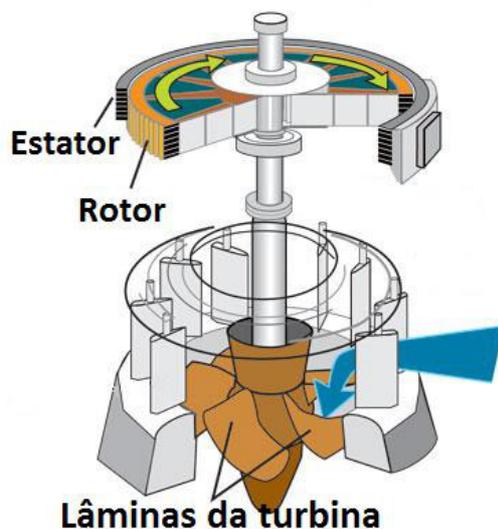


Figura 2.2 - Constituintes de um alternador: rotor e estator. Adaptado de (SWCPPhysics30, 2012).

Um aproveitamento hidroelétrico é constituído por diferentes componentes que podem ser classificadas de acordo com o objetivo em dois grupos: obras de retenção e obras para produção.

Nas obras de retenção incluem-se a barragem e órgãos de segurança e exploração, tais como descarregadores de cheias e de fundo, dispositivos para caudal ambiental ou transposição de peixes, entre outros. As obras de produção compreendem o circuito hidráulico (inclui tomada de água, túnel de adução, túnel de restituição, restituição, entre outros), a central (onde se produz a energia) e subestação (onde se encontram os transformadores) (Gulliver & Arndt, 2003). Os diferentes constituintes indicados serão apresentados de forma detalhada na secção 2.1.2.

A dimensão, o arranjo e tipologia das diferentes componentes supracitadas, variam bastante de aproveitamento para aproveitamento, e leva a que hajam múltiplas combinações possíveis em função das condições naturais, de fatores técnicos, económicos e ambientais e dos riscos envolvidos (Brookshier, 2004). Apesar disso, há determinados arranjos que são mais frequentes, sendo de seguida enumerados.

Central junto à barragem - circuito hidráulico curto

A colocação da central junto à barragem constitui a solução técnica mais elementar de aproveitamento do desnível da reserva de água, sendo a queda essencialmente gerada pela barragem. Independentemente da dimensão dos empreendimentos, este tipo de aproveitamento prevalece desde os primeiros tempos da hidroeletricidade. Um esquema deste tipo de solução é apresentado na Figura 2.3.

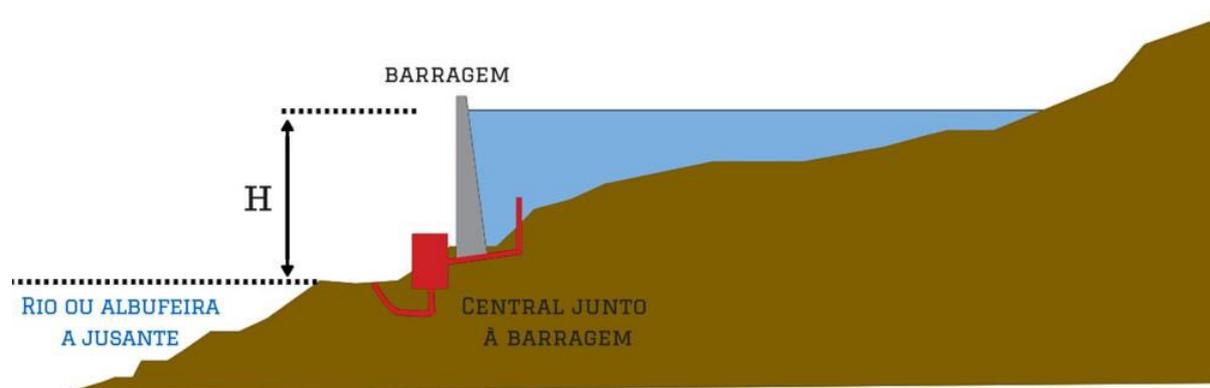


Figura 2.3 - Central junto à barragem - circuito hidráulico curto.

Central afastada da barragem – circuito hidráulico longo

O interesse em aproveitar desníveis naturais a jusante da barragem levou a soluções técnicas de circuito hidráulico extenso, em que a central se encontra afastada da barragem, possibilitando um incremento da queda e, conseqüentemente, da energia potencial disponível para produção

de eletricidade (Ramos & Almeida, 2000). Um exemplo deste tipo de solução técnica é esquematizado na Figura 2.4.

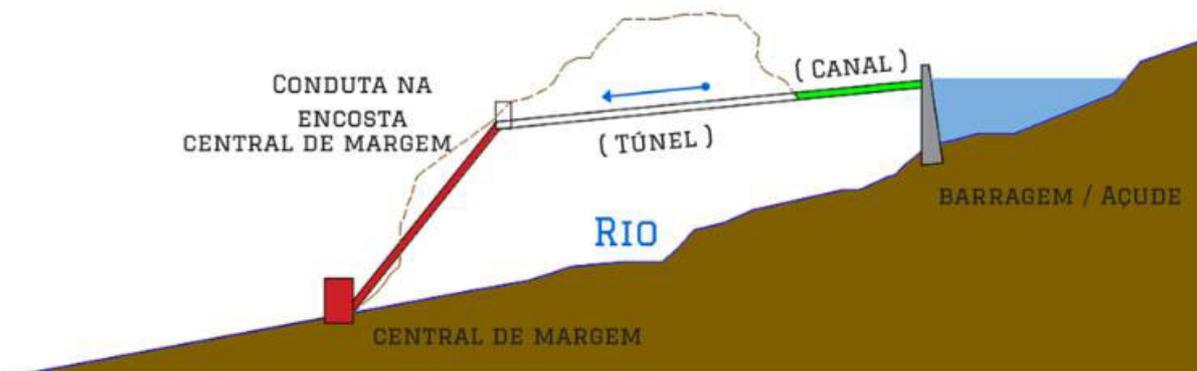


Figura 2.4 - Central afastada da barragem - circuito hidráulico longo.

Central em caverna – circuito hidráulico subterrâneo

A progressiva otimização dos aproveitamentos hidroelétricos levou à crescente utilização de centrais e circuitos hidráulicos subterrâneos. Esta solução permite que a queda sofra um aumento significativo, podendo este incremento ser até superior à altura da barragem (Leitão, 2015a). Assim, é possível aproveitar a queda proporcionada pela barragem, o desnível natural a jusante desta e ainda a distância relativamente à superfície a que a central se encontra. Um exemplo de solução técnica com central subterrânea é apresentado na Figura 2.5.

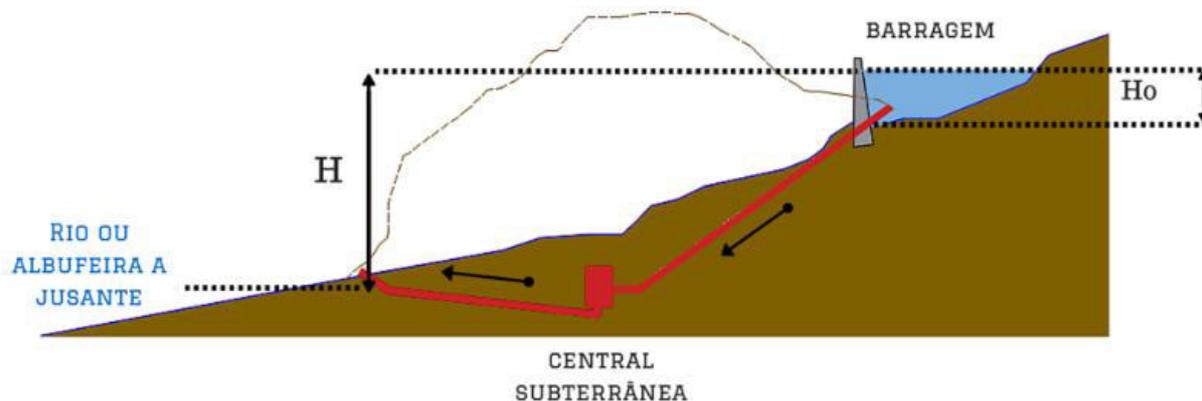


Figura 2.5 - Exemplo de solução de central em caverna.

O consumo de energia elétrica por parte da população apresenta uma grande variabilidade durante o dia (Novak, Moffat, Nalluri, & Narayanan, 2007). Assim, durante o período noturno, há uma significativa redução de consumo. Este aspeto levou ao desenvolvimento de centrais reversíveis, como é o caso do reforço de potência de Venda Nova III. Neste sistema, durante as horas de menor consumo energético por parte da população, a água é bombada de um

gravidade, arco ou abóbada. É também possível uma barragem conjugar diferentes tipos estruturais, sendo classificada como mista (Breeze, 2014). As barragens gravidade, em que o seu peso próprio é responsável pela estabilidade relativamente à ação da água, apresentam um eixo retilíneo ou, no caso de ser curvo, com elevado raio de curvatura (ver Figura 2.7) (Meliço, 2010). As barragens em arco (ver Figura 2.8) não possuem curvatura vertical, embora haja um espessamento dos arcos em profundidade e as barragens em abóbada (ver Figura 2.9), com dupla curvatura, apresentam um funcionamento monolítico, descarregando os impulsos ao longo do seu contorno.



Figura 2.7 - Barragem do Carrapateiro – gravidade (Douro valley, 2011b).



Figura 2.8 - Barragem do rio Gordon (Austrália) – arco (Panoramio, 2011).



Figura 2.9 - Barragem do Alto-Lindoso - abóbada de dupla curvatura (Eido do Luou, 2015).

Com o objetivo de descarregar as aflúências não armazenáveis e dissipar parte da energia envolvida no processo, normalmente em períodos de cheia, as barragens contêm descarregadores de cheia (Leitão, 2015b). Estes têm, em geral, um máximo de três elementos, identificados na Figura 2.10:

- estrutura de entrada, com ou sem comportas;
- trecho intermédio, com o objetivo de transporte de água;
- estrutura final, para dissipação de energia.

A barragem pode também estar provida com descarga de fundo, no caso de se pretender esvaziar a albufeira ou proceder à remoção de sedimentos.

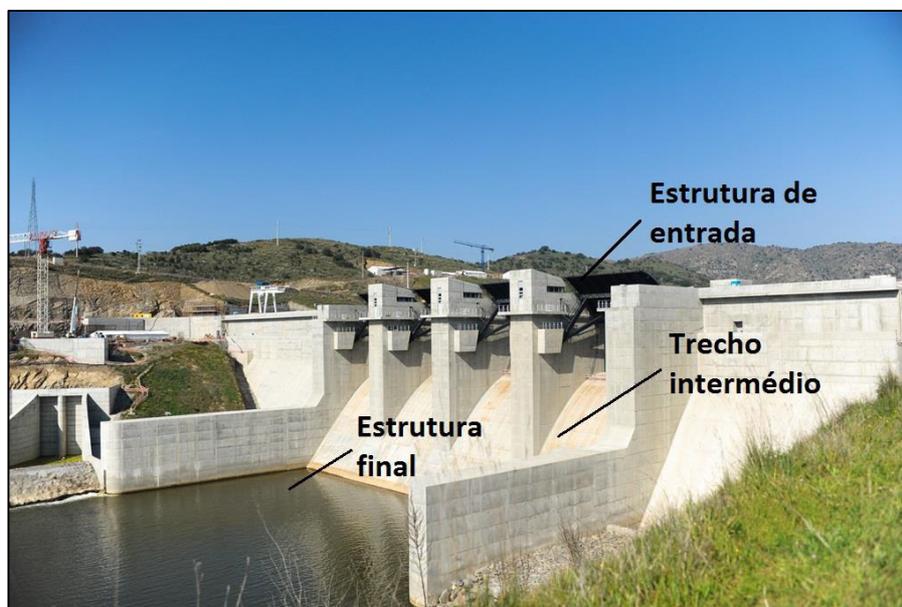


Figura 2.10 - Descarregador de cheia de barragem do Baixo Sabor. Adaptado de (EDP, 2015a).

Obras de produção: circuito hidráulico, central e subestação

Relativamente ao circuito hidráulico, este é constituído pela tomada de água, túnel de adução, túnel de restituição e restituição, conforme representado no esquema da Figura 2.11. A tomada de água constitui a componente responsável pela captação da água, dirigindo-se esta posteriormente para a central, através do túnel de adução. Após passagem na turbina, a água dirige-se para a restituição, através do túnel de restituição. A extensão do circuito hidráulico pode apresentar variações significativas de aproveitamento para aproveitamento, desde dezenas de metros até vários quilómetros.

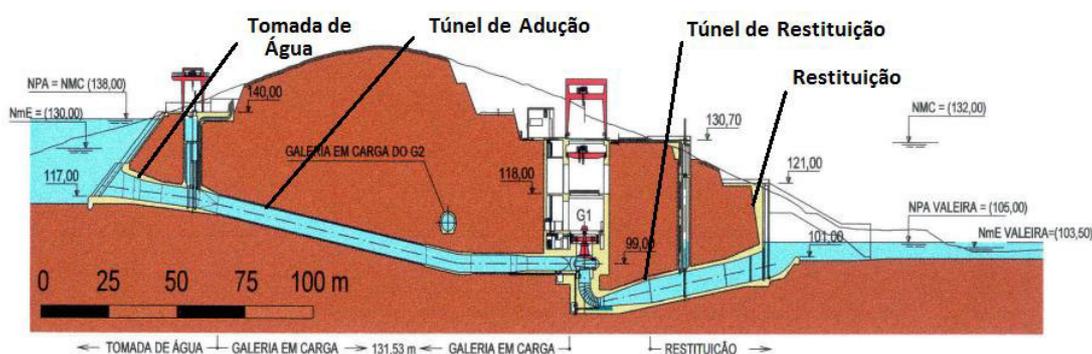


Figura 2.11 - Circuito hidráulico do Baixo Sabor. Adaptado de (EDP, 2012).

O circuito hidráulico pode ainda conter outros elementos, como chaminés de equilíbrio ou desarenadores. As chaminés de equilíbrio são estruturas construídas no contexto de circuitos hidráulicos extensos. Estas têm a forma de reservatórios abertos, ou seja, com superfície livre, e existem em pontos estratégicos do circuito hidráulico, sujeitos ao regime transitório, tendo como objetivo a proteção da central e do circuito contra o choque hidráulico (Macedo, 2012). As chaminés de equilíbrio podem, então, encontrar-se a montante da Central, a jusante da Central ou a montante e jusante simultaneamente. No entanto, se a Central ficar próxima da tomada ou restituição, uma das chaminés pode ser dispensada. Na Figura 2.12 é apresentada a construção de uma estrutura deste tipo. Já o desarenador tem como objetivo impedir que partículas sólidas de dimensão relevante, arrastadas pela água, atinjam a central. Deve ser instalado caso seja previsível o arrasto de partículas, seja pela natureza das águas onde o aproveitamento hidroelétrico é instalado ou pelo facto de o túnel de adução não ser revestido com betão. O impedimento de que as partículas atinjam a central é conseguido por um aumento significativo do diâmetro do túnel de adução, que leva a uma redução brusca da velocidade de escoamento e, assim, á deposição das partículas. O desarenador, então, não é mais do que alargamento significativo do túnel de adução.



Figura 2.12 - Construção de chaminé de equilíbrio do aproveitamento hidroelétrico de Canedo (Renewable Technology, 2015).

A central, local onde ocorre a produção de eletricidade, pode, de acordo com a sua localização relativa, ser dividida em dois grupos: as centrais a céu aberto e as centrais subterrâneas. As centrais a céu aberto podem estar inseridas na própria barragem (ver Figura 2.13), podem ser pé-de-barragem (ver Figura 2.14) ou ainda de margem (ver Figura 2.15). Já as centrais

subterrâneas, representadas esquematicamente na Figura 2.16, podem ser em poço (parte superior da central em contacto com a superfície) ou em caverna (central totalmente sob o solo). Já a subestação, que engloba os transformadores (onde a tensão é elevada) e o posto de corte (onde se secciona a ligação dos transformadores à rede elétrica) podem ser superficiais ou com os transformadores em caverna e o posto de corte à superfície (Leitão, 2015b).

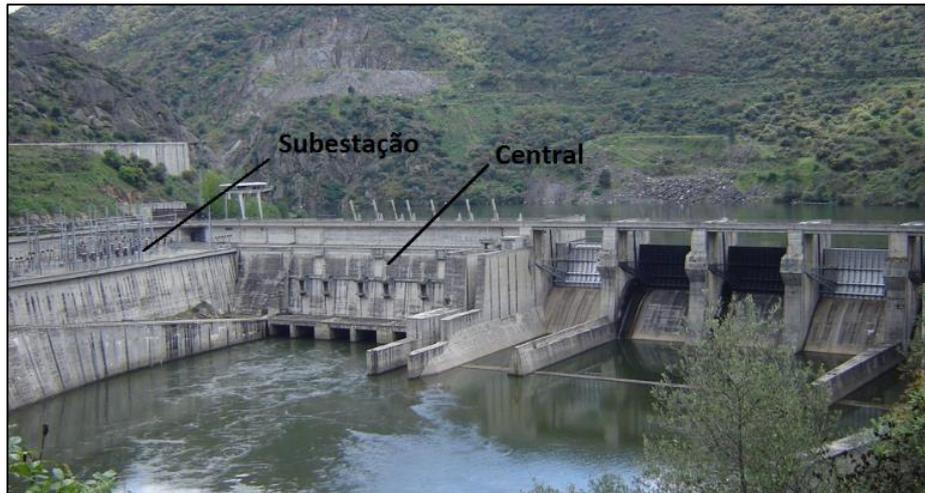


Figura 2.13 - Barragem da Valeira – central inserida na barragem, adaptado (Douro valley, 2011a).



Figura 2.14 - Barragem de Alqueva - central pé-de-barragem, (EDP, 2009).



Figura 2.15 - Central de Lindoso – central de margem (Olhares, 2009).

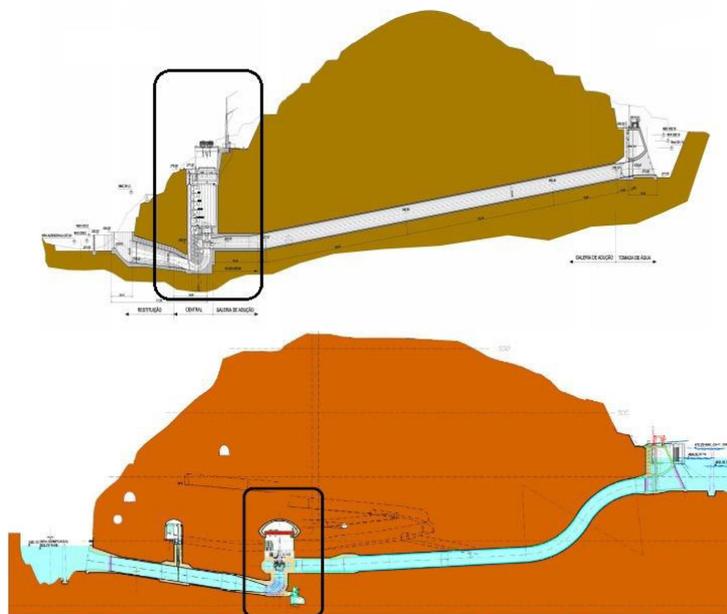


Figura 2.16 - Central em poço (cima - Bemposta II) e central em caverna (baixo - Picote II).
Adaptado de (EDP, 2015c) e (EDP, 2015).

Em função do caudal e queda disponíveis, é necessário, também, selecionar a turbina a instalar na Central, de forma a maximizar o rendimento do aproveitamento hidroelétrico (Gulliver & Arndt, 2003). Os principais tipos de turbinas estão representados na Figura 2.17 e são:

- turbinas Pelton;
- turbinas Francis;
- turbinas Kaplan;

- turbinas Bolbo.

As turbinas Pelton têm como domínio de aplicação quedas elevadas, trabalhando desafogadas e com descarga livre, não possuindo, então, tubo de aspiração. Para quedas médias devem ser selecionadas turbinas do tipo Francis, podendo estas ser ou não reversíveis (isto é, funcionar em regime de bombagem). Trabalham em imersão e possuem uma câmara de entrada que é, normalmente, em formato de espiral, um distribuidor de pás móveis para regulação do caudal turbinado, uma roda e um tubo de aspiração. No caso de quedas baixas, as turbinas do tipo Kaplan revelam maior eficiência, trabalham sob imersão, e possuem um distribuidor para regular o caudal. As turbinas do tipo Bolbo, que também funcionam sobre imersão, são indicadas para quedas muito baixas (Brookshier, 2004).

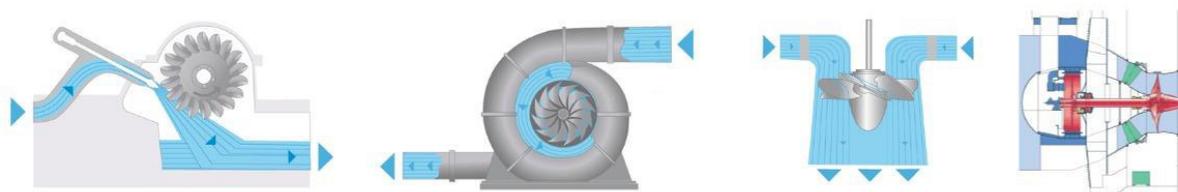


Figura 2.17 - Turbinas Pelton, Francis, Kaplan e Bolbo (da esquerda para a direita). Adaptado de (Landeskraftwerke, 2015) e (Leitão, 2015b).

2.1.3 Metodologia atual de trabalho no projeto de estruturas de aproveitamentos hidroelétricos

São vários os intervenientes na elaboração do projeto de estruturas de aproveitamentos hidroelétricos. O departamento de Estruturas e Geotecnia de uma empresa tem, em geral, como principal responsabilidade o dimensionamento estrutural das várias componentes do aproveitamento, de medidas de tratamento de fundações, do projeto de escavações, entre outros, colaborando diretamente com diferentes entidades ao longo deste processo. Assim, são frequentes as interações com o fornecedor de equipamentos (como turbina), os responsáveis pela Arquitetura, os departamentos de Hidráulica e outras especialidades, bem como consultores e empreiteiros. Estas interações podem ocorrer de variadas formas, desde telefonemas a *e-mails* e atualmente, na grande maioria das empresas, o projeto é elaborado e partilhado entre os diferentes intervenientes recorrendo a metodologias de trabalho e colaboração designadas como tradicionais, ou seja, recorrendo a desenho assistido por computador (CAD), baseado em representações bidimensionais - Ver Figura 2.18 - e munidos simplesmente de informação geométrica sendo incapazes de atribuir informação semântica

relevante aos elementos desenhados. Os empreendimentos são, então, definidos a partir de pontos, linhas e áreas dispostos em vistas independentes.

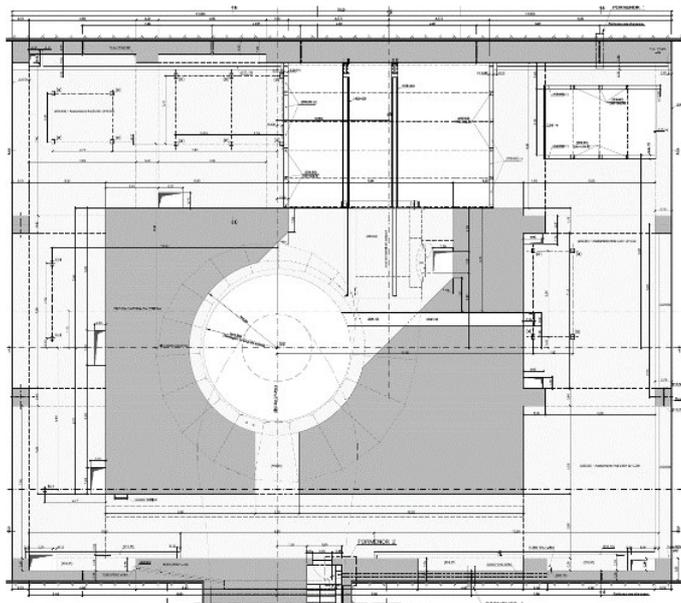


Figura 2.18 - Desenho 2D da central de Venda Nova III.

No entanto, e elaborando projeto por esta via tradicional, há diferentes aspetos que constituem limitações de trabalho. A ligação entre diferentes especialidades, como fornecedor de equipamentos e instalações hidráulicas, constitui um processo complicado de realizar com eficiência por esta metodologia de trabalho, sendo por vezes necessário o esclarecimento de dúvidas à equipa em obra, sob pena de se verificarem colisões entre estrutura e equipamentos. Também a dificuldade de compreensão da obra por parte dos diferentes intervenientes, e tendo como particularidade o facto de se tratarem de obras especiais e complexas, pode, por um lado, conduzir a erros construtivos por parte do empreiteiro e, por outro, limitar a capacidade de otimização estrutural pela equipa de projeto. O processo de elaboração de projetos de diferentes especialidades é também sequenciado, por exemplo, a equipa de projeto de instalações hidráulicas tem, em geral, de esperar que a equipa de projeto de estruturas realize a conceção estrutural, ou seja, este fator pode conduzir a tempos de espera entre as diferentes equipas.

Alguns dos fatores referenciados anteriormente conduzem diversas vezes a reformulações de projeto, o que constitui um problema proeminente nos projetos de construção (Love, Edwards, Han, & Goh, 2011). Estas reformulações traduzem-se também em alterações em um número elevado de desenhos e podem levar a extensões de prazos, recursos e custos e à redução da qualidade do projeto (Love & Edwards, 2004; Love, Edwards, Watson, & Davis, 2010). O impacto destas reformulações é agravado quando se tratam de projetos de aproveitamentos

hidroelétricos, devido à elevada extensão e complexidade que caracterizam estas obras. Assim, e neste tipo de projetos, uma reformulação pode conduzir a alterações em várias dezenas de desenhos e a um elevado investimento em retrabalho por parte da empresa.

Em suma, e partindo da premissa que não há metodologias de trabalho ideais, verifica-se que a tradicional apresenta um défice a nível de colaboração e partilha de informação, o que pode levar a erros e omissões de projeto (Josephson & Hammarlund, 1999).

2.2 BIM

2.2.1 Enquadramento

Atualmente, a indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) enfrenta desafios e mudanças tecnológicas relevantes, onde se incluem a proliferação da informação, a aplicação de práticas sustentáveis e a necessidade de melhoria de produtividade e rendimento, sobretudo através da aplicação de práticas LEAN (Becerik-Gerber & Kensek, 2010). De facto, esta indústria, caracterizada por ser habitualmente conservadora, está gradualmente a optar por soluções modernizadas e automatizadas (Lino *et al.*, 2012). Um instrumento com papel fundamental nesta mudança é o uso de tecnologias de informação, tendo os engenheiros e arquitetos do século XXI de estar preparados para esta constante evolução tecnológica, partilhando informação e promovendo a comunicação entre diferentes equipas e especialidades (Becerik-Gerber & Kensek, 2010). Como resposta a estes desafios, estamos a testemunhar mudanças a nível da colaboração, representação (passando de duas para três dimensões), análise, critérios tecnológicos (com o dono de obra a definir entregas melhoradas) e fabricação (sendo esta cada vez mais automática) (Autodesk, 2008). Assim, durante a última década, uma grande mudança da indústria foi a proliferação da metodologia *Building Information Modeling* (BIM) como o novo paradigma de CAD e colaboração, transversal a todas as fases de um projeto/construção e todos os correspondentes intervenientes (Bryde, Broquetas, & Volm, 2013; Goedert & Meadati, 2008).

Muito simplificada, poderá entender-se o BIM como uma tecnologia de modelação (tridimensional e paramétrica) associada a um conjunto de processos e que permite produzir, comunicar e analisar modelos de uma construção (Becerik-Gerber & Kensek, 2010). Fundamentalmente, o conceito BIM assenta numa metodologia de partilha de informação entre os diferentes intervenientes e as diferentes especialidades, durante as fases do ciclo de vida de

um edifício – desde o projeto à desconstrução, ver Figura 2.19 – e que se materializa na existência de um modelo tridimensional que corresponde à construção virtual desse mesmo edifício. Este modelo tridimensional paramétrico encontra-se, além de informação geométrica, munido de informação não geométrica como propriedades e atributos, sejam elas propriedades mecânicas, informações de fornecedor (no caso de equipamentos), esforços, prazos, custos de construção, entre outros (Lino *et al.*, 2012).



Figura 2.19 - BIM nas diferentes fases do ciclo de vida de um edifício (Autodesk, 2015a).

Uma das principais diferenças entre BIM e CAD 2D é que, tal como referido anteriormente, o segundo descreve o edifício através de vistas independentes como plantas, corte, alçados e pormenores (Azhar, 2011). Em CAD, qualquer alteração no projeto terá de ser repercutida manualmente em todos os desenhos, ao contrário do modelo BIM, em que os desenhos obtidos a partir deste se atualizam automaticamente (CRC Construction Innovation, 2007). O facto de o modelo BIM ser rico em informação permite aos utilizadores transcender as 3 dimensões do espaço euclidiano, sendo genericamente aceite a designação de 4D quando o modelo BIM aborda o planeamento construtivo, 5D quando ao planeamento de aliã estimativas de custos, 6D quando o modelo é utilizado para fins de manutenção/operação do edifício e, finalmente, 7D quando se abordam questões no âmbito da sustentabilidade. A produção e atualização de desenhos, a extração automática de quantidades e materiais, o facto de permitir análises estruturais e energéticas e a deteção automática de incompatibilidades e conflitos quando se cruzam especialidades são algumas das vantagens desta metodologia comparativamente com a tradicional. Nas sub-secções que se seguem são abordados alguns aspetos chave relacionados

com as metodologias BIM, nomeadamente: a modelação paramétrica, a interoperabilidade, o conceito LOD e os sistemas de classificação.

2.2.2 Modelação Paramétrica

- Considerações gerais

Nas últimas décadas, o uso de computadores afetou profundamente metodologias de trabalho nas diversas áreas, incluindo a Engenharia, promovendo desenvolvimentos substanciais (Nowacki, 2010).

Conjugando a capacidade dos computadores com as características específicas de elementos que se pretendem modelar e que são diversas vezes modificadas, chega-se à modelação paramétrica, em que dimensões e comportamentos de elementos são dependentes de variáveis, denominados parâmetros (Florio, 2011). A modelação paramétrica não representa objetos com propriedades e geometria fixas. Representa, sim, objetos através de parâmetros e regras que determinam a geometria bem como propriedades e características não-geométricas. Os parâmetros e regras podem ser expressões que se relacionam com outros objetos, permitindo que estes se atualizem automaticamente conforme o contexto definido pelo utilizador (Eastman *et al.*, 2011). Assim, ao criar/alterar um elemento, não se atua apenas sobre elementos geométricos como pontos e linhas mas sim sobre parâmetros que definem a forma e dimensões de determinada geometria (Florio, 2011). Há, então, parâmetros independentes e que são os dados de entrada do modelo, enquanto outros atributos são definidos em função dos primeiros. Esta relação mantém-se sempre que os dados de entrada são alterados (Turrin, Buelow, & Stouffs, 2011).

A formulação de relações paramétricas na modelação de sólidos exige um pensamento lógico, associativo e explícito sobre processos iterativos. Isto leva a um maior esforço por parte da equipa modelação, mas pode ser visto como um investimento realizado numa fase inicial que mais tarde terá retorno.

Sob o ponto de vista da Arquitetura, a modelação paramétrica permite avaliar o efeito que determinados parâmetros têm sobre a estética da estrutura e, sob o ponto de vista da Engenharia, permite rápidas adaptações em função do resultado de análises estruturais, promovendo uma otimização da geometria (Turrin *et al.*, 2011). Em suma, a modelação paramétrica permite uma melhor adaptação da geometria em função do contexto em que está inserida, facilita a perceção da estrutura e reduz o tempo perdido na sua alteração e revisão (Aish & Woodbury, 2005).

- Perspetiva histórica

O termo 'paramétrico' tem origem na Matemática (Davis, 2013). A sua incorporação na construção é debatida, embora se acredite que tenha origem nos anos 40, pelo arquiteto italiano Luigi Moretti. Este escreveu sobre Arquitetura paramétrica, que definia como o estudo da Arquitetura com o objetivo de definição de relações entre dimensões e determinados parâmetros. Moretti definiu a forma das bancadas de um estádio com base em 19 parâmetros, que incluíam, entre outros, a exposição solar e o custo de betão (ver Figura 2.20) (Davis, 2013).



Figura 2.20 - Modelo do estádio definido por Moretti (PGR, 2010).

A incorporação deste conceito em ferramentas informáticas de modelação aconteceu décadas depois, no ano de 1988, com a criação do primeiro *software* de modelação paramétrica de sólidos, o Pro/Engineer (PTC, 2015), atualmente denominado Creo Parametric. Já a *Dassault Systèmes* incorporou estas funcionalidades em 1993, no *software* CATIA, v4 (Dassault Systemes, 2003).

As indústrias aeroespaciais e mecânicas foram as primeiras a perceber os benefícios da atribuição de parâmetros a dimensões. Assim, em 1994, o Boeing 777 foi modelado parametricamente, através do *software* CATIA (Shepherd, 2011). Na Figura 2.21 é apresentada a modelação de uma componente mecânica neste *software*.

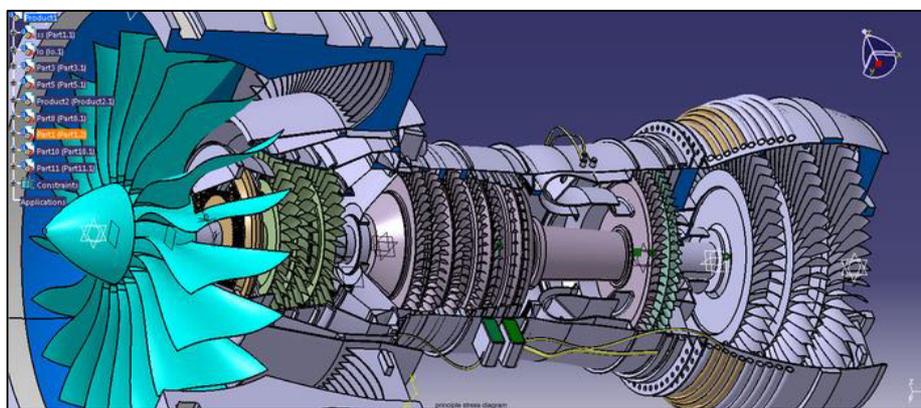


Figura 2.21 - Modelação de componente mecânica no software CATIA (GrabCAD, 2012).

Apesar do aparecimento dos *softwares* anteriormente referidos, a indústria AEC manteve-se conservativa e, nesta indústria, o uso de CAD consistia meramente na mimetização dos processos tradicionais em estirador passados para o domínio digital. Contudo, o desenvolvimento tecnológico e de *software* aliado ao facto de uma nova geração de engenheiros e arquitetos cada vez mais familiarizados com o conceito, levaram ao advento da adoção da modelação paramétrica por parte da indústria AEC (Shepherd, 2011).

Assim, em 2005, percebendo os benefícios que esta tecnologia poderia transmitir à indústria AEC, e baseando-se no CATIA v5, a *Gehry Technologies* criou, em parceria com a *Dassault Systèmes*, o *software Digital Project* (Gehry Technologies, 2015). Outros fornecedores de produtos CAD, como a *Bentley* e a *AutoDesk*, começaram a incorporar capacidades de modelação paramétrica nos seus *softwares* (Shepherd, 2011). A *AutoDesk* comprou o *software Revit* em 2002 e incorporou modelação paramétrica a partir da versão de 2010 do *AutoCad* (Davis, 2013). Os produtores de *software* BIM predefinem uma base de classes de objetos para os utilizadores, que podem ser modificadas ou estendidas. A classe de um objeto permite a criação de instâncias desse mesmo objeto, com formas que variam, dependendo dos valores dos parâmetros e da relação com outros objetos (Eastman *et al.*, 2011).

De forma a permitir ao utilizador embutir funções paramétricas e automação de tarefas, os produtos CAD foram estendidos através da interface de programação (API), podendo o utilizador aceder a parte do algoritmo do *software* e programar novas ferramentas.

A programação textual não sofreu grande evolução ao longo dos últimos anos. Tem havido no entanto uma disseminação cada vez mais alargada da programação visual (Davis, 2013), ilustrada de forma simplificada na Figura 2.22. Nesta metodologia de programação o código é representado não sob a forma de texto, mas sob a forma de diagramas. Esta forma de programar

permite facilitar a entrada na programação a ‘não especialistas’ por ser mais intuitiva e acaba por dar uma maior liberdade ao utilizador na modelação paramétrica, permitindo a criação de objetos de geometria complexa.

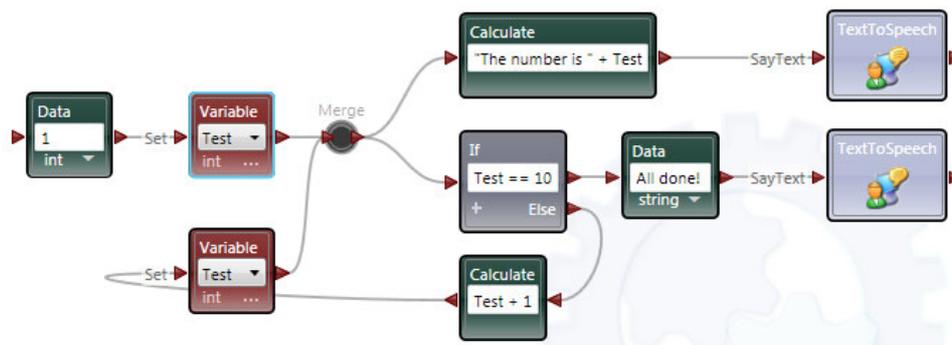


Figura 2.22 - Programação visual na aplicação Microsoft Visual Programming Language (Microsoft, 2012).

Robert Aish, quando trabalhava para a Bentley, desenvolveu o software *Generative Components*, que permitia a modelação paramétrica de objetos com recurso a algoritmos de programação visual, em 2003. Semelhante a este, David Rutten, da Robert McNeel & Associates, desenvolveu um ambiente de programação visual para o Rhino 3D, software de modelação de sólidos. Em 2007 é então lançado o Grasshopper, que é um plug-in de programação gráfica para o Rhino 3D, apresentado na Figura 2.23.

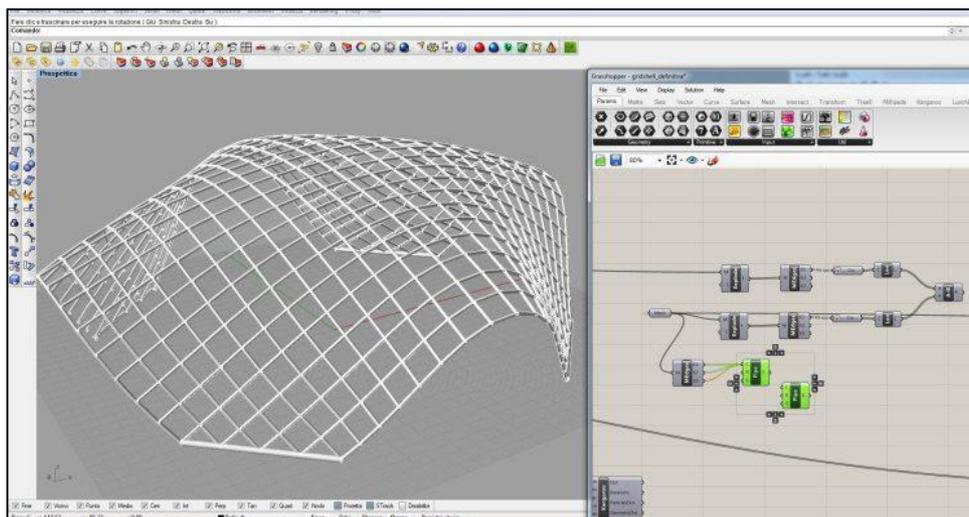


Figura 2.23 - Modelação paramétrica com recurso ao Grasshopper (Grasshopper, 2015).

Já em 2008, Robert Aish (o criador do software *Generative Components*), agora a trabalhar para a Autodesk, embarcou num projeto ambicioso para a criação de uma nova linguagem de

programação visual escrita para arquitetos e engenheiros de estruturas, a *DesignScript* (Dynamo BIM, 2014a). Esta linguagem está presente a partir da 7ª versão da ferramenta *Dynamo*.

A ferramenta *Dynamo* é gratuita, usa programação visual e o seu desenvolvimento é apoiado pela *Autodesk* (Autodesk, 2014). Esta ferramenta constitui um *add-in* para *softwares* da *Autodesk*, como o *Revit* e o *Robot Structural Analysis*, e permite manipular a sua base de dados de uma forma que a interface do utilizador não permite. O *Dynamo* acede, assim, à API destes *softwares* e executa tarefas que anteriormente só poderiam ser realizadas com programação de uma linguagem compatível com .NET, como Visual Basic e C#. O *Dynamo* permite, simplificadaamente, estender as funcionalidades do *Revit* através de programação visual, constituindo uma alternativa mais intuitiva para o utilizador comum do que o recurso direto à API. Uma das funcionalidades que o *Dynamo* vem potenciar é a modelação paramétrica de sólidos de geometria complexa (ver Figura 2.24).

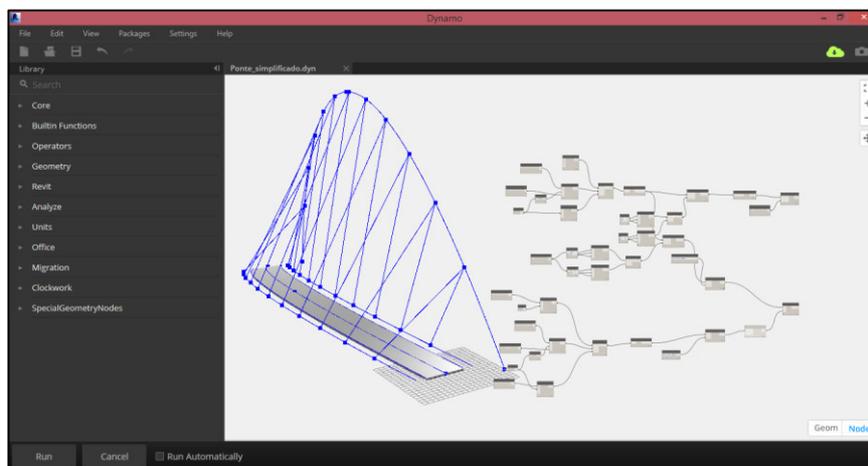


Figura 2.24 - Modelação paramétrica de uma ponte com recurso ao *Dynamo*.

No *Dynamo*, o algoritmo é constituído por um conjunto de nós ligados entre si por fios condutores. Cada nó executa uma operação – que pode ir desde o armazenamento de um valor à criação de uma geometria – e tem determinados *inputs* e *outputs* (*The Dynamo Primer, 2015a*). A título exemplificativo é apresentado na Figura 2.25 o nó *Point.ByCoordinates*, que, a partir de três variáveis numéricas, cria um ponto na interface *Dynamo*. O fluxo do programa é assegurado pelos fios condutores – Ver Figura 2.26.

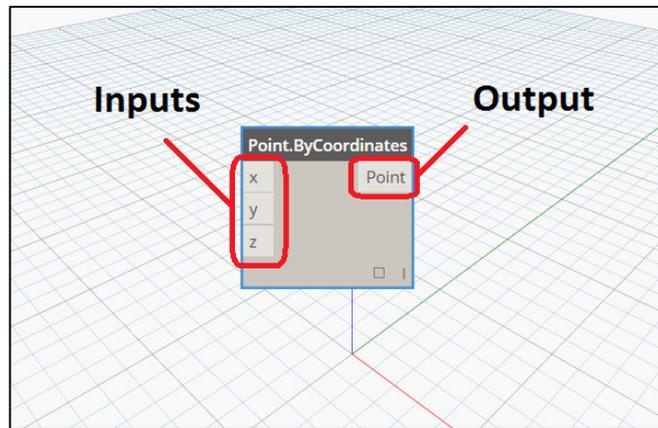


Figura 2.25 - Nó "Point.ByCoordinates".

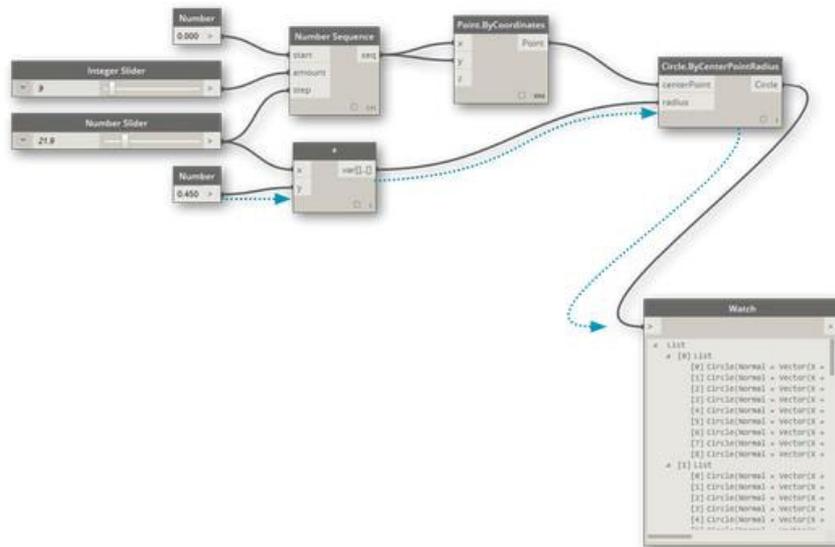


Figura 2.26 - Fios condutores estabelecem o curso do programa visual (The Dynamo Primer, 2015b).

2.2.3 Interoperabilidade

A indústria AEC abrange diferentes disciplinas e profissionais, como arquitetos, engenheiros, empreiteiros, donos de obra, entre outros, que geram informação de forma a atender às exigências do projeto de uma construção. Cada um destes intervenientes elabora diferentes elementos de projeto, que requerem dados de entrada específicos. Este facto cria um complexo ambiente com frequente partilha de informação, entre diferentes pessoas, especialidades e fases de projeto (Autodesk, 2013). Torna-se portanto essencial a agilização da troca de dados entre sistemas diferentes e a correta transmissão de informação (Lino *et al.*, 2012). Com a introdução de metodologias BIM e, conseqüentemente, de elementos paramétricos e com informação não

geométrica, é introduzido um novo nível de definição de formas que não é facilmente trocado entre diferentes *softwares*, com cada um a ter diferentes regras incorporadas (Jeong, Eastman, Sacks, & Kaner, 2009). Assim, podem ser utilizados diferentes *softwares* BIM em diferentes especialidades e fases do projeto, e a eficiência da colaboração de modelos entre estes *softwares* é traduzida pela correspondente interoperabilidade. Esta colaboração é potenciada se for permitida a partilha de modelos não só para visualização, mas também para análise, edição e desenvolvimento (Jeong *et al.*, 2009). No entanto, a falta de interoperabilidade entre aplicações BIM constitui um problema da indústria AEC, em que por diversas vezes o destinatário de modelos tem de modelar novamente parte da informação na aplicação recetora (Venugopal, Eastman, Sacks, & Teizer, 2012). Este problema procura ser ultrapassado pelo formato de dados IFC (*Industry Foundation Classes*), que tende a ser uma norma de aceitação universal para a troca de dados de modelos de edifícios e que inclui a geometria, a estrutura do objeto e atributos de material e desempenho (Lino *et al.*, 2012).

O IFC é um formato aberto e livre, sendo desenvolvido e mantido pela organização BuildingSMART (anteriormente designada de IAI – *International Alliance for Interoperability*). Este formato baseia-se em esquemas de programação ISO-STEP-EXPRESS (ISO, 2013) e foi especificamente desenvolvido para permitir trocas de dados entre diferentes intervenientes e fases de projeto, o que na prática corresponde a trocas entre diferentes aplicações BIM (Autodesk, 2007). Assim, a partilha de informação entre diferentes intervenientes e diferentes especialidades pode ser realizada a partir do modelo em formato IFC ao invés da partilha a partir de diferentes desenhos 2D – Ver Figura 2.27.

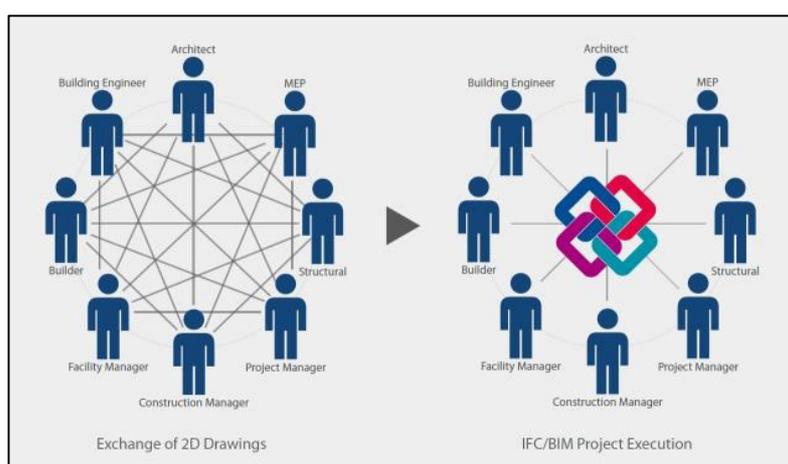


Figura 2.27 - Formato IFC na partilha de informação de um projeto (Intelligent BIM Solutions, 2015).

A maioria dos grandes vendedores de produtos BIM participa no desenvolvimento do formato IFC, e os seus produtos suportam este formato de ficheiro, que permite independência de uma equipa de projeto relativamente a uma *software house* e reduz a necessidade de remodelação de informação, tornando o processo de transferência de dados mais transparente (Solibri, 2015).

2.2.4 Níveis de desenvolvimento (LOD)

O conceito LOD – *Level of Development* ou, em português, Nível de Desenvolvimento, foi introduzido no BIM pelo AIA – *American Institute of Architects*, e constitui um critério para definir a maturidade e usabilidade de um modelo em diferentes fases de um projeto (J. M. S. Silva, 2013). O LOD traduz portanto o nível ou sofisticação da modelação de um elemento, quer a nível geométrico, quer a nível de informação anexada, em que a equipa de projeto pode confiar quando usa o modelo (BIM Forum, 2013). O LOD é geralmente expresso por uma série progressiva de números, em que há um aumento gradual de informação entre esta série (Jr. *et al.*, 2011). Há, assim, 5 grandes níveis LOD:

- LOD 100 – Este LOD corresponde a um modelo básico, considerado numa fase de projeto esquemático, e que fornece principalmente informação sobre massas e volumes. Com apenas a informação mais básica disponível, a utilização deste modelo limita-se à revisão da disposição básica dos espaços, cálculo de áreas e volumes e orientação de espaços;
- LOD 200 – Corresponde a um modelo ligeiramente mais desenvolvido, que contém informação suficiente para permitir uma análise básica do sistema estrutural. Pode ainda conter informação não geométrica que possibilite uma estimativa de custos;
- LOD 300 – A este nível já há informação suficiente no modelo para preparação de documentos tradicionais de construção ao nível do projeto de execução. Pode incluir informação não geométrica que pode ser usada pela equipa de projeto ou construção. O modelo pode também ser utilizado para criar modelos analíticos para o projeto de estruturas;
- LOD 400 – Neste nível estão incluídos detalhes adicionais e todas as estruturas primárias e secundárias de suporte. Inclui também informação completa sobre a fabricação, montagem ou construção, sendo possível realizar uma estimativa de custos detalhada;

- LOD 500 – Todos os elementos e sistemas são modelados de acordo com a construção e rigorosos em todos os detalhes. Este modelo tem os mesmos propósitos do LOD 400, embora possa também ser utilizado para manutenção do edifício, quando assim autorizado. Normalmente este nível de desenvolvimento não é requerido para o sistema estrutural.

Há também especificações para o LOD 350, com o principal objetivo de detetar conflitos na integração das diferentes especialidades (BIM Forum, 2013). Na Figura 2.28 são apresentados diferentes níveis de desenvolvimento (do 100 ao 400) para exemplos de elementos metálicos.

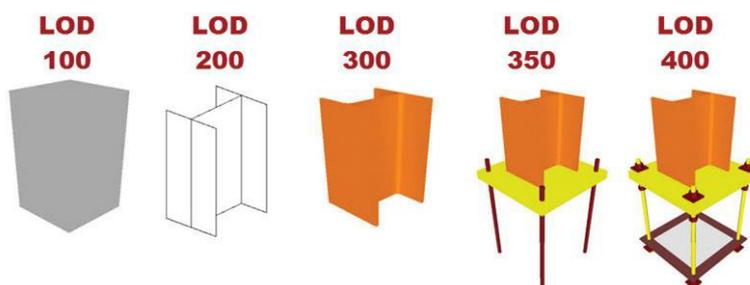


Figura 2.28 - Diferentes níveis de desenvolvimento (Structure magazine, 2013).

O principal objetivo da utilização deste conceito é a redução de problemas devido a um nível inadequado de informação nos projetos e permite (BIM Forum, 2013):

- Apoiar as equipas, incluindo o dono de obra, a especificar os *outputs* BIM e a perceber melhor o que incluir nos modelos;
- Apoiar os gestores de projeto a explicar às equipas a informação que os modelos por eles produzidos devem conter, nas diferentes fases do projeto;
- Fornecer um padrão que pode ser referenciado em contratos ou planos de execução BIM.

2.2.5 Sistemas de classificação de informação

Sendo o BIM uma metodologia que envolve o processamento de dados de diferentes naturezas, como geometria, custos, informações técnicas, custos ou prazos de construção, surge a necessidade de uma organização simples e direta destes e que apoie os *softwares* BIM e respetivos utilizadores (J. C. B. Silva & Amorim, 2011). Assim, os sistemas de classificação que já existiam previamente à generalização do BIM, surgem incorporados em *softwares* BIM como resposta à grande quantidade de informação envolvida, à necessidade de promover a sua

organização e padronização e como meio para alcançar uma gestão eficaz desta. Um sistema de classificação tem como objetivo agrupar objetos ou elementos semelhantes em categorias comuns. Com a classificação, elementos semelhantes são membros de uma classe, e classes semelhantes são membros de uma classe ainda mais geral, e assim sucessivamente (Pereira, 2013). Exemplos de sistemas de classificação internacionais são as tabelas Omniclass, MasterFormat, UniFormat ou Talo 2000.

A Omniclass é constituída por 15 tabelas, com classificações segundo diferentes critérios, e que podem ser utilizadas de forma independente ou combinadas, para elementos de maior complexidade (Omniclass, 2015). A MasterFormat, um dos percursores de classificação de informação, desenvolvido inicialmente em 1963, constitui a base da tabela 22 da OmniClass, “Resultados do Trabalho”. Também a UniFormat serviu de base para a Omniclass, na tabela 21 “Elementos”.

A organização da informação segundo sistemas de classificação permite uma melhor organização de bibliotecas de objetos (NIBS, 2012), permite realizar estimativas de quantidades e custos mais precisas (CSI, 2015) e auxilia a interoperabilidade entre diferentes *softwares*.

2.3 BIM aplicado a obras hidroelétricas

2.3.1 Levantamento de casos aplicados

Relativamente à aplicação de metodologias BIM em aproveitamentos hidroelétricos, embora não haja muita informação tornada pública, já é possível encontrar registos de implementação com sucesso, nomeadamente no estrangeiro. Integram-se nestes casos os aproveitamentos hidroelétricos de Tuoba e Huangdeng (Bentley, 2012; Infrastructure, 2015).

O aproveitamento hidroelétrico de Tuoba, cujo investimento foi superior a dois mil milhões de dólares, foi completado em 2010 (dentro dos prazos previamente estabelecidos), situa-se na província de Yunnan, na China, e tem uma potência instalada de 1400 megawatts. Este empreendimento enfrentava um planeamento inicial ambicioso de 75 meses – 24 meses para preparação, 39 meses para construção e 12 meses para pós-construção. Assim, a organização responsável pela execução do projeto – HydroChina Zhongnan Engineering Corporation – destacou entre 60 a 80 membros de projeto.

Este empreendimento, extremamente complexo, envolvia equipas de diferentes disciplinas, como de levantamento topográfico, geologia, construção, engenharia civil, engenharia

eletrotécnica, arquitetura, entre outros. Sendo a partilha e controlo de documentação um processo desafiante, e ainda mais estimulante em obras de tamanha complexidade, concluiu-se que os *softwares* 2D não teriam a necessária capacidade resposta para os objetivos iniciais do projeto. Assim, a HydroChina Zhongnan selecionou um conjunto *softwares* BIM, todos eles oriundos da *softwarehouse* Bentley.

Os *softwares* foram selecionados para diferentes tarefas e objetivos, sendo estes bastante variados. Entre outros, foram explorados *softwares* de gestão de partilha de informação entre as diferentes equipas (*ProjectWise*), de navegação (que permitiam revisões de projeto dinâmicas - *Bentley Navigator*), de modelação de Arquitetura (*Bentley Architecture*) e de modelação da especialidade de Estruturas (*Bentley Structure*).

A tecnologia tridimensional proporcionou uma melhor compreensão do empreendimento, quer da estrutura, quer dos equipamentos, cujas formas eram geralmente complexas. A deteção automática de colisões na integração das diferentes especialidades foi realizada de forma a reduzir erros, omissões e conflitos, sendo que deste processo resultou uma melhoria significativa na qualidade do projeto. Tal facto refletiu-se numa redução drástica do tempo perdido pelas equipas a resolver colisões detetadas em obra. A produção de documentação de obra (desenhos 2D) foi também obtida com recurso aos modelos, o que levou a uma grande redução de tempo despendido neste campo. De acordo com Gong Deyu, engenheiro chefe do aproveitamento hidroelétrico, a utilização do navegador e dos modelos virtuais levaram a uma redução de trabalho de projeto de 6 meses para 39 dias, com o mesmo número de colaboradores envolvidos (Bentley, 2012). Na Figura 2.29 é apresentado o modelo tridimensional do aproveitamento hidroelétrico de Tuoba.

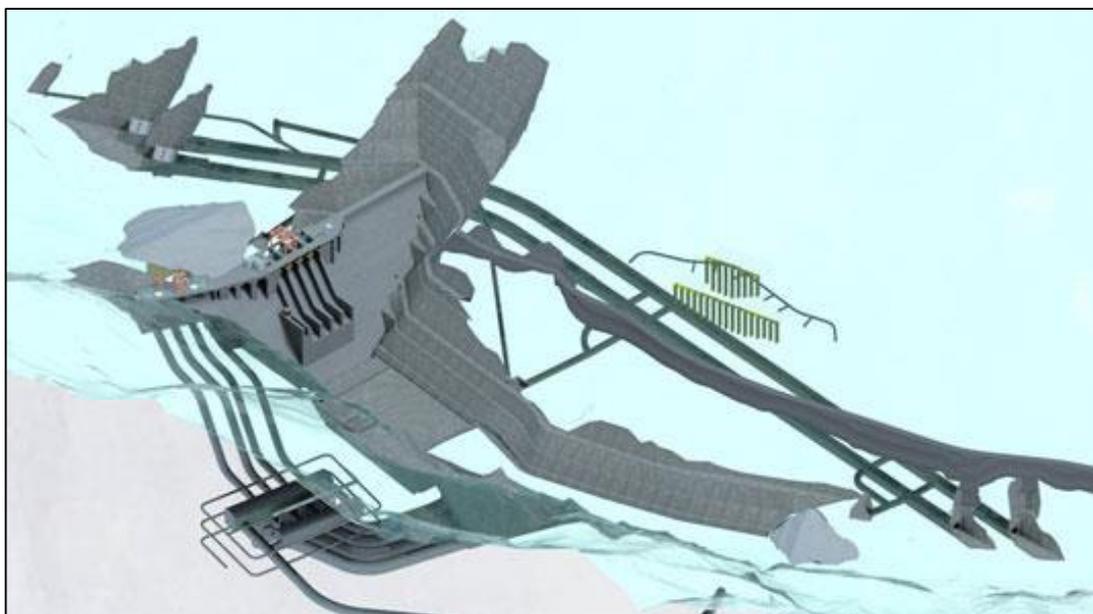


Figura 2.29 - Modelo tridimensional do aproveitamento hidroelétrico de Tuoba (Bentley, 2012).

O aproveitamento hidroelétrico de Huangdeng encontra-se na província de Yunnan, na China, e está neste momento sobre construção, sendo previsto o seu final em 2016. A barragem deste aproveitamento é de gravidade e tem uma altura máxima de 203 metros, sendo a potência instalada do aproveitamento de 1900 megawatts. Tal como no empreendimento anterior, também este aproveitamento hidroelétrico constitui uma obra de elevada complexidade, com medidas de retenção complicadas, estruturas diversificadas e um conjunto de equipamentos extensos e complexos, estando a firma HYDROCHINA Kunming (KHIDI) responsável pela elaboração do seu projeto e execução.

Devido ao desperdício significativo de recursos associados à metodologia de trabalho tradicional, a liderança da KHIDI optou pela adoção de processos BIM para melhorar a produtividade recorrendo, para esse efeito, a soluções da *Autodesk*. Esta adoção serve de apoio ao projeto colaborativo, coordenação e planeamento entre as várias disciplinas envolvidas no projeto. O *Inventor*, para detalhar estruturas metálicas, o *Revit MEP, Architecture e Structure* para modelação das diferentes especialidades e o *Navisworks*, para análise visual, simulações 4D e deteção de colisões, constituem algumas das plataformas utilizadas.

Também neste empreendimento os modelos permitiram uma melhor coordenação multidisciplinar, com as colisões entre as diferentes especialidades a serem detetadas em fase de projeto e não em obra. As visualizações tridimensionais permitiram também melhorar as decisões de projeto e a eficiência na produção de desenhos, com a qualidade da documentação

de construção a ser aprimorada. Na Figura 2.30 são apresentadas algumas das componentes modeladas do aproveitamento hidroelétrico de Huangdeng.

