



APLICAÇÃO DA METODOLOGIA BIM AO PROJETO DE PONTES - CASO PRÁTICO

RICARDO FILIPE FREITAS PINTO

novembro de 2016

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA BIM AO PROJETO DE PONTES

– CASO PRÁTICO

RICARDO FILIPE FREITAS PINTO

Projeto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS

Orientador: Professor Ricardo Pereira Santos

Supervisor: Eng.º José Luís Barbosa (GEG – Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Lda.)

OUTUBRO DE 2016

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xix
Abreviaturas	xxi
1. Introdução.....	1
2. Estado da Arte.....	5
3. Caso de Estudo.....	27
4. Considerações Finais.....	81
Referências Bibliográficas	87
Anexo I – Desenhos 2D da Ponte disponibilizados pela Empresa.....	91
Anexo II – Visualização 3D da Ponte em Revit	95
Anexo III – Rotinas Dynamo Desenvolvidas	97

RESUMO

O presente trabalho refere-se a um projeto para conclusão de Mestrado em Engenharia Civil – ramo de Estruturas no Instituto Superior de Engenharia do Porto. O projeto foi desenvolvido em regime parcial, na empresa GEG – Gabinete de Engenharia e Geotecnia, tendo como objetivo principal a implementação da metodologia BIM no setor da engenharia civil ligado ao projeto de pontes vigadas pré-esforçadas, que neste contexto se denomina por BrIM (Bridge Information Modeling).

Assente na crescente evolução tecnológica que visa a modernização atual do setor da construção civil no mundo, pretende-se com este trabalho analisar ou testar as reais capacidades e potencialidades da implementação da metodologia BrIM, bem como avaliar as suas limitações ou dificuldades de aplicação.

Dentro de um contexto atual de aplicação do BIM muito acentuado em áreas estruturais mais ligadas aos projetos de edifícios, a aplicação desta metodologia já está bastante inserida no habitat natural das empresas. Neste caso de estudo, de aplicação desta metodologia num setor dos projetos de pontes são assumidos, à partida, múltiplas condicionantes ligadas à criação do modelo tridimensional (3D). Com foco na concretização deste objetivo foram utilizadas as ferramentas da AutoDesk ligadas à aplicação do BIM, o Revit e a sua extensão, o Dynamo.

Sabendo de antemão as potencialidades destes *softwares* no desenvolvimento de modelos BIM em edifícios, a sua aplicação e concretização em pontes torna-se o desafio principal deste projeto. Sendo o Revit uma ferramenta BIM com múltiplos benefícios para a aplicação da metodologia no seu global, em pontes o desafio da modelação recaiu na utilização da sua extensão Dynamo. Neste caso, trata-se de uma ferramenta ainda pouco utilizada e explorada no âmbito do BIM, acarretando assim, dificuldades ligadas à obtenção de informação viável para a sua aplicação direta em projetos de pontes, bem como o facto de se tratar de um *software* de programação visual.

Pretende-se com este *software*, o Dynamo, criar rotinas operativas na modelação de alguns órgãos específicos das obras de arte, contornando assim a referida limitação do Revit para a modelação deste tipo de estruturas.

Palavras-chave: Pontes; BIM; BrIM; Revit; Modelação 3D Paramétrica; Dynamo; Programação Visual

ABSTRACT

This work is a project for Master Degree in Civil Engineering - Structural branch in the Institute of Engineering of Oporto. The project was developed in part-time, at the company GEG - Office of Engineering and Geotechnics, having as main objective the implementation of BIM methodology in the civil engineering sector linked to the design of pre-stressed with beams bridges, which in this context is called BrIM (Bridge Information Modeling).

Based on increasing technological developments aimed at the current modernization of the construction industry in the world, the aim of this work to analyze or test the actual capacity and potential of the implementation of BrIM methodology, and evaluate their limitations or implementation difficulties.

Within the current context of BIM implementation in structural areas most linked to projects of buildings, the application of this methodology is already inserted into the natural habitat of the companies. In this case study, the application of this methodology in a sector of bridge projects is undertaken at the outset multiple conditions relating to the creation of three-dimensional model (3D). Focusing on achieving this goal, we used the AutoDesk tools related to the implementation of BIM, Revit and its extension, Dynamo.

Knowing the potential of this software in the development of BIM models in buildings, their application and implementation on bridges becomes the main challenge of this project. Being Revit one of the BIM's tool with multiple benefits for the application of the methodology, with bridges the challenge of modeling involved the use of its Dynamo extension. In this case, it's little used and explored tool in BIM, resulting thus difficulties associated with obtaining reliable information for their direct application in bridge projects, as well as the fact that it is a visual programming software.

The aim of this software, Dynamo, is create operational routines while it's modeling some works of art, circumventing the limitation of Revit for modeling this type of structures.

Keywords: Bridges; BIM; BrIM; Revit; Parametric 3D modeling; Dynamo; Visual Programming.

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para que tenha sido possível a realização desta dissertação de mestrado.

Ao meu orientador, Professor Ricardo Pereira Santos agradeço o apoio disponibilizado para a realização deste projeto.