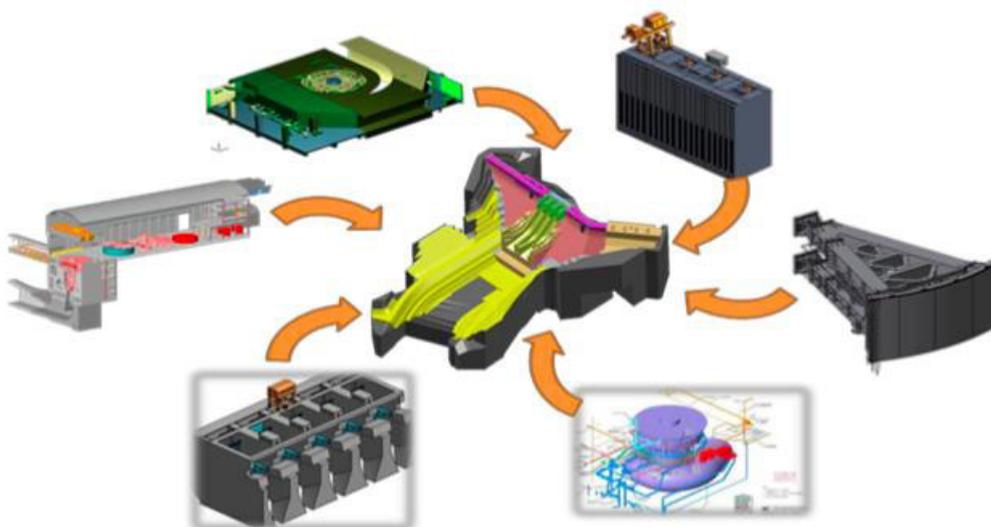


Figura 2.30 - Integração de diferentes especialidades no aproveitamento hidroelétrico de Huangdeng (Infrastructure, 2015).

Em suma, a abordagem BIM permitiu à KHIDI melhorar a eficiência de projeto e reduzir os custos com a colaboração e falhas de comunicação entre os diferentes campos do conhecimento, aumentando a qualidade do projeto. A empresa está também a equacionar a utilização de dispositivos móveis em obra para aceder aos modelos, reforçando o aumento da eficiência de projeto (Infrastructure, 2015).

2.3.2 Desafios à implementação

Nos últimos anos, a indústria AEC tem vindo a constatar os benefícios que se obtêm com a adoção do BIM. Apesar disso, a sua implementação segue um lento processo, quando comparado com a incorporação crescente de tecnologias de informação por parte de outras indústrias (Smith, 2014).

Um conjunto de barreiras e limitações inibem a adoção rápida do BIM na prática profissional (Lino *et al.*, 2012). Além das condicionantes de natureza técnica que procuram ser ultrapassadas pelos produtores de *software*, há ainda a considerar a mudança cultural, que é vista por muitas empresas como o principal entrave à alteração de paradigma. Este conservadorismo e resistência à mudança por parte dos profissionais seniores da indústria é, apesar de tudo, ameaçado pelos profissionais mais novos, que são em geral mais recetivos à adoção de

tecnologias de informação (Smith, 2014). Há ainda a destacar o investimento (a nível de *software* e treino de colaboradores), a lenta curva de aprendizagem (além dos *softwares* há novos processos de trabalho), o maior envolvimento de equipa (necessária promover uma maior interação colaborativa), a interoperabilidade (o formato IFC não está, ainda, isento de falhas) e aspetos relacionados com responsabilização/autoridade (não devem ser comprometidos direitos de autor e responsabilização dos diferentes intervenientes) (Lino *et al.*, 2012).

No caso de projetos de aproveitamentos hidroelétricos, há um agravamento de alguns dos aspetos anteriormente referidos. A elevada dimensão destes empreendimentos eleva o risco da adoção de metodologias BIM e o número de entidades envolvidas. Além do dono de obra e do empreiteiro, há ainda a considerar a influência que o fornecedor de equipamentos ou empresas subcontratadas (para estudos, projeto de estruturas, medidas geotécnicas, entre outros) têm no processo, sendo ponto assente que quanto maior for a adoção por parte dos diferentes intervenientes, mais potencializados serão os benefícios obtidos com a mudança de paradigma. Também o facto de se tratarem de empreendimentos de elevada complexidade conduz a um aumento da inércia por parte das empresas na adoção do BIM, pois requer maiores conhecimentos por parte dos colaboradores na exploração de *softwares*, agrava as limitações da interoperabilidade e complica as questões de responsabilização/autoridade devido à maior complexidade do ambiente de partilha.

De forma a ultrapassar os entraves à implementação, os donos de obra e entidades governamentais assumem um papel preponderante. Estes constituem forças impulsionadoras na adoção do BIM por parte da indústria, mandatando o seu uso em projetos. O desenvolvimento de normas nacionais e internacionais, protocolos legais para responder a problemas de responsabilização, certificação e educação BIM são também estratégias importantes a adotar. De facto, a educação do BIM não deverá focar-se apenas na aprendizagem de *softwares*, e englobar também as componentes de gestão e trabalho colaborativo associados ao BIM (Smith, 2014).

Um importante passo para a adoção do BIM por parte da indústria foi dado em Janeiro de 2014. Nesta data o Parlamento Europeu decidiu, com vista a modernizar as regras de contratação pública no setor, recomendar a utilização de ferramentas eletrónicas como as ferramentas BIM. Com esta decisão, os 28 Estados Membros Europeus deverão encorajar, especificar ou mandar o uso de BIM em obras públicas e projetos de empreendimentos na União Europeia até 2016. Alguns países, como o Reino Unido, Dinamarca, Finlândia ou Noruega já integram medidas semelhantes (Reuters, 2014).

Dada a globalização da atividade da construção, com o desaparecimento gradual de barreiras internacionais, as empresas deste setor competem cada vez mais com empresas internacionais que se podem apresentar com experiência e capacidades BIM elevadas. Esta vantagem competitiva constitui também um estímulo na adoção do BIM, com as empresas a perceberem que vão ficar para trás se não abarcarem e evoluírem na revolução BIM (Smith, 2014).

Com uma resposta cada vez mais eficaz da tecnologia aos desafios existentes, a questão relativa à implementação no presente é “Como vamos implementar?” e não “Isto é possível?” (Tomek & Matějka, 2014).

3. MODELAÇÃO

Com o objetivo de se obter uma melhor percepção dos desafios práticos à implementação de metodologias BIM no contexto da Direção de Engenharia de Barragens da EDP, optou-se pela modelação de três dos principais constituintes de um aproveitamento hidroelétrico em casos particulares que foram objeto de projeto recente na EDP: uma central (Venda Nova III), uma tomada de água (Venda Nova III) e uma restituição (Fridão).

Venda Nova III corresponde ao segundo reforço de potência do aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova. Após a conclusão deste reforço de potência, Venda Nova passará a ter a maior central hidroelétrica em Portugal, em termos de potência instalada. Este reforço é constituído por dois grupos reversíveis com potência total de 746 MW e estima-se que venha a ter uma produção média bruta de eletricidade de 1038 GWh/ano. A queda deste aproveitamento é de, aproximadamente, 414 m e o caudal de cerca de 200 m³/s (Ferreira, Sarmiento, & Lima, 2012).

Já o aproveitamento hidroelétrico de Fridão, que se encontra em fase de concurso, terá uma potência instalada de 238 MW. Este aproveitamento será constituído por duas barragens, sendo que uma delas desempenha funções de regularização a jusante (EDP, 2015b).

Para melhor compreensão dos órgãos a modelar no contexto desta dissertação de Mestrado, foram realizadas visitas a obras, nomeadamente ao aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua e ao reforço de potência de Venda Nova III.

3.1 Estratégia global

O *software* escolhido para a modelação das componentes supracitadas foi o *Revit Structure*, da *Autodesk*. Esta escolha baseou-se em três aspetos fundamentais: (i) comprovada capacidade do *software* em questão no contexto BIM, sendo inclusive um líder de mercado a nível global; (ii) existência de licença de utilização *Revit* na EDP; (iii) experiência prévia disponível na utilização da plataforma. No entanto, esta plataforma BIM contém algumas limitações na criação de famílias para elementos de geometria complexa. Dado que o tipo de obras a modelar compreendia vários elementos de geometria complexa, foi necessário o recurso a soluções complementares. Considerou-se que a ferramenta de programação gráfica *Dynamo*, que é gratuita e pode ser associada diretamente à plataforma *Revit* (como uma extensão) poderia constituir-se como uma solução viável, pelo que foi adotada desde o início. Esta associação

direta entre *Dynamo* e *Revit* traz também a interessante característica de minimizar potenciais problemas de interoperabilidade caso fossem utilizadas aplicações totalmente independentes.

Assim, estabeleceu-se a estratégia de que a modelação de uma componente/obra seria repartida pelo *Revit* e pelo *Dynamo*. Os elementos mais complexos, e que constituem um desafio de modelação no *Revit*, são modelados recorrendo a programação visual (*Dynamo*), enquanto a restante estrutura segue o processo de modelação corrente (*Revit*).

No *Dynamo* tentou-se genericamente que os objetos fossem modelados de forma paramétrica, ou seja, tentando identificar o máximo de parâmetros editáveis, de forma a facilitar alterações e reutilização de código *Dynamo* em obras futuras da mesma natureza. No entanto, para elementos de dimensão e complexidade mais significativa, esta metodologia revelou-se particularmente difícil dado o número extremamente elevado de parâmetros envolvidos. É, então, importante assinalar que alguns dos algoritmos de modelação destes elementos mostrados ao longo deste capítulo foram objeto de processo de otimização contínuo, tentando-se a redução gradual do número de parâmetros que definem a sua geometria.

3.2 Testes preliminares/Aprendizagem

O *Dynamo* é aproveitado por utilizadores do *Revit* para realizar/automatizar tarefas que não são possíveis na interface deste. Uma vez que *Dynamo* acede diretamente às bases de dados internas dos modelos *Revit*, e lhe é permitindo ler ou compor bases de dados externas, são abertos horizontes de capacidade de modelação e edição extremamente alargados no contexto do binómio *Dynamo/Revit*. Com efeito, é relativamente fácil obter e alterar parâmetros de elementos, exportar dados para ficheiros *Excel* ou até ler dados provenientes de *Excel*.

Numa fase inicial dos trabalhos, procedeu-se à aprendizagem de utilização do *Dynamo* para testar a viabilidade da sua utilização no contexto dos objetivos desta dissertação. Este processo decorreu em Dezembro de 2014 e Janeiro de 2015. Assim, recorreu-se a tutoriais escritos e a vídeos disponíveis na página oficial do *Dynamo* (Dynamo BIM, 2014c). Os tutoriais escritos descrevem aspetos básicos da linguagem da ferramenta e apresentam alguns nós (um nó corresponde a uma caixa no ambiente de programação visual que realiza uma tarefa específica) e possibilidades de tarefas geométricas e não geométricas no *software*. Devido à vasta possibilidade de exploração da ferramenta, encontram-se variados exemplos de algoritmos nos tutoriais, mas são reduzidos os que se referem à modelação específica de sólidos de geometria

complexa. Assim, grande parte do tempo da aprendizagem foi investido em processos de tentativa-erro, explorando de forma extensiva os nós disponibilizados na ferramenta.

Estabeleceu-se inicialmente como desafio a modelação paramétrica de um objeto simples que envolvesse operações *booleanas* de sólidos (união, diferença ou interseção): um cubo cujo volume seria subtraído do volume de um cilindro. Os parâmetros deste objeto são:

- Dimensão das arestas do cubo;
- Altura do cilindro (posição da base relativamente à origem);
- Comprimento do cilindro;
- Raio do cilindro.

O cilindro encontra-se centrado com o cubo, mas a sua altura e comprimento podem variar. Os parâmetros supracitados podem ser verificados na Figura 3.1, onde é apresentada uma planta (esquerda) e um alçado (direita) do cubo e do cilindro sobrepostos.

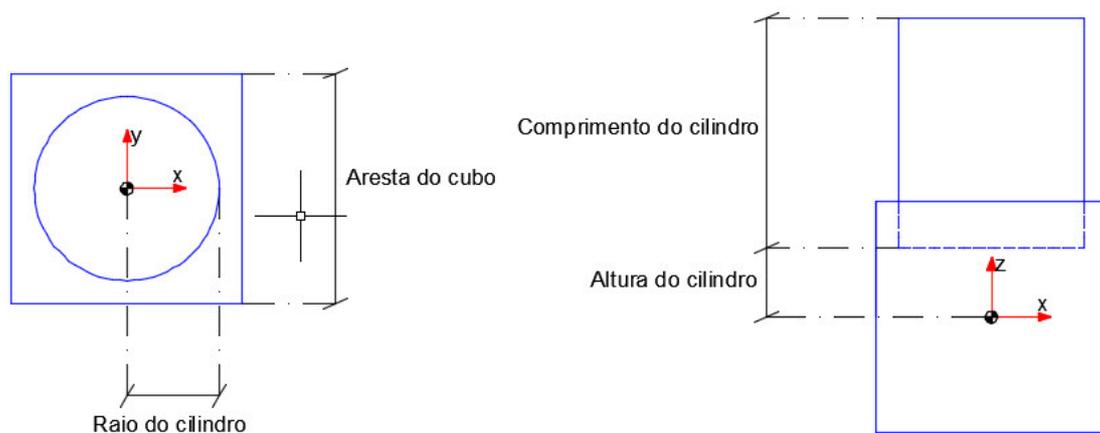


Figura 3.1 - Representação dos parâmetros em planta (esquerda) e em alçado (direita).

Assim foi criado o cubo a partir da dimensão da aresta e o cilindro a partir do raio e das distâncias da base e topo relativamente à origem. O volume do cilindro é posteriormente subtraído ao volume do cubo, sendo o resultado desta operação geométrica importada para o *Revit*.

Como resultado da execução deste algoritmo, o objeto final é apresentado no *Revit* como uma instância importada, embora com a execução dos comandos “*Full Explode*” ou “*Partial Explode*” o *software* entende a geometria como nativa. No caso de não se realizar este processo (explodir o objeto), e este permanecer como instância importada, não é possível realizar tarefas

elementares no *Revit* como fazer *Join* (unir a outros elementos), e o elemento não se apresenta corretamente nos cortes/vistas. O objeto pode depois ser atribuído de um material, munido de parâmetros não geométricos em ambiente *Revit* (ex.: resistência, densidade, condutibilidade térmica) e guardado como uma família (na presente dissertação optou-se por guardar como família de modelo genérico). Esta família pode depois ser utilizada em projetos *Revit*, embora seja importante referir que os parâmetros geométricos não são importados para o *Revit* pelo que a manipulação destes terá de ser realizada no *Dynamo* e implicará a criação de uma nova família. O objeto em ambiente *Revit* é apresentado na Figura 3.2.

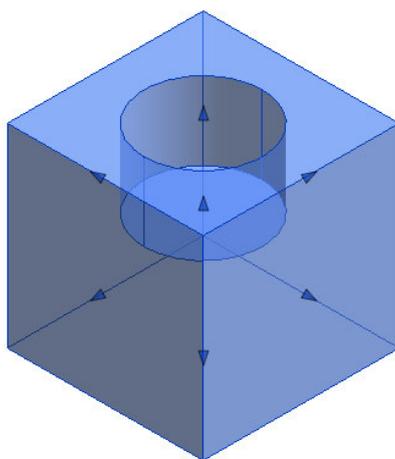


Figura 3.2 - Objeto no Revit.

Relativamente ao código *Dynamo* correspondente ao código referente à modelação deste sólido há a destacar o facto de as variáveis serem manipuladas a partir *Sliders* (nós que geram valores dentro de uma gama definida pelo utilizador, e torna a manipulação de parâmetros mais intuitiva) e o nó utilizado para importação da geometria para o *Revit*, *ImportInstance.ByGeometry*. Na Figura 3.3 é possível verificar o código *Dynamo*, sendo os *Sliders* associados às variáveis destacados a vermelho.

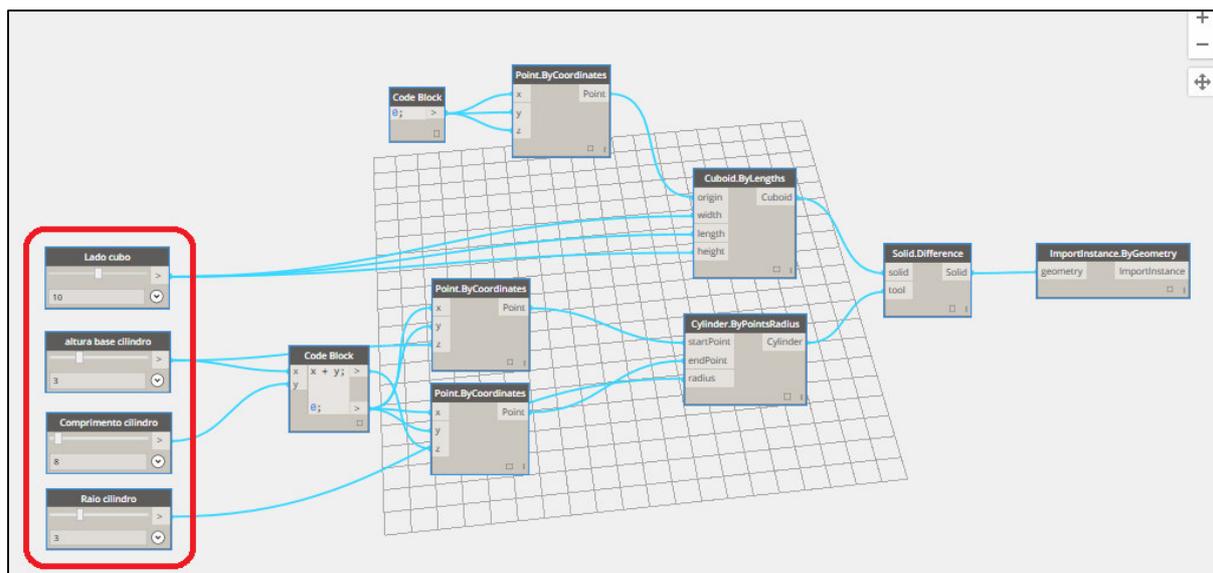


Figura 3.3 - Código Dynamo que leva à criação do objeto.

3.3 Central de Venda Nova III

3.3.1 Descrição da geometria

A central de Venda Nova III é uma central em poço. Esta é a componente de um aproveitamento hidroelétrico que mais se assemelha a um edifício corrente.

Apesar disso, a central contém estruturas complexas de suporte ao alternador e à turbina, do tipo Francis, constituída por uma espiral e um tubo de aspiração. As dimensões destes equipamentos são bastante elevadas, sendo que, por exemplo, a espiral tem um diâmetro interior que chega aos 8 m e um peso total aproximado de 160 toneladas. Na Figura 3.4 são apresentados cortes da central.

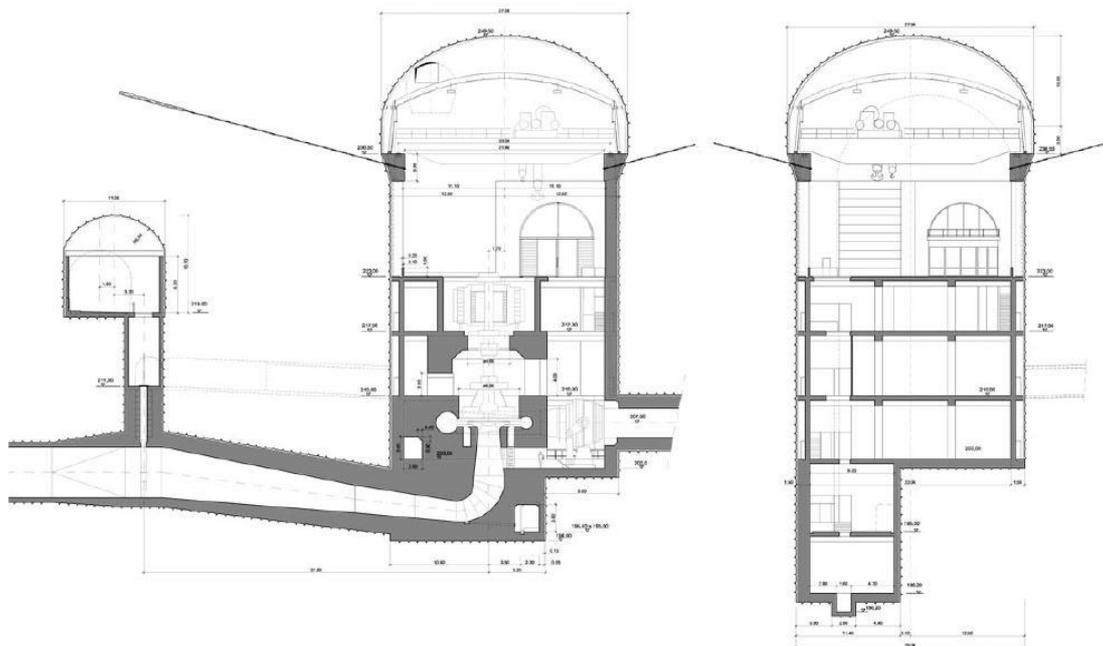


Figura 3.4 - Cortes da central de Venda Nova III (EDP, 2015d).

3.3.2 Estratégia de modelação da central

Após uma análise global da estrutura da central, verificou-se que grande parte desta poderia ser modelada com recurso a classes/famílias nativas do *Revit*, visto que a maioria dos elementos correspondem a elementos estruturais comuns, como pilares, paredes, vigas ou lajes. Contudo, tal como explicado anteriormente, há alguns maciços que constituem desafios de modelação, nomeadamente o maciço de suporte da turbina e o maciço de suporte do alternador. Para estes, optou-se pelo recurso ao *Dynamo* na sua modelação.

De facto, o maciço de suporte da turbina caracteriza-se adicionalmente pela inclusão de um complexo equipamento hidromecânico (espiral e tubo de aspiração). Visto que, no âmbito da presente dissertação, se pretende modelar a especialidade de estruturas é, então, necessário modelar os sólidos que representem a envolvente destes equipamentos de forma a poder garantir a adequada complementaridade geométrica do maciço de suporte.

3.3.3 Modelação

O primeiro elemento da central a ser modelado foi o maciço de suporte da turbina. Para isso procedeu-se inicialmente à modelação paramétrica da espiral e do tubo de aspiração. Para isso foi necessária a análise detalhada dos dados disponibilizados pelo fornecedor de equipamentos.

Nas Figuras 3.5 a 3.7 apresentam-se algumas informações relevantes sobre a espiral, nomeadamente o seu desenho 3D (Figura 3.5), a sua vista em planta (Figura 3.6) e a secção transversal tipo (Figura 3.7). No Anexo 1 – Explicação detalhada de algoritmos de modelação está disponibilizada uma explicação aprofundada, a nível de algoritmo *Dynamo*, da modelação da espiral.

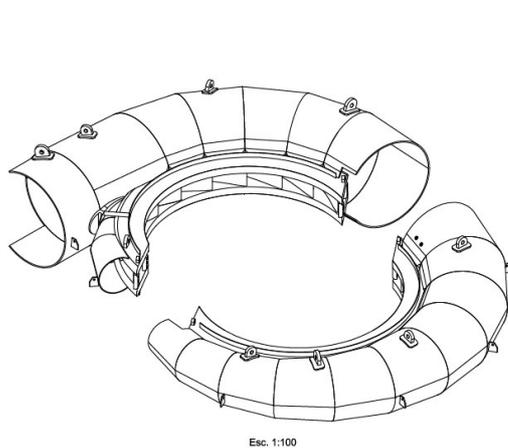


Figura 3.5- Desenho tridimensional da espiral.

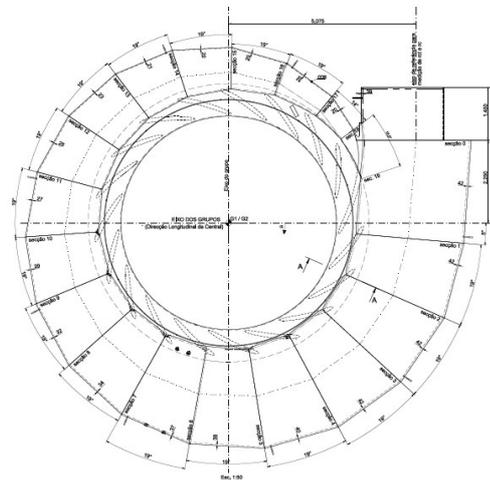


Figura 3.6 - Vista em planta da espiral.

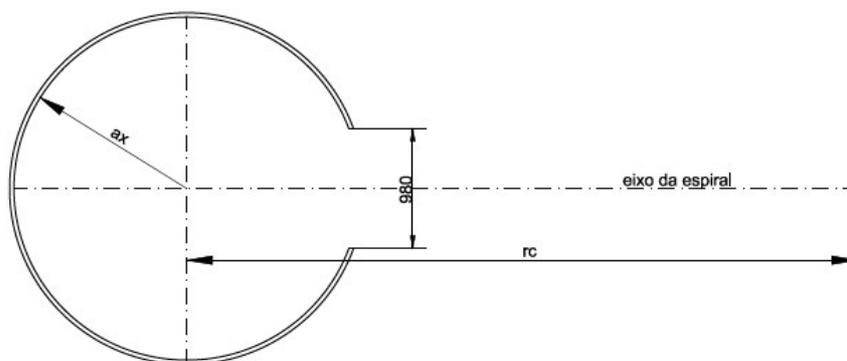


Figura 3.7 - Secção tipo da espiral.

Relativamente à espiral há quatro parâmetros essenciais a considerar na modelação, identificados na Figura 3.7 e Figura 3.8:

- Ângulo, segundo o plano XY (Ver Figura 3.8), entre o eixo dos grupos e o centro de cada secção da espiral - α ;

- Distância entre o eixo dos grupos e o centro de cada secção – **rc** (ver Figura 3.7 e Figura 3.8);
- Raio da secção interior – **ax** (ver Figura 3.7);
- **Espessura** do equipamento em cada secção.

O eixo dos grupos, também apresentado na Figura 3.8, foi escolhido como a origem para a modelação da espiral.

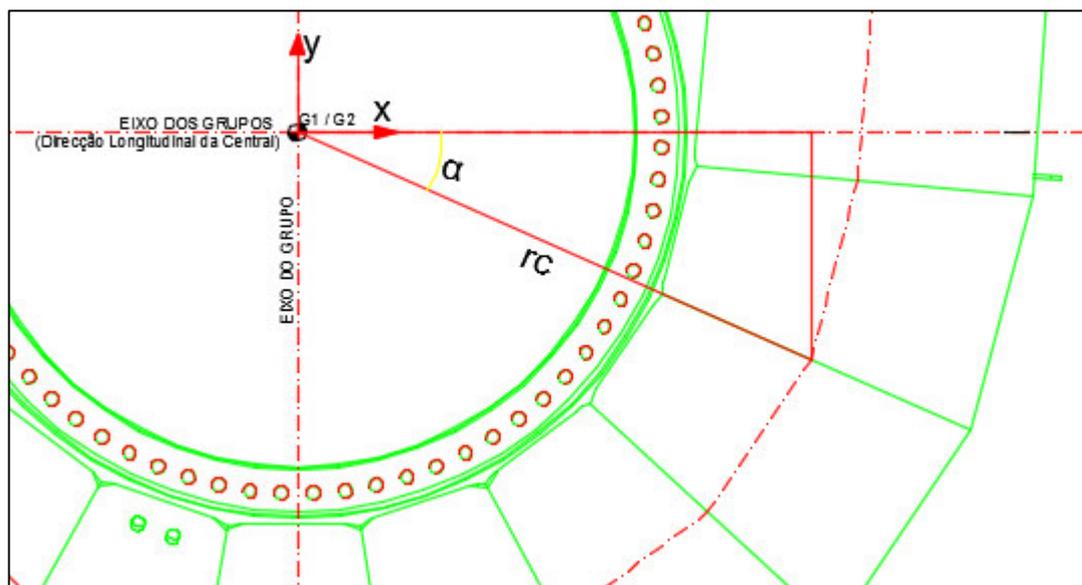


Figura 3.8 - Definição dos pontos centrais de cada secção.

O primeiro passo consistiu na definição do ponto central de cada secção, que seria obtido a partir dos parâmetros α e rc .

As coordenadas do centro de cada secção são então obtidas por relações trigonométricas e dadas por:

$$x = \cos \alpha \times rc \quad (3.1)$$

$$y = - \sin \alpha \times rc \quad (3.2)$$

Obtidos os pontos centrais, procedeu-se à definição de cada secção. Cada secção é composta por uma circunferência aberta (ver Figura 3.9), sendo a abertura constante em todas as secções. O *Dynamo* disponibiliza na biblioteca diferentes nós que permitem a modelação de arcos, tendo-se neste caso optado por modelar as secções a partir de cinco *inputs*: centro, raio, ângulo de início, ângulo de fim e a normal ao arco.

O raio é dado pela soma dos parâmetros ax e espessura do equipamento (visto pretender-se modelar a envolvente deste e o parâmetro ax traduzir o raio interior), o centro foi anteriormente definido e o arco deve ser paralelo ao vetor dado por dois pontos: a origem e o centro de cada secção. Visto isto, resta então definir os ângulos de início e fim do arco.

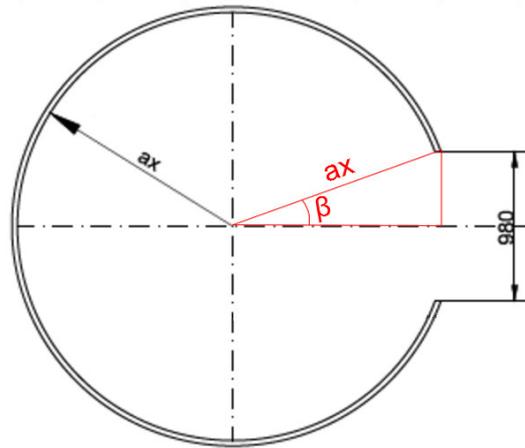


Figura 3.9 - Definição do ângulo de início da secção da espiral.

O ângulo de início (β) e ângulo de fim são, então, dados por:

$$\beta = \text{arc sin} \frac{980/2}{ax} \quad (3.3)$$

$$\text{ângulo fim} = 360 - \beta \quad (3.4)$$

Com estas operações obtém-se a circunferência aberta de cada secção, representadas, em ambiente *Dynamo* na Figura 3.10.

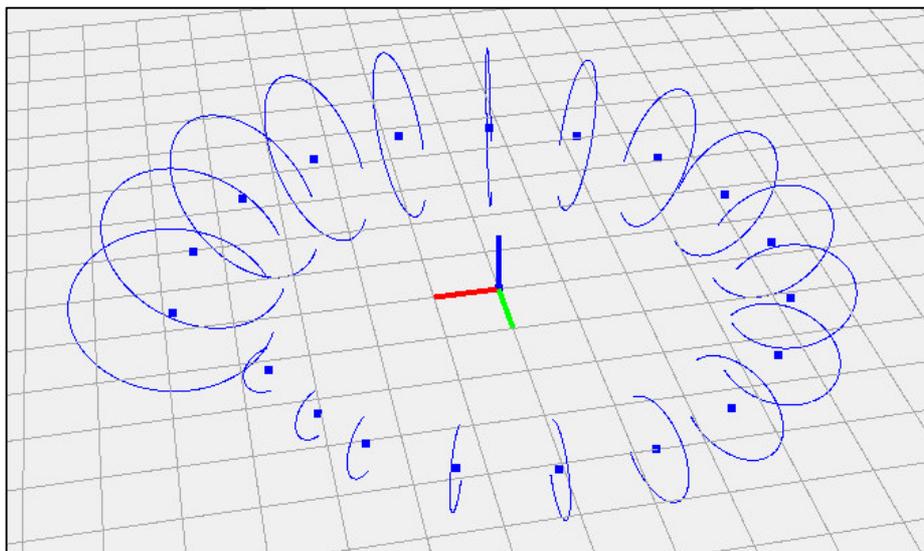


Figura 3.10 - Diferentes secções em ambiente *Dynamo*.

No entanto, pretende-se realizar um *Loft* (processo geométrico que permite a definição de superfícies/sólidos a partir de uma sequência de secções) e, para isso, as secções devem ser fechadas. Assim, optou-se por unir, através de uma reta, os pontos de início e fim de cada arco que define a secção, tal como demonstrado na Figura 3.11. Estas retas são posteriormente unidas ao arco, para que cada secção seja constituída por estes dois elementos: o arco e a reta que une os seus limites.

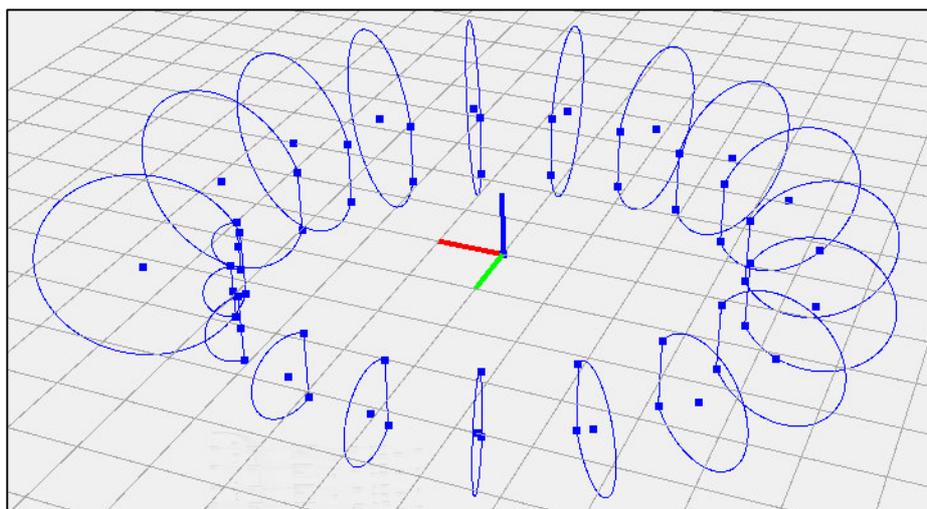


Figura 3.11 - Secções após definição de reta entre ponto inicial e final de cada arco.

Realizando-se um *Loft* entre secções consecutivas (secção 1 e secção 2, secção 2 e secção 3, e assim sucessivamente), obtém-se o sólido que caracteriza a espiral. Optou-se, também, por realizar outra operação *Loft* mas para se obter uma superfície (dando, posteriormente, a espessura do equipamento a esta superfície), de forma a obter uma representação mais realista da espiral. Estas duas apresentações do equipamento podem ser verificadas na Figura 3.12 (sólido, no *Dynamo*) e na Figura 3.13 (representação realista, em *Revit*).

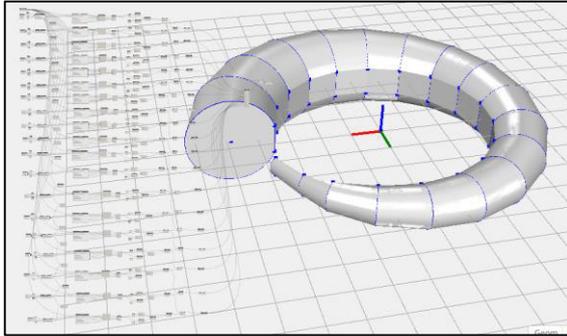


Figura 3.12 - Sólido envolvente da espiral e o respetivo algoritmo em Dynamo.



Figura 3.13 - Espiral em Revit.

O algoritmo *Dynamo* que permite a execução das operações geométricas anteriormente referidas é apresentado na Figura 3.14. Devido à sua extensão e ao âmbito da presente dissertação, não se pretende descrever detalhadamente este algoritmo, embora, e de acordo com a Figura 3.14, se possa destacar:

- Em **1** é possível manipular os parâmetros referentes a cada secção (**α** , **rc** , **ax** e **espessura**);
- Em **2** são criados os arcos;
- Em **3** são criadas as linhas que “fecham” os arcos;
- Em **4** são criados os sólidos entre secções;
- Em **5** estes sólidos são unidos, sendo o resultado desta união importado para o *Revit*.

Relativamente aos diferentes nós explorados neste algoritmo, há a destacar o nó “*Curve.PointAtParameter*” que, dada uma curva e um parâmetro entre 0 e 1, devolve o ponto correspondente de uma curva (sendo que o 0 corresponde ao ponto inicial e o 1 ao ponto final). Este nó permitiu a criação da reta que “fecha” os arcos correspondentes às diferentes secções.

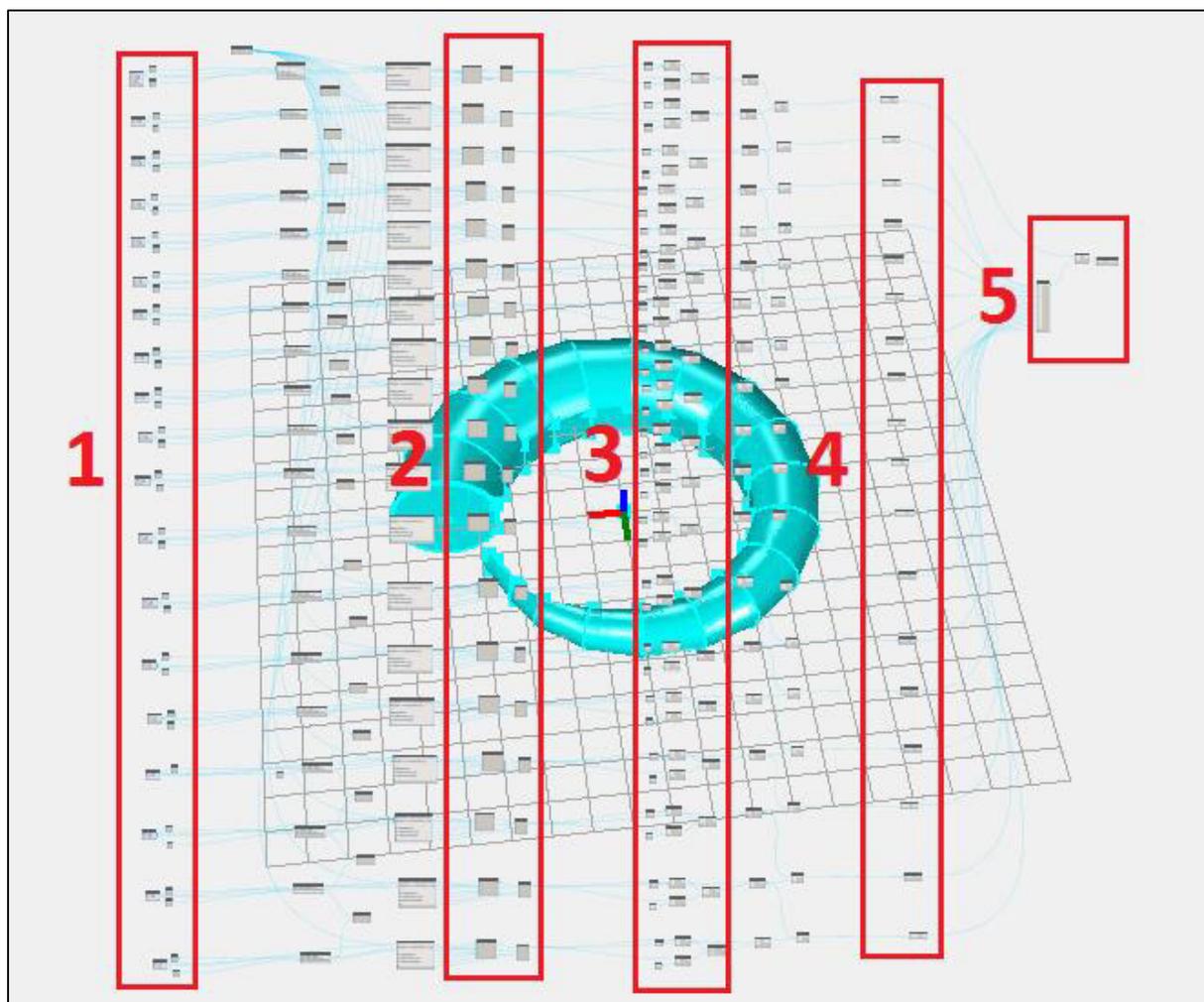


Figura 3.14 - Algoritmo Dynamo de modelação da espiral.

Foi ainda solicitado ao fornecedor de equipamentos um modelo tridimensional do equipamento, de forma a poder explorar um diferente *workflow* que passaria pelo aproveitamento deste modelo. Inicialmente, tentou-se a importação direta do equipamento, em formato de ficheiro .SAT para o ambiente de criação de famílias do *Revit*. Esta metodologia não se revelou viável devido ao tamanho do modelo, pois este é constituído por mais de 4000 componentes, o que influencia na exploração do mesmo.

Foram, então, testadas soluções alternativas, nomeadamente através do *software Inventor*. O objetivo da utilização deste *software* consistia em realizar uma simplificação do equipamento, visto pretender-se apenas um sólido cujo volume pudesse ser subtraído ao maciço de betão. O *Inventor* tem um comando, denominado *BIM Exchange*, que simplifica objetos e grava como famílias *Revit*, no entanto, esta ferramenta realiza simplificações demasiado grosseiras, criando cubos ou cilindros que cubram todos os vértices do objeto. Este comando revela-se útil no caso de se pretender uma estimativa do volume ocupado por um equipamento e não no caso em que

este trabalho se insere, em que se pretende um objeto que traduza o equipamento com elevado rigor.

Por último, tentou-se realizar esta simplificação manualmente, apagando algumas componentes de menor relevância e “preenchendo” o equipamento, de forma a este ser maciço. Também esta alternativa não se revelou eficaz, pois à mínima tentativa de manipulação se obtinham erros e faltavam componentes ao modelo. Na Figura 3.15 é possível comprovar a falta de componentes no modelo da espiral no *Inventor*.

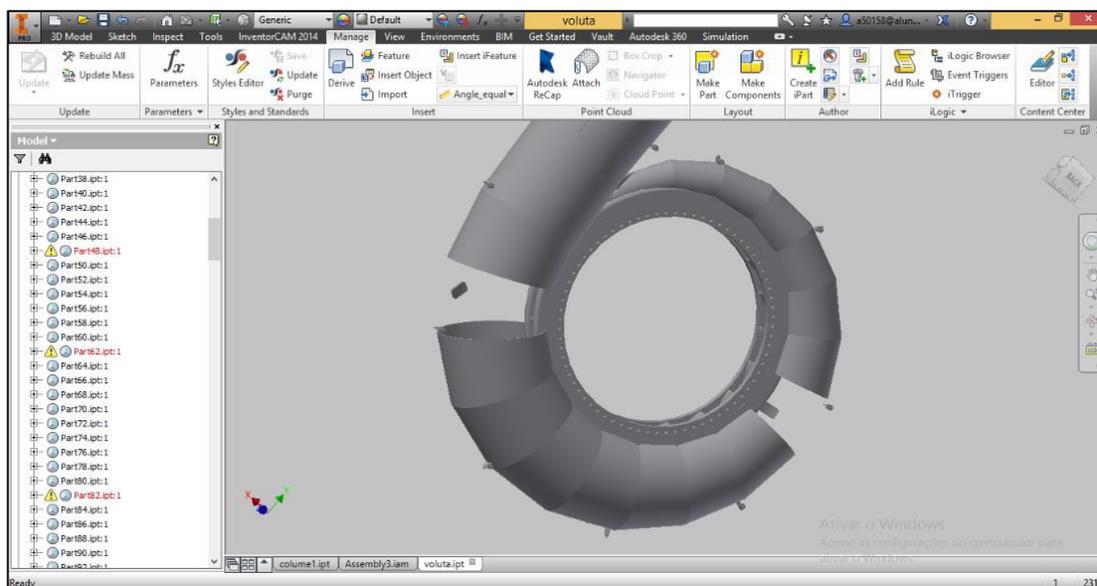


Figura 3.15 - Equipamento no *Inventor*.

Apesar das tentativas de exploração do modelo do fornecedor de equipamentos se terem revelado improdutivas, este *workflow* poderá resultar no caso de, no caderno de encargos, ser especificada a transmissão do modelo de um maciço simplificado, que traduza a envolvente do equipamento.

Relativamente ao tubo de aspiração, alguns dos dados do fornecedor de equipamentos são apresentados de seguida, nomeadamente um corte na Figura 3.16 e o perfil transversal tipo na Figura 3.17.

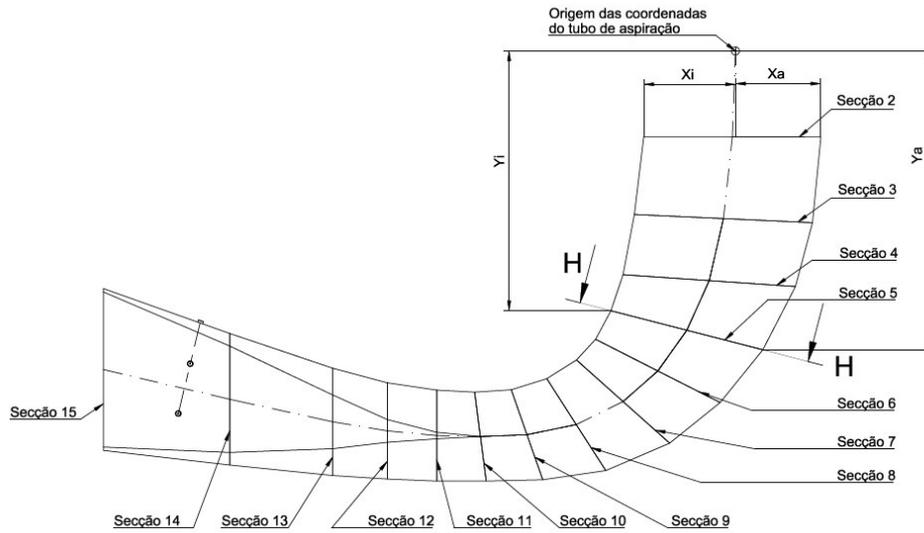


Figura 3.16 - Corte do tubo de aspiração.

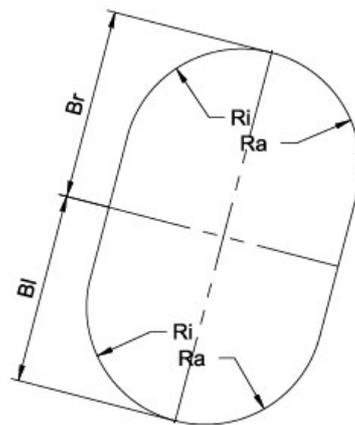


Figura 3.17 - Secção-tipo do tubo de aspiração.

De forma a facilitar a futura integração entre os modelos do tubo de aspiração e da espiral, optou-se por definir, para o tubo de aspiração, a mesma origem que para a espiral, sendo esta representada na Figura 3.18.

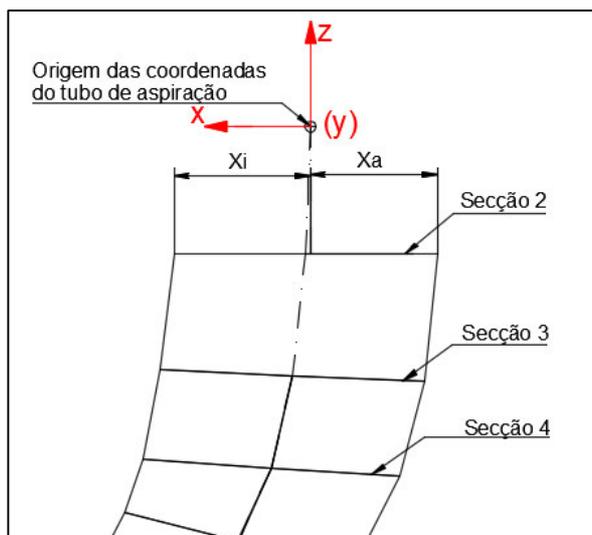


Figura 3.18 - Definição da origem das coordenadas para o modelo do tubo de aspiração.

Há, assim, oito parâmetros para cada secção do tubo de aspiração, sendo estes:

- **Bl e Br** – distâncias entre os limites da secção e o centro dessa mesma secção (Ver Figura 3.17);
- **Ra e Ri** – raios dos segmentos curvilíneos (Ver Figura 3.17);
- **Xa e Xi** – distâncias (segundo eixo *xx*) dos limites centrais de cada secção e a origem do sistema de coordenadas (Ver Figura 3.16);
- **Ya e Yi** – distâncias (segundo eixo *yy*) dos limites centrais de cada secção e a origem do sistema de coordenadas (Ver Fig. 3.17);

Os valores dos parâmetros para as diferentes secções podem ser verificados na Figura 3.19 sendo estes dados correspondentes ao fornecedor de equipamentos.

COORDENADAS DA BLIND. DO TUBO DE ASPIR.								
Dimensões internas da blindagem do tubo de aspiração								
Secção	Bl	Br	Ra	Ri	Xa	Ya	Xi	Yi
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
2	1575,0	1575,0	1520,0	1520,0	-1466,0	1509,0	1576,0	1509,0
3	1735,0	1735,0	1530,0	1530,0	-1320,0	3011,0	1740,0	2868,0
4	1910,0	1910,0	1483,0	1483,0	-1022,0	4130,0	1937,0	3924,0
5	2180,0	2180,0	1345,0	1345,0	-455,0	5237,0	2150,0	4561,0
6	2510,0	2510,0	1197,0	1197,0	285,0	6157,0	2418,0	5068,0
7	2840,0	2840,0	1071,0	1071,0	1160,0	6867,0	2753,0	5433,0
8	3208,0	3208,0	935,0	935,0	2269,0	7344,0	3273,0	5765,0
9	3475,0	3475,0	815,0	815,0	3360,0	7502,0	3896,0	5962,0
10	3625,0	3625,0	766,0	766,0	4340,0	7525,0	4537,0	6004,0
11	3625,0	3625,0	720,0	720,0	5198,0	7525,0	5198,0	5970,0
12	3550,0	3550,0	625,0	625,0	6060,0	7490,0	6060,0	5840,0
13	3390,0	3390,0	450,0	450,0	7010,0	7427,0	7010,0	5583,0
14	3150,0	3150,0	200,0	200,0	8800,0	7244,0	8800,0	4977,0
15	3000,0	3000,0	40,0	40,0	11000,0	6987,0	11000,0	4187,0

Figura 3.19 - Parâmetros das diferentes secções do tubo de aspiração.

Para a modelação do tubo de aspiração, foram então definidos seis pontos que auxiliam as transformações geométricas que levam à definição das diferentes secções, sendo estes apresentados na Figura 3.20.

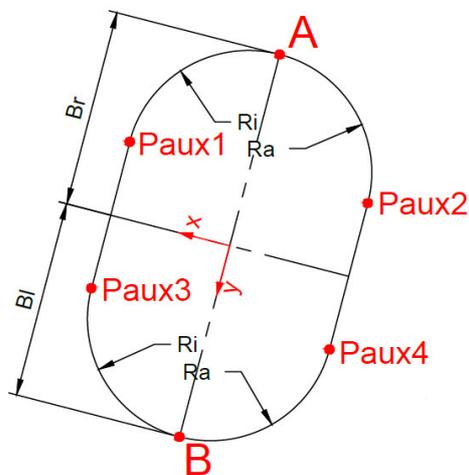


Figura 3.20 - Pontos que definem cada secção do tubo de aspiração.

Assim, a modelação passa pela criação de duas semicircunferências (a primeira, entre os pontos A, Paux1 e Paux2 e a segunda, entre os Pontos Paux3, B e Paux4) e duas retas (a primeira de Paux1 a Paux3 e a segunda de Paux4 a Paux2). As coordenadas espaciais dos diferentes pontos são dadas por:

$$\text{Ponto A } \left(\frac{X_i + X_a}{2}; -Br; -\frac{Y_i + Y_a}{2} \right) \quad (3.5)$$

$$\text{Ponto B } \left(\frac{X_i + X_a}{2}; Bl; -\frac{Y_i + Y_a}{2} \right) \quad (3.6)$$

$$\text{Paux1 } (X_i; -Br + R_i; -Y_i) \quad (3.7)$$

$$\text{Paux2 } (X_i; -Br + R_a; -Y_a) \quad (3.8)$$

$$\text{Paux3 } (X_i; Bl - R_i; -Y_i) \quad (3.9)$$

$$\text{Paux4 } (X_a; Bl - R_a; -Y_a) \quad (3.10)$$

O resultado da modelação dos elementos geométricos anteriormente referidos para as diferentes secções é apresentado na Figura 3.21.

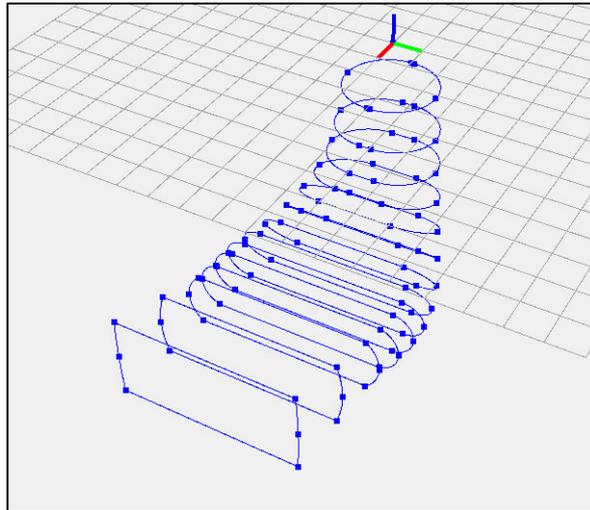


Figura 3.21 - Diferentes secções do tubo de aspiração.

Tal como na espiral, também no tubo de aspiração é necessário realizar um *Loft* entre as diferentes secções. Assim, os elementos que constituem cada secção do tubo de aspiração (semicircunferências e retas) foram unidas, para que cada secção fosse constituída por apenas um elemento geométrico. Após esta união, realizaram-se duas operações geométricas *Loft*, analogamente ao sucedido na modelação da espiral, uma para o sólido cujo volume vai ser subtraído ao maciço de betão (representado na Figura 3.22) e outra para se obter uma representação realística do tubo de aspiração (representado na Figura 3.23).

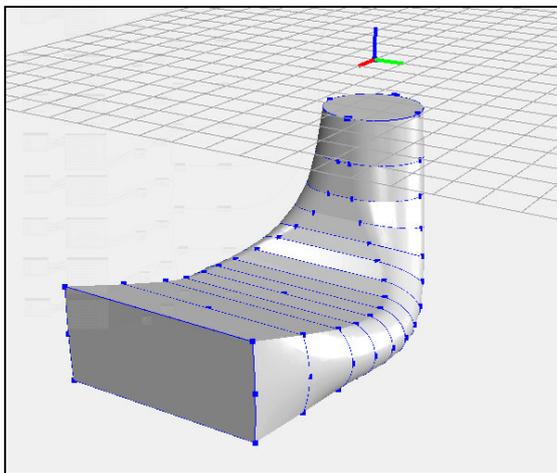


Figura 3.22 - Sólido do tubo de aspiração, em *Dynamo*.

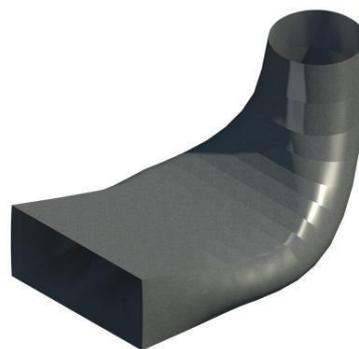


Figura 3.23 - Representação realista do tubo de aspiração, em *Revit*.

O algoritmo *Dynamo* que permite a realização das operações geométricas supracitadas e, conseqüentemente, a modelação do tubo de aspiração é apresentado na Figura 3.24. Mais uma

vez se optou por não detalhar este algoritmo embora, e de acordo com a Figura 3.24, se possa destacar:

- Em **1** é possível manipular os parâmetros referentes a cada secção (**Bl, Br, Ra, Ri, Xa, Xi, Ya e Yi**);
- Em **2** são criadas as semicircunferências e retas que constituem as secções do tubo de aspiração;
- Em **3** são criados os sólidos entre secções;
- Em **4** estes sólidos são unidos, sendo o tubo de aspiração posteriormente importado para o Revit.

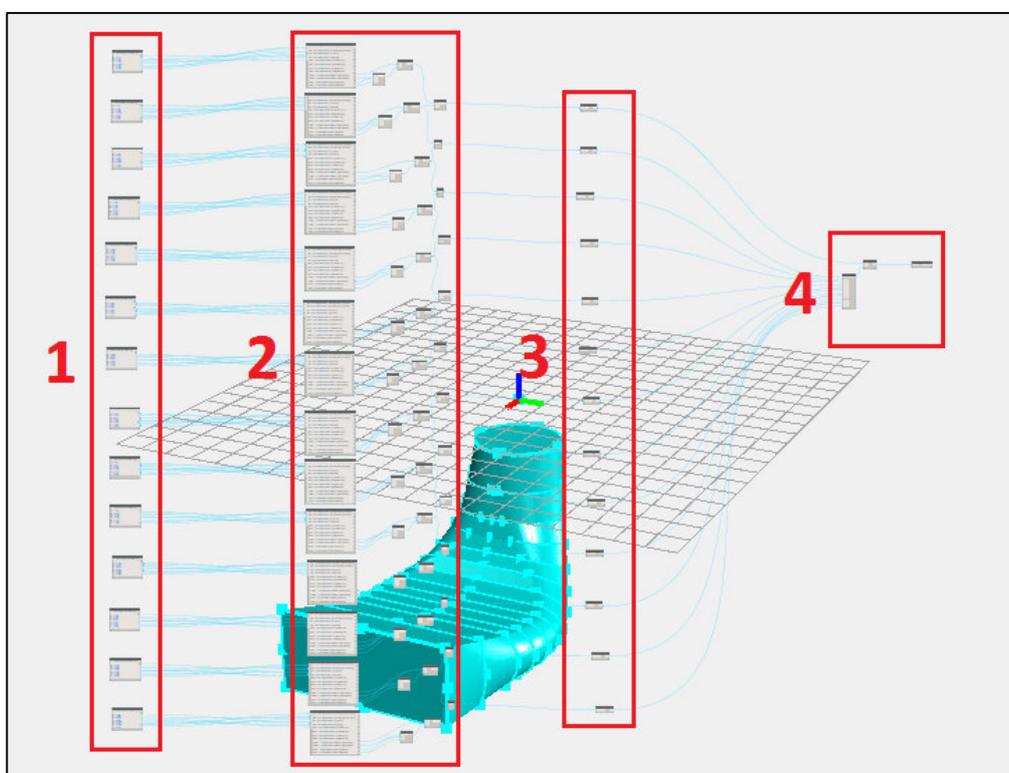


Figura 3.24 - Algoritmo Dynamo de modelação do tubo de aspiração.

Relativamente a este algoritmo, há ainda a destacar o facto de o autor, fruto da maior familiarização com a linguagem de programação, recorrer a programação em *Code Block* (bloco que permite programação textual ao invés de visual, o que na Figura 3.24 é possível verificar em **2**) em complementaridade com programação através de nós. A programação em *Code Block* promove uma maior simplicidade do algoritmo, pois cada bloco deste tipo pode conter variadas funções ou procedimentos, havendo uma redução do número de nós utilizados.

Uma vez obtidos os modelos e respetivos algoritmos da espiral e do tubo de aspiração, procedeu-se para a modelação do maciço de betão de suporte da turbina. Além dos vazios devido à turbina, há ainda outros vazios, geometricamente menos complexos, que foram também modelados parametricamente. Exemplo disso são os vazios A1, A2, A3, A4 e A5, representados na Figura 3.25, correspondente a um corte do maciço.

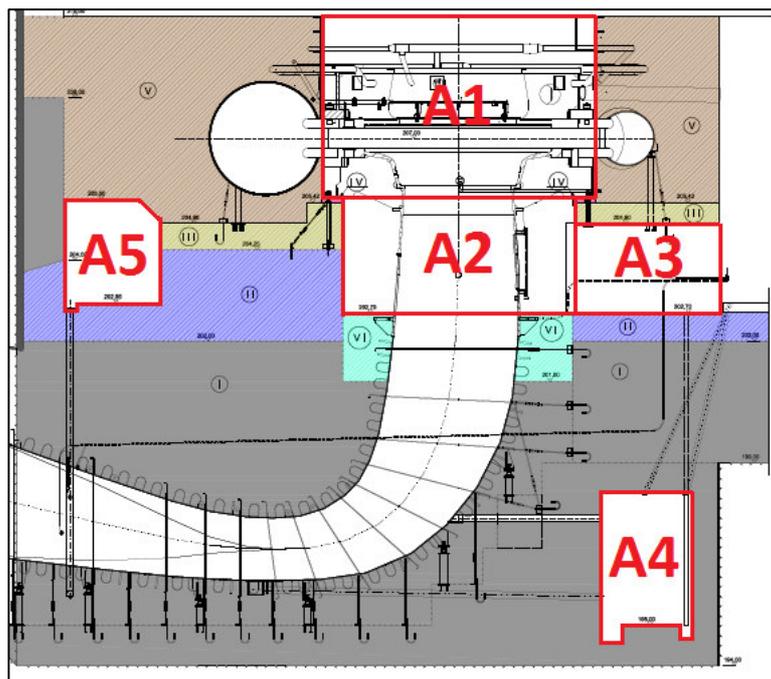


Figura 3.25 - Corte do maciço de suporte da turbina, com identificação de algumas das aberturas também modeladas.

A origem do modelo deste maciço foi definida como sendo a mesma definida na espiral e no tubo de aspiração, o que facilitou a integração destes dois modelos no algoritmo, bastando copiar os algoritmos anteriores. O maciço de betão é um prisma de geometria simples modelado parametricamente. Note-se que a modelação do maciço e das aberturas poderia ser obtida a partir de ferramentas do *Revit*, devido à menor complexidade quando comparados com a turbina, contudo, optou-se por recorrer também ao *Dynamo* na sua modelação.

Assim, um utilizador que pretenda modelar um maciço de suporte da turbina de outro empreendimento hidroelétrico, pode adaptar o algoritmo do maciço de Venda Nova III, alterando os parâmetros deste. No caso de o maciço que se pretende modelar conter mais ou menos aberturas, parte do algoritmo pode ser acrescentado ou eliminado.

Outros elementos da central foram modelados com recurso ao *Dynamo*. Um exemplo destes elementos é a estrutura de suporte do alternador, apresentado na Figura 3.26. A modelação destes elementos não é especificada no presente documento com o objetivo de não repetir processos de modelação. As dificuldades com que o autor se foi confrontando durante a modelação foram sendo ultrapassadas com processos tentativa-erro ou partilhando esses obstáculos no fórum do *site* do *Dynamo* (Dynamo BIM, 2014b). De facto, este fórum revelou extrema utilidade durante a modelação dos diferentes elementos, pois permite obter ajuda de utilizadores com grande experiência na utilização do *software*. Nota ainda para a possibilidade do utilizador descarregar gratuitamente pacotes de nós personalizados, que podem ser criados por qualquer utilizador e partilhados no *site* *Dynamo packages* (Dynamo Packages, 2014). Estes nós expandem as funcionalidades nativas da ferramenta e podem ser obtidos compilando nós já existentes ou programando na linguagem *Python*. Um exemplo de um nó personalizado criado pelo autor, e utilizado na modelação do maciço de suporte do alternador, é o nó que permite a realização de um *Loft* entre secções com abertura interior, ou seja, a criação de um sólido oco. Este processo é apenas conseguido nos nós nativos do *Dynamo* criando um primeiro *Loft* do sólido como maciço, um segundo *Loft* correspondente apenas à abertura sendo, posteriormente, o volume do segundo sólido subtraído ao volume do primeiro. O nó criado automatiza este processo a partir de quatro *inputs*: os perímetros interior e exterior nas secções de entrada e de saída. Este nó permite poupar tempo de modelação e descomplica a interface de programação, com uma redução substancial do número de nós utilizados para realizar a mesma tarefa (neste caso, dez nós são compactados em apenas um).

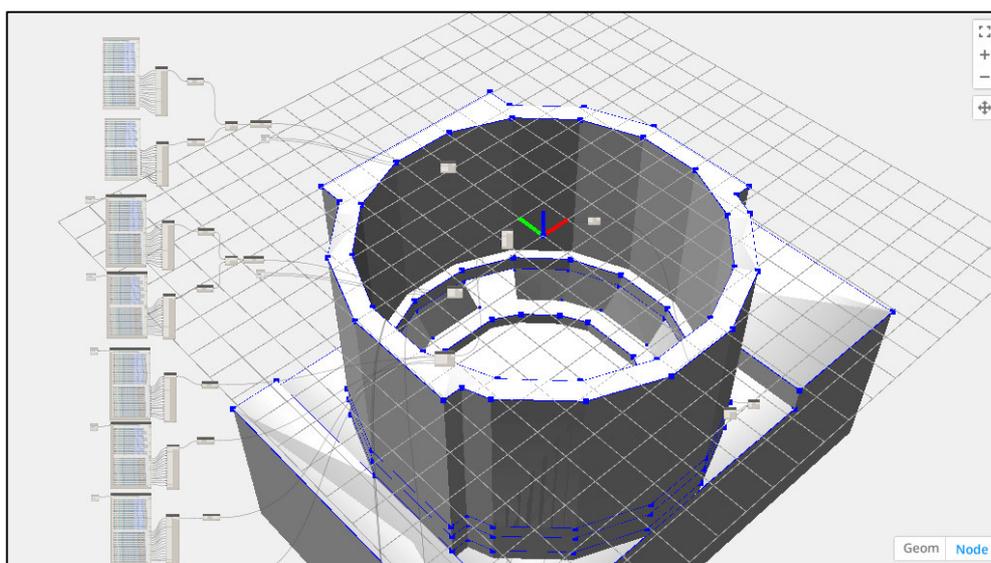


Figura 3.26 - Algoritmo e representação tridimensional do maciço de suporte do alternador.

A restante estrutura foi modelada seguindo um processo de modelação corrente, através a famílias nativas do *Revit*. Esta modelação foi realizada partindo de desenhos de execução a duas dimensões e foram tidos cuidados de forma a garantir uma extração de quantidades precisa, por exemplo, nas ligações pilar-viga ou viga-laje. Para este efeito foram recordados conceitos adquiridos em unidades curriculares realizadas em anos anteriores, particularmente em Organização e Gestão da Construção.

A interpretação dos desenhos a duas dimensões, e tendo como particularidade o facto de se tratarem de estruturas de elevada complexidade, constituiu uma dificuldade inicial, dedicando o autor várias horas a analisar os diferentes desenhos antes de partir para a modelação. Já na modelação, a ferramenta do *Revit* que permite a criação de escadas revela-se menos intuitiva que as restantes, havendo inicialmente alguma dificuldade em perceber detalhadamente todos os parâmetros associados à modelação destes elementos.

O modelo final apresenta um nível de desenvolvimento de 300 para os diferentes elementos. A modelação da espiral e do tubo de aspiração foi realizada no espaço de uma semana, ao passo que a modelação da restante estrutura demorou três semanas, perfazendo um total de tempo de modelação de cerca de quatro semanas para esta componente de Venda Nova III. O modelo da central em *Revit* é apresentado na Figura 3.27 (vista tridimensional) e na Figura 3.28 (corte tridimensional).

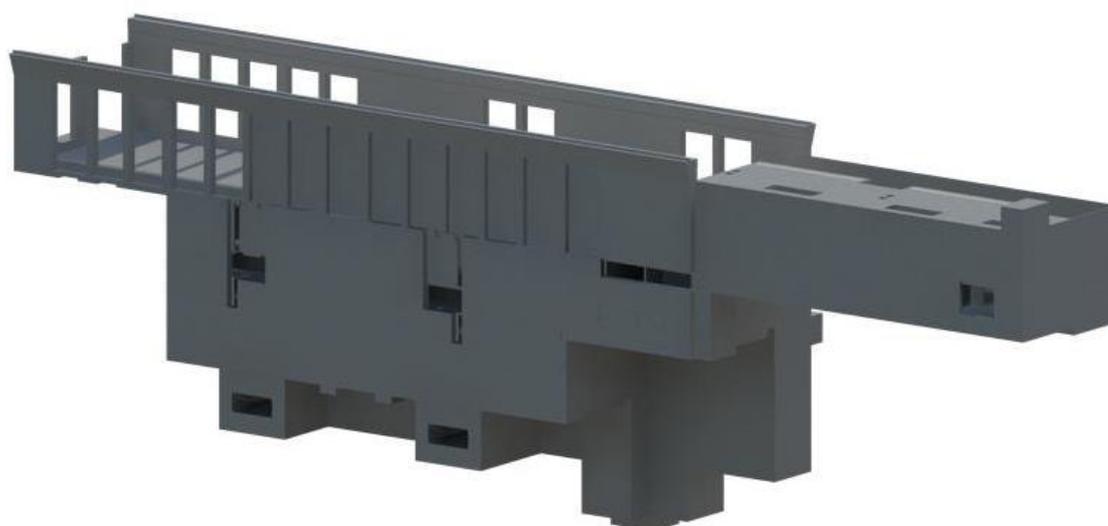


Figura 3.27 - Modelo da Central.

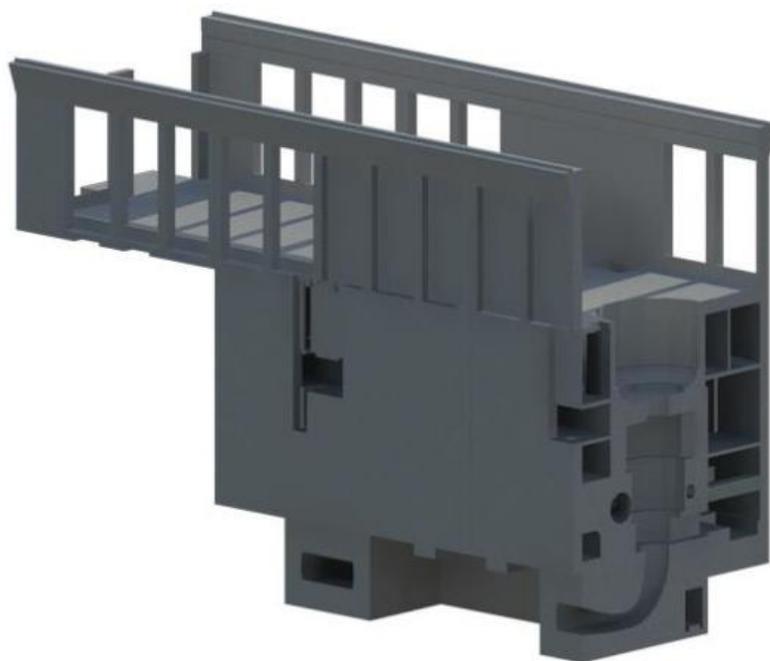


Figura 3.28 - Corte tridimensional da central.

3.4 Tomada de água de Venda Nova III

3.4.1 Descrição da geometria

A tomada de água de Venda Nova III é, essencialmente, constituída pelos seguintes elementos: o bocal, o maciço de suporte, a torre de manobra e o pórtico de apoio ao equipamento de movimentação das comportas. Na Figura 3.29 é apresentada a tomada de água de Venda Nova III (esquerda) e a tomada de água de Venda Nova II (direita).



Figura 3.29 - Tomada de água de Venda Nova III, à esquerda (EDP, 2014).

É no bocal da tomada de água que, perante o funcionamento do aproveitamento em turbina, se dá a entrada da água da albufeira de Venda Nova no circuito hidráulico e onde, ao longo dos seus 23 m de desenvolvimento, acontece uma redução significativa de secção transversal do escoamento (Ferreira *et al.*, 2012). A secção do bocal é retangular, com largura livre de 18,5 m na zona de entrada e 5 m na zona junto às comportas, variando também a altura entre os 13,2 m e os 5 m, nas mesmas zonas. Na zona de entrada do bocal há três septos, dois verticais, dividindo o troço inicial em três vãos, e um horizontal, com o objetivo de conceder apoio às grades de proteção do circuito e que divide a altura da boca em dois vãos de 6,1 m cada. Estes septos são apresentados na Figura 3.30.



Figura 3.30 - Zona de entrada do bocal da tomada de água de Venda Nova III (EDP, 2014).

Após o troço de secção variável do bocal encontra-se um trecho com secção transversal constante, com 5 m de largura e 8 m de altura, onde se instalam as comportas, ensecadeira e de segurança. Estas comportas são movimentadas no interior da torre de manobra, com 24 m de altura, 8 m de diâmetro interior e 1 m de espessura, e nela estão instalados todos os equipamentos necessários à operação das comportas. A fundação desta torre é conseguida à custa de um maciço de suporte com aproximadamente 1800 m³ de betão, que se encontra confinado pelos taludes laterais de rocha, com fundação plana e inclinada de modo contínuo com a soleira do bocal e circuito hidráulico (Ferreira *et al.*, 2012). Encastrado no topo da torre de manobra, encontra-se um pórtico em betão armado, com cerca de 15 m de altura e que funciona como apoio da ponte rolante que permite a movimentação das comportas.

3.4.2 Estratégia de modelação

A maior complexidade geométrica desta componente, comparativamente com a central, leva a que haja um maior recurso ao *Dynamo*. Assim, optou-se pela divisão da componente em diferentes partes, nomeadamente: bocal, maciço de suporte, torre de manobra e pórtico de apoio à movimentação das comportas. Há ainda a considerar dois maciços laterais ao bocal, também modelados separadamente, e, nesta componente, optou-se ainda pela modelação do túnel de adução e pela incorporação do terreno no modelo. Na Figura 3.31 e na Figura 3.32 é apresentada a divisão do modelo por diferentes elementos.

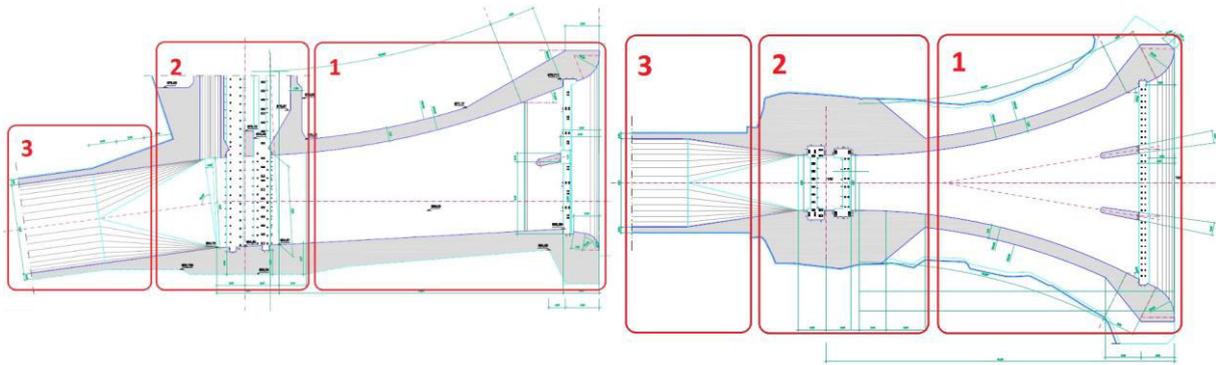


Figura 3.31 - Divisão da tomada de água por elementos de modelação: bocal (1), maciço de suporte (2) e túnel de adução (3).

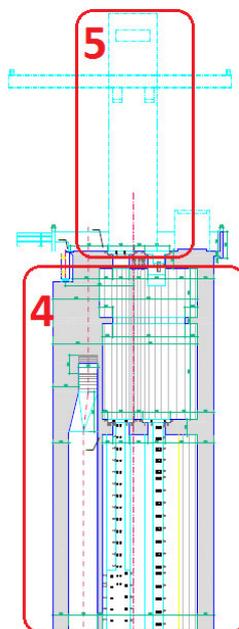


Figura 3.32 - Divisão da tomada de água por elementos de modelação: torre de manobra (4) e pórtico de apoio (5).

A modelação do bocal, maciço de suporte (incluindo maciços laterais) e túnel de adução é totalmente realizada em *Dynamo* ao passo que na torre de manobra há elementos (como vigas e lajes) que são modeladas em *Revit*. Já o pórtico de apoio, devido à simplicidade da sua geometria, é totalmente modelado no *Revit*.

3.4.3 Modelação

O primeiro elemento a ser modelado foi o bocal. Após análise dos desenhos correspondentes a este elemento, estudaram-se diferentes estratégias de modelação, e entendeu-se que a mais intuitiva correspondia à subtração sequencial de volumes, num processo análogo ao adotado na

modelação do maciço de suporte da turbina, na central. Assim, e partindo de um prisma retangular de geometria simples, vão sendo subtraídos volumes modelados parametricamente sendo o resultado final a geometria pretendida.

Os vazios definidos dividem-se em dois grandes grupos: os vazios exteriores (vazios 1, 2, 3 e 4) e os vazios interiores (em planta e em corte) – ver Figura 3.33. O facto de a origem da tomada de água estar já definida na metodologia de trabalho tradicional foi também aproveitado, definindo-se neste caso a mesma origem, sendo também apresentada na Figura 3.33.

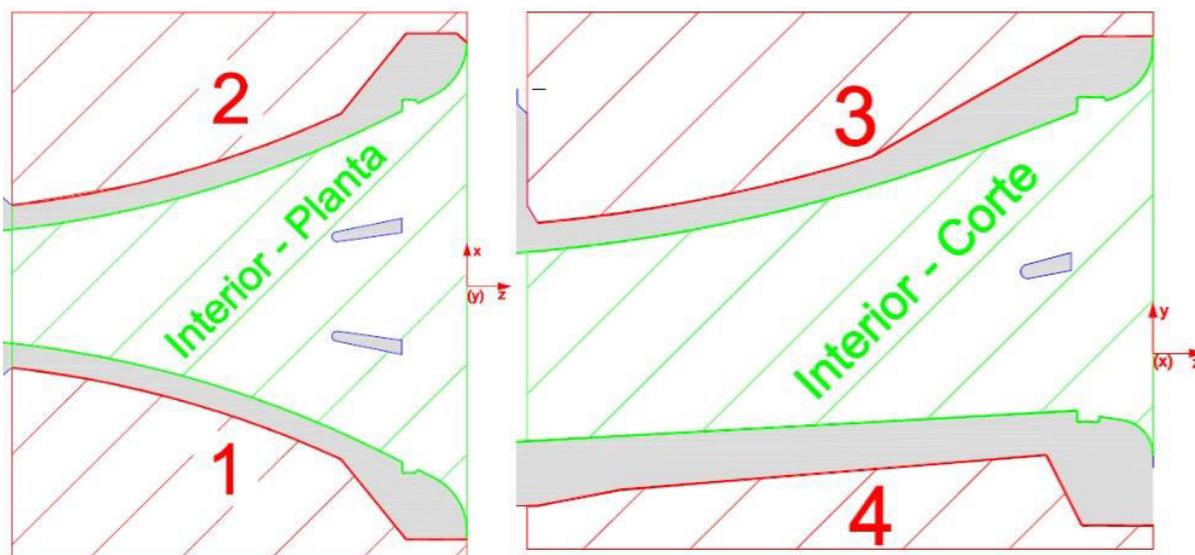


Figura 3.33 - Representação das aberturas do bocal em planta (esquerda) e em corte (direita).

Há, então, diferentes parâmetros para os diferentes vazios. Mais uma vez, de forma a não explicar processos repetitivos, optou-se por demonstrar a modelação de apenas uma destas aberturas e de um dos septos, seguindo as restantes aberturas e septos estratégias de modelação semelhantes. É, então, de seguida, apresentado o processo de modelação da abertura 2 e do septo horizontal. No Anexo 1 – Explicação detalhada de algoritmos de modelação está disponibilizada uma explicação aprofundada, a nível de algoritmo *Dynamo*, da modelação da abertura 2.

A abertura 2 é definida por diferentes segmentos, de diferentes características. Analisando de jusante para montante identifica-se um segmento curvilíneo seguido de três segmentos retilíneos - Figura 3.34. O segmento curvilíneo é definido a partir de cinco parâmetros: o **raio** de curvatura, os **ângulos de início e fim**, e **duas distâncias** (que definem a localização relativamente à origem): **l1**, que corresponde à distância entre o centro do arco que define o

troço curvilíneo e o eixo dos xx , e l_2 , que corresponde à distância entre o eixo dos zz e o início (a jusante) do segmento curvilíneo. Já os segmentos retilíneos podem ser definidos a partir de dois parâmetros: o **ângulo**, relativamente ao eixo dos zz , e a **extensão** do respetivo segmento.

De forma a facilitar a compreensão e/ou manipulação do algoritmo os segmentos anteriormente referidos são designados de segmentos 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4, correspondendo o 2.1 ao segmento curvilíneo (Figura 3.34).

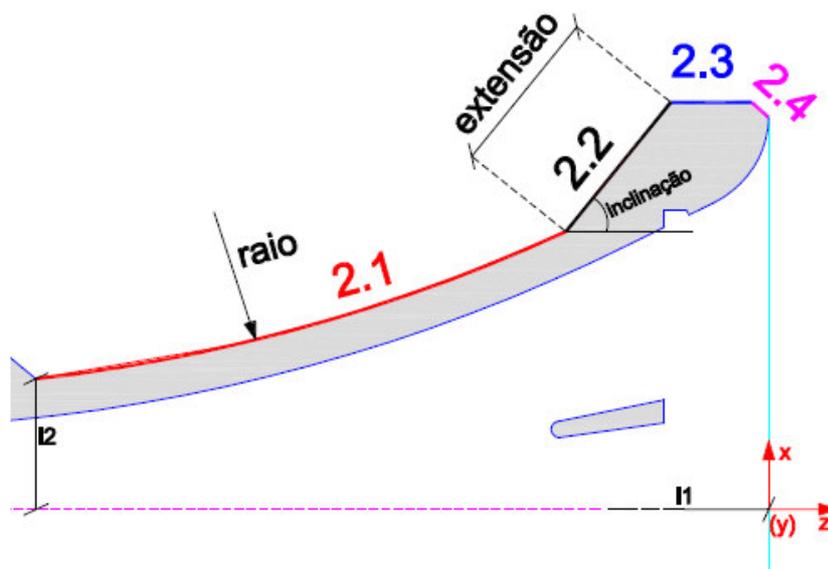


Figura 3.34 - Apresentação detalhada da abertura 2, com identificação de alguns parâmetros.

O segmento 2.1, correspondente a um arco, pode ser modelado a partir de cinco *inputs*: o centro e raio do arco, os ângulos de início e fim e a normal ao arco. Relativamente ao centro, as coordenadas relativamente aos eixos de xx e zz são dadas por:

$$x = raio + l_2 \tag{3.11}$$

$$z = -l_1 \tag{3.12}$$

A coordenada correspondente ao eixo dos yy pode ser arbitrada, sendo o importante, visto pretender-se realizar a subtração do volume, que este sólido “cubra” a geometria do prisma. Visto isto, adotou-se um valor elevado, sendo:

$$y = -15 \tag{3.13}$$

O raio e os ângulos são dados fornecidos pelo utilizador (parâmetros), ao passo que a normal é dada pelo vetor do eixo dos yy. Uma vez gerado o arco, este é copiado 30 metros em relação ao eixo dos yy (note-se que se tinha definido a coordenada deste eixo como sendo $y = -15$), optando-se por este valor para manter conformidade com o valor definido anteriormente. Esta operação tem como objetivo a criação de uma superfície entre os dois arcos, que é conseguida com a realização de um *Loft* entre estas. Esta superfície é apresentada na Figura 3.35. Lembra-se que a sua altura (dimensão segundo o eixo dos yy) é elevada de forma a garantir que “cobre” o volume do prisma regular ao qual são subtraídos os diferentes vazios.

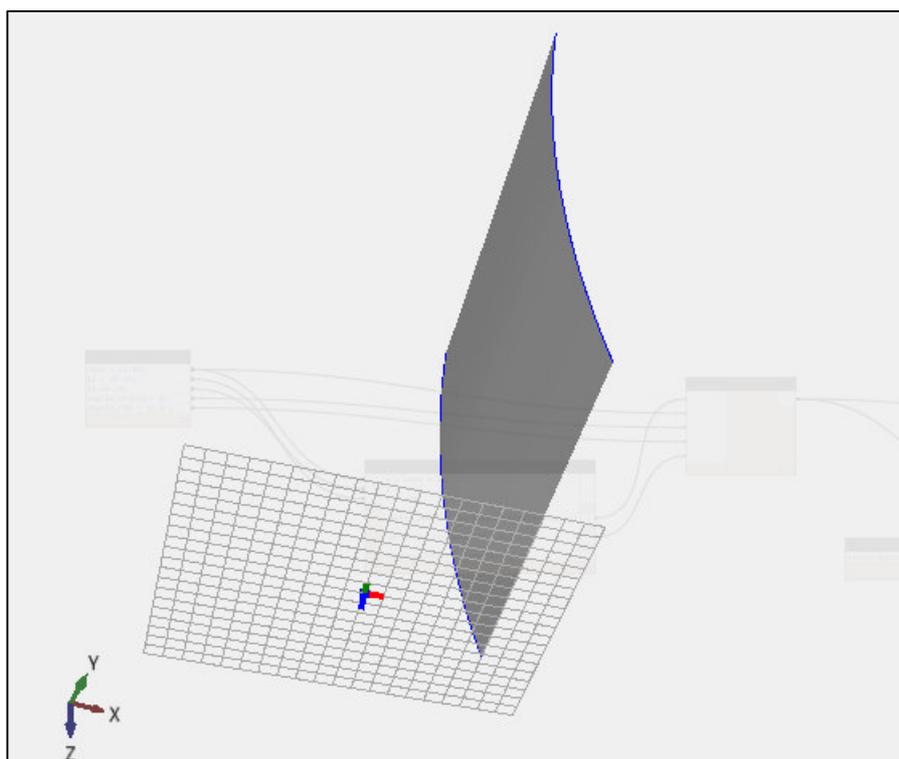


Figura 3.35 - Superfície, em Dynamo, que define o segmento 2.1.

Relativamente ao segmento 2.2, este pode ser definido por uma reta, que por sua vez é definida por dois pontos. O primeiro ponto corresponde ao final do segmento 2.1 (doravante designado de ponto A), sendo o segundo (doravante designado de ponto B) determinado em função deste, dependendo dos parâmetros (extensão e inclinação) do segmento. Assim, as coordenadas do ponto B são obtidas partindo das coordenadas do ponto A através de relações trigonométricas. O ponto B é, então, dado por:

$$x(B) = x(A) + \text{extensão} \times \sin(\text{inclinação}) \quad (3.14)$$

$$z(B) = z(A) + \text{extensão} \times \cos(\text{inclinação}) \quad (3.15)$$

Mais uma vez, e mantendo a coerência de acordo com o segmento anterior, no ponto B também se optou por definir a coordenada do eixo dos yy igual a - 15. Com os dois pontos definidos é, então, possível criar a reta entre os pontos A e B, que definem o segmento 2.2. Analogamente ao segmento anterior, também esta reta é copiada 30 metros na direção do eixo dos yy com o objetivo de gerar uma superfície.

Este ciclo, que se caracteriza por partir do ponto final do segmento anterior e que permite, tendo em conta o valor dos parâmetros, definir o novo segmento e criar uma superfície, é repetido para 2.3 e 2.4. No final deste processo, obtêm-se quatro superfícies que são depois unidas. Estas superfícies são depois convertidas num sólido, através da atribuição de espessura. O valor da espessura foi definido como sendo 10 metros, mais uma vez de forma a garantir que este volume “cobre” o volume do prisma retangular cujo volume vai ser subtraído desta abertura. Na Figura 3.36 está representado o algoritmo e o sólido correspondente ao vazio 2.

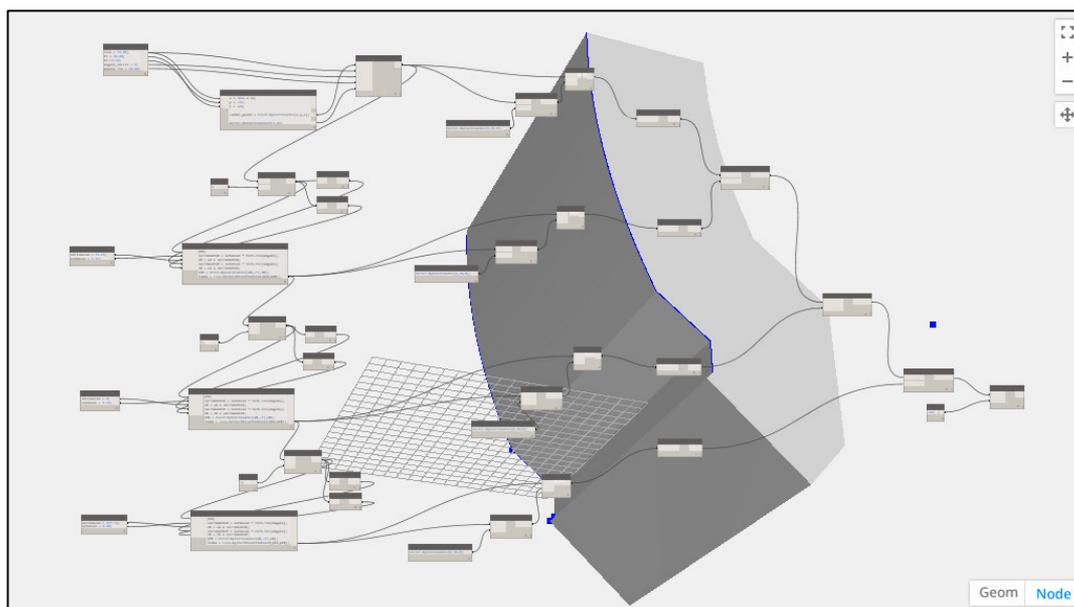


Figura 3.36 - Algoritmo e sólido que definem o vazio 2.

Relativamente a este algoritmo *Dynamo*, há a destacar a utilização dos nós “*Point.X*” e “*Point.Z*” que devolvem as coordenadas X e Y de um ponto, respetivamente, e ainda do nó “*Surface.Thicken*” que permite converter uma superfície num sólido, através do seu espessamento.

Os restantes vazios exteriores (1,3 e 4) seguem, tal como referido anteriormente, processos de modelação semelhantes. O resultado da subtração dos vazios exteriores ao prisma é apresentado na Figura 3.37.

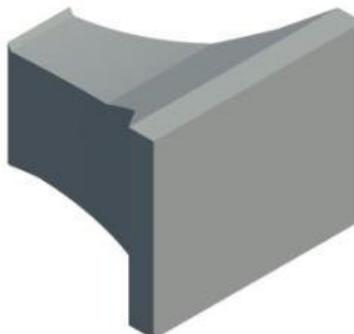


Figura 3.37 - Sólido em Revit resultante da subtração dos vazios exteriores.

Também os vazios interiores (planta e corte) seguem o mesmo processo, mas com uma particularidade: neste processo de modelação considera-se sempre uma dimensão elevada de forma a garantir que o volume criado “cubra” o prisma inicial (no vazio 2 considerava-se $y = -15$) mas, para os vazios interiores, isto não poderia ser feito visto poder levar à subtração de paredes ou lajes do bocal. No entanto, o processo seguido nestes vazios foi o mesmo, considerando uma dimensão elevada mas, no final de modeladas as aberturas em planta e em corte, estas são intersectadas. Esta interseção entre aberturas é apresentada na Figura 3.38, sendo o resultado desta interseção apresentado na Figura 3.39.

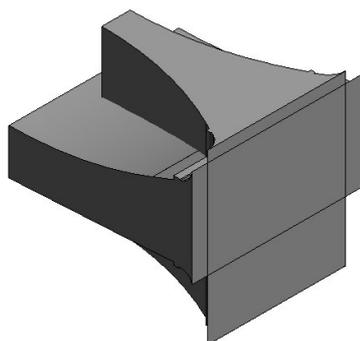


Figura 3.38 - Interseção entre os vazios Interior - Corte e Interior - Planta.

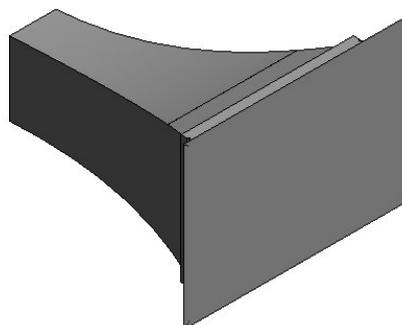


Figura 3.39 - Resultado da interseção entre vazios.

O resultado desta interseção entre estes dois volumes é subtraído ao volume do prisma, garantindo que este fica corretamente modelado. O prisma subtraído dos vazios exteriores e interiores é apresentado na Figura 3.40.

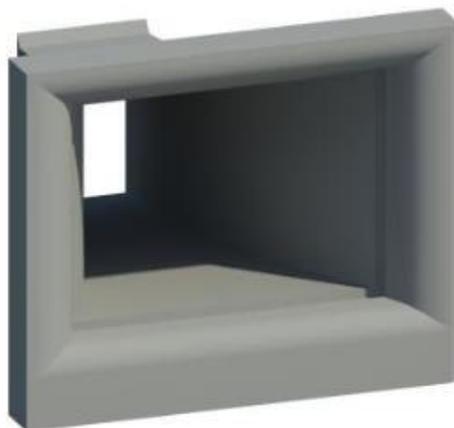


Figura 3.40 - Sólido em Revit resultante da subtração dos vazios exteriores e interiores.

Uma vez modelados os vazios, procedeu-se à modelação dos septos, de forma a completar o bocal. Os septos são definidos a partir de oito parâmetros, sendo seis distâncias (**I1**, **I2**, **I3**, **I4**, **I5** e **I6**) e dois ângulos (**inclinação 1** e **inclinação 2**). Partindo destes parâmetros podem ser associados cinco pontos, que levam à definição da forma do septo. Estes parâmetros e pontos são apresentados na Figura 3.41.

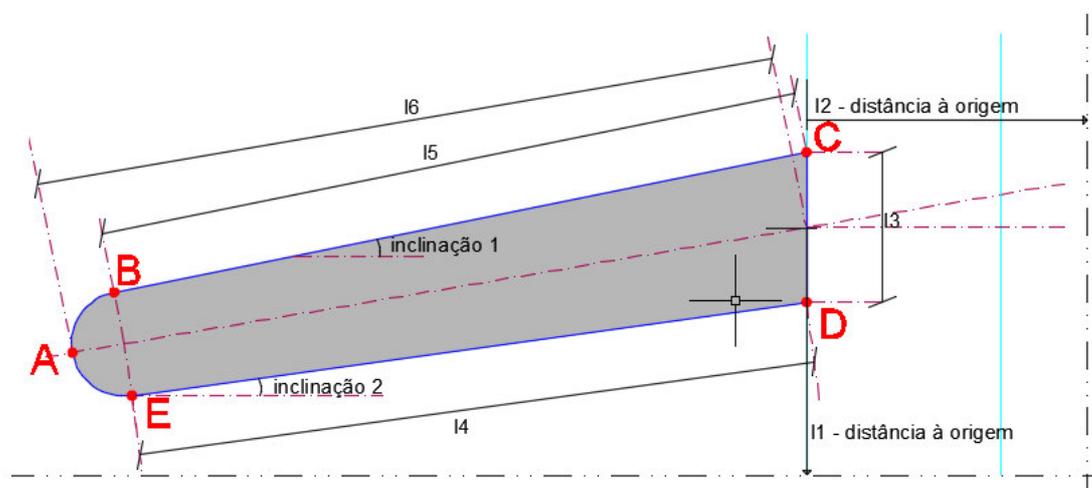


Figura 3.41 - Parâmetros relativos ao septo.

As coordenadas segundo os eixos do yy e zz dos diferentes pontos podem ser obtidas por relações trigonométricas a partir dos parâmetros supracitados.

Mais uma vez se adotou o valor de -15 para as coordenadas relativas ao eixo dos xx . Definidos os pontos é criada a secção do septo, sendo esta composta por uma semicircunferência entre os pontos E, A e B e por retas entre os pontos B e C, C e D e, finalmente, D e E.

Definidas as retas e a semicircunferência, estas são unidas e a secção é copiada 30 metros na direção do eixo dos xx . Tendo as duas secções é então possível obter o sólido, com a realização de um *Loft*. Na Figura 3.42 é apresentado este sólido.

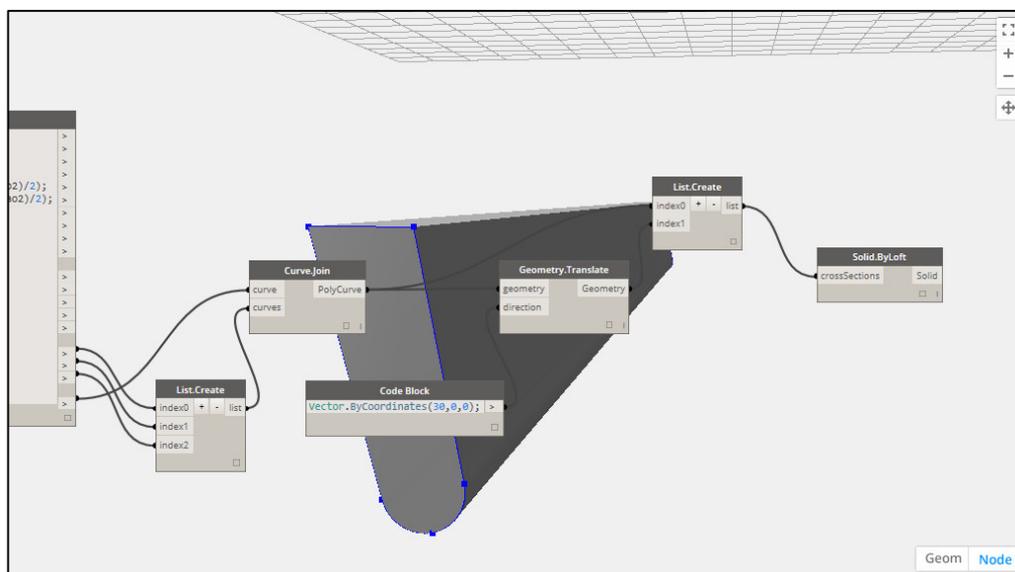


Figura 3.42 - Parte do algoritmo que define o sólido correspondente ao septo horizontal.

Uma vez obtido este sólido, este é intersetado com o vazio interior anteriormente subtraído ao prisma. Desta forma, garante-se que o septo se desenvolve unicamente no interior do bocal. O resultado desta interseção é adicionado ao bocal, sendo que o mesmo processo foi seguido para os septos verticais. Foram ainda modelados outros vazios nos septos devido ao suporte da grade do bocal por parte destes mas, devido à sua simplicidade, não são expostos no presente documento. A geometria final do bocal é apresentada na Figura 3.43.

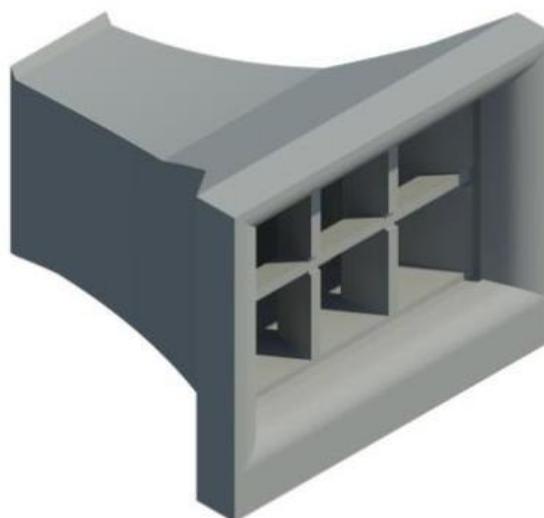


Figura 3.43 - Representação tridimensional do Bocal no Revit.

Na Figura 3.44 é apresentada a totalidade do algoritmo de modelação do bocal. Assim, e de acordo com esta figura, é possível destacar:

- Em **1** podem ser manipulados os parâmetros referentes aos vazios e septos;
- Em **2** são modelados estes elementos;
- Em **3** são subtraídos (no caso dos vazios) e adicionados (no caso dos septos) ao prisma regular.

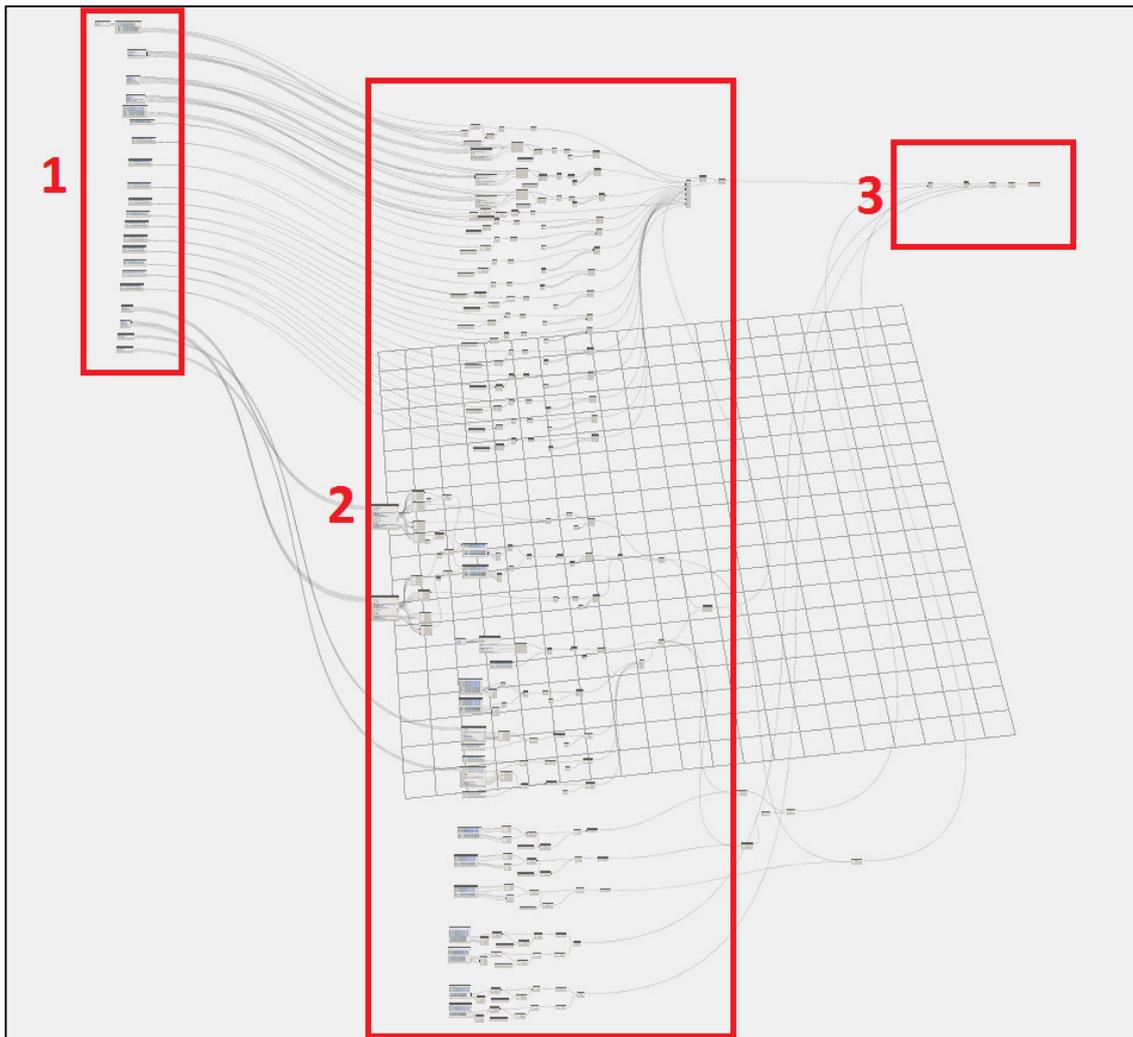


Figura 3.44 - Algoritmo Dynamo de modelação do bocal.

O bocal foi depois guardado como uma família de modelo genérico no *Revit*. É também possível explorar um comando do *Revit* denominado “*Wall by Face*” que, a partir das faces do bocal, modela paredes. Este comando tem interesse se o utilizador pretende dividir um sólido modelado no *Dynamo* em diferentes elementos.

Uma vez modelado o bocal, partiu-se para a modelação das restantes componentes, sendo que o presente documento vai focar-se nos aspetos de cada componente que constituíram desafios comparativamente com as anteriores, de forma evitar uma constante repetição de processos de modelação.

O maciço de suporte apresenta, em geral, geometria de menor complexidade quando comparado com o bocal. Além do maciço que se encontra confinado pelo terreno, considerou-se também como pertencente a esta componente a parte que realiza a transição entre este e o bocal. A modelação é, então, realizada dividindo o maciço de suporte nestas duas componentes.

A origem definida para este elemento é a mesma que a definida aquando da modelação do bocal. Começou-se pela modelação do exterior da parte que faz a transição entre o maciço confinado e o bocal. A estratégia adotada neste processo foi a mesma que a adotada anteriormente, com a modelação paramétrica dos vazios exteriores. O vazio resultante desta subtração de volumes é apresentado na Figura 3.45.



Figura 3.45 - Representação tridimensional do exterior do maciço que realiza a transição entre o bocal e o maciço confinado pelo terreno.

Já relativamente ao maciço confinado pelo terreno, e para os vazios exteriores, não se adotou a mesma estratégia de modelação. A parte exterior deste maciço foi modelada partindo do desenho das escavações, definindo duas secções (de base e de topo), visto saber-se que a secção de topo corresponde à cota 679 metros. Depois de obtidas as duas secções, é realizado um *Loft* entre estas, ficando, então, definido o exterior do maciço confinado pelo terreno. Na Figura 3.46 são representadas sobre o desenho das escavações a secção de base (a vermelho) e a secção de topo (a azul).

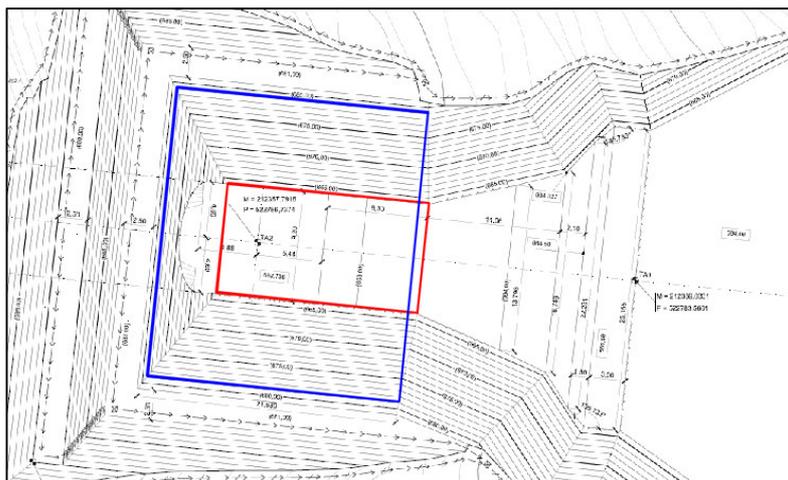


Figura 3.46 - Secção de base (vermelho) e topo (azul) do maciço confinado pelo terreno.

Já relativamente aos vazios interiores, estes maciços seguiram a estratégia “padrão”, modelando o vazio em corte e em planta, cada um com uma dimensão elevada, sendo que estas são depois intercetadas e o resultado desta interceção é subtraído aos volumes anteriormente referidos. A exceção vai para os vazios correspondentes ao início do túnel de adução e da torre de manobra, sendo estes melhor explicados na modelação das respetivas componentes. O modelo do maciço de suporte é apresentado na Figura 3.47.

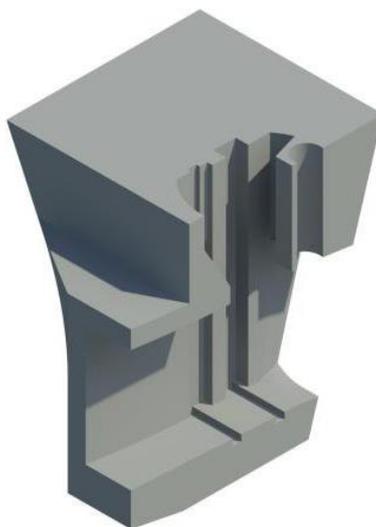


Figura 3.47 - Corte tridimensional do maciço de suporte, em Revit.

Uma das principais características relativas ao túnel de adução é o facto de, no seu interior, se dar a transição entre uma secção retilínea e uma secção circular. Esta transição é bastante

frequente em circuitos hidráulicos de aproveitamentos hidroelétricos, sendo denominada pelos intervenientes no projeto de “quadrado redondo”, apesar de muitas vezes, na realidade, a secção reta não ser quadrangular mas sim retangular, como no presente caso. Na Figura 3.48 é apresentado um corte longitudinal (à esquerda) e um corte pelo eixo do túnel de adução (à direita).

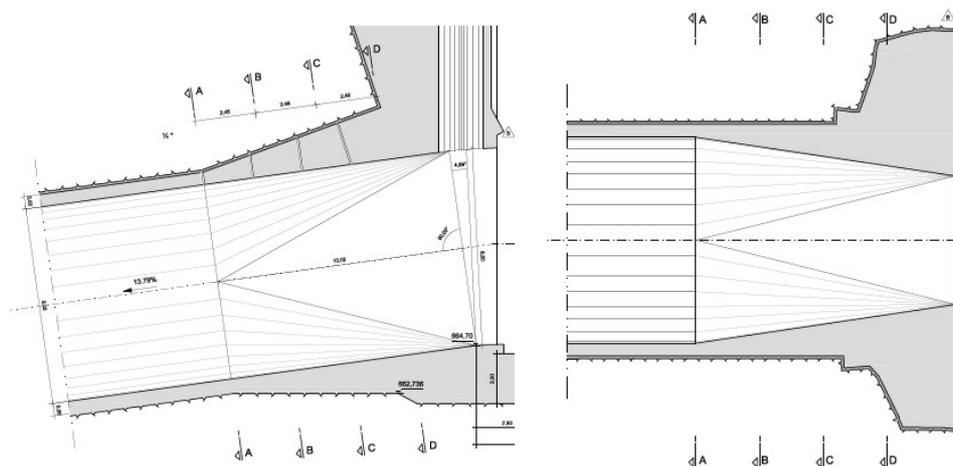


Figura 3.48 – Cortes do túnel de adução: longitudinal (esquerda) e pelo eixo (direita).

Mais uma vez, os vazios exteriores foram modelados parametricamente e o seu volume subtraído ao volume de um prisma regular, de forma semelhante ao que foi realizado anteriormente para, por exemplo, o caso do bocal. Já no caso do vazio interior, e particularmente no “quadrado redondo”, este foi, inicialmente, modelado realizando um *Loft* entre três secções: a secção retangular, a secção circular e uma secção intermédia entre as anteriores. Uma vez modelado o túnel de adução, este foi exportado para o *Revit*, porém, quando executados os comandos “*Partial Explode*” ou “*Full Explode*” o elemento desaparece e o *software* apresenta a seguinte mensagem de erro “*Import contained 3D data or points which can’t be exploded. Only 2D data was exploded.*”. O facto de não ser possível explodir o sólido antes da gravação da família apresenta importantes limitações na sua utilização pois, tal como já referido anteriormente, não é possível, por exemplo, unir o objeto a outros, nem criar vistas em corte do objeto, pois o seu aspeto nestas vistas poderia não corresponder ao realmente modelado. Na Figura 3.49 é possível verificar que o início do túnel de adução apresenta as cores trocadas e textura errada quando comparado com o maciço de suporte, apesar de ter atribuído o mesmo material.

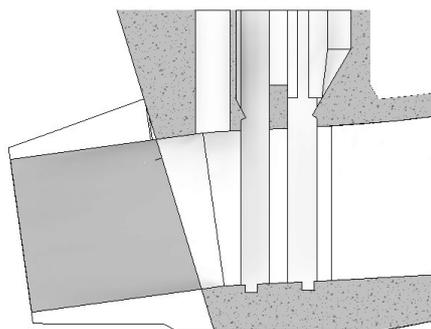


Figura 3.49 - Corte do túnel de adução não explodido (esquerda) e do maciço de suporte (direita).

Com o objetivo de perceber a razão do *Revit* não explodir o maciço, a situação foi exposta em diferentes fóruns, nomeadamente no da *Autodesk*. Embora não tenha sido obtida nenhuma resposta realmente elucidativa para o caso em questão, foi possível detetar vários casos semelhantes, mas em que os sólidos tinham sido modelados em *softwares* diferentes do *Dynamo*. Nestes casos o problema estava na limitação do *Revit* em “perceber” alguns princípios geométricos, sejam eles complicados ou não, havendo tanto casos de geometrias muito complexas que não explodiam, como de formas simples (como, por exemplo, uma cadeira). Assim, com o intuito de identificar a parte do algoritmo *Dynamo* que o *Revit* não é capaz de explodir, foram realizados os seguintes testes: partindo do prisma regular inicial, são subtraídos individualmente os vazios e o resultado exportado para o *Revit*, sendo explodido sequencialmente. Com este teste percebeu-se que o *Revit* era capaz de interpretar todos os sólidos até aquele em que se subtrai o vazio interior, nomeadamente o “quadrado redondo”, podendo concluir-se que a modelação deste deveria ser realizada de forma distinta, para permitir que o *software* o entenda como nativo.

Foram, então, testadas diferentes formas de modelação, com o objetivo de ultrapassar as limitações do *Revit* na compreensão da geometria. Inicialmente foram exploradas outras possibilidades de *Loft*, tais como a utilização de *guide curves*, que correspondem a curvas que “conduzem” o *Loft*, mas nenhuma destas opções se revelou viável. Optou-se também por aumentar o número de secções de referência, sendo este processo de seguida apresentado.

A transição entre as secções reta e curvilínea dá-se de forma linear com, após a secção reta, se desenvolverem quatro quartos de círculo, cujo raio e centro vão variando até a jusante constituírem a secção circular. Na Figura 3.50 são apresentadas diferentes secções desta transição.

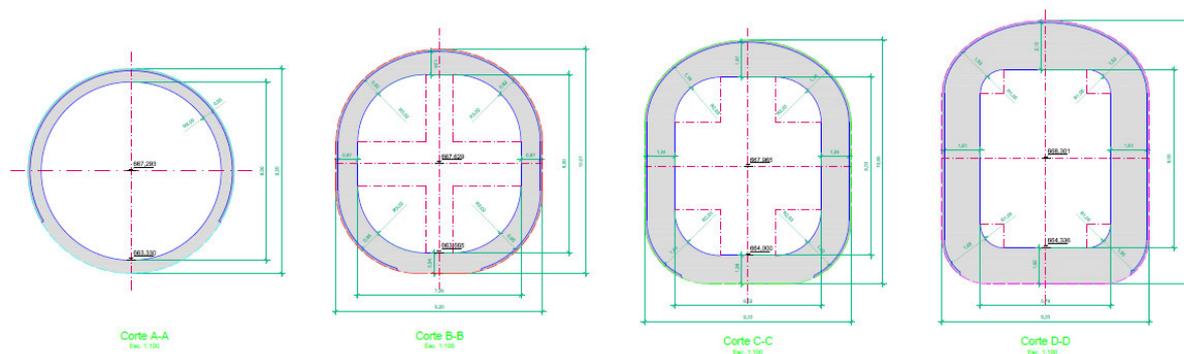


Figura 3.50 - Diferentes secções do túnel de adução.

Visto suspeitar-se que o problema poderia estar no facto de se realizarem operações *Loft* entre uma secção completamente retilínea e uma secção grande parte curvilínea definiram-se cinco secções sendo, de montante para jusante: a secção 1, correspondente à secção retilínea, a secção 2, correspondente à secção cujo raio dos quatro quartos de círculo é 1 cm, a secção 3, correspondente à secção intermédia, a secção 4, correspondente à secção cujo raio das partes circulares é 3,99 m e, finalmente, a secção circular de 4 m de raio. A opção pelas secções cujos raios das partes circulares são 1 cm e 3,99 m visa minimizar as operações *Loft* entre secções retas e curvilíneas anteriormente referenciadas. Então, a modelação do “quadrado redondo” parte de sete parâmetros correspondentes à posição relativamente à origem definida ($L1$ e $L2$), às dimensões da secção retangular (a e b), à dimensão da secção circular (d) e, por último, as características da transição (L e i). Estes parâmetros podem ser verificados na Figura 3.51, á exceção do parâmetro a , que corresponde à dimensão da secção retangular perpendicular ao parâmetro b .

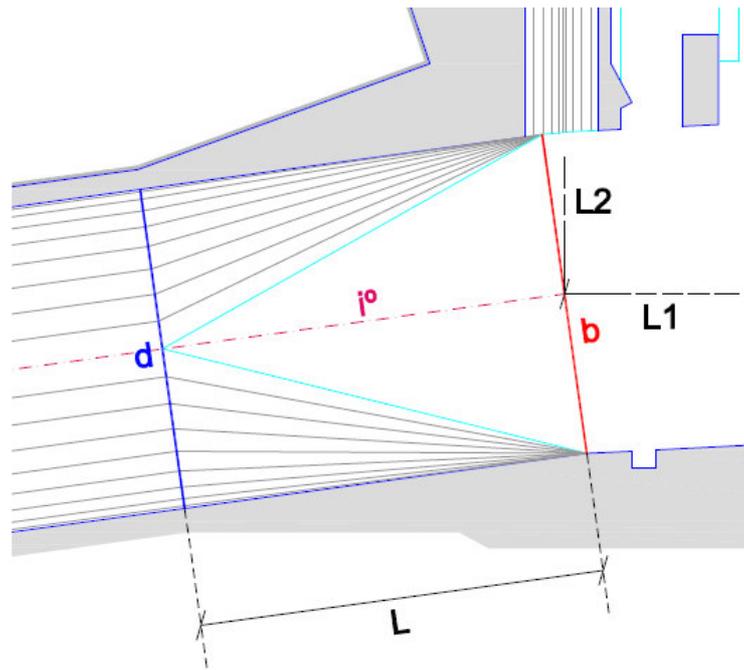


Figura 3.51 - Parâmetros da transição entre secção retilínea e curvilínea.

A origem foi a mesma definida no caso do bocal e a secção retangular é definida a partir de quatro pontos, cada um correspondente a cada vértice, representados na Figura 3.52.

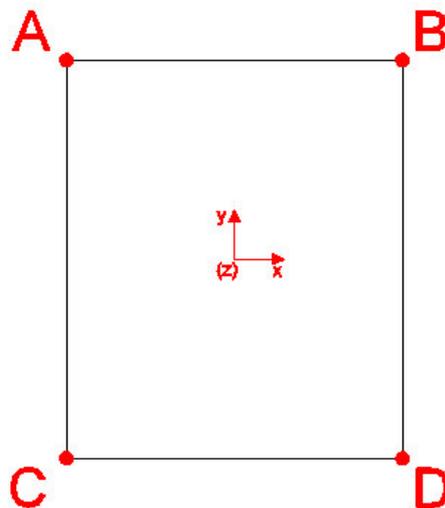


Figura 3.52 - Pontos que definem a secção retangular

As coordenadas destes pontos podem ser obtidas partindo das coordenadas do centro da secção ($L1$ e $L2$) e recorrendo a relações trigonométricas.

Já relativamente às secções de transição para a secção circular, estas definem-se a partir dos centros dos quatro quartos de círculo (C1, C2, C3 e C4), sendo um exemplo de secção representado na Figura 3.53.

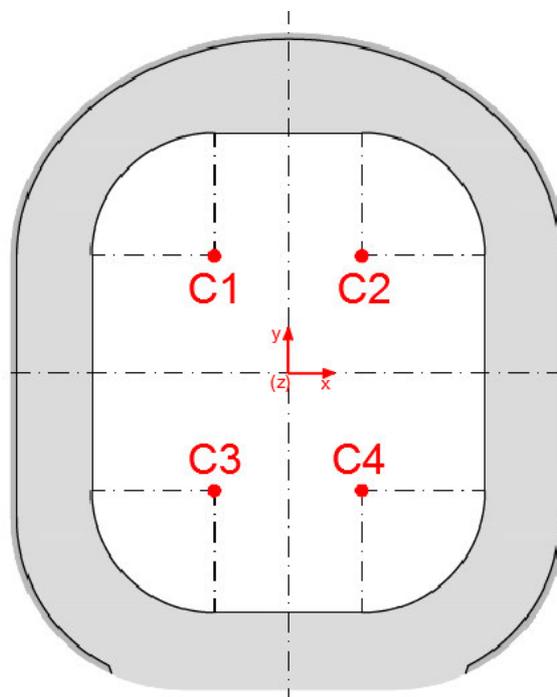


Figura 3.53- Pontos que definem secções de transição.

Assim, para o caso das diferentes secções intermédias são calculadas as coordenadas dos centros dos quartos de círculo partindo das coordenadas dos pontos da secção retangular. Por exemplo, as coordenadas do ponto C1 são calculadas a partir do ponto A, enquanto as coordenadas do ponto C2 são calculadas partindo do ponto B, e assim sucessivamente. Partindo destes pontos são então modelados os quatro quartos de círculo, sendo estes posteriormente unidos por retas.

Repetindo este processo para as restantes secções é então possível realizar a operação *Loft* entre secções consecutivas, sendo o resultado final o vazio correspondente ao “quadrado redondo”. Na Figura 3.54 é apresentado o algoritmo *Dynamo* de modelação do “quadrado redondo”, sendo nesta figura possível destacar:

- Em **1** os parâmetros manipuláveis pelo utilizador ($L1$, $L2$, a , b , i e d);
- Em **2** o conjunto de nós que conduz à criação das diferentes secções;
- Em **3** são realizados *Loft* entre estas;
- Em **4** os sólidos entre secções são unidos.

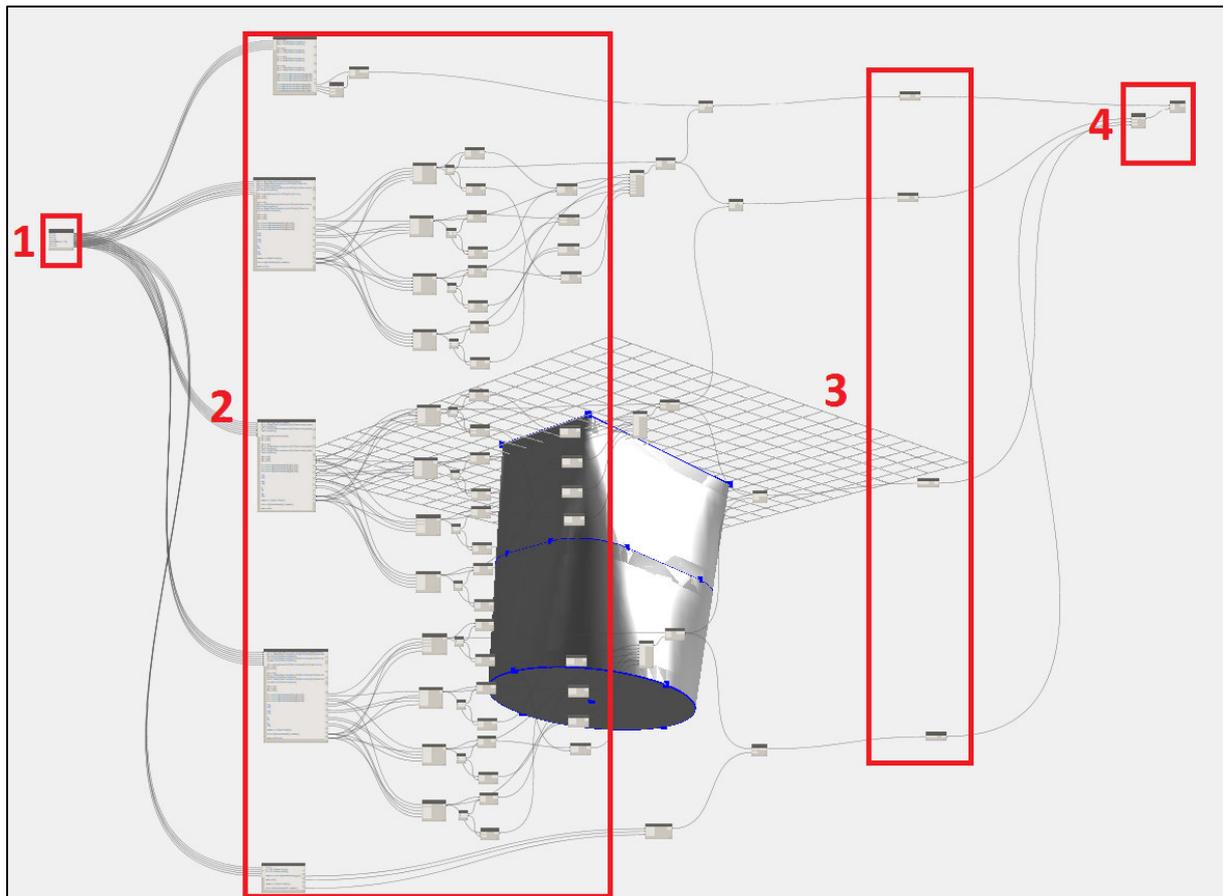


Figura 3.54 – Algoritmo Dynamo de modelação do quadrado redondo.

Uma vez obtido este vazio foi novamente testada a importação para o *Revit*, sendo que, com este processo geométrico, o *software* já foi capaz de explodir a geometria. Embora não seja possível concluir com exatidão os processos de modelação que levaram a que o *Revit* não explodisse a geometria, tal foi ultrapassado limitando as operações *Loft* entre secções de “natureza” diferente, ou seja, entre secções retas e curvas. O facto de todas as secções intermédias terem o mesmo número de pontos garante que o *Loft* é bem feito, pois os pontos são “unidos” aos correspondentes em outra secção. Por outro lado, apenas os *Lofts* inicial e final envolvem secções completamente retas (montante) e completamente curvas (jusante) mas, tendo em conta que se teve o cuidado das secções com os raios muito reduzidos (1 cm, a montante) e muito elevados (3,99 m, a jusante), levaram a que o comprimento desta operação geométrica fosse muito reduzido.

Por último, e tendo em conta que esta transição se verifica muito frequentemente em aproveitamentos hidroelétricos, optou-se pela criação de um nó personalizado que modelasse automaticamente esta transição através de um único nó. Assim, e para criação de um nó personalizado (ou *custom node*) é reunido todo o algoritmo e são definidos os *inputs*

(parâmetros) e os *outputs* (sólido), sendo depois guardado. Depois de guardado, este nó pode ser acedido pelo utilizador diretamente na interface do *Dynamo*, poupando assim muitas horas de modelação e promovendo uma maior simplificação do algoritmo (várias dezenas de nós e linhas de código são compactados em apenas um nó).

Na Figura 3.55 é apresentada a família *Revit* correspondente ao início do túnel de adução.



Figura 3.55 - Vista tridimensional da parte inicial do túnel de adução.

A torre de manobra, apesar de apresentar elementos comuns numa estrutura, como lajes ou vigas, destaca-se pela complexidade do seu interior, podendo este ser dividido em duas partes: o tubo de arejamento e a zona com as aberturas que permite a movimentação das comportas. Na Figura 3.56 é apresentado um corte da torre de manobra, sendo à esquerda representado o vazio correspondente ao tubo de arejamento e à direita o vazio correspondente à movimentação das comportas.

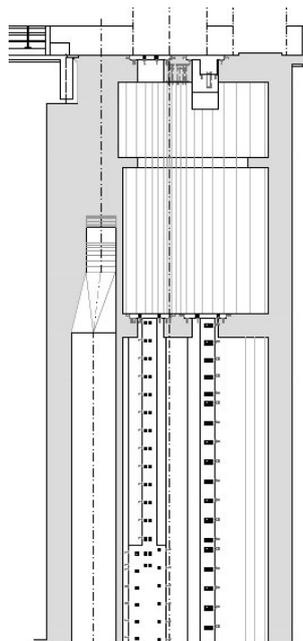


Figura 3.56 - Corte da torre de manobra.

O tubo de arejamento é, na parte inferior, circular e vertical, prolongando-se até à zona da primeira laje da torre (analisando da base para o topo), onde sofre um afunilamento (e transição gradual para secção reta) e se reparte em duas secções que se desenvolvem na horizontal (para lados opostos). A secção da zona da abertura que permite a movimentação das comportas varia a determinadas cotas, mas não gradualmente, ou seja, a diferentes alturas da torre de manobra a secção muda, como no caso da laje. As diferentes secções da torre de manobra são apresentadas na Figura 3.57.

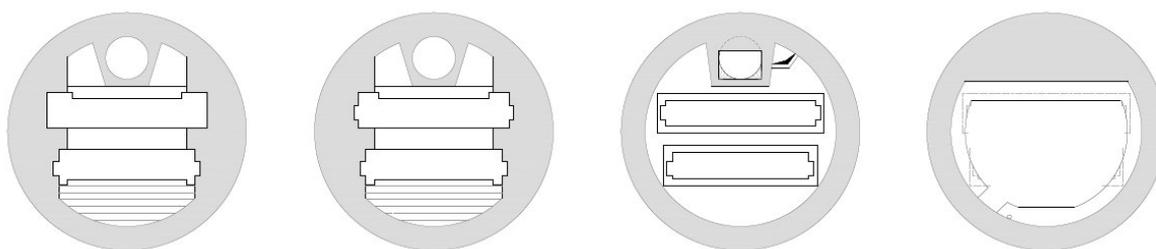


Figura 3.57 - Diferentes secções da torre de manobra.

A modelação da torre de manobra seguiu o mesmo princípio de modelação dos elementos anteriores, modelando-se os vazios (neste caso apenas os interiores) e, posteriormente, estes volumes são subtraídos a um cilindro com o mesmo raio que a torre de manobra. Relativamente ao tubo de arejamento, a maior dificuldade de modelação corresponde ao afunilamento, e correspondente passagem de secção curva a secção reta, e, para este caso, foi adotada a mesma

estratégia adotada no caso do vazio interior do túnel de adução (“quadrado redondo”), precavendo problemas futuros na explosão da geometria. Já relativamente à abertura que permite a movimentação das comportas, foram definidas as diferentes secções (através de linhas e arcos) e realizados *Lofts* na gama de alturas correspondente às diferentes secções. Estes volumes são depois unidos e subtraídos ao volume do cilindro. As lajes foram consideradas como vazios, sendo a sua modelação realizada posteriormente em *Revit*. Uma vez finalizado o algoritmo correspondente à modelação da torre de manobra, esta foi importada para o *Revit* mas, além de não explodir, o sólido apresentava uma distorção geométrica. Esta distorção é apresentada na Figura 3.58.

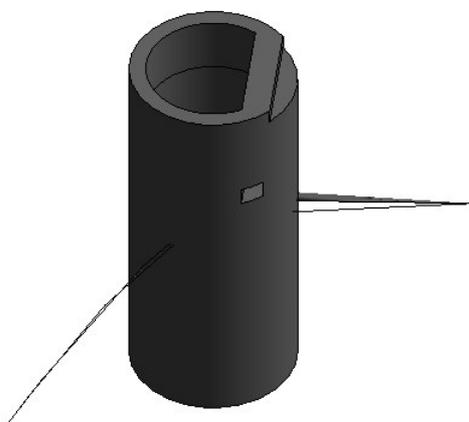


Figura 3.58 - Vista tridimensional da torre de manobra após importação para o *Revit*.

A distorção ocorre na cota da primeira laje, onde há transição do tipo de secção, logo, onde dois vazios convergem. O problema poderia então estar na incapacidade do *Revit* em unir estes dois vazios interiores. Mais uma vez a situação foi exposta em alguns fóruns, sendo o autor alertado que o facto de dois vazios partilharem a mesma face, e esta ser diferente nos dois vazios, poderia de alguma forma “confundir” o *software*. A primeira tentativa para solucionar o problema consistiu na extensão de um dos vazios de forma a aumentar a sua intersecção, mas não resultou, mantendo-se a mesma distorção da geometria e a incapacidade de explodir o sólido.

A solução passou, então, pela divisão da torre de manobra em dois sólidos separados (inferior e superior à cota onde ocorre a distorção) sendo que, desta forma, ambos os sólidos são “explodidos” pelo *Revit*. A torre de manobra em *Revit* é apresentada na Figura 3.59.

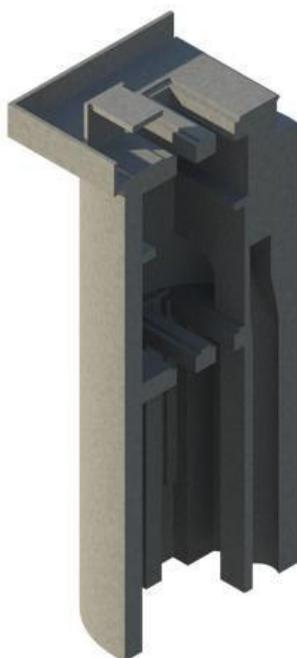


Figura 3.59 - Corte tridimensional da torre de manobra.

Os restantes elementos a modelar, como o pórtico de apoio e os maciços laterais, foram modelados com recurso a ferramentas nativas do *Revit*. Após modelada a totalidade da componente, optou-se também pela incorporação do terreno no modelo. Para incorporar o terreno no modelo, aproveitou-se o desenho em *AutoCad 3D* das escavações, apesar de este antes de ser importado para o *Revit* ter sido ligeiramente trabalhado (foram adicionadas linhas de forma a garantir que o terreno gerado no *Revit* ficasse o mais preciso possível). Este ficheiro foi depois importado para o *Revit* e gerada a superfície do terreno a partir do comando “*Toposurface*”, com a opção “*Create from Import*”.

No entanto, modelado o terreno a partir desta metodologia, e no caso da estrutura em questão, há um problema no túnel de adução, pois não é possível a modelação de túneis na superfície do terreno no *Revit*. Esta incapacidade de modelação de túneis por parte do *software* inviabiliza a realização de cortes no túnel, tal como demonstrado na Figura 3.60.

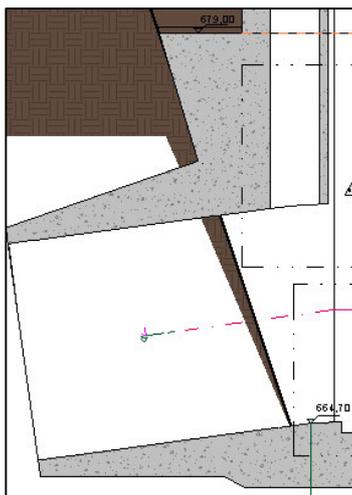


Figura 3.60 - Problema de apresentação na interface entre o túnel de adução e o terreno.

De forma a contornar este problema foram testadas diferentes alternativas, desde ferramentas do *Revit* que modelam aberturas no terreno (“*Building Pad*”) a extensões que aumentam as funcionalidades relativas à manipulação de terreno, embora nenhuma destas alternativas permitisse a correta modelação de um túnel. Esta situação foi também exposta no fórum da *Autodesk*, onde foi indicado ao autor que, de facto, a modelação de túneis não é possível no *Revit*, constituindo uma limitação deste.

Visto isto, foram ainda testadas hipóteses “indiretas” de modelação de túneis, tais como a tentativa de conversão do terreno numa massa e posterior criação de um vazio com o túnel, o que também não resultou visto que o *Revit* cria o terreno como uma superfície e não como um sólido. Apesar de esta ideia não ter resultado diretamente no *Revit*, foi ainda testada esta hipótese, mas recorrendo ao *Dynamo*.

Assim, no *Dynamo* extrai-se a informação geométrica da topografia a partir de um projeto *Revit* e cria-se uma malha sobre esta. Os vértices desta malha são depois extraídos e criadas superfícies entre estes pontos. Unindo estas superfícies obtém-se a topografia em ambiente *Dynamo*, tal como demonstrado na Figura 3.61.

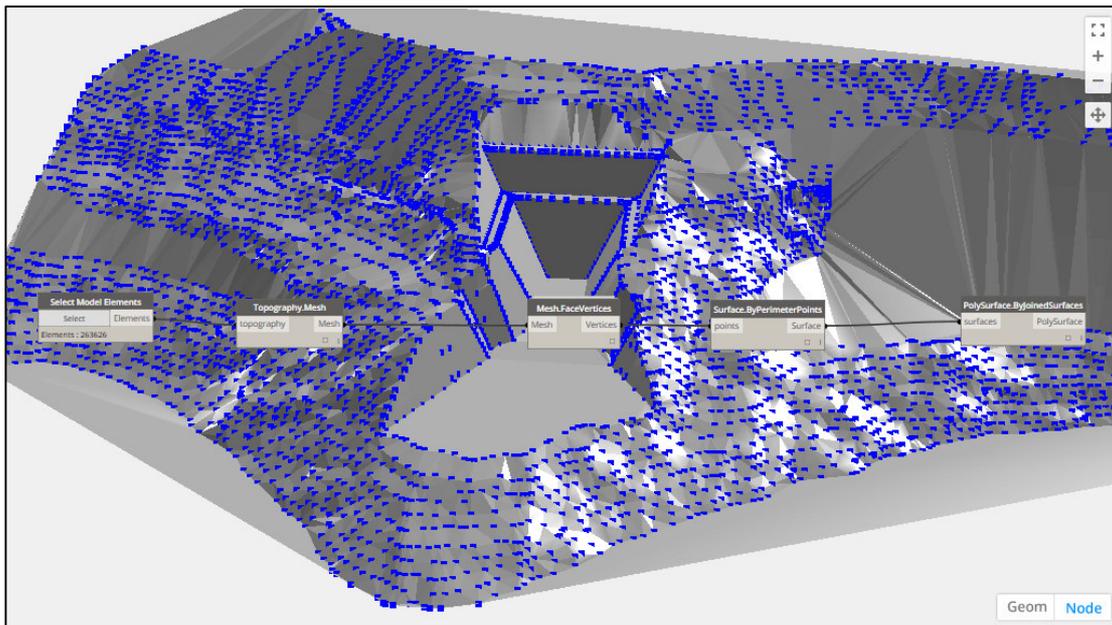


Figura 3.61 - Algoritmo Dynamo que permite gerar uma superfície de acordo com o terreno.

Uma vez obtida a superfície relativa ao terreno, é modelado um prisma sobre esta, através de quatro parâmetros: **centro**, **base**, **largura** e **altura**. É importante que o centro do prisma esteja próximo do centro do terreno, de forma a garantir que estes se intersetem, sendo boa prática colocar o terreno na origem do *Revit*, para que a origem do prisma possa ser o mesmo ponto. O resultado da modelação do prisma sobre o terreno é apresentado na Figura 3.62.

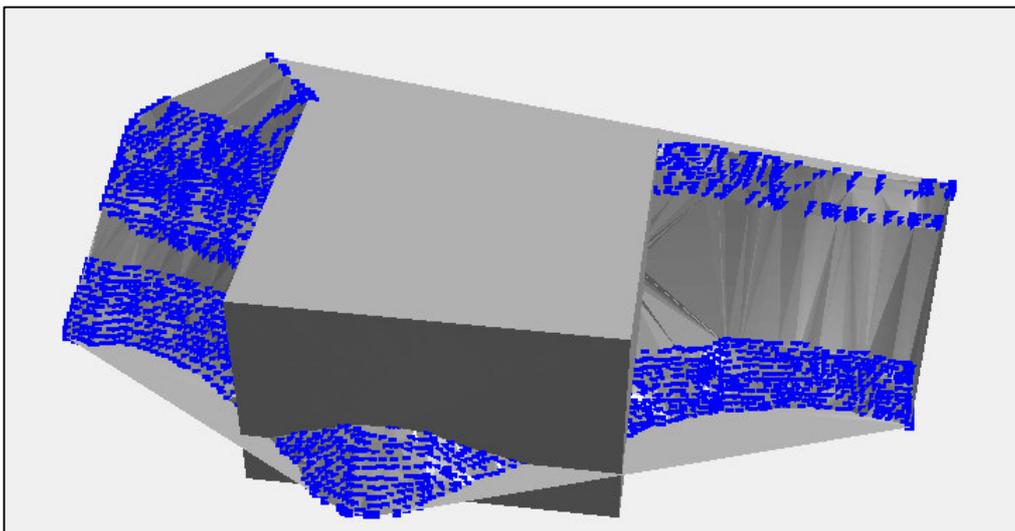


Figura 3.62 - Vista em Revit do prisma sobre o terreno.

Este prisma é depois partido e dividido em dois sólidos: inferior e superior à superfície correspondente à topografia. É então selecionado o sólido correspondente à parte inferior, sendo este exportado para o *Revit* e guardado como uma família.

Esta família é, então, um sólido correspondente ao terreno, embora ainda não tenha sido modelado o túnel, tal como se pretendia inicialmente. Para a modelação do túnel, é carregada a família do sólido do terreno num projeto *Revit*, em conjunto com a família do túnel de adução, como maciça (visto que o túnel de adução está modelado parametricamente, bastou “desligar” do algoritmo os vazios interiores e importar para o *Revit*). Tendo estes dois elementos no *Revit*, a operação de subtração de volumes é realizada no *Dynamo*, selecionando os dois elementos, extraíndo a sua geometria para o *Dynamo* e realizando a diferença de volumes. O resultado desta diferença corresponde ao terreno com o túnel e é depois exportada para o *Revit* e guardado como uma outra família, podendo ser utilizada em qualquer projeto. A família correspondente ao terreno modelado com o túnel é apresentada na Figura 3.63.

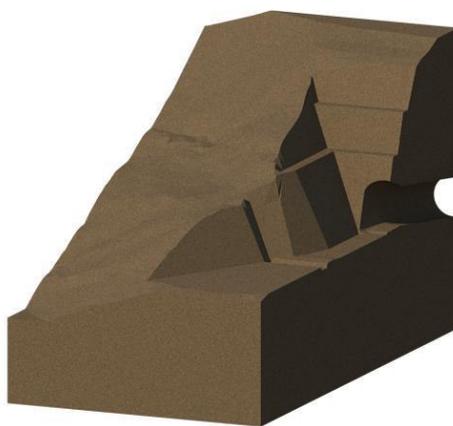


Figura 3.63 - Terreno com túnel.

Relativamente ao código *Dynamo* que permite a criação do maciço correspondente ao terreno, há a destacar que, no processo de extração dos vértices da malha sobre a topografia, se recorreu a um nó personalizado denominado “*Mesh.FaceVertices*”, disponível no *site Dynamo Packages* (*Dynamo Packages, 2014*).

Uma vez obtido o modelo do terreno com o túnel, foi então modelada a tomada de água, juntando as famílias criadas com recurso ao *Dynamo* e modelando outros elementos de menor dimensão no *Revit*, como vigas ou lajes. Todo o processo de modelação demorou cerca de quatro semanas, sendo que uma boa parte desse tempo (quase uma semana) foi investido a detetar e resolver problemas relacionados com o facto de o *Revit* não explodir a geometria. Este modelo apresenta-se apto para extração automática de desenhos de execução, com um nível de

desenvolvimento (LOD) de 300 para os diferentes elementos. O modelo da tomada de água é apresentado na Figura 3.64 (vista tridimensional) e na Figura 3.65 (corte tridimensional).

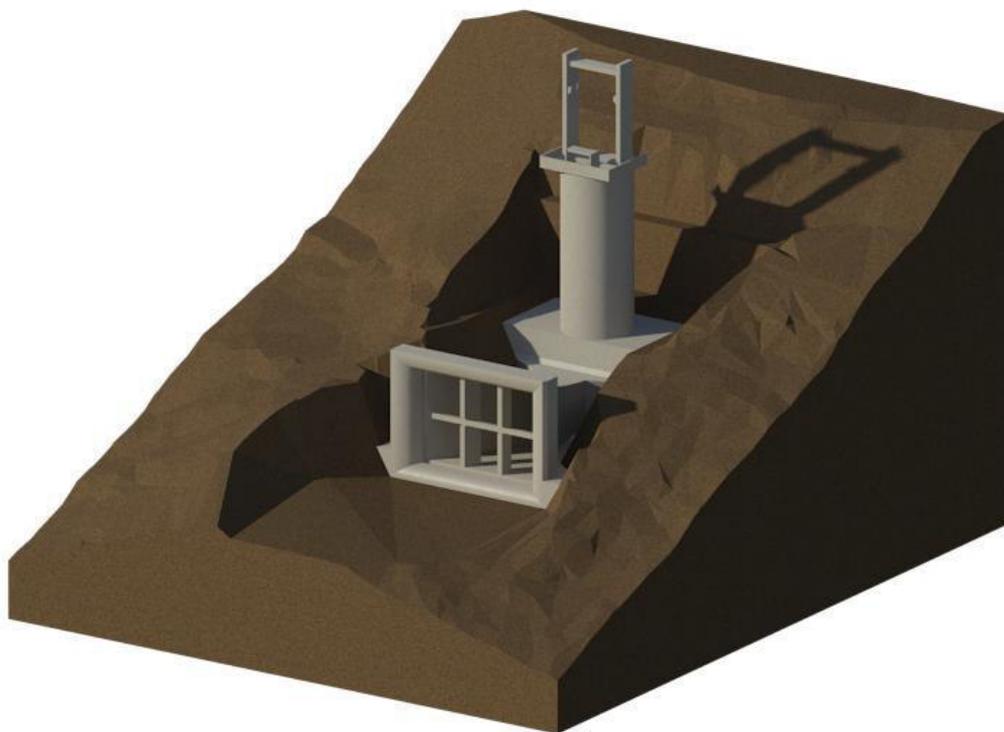


Figura 3.64 - Modelo da tomada de água, em Revit.



Figura 3.65 - Corte tridimensional da tomada de água, em Revit.

3.4.4 Modelação de armaduras

Uma vez obtido o modelo com LOD 300 da tomada de água, optou-se também por verificar a viabilidade da modelação de armaduras, particularmente nos sólidos obtidos com recurso a programação gráfica. O elemento da tomada de água escolhido para reforçar foi o bocal e, tendo em conta as limitações do *Revit* na modelação de armaduras (ferramentas requerem maior agilização) e a “vontade” em testar a interoperabilidade no caso de sólidos de geometria complexa, optou-se por explorar o *software Tekla Structures*. Assim, o elemento foi guardado no *Revit* com o formato de ficheiro IFC. Já no *Tekla*, versão 20, foram testadas diferentes formas de importação: como modelo de referência e como elemento de betão.

Tal como o nome indica, ao importar um modelo de referência, o *Tekla* interpreta o ficheiro apenas como uma referência (como uma imagem), que ajudará a construir o modelo no *Tekla*. No caso do formato de ficheiros IFC há a possibilidade de converter este modelo num modelo nativo do *Tekla*, através do comando “*Convert IFC Objects*” embora esta funcionalidade resulte na sua plenitude apenas para estruturas modeladas através de *softwares* BIM, ou seja, modelos munidos de informação não geométrica. Foi então testada esta possibilidade para o bocal, sendo que o IFC deste apenas era convertido por esta via se, nas definições do comando “*Convert IFC Objects*”, se ativasse a opção “*Convert Brep Object*”. Ao se converter como um BREP – *Boundary Representation* - o objeto é interpretado não como um sólido mas sim como um conjunto de superfícies que definem os seus limites, sendo que este tipo de exportação limita as possibilidades de exploração do modelo no *Tekla*. Já a importação de elementos de betão revela bastante utilidade na importação de elementos de geometria complexa, pois recebe a forma e atribui ao sólido o material betão. Também esta metodologia de importação não se revelou viável, pois o *Tekla* não interpretava o bocal como um sólido.

No entanto, durante o período em que a presente dissertação foi elaborada, foi lançada a versão 21 do *Tekla Structures* sendo que, nesta versão, foi novamente testada a importação do bocal como elemento de betão. Esta versão do *software* já interpreta o bocal como um sólido, permitindo, então, o reforço do elemento. Na Figura 3.66 é apresentado o menu, no *Tekla*, com as propriedades relativas ao bocal importado como elemento de betão. Sendo destacado a vermelho o seu volume.

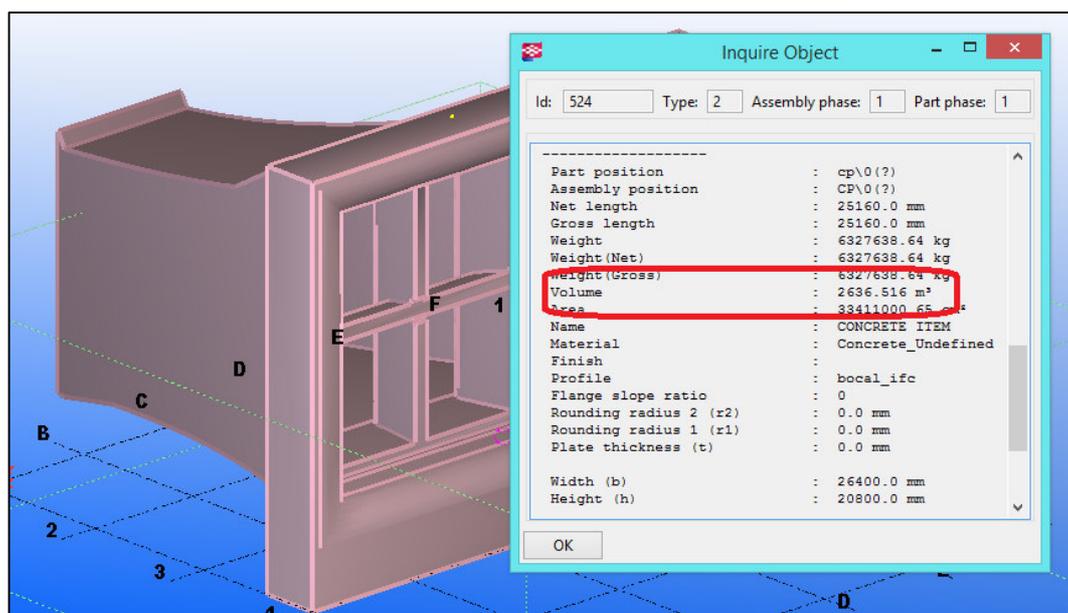


Figura 3.66 - Bocal, como sólido, no Tekla 21.

A modelação das armaduras foi realizada partindo dos desenhos de execução a duas dimensões, constituindo uma dificuldade inicial ao autor interpretar estes desenhos, devido à elevada complexidade e quantidade de varões. O Tekla apresenta uma variedade elevada de comandos que permitem a modelação de armaduras, desde a colocação de armaduras presentes em catálogo à modelação paramétrica de grupos de armaduras ou malhas. Para o reforço do bocal, o comando mais explorado foi o “*Reinforcing Bar Group*” que, partindo de diferentes parâmetros, leva à modelação de grupos de armaduras. Estes parâmetros dividem-se em dois grupos: os parâmetros gerais e os parâmetros de grupo. Os parâmetros gerais incluem o diâmetro dos varões, o raio de dobragem, a classe das armaduras, os recobrimentos e o comprimento, ângulo e extensão das amarrações. Já os parâmetros de grupo incluem o método de criação das armaduras (por espaçamento exato, por espaçamento flexível no início e fim, por número de varões,...) e outras ações adicionais tais como as barras do grupo que não são criadas (como a primeira e a última) e o tipo do grupo de armaduras. Com este comando são modeladas as formas da primeira e da última armadura, sendo que o *software*, baseado nos parâmetros anteriores, cria as restantes armaduras do grupo. O parâmetro que traduz o tipo do grupo de armaduras revelou extrema utilidade durante a modelação, pois neste parâmetro é possível escolher a hipótese “*Tapered*” que, dando perfis inicial e final de armaduras diferentes, cria automaticamente os varões tendo em conta esta transição linear de forma.

A maior dificuldade de modelação residiu nos varões cuja forma não se adapta às fronteiras do sólido, devido à falta de pontos para realizar *snap* (operação que consiste em seleccionar pontos

na definição da forma das armaduras). Nestes casos é possível modelar linhas e pontos que auxiliem os *snaps*, ou até utilizar o comando “*Clip Plane*”, que permite realizar cortes tridimensionais no modelo e depois proceder à modelação das armaduras, tal como apresentado na Figura 3.67.

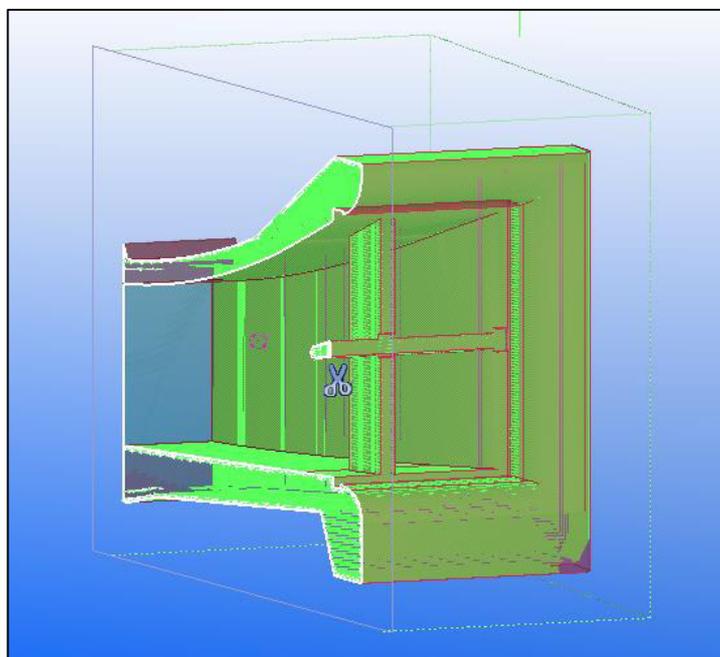


Figura 3.67 - Utilização do comando “*Clip Plane*” para modelação de armaduras.

O facto de, por vezes, o *software* não modelar determinadas armaduras (eram criados os perfis inicial e final e não eram criados os varões) também constituiu uma contrariedade à modelação, que foi ultrapassada por diminuição do raio de dobragem das armaduras (parâmetro “*Bending Radius*”).

Foi investida uma semana na modelação de armaduras, onde se prevê ter conseguido modelar uma percentagem ligeiramente superior a 50% do total das armaduras do bocal. De facto, a modelação de armaduras, e tendo como particularidade o facto de neste caso se tratar de uma estrutura complexa, constitui uma tarefa que exige um elevado esforço a nível de investimento de tempo. É da opinião do autor que, se o objetivo da modelação de armaduras for unicamente a produção de desenhos de execução, neste momento, este esforço não é recompensado, sendo mais rápida a elaboração de desenhos pelo processo tradicional. No entanto, se o potencial do modelo de informação das armaduras for amplamente explorado, como para deteção de incompatibilidades ou até para fabricação assistida por computador (CAM), a modelação de armaduras já constitui um processo a ponderar. A constante evolução tecnológica e progresso de plataformas e ferramentas BIM leva também a que o processo de modelação de armaduras

seja progressivamente agilizado, sendo hoje possível produzir modelos que no passado recente seriam inimagináveis de modelar em intervalos de tempo úteis.

Em suma, a modelação de armaduras requer um elevado esforço de modelação, havendo um incremento significativo de tempo investido ao passar-se do LOD 300 para LOD 400, porém traduz-se num modelo muito rico em informação que pode ser explorada, melhorando a qualidade do projeto e reduzindo erros construtivos. Na Figura 3.68 , Figura 3.69 e Figura 3.70 é apresentado o modelo de armaduras do bocal.

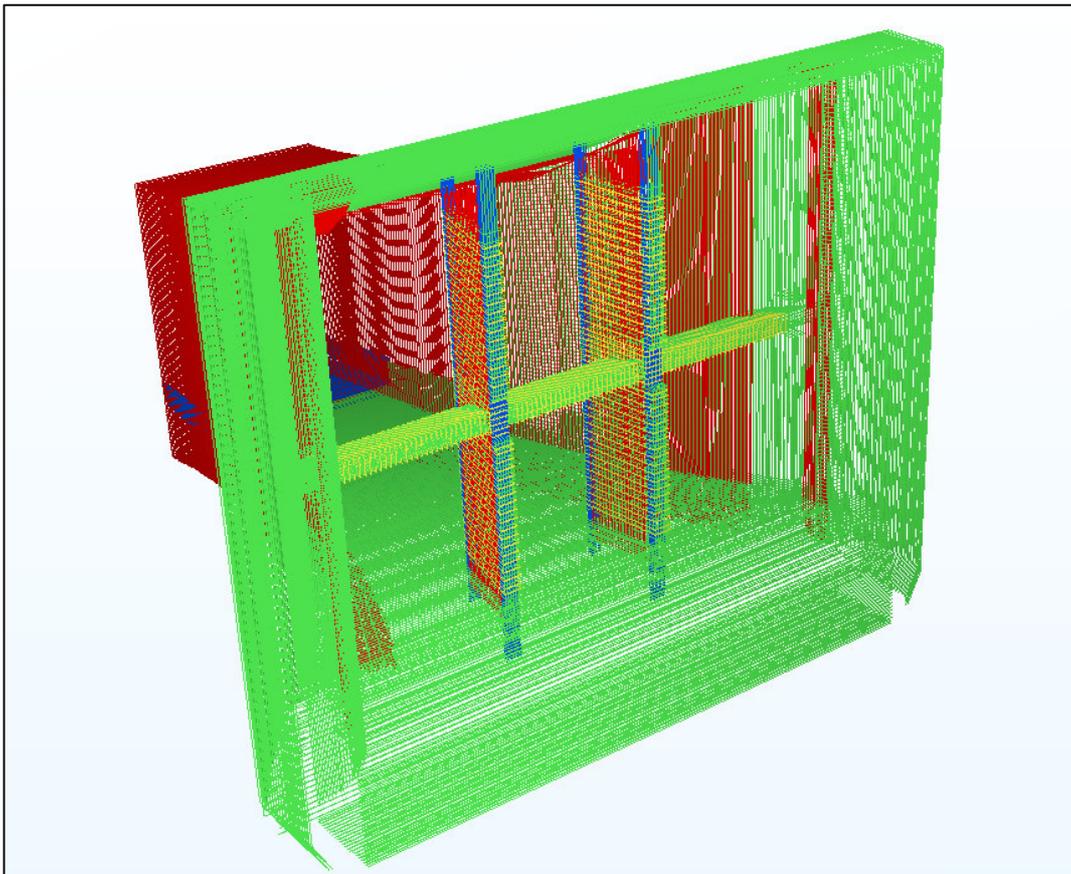


Figura 3.68 - Modelo de armaduras do bocal.

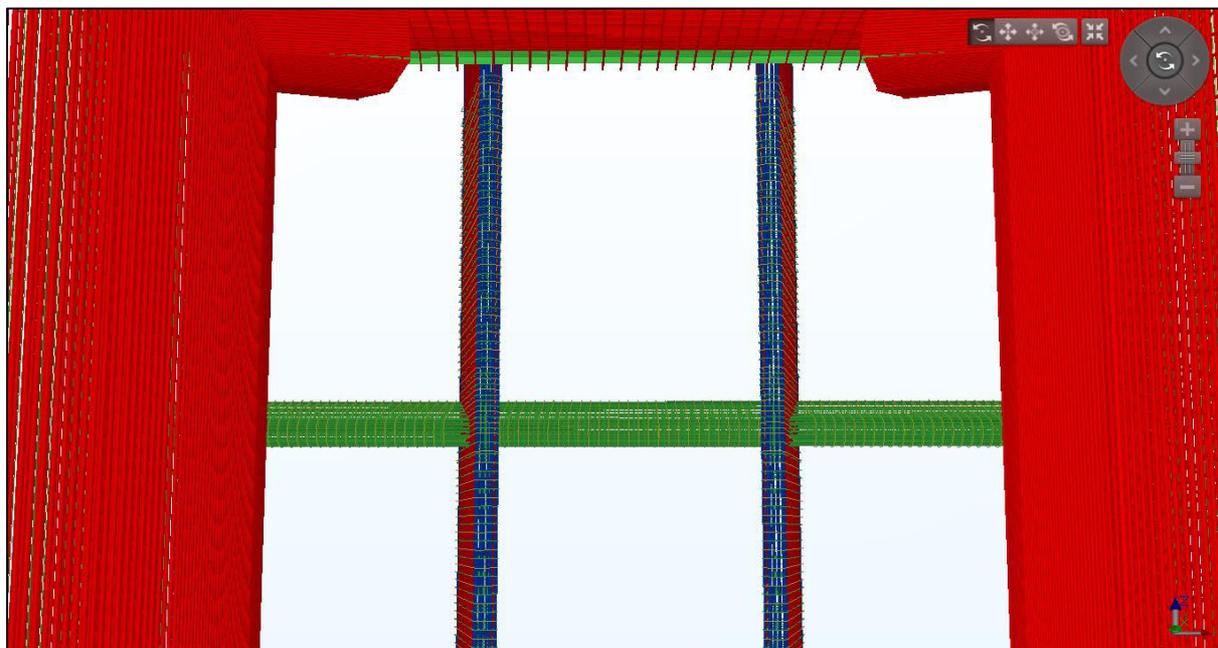


Figura 3.69 - Modelo de armaduras do bocal - vista a jusante.

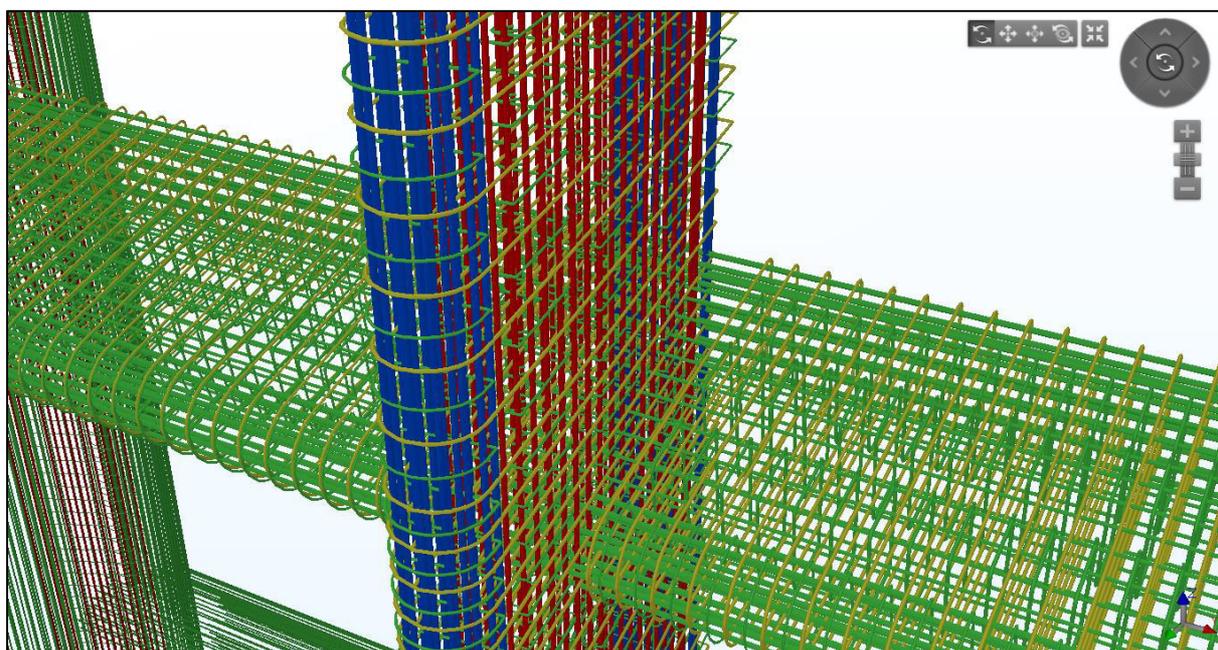


Figura 3.70 - Modelo de armaduras do bocal - septos vertical e horizontal.

3.5 Restituição de Fridão

3.5.1 Descrição de geometria

A Restituição de Fridão é, essencialmente, composta por três partes distintas: o bocal da restituição, a torre de movimentação da comporta e o túnel da restituição. O bocal da restituição apresenta uma extensão de, aproximadamente, 25 m até à torre de movimentação da comporta. Esta torre destaca-se pela sua elevada altura (cerca de 40 m) e contém compartimentos para armazenar os diferentes elementos de apoio à movimentação da comporta e um septo horizontal. Já o túnel da restituição faz a transição da central ao bocal, com uma extensão de aproximadamente 40 m.

A restituição de Fridão apresenta, então, uma estrutura com algumas semelhanças quando comparada com a tomada de água de Venda Nova III (a nível de elementos constituintes), embora evidencie uma dimensão e complexidade geométrica menores.

3.5.2 Estratégia de modelação

Para a modelação da restituição de Fridão, esta componente foi dividida nas três partes que a constituem: o bocal, a torre de movimentação da comporta e o túnel da restituição. Estes três constituintes são apresentados na Figura 3.71.

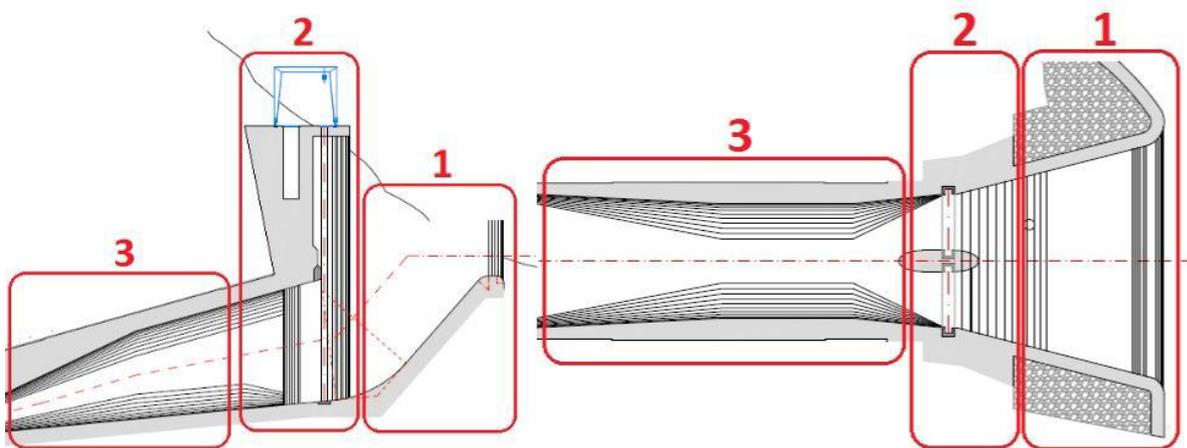


Figura 3.71 - Diferentes constituintes da restituição - bocal (1), torre de apoio à movimentação da comporta (2) e túnel (3) - em corte (esquerda) e em planta (direita).

A modelação da restituição foi totalmente realizada com recurso ao *Dynamo* e seguiu-se uma estratégia de modelação análoga à adotada no caso da tomada de água de Venda Nova III, ou seja, criando os sólidos por sucessivas operações de subtração de volumes. Visto que a

estratégia e, conseqüentemente, os algoritmos destas componentes apresentam semelhanças, o processo de modelação da restituição não será descrito no presente documento.

Devido ao facto de, na altura da realização da dissertação, esta obra se encontrar ainda em fase de estudo prévio, os desenhos fornecidos ao autor para modelação apresentavam incoerências, havendo elementos em que as suas dimensões eram alteradas nos diferentes cortes/plantas. Estas incoerências criaram algumas dificuldades iniciais ao autor, e não aconteceriam no caso de os desenhos terem sido obtidos a partir de um modelo BIM.

Outra particularidade na modelação da restituição foi a redução substancial dos tempos de modelação devido à maior familiaridade do autor com o *software* e com o processo de obtenção de sólidos. Assim, a modelação da restituição foi realizada em menos de duas semanas, com um LOD de 300 para os diferentes elementos. O modelo da restituição é apresentado na Figura 3.72 (vista tridimensional) e na Figura 3.73 (corte tridimensional).

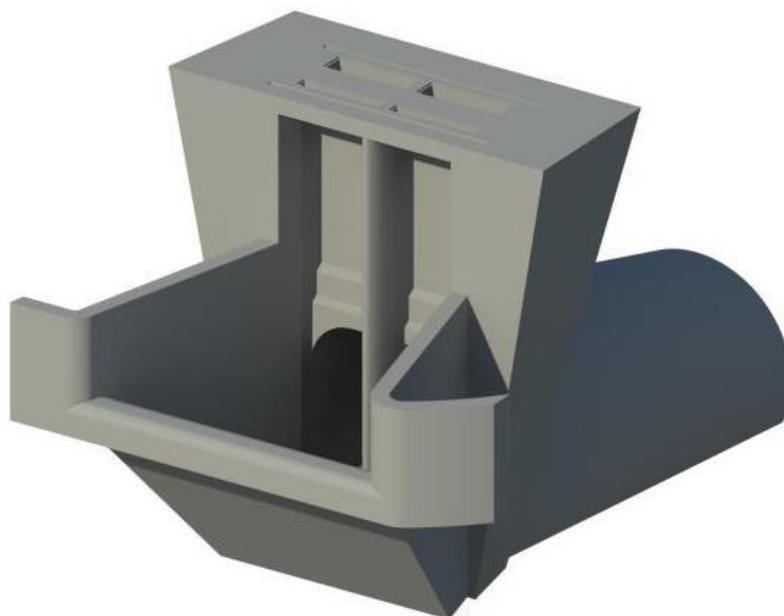


Figura 3.72 - Modelo da restituição.

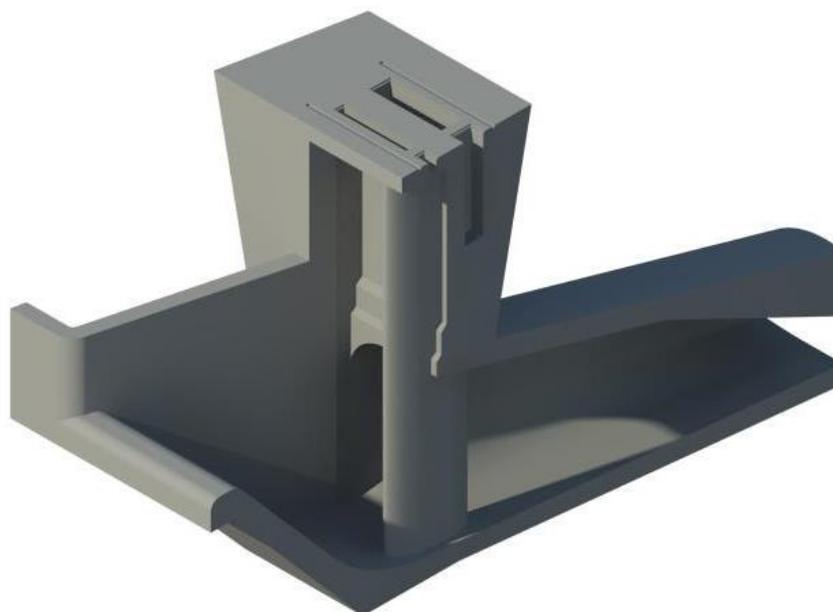


Figura 3.73 - Corte tridimensional da restituição.

3.6 Ferramenta de modelação de falhas

Outro desafio proposto ao autor foi a realização de uma ferramenta que permitisse a modelação de falhas geológicas em *Revit*. As falhas são definidas a partir de três parâmetros base, sendo estes a **georreferenciação**, o **pendor**, a **espessura** e a **extensão**, embora se tenha incluído um parâmetro extra na modelação de mais do que uma falha que define a **preponderância** (a nível de apresentação) no caso de falhas se cruzarem. Para a elaboração da ferramenta recorreu-se novamente ao *Dynamo*, criando-se diferentes algoritmos em função do número de falhas que se pretendam modelar (foram criados dez ficheiros, para modelação de uma a dez falhas geológicas).

Assim, parte-se de um projeto *Revit* com o terreno modelado. A primeira parte do algoritmo converte a superfície do terreno no *Revit* num sólido, num processo análogo ao realizado na modelação do túnel. Já as falhas são modeladas a partir de quatro pontos, que correspondem aos vértices de uma superfície (plano médio da falha). As coordenadas destes pontos são obtidas a partir da georreferenciação (coordenadas de um ponto da falha relativamente à origem do terreno), do pendor (inclinação) e da extensão. Na definição da falha considera-se uma dimensão “infinita” sendo que, no algoritmo *Dynamo*, foi considerada uma distância dos vértices da superfície que define a falha ao ponto georreferenciado de 500 m, garantindo, assim, que uma dimensão da falha é suficientemente extensa. Esta superfície é depois “convertida”

num sólido com a atribuição de espessura, que corresponde a um parâmetro. O algoritmo *Dynamo* que define as operações geométricas anteriormente referidas é de seguida apresentado.

As falhas são depois intersectadas com o sólido correspondente ao terreno de forma a garantir que os seus limites correspondem aos limites do terreno. O volume das falhas é subtraído ao volume do terreno sendo este diretamente exportado, o que não é possível no caso das falhas, pois estas podem intersectar-se e haver sobreposição de material.

Para a definição da preponderância relativa das falhas no caso de interseção, recorreu-se ao nó “*If*” que corresponde a uma instrução condicional, ou seja, este nó devolve *outputs* diferentes dependendo do conteúdo de uma variável *booleana*, podendo esta ser verdadeira ou falsa. A variável *booleana* pergunta, ao utilizador, se determinada falha tem preponderância sobre outra. A título exemplificativo, se a falha 1 tiver preponderância sobre a falha 2, então o volume da falha 1 é subtraído ao volume da falha 2, e é criada uma lista com a falha 1 e a falha 2 subtraída da falha 1, sendo este o *output* do nó “*If*” se a condição for verdadeira (no caso de a variável ser falsa, o processo adotado seria o inverso). O *output* deste nó é depois importado para o *Revit*, conjuntamente com o terreno. No caso de as falhas não se intersectarem é indiferente o conteúdo da variável *booleana*, pois não há subtração de volumes entre falhas.

Quer o terreno, quer as falhas, têm depois de ser copiadas para um *template* de criação de modelos genéricos no *Revit* (no caso de ser modelada mais do que uma falha têm de ser importadas alternadamente) onde são “explodidos”, atribuídos de informação não geométrica (como material e outros parâmetros que se pretendam adicionar) e guardados como uma família que poderá ser utilizada em qualquer projeto. Na Figura 3.74 é apresentado um exemplo de modelação de duas falhas sobre um terreno, no *Revit*.

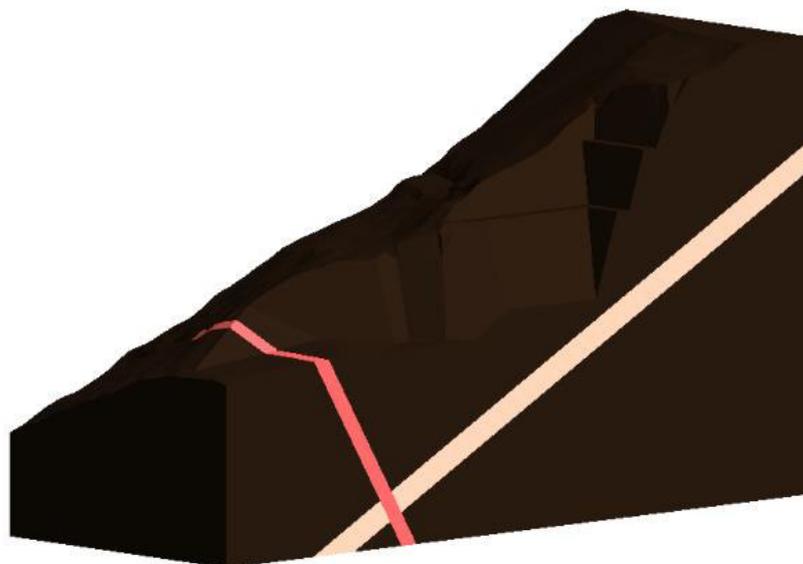


Figura 3.74 - Terreno e falhas geológicas, em Revit.

4. USOS DO BIM NO CONTEXTO DAS COMPONENTES MODELADAS

Há diferentes objetivos/motivos que levam à decisão de adoção de metodologias BIM por parte de uma empresa. Estes objetivos podem ser diversos, tais como a redução do tempo de projeto, a melhoria da qualidade do projeto final ou o aumento da eficiência na produção de documentação de construção, e são suportados por diferentes *deliverables* que são obtidos a partir do modelo BIM. Uma vez obtido o modelo BIM, e tendo em conta que se trata de um modelo rico em informação geométrica e não geométrica, este pode ser explorado para diferentes fins, de forma a cumprir os objetivos anteriormente definidos. Assim, no presente capítulo, são explorados/discutidos os diferentes usos dos modelos BIM criados no contexto desta dissertação:

- Geração de peças desenhadas;
- Geração de mapas de quantidades;
- Exploração do modelo de armaduras, nomeadamente para deteção de colisões e CAD/CAM;
- Compreensão, comunicação e discussão dos modelos;
- Geração de conteúdos multimédia.

4.1 Geração de peças desenhadas

A geração de peças desenhadas constitui um dos processos mais elementares na exploração de um modelo BIM. Estes desenhos podem ser obtidos de forma fácil e têm a interessante característica de se manterem fiéis ao modelo, com atualização automática mediante alterações do mesmo. Esta característica constitui uma das grandes vantagens desta metodologia comparativamente com a tradicional. O desenho final obtido a partir do modelo BIM encontra-se no Anexo 2 – Desenhos obtidos a partir do modelo BIM formato de folha A3, no entanto as dimensões reais deste desenho são para uma folha A0.

Definiu-se como objetivo aproximar, em termos de conteúdo e aspeto, os desenhos obtidos a partir do modelo BIM aos desenhos de execução tradicionais, sendo que a componente escolhida para este fim foi a tomada de água de Venda Nova III.

Optou-se também pela criação de um *template* (ficheiro *Revit* padrão com determinadas características já definidas) da empresa, de forma a facilitar a futura obtenção de mais desenhos noutros projetos.

O primeiro passo para a criação do *template* consistiu na inserção da folha utilizada pela empresa para impressão de desenhos. Para este efeito foi criada uma família da folha (partindo da utilizada nos processos tradicionais) estando, obviamente, a informação contida nesta parametrizada de forma a ser adaptada em função da obra, do desenho, dos projetistas, códigos de desenho, notas, entre outros. De forma a tornar possível essa parametrização foram criados diversos parâmetros partilhados (“*shared parameters*”). Esta folha foi criada para os tamanhos A0, A1, A2 e A3.

O diagrama mostra a estrutura de uma folha de desenho em Revit, organizada em uma grade de parâmetros. Os campos são os seguintes:

- Exec./Seguinte:** Campo para o nome do responsável pelo documento.
- Cliente:** Campo para o nome do cliente, com o logótipo da EDP e o texto "EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A.".
- Código S007:** Campo para o código de identificação do documento.
- Vista:** Campo para o nome da vista.
- Verif./Coord.:** Campo para o nome do responsável pela verificação e coordenação.
- Est./Proj.:** Campo para o nome do responsável pelo projeto.
- Des. Designer:** Campo para o nome do designer.
- Emissor:** Campo para o nome do emissor, com o logótipo da EDP e o texto "EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A." e "DEB - Engenharia de Barragens".
- Código de unidade:** Campo para o código de unidade.
- Esca. 1:1:** Campo para a escala do desenho.
- Escalas:** Campo para a definição de escalas.
- Substituído por:** Campo para o nome do substituto.
- Data:** Campo para a data de emissão.

Figura 4.1 – Pormenor da folha em Revit.

Uma vez criada a família da folha, passou-se para a criação de famílias de símbolos que se revelem úteis na cotação de desenhos, como na representação de cortes e cotas. Nota para o facto de qualquer apresentação necessitar de ter uma espessura de linha superior aquela que é realmente pretendida, pois quando se convertem os desenhos de *Revit* para ficheiros em formato PDF (*Portable Document Format*) as linhas têm tendência a perder espessura na sua apresentação. Na Figura 4.2 e Figura 4.3 é apresentado o símbolo correspondente à representação de um nível no *Revit*, por defeito e no *template*, respetivamente.



Figura 4.2 - Cota padrão no Revit.



Figura 4.3 - Cota no template da empresa.

Na produção de desenhos, também as cotagens de distâncias e ângulos assumem um papel preponderante para o aspecto final desse desenho e, mais uma vez, a apresentação do Revit teve de ser adaptada para corresponder ao aspecto que a empresa promove. Nestes casos, não é necessária a criação de uma nova família, sendo necessária a duplicação de uma existente e alterados os parâmetros necessários, como cor, espessura de linha, entre outros. A título exemplificativo é apresentada a cotagem padrão do *Revit* na Figura 4.4 e a cotagem de acordo com o *template* criado, na Figura 4.5.

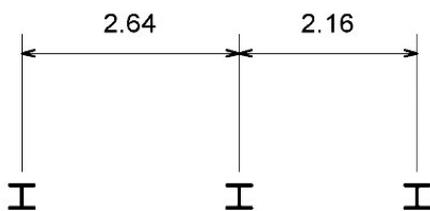


Figura 4.4 - Cotagem de distâncias padrão no Revit.

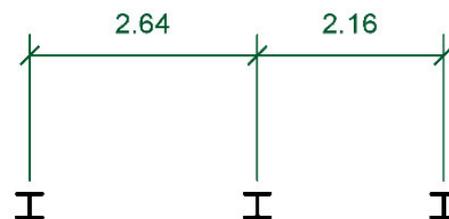


Figura 4.5 - Cotagem de distâncias no template da empresa.

Partindo deste *template* foram então obtidos os desenhos da tomada de água, sendo de seguida comparado um desenho de execução segundo a metodologia tradicional (Figura 4.6) e um desenho obtido a partir do modelo BIM (Figura 4.7).

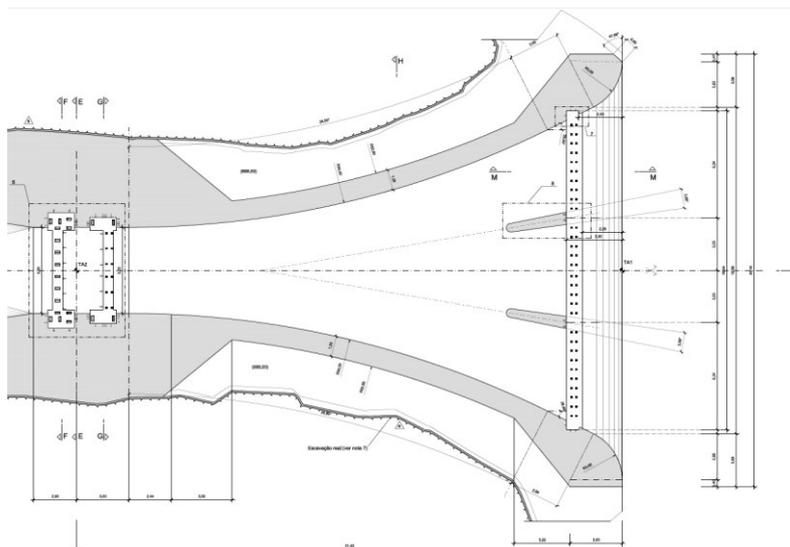


Figura 4.6 - Desenho de execução segundo a metodologia tradicional.

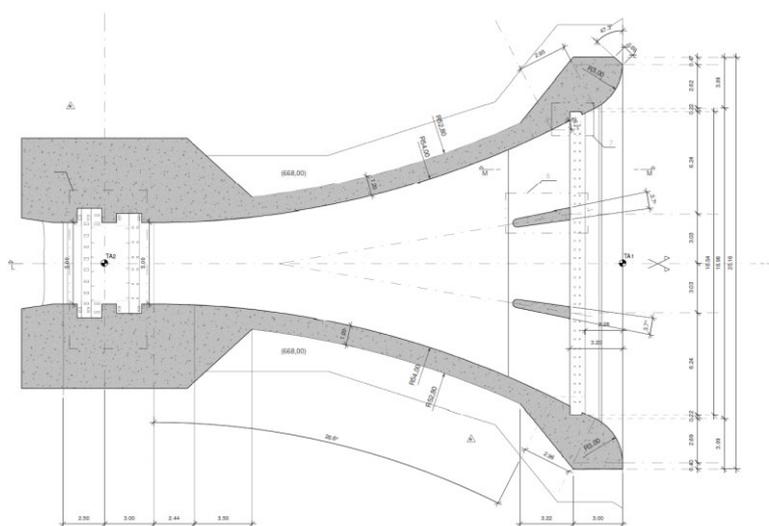


Figura 4.7 - Desenho obtido a partir do modelo BIM.

Repare-se que a diferença entre os desenhos reside no facto de no desenho obtido segundo a metodologia tradicional se ter incorporado o perfil de escavações real (após construção), algo que também poderia ser realizado no desenho obtido a partir do modelo BIM, embora não se tenha optado por fazer.

Em suma, é possível, a partir do modelo BIM, obter desenhos com aspeto análogo aos que se obtêm através da metodologia de trabalho tradicional, sendo que estes podem ser complementados com cortes tridimensionais, promovendo uma melhor compreensão da estrutura por parte dos diferentes intervenientes. No caso de alteração de projeto, estes desenhos

são atualizados tendo em conta o modelo, ao contrário da metodologia de trabalho tradicional, em que as alterações têm de ser repercutidas manualmente e individualmente em cada desenho.

4.2 Mapas de quantidades

Os elementos modelados em BIM são ricos em informação. Informação básica como o volume, material e o agrupamento dos elementos por famílias torna possível a extração automática de quantidades a partir do modelo.

Dependendo da fase de um projeto e, conseqüentemente, do rigor que se pretende para o mapa de quantidades gerado, deve ter-se em atenção no processo de modelação aspetos como as ligações viga-pilar, viga-laje, entre outros (ver Figura 4.8 e Figura 4.9). Assim, e tal como referido anteriormente, na modelação foram tidos em conta conhecimentos relativos a regras de medição, adquiridos na Unidade Curricular de Organização e Gestão da Construção (Couto, 2010).

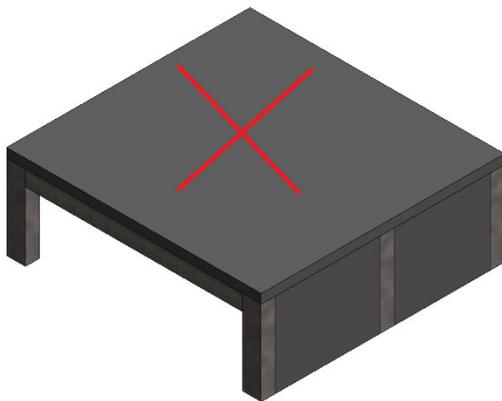


Figura 4.8 - Modelação sem cuidados para extração de quantidades.

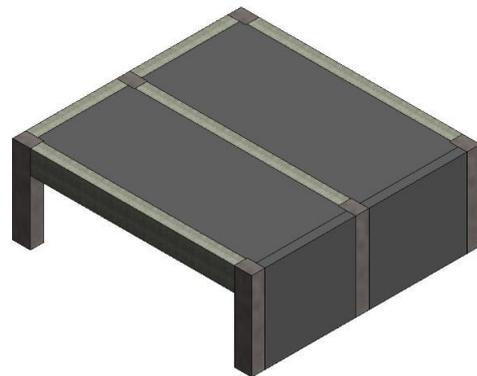


Figura 4.9 - Modelação para extração rigorosa de quantidades.

A título exemplificativo, optou-se por obter os volumes relativos às paredes entre as cotas 217 m e 221 m, da central. Na geração do mapa é possível escolher os diferentes parâmetros a inserir na tabela e até filtrar os elementos que se pretendem incluir, sendo que neste caso se selecionaram os parâmetros:

- Tipo (instância da família “Wall”);
- Material;
- Espessura;

- Comprimento;
- Volume.

Foi também adicionado um filtro de forma ao mapa incluir apenas as paredes entre as cotas supracitadas. De seguida é apresentado um excerto do mapa gerado (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Excerto do mapa de quantidades gerado.

Paredes: 217m - 221m				
Tipo	Material	Espessura	Comprimento	Volume
Parede 1.15m	Betão	1.15 m	5.40 m	64.64 m ³
Parede 1.15m	Betão	1.15 m	18.44 m	238.57 m ³
Parede 1.15m	Betão	1.15 m	18.44 m	238.57 m ³
Parede 1.15m	Betão	1.15 m	14.20 m	183.71 m ³
Parede 1.15m	Betão	1.15 m	5.80 m	74.98 m ³
Parede 1.15m	Betão	1.15 m	8.30 m	107.38 m ³
Parede 0.74m	Betão	0.74 m	24.12 m	124.87 m ³
Parede 0.20m	Betão	0.20 m	3.18 m	3.09 m ³
Parede 0.30m	Betão	0.30 m	2.14 m	4.11 m ³
Parede 0.30m	Betão	0.30 m	5.07 m	9.52 m ³
Parede 0.30m	Betão	0.30 m	3.18 m	4.31 m ³
Parede 1.15m	Betão	1.15 m	18.44 m	143.14 m ³
Parede 0.74m	Betão	0.74 m	4.90 m	24.48 m ³
Parede 0.20m	Betão	0.20 m	17.89 m	4.08 m ³
Parede 0.20m	Betão	0.20 m	6.03 m	1.30 m ³
Parede 0.20m	Betão	0.20 m	11.40 m	2.58 m ³
Parede 1.15m	Betão	1.15 m	29.61 m	226.98 m ³

Com o mapa de quantidades gerado foi possível obter um total de 310 paredes, perfazendo um volume total de 8173,81 m³ de betão. O mapa foi também exportado para o *Excel*, pois este *software* revela-se mais intuitivo na alteração de aspetos estéticos (como dimensão e cor das células).

De facto, a geração automática de mapas de quantidades a partir do modelo BIM constitui uma vantagem comparativamente com a metodologia de trabalho corrente, pois transforma um processo tradicionalmente moroso e propenso ao erro num processo rápido (mapas são gerados em poucos minutos) e com elevado rigor. O facto de ser possível adicionar parâmetros e recorrer aos sistemas de classificação torna possível um elevado nível de personalização dos mapas, de forma a corresponder da melhor maneira ao que o utilizador pretende. Estes mapas são também adequados para obtenção de rigorosas estimativas de custo (Eastman *et al.*, 2011).

4.3 Exploração do modelo de armaduras para deteção de colisões e CAD/CAM

O modelo de armaduras, realizado no *Tekla Structures*, pode também ser explorado para diferentes fins, como produção de desenhos, deteção de colisões ou CAD/CAM, sendo que no presente capítulo serão discutidos os dois últimos.

Para a deteção de colisões, optou-se por explorar o *software Tekla BIMsight*, que se trata de um visualizador de modelos BIM e que permite combinar modelos, detetar conflitos e comunicar problemas/erros (Tekla BIMsight, 2013). Este tipo de *software* permite combinar deteções de colisões geométricas com análises semânticas baseadas em regras com o objetivo de identificar colisões específicas (Eastman *et al.*, 2011), ou seja, é possível configurar o tipo de colisões que se pretende detetar. No caso do *Tekla BIMsight* é possível seleccionar os elementos entre os quais se pretendem detetar colisões, incluir tolerâncias, entre outros, tal como apresentado na Figura 4.10.

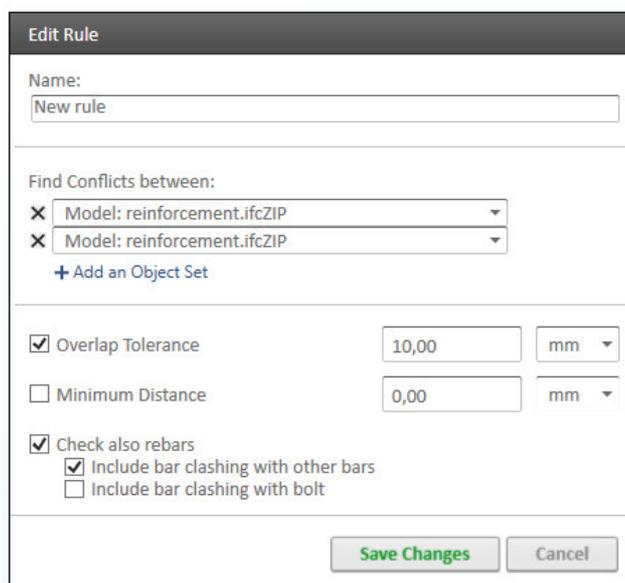


Figura 4.10 - Menu de criação de regra para deteção de colisões, no Tekla BIMsight.

No presente caso, optou-se por verificar as colisões entre varões de armaduras e dar uma tolerância de 10 mm, de forma a garantir que apenas são detetadas colisões significativas. De facto, se for realizada uma análise a todas as colisões existentes e estas não forem “filtradas”, obtém-se um número elevado de colisões que não comprometem a boa execução da estrutura, pois com ligeiros ajustes são evitadas. Ainda assim, foram detetadas colisões pelo *software*, nomeadamente na ligação entre septos verticais e horizontal – ver Figura 4.11 e Figura 4.12.

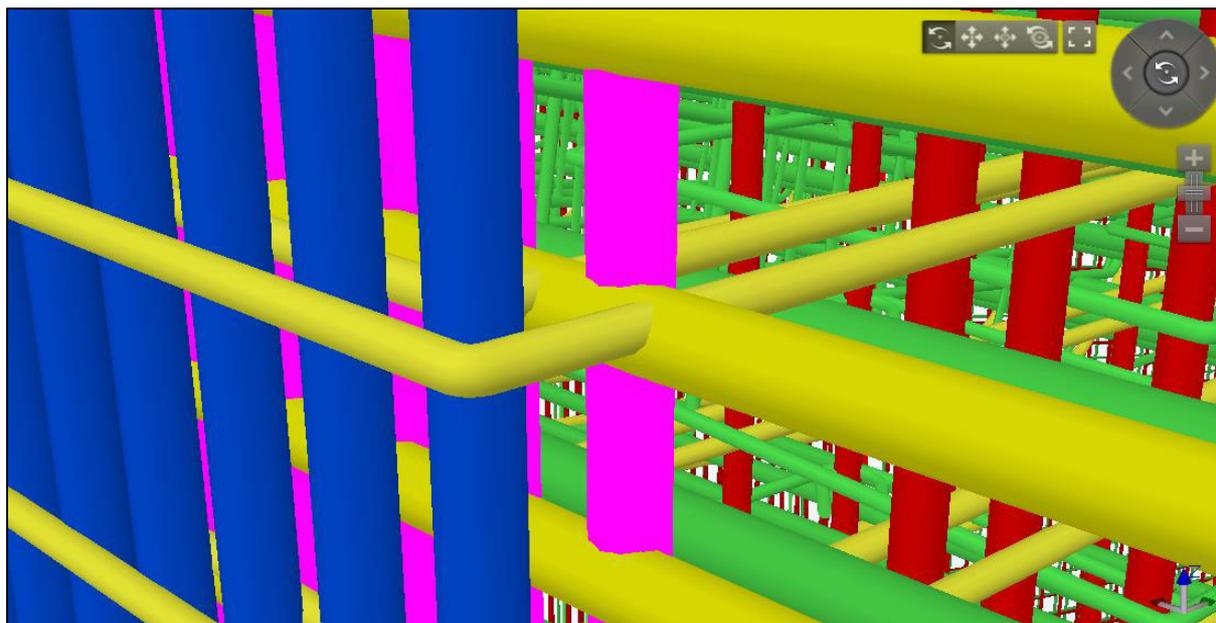


Figura 4.11 - Colisão entre diferentes varões no septo vertical.

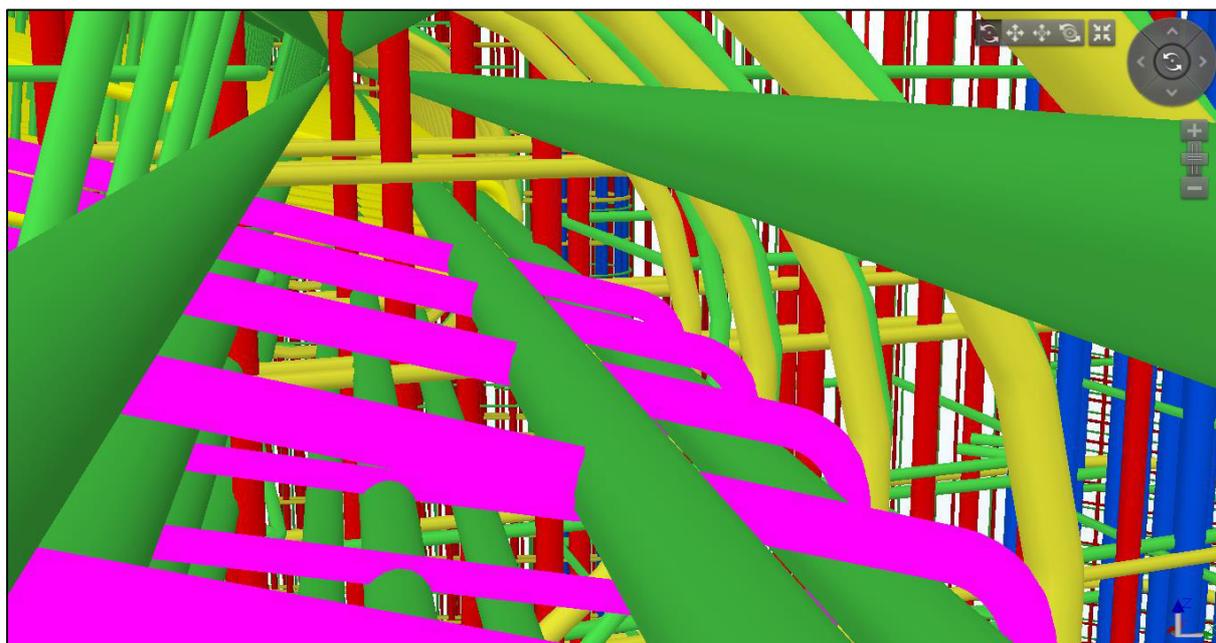


Figura 4.12 - Colisão entre diferentes varões, no septo horizontal.

As deteções de colisões são realizadas em intervalos de tempo curtos, e revelam-se eficientes na identificação, e posterior resolução, de problemas antes da execução da estrutura, o que pode prevenir atrasos na construção.

Também a possibilidade de “programar” regras que permitem transcender a identificação de colisões físicas revela bastante potencial na automatização de controlos de qualidade do projeto.

A título exemplificativo, é possível realizar automaticamente verificações de diâmetro mínimo, a nível de armadura, ou espessura mínima de parede, a nível de betão.

As aplicações CAD/CAM (*Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing*) são usadas quer para desenhar/modelar um produto quer para programar os seus processos de produção/fabricação, especificamente, através de máquinas CN (máquinas de controlo numérico). Os *softwares* CAM usam os modelos criados para controlar uma máquina que transforma desenhos em partes físicas (Autodesk, 2015c).

As máquinas CN são programadas para produção de lotes de peças complexas (Figura 4.13). Após uma sequência de instruções pré-programadas, estas máquinas cortam, alinham e dobram varões em diferentes tamanhos e formas. O desenvolvimento desta tecnologia deu-se no início dos anos 50 do século XX no Instituto de Tecnologia de Massachussetts com o objetivo de encontrar métodos mais eficientes na fabricação de aviões para a Força Aérea dos EUA (Ribeiro, 2013).



Figura 4.13 - Exemplo de máquina de controlo numérico (Rhocan, 2015).

Os dados necessários para programação de uma máquina CN já existem na base de dados dos modelos BIM e, teoricamente, podem ser encaminhados de forma automática para esta finalidade. O *Tekla*, particularmente, apresenta já compatibilidade com as respetivas máquinas de corte, através da gravação de ficheiros que são lidos pelas mesmas. Os formatos de ficheiro BVBS (*Bundesvereinigung Bausoftware*) e ASCII sintetizam a informação numa linguagem própria que está apta a utilização direta por máquinas CN (Ribeiro, 2013).

De facto, grandes inovações foram feitas nas máquinas automatizadas de produção de armaduras (Aram, Eastman, & Sacks, 2013), sendo que a principal componente que contribuiu para o aumento da produtividade no fabrico foi a aplicação de tecnologias de informação (C. Eastman & Sacks, 2008). Assim, com a transferência de dados automatizada entre os modelos BIM e as máquinas de controlo numérico, possível com os sistemas CAD/CAM, obtém-se uma redução de custos, aumento da qualidade do fabrico e uma melhoria da produtividade (Ribeiro, 2013).

4.4 Compreensão, comunicação e discussão dos modelos

O extenso e complexo projeto de um aproveitamento hidroelétrico é elaborado e partilhado com recurso a desenhos, sobretudo representados a duas dimensões. A interpretação destes desenhos exige elevada capacidade de abstração e, durante a elaboração da presente dissertação, o autor despendeu um elevado número de horas na interpretação de desenhos de forma a ter uma boa perceção da estrutura das diferentes componentes.

De facto, a elevada dimensão/complexidade destes empreendimentos torna indispensável a correta compreensão da obra por parte dos diferentes intervenientes. Esta compreensão pode ser potenciada complementando os desenhos tradicionais com cortes tridimensionais, possíveis de obter a partir do modelo BIM. Este fator pode apresentar diversas vantagens, nomeadamente a redução do tempo investido na interpretação de desenhos, promovendo uma melhor compreensão da obra por parte dos diferentes *stakeholders* e levando, conseqüentemente, a uma redução do número de erros construtivos. A título exemplificativo é de seguida apresentado (Figura 4.14 e Figura 4.15) o exemplo da torre de manobra da tomada de água de Venda Nova III, em que claramente o corte tridimensional facilita a compreensão da sua estrutura.

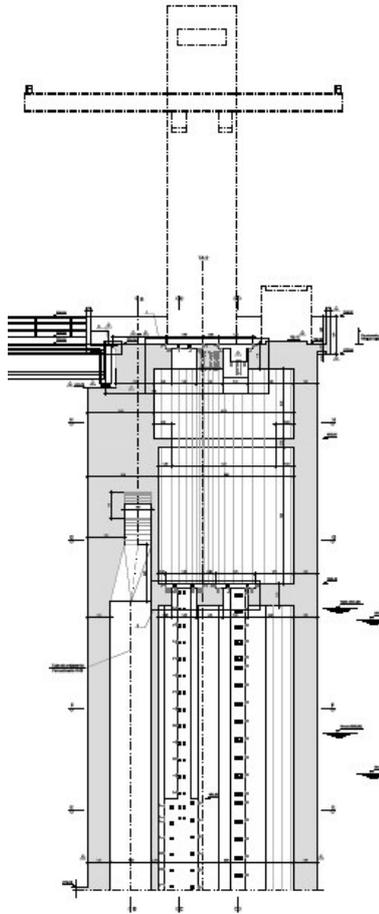


Figura 4.14 - Desenho tradicional.

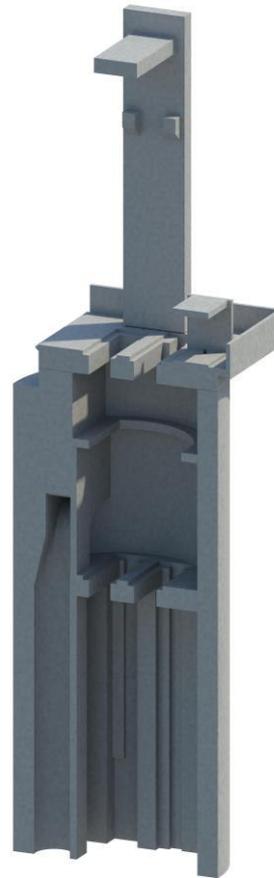


Figura 4.15 - Corte tridimensional obtido a partir do modelo BIM.

A possibilidade de partilha do modelo tridimensional promove ainda uma melhor colaboração entre as diferentes equipas de projeto (como por exemplo com o fornecedor de equipamentos), devido à ausência de incoerências. Também a equipa em obra pode beneficiar com a adoção de metodologias BIM, sendo que no limite há a possibilidade de esta dispor de equipamentos móveis com visualizadores gratuitos do modelo (ver Figura 4.16). Esta medida é sugerida no aproveitamento hidroelétrico de Huangdeng (Infrastructure, 2015), o que permitiria aumentar a eficiência construtiva, nomeadamente no esclarecimento de dúvidas construtivas.



Figura 4.16 - Visualização de modelo Tekla em obra (Tekla, 2014).

Na fase inicial do projeto de um aproveitamento hidroelétrico, a conceção geométrica das diferentes componentes é diversas vezes discutida/otimizada até se obter uma solução final. Também nesta fase o modelo BIM pode revelar-se útil, promovendo um melhor processo de otimização, visto estar parametrizado e ser possível testar diferentes soluções em intervalos de tempo relativamente curtos.

4.5 Geração de conteúdos multimédia

Um outro potencial uso do modelo BIM, embora menos técnico que os anteriormente apresentados, é a geração de conteúdo multimédia, nomeadamente a criação de vídeos de apresentação do empreendimento. Também se optou por explorar este uso na presente dissertação tendo-se, para este efeito, recorrido ao *software Lumion*.

O *Lumion* permite a importação de modelos de variados *softwares* CAD e a visualização desses modelos, com exploração em tempo real ou através da elaboração de imagens ou vídeos. De facto, este *software* é de manipulação intuitiva e revela-se capaz de produzir vídeos de elevada qualidade em intervalos de tempo relativamente curtos (Lumion 3D, 2015).

Assim, optou-se, para este uso, pela exploração do modelo da tomada de água de Venda Nova III, tendo-se obtido diferentes imagens do modelo e elaborado um vídeo. No vídeo o modelo é percorrido pelo seu exterior e interior, nomeadamente no bocal, tubo de arejamento e zona de

movimentação das comportas. Para a elaboração deste vídeo foram incorporados os modelos do *Revit* e do *Tekla* (armaduras do bocal), sendo que o primeiro foi exportado para o *Lumion* através da extensão “*Revit to Lumion Bridge*”, que grava o modelo no formato *COLLADA* (*Collaborative Design Activity*) e o segundo, por sua vez, foi exportado com recurso ao formato *Sketchup*, pois o formato *DWG* não permite a exportação de armaduras.

Os modelos são interpretados pelo *Lumion*, sendo inseridos num cenário à escolha do utilizador (no presente caso optou-se por um rio). Uma vez inseridos, os modelos podem ser editados, a nível de material constituinte (tendo o *software* uma biblioteca de materiais bastante rica, com muitas texturas), assim como o cenário, onde é possível trabalhar no terreno, iluminação (natural e artificial) e adicionar elementos, como pessoas (podendo ser, ou não, animadas) ou objetos. Uma vez definidos todos os elementos pretendidos, o vídeo é gerado a partir de uma sequência de fotografias, sendo que é permitido ao utilizador definir o intervalo de tempo entre estas imagens.

São, de seguida, apresentadas imagens obtidas a partir do *Lumion* nomeadamente a zona a montante do bocal (Figura 4.17) e na torre de manobra (Figura 4.18).

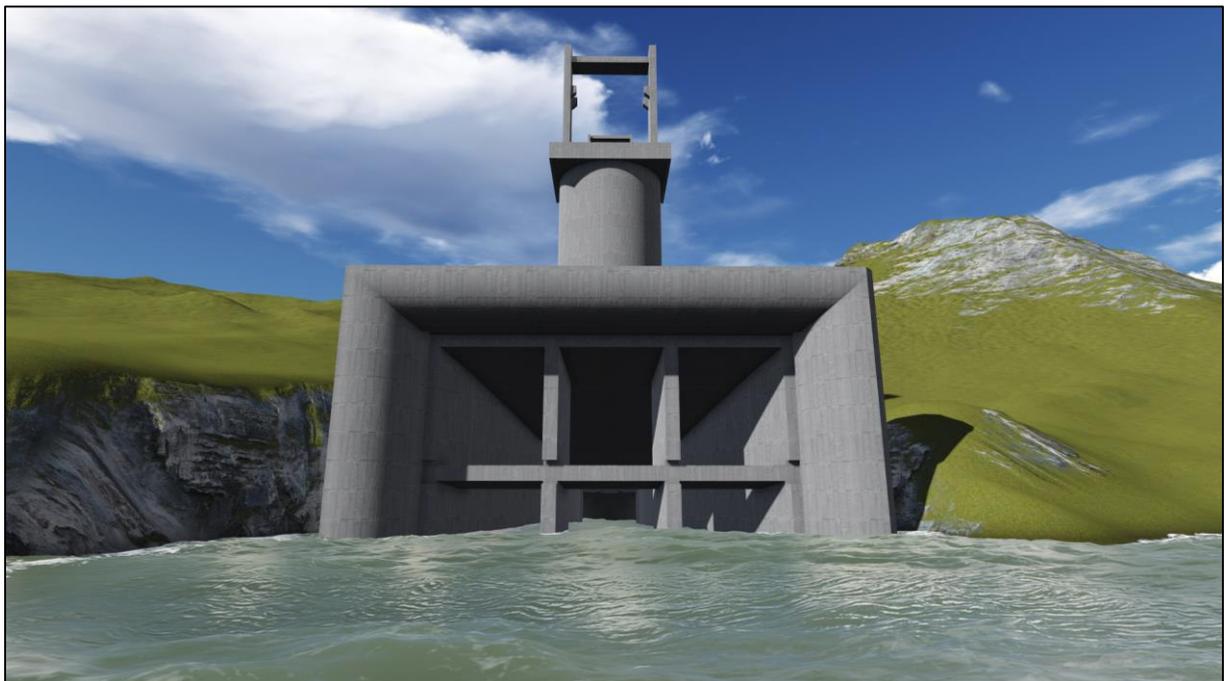


Figura 4.17 - Vista frontal da tomada de água.

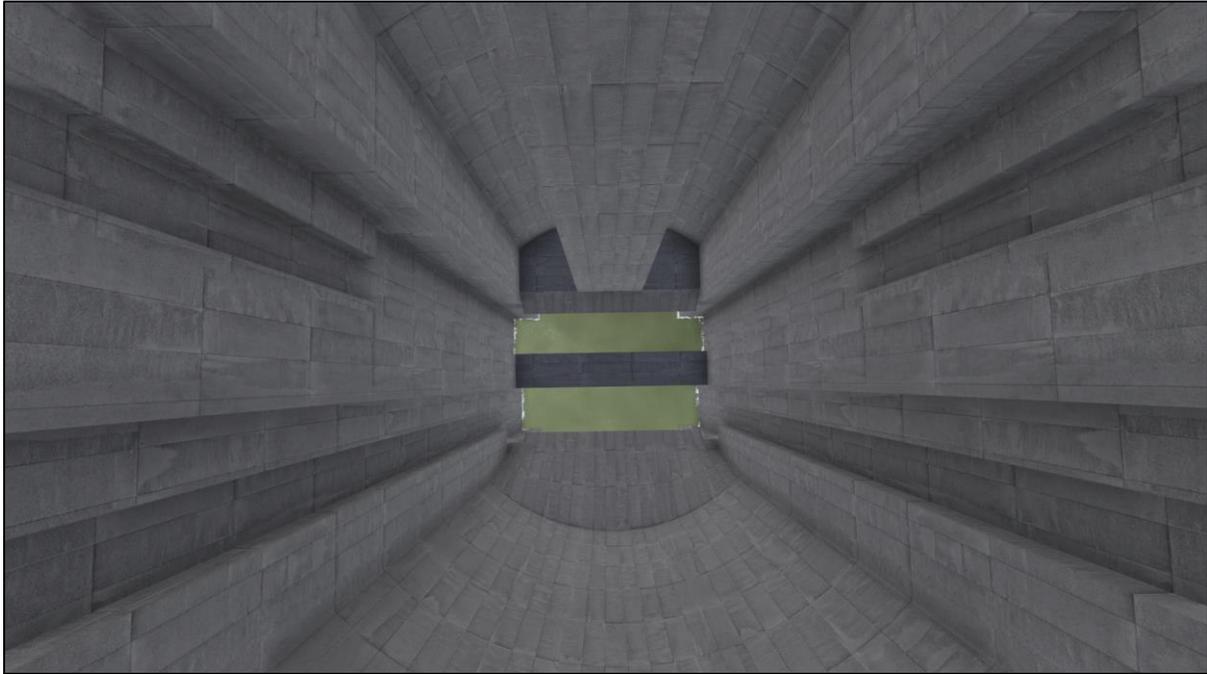


Figura 4.18 - Vista da zona de movimentação das comportas.

Os vídeos revelam elevado potencial na apresentação do empreendimento antes da sua execução e, até, na compreensão da obra por parte dos diferentes *stakeholders*. Também durante a realização do modelo BIM, estes vídeos se revelam úteis, nomeadamente na verificação de qualidade deste pois, permitindo percorrer a estrutura pelo seu interior, pode levar à verificação de erros de modelação difíceis de detetar, situação que ocorreu durante a realização da presente dissertação, em que se verificou que uma viga da torre de manobra não estava apoiada numa parede, como acontece na realidade.

5. ESTRATÉGIAS E PLANOS DE IMPLEMENTAÇÃO/EXECUÇÃO

5.1 Âmbito do documento

De forma a promover uma implementação bem sucedida de metodologias BIM, é essencial que a equipa de projeto realize um planeamento detalhado e exaustivo (Computer Integrated Construction Research Program, 2011). Assim, e como resposta a este fator, é importante que a equipa de projeto desenvolva um plano de execução BIM (BCA, 2013b), doravante designado BEP (*BIM Execution Plan*).

O BEP descreve a visão geral, em conjunto com alguns detalhes, da estratégia que a equipa deve seguir durante a execução do projeto relativamente aos aspetos relacionados com BIM e trocas de informação. É usualmente definido no início do projeto, sendo sujeito a revisão aquando da adição de novos membros, de forma a acomodar a sua participação (BCA, 2013b). O BEP deve garantir que todas as partes envolvidas estão conscientes das oportunidades e responsabilidades associadas à incorporação do BIM no *workflow* de projeto (Computer Integrated Construction Research Program, 2011). Entre outro conteúdo, o BEP deve conter informação do projeto, identificar os objetivos e usos BIM, definir os *deliverables* para as diferentes fases de projeto e incluir os processos que levam à sua produção (BCA, 2013a). O desenvolvimento deste documento deve permitir ao dono de obra e aos membros de projeto (BCA, 2013b):

- Entender claramente os objetivos estratégicos para a implementação BIM no projeto;
- Perceber as suas funções e responsabilidades a nível de criação de modelos, manutenção e colaboração nas diferentes fases de projeto;
- Desenvolver um processo apropriado para participarem na implementação;
- Delinear eventuais recursos ou serviços adicionais que possam ser necessários;
- Providenciar uma base de referência para medir o progresso ao longo do projeto.

Neste contexto, optou-se pela realização de um documento de apoio à elaboração do plano de execução e implementação de metodologias BIM na empresa, presente no Anexo 3, e cujos aspetos principais são relevados no presente capítulo. Neste documento são definidos aspetos

padrão para os diferentes tipos de projetos, sendo ainda complementado com outros documentos que se entendem ser de elevada relevância para a implementação do BIM.

Assim, o corpo do documento é essencialmente constituído por seis capítulos, aos quais são adicionados anexos. Nestes capítulos são definidos objetivos e usos BIM (sendo, também, sugerida uma metodologia para a sua seleção – cap. 2), são apresentadas novas funções que aparecem com o BIM e atribuídos os seus responsáveis (cap. 3), são mapeados processos de forma a garantir os diferentes *deliverables* (cap. 4), são discutidas as diferentes trocas de informação (cap. 5) e são, ainda, definidos aspetos organizacionais, nomeadamente a estrutura de pastas e nomenclatura de ficheiros (cap. 6). Em anexo é possível encontrar uma proposta de controlo de qualidade de modelos, um documento de especificações LOD e um auxiliar de modelação. Os aspetos definidos no documento devem ser aproveitados no futuro embora, e tendo como particularidade o facto de se tratarem de obras especiais, possam ser adaptados e/ou alterados em função de necessidades específicas da obra em questão. Trata-se, então, de um documento aberto, podendo ser alterado em virtude da experiência que vai sendo adquirida ao longo da sua aplicação em diferentes projetos, sofrendo, assim, um processo de melhoramento constante.

O plano apresentado visa a implementação de metodologias BIM no departamento de fundações e estruturas da DEB (Direção de Engenharia de Barragens), logo, corresponde a uma versão adaptada de planos gerais, com simplificação no número de itens abordados, pois trata-se de uma tipologia de trabalho de gabinete de projeto e dono de obra, o que não requer todas as partes de um BEP geral. O documento é maioritariamente inspirado no *BIM Project Execution Planning Guide (Computer Integrated Construction Research Program, 2011)*, embora outros documentos como normas de países pioneiros na adoção do BIM (Singapura, Reino Unido e Finlândia) e dissertações sob a temática de BIM se tenham revelado fundamentais para o desenvolvimento deste. Na Figura 5.1 são apresentados constituintes/bases de um BEP.



Figura 5.1 – Constituintes/bases do plano de execução BIM.

5.2 Objetivos e Usos BIM

No início de cada projeto em que se pretende implementar metodologias BIM, é de extrema importância perceber e definir o porquê dessa implementação, ou seja, o que a empresa pretende ganhar em relação à abordagem tradicional. Assim, os objetivos dessa implementação podem ser vários, por exemplo:

- Redução do custo de projeto;
- Redução do tempo de projeto;
- Melhoria da qualidade do projeto final;
- Aumento da eficiência na produção de documentação;
- Aumento da produtividade da equipa em obra;
- Redução de custos associados a alterações/erros de projeto;
- Melhoria no processo de cruzamento entre especialidades.

O início deve, então, ter sempre presente a finalidade, pois é essencial que os membros do projeto percebam qual o futuro uso e importância da informação que estão a desenvolver

(Computer Integrated Construction Research Program, 2011). Depois de definidos os objetivos da implementação de metodologias BIM no projeto, é importante perceber quais os processos e *deliverables* que levam a que esses mesmos objetivos sejam cumpridos. Surge então o conceito de uso BIM, que constitui uma tarefa ou procedimento que um projeto pode beneficiar devido à utilização de metodologias BIM (Computer Integrated Construction Research Program, 2011) e que tem como função garantir que determinado objetivo BIM definido anteriormente é alcançado. Para melhor perceção desta relação é apresentado na Figura 5.2 um exemplo da definição de usos BIM em função dos objetivos.

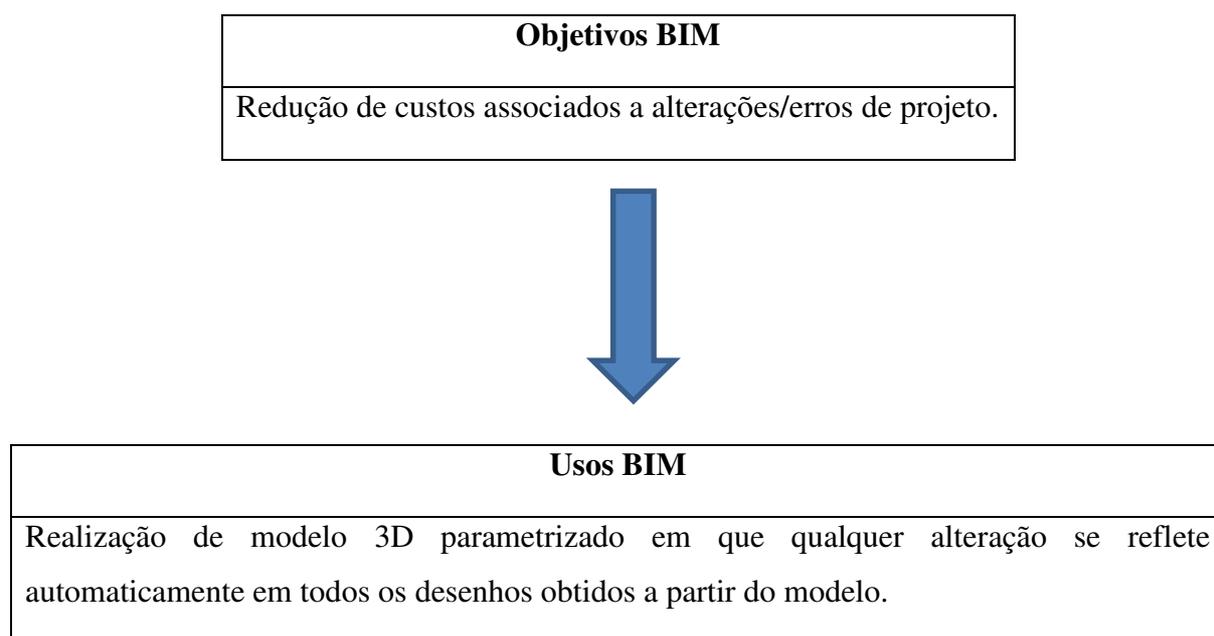


Figura 5.2 - Relação entre objetivos e usos BIM.

Com o objetivo de auxiliar a equipa de projeto na definição dos usos BIM optou-se por adotar a tabela de seguida apresentada (Tabela 5.1), que constitui uma adaptação da tabela do *BIM Project Execution Planning Guide* (Computer Integrated Construction Research Program, 2011).

Tabela 5.1 - Definição dos usos BIM.

Uso BIM	Potencial para o Projeto	Responsável	Capacidade			Recursos / Competências Adicionais	Notas	Decisão
	Alto / Médio / Baixo		Escala 1-3; 1= Baixo					Sim / Não
			Recursos	Competência	Experiência			

Assim, o preenchimento da tabela supracitada leva à definição dos usos BIM a produzir para o projeto em questão. A primeira coluna da tabela inclui os alguns usos BIM possíveis, sendo que, a partir do trabalho desenvolvido na presente dissertação, se optou por incluir os seguintes:

- Produção de desenhos de execução;
- Produção de mapas de quantidades;
- Produção de modelo de armaduras;
- Produção de vídeos/*renders* do modelo;
- Análise estrutural a partir do modelo.

Estes usos devem depois ser avaliados em diferentes óticas. Inicialmente é atribuído o responsável pela sua elaboração, sendo este depois avaliado em termos de competência e experiência na tarefa a desenvolver, numa escala de três níveis (em analogia à tabela original). Também a empresa é avaliada, mas a nível de recursos que dispõem que possibilitam a elaboração desse uso. Uma vez definidos estes campos é então estudada a necessidade extra a nível de recursos ou reforço de competências por parte do responsável. Devem ser ainda referidas particularidades relevantes associadas ao uso BIM em questão e que possam influenciar na tomada de decisão de elaborar, ou não, o uso BIM, o que corresponde ao último campo da tabela. É, de seguida (Tabela 5.2), apresentado um exemplo de preenchimento da tabela.

Tabela 5.2 - Exemplo de preenchimento da tabela de definição de usos BIM.

Uso BIM	Potencial para o Projeto	Responsável	Capacidade			Recursos / Competências Adicionais	Notas	Decisão
	Alto / Médio / Baixo		Escala 1-3; 1= Baixo					Sim / Não
			Recursos	Competência	Experiência			
Extração de Quantidades	Alto	Engenheiro 1	3	2	1	Requer treino na última versão de <i>software</i>	Elevado potencial de redução de custo de projeto	Sim

5.3 Identificação de membros de equipa e responsabilidades

Tal como referido anteriormente, a adoção do BIM leva ao surgimento de novas responsabilidades e, conseqüentemente, a uma nova definição de cargos. Para esta definição, é recomendado em normas (nomeadamente Singapura e Reino Unido) a adoção de matrizes de responsabilidade que se revelam algo complexas e pouco intuitivas de interpretar. Visto isto, e tendo em conta na presente dissertação é visada a aplicação num departamento maioritariamente dedicado ao ramo das estruturas e se pretende promover uma organização

descomplicada e intuitiva, optou-se simplesmente pela atribuição de tarefas elementares a membros de projeto essenciais.

A definição dos diferentes cargos partiu do organigrama do departamento, de forma a haver uma adaptação à realidade do mesmo, e otimizar os recursos humanos disponíveis. De uma forma muito simplificada, o departamento divide-se em três níveis hierárquicos: membros de direção, engenheiros e técnicos de desenho. Tendo em conta esta organização, e também recorrendo a colaboradores familiarizados com os processos da empresa, distinguiram-se quatro diferentes funções: o BIM *manager* (membro da direção), que tem responsabilidades sobre todos os projetos em que são adotadas metodologias BIM, o gestor de projeto (engenheiro), que, simplificada, pode ser encarado como um BIM *manager* particular para cada projeto, o engenheiro, que desempenha funções de modelação e o técnico de desenho, que apoiará o engenheiro na produção de modelos (modelador). Assim, enquanto os dois primeiros cargos terão funções focadas em gestão de recursos humanos e processos, os dois últimos serão mais responsáveis pela produção de *deliverables*. Estas responsabilidades/tarefas são incrementadas às responsabilidades padrão que os colaboradores da empresa tinham antes da adoção de metodologias BIM. No documento presente no Anexo 3 é possível verificar as responsabilidades para as diferentes funções. Note-se que alguns dos conceitos introduzidos nas responsabilidades (como fórum interno, modelação a partir de *worksets* ou gestão de pastas) são definidos nos subcapítulos a seguir.

5.4 Mapeamento de processos

É essencial, para os intervenientes no projeto, perceber o processo de implementação para cada uso BIM e para o projeto como um todo. No *BIM Project Execution Planning Guide* (Computer Integrated Construction Research Program, 2011) é recomendada a elaboração de diferentes mapas de processos (esquemas que definem *workflow* da empresa – Ver Figura 5.3), distinguindo-se estes em mapas de processo de nível 1 (geral) e mapas de processo de nível 2 (detalhado). O mapa de nível 1 consiste na ordenação cronológica dos diferentes usos BIM, com identificação das respetivas trocas de informação enquanto o mapa de nível 2 detalha a obtenção desses mesmos usos. Mais uma vez se optou por adaptar a metodologia sugerida à realidade da empresa, e decidiu-se que, tendo em conta que o mapa se refere apenas a um departamento e há uma incorporação reduzida de usos BIM (os usos definidos em 5.2), é

desnecessária a criação de dois níveis de mapas de processos. Assim, elaborou-se o mapa de processos presente no anexo BEP 1 (anexo 1 do BEP).



Figura 5.3 - Mapeamento de processos (Ultra Consultants, 2015).

O mapa de processos foi elaborado segundo a notação BPMN (*Business Process Model and Notation*) (BPMN, 2015) e tendo em conta as diferentes funções e responsabilidades definidas anteriormente, o trabalho (a nível de modelação) desenvolvido na presente dissertação e a vontade de otimização dos recursos humanos do departamento. O mapa foi evoluindo ao longo de diferentes versões até à apresentada, sendo que neste processo de evolução foram fundamentais as discussões com o Eng.º André Ferreira, conhecedor dos atuais processos do departamento e modelação BIM, e com o Professor Miguel Azenha, com conhecimentos de estratégias de implementação BIM e trabalho colaborativo. O facto de, no semestre da realização da dissertação, se desenvolver na Universidade do Minho uma Unidade Curricular dedicada ao BIM com elaboração de trabalhos de grupo, permitiu ao autor identificar estratégias de colaboração e modelação conjunta, materializadas no mapa de processos na modelação através de *worksets* (a modelação com recurso *worksets* é explicada no auxiliar de modelação, presente no documento em anexo BEP 4).

O mapa de processos foi produzido de forma padronizada para as diferentes fases do projeto, desde uma fase conceptual até à fase de execução, sofrendo, obviamente, ligeiras adaptações nas diferentes fases. Ao longo do mapa vão sendo apresentadas também as trocas de informação entre os diferentes intervenientes, sendo estas discutidas em maior detalhe no subcapítulo 5.5. O mapa de processos é de seguida descrito.

Inicialmente, é responsabilidade do gestor de projeto reunir todos os documentos necessários à modelação e produção de *deliverables*. Os documentos são disseminados pelas diferentes equipas de modelação, responsáveis pela produção de modelos de componentes (como central, tomada de água...) ou parte de componentes. As equipas de modelação podem ser constituídas por um engenheiro e um modelador (técnico de desenho), que apoia o primeiro. O engenheiro deverá analisar os documentos relativos à componente/parte que tem a modelar e verificar se esta contém equipamento. Se contiver, é necessário averiguar se o fornecedor de equipamentos tem o modelo BIM ou não, sendo que no caso de não ter será necessário criar o equipamento (recorrendo ao *Dynamo*) e, no caso de ter, é apenas necessário adaptar o modelo ao *software* que a empresa utiliza (podendo, também, recorrer-se ao *Dynamo*). Após definida a situação do equipamento, o engenheiro deve analisar os documentos relativos à componente e decidir se delega tarefas de modelação ao modelador ou se modela a totalidade da componente. No caso de optar por uma metodologia de modelação conjunta, esta será obtida com o recurso a *worksets*, sendo que a frequência da sincronização com o ficheiro central deverá ser definida pelo gestor de projeto. Finalizada a modelação, o engenheiro deverá realizar um controlo de qualidade do modelo, cuja proposta de procedimento também se encontra no documento em anexo BEP 2. No caso de o modelo ter sido bem elaborado, pode ser aproveitado pelo engenheiro para realizar análises estruturais e, eventualmente, adaptar em função dessas mesmas análises. O modelo deve, depois, ser guardado num ficheiro central e protegido pelo engenheiro recorrendo a *worksets* para que, daí em diante, o modelador não possa alterar o seu conteúdo. Depois de protegido o modelo, o modelador procede à elaboração de *deliverables*, tais como desenhos, mapas de quantidades e vídeos/*renders*.

5.5 Trocas de informação

As trocas de informação estão intimamente ligadas ao BIM. Durante os diferentes processos que levam à produção de *deliverables*, são constantes as trocas de ficheiros e o reuso de informação. Posto isto, revela-se de extrema importância que quem produz informação perceba a sua futura utilização e as suas propriedades (Computer Integrated Construction Research Program, 2011), tais como o formato, o LOD, o destinatário, entre outros. Assim, é necessário definir as trocas de informação que ocorrem durante os processos BIM para as diferentes fases de projeto.

Para auxiliar na definição das trocas de informação optou-se pela adaptação da tabela disponível no documento *BIM Project Execution Planning Guide* (Computer Integrated Construction Research Program, 2011), tendo-se suprimido mas também acrescentado alguns campos, com o objetivo de a adaptar aos usos desenvolvidos no departamento e promover uma tabela fácil de consultar e interpretar. A tabela é de seguida apresentada (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 - Tabela de definição de trocas de informação.

Uso BIM	
Modelo/Parte	
Autor(es)	
Receptor(es)	
<i>Input / Output</i>	
Fase	
Formato ficheiro	
Aplicação e versão	
LOD	
Notas	

Assim, a tabela é constituída por dez campos que caracterizam a troca de informação. Nestes campos é identificado o uso BIM correspondente à troca de informação, o modelo ou componente, o(s) autor(es) e receptor(es), é definido se a informação corresponde a um dado de entrada (*input*) ou saída (*output*) desse mesmo uso, identificada a fase em que ocorre, o formato, aplicação e versão em que foi criada, o LOD da componente e, por último, podem ser adicionadas notas de forma a garantir que a troca de informação ocorre de forma eficiente.

Relativamente ao LOD, optou-se por desenvolver um documento de especificações (presente no documento em anexo BEP 3), pois entendeu-se que a definição dada pelo *American Institute of Architects* (BIM Forum, 2013) é pouco intuitiva para o utilizador comum e complexa de consultar. Assim, deve definir-se o LOD da componente tendo em conta o documento de especificações, sendo que qualquer alteração relativamente a elementos específicos deve ser relatada no campo “Notas”.

O trabalho desenvolvido a nível de modelação permitiu ao autor perceber as características, a nível de trocas de informação, necessárias para os diferentes usos BIM, quer como dados de entrada, quer como dados de saída. Assim, definiram-se as trocas de informação padrão, para a fase de projeto de execução, optando-se, a título exemplificativo, pela escolha da componente “Central”. Estas trocas estão definidas no documento, e numeradas, de forma a facilitar a sua

introdução no mapa de processos. De seguida é apresentada a tabela que define a informação correspondente aos dados de entrada para produção de desenhos e mapas de quantidades (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 - Troca de informação correspondente aos dados de entrada para produção de desenhos e mapas de quantidades.

Uso BIM	Produção de desenhos; Mapas de quantidades
Modelo/Parte	Central
Autor(es)	Engenheiro 1
Receptor (es)	Modelador 1
Input / Output	Input
Fase	Projeto de execução
Formato ficheiro	.rvt
Aplicação e versão	Revit 2015
LOD	300
Notas	Modelo Central verificado e totalmente protegido

Nota para o uso relativo à produção de vídeos do modelo em que, apesar de a empresa não possuir a licença do *software Lumion*, entendeu-se que este seria o indicado no caso de se pretender implementar o uso em questão.

São, assim, definidas as trocas de informação para a fase de projeto de execução. Em fases de projeto anteriores, a principal alteração residirá no LOD, que deverá ser mais baixo, o que é melhor explicado no documento de especificação LOD, presente no documento em anexo BEP 3. No caso de serem adicionados mais usos a um projeto, deverão ser verificados os formatos mais convenientes para criação e partilha de informação de forma eficiente.

5.6 Estrutura de pastas e nomenclatura de ficheiros

A elevada quantidade de informação criada e partilhada é uma característica relevante de um projeto, sobretudo no caso de obras especiais. Assim, a organização dos diferentes ficheiros criados durante a produção de *deliverables*, e a respetiva nomenclatura, é de extrema importância, e é essencial que tal esteja definido à partida. É fundamental que, quando um colaborador necessita de um ficheiro, o consiga localizar com clareza. Neste capítulo é proposta uma estrutura de organização de pastas e nomenclatura de ficheiros.

5.6.1 Estrutura de pastas e gestão de conteúdo

Para a definição da estrutura de pastas, optou-se por recorrer a bibliografia de referência, nomeadamente a norma britânica BS 1192 – 2007 (British Standard, 2007). Assim, definiu-se uma organização de pastas que tem em conta o proposto na norma mas também a organização atual da empresa e o trabalho que se prevê vir a desenvolver, a nível de usos BIM. Esta estrutura de pastas é de seguida apresentada e descrita, sendo que mais uma vez o contributo do Eng.º André Ferreira se revelou fundamental, devido à sua experiência na elaboração de projetos de obras especiais e organização de informação. A estrutura de pastas sugerida é apresentada na Figura 5.4

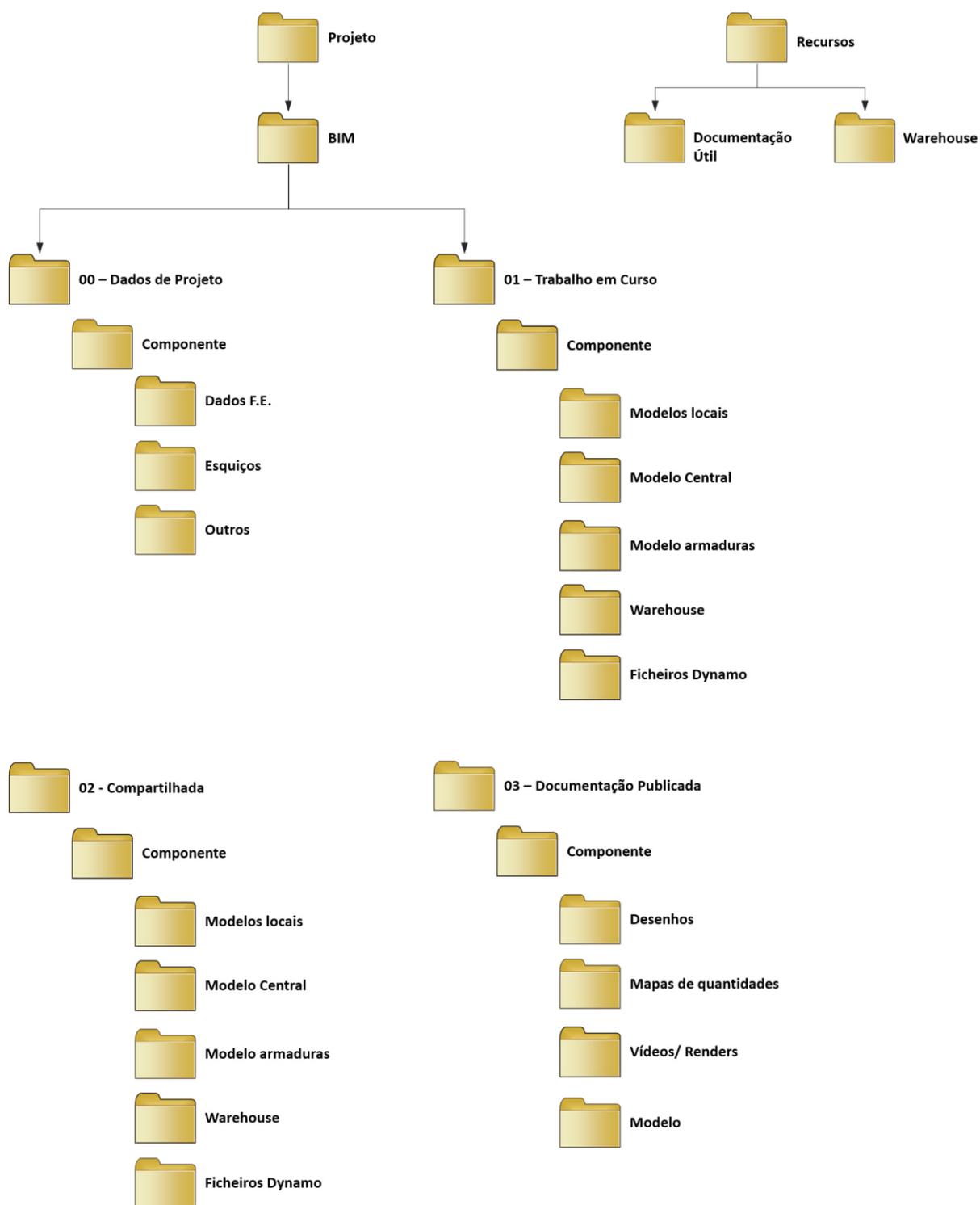


Figura 5.4 - Estrutura de pastas proposta.

Todos os ficheiros estão presentes no servidor da empresa. Cada projeto tem uma pasta correspondente e, inserida nesta, está a pasta “BIM”. Esta pasta contém 4 pastas no seu interior: “00 – Dados de projeto”, “01 – Trabalho em curso”, “02 - Compartilhada” e, por último, “03 – Documentação Publicada”.

A primeira pasta, “Dados de projeto”, contém, para as diferentes componentes da obra, os dados necessários à modelação destas (como dados do fornecedor de equipamentos, esquiços, origens dos modelos, entre outros), e pode ser acedida (apenas para leitura) pelas equipas de modelação, exclusivamente à pasta da componente pela qual são responsáveis.

A segunda pasta, correspondente ao trabalho em curso, armazena, para cada componente de uma obra hidroelétrica, os ficheiros (como modelos e famílias) que não estão finalizados ou que ainda não foram verificados/aprovados. Finalizados os modelos, estes são sujeitos a um procedimento de controlo de qualidade, realizado pelo engenheiro responsável em conjunto com o gestor de projeto. Se o modelo estiver de acordo com o que foi delineado inicialmente, ou seja, se “passar” no controlo de qualidade, pode ser guardado na terceira pasta “Compartilhada”. Esta transição é realizada pelo gestor de projeto e esquematizada através de um mapa de processos na Figura 5.5.

Cada equipa de modelação tem apenas acesso à pasta correspondente à componente pela qual é responsável, em “Trabalho em Curso”. Já a pasta “Compartilhada”, onde se situam os modelos protegidos por *Worksets*, pode ser acedida pelos modeladores (apenas aos ficheiros correspondentes à componente pela qual são responsáveis), de forma a produzirem *deliverables*, tais como desenhos, mapas de quantidades e vídeos. Produzidos estes, são entregues ao gestor de projeto que, se entender que estão em conformidade com o previsto, guarda-os na última pasta, “Documentação Publicada”. Este processo é esquematizado na Figura 5.6. Qualquer acesso a esta pasta por parte das equipas de modelação (para, por exemplo, atualizar os ficheiros do projeto de execução de acordo com as alterações realizadas em obra) deverá ser solicitado ao gestor de projeto.

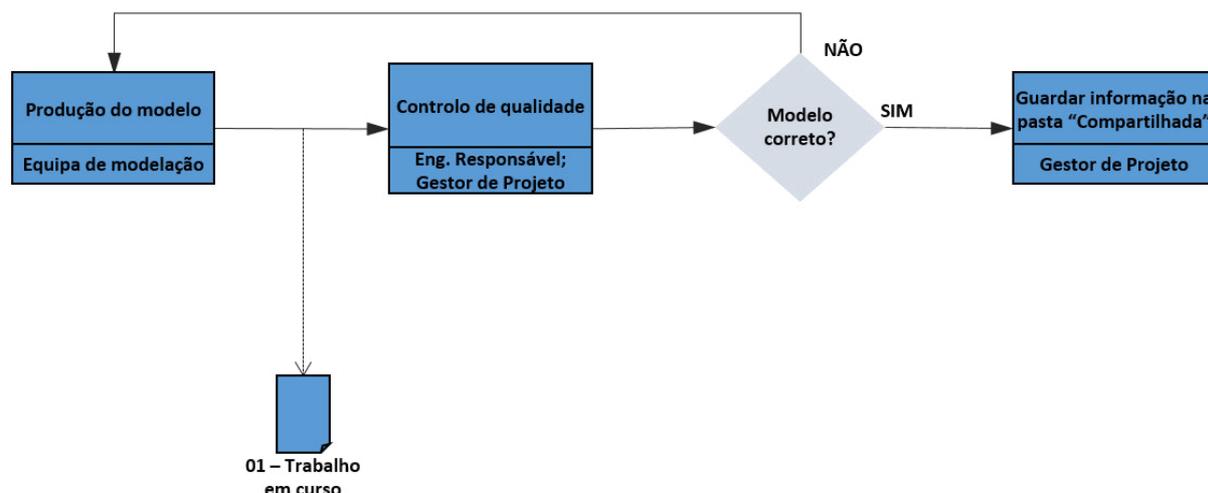


Figura 5.5 - Percurso da informação de “Trabalho em Curso” para “Compartilhada”.

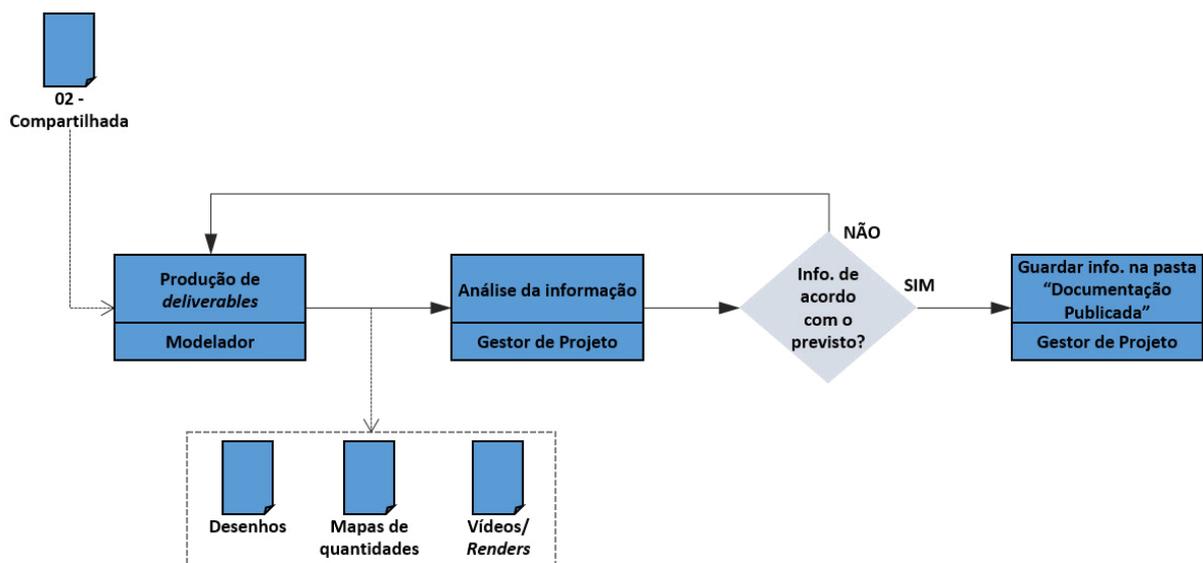


Figura 5.6 - Produção de informação para a pasta "Documentação Publicada".

5.6.2 Nomenclatura de ficheiros

Também na definição da nomenclatura de ficheiros se optou por recorrer à norma BS 1192:2007. Nesta norma são sugeridos diversos campos para identificação inequívoca de um ficheiro e, mais uma vez, definiu-se um sistema de nomenclatura que tivesse em conta estas sugestões, o sistema atualmente definido pela empresa e que, ao mesmo tempo, fosse intuitivo de analisar por parte dos colaboradores. A solução obtida passa, então, pela identificação dos ficheiros a partir de 5 campos, separados por ‘_’, sendo a estrutura do seguinte tipo:

PPP_AAAA_CCCCC_TT_NNNN

O primeiro campo diz respeito ao projeto, que deve ser identificado por 3 caracteres. O segundo campo identifica o autor (ou, no caso de modelação conjunta, o engenheiro responsável) através de 4 caracteres, sendo que cada colaborador deve ter um código associado, que não pode repetir-se. O terceiro campo identifica a componente/parte da obra (central, tomada de água, restituição ou corpo da barragem) através de 5 caracteres. O tipo de ficheiro é identificado pelo quarto campo, através de 2 caracteres, segundo a tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Código para os diferentes tipos de ficheiro.

Tipo de ficheiro	Código
Modelo	MD
Ficheiro Dynamo	DY
Família	FM
Desenho	DS
Mapa de quantidades	MQ
Vídeo	VD

Por último, o quinto campo identifica o número do ficheiro, através de quatro dígitos.

A título exemplificativo, o primeiro modelo da tomada de água de Venda Nova III, realizado pelo Eng.º André Ferreira, teria o seguinte nome:

VN3_ANDF_TOMAD_MD_0001

5.7 Documentos auxiliares

De forma a complementar a proposta de plano de execução BIM, optou-se pela elaboração de documentos adicionais que já foram sendo mencionados ao longo dos sub-capítulos anteriores, com o objetivo de auxiliar a implementação de metodologias BIM na empresa e também apoiar os colaboradores menos familiarizados com o conceito e *softwares* BIM. Assim, optou-se pela elaboração dos seguintes documentos:

- Proposta de controlo de qualidade de modelos;
- Documento de especificações LOD;
- Auxiliar de modelação.

Estes documentos estão anexados à proposta de plano de execução BIM que se encontra no Anexo 3 – Proposta de Plano de Execução BIM (BEP2, BEP3 e BEP4), sendo os aspetos mais relevantes de cada um de seguida referidos.

5.7.1 Proposta de controlo de qualidade de modelos

Cada modelador é responsável pela qualidade dos modelos que produz. Visto isto, é de maior importância que os modeladores garantam que os seus modelos têm o nível de qualidade pretendido. Para isso, no final de cada modelo, e antes da sua utilização para produção de *deliverables* cada modelador deverá realizar um controlo de qualidade (BCA, 2013b).

Foram então definidos diferentes aspetos que devem ser garantidos, tendo em conta o proposto na norma de Singapura (BCA, 2013b) - como a verificação da convergência de elementos estruturais - sendo ainda incluídos alguns aspetos pelo autor de acordo com o trabalho de modelação desenvolvido na presente dissertação. São também sugeridos procedimentos com o objetivo de detetar erros de modelação (ex.: utilização da ferramenta *Section Box*, que permite realizar cortes tridimensionais ao modelo) e uma solução no caso de se pretender realizar um controlo de qualidade mais detalhado (*software Solibri Model Checker*).

5.7.2 Documento de especificações LOD

O conceito LOD é, tal como referido anteriormente, um conceito importante no BIM pois, entre outras vantagens, permite especificar os *outputs* BIM, o nível de sofisticação (geométrica e não geométrica) dos modelos e fornece uma padronização de informação (BIM Forum, 2013). Assim, neste documento são apresentados quatro diferentes níveis de desenvolvimento (100, 200, 300 e 400) em que, para cada um, são descritas informações a incluir nos diferentes elementos construtivos. Estas informações foram definidas tendo em conta o documento *Level of Development Specification* (BIM Forum, 2013) e a dissertação de J. M. S. Silva (2013). No âmbito da aplicação do documento, decidiu-se que um quinto nível de desenvolvimento não necessita de ser descrito, pois os fins de tal nível (manutenção/operação de edifícios) não dizem respeito ao departamento em questão. A ordem de apresentação dos elementos construtivos foi decidida pelo autor, na tentativa de uma organização intuitiva e que permita uma consulta rápida e descomplicada. Assim, a apresentação segue um percurso inverso ao das cargas aplicadas sobre uma estrutura (sítio, fundações, pilares/paredes, vigas, lajes...), sendo que no final são retratados outros elementos como cofragens, juntas de dilatação, armaduras, entre outros. Relativamente aos maciços de geometria complexa, estes podem ser decompostos em vários elementos construtivos referidos anteriormente. Assim, o maciço deverá ser modelado tendo em conta os diferentes requisitos para os elementos construtivos supracitados (por exemplo, o bocal da tomada de água de Venda Nova III pode ser entendido como contendo duas lajes, duas

paredes, dois pilares e uma viga). Este documento é essencial para a definição das trocas de informação.

5.7.3 Auxiliar de modelação

Este documento tem como objetivo servir de catalisador na aprendizagem e repositório de informação de *softwares* BIM por parte dos colaboradores do Departamento de Fundações e Estruturas da Direção de Engenharia de Barragens. Apresenta, para os diferentes elementos construtivos, o processo de modelação e um conjunto de boas práticas para obtenção de mapas de quantidades detalhados.

Assim, o documento compreende vários aspetos relevantes como: (i) comandos e cuidados na modelação de elementos no *Revit*; (ii) um exemplo de modelação em *Dynamo* (tubo de aspiração); (iii) são abordadas boas práticas relativas à interoperabilidade *Revit-Tekla* e apresentados os comandos para modelação de armaduras neste último; (iv) é explicada a utilização da ferramenta de modelação de falhas desenvolvida na presente dissertação e; (v) é incluído um auxiliar de trabalho colaborativo com recurso a *worksets*.

Este auxiliar foi realizado para a versão 2015 do *Revit*, 21 do *Tekla* e 0.7.5 do *Dynamo*.

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Considerações finais

O BIM é cada vez mais aceite como o futuro da indústria AEC, estando os diferentes membros desta indústria e *software houses* a preparar-se gradualmente para a sua implementação nos vários tipos de empreendimentos. Os desafios a esta implementação vão sendo ultrapassados, sendo o desenvolvimento tecnológico o motor deste fator, com *hardware* e *software* disponíveis cada vez mais capazes. Também fatores como ações governamentais que mandatam o uso do BIM por parte da indústria em alguns países, o desenvolvimento de normas e protocolos legais e a vontade das empresas em não perder competitividade e oportunidades para concorrentes constituem catalisadores para a implementação.

De um modo geral, os objetivos inicialmente propostos foram cumpridos, tendo sido os principais desafios à implementação do BIM no projeto de estruturas de obras hidroelétricas identificados e definido um *workflow* que permite ultrapassar esses mesmos desafios.

Assim, com o trabalho desenvolvido na presente dissertação, foi possível concluir:

- Muitos dos desafios identificados no presente trabalho são de natureza técnica pois, em geral, os aproveitamentos hidroelétricos destacam-se pela elevada extensão e complexidade, sendo que a plataforma BIM explorada não está ainda preparada para obter o modelo BIM deste tipo de empreendimentos com recurso a ferramentas nativas;
- Para o caso de estruturas reticuladas correntes (como, por exemplo, posto de observação e controlo e mesmo a central) é inequívoca a possibilidade de aplicação do BIM em todas as suas dimensões;
- No caso de componentes de maior complexidade geométrica (como a tomada de água ou restituição) foi possível a realização do modelo virtual. Para a modelação destas componentes, e face às limitações da plataforma BIM explorada a nível de famílias de geometria complexa, levou ao recurso à ferramenta *Dynamo*. Esta ferramenta revelou-se capaz para este fim. A integração *Dynamo/Revit* ainda não é totalmente automatizada, pelo que se houver necessidade de alterações após a geração de ‘outputs’ como peças desenhadas ou quantidades, poderá perder-se algum trabalho correspondente. De facto, a alteração ao sólido em *Dynamo* obriga a nova exportação para *Revit*, substituindo o

sólido anteriormente existente e perdendo-se informação específica relativa ao sólido anterior, como por exemplo as cotagens automáticas nas peças desenhadas, constituindo uma limitação deste *workflow*;

- A passagem de LOD 300 para LOD 400 leva a um incremento significativo de esforço de modelação, particularmente no que diz respeito à modelação das armaduras. De facto, concluiu-se que este uso, para componentes complexas, conduz a um elevado investimento a nível de tempo nos modelos que à partida não se considera produzir o retorno de investimento necessário;
- Os *outputs* obtidos a partir dos modelos BIM revelam elevado potencial para o departamento, pois o facto de os desenhos tradicionais poderem ser integralmente mimetizados, e para além de isso poderem ser complementados com cortes tridimensionais podem levar a uma mais rápida e melhor compreensão da obra por parte dos diferentes intervenientes e, conseqüente, a uma redução de erros construtivos;
- O modelo virtual revela-se também útil em fases precoces de projeto, nomeadamente na conceção estrutural, pois, visto estar parametrizado, permite testar diversas soluções em intervalos de tempo relativamente curtos;
- Os mapas de quantidades obtidos a partir do modelo BIM promovem um maior rigor do que os mapas obtidos por processos tradicionais, e podem ser obtidos em curtos intervalos de tempo;
- O Plano de Execução BIM (BEP) revela-se essencial para a implementação do processo BIM no departamento, pois promove uma maior organização e melhor integração por parte dos diferentes colaboradores no novo paradigma.

Tendo em conta os aspetos anteriormente enumerados, é da opinião do autor e respetivos orientadores que esta **metodologia já se revela vantajosa** para o departamento de Fundações e Estruturas da Direção de Engenharia de Barragens da EDP Produção, embora não possam, ainda, ser exploradas as diferentes dimensões do BIM da mesma forma que acontece para estruturas comuns. Acredita-se também que, quanto maior a adoção do processo BIM por parte dos diferentes departamentos da EDP e correspondentes parceiros, maiores serão os benefícios que se podem obter como, por exemplo, no cruzamento das diferentes especialidades, que constitui uma das grandes vantagens da metodologia BIM comparativamente com o processo de trabalho tradicional.

6.2 Perspetivas futuras

Com a evolução do *software*, é previsível que processos que hoje se revelam morosos, como a modelação de armaduras em estruturas complexas, sejam gradualmente agilizados. O facto de o autor da presente dissertação ter já trabalhado com diferentes versões de plataformas BIM nos últimos três anos, e uma análise à evolução da capacidade destas, leva a crer que as limitações do presente irão ser ultrapassadas no futuro, sendo os *softwares* cada vez mais capazes, beneficiando da constante evolução tecnológica. De facto, este avanço deverá permitir a implementação do BIM nos diversos tipos de projeto, mesmo os mais complexos, prevendo-se uma indústria cada vez mais automatizada, rigorosa e capaz.

No contexto da dissertação elaborada, a ferramenta de modelação de falhas geológicas tem como principal objetivo a obtenção do modelo tridimensional para melhor perceção destas embora, no futuro, se pretenda explorar este modelo nomeadamente no contexto de *softwares* de programação gráfica para, por exemplo, realizar estudos do local mais apropriado para implementação de uma estrutura (recorrendo aos algoritmos de otimização destes *softwares*).

O desenvolvimento de algoritmos de programação gráfica em *Dynamo* que permitam a modelação de armaduras em elementos específicos de aproveitamentos hidroelétricos, como, por exemplo, o maciço de suporte da turbina, poderá constituir um interessante desenvolvimento. Tais algoritmos podem incorporar regras específicas que poderão ser associadas a parâmetros, cuja manipulação é possível de realizar a partir do *Excel*, o que constitui um *software* de manipulação mais intuitiva para o utilizador comum. Há já relatos de algoritmos de modelação de armaduras em elementos de geometria complexa, em que os parâmetros são manipulados no *Excel* (Autodesk, 2015b).

A exploração do BEP elaborado poderá, também, constituir um importante desenvolvimento. Este documento poderá ser amplificado, no sentido de reproduzir um maior número de usos BIM e/ou até abranger outros departamentos, e ainda melhorado, na medida em que se otimizem os processos para produção dos diferentes *deliverables*.

REFERÊNCIAS

- Aish, R., & Woodbury, R. (2005). Multi-Level Interaction in Parametric Design. *Lecture Notes in Computer Science*, 3638, 15-162.
- Aram, S., Eastman, C., & Sacks, R. (2013). Requirements for BIM platforms in the concrete reinforcement supply chain. *Automation in Construction*, 35, 1-17.
- Autodesk. (2007). IFC with Autodesk® Revit® for Dummies [Vídeo de aula]: Autodesk University.
- Autodesk. (2008). Improving Building Industry through Integrated Project Delivery and Building Information Modeling. Consultado em Abril 19, 2015. Disponível em http://images.autodesk.com/latin_am_main/files/bim_and_ipd_whitepaper.pdf
- Autodesk. (2013). How Autodesk Supports Open Data Exchange Standards to Improve Project Collaboration. Consultado em Julho 13, 2015. Disponível em http://www.autodesk.com/temp/emea/Interoperability/Interop_BIM%20Whitepaper_en-GB.pdf
- Autodesk. (2014). Practically Dynamo: Practical Uses for Dynamo Within Revit [Vídeo de aula]: Autodesk University.
- Autodesk. (2015a). In the Fold - Autodesk news and opinions. Consultado em Outubro 13, 2015. Disponível em http://inthefold.autodesk.com/in_the_fold/2014/01/european-parliament-directive-to-spur-bim-adoption-in-28-eu-countries.html
- Autodesk. (2015b). Rebar modelling in Revit with Dynamo – use case by ABT. Consultado em Outubro 22, 2015. Disponível em <http://autodesk.typepad.com/bimtoolbox/2015/10/rebar-modelling-in-revit-with-dynamo-use-case-by-abt.html>
- Autodesk. (2015c). What is CAD/CAM? Consultado em Setembro 3, 2015. Disponível em <http://www.autodesk.com/solutions/cad-cam>
- Azhar, S. (2011). Building Information Modeling: Benefits, Risks and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11, 241-252.
- BCA. (2013a). *BIM Essential Guide for BIM Execution Plan*.
- BCA. (2013b). *Singapore BIM Guide - version 2*.

Becerik-Gerber, B., & Kensek, K. (2010). Building Information Modeling in Architecture: Emerging Research Directions and Trends. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 136(3), 139-147.

Bentley. (2012). Case Study - HydroChina Zhongnan Shortens Tuoba Hydropower Station Feasibility Design Phase by 80 Percent. Consultado em Agosto 5, 2015. Disponível em http://ftp2.bentley.com/dist/collateral/docs/case_studies/CS_HydroChina_Case_Study_s_091_2.pdf

Bhatia, S. C. (2014). Hydroelectric Power. In S. C. Bhatia (Ed.), *Advanced Renewable Energy Systems* (pp. 240-269): Woodhead Publishing Ltd

BIM Forum. (2013). *Level of Development Specification* Disponível em <http://bimforum.org/wp-content/uploads/2013/08/2013-LOD-Specification.pdf>

BPMN. (2015). Object Management Group - Business Process Model and Notation. Consultado em Junho 14, 2015. Disponível em <http://www.bpmn.org/>

Breeze, P. (2014). Hydropower. In P. Breeze (Ed.), *Power Generation Technologies* (Second ed., pp. 153-179). Oxford: Elsevier / Newnes.

British Standard. (2007). *BS 1192:2007 Collaborative production of architectural, engineering and construction information – Code of practice*. Disponível em <http://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=000000000030163398>.

Brookshier, P. (2004). Hydropower Technology. In C. J. Cleveland (Ed.), *Encyclopedia of Energy* (1 ed., pp. 333-341): Elsevier Science.

Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The Project Benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31, 971-980.

Clean Balance Power. (2012). About Pumped Storage. Consultado em Setembro 3, 2015. Disponível em <http://www.cleanbalancepower.com/about-pumped-storage.html>

Cleveland, C. J., & Morris, C. (2014). Hydropower. In C. J. Cleveland & C. Morris (Eds.), *Handbook of Energy* (1 ed., Vol. II: Chronologies, Top Ten Lists, and Word Clouds, pp. 29-47). Waltham: Elsevier Science.

Computer Integrated Construction Research Program. (2011). *BIM Project Execution Planning Guide - Version 2.1*. May, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA.

- Couto, J. P. (2010). *Técnicas de Medição e Orçamentação de Obras*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- CRC Construction Innovation. (2007). Adopting BIM for Facilities Management - Solutions for managing the Sydney Opera House. Consultado em Julho 13, 2015. Disponível em <http://www.sbenrc.com.au/wp-content/uploads/2013/10/11-AdoptingBIMforFacilitiesManagement-SolutionsforManagingtheSydneyOperaHouse.pdf>
- CSI. (2015). MasterFormat. Consultado em Agosto 7, 2015, Disponível em <http://www.csinet.org/Home-Page-Category/Formats/MasterFormat.aspx>
- Dassault Systemes. (2003). A short history of CATIA & Dassault Systemes.
- Davis, D. (2013). A History of Parametric. Consultado em Julho 10, 2015. Disponível em <http://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>
- Douro valley. (2011a). Barragem da Valeira. Consultado em Setembro 9, 2015. Disponível em <http://www.dourovalley.eu/poi?id=3605>
- Douro valley. (2011b). Barragem do Carrapateiro. Consultado em Julho 20, 2015. Disponível em <http://dourovalley.eu/poi?id=6907>
- Dynamo BIM. (2014a). DesignScript is now Dynamo. Consultado em Julho 15, 2015. Disponível em <http://dynamobim.com/designscript-is-now-dynamo/>
- Dynamo BIM. (2014b). Forum Discussions. Consultado em Julho 3, 2015. Disponível em <http://dynamobim.com/forums/forum/dyn/>
- Dynamo BIM. (2014c). Learn. Consultado em Dezembro 27, 2015. Disponível em <http://dynamobim.com/learn/>
- Dynamo Packages. (2014). Dynamo Package Manager. Consultado em Julho 4, 2015. Disponível em <http://dynamopackages.com/>
- Eastman, Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook Second Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. .
- Eastman, C., & Sacks, R. (2008). Relative productivity in the AEC industries in the United States for on-site and off-site activities. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134, 517-526.

EDP. (2009). Banco de Imagens. Consultado em Julho 10, 2015. Disponível em <https://www.edp.pt/pt/media/bancodeimagens/Pages/BancodeImagens.aspx?ImageSubCategoryTitle=Hidroel%C3%A9ctricas>

EDP. (2012). Aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. Consultado em Julho 11, 2015. Disponível em http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier_artigo/visita09112012_175525797150b3412beafd9.pdf

EDP. (2014). Venda Nova III - Fotos e Vídeos. Consultado em Agosto 17, 2015. Disponível em http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/fotos_videos.php?item_id=87&cp_type=§ion_type=fotos_videos

EDP. (2015a). Baixo Sabor Fotos e Vídeos. Consultado em Setembro 3, 2015. Disponível em http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/fotos_videos.php?item_id=1&cp_type=he§ion_type=fotos_videos

EDP. (2015b). Barragem de Fridão. Consultado em Agosto 3, 2015. Disponível em http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/empreendimento.php?item_id=81&cp_type=he

EDP. (2015c). Bemposta II Informação Técnica. Consultado em Julho 13, 2015. Disponível em http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/info_tecnica.php?item_id=83&cp_type=§ion_type=info_tecnica

EDP. (2015d). Venda Nova III - Informação Técnica. Consultado em Agosto 20, 2015. Disponível em http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/info_tecnica.php?item_id=87&cp_type=he§ion_type=info_tecnica

EDP. (2015). Picote II Informação Técnica. Consultado em Julho 13, 2015, Disponível em http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/info_tecnica.php?item_id=85&cp_type=§ion_type=info_tecnica

- Eido do Luou. (2015). Consultado em Julho 10, 2015. Disponível em <http://www.eidodoluou.com/client/files/0000000001/1394.JPG>
- Ferreira, A., Sarmiento, C., & Lima, C. (2012). *Tomada de Água do Reforço de Potência de Venda Nova III*. In Encontro Nacional Betão Estrutural - BE 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Florio, W. (2011). Modelagem Paramétrica, Criatividade e Projeto: duas experiências com estudantes de Arquitetura. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, 6, número 2, 43-66.
- Gehry Technologies. (2015). About Gehry Technologies. Consultado em Julho 15, 2015, Disponível em <http://www.gehrytechnologies.com/en/main/about/>
- Goedert, J. D., & Meadati, P. (2008). Integrating construction process documentation into Building Information Modeling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(7), 509-516.
- GrabCAD. (2012). Consultado em Julho 10, 2015. Disponível em <https://grabcad.com/library/pratt-and-whitney-turbofan-engine-pure-power-1000g>
- Grasshopper. (2015). Consultado em Julho 15, 2015. Disponível em <http://www.grasshopper3d.com/video/form-finding-experiment-gridshell-grasshopper-kangaroo>
- Gulliver, J. S., & Arndt, R. E. A. (2003). Hydroelectric Power Stations. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (3 ed., pp. 489-504). Michigan: Academic Press.
- Infrastructure, I. (2015). Model-based Design Powers China Dam Construction Consultado em Agosto 8, 2015. Disponível em <https://informedinfrastructure.com/4362/model-based-design-powers-china-dam-construction/?print=pdf>
- Intelligent BIM Solutions. (2015). Why BIM? Consultado em Julho 11, 2015. Disponível em <http://ibimsolutions.com/bim/>
- ISO. (2013). Industry Foundation Classes (IFC) for Data Sharing in the construction and facility management industries (ISO 16739:2013).
- Jeong, Y.-S., Eastman, C. M., Sacks, R., & Kaner, I. (2009). Benchmark tests for BIM data exchanges of precast concrete. *Automation in Construction*, 18, 469-484.

- Josephson, P.-E., & Hammarlund, Y. (1999). The causes and costs of defects in construction A study of seven building projects. *Automation in Construction*, 8, 681-687.
- Jr., J. M. A., Kneer, E., Mykins, D., Odeh, D. J., Ouzoonian, A. M., Rauch, A. M., & Wittry, D. (2011). *Building Information Modeling for the Engineer of Record*. In Structural Engineering Institute - Council of American Structural Engineers White Paper.
- Killingtveit, Å. (2014). Hydroelectric Power. In T. Letcher (Ed.), *Future Energy* (Second ed., pp. 453-470). New York: Elsevier Science.
- Landeskraftwerke. (2015). Turbinenarten. Consultado em Julho 11, 2015. Disponível em <http://www.landeskraftwerke.de/turbinenarten.htm>
- Leitão, R. (2015a). *Tecnologias para a Produção - Fundamentos. Princípios de Funcionamento Hídrico (Parte 1)*. Universidade interna EDP.
- Leitão, R. (2015b). *Tecnologias para a Produção - Fundamentos. Princípios de Funcionamento Hídrico (Parte 2)*. Universidade interna EDP.
- Lino, J. C., Azenha, M., & Lourenço, P. (2012). *Integração da Metodologia BIM na Engenharia de Estruturas* In Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE 2012 Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Love, P. E. D., & Edwards, D. J. (2004). Forensic project management: the underlying causes of rework in construction projects. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 00, 1-22.
- Love, P. E. D., Edwards, D. J., Han, S., & Goh, Y. M. (2011). Design error reduction: toward the effective utilization of building information modeling. *Research in Engineering Design*, 22, 173-187.
- Love, P. E. D., Edwards, D. J., Watson, H., & Davis, P. (2010). Rework in Civil Engineering Projects: Determination of Cost Predictors. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136, 275-282.
- Lumion 3D. (2015). Lumion 5 Product Information. Consultado em Setembro 9, 2015. Disponível em <http://lumion3d.com/products/>
- Macedo, J. P. (2012). *Avaliação do funcionamento e dimensionamento hidráulico de chaminés de equilíbrio em aproveitamentos hidroelétricos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

- Meliço, J. A. G. (2010). *Escolha de formas de barragens abóbada*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Microsoft. (2012). VPL Introduction. Consultado em Julho 15, 2015. Disponível em <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb483088.aspx>
- NIBS. (2012). *National BIM Standard - United States™ Version 2*
- Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2007). *Hydraulic Structures* (Fourth ed.). New York: Taylor & Francis.
- Nowacki, H. (2010). Five Decades of Computer-Aided Ship Design. *Computer-Aided Design*, 42, 956-969.
- Olhares. (2009). Central do Lindoso. Consultado em Julho 10, 2015. Disponível em http://olhares.sapo.pt/central_do_lindoso_foto3202383.html
- Omniclass. (2015). About Omniclass. Consultado em Agosto 7, 2015. Disponível em <http://www.omniclass.org/about.asp>
- Panoramio. (2011). Consultado em Julho 10, 2015. Disponível em <http://www.panoramio.com/photo/62967984>
- Pereira, R. M. S. (2013). *Sistemas de classificação na construção. Síntese comparada de métodos*. Dissertação de Mestrado Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- PGR. (2010). Consultado em Julho 10, 2015. Disponível em <http://www.palomagr.com/01-MS-Showbigness>
- PTC. (2015). PTC History and Acquisitions. Consultado em Julho 10, 2015, Disponível em <http://www.ptc.com/about/history>
- Ramos, H., & Almeida, A. B. d. (2000). General Types of Small Hydropower Schemes. In H. Ramos (Ed.), *Guidelines for Design of Small Hydropower Plants* (pp. 9-15). Belfast: WREAN & DED.
- Rehman, S., Al-Hadhrami, L. M., & Alam, M. M. (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 586-598.
- Renewable Technology. (2015). Projects. Consultado em Setembro 11, 2015. Disponível em <http://www.renewable-technology.com/projects/canedo-hydropower-plant-portugal/canedo-hydropower-plant-portugal6.html>

- Reuters. (2014). BIMobject AB: The European Parliament recommends BIM-technology. Consultado em Agosto 11, 2015. Disponível em <http://www.reuters.com/article/2014/01/17/idUSnHUGdtb9+70+ONE20140117>
- Rhocan. (2015). CNC Machining. Consultado em Setembro 3, 2015. Disponível em <http://www.rhocan.com/cnc-machining/>
- Ribeiro, C. A. N. (2013). *Desenvolvimento de processos CAD/CAM para a pormenorização e produção industrial de armaduras para elementos de betão armado* Dissertação de Mestrado Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Shepherd, P. (2011). Aviva Stadium - Use of Parametric Modelling in Structural Design. *The Structural Engineer*, 89(3), 28-34.
- Silva, J. C. B., & Amorim, S. R. L. d. (2011). *A contribuição dos sistemas de classificação para a tecnologia BIM - uma abordagem teórica*. In V TIC, Salvador, Bahia, Brasil.
- Silva, J. M. S. (2013). *Princípios para o desenvolvimento de projetos com recurso a ferramentas BIM*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Smith, P. (2014). BIM implementation - global strategies. *Procedia Engineering*, 85, 482-492.
- Solibri. (2015). About BIM and IFC. Consultado em Julho 17, 2015. Disponível em <http://www.solibri.com/support/bim-ifc/>
- Structure magazine. (2013). Beating Chaos and Achieving Profits in BIM with LOD 350. Consultado em Julho 11, 2015. Disponível em <http://www.structuremag.org/?p=558>
- SWCPPPhysics30. (2012). Mechanism of Hydroelectric Power. Consultado em Setembro 3, 2015. Disponível em <https://swcphysics30.wordpress.com/2012/06/09/mechanism-of-hydroelectric-power/>
- Tekla. (2014). Tekla Acquires Field3D Business from SVS Innovations. Consultado em Outubro 14, 2015. Disponível em <http://www.tekla.com/us/company/news/tekla-acquires-field3d-business-svs-innovations>
- Tekla BIMsight. (2013). Improve the way you work today Consultado em Setembro 3, 2015. Disponível em <http://www.teklabimsight.com/>
- The Dynamo Primer. (2015a). Dynamo. Consultado em Outubro 20, 2015. Disponível em <http://dynamoprimer.com/>

The Dynamo Primer. (2015b). What is Dynamo? Consultado em Outubro 20, 2015. Disponível em http://dynamoprimer.com/01_Introduction/1-2_what_is_dynamo.html

Tomek, A., & Matějka, P. (2014). The impact of BIM on risk management as an argument for its implementation in a construction company. *Procedia Engineering*, 85, 501-509.

Turrin, M., Buelow, P. v., & Stouffs, R. (2011). Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 25, 656-675.

Ultra Consultants. (2015). A Business Process Map and ERP: The Best Way to Get There. Consultado em Setembro 9, 2015. Disponível em <http://www.ultraconsultants.com/business-process-map/>

Venugopal, M., Eastman, C. M., Sacks, R., & Teizer, J. (2012). Semantics of model views for information exchanges using the industry foundation class schema. *Advanced Engineering Informatics*, 26, 411-428.

ANEXOS

ANEXO 1 – EXPLICAÇÃO DETALHADA DE ALGORITMOS DE MODELAÇÃO

Espiral

Nas Figura A1.1 Figura A1.3 apresentam-se algumas informações relevantes sobre a espiral, nomeadamente o seu desenho 3D (Figura A1.1), a sua vista em planta (Figura A1.2) e a secção transversal tipo (Figura A1.3).

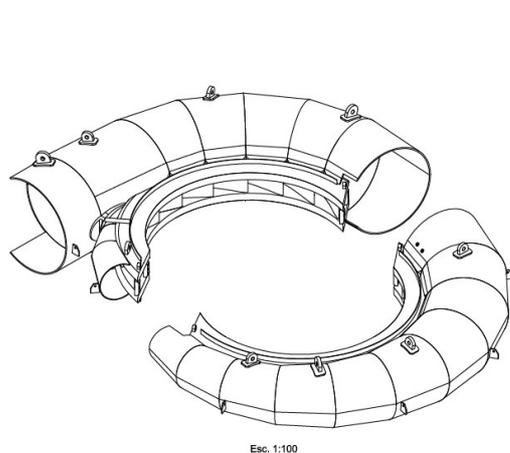


Figura A1.1 - Desenho tridimensional da espiral.

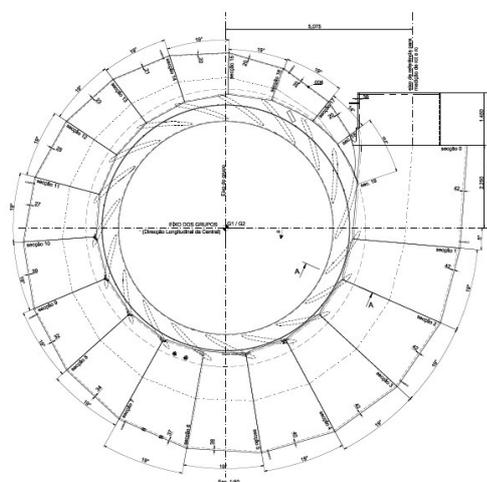


Figura A1.2 - Vista em planta da espiral.

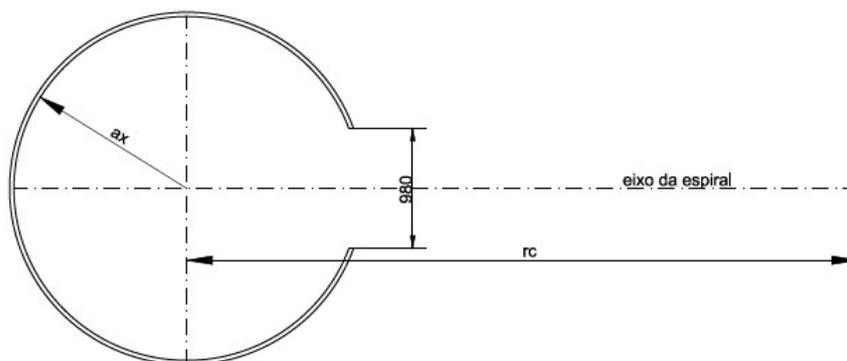


Figura A1.3 - Secção tipo da espiral.

Relativamente à espiral há quatro parâmetros essenciais a considerar na modelação, identificados na Figura A1.3 e Figura A1.4:

- Ângulo, segundo o plano XY (Ver Figura A1.4), entre o eixo dos grupos e o centro de cada secção da espiral - α ;
- Distância entre o eixo dos grupos e o centro de cada secção – rc (ver Figura A1.3 e Figura A1.4);
- Raio da secção interior – ax (ver Figura A1.3);
- **Espessura** do equipamento em cada secção.

O eixo dos grupos, também apresentado na Figura A1.4, foi escolhido como a origem para a modelação da espiral.

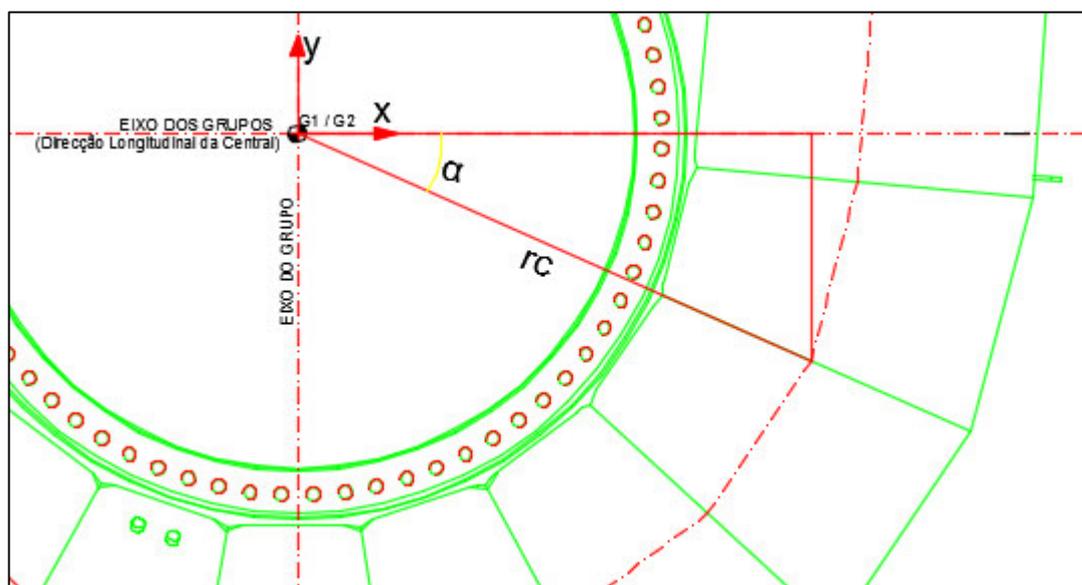


Figura A1.4 - Definição dos pontos centrais de cada secção.

O primeiro passo consistiu na definição do ponto central de cada secção, que seria obtido a partir dos parâmetros α e rc .

As coordenadas do centro de cada secção são então obtidas por relações trigonométricas e dadas por:

$$x = \cos \alpha \times rc \quad (A1.1)$$

$$y = - \sin \alpha \times rc \quad (A1.2)$$

O algoritmo *Dynamo* que define o ponto central de cada secção é apresentado na Figura A1.5.

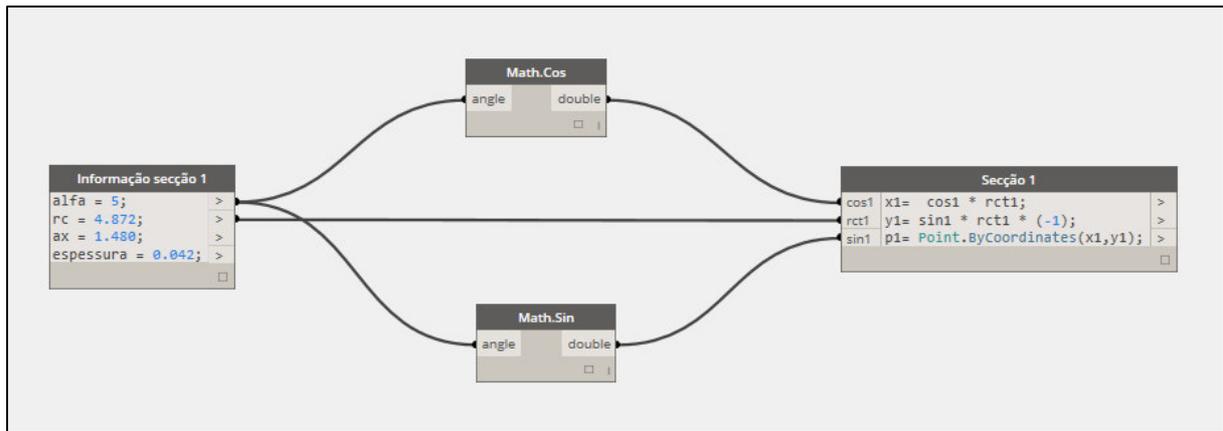


Figura A1.5 - Definição dos pontos centrais das secções.

Note-se que, para realização de algumas tarefas, podem-se utilizar os nós predefinidos do programa ou programar manualmente num nó personalizado. Um nó personalizado é um nó, inicialmente vazio, e que o utilizador pode programar livremente. A título exemplificativo, na Figura A1.5, é apresentado um nó personalizado “Informação secção 1” que contém os parâmetros relativos à primeira secção.

Obtidos os pontos centrais, procedeu-se à definição de cada secção. Cada secção é composta por uma circunferência aberta (ver Figura A1.6), sendo a abertura constante em todas as secções. O *Dynamo* disponibiliza na biblioteca diferentes nós que permitem a modelação de arcos, tendo-se neste caso optado por modelar as secções a partir de cinco *inputs*: centro, raio, ângulo de início, ângulo de fim e a normal ao arco.

O raio é dado pela soma dos parâmetros *ax* e espessura do equipamento (visto pretender-se modelar a envolvente deste e o parâmetro *ax* traduzir o raio interior), o centro foi anteriormente definido e o arco deve ser paralelo ao vetor dado por dois pontos: a origem e o centro de cada secção. Visto isto, resta então definir os ângulos de início e fim do arco.

O ângulo de início (β) e ângulo de fim são, então, dados por:

$$\beta = \arcsin \frac{980/2}{ax} \quad (A1.3)$$

$$\text{ângulo fim} = 360 - \beta \quad (A1.3)$$

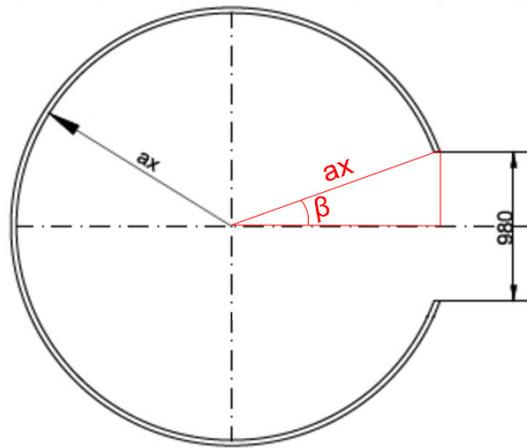


Figura A1.6 - Definição do ângulo de início da secção da espiral

O ângulo de início (β) e ângulo de fim são, então, dados por:

$$\beta = \text{arc sin} \frac{980/2}{ax} \quad (A1.4)$$

$$\hat{\text{ângulo fim}} = 360 - \beta \quad (A1.5)$$

Assim, estão definidas todas as manipulações dos parâmetros que levam à definição de cada secção da espiral. O algoritmo no *Dynamo* que apresenta estas operações é apresentado na Figura A1.7.

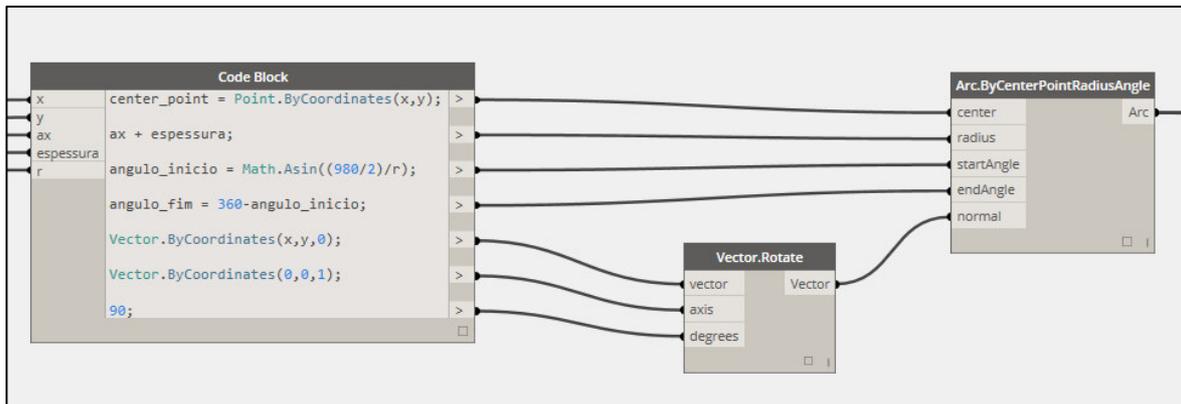


Figura A1.7 - Definição da secção da espiral.

Com estas operações obtém-se a circunferência aberta de cada secção, representadas, em ambiente *Dynamo* na Figura A1.8.

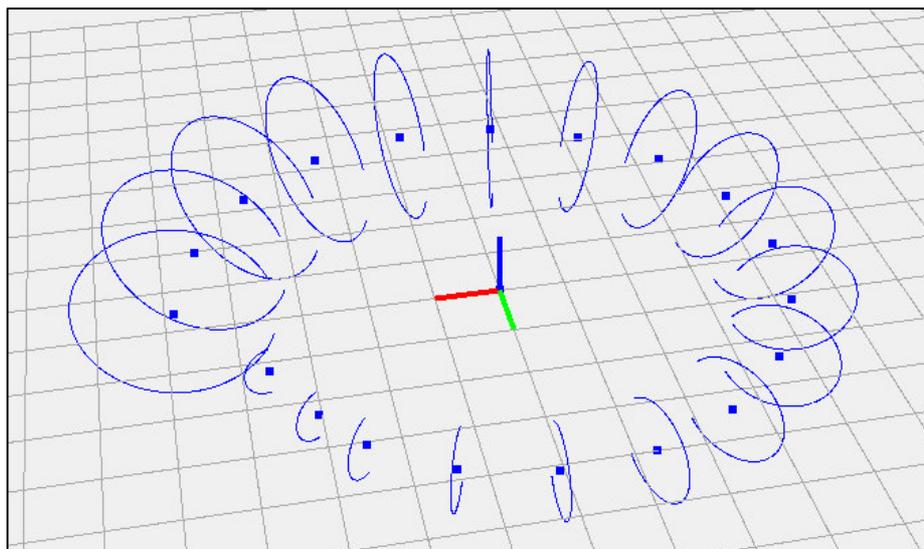


Figura A1.8 - Diferentes secções em ambiente *Dynamo*.

Nota apenas para a definição do vetor normal à secção da espiral, que é dada pela rotação de 90° em torno do eixo dos zz (através do nó “*Vector.Rotate*”) do vetor dado pelas coordenadas do ponto central dessa mesma secção. Com estas operações obtém-se a circunferência aberta de cada secção, no entanto, e visto pretender-se realizar um *Loft* (processo geométrico que permite a definição de superfícies/sólidos a partir de uma sequência de secções) é necessário as secções serem constituídas por curvas fechadas. Assim, optou-se por unir, através de uma reta, o ponto inicial e final da secção. Para determinar o ponto inicial e final de uma curva, o *Dynamo* disponibiliza o nó “*Curve.PointAtParameter*” que, dado um valor entre 0 e 1, devolve o ponto correspondente de uma curva (sendo que o 0 corresponde ao ponto inicial e o 1 ao ponto final). Estes pontos são depois unidos através de uma linha, através do nó “*Line.ByStartPointEndPoint*” e esta linha é unida à restante secção, recorrendo ao nó “*Curve.Join*” – Ver Figura A1.9.

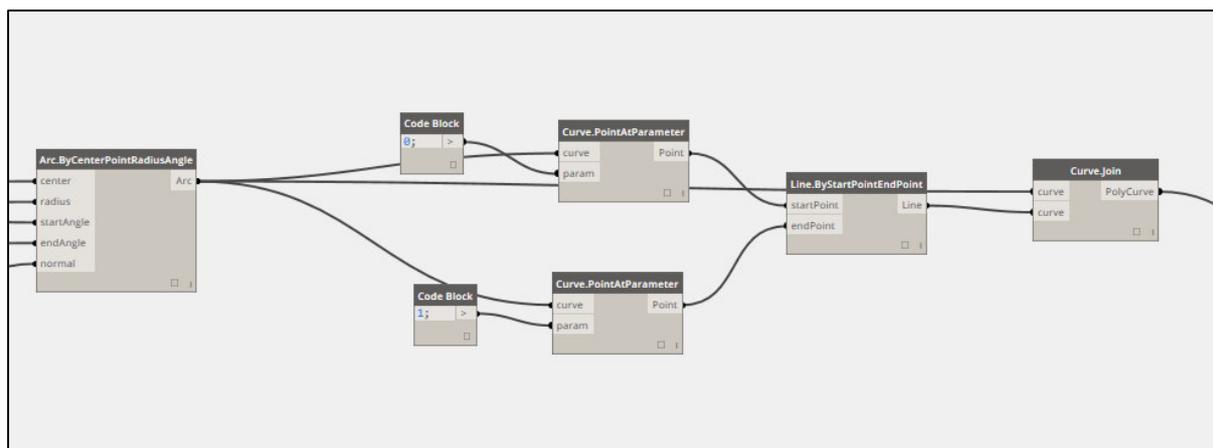


Figura A1.9 – Definição dos pontos de início e fim, criação da linha entre eles e união à secção.

O processo é, então, repetido para as restantes secções, com atualização dos respetivos parâmetros. O resultado é apresentado na Figura A1.10.

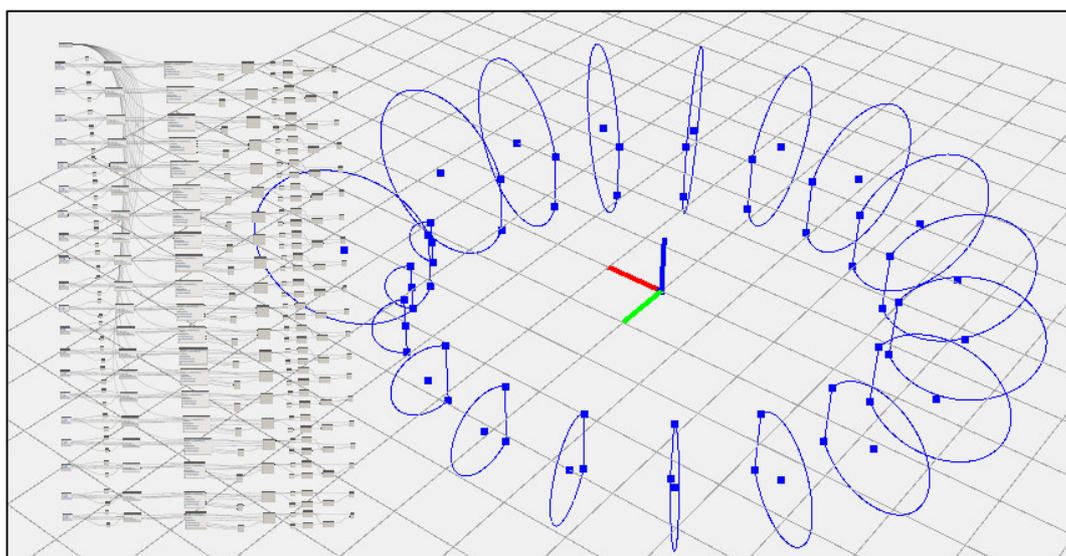


Figura A1.10 - Diferentes secções da espiral.

Realizando-se um *Loft* (nó “*Solid.ByLoft*”) entre todas as secções, obtém-se o sólido que caracteriza a espiral. Optou-se, também, por realizar outra operação *Loft* mas para se obter uma superfície (dando, posteriormente, a espessura do equipamento a esta superfície), de forma a obter uma representação mais realista da espiral (nós “*Surface.ByLoft*” e “*Surface.Thicken*”). Note-se que, após realizadas as operações geométricas *Loft* entre todas as secções (entre as secções 1 e 2, 2 e 3, 3 e 4 e assim sucessivamente), optou-se por unir todos os sólidos obtidos através do nó “*Solid.Union*”. No entanto, e visto que este nó tem apenas dois *inputs*, recorreu-

se também ao nó “List.Create” que permite reunir diferentes elementos, agrupando as diferentes secções, e permitindo, então, a união de todos os sólidos – VER Figura A1.11.

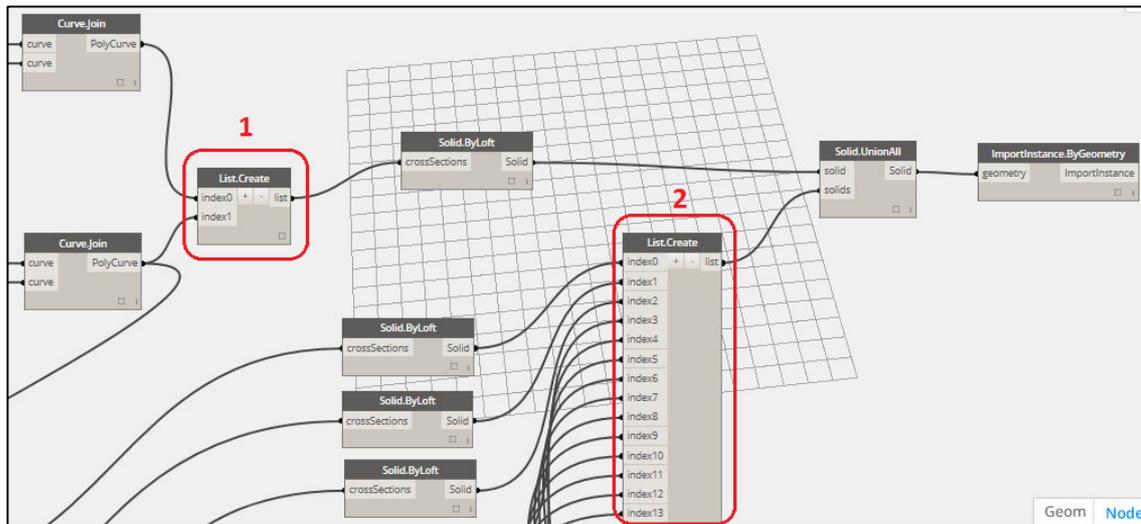


Figura A1.11 - Nó "List.Create" - em (1) para agrupar duas secções e permitir a realização do Loft e em (2) para agrupar todos os sólidos e, posteriormente, permitir a sua união.

Abertura 2 do bocal da tomada de água

A abertura 2 é definida por diferentes segmentos, de diferentes características. Analisando de jusante para montante identifica-se um segmento curvilíneo seguido de três segmentos retilíneos - Figura A1.12. O segmento curvilíneo é definido a partir de cinco parâmetros: o **raio** de curvatura, os **ângulos de início e fim**, e **duas distâncias** (que definem a localização relativamente à origem): **I1**, que corresponde à distância entre o centro do arco que define o troço curvilíneo e o eixo dos xx , e **I2**, que corresponde à distância entre o eixo dos zz e o início (a jusante) do segmento curvilíneo. Já os segmentos retilíneos podem ser definidos a partir de dois parâmetros: o **ângulo**, relativamente ao eixo dos zz , e a **extensão** do respetivo segmento.

De forma a facilitar a compreensão e/ou manipulação do algoritmo os segmentos anteriormente referidos são designados de segmentos 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4, correspondendo o 2.1 ao segmento curvilíneo (Figura A1.12).

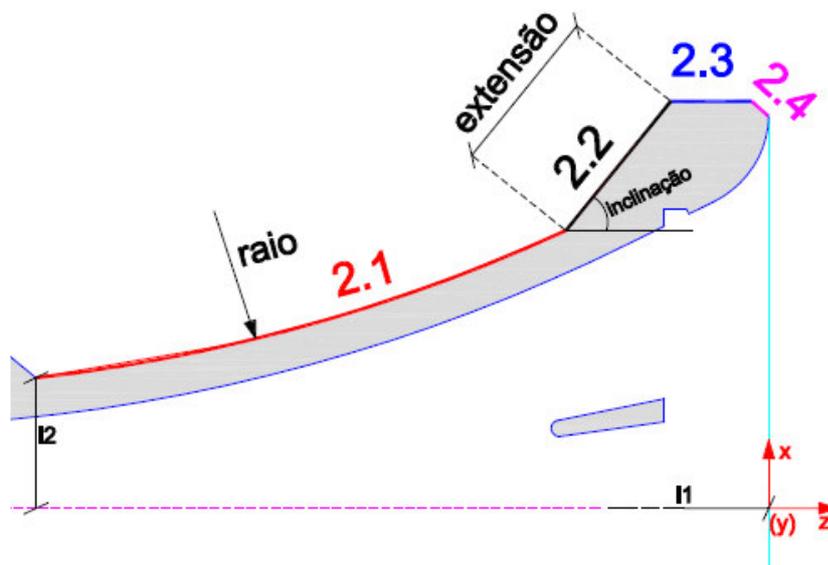


Figura A1.12- Apresentação detalhada da abertura 2, com identificação de alguns parâmetros.

O segmento 2.1 pode ser modelado a partir do nó “*Arc.ByCenterPointRadiusAngle*”. Este nó, já utilizado anteriormente, permite a criação da semicircunferência e tem como *inputs* o centro e raio da semicircunferência, os ângulos de início e fim e a normal à semicircunferência. Relativamente ao centro, as coordenadas relativamente aos eixos de *xx* e *zz* são dadas por:

$$x = raio + l2 \tag{A1.6}$$

$$z = - l1 \tag{A1.7}$$

O segmento 2.1, correspondente a um arco, pode ser modelado a partir de cinco *inputs*: o centro e raio do arco, os ângulos de início e fim e a normal ao arco. Relativamente ao centro, as coordenadas relativamente aos eixos de *xx* e *zz* são dadas por:

$$x = raio + l2 \tag{A1.8}$$

$$z = - l1 \tag{A1.9}$$

A coordenada correspondente ao eixo dos *yy* pode ser arbitrada, sendo o importante, visto pretender-se realizar a subtração do volume, que este sólido “cubra” a geometria do prisma. Visto isto, adotou-se um valor elevado, sendo:

$$y = -15 \tag{A1.10}$$

O raio e os ângulos são dados fornecidos pelo utilizador, ao passo que a normal é dada pelo vetor do eixo dos yy . Uma vez gerada a semicircunferência, esta é copiada 30 metros em relação ao eixo dos yy , para o plano $y = 15$, optando-se por este valor para manter conformidade com o valor definido anteriormente. Esta operação, conseguida através do nó “*Geometry.Translate*”, tem como objetivo a criação de uma superfície entre as duas curvas, que por sua vez é conseguida com a realização de um *Loft* entre estas (nó “*Surface.ByLoft*”). O algoritmo *Dynamo* que define as operações que levam à criação desta superfície é apresentado na Figura A1.13.

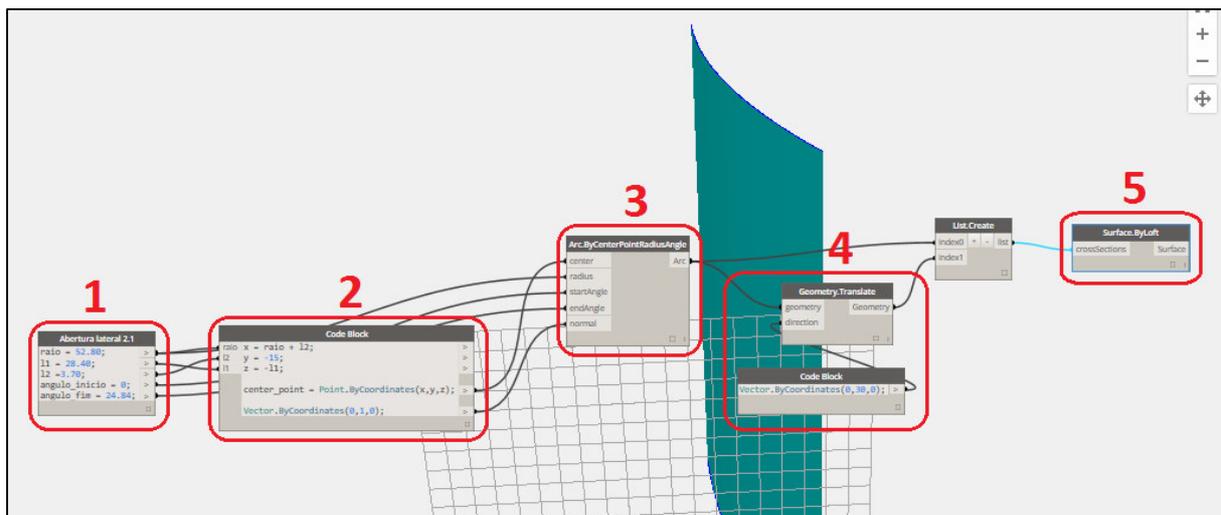


Figura A1.13 - Algoritmo *Dynamo* que leva à criação da superfície que define o vazio 2.1.

Assim, e tendo em conta a Figura A1.13, em **1** são definidos os parâmetros pelo utilizador, em **2** são realizadas as manipulações geométricas para definição do centro da semicircunferência e programado o vetor normal a esta. A semicircunferência é criada em **3**, sendo copiada em **4** e, finalmente, o *Loft* entre as duas semicircunferências é realizado em **5**.

Relativamente ao segmento 2.2, este pode ser definido por uma reta, que por sua vez é definida por dois pontos. O primeiro ponto corresponde ao final do segmento 2.1 (doravante designado de ponto A), sendo o segundo (doravante designado de ponto B) determinado em função deste, dependendo dos parâmetros (extensão e inclinação) do segmento. Assim, as coordenadas do ponto B são obtidas partindo das coordenadas do ponto A através de relações trigonométricas. O ponto B é, então, dado por:

$$x(B) = x(A) + \text{extensão} \times \sin(\text{inclinação}) \quad (A1.11)$$

$$z(B) = z(A) + \text{extensão} \times \cos(\text{inclinação}) \tag{A1.12}$$

Mais uma vez, e mantendo a coerência de acordo com o segmento anterior, no ponto B também se optou por definir a coordenada do eixo dos yy igual a -15. Com os dois pontos definidos é, então, possível criar a reta entre os pontos A e B, que definem o segmento 2.2. Analogamente ao segmento anterior, também esta reta é copiada 30 metros na direção do eixo dos yy com o objetivo de gerar uma superfície. O algoritmo que define as operações anteriormente descritas é apresentado na Figura A1.14.

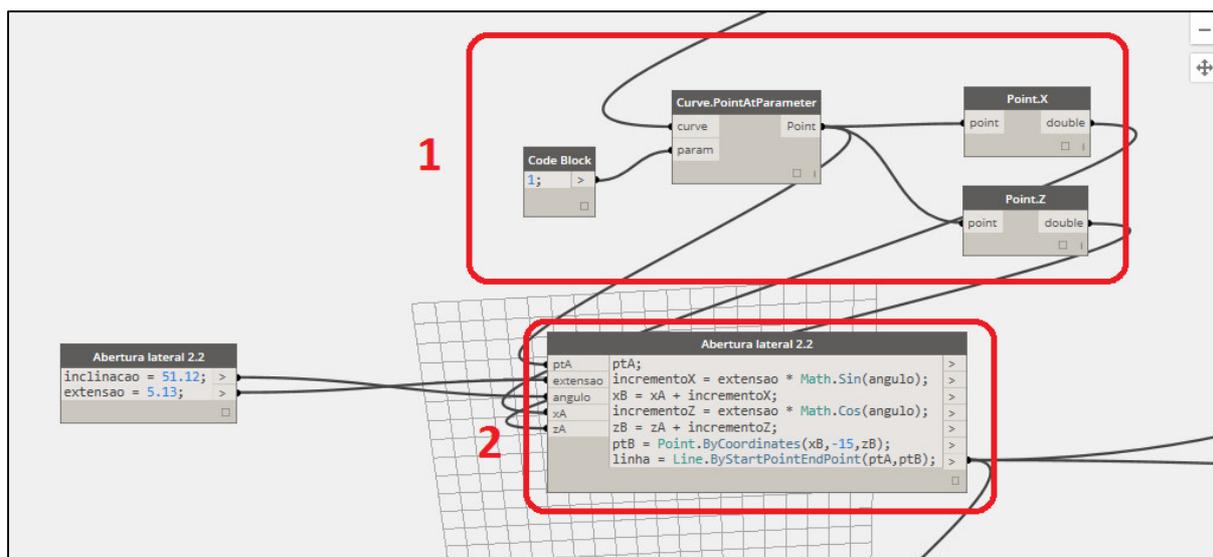


Figura A1.14 - Algoritmo que define a reta do segmento 2.2.

Repare-se que em **1** é extraído o ponto final da semicircunferência correspondente ao segmento anterior, através do nó “Curve.PointAtParameter”, associando-se a este nó o nó do arco do segmento 2.1 e o parâmetro 1 (relembrando a funcionalidade deste nó, se se pretendesse obter o ponto inicial, o parâmetro associado seria o 0). Também em **1**, e após obtido o ponto final do segmento 2.1, são utilizados os nós “Point.X” e “Point.Z” que permitem obter as coordenadas xx e zz, respetivamente, do ponto supracitado. Seguidamente, procede-se para a definição do segmento 2.2, apresentado na figura em **2**. Definido o segmento, e tal como no anterior, este é copiado em 30 metros segundo o eixo dos yy e criada uma superfície entre as duas retas.

Este ciclo, que se caracteriza por partir do ponto final do segmento anterior e que permite, tendo em conta o valor dos parâmetros, definir o novo segmento e criar uma superfície, é repetido para 2.3 e 2.4. No final deste processo, obtêm-se quatro superfícies que são depois unidas. Estas superfícies são depois convertidas num sólido, através da atribuição de espessura. O valor da espessura foi definido como sendo 10 metros, mais uma vez de forma a garantir que este volume

“cobrir” o volume do prisma retangular cujo volume vai ser subtraído desta abertura. Na Figura A1.15 está representado o algoritmo e o sólido correspondente ao vazio 2.

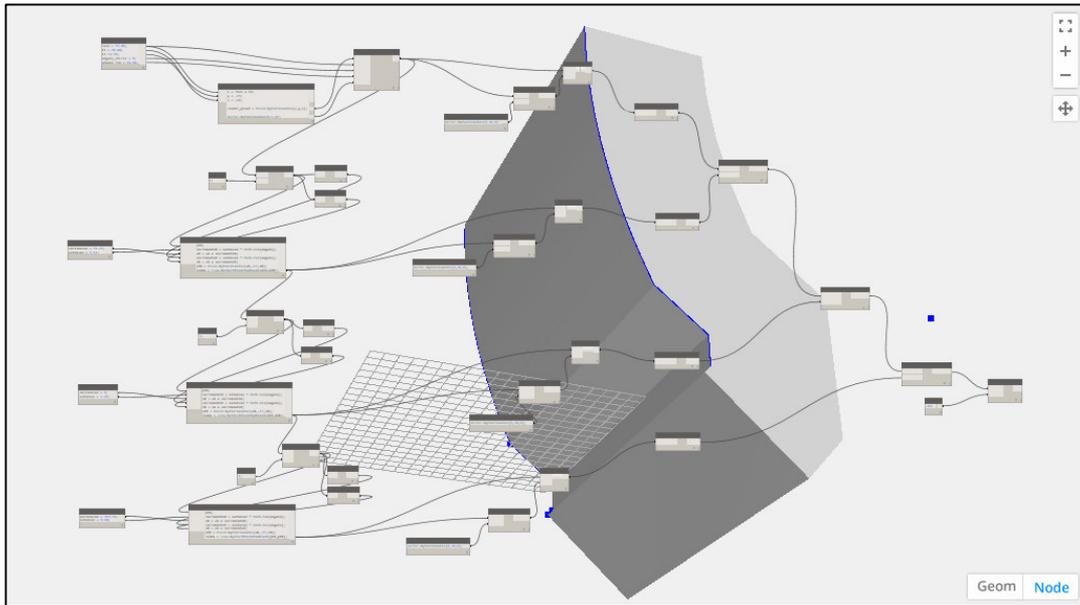


Figura A1.15 - Algoritmo e sólido que definem o vazio 2.

Os restantes vazios exteriores (1,3 e 4) seguem, tal como referido anteriormente, processos de modelação semelhantes. O resultado da subtração dos vazios exteriores ao prisma é apresentado na Figura A1.16.

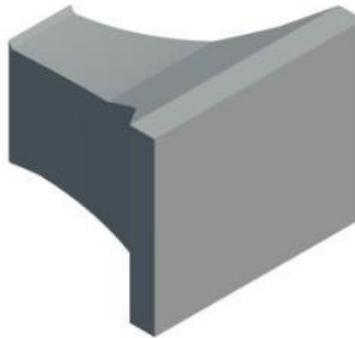


Figura A1.16- Sólido em Revit resultante da subtração dos vazios exteriores.

ANEXO 2 – DESENHOS OBTIDOS A PARTIR DO MODELO BIM

ANEXO 3 – PROPOSTA DE PLANO DE EXECUÇÃO BIM



Proposta de Plano de Execução BIM

Departamento de Fundações e Estruturas da Direção de Engenharia de
Barragens da EDP

Índice Geral

Introdução.....	1
Objetivos e Usos BIM	3
Membros de Equipa e Responsabilidades	9
3.1 BIM <i>manager</i>	9
3.2 Gestor de projeto	10
3.3 Engenheiro (modelador nível 1)	10
3.4 Desenhador (modelador nível 2)	11
Mapeamento de processos.....	13
Trocas de informação	15
Estrutura de pastas e nomenclatura	21
Estrutura de pastas	21
Nomenclatura dos ficheiros	23
Bibliografia.....	25
Anexos.....	27
Anexo 1- Mapa de processos.....	29
Anexo 2- Controlo de qualidade de modelos	33
Anexo 3- Documento de especificações LOD	35
Anexo 4- Auxiliar de modelação.....	41

INTRODUÇÃO

O presente documento serve de apoio à implementação de metodologias BIM na empresa. Antes de cada projeto, é boa prática a elaboração de um plano de execução onde são definidos elementos essenciais, promovendo uma maior organização do trabalho e melhor integração da equipa de projeto, estando esta melhor informada das suas funções, processos e objetivos.

Assim, ao longo deste documento, vão sendo definidos elementos do plano de execução padrão para os diferentes projetos, tal como a definição de objetivos BIM, de usos BIM (onde é, também, sugerida uma metodologia para a sua seleção), são apresentadas novas funções que aparecem com o BIM e atribuídos os seus responsáveis, são mapeados processos para garantir os *deliverables*, são discutidos os formatos em que a informação deve ser trocada e são, ainda, discutidos aspetos organizacionais. O documento está, também, provido com um auxiliar de modelação, uma proposta para controlo de qualidade de modelos e com um documento de especificação LOD. Estes aspetos devem ser aproveitados no futuro embora, e tendo como particularidade o facto de se tratarem de obras especiais, possam ser adaptados e/ou alterados em função das necessidades específicas da obra em questão. Este trata-se, então, de um documento aberto, podendo ser alterado em virtude da experiência que vai sendo adquirida ao longo da sua aplicação em diferentes projetos, sofrendo um processo de otimização constante.

O plano de execução apresentado, dadas as especificidades do departamento e empresa a que se destina, corresponde a uma versão adaptada de planos gerais, com simplificação no número de itens abordados, pois trata-se de uma tipologia de trabalho de gabinete de projeto e dono de obra, o que não requer todas as partes de um BEP (*BIM Execution Plan*) completo. A consulta de bibliografia de referência, tal como *AEC (UK) BIM Protocol*, *BS 1192:2007*, *Singapore BIM Guide*, *BIM Essential Guide For BIM Execution Plan*, *BIM Project Execution Planning Guide*, *BIM Planning Guide for Facility Owners*, *COBIM (Common BIM Requirements)* e ainda algumas dissertações sob a temática de BIM foi fundamental para a elaboração deste documento.

OBJETIVOS E USOS BIM

No início de cada projeto em que se pretende implementar metodologias BIM, é de extrema importância perceber e definir o porquê dessa implementação, ou seja, o que a empresa pretende ganhar em relação à abordagem tradicional. Assim, os objetivos dessa implementação podem ser vários, por exemplo:

- Redução do custo de projeto;
- Redução do tempo de projeto;
- Melhoria da qualidade do projeto final;
- Aumento da eficiência na produção de documentação;
- Aumento da produtividade da equipa em obra;
- Redução de custos associados a alterações/erros de projeto;
- Melhoria no processo de cruzamento entre especialidades.

O início deve, então, ter sempre presente a finalidade, pois é essencial que os membros do projeto percebam qual o futuro uso e importância da informação que estão a desenvolver. Depois de definidos os objetivos da implementação de metodologias BIM no projeto, é importante perceber quais os processos e *deliverables* que levam a que esses mesmos objetivos sejam cumpridos. Surge então o conceito de uso BIM, que constitui uma tarefa ou procedimento que um projeto pode beneficiar devido à utilização de metodologias BIM e que tem como função garantir que determinado objetivo BIM definido anteriormente é alcançado. Para melhor percepção desta relação é apresentado na Figura 1 - Relação entre objetivos e usos BIM. um exemplo da definição de usos BIM em função dos objetivos.

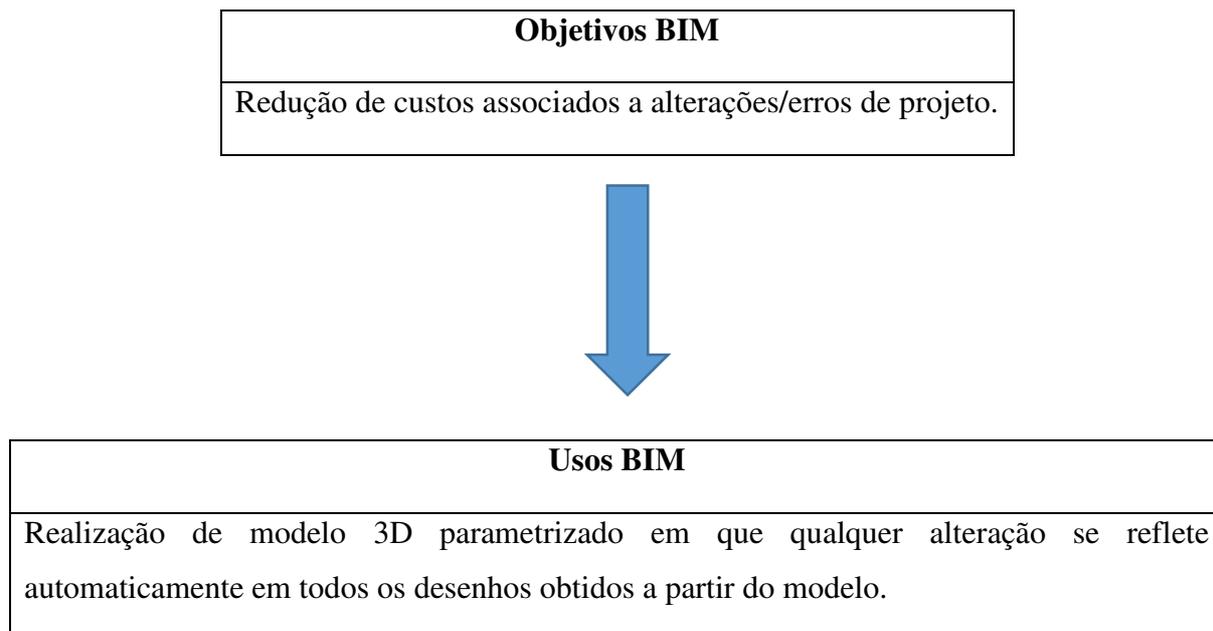


Figura 1 - Relação entre objetivos e usos BIM.

Para auxiliar a equipe de projeto na definição dos usos BIM foi desenvolvida a Tabela 1, adaptada a partir do documento *BIM Project Execution Planning Guide*.

Tabela 1 - Definição dos usos BIM.

Uso BIM	Potencial para o Projeto	Responsável	Capacidade			Recursos / Competências Adicionais	Notas	Decisão
	Alto / Médio / Baixo		Escala 1-3; 1= Baixo					Sim / Não
			Recursos	Competência	Experiência			

O preenchimento da tabela segue a seguinte sequência de instruções:

1) Preveem-se os seguintes usos para cada projeto:

- Produção de desenhos de execução;
- Produção de mapas de quantidades;
- Produção de modelos de armaduras (opcional);
- Produção de vídeos/*renders*;
- a) Análise estrutural a partir do modelo.

A tabela pode ser expandida no caso de serem identificados usos além dos enunciados.

2) Avaliar do potencial para o projeto que cada utilização tem, numa escala de Alto/Médio/Baixo. Um uso essencial para o projeto deverá ser avaliado com potencial alto,

já um uso desejável mas não fundamental deverá ser avaliado com potencial médio e, por último, um uso de interesse residual deverá ser avaliado com potencial baixo;

- 3) Identificar as partes responsáveis para cada uso, pelo BIM *manager*. Este deverá identificar o responsável pelo nome definido no organograma da empresa;
- 4) Avaliar as capacidades, numa escala de 1 a 3 de cada responsável e da empresa a nível de:
 - a) Recursos - Este campo diz respeito à capacidade da empresa a nível de *software* e formação. O nível 1 indica que a empresa não tem disponível o *software* e necessita de formação, o nível 2 indica que a empresa tem disponível o *software* necessário mas requer formação ou não tem disponível o *software* mas não requer formação e, por último, o nível 3 indica que a empresa não tem qualquer necessidade a nível de *software* e formação;
 - b) Competência – avalia o *know-how* do responsável. A avaliação da competência do responsável será realizada por estimativa do próprio e por heteroavaliação dos colegas;
 - c) Experiência – avalia a experiência do responsável na realização da tarefa em questão. O nível 1 indica que o responsável nunca realizou a tarefa em questão, o nível 2 indica que o responsável realizou a tarefa entre 1 a 5 vezes e o nível 3 indica que o responsável realizou a tarefa em mais do que 5 ocasiões.
- 5) Indicar eventual necessidade extra a nível de recursos ou reforço de competências dos responsáveis;
- 6) A equipa deve ainda considerar valores ou riscos adicionais associados a cada uso. Tais observações serão incorporadas no campo “notas”;
- 7) No final, e ponderadas todas as informações anteriormente consideradas, a equipa deve então tomar uma decisão final se avança, ou não, para a realização do uso BIM.

Na Tabela 2 é apresentado um exemplo de preenchimento da tabela de usos BIM.

Tabela 2 - Exemplo de preenchimento de tabela de usos BIM.

Uso BIM	Potencial para o Projeto	Responsável	Capacidade			Recursos / Competências Adicionais	Notas	Decisão
	Alto / Médio / Baixo		Escala 1-3; 1= Baixo					Sim / Não
			Recursos	Competência	Experiência			
Extração de Quantidades	Alto	Engenheiro 1	3	2	1	Requer treino na última versão de <i>software</i>	Elevado potencial de redução de custo de projeto	Sim

Depois de definidos todos os usos BIM que a empresa vai implementar no projeto em questão, é da responsabilidade do BIM *manager* a definição de ações de formação e aquisições necessárias a nível de *software* e *hardware*.

A tabela de usos fornecida (Tabela 3) tem já definidos os usos BIM padrão para o departamento, sendo que os restantes campos deverão ser preenchidos em função das condições da empresa a nível de recursos humanos e tecnológicos no momento da elaboração do projeto.

Tabela 3 - Tabela de usos BIM.

Uso BIM	Potencial para o Projeto	Responsável	Capacidade			Recursos / Competências Adicionais	Notas	Decisão
	Alto / Médio / Baixo		Escala 1-3; 1= Baixo					Sim / Não
			Recursos	Competência	Experiência			
Produção de desenhos de execução								
Produção de mapas de quantidades								
Produção de modelo de armaduras								
Produção de vídeos/renders do modelo								
Análise Estrutural a partir do modelo								

MEMBROS DE EQUIPA E RESPONSABILIDADES

No presente capítulo definem-se as responsabilidades dos intervenientes diretos no processo BIM. Visto que na prática se trata de aplicação num departamento maioritariamente dedicado ao ramo das estruturas, optou-se por não adotar matrizes de responsabilidade complexas mas sim a atribuição de tarefas elementares a membros de projeto essenciais. Assim, com a adoção de metodologias BIM surgem novas responsabilidades e, conseqüentemente, novos cargos. São, então, distinguidas quatro funções: o BIM *manager*, que também desempenha funções de projeto e tem responsabilidades sobre todos os projetos em que são adotadas metodologias BIM, o gestor de projeto, que pode ser encarado como um BIM *manager* particular para cada projeto, o engenheiro, que desempenhará funções de modelação (modelador de nível 1) e o desenhador, que apoiará o engenheiro na produção de modelos (modelador de nível 2). Enquanto os dois primeiros cargos terão funções focadas em gestão de recursos humanos e processos, os dois últimos serão mais responsáveis pela produção de *deliverables*. Estas responsabilidades/tarefas são incrementadas às responsabilidades padrão que os colaboradores da empresa tinham antes da adoção de metodologias BIM. As genéricas tarefas supracitadas são de seguida enumeradas:

BIM manager

- Definição, em conjunto com gestor de projeto, dos usos BIM e respetivos *deliverables*;
- Atribuição de responsabilidades a modeladores;
- Gestão do *template* do *software Revit*;
- Gestão do fórum interno;
- Atualização/alteração dos procedimentos de controlo de qualidade;
- Definição de ações de formação de forma a garantir que os *deliverables* são produzidos;
- Gestão da pasta comum “Recursos”;
- Aprovação final do modelo BIM.

Gestor de projeto

- Definição LOD dos modelos para as diferentes fases de projeto de acordo com os objetivos e utilizações BIM;
- Divisão do projeto por partes de modelação;
- Seleção e distribuição de dados de projeto pelos diferentes modeladores;
- Controlo de prazos de modelação;
- Modelação BIM de uma parte do projeto se compatível com as funções acumuladas de gestão;
- Reestruturação, sempre que necessário, das equipas de modelação ao longo do projeto;
- Garantia de trocas de informação precisas entre modeladores e eventuais junções de modelos;
- Gestão de ficheiros centrais e *timing* de sincronizações, a nível de *Worksets*;
- Gestão do sistema de pastas (a nível de conteúdo e permissões) do projeto pelo qual é responsável;
- Definição de modelos que devem ser transferidos para a *warehouse* comum e posterior comunicação ao BIM *manager*;
- Validação de modelos, em conjunto com engenheiros responsáveis pela modelação.

Engenheiro (modelador nível 1)

- Modelação de parte/componente de projeto, nomeadamente partes mais complexas em que é necessário recorrer ao *Dynamo*;
- Garantia que modelos por ele produzidos estão de acordo com guias de modelação e LOD's definidos pelo BIM *manager*;
- Sugestão de alterações a documentos como *template* e guia de boas práticas ao BIM *manager*, se achar conveniente;
- Delegação de tarefas ao modelador nível 2;
- Controlo de qualidade de modelos;
- Análise estrutural de modelos.

Desenhador (modelador nível 2)

- Auxiliar modelador nível 1 na modelação;
- Garantir que modelos por ele produzidos estão de acordo com guias de modelação e LOD's definidos pelo BIM *manager*;
- Produção de *deliverables*, tais como desenhos de execução, mapas de quantidades, vídeos, entre outros.

MAPEAMENTO DE PROCESSOS

É necessário, para os intervenientes no projeto, perceber o processo de implementação para cada uso BIM e para o projeto como um todo. Na bibliografia referida no início do documento é recomendada a elaboração de diferentes mapas de processos, distinguindo-se estes em mapas de processo de nível 1 (geral) e mapas de processo de nível 2 (detalhado). Inicialmente era elaborado o mapa global, inserindo os usos BIM ordenados de forma cronológica e identificando as trocas de informação entre os diferentes intervenientes sendo, posteriormente, definidos os mapas de processo para esses mesmos usos, denominados mapas detalhados. No entanto, e para o departamento onde se pretende implementar metodologias BIM, entendeu-se desnecessária a criação de dois níveis de mapas de processos, devido ao reduzido número de usos BIM (departamento, tal como referido anteriormente, dedicado predominantemente a estruturas). Assim, definiram-se como padrão os seguintes usos:

- Produção de modelos BIM;
- Análise estrutural a partir do modelo;
- Produção de modelos de armaduras (opcional);
- Produção de desenhos de execução;
- Produção de mapas de quantidades;
- Produção de vídeos/*renders* do modelo (opcional).

Nos processos foi introduzido um fórum denominado “fórum interno”. Esta plataforma informática pretende facilitar a elaboração de *deliverables* e limitar o tempo perdido quando surge um problema que um engenheiro não consegue ultrapassar. O fórum poderá ser acedido por todos os colaboradores, que têm a possibilidade de criar um tópico com uma dúvida, sendo que os restantes dão apoio. Após resolução do problema, e se se revelar vantajoso, o colaborador deverá proceder à elaboração de um vídeo onde resolve o problema, que ficará guardado no fórum, e, quando outro colaborador tiver a mesma dúvida, esta fica esclarecida com a visualização desse.

No Anexo 1 encontra-se o mapa de processos para elaboração dos usos enumerados anteriormente. Mais uma vez, chama-se a atenção para o facto de este se tratar de um documento aberto, pelo que aquando e após a sua implementação este deve ser revisto e atualizado de forma

a reproduzir processos reais e a ser o mais útil possível em projetos futuros. O mapa de processos foi, também, produzido de forma *standard* para as diferentes fases do projeto, desde uma fase conceptual até à fase de execução, sofrendo, obviamente, ligeiras adaptações nas diferentes fases. Ao longo do mapa de processos vão sendo apresentadas também as trocas de informação que são definidas no capítulo a seguir.

Inicialmente, é responsabilidade do gestor de projeto reunir todos os documentos necessários à modelação e produção de *deliverables*. Os documentos são disseminados pelas diferentes equipas de modelação, responsáveis pela produção de modelos de componentes (como central, tomada de água...) ou parte de componentes. As equipas de modelação podem ser constituídas por um engenheiro e um modelador, que apoia o primeiro. O engenheiro deverá analisar os documentos relativos à componente/parte que tem a modelar e verificar se esta contém equipamento. Se contiver, é necessário averiguar se o fornecedor de equipamentos tem o modelo BIM ou não, sendo que no caso de não ter será necessário criar o equipamento (recorrendo ao *Dynamo*) e, no caso de ter, é apenas necessário adaptar o modelo ao *software* que a empresa utiliza (podendo, também, recorrer-se ao *Dynamo*). Após definida a situação do equipamento, o engenheiro deve analisar os documentos relativos à componente e decidir se delega tarefas de modelação ao modelador ou se modela a totalidade da componente. No caso de optar por uma metodologia de modelação conjunta, esta será obtida com o recurso a *worksets* (melhor explicação relativamente a esta metodologia de trabalho pode ser encontrada no auxiliar de modelação), sendo que a frequência da sincronização com o ficheiro central deverá ser definida pelo gestor de projeto. Finalizada a modelação, o engenheiro deverá realizar um controlo de qualidade do modelo, cuja proposta de procedimento se encontra em anexo. No caso de o modelo ter sido bem elaborado, pode ser aproveitado pelo engenheiro para realizar análises estruturais e, eventualmente, adaptar em função dessas mesmas análises. O modelo deve, depois, ser guardado num ficheiro central e protegido pelo engenheiro recorrendo a *worksets* para que, daí em diante, o modelador não possa alterar o seu conteúdo. Depois de protegido o modelo, o modelador procede à elaboração de *deliverables*, tais como desenhos, mapas de quantidades e vídeos/*renders*.

TROCAS DE INFORMAÇÃO

As trocas de informação estão intimamente ligadas ao BIM. Durante os diferentes processos que levam à produção de *deliverables*, são constantes as trocas de ficheiros e o reuso de informação. Posto isto, revela-se de extrema importância que quem produz informação perceba a sua futura utilização e as suas propriedades, tais como o formato, LOD, quem a vai receber, entre outros. Assim, é necessário definir as trocas de informação que ocorrem durante os processos BIM para as diferentes fases de projeto.

Para auxiliar na definição das trocas de informação optou-se pela adaptação do quadro disponível no documento *BIM Project Execution Planning Guide*. A organização dos elementos construtivos foi idealizada pelo autor, com o intuito de promover um quadro claro de consultar e interpretar. São também definidas trocas de informação padrão, para a fase de projeto de execução, optando-se, a título exemplificativo, pela escolha da componente “Central”.

As primeiras trocas de informação ocorrem entre o gestor de projeto e diferentes intervenientes, tais como empreiteiros, arquitetos, consultores, fornecedores de equipamentos, entre outros. Devido à complexidade e heterogeneidade que definem estas trocas de informação, optou-se por não exemplificar. O gestor de projeto dissemina depois, pelas equipas de modelação, a informação correspondente a cada parte/componente. Após reunida toda a documentação necessária à correta modelação (como esquiços, dados de projeto, dados do fornecedor de equipamentos, auxiliar de modelação, entre outros) as interações ocorrem principalmente entre o engenheiro responsável por essa mesma parte/componente, o modelador de apoio e o gestor de projeto.

As diferentes trocas de informação são numeradas para simplificação de compreensão do mapa de processos, disponível no Anexo 1, em que as diferentes trocas são identificadas em função da numeração adotada.

O engenheiro é responsável pelo ficheiro central (no caso de modelação conjunta), e proteção de parte da estrutura que o modelador não poderá alterar, logo o engenheiro partilha com o modelador o ficheiro central parcialmente protegido – Ver Tabela 4 - para que o modelador possa trabalhar em parte da estrutura (troca de informação 1 – T1).

Tabela 4 - Partilha do ficheiro central parcialmente protegido com o modelador (T1).

Uso BIM	Modelação 3D
Modelo/Parte	Central
Autor(es)	Engenheiro 1
Receptor (es)	Modelador 1
<i>Input / Output</i>	<i>Input</i>
Fase	Projeto de execução
Formato ficheiro	.rvt
Aplicação e versão	Revit 2015
LOD	300
Notas	Ficheiro Central parcialmente protegido

Finalizada a modelação, e verificado o modelo pelo engenheiro e gestor de projeto, passa-se à produção de *deliverables*, tais como desenhos e mapas de quantidades, modelos de armaduras (opcional) e vídeos/*renders* (opcional), correspondendo às trocas de informação 2, 3 e 4 (T2, T3 e T4), que se encontram na Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7, respetivamente.

Tabela 5 - Partilha do modelo verificado e protegido, para que o modelador produza deliverables (T2).

Uso BIM	Produção de desenhos; Mapas de quantidades
Modelo/Parte	Central
Autor(es)	Engenheiro 1
Receptor (es)	Modelador 1
<i>Input / Output</i>	<i>Input</i>
Fase	Projeto de execução
Formato ficheiro	.rvt
Aplicação e versão	Revit 2015
LOD	300
Notas	Modelo Central verificado e totalmente protegido

Tabela 6 - Partilha de ficheiros para exportação para o Tekla (T3).

Uso BIM	Modelação de armaduras
Modelo/Parte	Central
Autor(es)	Engenheiro 1
Receptor (es)	Modelador 1
<i>Input / Output</i>	<i>Input</i>
Fase	Projeto de execução
Formato ficheiro	.IFC
Aplicação e versão	Revit 2015
LOD	300

Notas	Gravar dois ficheiros .IFC - Um com a geometria modelada em Revit, outro com a geometria modelada em Dynamo
-------	---

O facto de, para a modelação de armaduras, se separarem os modelos em elementos modelados no *Revit* e elementos modelados em *Dynamo* encontra-se melhor explicado no auxiliar de modelação (Anexo 4), na parte referente a armaduras.

Tabela 7 - Partilha do ficheiro para posterior realização de vídeo (T4).

Uso BIM	Produção de Vídeo
Modelo/Parte	Central
Autor(es)	Engenheiro 1
Receptor (es)	Modelador 1
<i>Input / Output</i>	<i>Input</i>
Fase	Projeto de execução
Formato ficheiro	<i>Collada (.dae)</i>
Aplicação e versão	<i>Revit 2015</i>
LOD	300
Notas	

Após produzidos os *deliverables*, estes são partilhados com o gestor de projeto, que tem a responsabilidade de reunir documentação e partilhar, por exemplo, com a equipa em obra e/ou outros departamentos. Assim, o gestor de projeto recebe os desenhos (troca de informação 5 – T5) (Tabela 8), os mapas de quantidades (troca de informação 6 – T6) (Tabela 9), o modelo de armaduras (troca de informação 7 – T7) (Tabela 10) e os vídeos/*renders* (troca de informação 8 – T8) (Tabela 11).

Tabela 8 - Partilha de desenhos (T5).

Uso BIM	Produção de desenhos
Modelo/Parte	Central
Autor(es)	Modelador 1
Receptor (es)	Gestor de projeto
<i>Input / Output</i>	<i>Output</i>
Fase	Projeto de execução
Formato ficheiro	PDF; DWG; .rvt
Aplicação e versão	<i>Revit 2015</i>
LOD	300
Notas	

Tabela 9 - Partilha de mapas de quantidades (T6).

Uso BIM	Extração de quantidades
Modelo/Parte	Central
Autor(es)	Modelador 1
Receptor (es)	Gestor de projeto
<i>Input / Output</i>	<i>Output</i>
Fase	Projeto de execução
Formato ficheiro	<i>Excel (.xls); .rvt</i>
Aplicação e versão	<i>Revit 2015</i>
LOD	300
Notas	

Tabela 10 - Partilha de modelo de armaduras (T7).

Uso BIM	Modelação de armaduras
Modelo/Parte	Central
Autor(es)	Modelador 1
Receptor (es)	Gestor de projeto
<i>Input / Output</i>	<i>Output</i>
Fase	Projeto de execução
Formato ficheiro	.IFC
Aplicação e versão	<i>Tekla 21</i>
LOD	400
Notas	

Tabela 11 - Partilha de vídeos (T8).

Uso BIM	Produção de Vídeo
Modelo/Parte	Central
Autor(es)	Modelador 1
Receptor (es)	Gestor de projeto
<i>Input / Output</i>	<i>Output</i>
Fase	Projeto de execução
Formato ficheiro	.mp4
Aplicação e versão	<i>Lumion 5.0</i>
LOD	300
Notas	

Relativamente à produção de vídeos do modelo, e apesar de a empresa não possuir a licença do *software Lumion*, entendeu-se que este seria o indicado no caso de se pretender implementar o uso em questão.

Estão, assim, definidas as trocas de informação para a fase de projeto de execução. Em fases de projeto anteriores, a principal alteração residirá no LOD, que deverá ser mais baixo, o que é

melhor explicado no documento de especificação LOD que se encontra no Anexo 3. No caso de serem adicionados mais usos a um projeto, deverão ser verificados os formatos mais convenientes para criação e partilha de informação de forma eficiente.

ESTRUTURA DE PASTAS E NOMENCLATURA DE FICHEIROS

A elevada quantidade de informação criada e partilhada é uma característica relevante de um projeto, sobretudo no caso de obras especiais. Assim, a organização dos diferentes ficheiros criados durante a produção de *deliverables*, e a respetiva nomenclatura, é de extrema importância, e é essencial que tal esteja definido à partida. É importante que, quando um colaborador necessita de um ficheiro, o consiga localizar com clareza. Neste capítulo é proposta uma forma de organização e nomenclatura de ficheiros (Ver Figura 2).

Estrutura de pastas

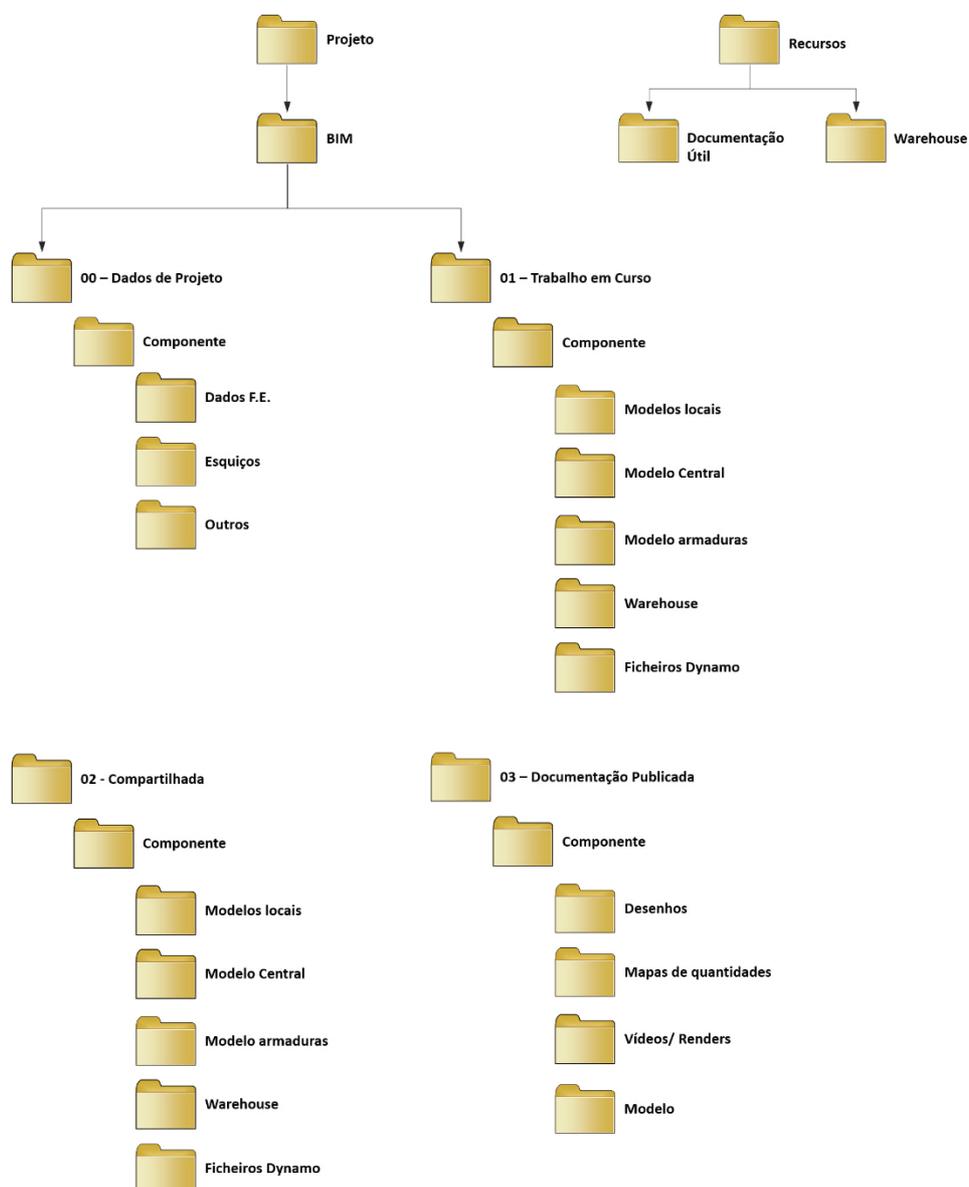


Figura 2 - Estrutura de pastas proposta.

A estrutura geral de pastas é apresentada na Figura 2. Todos os ficheiros estão presentes no servidor da empresa. Cada projeto tem uma pasta correspondente e, inserida nesta, está a pasta “BIM”. Esta pasta contém 4 pastas no seu interior: “00 – Dados de projeto”, “01 – Trabalho em curso”, “02 - Compartilhada” e, por último, “03 – Documentação Publicada”.

A primeira pasta, “Dados de projeto”, contém, para as diferentes componentes da obra, os dados necessários à modelação destas (como dados do fornecedor de equipamentos, esboços, origens dos modelos, entre outros), e pode ser acedida (apenas para leitura) pelas equipas de modelação, exclusivamente à pasta da componente pela qual são responsáveis.

A segunda pasta, correspondente ao trabalho em curso, armazena, para cada componente de uma obra hidroelétrica, os ficheiros (como modelos e famílias) que não estão finalizados ou que ainda não foram verificados/aprovados. Finalizados os modelos, estes são sujeitos a um procedimento de controlo de qualidade, realizado pelo engenheiro responsável em conjunto com o gestor de projeto (metodologia proposta no anexo 2). Se o modelo estiver de acordo com o que foi delineado inicialmente, ou seja, se “passar” no controlo de qualidade, pode ser guardado na terceira pasta “Compartilhada”. Esta transição é realizada pelo gestor de projeto.

Cada equipa de modelação tem apenas acesso à pasta correspondente à componente pela qual é responsável, em “Trabalho em Curso”. Já a pasta “Compartilhada”, onde se situam os modelos protegidos por *Worksets*, pode ser acedida pelos modeladores (apenas aos ficheiros correspondentes à componente pela qual são responsáveis), de forma a produzirem *deliverables*, tais como desenhos, mapas de quantidades e vídeos. Este percurso encontra-se representado na Figura 3. Produzidos estes, são entregues ao gestor de projeto que, se entender que estão em conformidade com o previsto, guarda-os na última pasta, “Documentação Publicada” (Figura 4). Qualquer acesso a esta pasta por parte das equipas de modelação (para, por exemplo, atualizar os ficheiros do projeto de execução de acordo com as alterações realizadas em obra) deverá ser solicitado ao gestor de projeto.

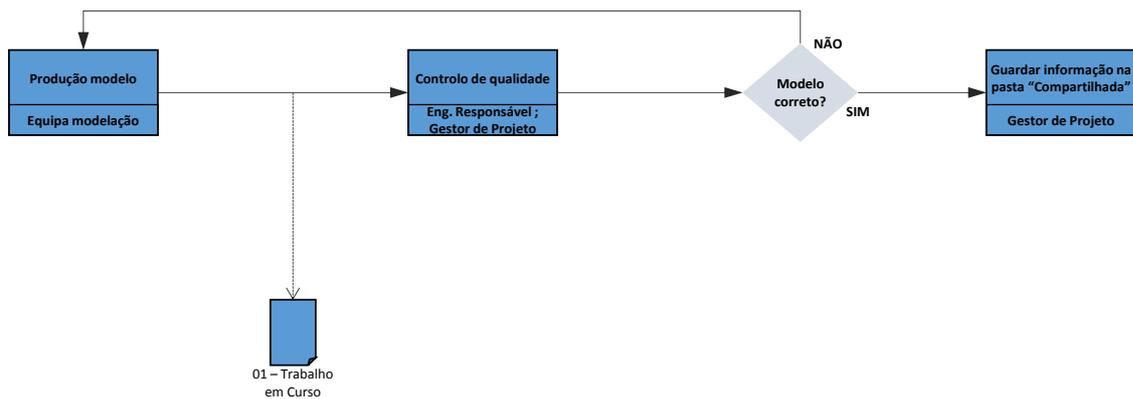


Figura 3 – Percurso da informação de “Trabalho em Curso” para “Compartilhada”.

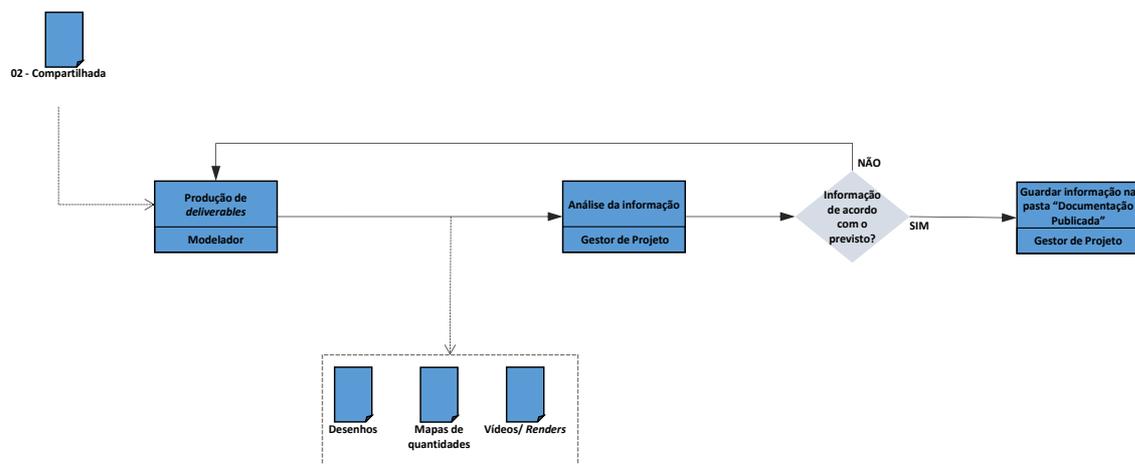


Figura 4 - Produção de informação para a pasta "Documentação Publicada".

Paralelamente às pastas relativas aos diferentes projetos, há ainda uma pasta denominada “Recursos”. Esta pasta contém documentos de apoio à modelação, como *templates*, auxiliar de modelação, procedimento de controlo de qualidade, documento de especificações LOD, entre outros, e que se encontram na pasta “Documentação Útil”. Em “Recursos” há, também, uma *warehouse* comum a todos os projetos e que pode conter, por exemplo, famílias ou ficheiros *Dynamo* de projetos já realizados e que se podem revelar úteis na modelação de projetos atuais. A seleção destes ficheiros é realizada pelo BIM *manager*, que analisa sugestões dos diferentes gestores de projeto.

Nomenclatura dos ficheiros

O nome dos diferentes ficheiros é constituído por 5 campos, separados por underscores. O primeiro campo diz respeito ao projeto, que deve ser identificado por 3 caracteres. O segundo campo identifica o autor (ou, no caso de modelação conjunta, o engenheiro responsável) através de 4 caracteres, sendo que cada colaborador deve ter um código associado, que não pode repetir-

se. O terceiro campo identifica a componente/parte da obra (central, tomada de água, restituição ou corpo da barragem) através de 5 caracteres. O tipo de ficheiro é identificado pelo quarto campo, através de 2 caracteres, segundo a

Tabela 12.

Tabela 12 - Código para os diferentes tipos de ficheiro.

Tipo de ficheiro	Código
Modelo	MD
Ficheiro Dynamo	DY
Família	FM
Desenho	DS
Mapa de quantidades	MQ
Vídeo	VD

Por último, o quinto campo identifica o número do ficheiro, através de quatro dígitos. A estrutura tipo é a seguinte:

PPP_AAAA_CCCCC_TT_NNNN

A título exemplificativo, o primeiro modelo da tomada de água de Venda Nova III, realizado pelo Eng.º André Ferreira, teria o seguinte nome:

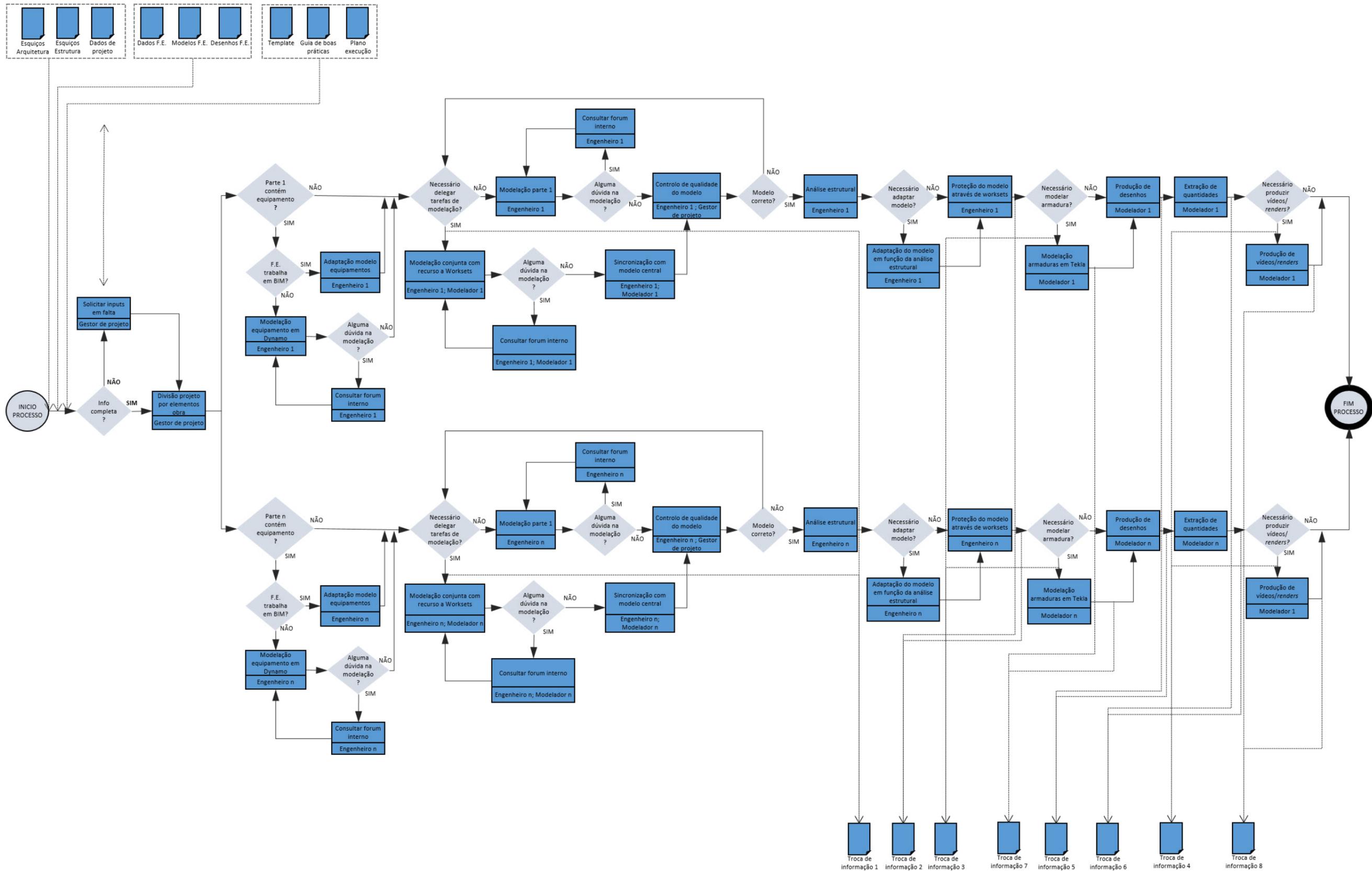
VN3_ANDF_TOMAD_MD_0001

BIBLIOGRAFIA

- AEC UK. (2012a). AEC (UK) BIM Protocol Consultado em Maio 18, 2015. Disponível em <http://aecuk.wordpress.com/>
- AEC UK. (2012b). AEC (UK) BIM Protocol for Autodesk Revit. Consultado em Maio 18, 2015. Disponível em <http://aecuk.wordpress.com/>
- BCA. (2013a). *BIM Essential Guide for BIM Execution Plan*.
- BCA. (2013b). *Singapore BIM Guide - version 2*.
- British Standard. (2007). *BS 1192:2007 Collaborative production of architectural, engineering and construction information – Code of practice*. Disponível em <http://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=000000000030163398>.
- buildingSMART. (2012). *Process - Information Delivery Manual (IDM)*. Consultado em Junho 16, 2015. Disponível em <http://buildingsmart.com/standards/idm>
- COBIM. (2012). *Common BIM Requirements 2012*. Consultado em Maio 19, 2015. Disponível em <http://www.en.buildingsmart.kotisivukone.com/3>
- Computer Integrated Construction Research Program. (2011). *BIM Project Execution Planning Guide - Version 2.1*. May, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA.
- Computer Integrated Construction Research Program. (2013). *BIM Planning Guide for Facility Owners. Version 2.0*. The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA.
- Couto, J. P. (2010). *Técnicas de Medição e Orçamentação de Obras*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho
- Omniclass. (2015). About Omniclass. Consultado em Agosto 7, 2015. Disponível em <http://www.omniclass.org/about.asp>
- Ribeiro, C. A. N. (2013). *Desenvolvimento de processos CAD/CAM para a pormenorização e produção industrial de armaduras para elementos de betão armado* Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Silva, J. M. S. (2013). *Princípios para o desenvolvimento de projetos com recurso a ferramentas BIM*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

ANEXOS

Anexo 1- Mapa de processos



Anexo 2- Controlo de qualidade de modelos

Cada modelador é responsável pela qualidade dos modelos que produz, sendo que qualquer erro detetado nesses mesmos modelos será de sua responsabilidade. Visto isto, é de maior importância que os modeladores garantam que os seus modelos têm o nível de qualidade pretendido. Para isso, no final de cada modelo, e antes da sua utilização, por exemplo, para produção de desenhos, cada modelador deverá realizar um controlo de qualidade. Assim, de seguida, são referidos alguns aspetos a ter em conta na realização do controlo de qualidade:

- Assegurar que o modelo corresponde ao nível de desenvolvimento definido, consultando o documento de especificações LOD e confrontar com o modelo produzido;
- Assegurar que cada elemento foi modelado de acordo com o especificado no auxiliar de modelação, dependendo do nível de desenvolvimento pretendido;
- Verificar se os parâmetros não geométricos estão corretamente definidos e atribuídos, como os materiais;
- Verificar se há colisões/duplicação de elementos, dependendo do nível de desenvolvimento pretendido;
- Verificar formatos de ficheiro a produzir e respetivas nomenclaturas. Consultar documentos de aspetos organizacionais e de trocas de informação;
- Garantir convergência entre elementos estruturais, como vigas e pilares;
- Percorrer virtualmente o modelo seguindo o percurso das cargas desde o topo da estrutura às fundações de forma a verificar se há falta de algum elemento estrutural;
- Na vista 3D, executar a opção *Zoom to Fit*, de forma a verificar se há algum elemento modelado distante da estrutura;
- Em fases prematuras de projeto como, por exemplo, em fases conceptuais, o modelador deve discutir o conteúdo do modelo com os arquitetos e engenheiros responsáveis pela elaboração dos esboços que deram origem ao modelo;
- O modelador deve verificar, piso a piso (ou a cada cota com maior relevância a nível de complexidade construtiva), se há erros ou falta modelar algum elemento.

Para realizar algumas das tarefas anteriormente enumeradas, o modelador deve gerar cortes e plantas em localizações estratégicas (e cotar medidas para verificar se estão de acordo com o previsto). A utilização da *section box*, em vistas 3D, é também uma ferramenta potente para detetar alguns erros de modelação. Gerar, sem grande detalhe “artístico”, um vídeo onde se percorre o interior da estrutura pode revelar-se, também, uma metodologia eficaz para deteção de problemas no modelo.

No âmbito deste documento, achou-se que a metodologia supracitada é suficiente para controlo de qualidade dos modelos. No entanto, e caso no futuro se pretendam realizar controlos de qualidade com maior rigor, é sugerido o *software Solibri Model Checker*. Este *software* comunica com o *Revit* a partir do formato BCF (*BIM Collaboration Format*), que permite um *workflow* eficiente para o controlo de qualidade de modelos. Assim, no *Model Checker* podem analisar-se os erros detetados (sendo estes erros físicos e não só) e criar uma apresentação com imagens e comentários. Já no *Revit*, o utilizador é confrontado com a apresentação definida no *Model Checker* e pode comentar, marcar como resolvido, pedir mais informações, entre outros. O grande potencial deste *software*, na opinião do autor, é a possibilidade de codificar regras próprias e características de obras hidroelétricas que o *software* analisará automaticamente. Um exemplo do que foi referido é a definição de dimensões mínimas de elementos estruturais ou áreas mínimas de divisões.

Anexo 3- Documento de especificações LOD

O presente documento especifica os requisitos mínimos para cada LOD. Este serve de apoio à equipa de projeto, como auxílio na descrição do que deve ser incluído em cada *deliverable*, ao BIM *manager* e gestor de projeto, na colaboração com as equipas de modelação e permite, ainda, uma padronização da informação. Assim, são apresentados quatro diferentes níveis de desenvolvimento (100, 200, 300 e 400) em que, para cada um, são descritas informações a incluir nos diferentes elementos construtivos. No âmbito da aplicação do documento, decidiu-se que um quinto nível de desenvolvimento não necessita de ser descrito, pois os fins de tal nível (manutenção/operação de edifícios) não dizem respeito ao departamento em questão. A ordem de apresentação dos elementos construtivos foi decidida pelo autor, na tentativa de uma organização intuitiva e que permita uma consulta rápida e descomplicada. Assim, a apresentação segue um percurso inverso ao das cargas aplicadas sobre uma estrutura (sítio, fundações, pilares/paredes, vigas, lajes...), sendo que no final são retratados outros elementos como cofragens, juntas de dilatação, armaduras, entre outros. Relativamente aos maciços de geometria complexa, estes podem ser decompostos em vários elementos construtivos referidos anteriormente. Assim, o maciço deverá ser modelado tendo em conta os diferentes requisitos para os elementos construtivos supracitados.

LOD 100

O LOD 100 corresponde à representação genérica do modelo. Tem como objetivo dar uma ideia da conceção geral da estrutura, sendo utilizado em fases prematuras de projeto (ver Tabela 13).

Tabela 13 - Definição do LOD 100.

Elemento	Modelação (Sim/Não)	Notas
Sítio		
Topografia	Não	
Falhas	Não	
Fundações		
Sapatas isoladas	Não	
Estacas e maciços de encabeçamento	Não	
Fundações especiais	Não	
Lintéis	Não	
Vigas de equilíbrio	Não	

Elemento	Modelação (Sim/Não)	Notas
Laje de fundação	Sim	Dimensões e formas genéricas. Não modelar aberturas. Espessura constante.
Pilares		Dimensões e formas genéricas. Todos os pilares com a mesma secção. Não fazer distinção entre diferentes tipos de pilares.
Betão <i>in situ</i>	Sim	
Metálicos	Sim	
Pré-fabricados	Sim	
Paredes		Dimensões e formas genéricas. Todas as paredes com a mesma espessura. Não modelar aberturas.
Paredes interiores	Sim	
Paredes exteriores	Sim	
Vigas		Dimensões e formas genéricas. Todas as vigas com a mesma secção. Não fazer distinção entre diferentes tipos de vigas.
Betão	Sim	
Metálicas	Sim	
Pré-fabricadas	Sim	
Lajes	Sim	Dimensões e formas genéricas. Não modelar aberturas. Espessura constante.
Escadas	Não	
Outros		
Juntas de dilatação	Não	
Armaduras	Não	
Cofragem	Não	

LOD 200

Um elemento com LOD 200 contém quantidade e forma aproximadas, sendo a localização exata. Devem conter informação não geométrica tal como o número de identificação de acordo com a tabela 23 da *Omniclass* e o material. Deve também permitir exportação para um *software* de cálculo estrutural. A modelação deve ser realizada piso a piso. Não é necessário ter cuidados com a modelação tendo em conta a extração precisa de quantidades (ver Tabela 14).

Tabela 14 – Definição do LOD 200.

Elemento	Modelação (Sim/Não)	Notas
Sítio		
Topografia	Não	
Falhas	Não	
Fundações		Modelação com recurso a ferramenta nativa do <i>software</i> . Dimensões aproximadas.
Sapatas isoladas	Sim	

Elemento	Modelação (Sim/Não)	Notas
Estacas e maciços de encabeçamento	Sim	
Fundações especiais	Sim	
Lintéis	Sim	
Vigas de equilíbrio	Sim	
Laje de fundação	Sim	Laje com espessura constante. Não modelar aberturas.
Pilares		Modelação com recurso a ferramenta nativa do <i>software</i> .
Betão <i>in situ</i>	Sim	Dimensões aproximadas.
Metálicos	Sim	Modelação com tipo de perfil que se pretende (ex.: perfil I ou H), com dimensões aproximadas.
Pré-fabricados	Sim	Não distinguir de pilares de betão <i>in situ</i> .
Paredes		Dimensões aproximadas. Modelar aberturas de maiores dimensões (como portas).
Paredes interiores	Sim	
Paredes exteriores	Sim	
Vigas		Dimensões aproximadas.
Betão	Sim	
Metálicas	Sim	Modelação com o tipo de perfil que se pretende (ex.: perfil I ou H), com dimensões aproximadas.
Pré-fabricadas	Sim	Não distinguir de vigas de betão <i>in situ</i> .
Lajes	Sim	Dimensões aproximadas. Modelação de aberturas de maiores dimensões (como caixa de escadas). Modelação de diferentes tipos de laje em função da espessura e de inclinações.
Escadas	Sim	Modelação com número e dimensão de degraus aproximados.
Outros		
Juntas de dilatação	Não	
Armaduras	Não	
Cofragem	Não	

LOD 300

A modelação de elementos com LOD 300 é realizada de acordo com o dimensionamento da estrutural. Quantidade, dimensão e localização exatas. Deve permitir a extração acurada de quantidades, de acordo com o auxiliar de modelação. Modelação piso a piso. A identificação de acordo com a tabela 23 da *Omniclass* e materiais é alguma da informação não geométrica associada aos elementos. Os desenhos de execução (betão) podem ser obtidos através de elementos com este LOD, tal é o nível de detalhe associado (ver Tabela 15).

Tabela 15 – Definição do LOD 300.

Elemento	Modelação (Sim/Não)	Notas
Sítio		
Topografia	Sim	
Falhas	Sim	Modelação com recurso a ferramenta auxiliar no <i>add-in Dynamo</i> .
Fundações		Modelação com recurso a ferramenta nativa do <i>software</i> . Dimensões exatas.
Sapatas isoladas	Sim	
Estacas e maciços de encabeçamento	Sim	
Fundações especiais	Sim	
Lintéis	Sim	
Vigas de equilíbrio	Sim	
Laje de fundação	Sim	Modelar todas as aberturas. Modelar variações de espessura.
Pilares		Modelação com recurso a ferramenta nativa do <i>software</i> . Dimensões exatas.
Betão <i>in situ</i>	Sim	
Metálicos	Sim	Modelação com o perfil obtido no dimensionamento.
Pré-fabricados	Sim	
Paredes		Modelação com recurso a ferramenta nativa do <i>software</i> . Modelar variações de espessura. Modelar todas as aberturas.
Paredes interiores	Sim	
Paredes exteriores	Sim	
Vigas		Modelação com recurso a ferramenta nativa do <i>software</i> . Dimensões exatas.
Betão	Sim	
Metálicas	Sim	Modelação com o perfil obtido no dimensionamento.
Pré-fabricadas	Sim	Não distinguir de vigas de betão <i>in situ</i> .
Lajes	Sim	Modelação com recurso a ferramenta nativa do <i>software</i> . Dimensões exatas. Modelação de todas as aberturas. Modelação de diferentes tipos de laje em função da espessura e de inclinações.
Escadas	Sim	Modelação correta de todos os degraus e corrimões.
Outros		
Juntas de dilatação	Sim	Modelação como intervalos entre estruturas.
Armaduras	Não	
Cofragem	Não	

LOD 400

Um elemento com LOD 400 está preparado para gerar documentos de construção, incluindo de armaduras. São respeitados os requisitos referentes ao LOD 300, acrescidos de modelos de armaduras e ligações, entre outros pormenores (ver Tabela 16).

Tabela 16 – Definição do LOD 400.

Elemento	Modelação (Sim/Não)	Notas
Sítio		
Topografia	Sim	
Falhas	Sim	Modelação com recurso a ferramenta auxiliar no <i>add-in Dynamo</i> .
Fundações		Modelação com recurso a ferramenta nativa do <i>software</i> . Dimensões exatas.
Sapatas isoladas	Sim	
Estacas e maciços de encabeçamento	Sim	
Fundações especiais	Sim	
Linteis	Sim	
Vigas de equilíbrio	Sim	
Laje de fundação	Sim	Modelar todas as aberturas. Modelar variações de espessura.
Pilares		Modelação com recurso a ferramenta nativa do <i>software</i> . Dimensões exatas.
Betão <i>in situ</i>	Sim	
Metálicos	Sim	Modelação com o perfil obtido no dimensionamento. Modelação de ligações.
Pré-fabricados	Sim	Modelação de ligações.
Paredes		Modelação com recurso a ferramenta nativa do <i>software</i> . Modelar variações de espessura. Modelar todas as aberturas.
Paredes interiores	Sim	
Paredes exteriores	Sim	
Vigas		Modelação com recurso a ferramenta nativa do <i>software</i> . Dimensões exatas.
Betão	Sim	
Metálicas	Sim	Modelação com o perfil obtido no dimensionamento. Modelação de ligações.
Pré-fabricadas	Sim	Modelação de ligações.
Lajes	Sim	Modelação com recurso a ferramenta nativa do <i>software</i> . Dimensões exatas. Modelação de todas as aberturas. Modelação de diferentes tipos de laje em função da espessura e de inclinações.
Escadas	Sim	Modelação correta de todos os degraus e corrimões.
Outros		
Juntas de dilatação	Sim	Modelação como intervalos entre estruturas.

Elemento	Modelação (Sim/Não)	Notas
Armaduras	Sim	Modelação de todas as armaduras.
Cofragem	Sim	Modelação no <i>Revit</i> através de materiais e famílias apropriadas ou recorrer a <i>softwares</i> externos.

Anexo 4- Auxiliar de modelação

O presente auxiliar serve de apoio ao modelador. Paralelamente à consulta deste, é aconselhável a consulta do documento de especificações LOD, de forma a perceber qual o nível de detalhe que é necessário colocar no modelo, o que poderá poupar algum tempo na tarefa da modelação. São apresentadas, para cada elemento construtivo, boas práticas para garantia de uma correta modelação e ainda um auxiliar de trabalho colaborativo através de *worksets*. O auxiliar foi realizado para a versão 2015 do *Revit*, 21 do *Tekla* e 0.7.5 do *Dynamo*.

Fundações

- Estacas e maciços de encabeçamento

O *Revit* disponibiliza diferentes famílias para auxiliar a modelação de estacas e maciços de encabeçamento como demonstra a Figura 5. Caso não esteja incorporada uma família com as dimensões pretendidas, é possível duplicar uma família existente, alterar os seus parâmetros (ver Figura 6), e dar um nome que permite identificar facilmente o elemento.

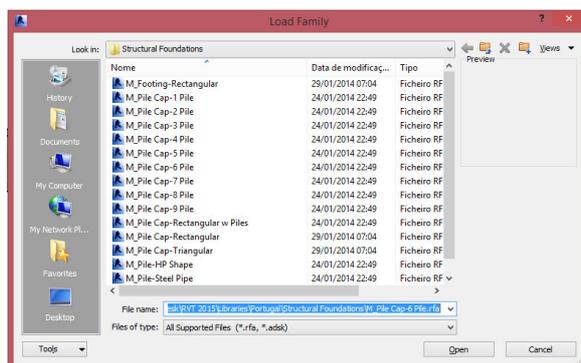


Figura 5 - Famílias estacas e maciços de encabeçamento disponíveis.

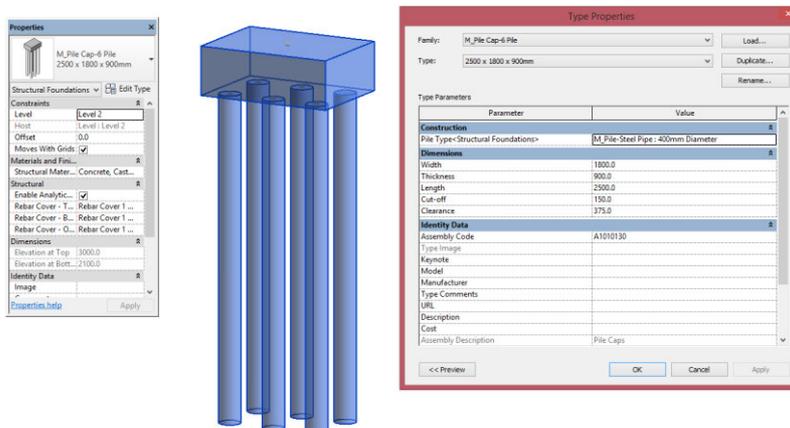


Figura 6 - Parâmetros de uma família de maciço de encabeçamento com 6 estacas.

Processo de modelação:

Aba *Structure* – No campo *Foundation* seleccionar *Isolated* – Seleccionar família pretendida

- Sapatas

Caso não esteja incorporada uma família com as dimensões pretendidas, é possível duplicar uma família existente, alterar os seus parâmetros, e dar um nome que permita identificar facilmente o elemento.

Processo de modelação:

Aba *Structure* – No campo *Foundation* seleccionar *Isolated* – Seleccionar família pretendida

- Lintéis/ Vigas de equilíbrio

Modeladas entre os centros geométricos das sapatas/maciços de encabeçamento como se pode ver na Figura 7. Com esta prática de modelação não há sobreposição de material, pois automaticamente o *software* limita a extensão da viga entre as faces das sapatas. Caso não esteja incorporada uma família com as dimensões pretendidas, é possível duplicar uma família existente, alterar os seus parâmetros, e dar um nome que permite identificar facilmente o elemento.

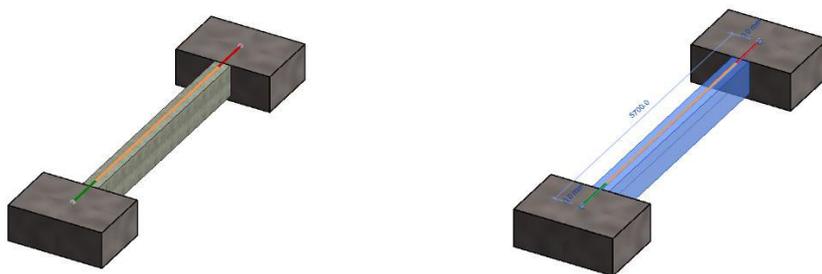


Figura 7 - Lintel entre sapatas.

Processo de modelação:

Aba *Structure* – No campo *Structure* seleccionar *Beam* – Seleccionar família pretendida

Pilares

Os pilares devem ser modelados piso a piso, mesmo que a sua secção seja constante ao longo de diferentes pisos. Este cuidado de modelação facilita a extração detalhada de quantidades (por piso) e o planeamento construtivo. No entanto, e no caso de haver pisos com pilares com a mesma secção e comprimento, poder-se-á utilizar o comando *Copy to Clipboard*, na aba *Modify* (ver Figura 8), o que permite copiar o elemento, e depois utilizar o comando *Paste*, na mesma aba, com a instrução *Aligned to Selected Levels*, onde depois se escolhem os pisos para onde se pretende replicar o pilar (ver Figura 9).

Caso não esteja incorporada uma família com as dimensões pretendidas, é possível duplicar uma família existente, alterar os seus parâmetros, e dar um nome que permite identificar facilmente o elemento.

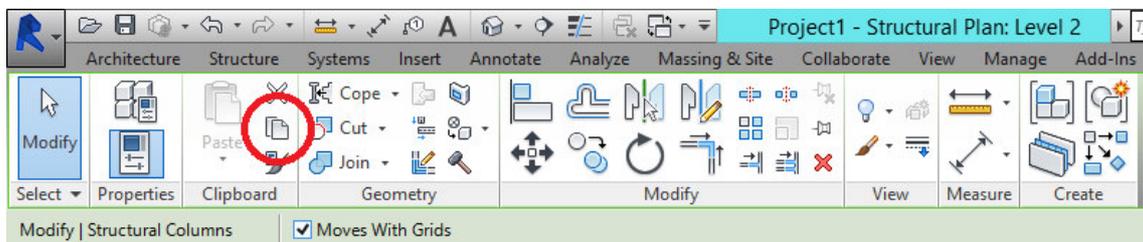


Figura 8 - Comando "Copy to Clipboard".

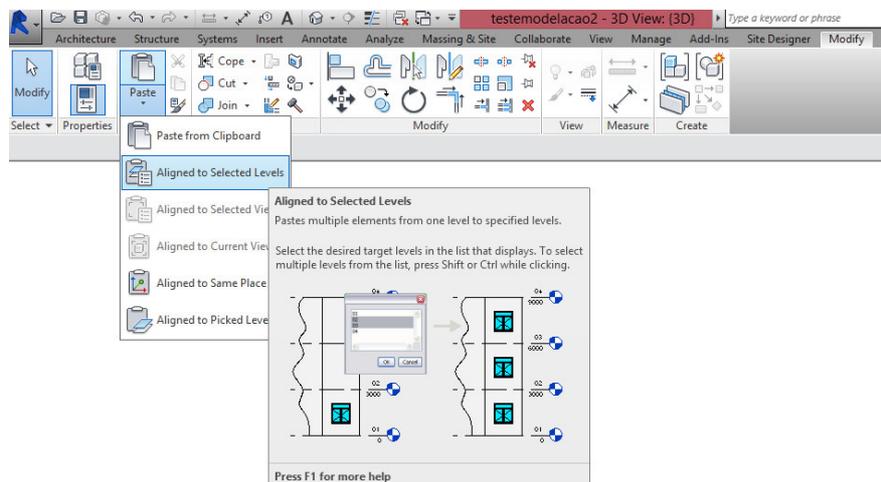


Figura 9 - Comando "Aligned to Selected Levels".

Processo de modelação:

Aba *Structure* – No campo *Structure* seleccionar *Column* – Seleccionar família pretendida

Paredes

Tal como os pilares, as paredes devem ser modeladas piso a piso, mesmo que a sua secção seja constante ao longo de diferentes pisos. Este cuidado de modelação facilita a extração detalhada de quantidades (por piso) e o planeamento construtivo (ver Figura 11 e Figura 12).

As paredes poderão ser modeladas entre as faces exteriores dos elementos que ligam ou seleccionando os centros geométricos desses mesmos elementos (. Neste último caso, é necessário ter em conta as regras de medição de quantidades. Para isso, dever-se-á garantir que não há subtração de volume dos pilares (ou outros elementos que a parede liga) e adição de volume na parede. Assim, o comando *Switch Join Order*, na aba *Modify*, deverá ser utilizada de forma a garantir uma extração de quantidades correta (ver Figura 11 - Modelação incorreta da parede e Figura 12 - Modelação correta da parede).

Caso não esteja incorporada uma família com as dimensões pretendidas, é possível duplicar uma família existente, alterar os seus parâmetros, e dar um nome que permite identificar facilmente o elemento.

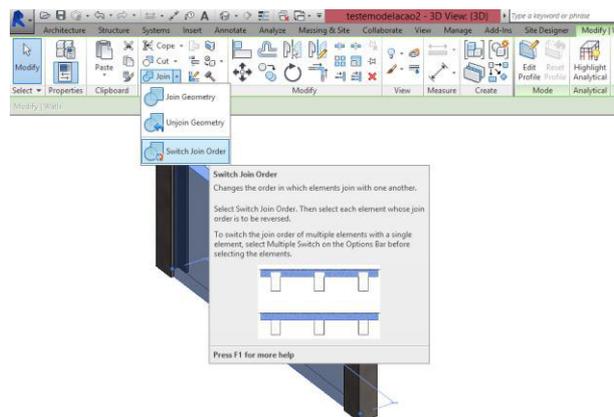


Figura 10 - Comando Switch Join Order.

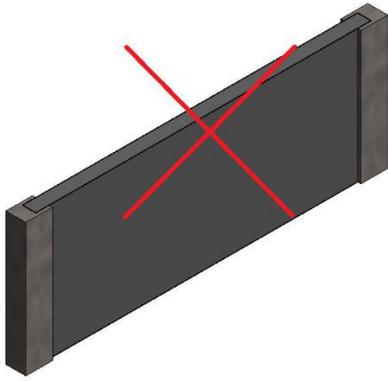


Figura 11 - Modelação incorreta da parede.

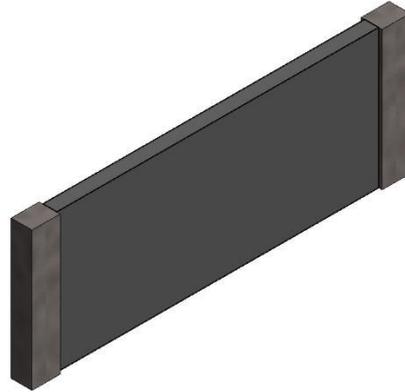


Figura 12 - Modelação correta da parede.

NOTA: Os cuidados a ter com a extração de quantidades dependem do LOD pretendido para o modelo. Assim, para LOD's mais baixos, uma modelação grosseira pode ser suficiente.

Processo de modelação:

Aba *Structure* – No campo *Structure* seleccionar *Wall* – Seleccionar *Wall: Structural* - Seleccionar família pretendida

Vigas

As vigas poderão ser modeladas entre os centros geométricos dos pilares a que ligam. O programa assume a ligação entre pilares e vigas e não há duplicação de material (assumindo também o programa a preponderância dos elementos verticais sobre os elementos horizontais).

Caso não esteja incorporada uma família com as dimensões pretendidas, é possível duplicar uma família existente, alterar os seus parâmetros, e dar um nome que permite identificar facilmente o elemento.

Processo de modelação:

Aba *Structure* – No campo *Structure* seleccionar *Beam* - Seleccionar família pretendida

Lajes

A modelação de lajes pode, em função do seu contorno, ser realizada de diferentes formas. Ao se definir o contorno da laje é necessário pensar no processo de extração de quantidades para que este seja corretamente realizado. Assim, é importante a ligação da laje com pilares, vigas e paredes. Relativamente a pilares e paredes, as regras de medição portuguesas indicam que as alturas serão determinadas entre as faces superiores das lajes ou das vigas de betão, logo, os pilares e paredes têm preponderância sobre as lajes. Também relativamente às vigas as regras de medição indicam que a medição dos volumes incorporados na espessura das lajes será incluída na medição do betão das vigas, lintéis e cintas, logo, também as vigas têm preponderância relativamente às lajes.

Assim, e definindo o contorno da laje como sobrepondo pilares, paredes e vigas, é, mais uma vez, necessário recorrer ao comando *Switch Join Order* (explicado na modelação de paredes) e aplicar o comando entre a laje e os pilares, paredes e vigas (ver Figura 13 – modelação incorreta de laje e Figura 14 – modelação correta de laje).

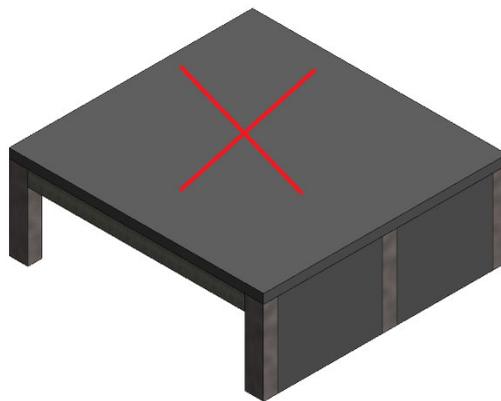


Figura 13 - Modelação errada da laje, devido ao volume dos elementos.

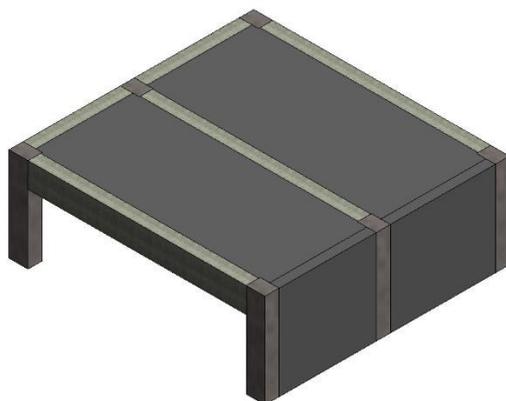


Figura 14 - Modelação correta da laje, após aplicação do comando "Switch Join Order".

Uma outra possibilidade de correta modelação da laje sem recurso ao comando *Switch Join Order* é a definição das fronteiras da laje contornando pilares, lajes e vigas como é demonstrado na Figura 15.

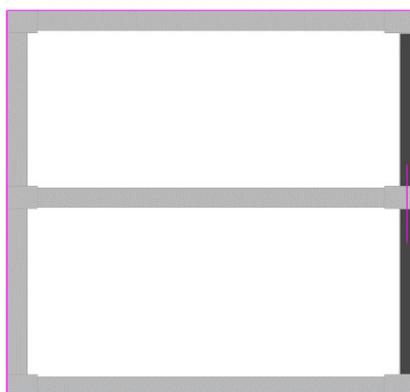


Figura 15- Definição do contorno da laje de forma a evitar sobreposição com restantes elementos estruturais.

NOTA: Os cuidados a ter com a extração de quantidades dependem do LOD pretendido para o modelo. Assim, para LOD's mais baixos, uma modelação grosseira pode ser suficiente.

Caso não esteja incorporada uma família com as dimensões pretendidas, é possível duplicar uma família existente, alterar os seus parâmetros, e dar um nome que permite identificar facilmente o elemento.

Processo de modelação:

Aba *Structure* – No campo *Structure* seleccionar *Floor* – Seleccionar *Floor: Structural* -
Seleccionar família pretendida

Escadas

As escadas devem ser modeladas piso a piso, com recurso à ferramenta nativa do *software*. Esta ferramenta não é intuitiva e está longe de estar otimizada, pelo que, no caso de haver dificuldades relevantes na modelação com esta ferramenta, poder-se-á contornar o problema com a criação de uma massa (*In-Place Mass*), definindo o seu tipo como *floor*.

Na ferramenta nativa de escadas há diversos parâmetros manipuláveis, como a dimensão do espelho, piso, entre outros (Figura 16). É também possível introduzir corrimões ou até fixar um determinado número de degraus para um lanço de escadas.

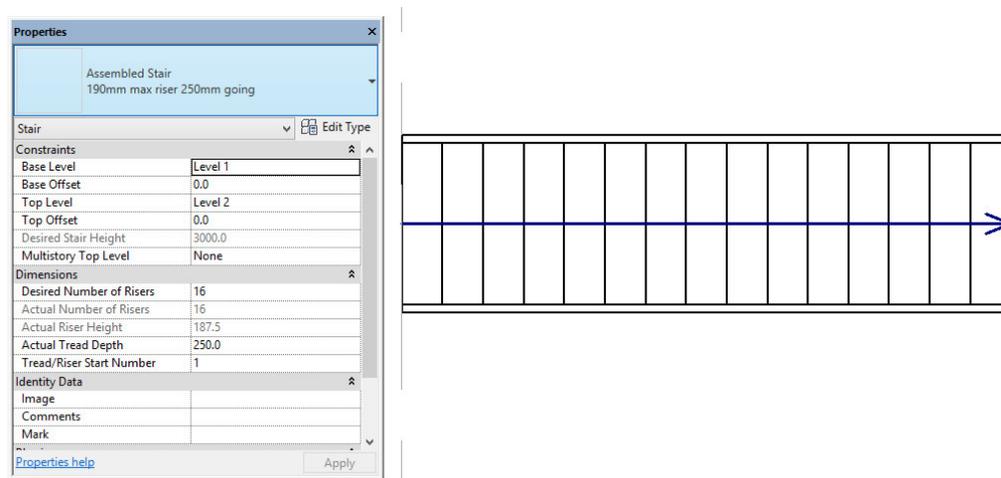


Figura 16 - Parâmetros numa família de escadas.

Processo de modelação:

Aba *Architecture* – No campo *Circulation* seleccionar *Stair* – Seleccionar *Stair by Component* –
Manipular parâmetros conforme necessidade

Ou

Aba *Massing & Site* – No campo *Conceptual Mass* – Seleccionar *In-Place Mass*

Maçiços de geometria complexa

Para a criação de maços de geometria complexa poder-se-á recorrer ao *Plug-In Dynamo*. Trata-se de uma ferramenta de programação gráfica que permite complementar o *Revit* em diversas funções, sendo a criação de maços de geometria complexa uma delas. Podem ser seguidas diferentes estratégias de modelação, sendo que a utilizada na modelação de componentes de Venda Nova III permitiu identificar que a subtração de volumes parece a mais intuitiva (os algoritmos podem ser consultados para melhor perceção).

Como este tipo de geometrias é comum em obras hidroelétricas, achou-se por bem complementar este auxiliar de modelação com um exemplo, em que será modelado o tubo de aspiração, cujo volume pode ser subtraído a qualquer maço.

O primeiro passo consiste em abrir o *Revit* no *template* da criação de modelos genéricos (*generic model*). Depois, na aba *Add-Ins*, é possível aceder ao *Dynamo* (Figura 17).

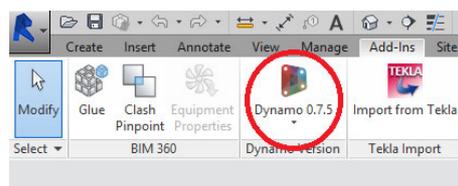


Figura 17 - Acesso ao Dynamo.

Na Figura 18 é apresentado o desenho fornecido pelo fornecedor de equipamentos com dados relativos ao tubo de aspiração.

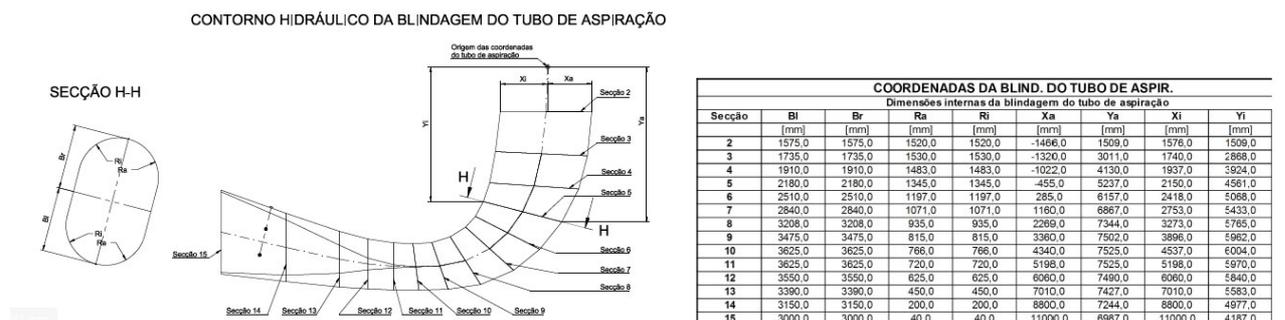


Figura 18 - Dados tubo de aspiração.

Como é possível constatar são fornecidos diferentes parâmetros para cada secção. Assim, o primeiro passo seria criar um espaço que permitisse a identificação de todos os parâmetros para cada secção. Com duplo clique na interface do *Dynamo* é aberta uma janela, onde podem depois ser inseridos os dados relativos aos parâmetros (Figura 19).

```

Secção 2
cs = CoordinateSystem.Identity(); >
Bl = 1.575; >
Br = 1.575; >
Ra = 1.520; >
Ri = 1.520; >
Xa = -1.466; >
Ya = 1.509; >
Xi = 1.576; >
Yi = 1.509; >

```

Figura 19 - Parâmetros no Dynamo.

As setas do lado direito permitem ligar os parâmetros a outras funções, podendo depois ser manipulados. Após este passo o *software* já contém as variáveis do tipo numérico necessárias. Visto isto, é então necessário manipular os parâmetros de forma que seja possível a modelação de cada secção. A manipulação consiste na criação de formas geométricas, como pontos, linhas e arcos que conjugadas constituem a geometria pretendida (secção). Na Figura 20 é apresentado o conjunto de instruções, com identificação dos comandos para criação de pontos (*Point.ByCoordinates*), linhas entre dois pontos (*Line.ByStartPointEndPoint*) e ainda arcos através de três pontos (*Arc.ByThreePoints*).

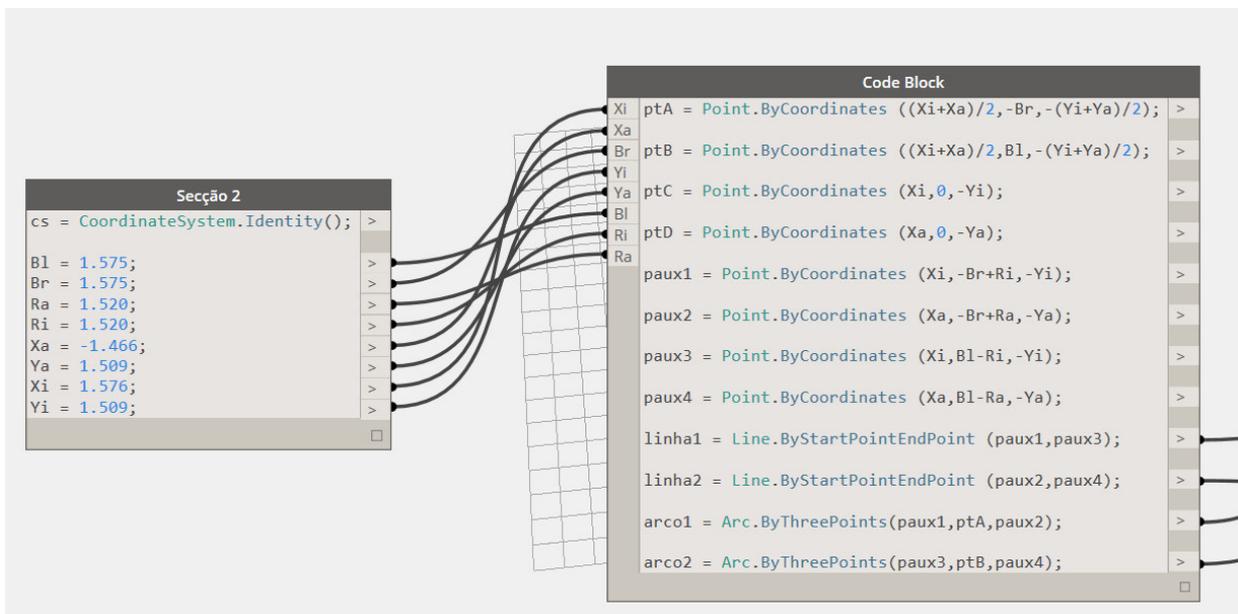


Figura 20 - Manipulação das variáveis de cada secção.

É possível associar e manipular as variáveis através de nós. Um nó é uma pequena caixa que permite albergar variáveis ou realizar uma determinada tarefa. Neste caso optou-se por realizar essas tarefas por escrito (manualmente) em caixas maiores (designadas de blocos de código)

para que o algoritmo se torne mais simples e intuitivo de alterar/manipular. Na Figura 21, Figura 22 e Figura 23 são apresentados alguns nós de tarefas simples que poderiam ser também utilizados. Os nós podem ser acedidos na aba esquerda da interface do *software*, pesquisando através do nome ou através dos campos lá apresentados.

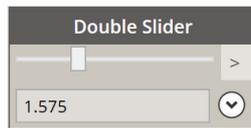


Figura 21 - Nó "Double Slider" que alberga uma variável numérica do tipo real.

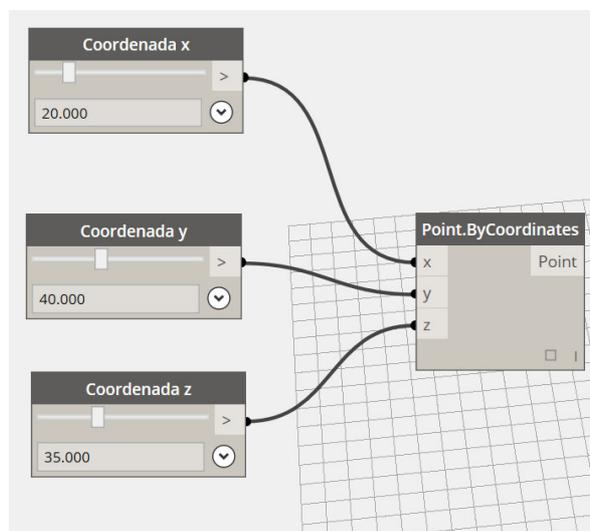


Figura 22 - Nó "Point.ByCoordinates" que, através de 3 coordenadas, cria um ponto.

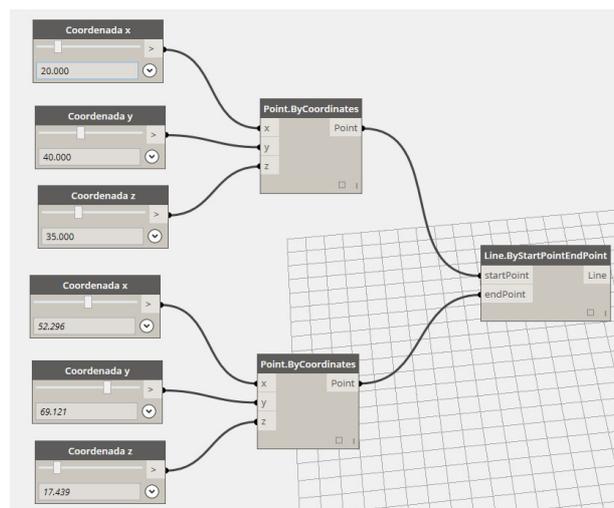


Figura 23 - Nó "Line.ByStartPointEndPoint" que permite criação de uma linha entre dois pontos.

O resultado final das manipulações geométricas é apresentado na Figura 24.

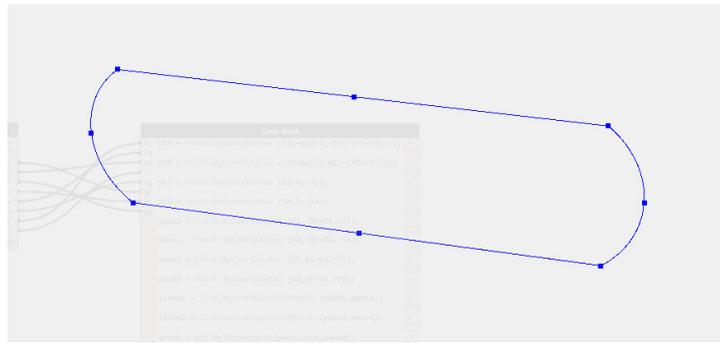


Figura 24 - Secção tubo de aspiração.

Este processo é repetido para cada secção (copiando o código de uma secção e alterando os parâmetros). As secções estão criadas através de um conjunto de linhas mas estas não estão unidas. Para isso é utilizado o nó *Curve.Join* que, dadas duas curvas, as une. Como, neste caso, há mais do que duas linhas, é criada uma lista (nó *List.Create*) que albergue as restantes linhas. O *output* do nó *Curve.Join* é a secção toda unida (Figura 25).

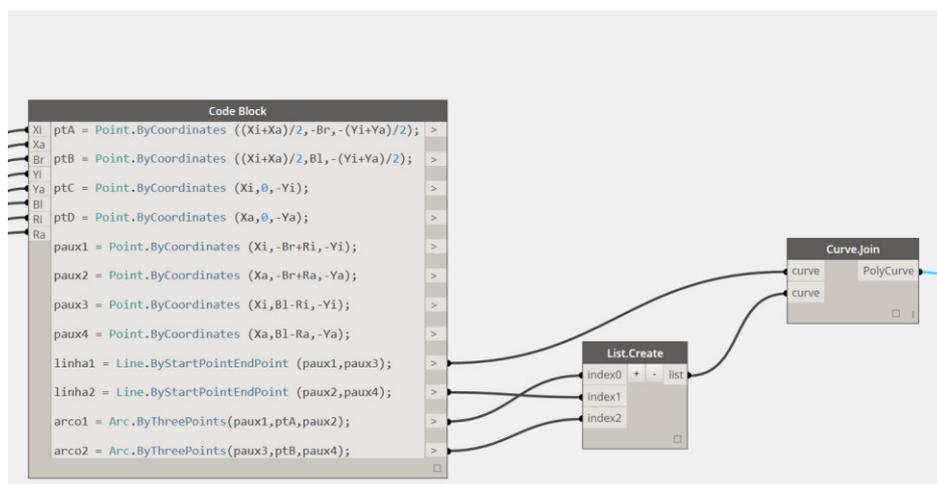


Figura 25 - Nó *Curve.Join* que permite unir as linhas constituintes de cada secção.

Após obtidas todas as secções procede-se para a criação de um sólido entre todas elas. Para isso, cria-se, entre cada secção e a imediatamente a seguir, uma lista com as duas secções e utiliza-se o nó *Solid.ByLoft*. O resultado final desta operação é o sólido do tubo de aspiração (Figura 26).

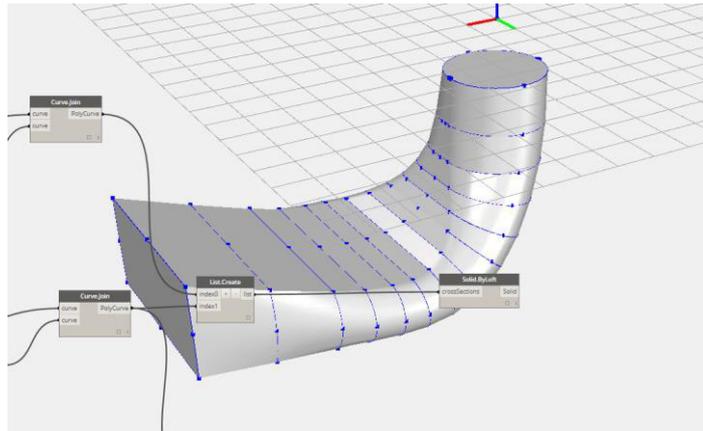


Figura 26 - Maciço tudo de aspiração.

Após este passo, o resultado final é um conjunto de sólidos entre as secções. Esses sólidos podem ser unidos em um sólido através do nó *Solid.UnionAll* – Ver Figura 27(antes é necessário criar uma lista do conjunto de sólidos). Com isto, o tubo de aspiração fica como um único sólido e pode ser importado para o *Revit* através do nó *ImportInstance.ByGeometry*.

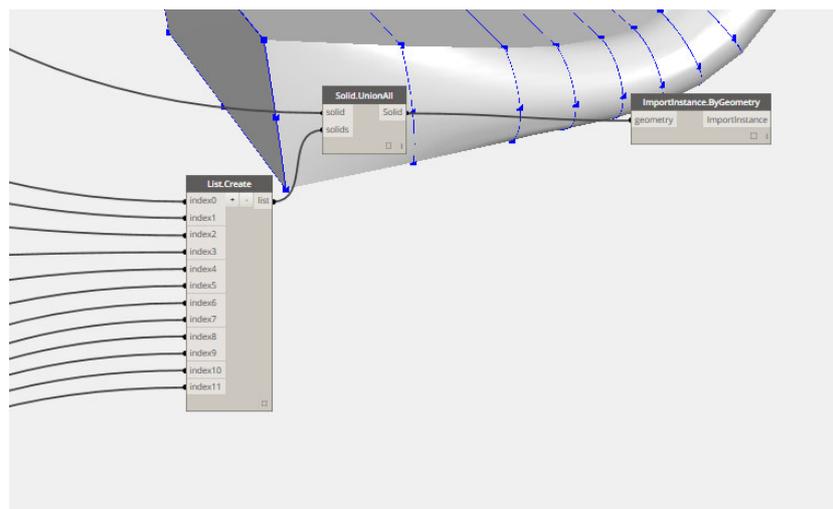


Figura 27 - União dos diferentes sólidos e exportação para o *Revit*.

Após executar o programa, a geometria aparecerá no *Revit*. É muito importante explodir a geometria no *Revit* para que o *software* o entenda como nativo, e ser possível realizar tarefas elementares com o objeto como usar o comando *Join*, o que não é possível com massas. Após isto o objeto pode então ser guardado como uma família e guardado na *warehouse* do projeto – Ver Figura 28.

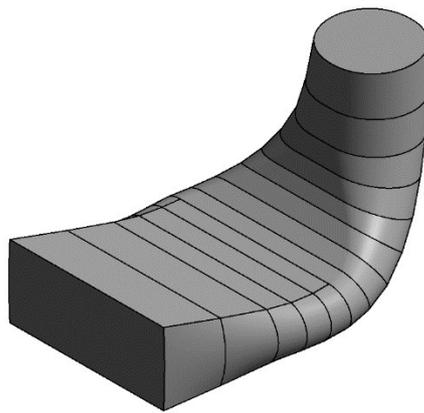


Figura 28 - Tubo de aspiração como objeto no Revit.

Armaduras

A modelação de armaduras é apenas requerida para LOD's mais elevados. A modelação é realizada no *software Tekla Structures*.

A passagem de modelos do *Tekla Structures* para o *Revit* é realizada através do formato IFC. Assim, o modelo deve ser guardado no *Revit* com este formato e depois aberto no *Tekla* como um modelo de referência. Para isso, e já no *Tekla*, no canto superior direito, há um ícone denominado *Model List* (Figura 29 e Figura 30) que permite adicionar modelos com o formato anteriormente discutido.

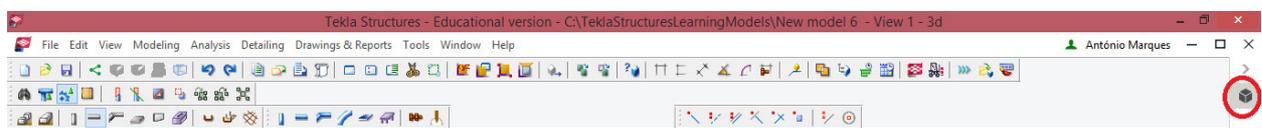


Figura 29 - À direita, ícone "Model List".

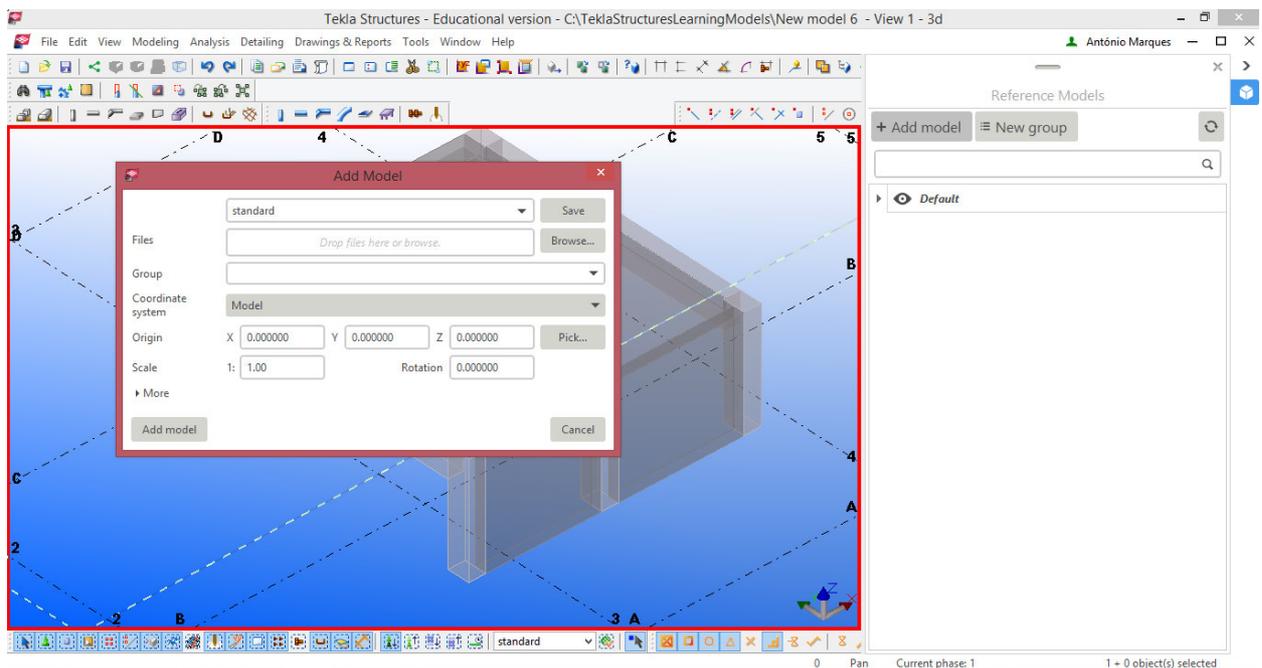


Figura 30 - Parâmetros na importação de um modelo.

Após importados os elementos, é necessário convertê-los para objetos nativos no *Tekla*, através do comando *Convert IFC Objects*, na aba *Tools* (Ver Figura 31).

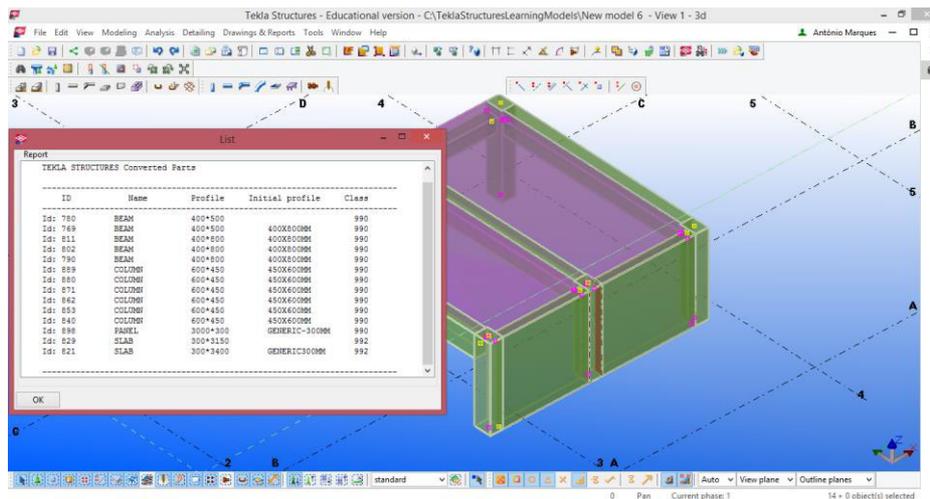


Figura 31 - Conversão de modelo de referência em objetos Tekla.

No entanto, para elementos de geometria complexa (modelados com recurso ao *Dynamo*), a importação do modelo não resulta da forma supracitada, sendo necessário importar através de uma metodologia alternativa. Tal metodologia consiste na importação como elemento de betão (*Concrete Item*), tal como é apresentado na Figura 32.

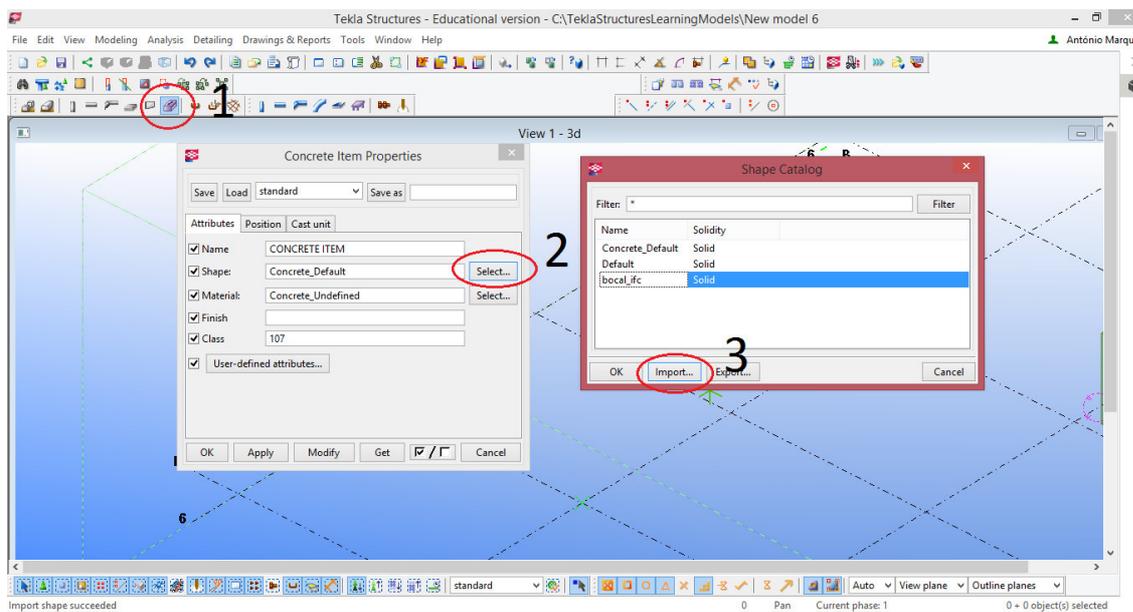


Figura 32 - Passos para importação de maciços de geometria complexa.

Após a importação da estrutura para o *Tekla* pode-se, então, proceder ao seu reforço, sendo que as ferramentas disponíveis se revelam intuitivas. Para o caso dos maciços de geometria complexa, e em dificuldades ao realizar *snap*, é possível modelar linhas e pontos que auxiliem essa tarefa ou até utilizar o *Clip Plane*, que permite cortar o modelo em pontos estratégicos e depois proceder à modelação (ver Tabela 17 - Ferramentas disponíveis para modelação de armaduras).

Tabela 17 - Ferramentas disponíveis para modelação de armaduras.

Comando	Ícone	Descrição
<i>Reinforcing Bar Shape Catalog</i>		Cria um varão ou grupo de varões de acordo com uma forma predefinida
<i>Reinforcing Bar</i>		Cria um único varão
<i>Reinforcing Bar Group</i>		Cria um grupo de varões
<i>Curved Reinforcing Bar Group</i>		Cria um grupo de varões curvos
<i>Circular Reinforcing Bar Group</i>		Cria um grupo de varões circulares
<i>Reinforcement Mesh</i>		Cria uma malha de varões
<i>Reinforcement Splice</i>		Junta varões ou grupos de varões

Com um duplo clique sobre os ícones é possível alterar os parâmetros dos varões a introduzir, como diâmetro, comprimento e ângulo de dobragem, recobrimentos, entre outros (ver Figura 33).

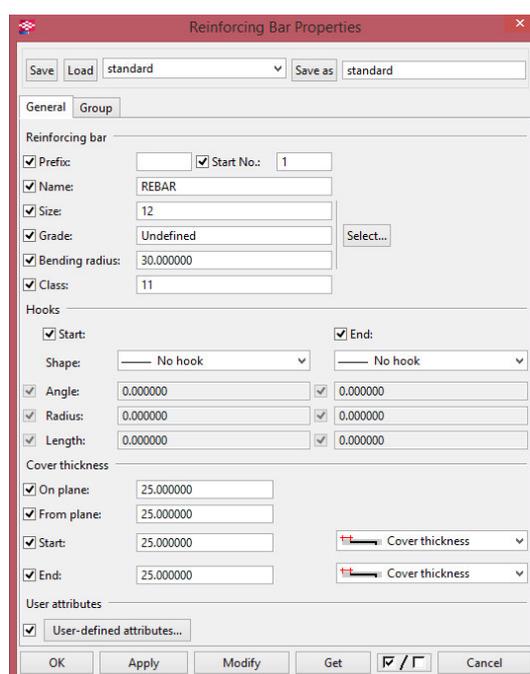


Figura 33 - Parâmetros para um varão.

Aberturas

As aberturas nas lajes de apenas um piso podem ser tidas em conta na definição do contorno da laje. Pode também ser utilizado o comando *Shaft Opening*.

As aberturas nas lajes que atravessem mais do que um piso deverão ser modeladas com o comando *Shaft Opening*.

As aberturas nas paredes devem ser modeladas com o comando *Wall Opening*.

Processo de modelação:

Aba *Structure* – No campo *Opening* – Selecionar *Shaft*

Aba *Structure* – No campo *Opening* – Selecionar *Wall*

Terreno

A modelação do terreno é realizada partindo do ficheiro *.dwg* com as linhas de cota (ver Figura 34). Assim, este deve ser importado para o *Revit*, sendo depois criada a superfície partindo das linhas do terreno (ver Figura 35).

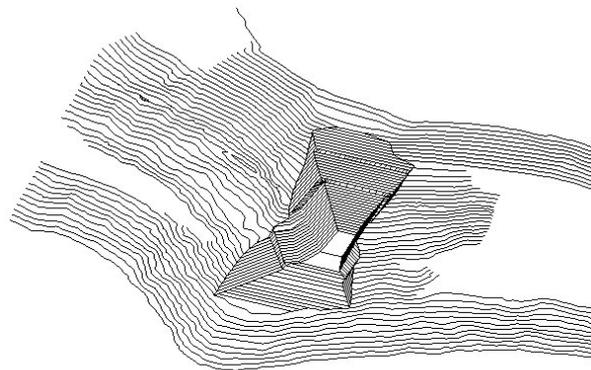


Figura 34 - Linhas de cota do terreno importadas para o Revit.



Figura 35 - Terreno criado a partir das linhas.

Processo de modelação:

Aba Massing & Site – Seleccionar Toposurface – Aba Modify | Edit Surface – Seleccionar Create from Import – Seleccionar Select Import Instance – Seleccionar linhas de cota

Falhas

As falhas são modeladas com recurso ao *add-in Dynamo*. Assim, inicialmente, parte-se de um projeto em *Revit* com o terreno modelado. É importante garantir que o terreno se encontra aproximadamente centrado relativamente à origem do projeto. Posteriormente é necessário aceder ao *Dynamo*, e abrir um ficheiro relativamente às falhas (há um ficheiro para cada número de falhas entre 1 e 10).

Já no *Dynamo*, é necessário seleccionar a superfície no terreno e preencher os campos relativos às características das falhas, como espessura, ângulo, entre outros (Figura 36). No caso de haver mais do que uma falha é também possível definir qual a que tem preponderância em caso de interceção.

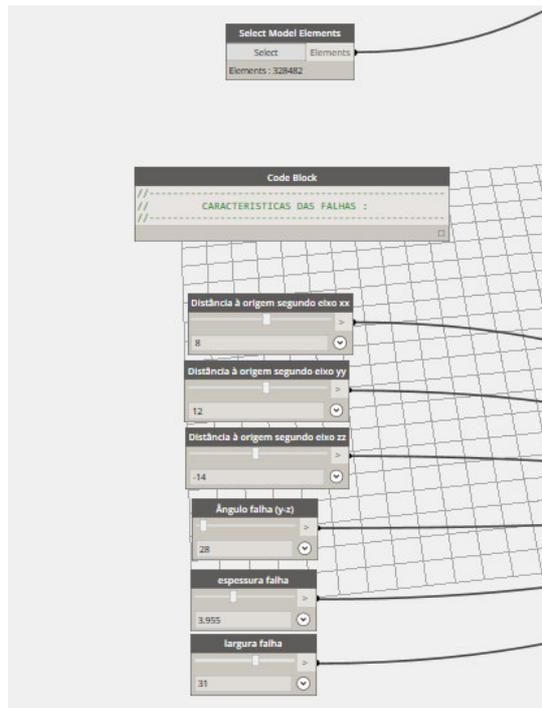


Figura 36 - Parâmetros da falha.

Correndo o ficheiro *Dynamo*, são gerados dois sólidos no *Revit*, o terreno e a falha (Figura 37).

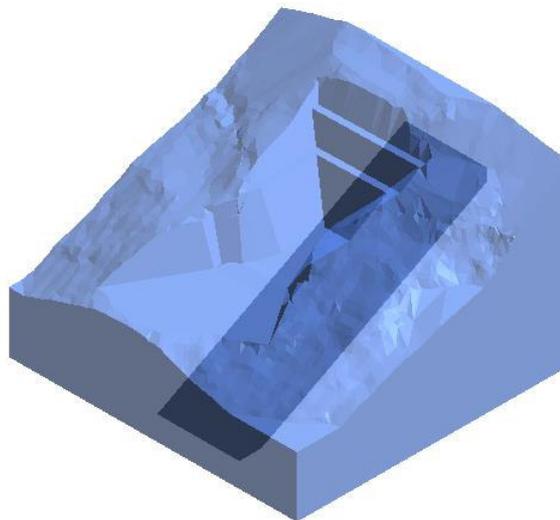


Figura 37 - Terreno e falha no Revit.

No entanto, os objetos encontram-se num *project file*, e pretende-se guardar como uma família. Assim, têm de ser copiados para um *template* de criação de modelos genéricos. Para realizar este passo, selecionam-se os objetos e utiliza-se o commando *Copy to Clipboard*, já referido anteriormente. Posteriormente, abre-se o *template* de criação de modelos genéricos e cola-se, através do commando *Paste from Clipboard* (Figura 38). Para o caso de haver mais do que uma falha, estas teriam de ser importadas alternadamente.

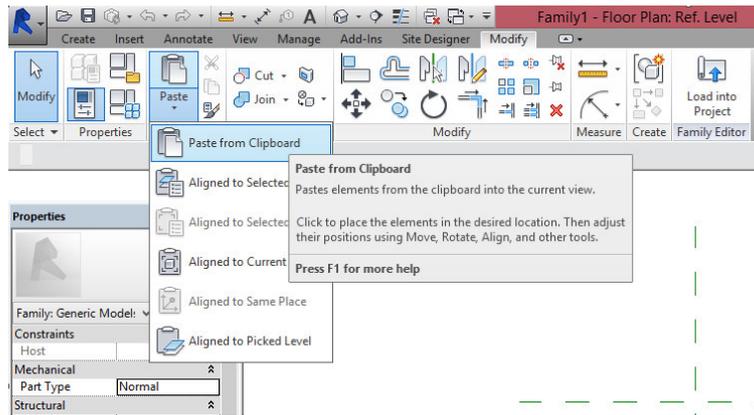


Figura 38 - Comando Paste from Clipboard, no template de criação de modelos genéricos.

Já com os sólidos no *template* de criação de modelos genéricos, deve ser utilizado o commando *Partial Explode* (Figura 39) de forma a que o Revit reconheça os sólidos como nativos. Explodidos os sólidos resta atribuir a cada um deles o material correspondente (Figura 40) (o material da falha deve ser criado) e o terreno e a falha são guardados como família.

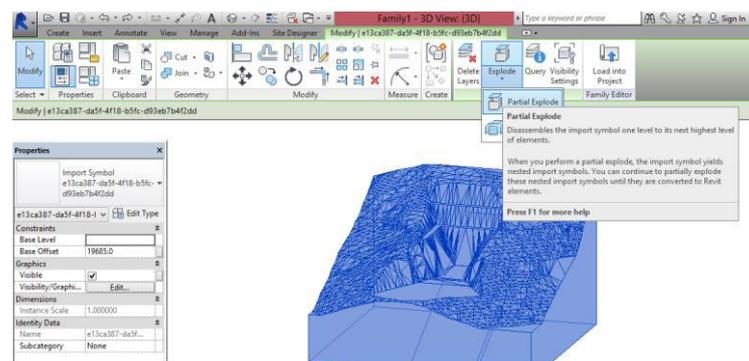


Figura 39 - Comando Partial Explode.

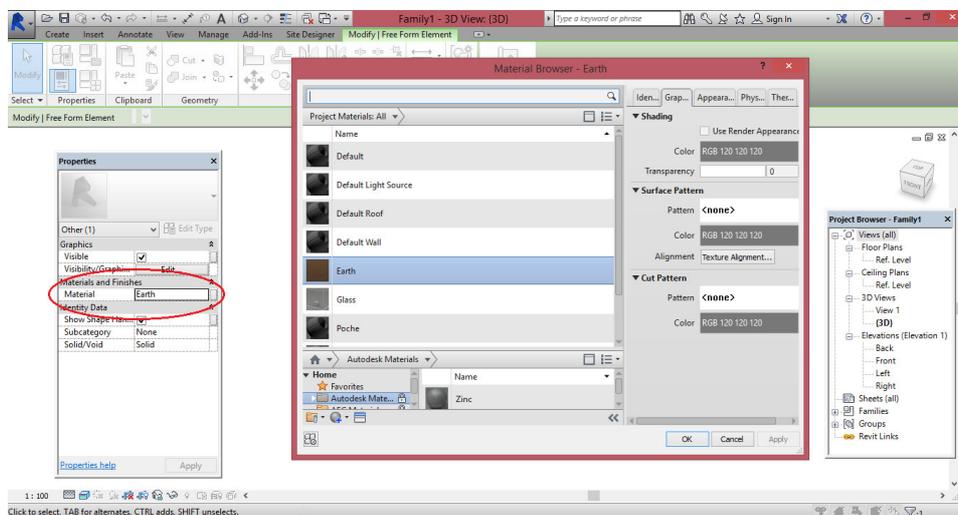


Figura 40 - Atribuição de material.

A família do terreno com as falhas pode depois ser inserida em qualquer projeto (Figura 41).



Figura 41 - Terreno e falha inseridos no projeto.

Worksets

Durante a modelação, é importante o apoio que o modelador (desenhador) dá ao engenheiro, pois, em geral, tratam-se de componentes extensas e complexas. Assim, é importante definir cuidadosamente uma metodologia de trabalho colaborativa entre os diferentes responsáveis pela modelação. A modelação conjunta pode ser obtida através de *Links*, em que cada responsável desenvolve o seu modelo independentemente e no fim são agregados, ou através de *Worksets*, que será a metodologia implementada pela empresa. É possível fazer uma analogia entre um *workset* e um *layer*, em *AutoCad*. Um *workset* é então, um conjunto de elementos agrupados, podendo ser elementos construtivos, grelhas, níveis ou até *Links* externos ao modelo. De uma forma geral, o engenheiro cria o modelo, que será o modelo central, e define os *worksets* em função da divisão de tarefas de modelação. Quando os restantes responsáveis pela modelação abrem o ficheiro central, o *Revit* cria automaticamente um ficheiro local, guardado no computador do respetivo responsável, no qual este trabalhará no *workset* a si atribuído. Ao longo da tarefa de modelação, os diferentes responsáveis vão sincronizando os modelos locais com o ficheiro central (a frequência da sincronização é definida pelo gestor de projeto), sendo este automaticamente atualizado. De seguida é explicado um exemplo simples (um pórtico) em que o engenheiro é responsável pela modelação de pilares e o modelador é responsável pela modelação de vigas.

Inicialmente, o engenheiro é responsável pela criação do modelo central. Deve definir os *worksets* e atribuir os elementos construtivos a esses mesmos *worksets*. Para definição dos *worksets*, na aba *Collaborate*, no separador *Manage Collaboration*, deve clicar sobre o ícone *Worksets* (Figura 42).

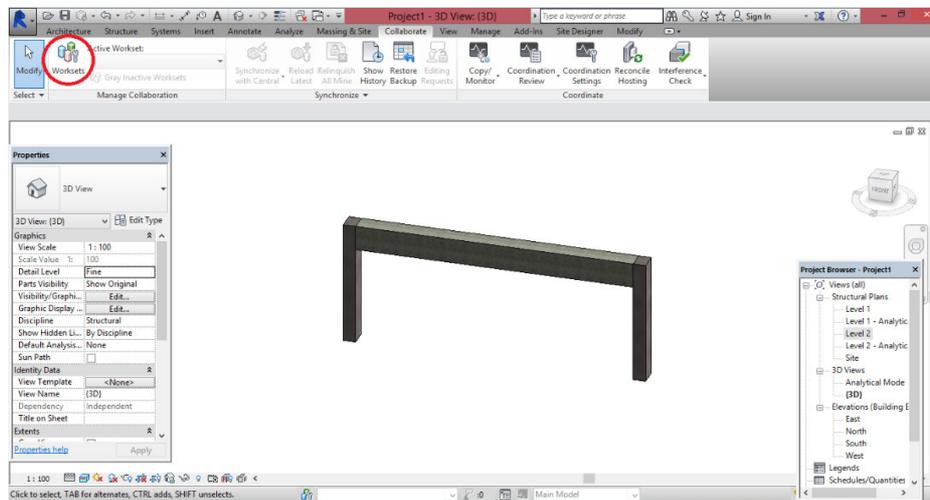


Figura 42 - Ícone Worksets.

Após clique no ícone *Worksets*, é apresentada uma janela ao utilizador (Figura 43), onde o *Revit* define dois *worksets* por defeito, um para o qual são movidas a grelha e os níveis (*Shared Levels and Grids*) e um outro para o qual são movidos os restantes elementos (*Workset1*). Assim, e no caso de o projeto ter já parte da estrutura modelada, esta é toda definida como pertencendo ao *Workset1*. Os nomes dos *worksets* padrão podem ser alterados.

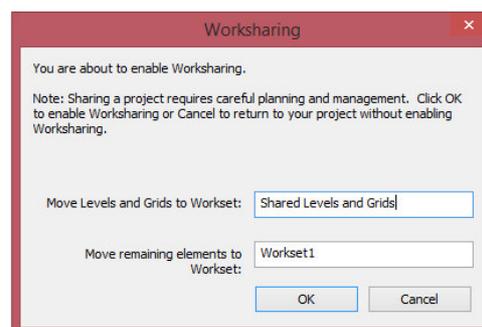


Figura 43 - Worksets definidos automaticamente.

O engenheiro pode, depois, criar novos *Worksets* que, neste caso, serão “Vigas” e “Pilares” (Figura 44). No processo de criação o engenheiro pode definir se os *worksets* que está a definir são editáveis (neste caso é ele o “dono” do *workset*) ou não (“dono” do *workset* será outro colaborador) e pode ainda definir se são visíveis ou não nos restantes *worksets*, isto é, quando se trabalha sobre esta metodologia estará sempre ativo apenas um *workset*, e no caso de não

serem visíveis os restantes, o utilizador poderá apenas ver os elementos associados ao *workset* aberto. Na aba inferior do *Revit* é possível verificar e alterar o *workset* ativo (Figura 45).

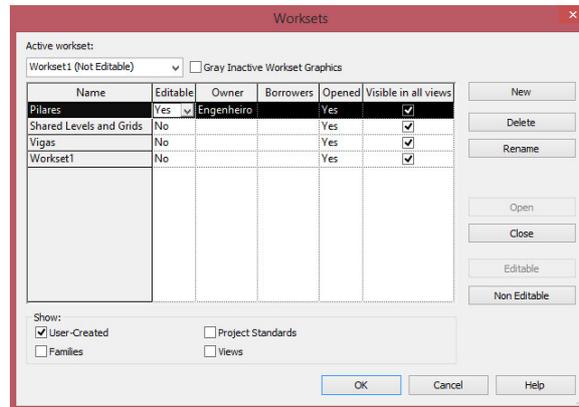


Figura 44 - Worksets “Vigas” e “Pilares” criados pelo engenheiro.



Figura 45 - Workset ativo

Os *worksets* criados estão vazios, ou seja, não contêm qualquer elemento associado. Para associar elementos, estes devem ser selecionados e, no quadro *Properties*, em *Identity Data*, é selecionado o *workset* pretendido (Figura 46).

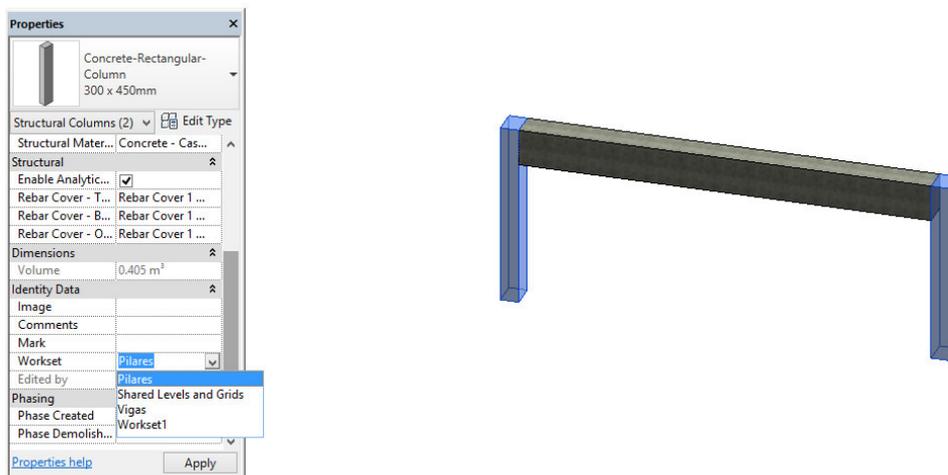


Figura 46 - Associação de elementos ao workset correto.

O mesmo processo deve ser repetido para os restantes elementos. Após associados todos os elementos aos respetivos *worksets*, o ficheiro pode ser guardado, e será o ficheiro central. No caso de o modelador não querer restringir a utilização do modelo, poderá ativar a opção

Relinquish All Mine (na aba *Collaborate*), em que dá permissão a qualquer outro utilizador para editar elementos sobre o qual é “dono” (Figura 47).

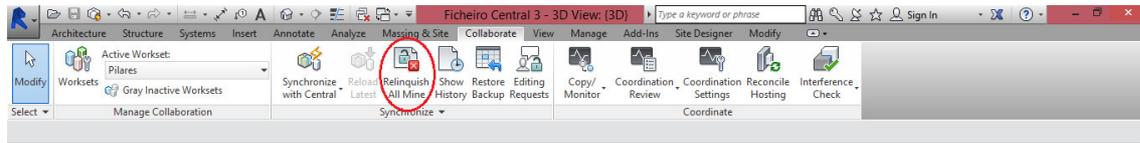


Figura 47 - Comando *Relinquish All Mine*.

Definido o ficheiro central, este pode ser acedido pelos diferentes utilizadores, neste caso, pelo modelador. Ao aceder, e tal como foi referido anteriormente, irá ser criado um novo ficheiro, ficheiro local (guardado em Documentos, com o mesmo nome do ficheiro central, seguido de *underscore*, seguido do nome do utilizador), sendo que podem ser abertos todos os *worksets* ou apenas os que o utilizador pretender (Figura 48). No caso de o modelo não ser pesado, é recomendável que todos os *worksets* sejam abertos, para que os elementos possam servir de referência para a criação de novos.

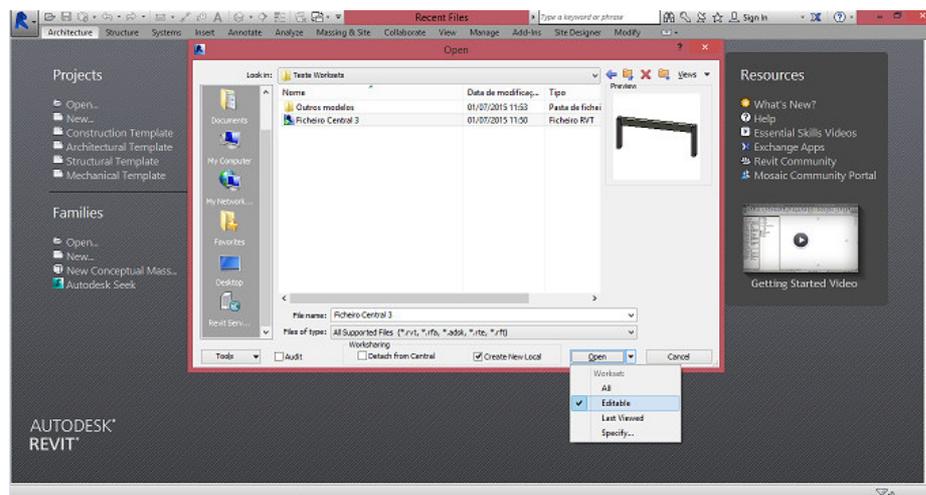


Figura 48 - Acesso ao ficheiro central.

Com o ficheiro local criado, o modelador deve aceder novamente ao menu das *Worksets*, e definir-se como dono da *workset* pela qual é responsável, neste caso, a *workset* “Vigas” (ver Figura 49). A *workset* “Vigas” não tinha “dono” associado, logo pode ser editada pelo modelador, mas no caso de este tentar definir-se como dono das *worksets* pertencentes ao engenheiro o *Revit* não permitiria.

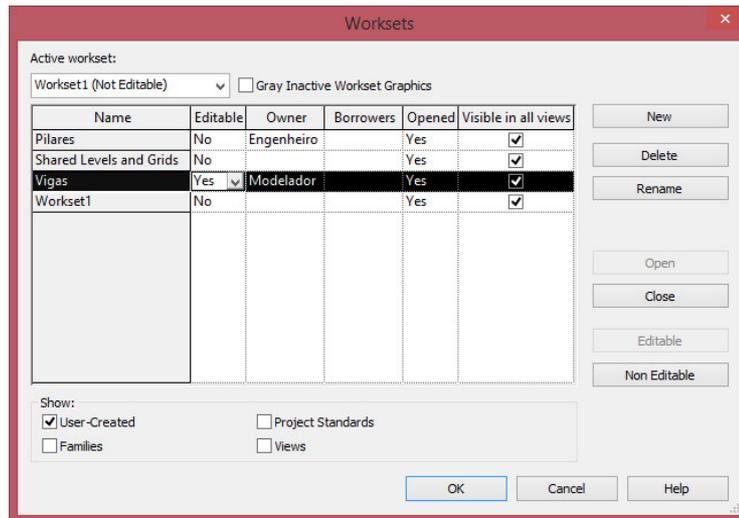


Figura 49 - Associação da workset "Vigas" ao modelador.

O modelador pode, então, editar as vigas do modelo e criar novos elementos, que serão associados à *workset* ativa. No caso de tentar alterar elementos associados ao engenheiro, como os pilares, será impedido pelo *software*, mas tem a opção de enviar um pedido ao engenheiro para alterar o elemento em questão. Esse pedido será apresentado ao engenheiro quando este abrir o seu ficheiro, e pode permitir ou negar o acesso ao elemento por parte do desenhador (ver Figura 50 e Figura 51).

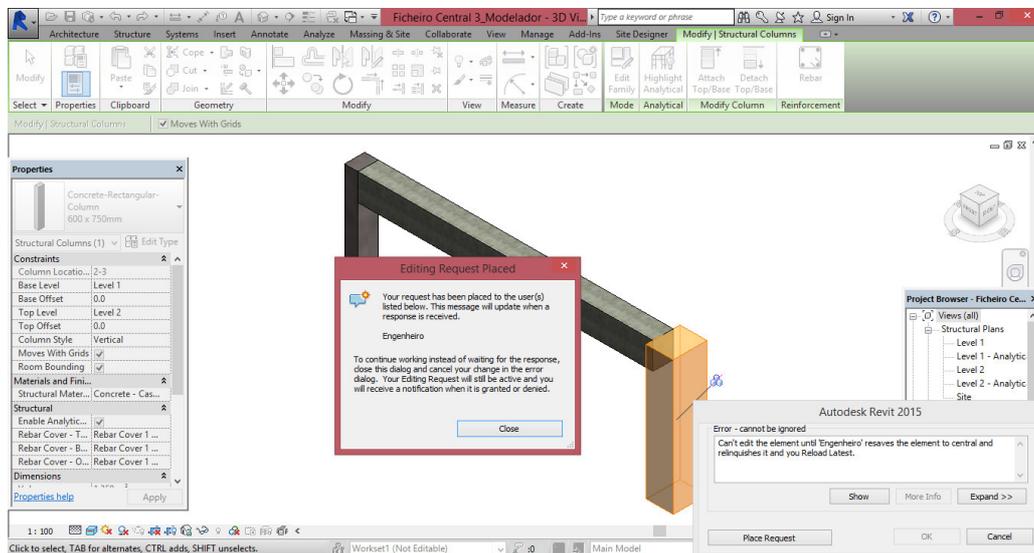


Figura 50 - Alteração de pilar negada e consequente pedido ao engenheiro.

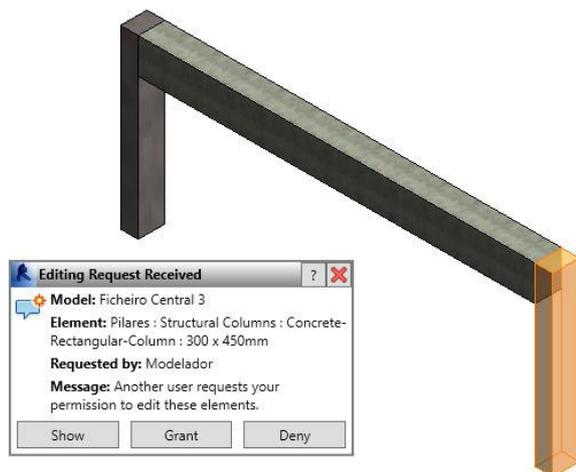


Figura 51 - Pedido de alteração apresentado ao engenheiro.

A sincronização do ficheiro local com o ficheiro central é realizada através do comando *Synchronize With Central*, presente na aba *Collaborate* (ver Figura 52).



Figura 52 - Comando *Synchronize With Central*.

Por último, no caso de o modelo estar finalizado e o modelador pretender evitar qualquer tipo de alteração, pode criar uma *workset* com todo o modelo e definir-se como “dono”. Este processo permitirá apenas ao modelador produzir *deliverables*, tais como desenhos, mapas de quantidades, entre outros.