Ao meu chefe e coorientador Eng.º José Luís Barbosa pelo desafio proposto e pelo apoio prestado para a realização desta dissertação

Aos colaboradores da empresa GEG – Gabinete de Estruturas e Geotecnia, pelo apoio e motivação que sempre me deram ao longo de todo o curso.

Ao colaborador da empresa GEG Joel Soares por todo o apoio e motivação que me deu em relação ao BIM e as dicas para o Dynamo e Revit ao longo da realização desta dissertação.

Aos colegas e amigos do ISEP por todo o apoio e companheirismo ao longo de todo o curso.

Aos meus amigos pela amizade e compreensão por todos os momentos que em que não pude estar presente devido ao curso.

À minha namorada Adriana Sousa por todo o apoio incondicional nos momentos mais difíceis deste percurso. Pelas palavras de motivação e paciência que sempre demonstrou.

Por fim, um agradecimento à minha família e em especial à minha mãe e irmão pelo apoio e confiança demonstrada ao longo de todo o curso e pela compreensão sempre que não pude estar presente.

ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Âmbito e Objetivos.....	2
1.3.	Organização da Dissertação.....	3
2.	Estado da Arte.....	5
2.1.	<i>Bridge Information Modeling</i> (BrIM).....	5
2.1.1.	O conceito BrIM.....	5
2.1.2.	Evolução do BrIM.....	6
2.1.3.	Benefícios do BrIM.....	7
2.1.4.	Inconvenientes do BrIM.....	9
2.1.5.	Interoperabilidade.....	10
2.2.	<i>Softwares</i> BIM utilizados na Dissertação.....	11
2.2.1.	AutoCAD Civil 3D® 2017.....	11
2.2.2.	Autodesk® Revit Structure® 2017.....	11
2.3.	Programação Gráfica / Visual em Dynamo na Modelação.....	13
2.3.1.	Definição de programação visual/Gráfica.....	13
2.3.2.	Definição de Algoritmo.....	15
2.3.3.	Dynamo: <i>Interface</i> de programação visual.....	16
2.3.4.	Enquadramento Histórico da Programação Visual / Gráfica.....	19
2.3.5.	Visão Geral do Ambiente Dynamo.....	20
2.4.	Preparação da Modelação BIM.....	24
2.4.1.	Leitura e compreensão do modelo CAD.....	24

ÍNDICE DE TEXTO

2.4.2.	Objetivos de Desempenho BIM	24
2.4.3.	Escolha do <i>Add-in</i> do Revit para BIM.....	25
3.	Caso de Estudo	27
3.1.	Descrição do Caso de Estudo	27
3.1.1.	Apresentação.....	27
3.1.2.	Dados de Traçado	27
3.1.3.	Descrição da Estrutura.....	28
3.2.	Produção do Modelo BIM	31
3.2.1.	Folha de Cálculo em Excel para Integração no Dynamo.....	31
3.2.2.	Criação de famílias parametrizadas em REVIT	35
3.2.3.	Parametrização de Rotina em Dynamo	43
3.2.4.	Implantação do Terreno Natural	78
4.	Considerações Finais	81
4.1.	Conclusões	81
4.2.	Desenvolvimentos Futuros	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Vantagens da antecipação da tomada de decisões. Curva de MacLeamy, adaptado de (Council, 2007) (FERREIRA, 2011).	8
Figura 2.2 – Imagem de um “Code Block” no Dynamo para a criação de um ponto de coordenadas (0,0,0).	14
Figura 2.3 – Esquema representativo de blocos de caixa preta e caixa branca (VOGT, 2016)	15
Figura 2.4 – A lógica de um algoritmo (ALHADIDI, et al., 2014)	15
Figura 2.5 – Interoperabilidade entre o Dynamo e outros <i>softwares</i>	16
Figura 2.6 – Processo BrIM através da ligação do Dynamo, Excel e Revit. (<i>baseado em</i> (SGAMBELLURI, 2014))	17
Figura 2.7 – Fluxo de trabalho em Dynamo (<i>baseado em</i> (Guerra, 2014))	18
Figura 2.8 – SketchPad (1963)	19
Figura 2.9 – <i>Interface</i> do Dynamo (SGAMBELLURI, 2014)	20
Figura 2.10 – Biblioteca do Dynamo (JEZYK, et al., 2015)	21
Figura 2.11 – Exemplo de <i>Node</i> (JEZYK, et al., 2015)	22
Figura 2.12 – Diferentes tipos de estados dos <i>nodes</i> (JEZYK, et al., 2015)	23
Figura 2.13 – Representação dos fios e do sentido do fluxo do programa. (JEZYK, et al., 2015)	23
Figura 3.1 – Planta de localização da Obra de Arte Especial 1 em análise	27
Figura 3.2 – Alçado Longitudinal da ponte	28
Figura 3.3 – Corte Transversal do tabuleiro.	28
Figura 3.4 – Planta e alçado tipos das sapatas e pilares.	29
Figura 3.5 – Alçado da viga de encabeçamento (Travessa).	30
Figura 3.6 – Alçado lateral tipo do encontro	30
Figura 3.7 – Coordenadas base adotadas para a transformação das coordenadas.	32

Figura 3.8 – Alteração das coordenadas do ponto base do projeto.	32
Figura 3.9 – Alteração das coordenadas do ponto base do projeto para a origem nula.	32
Figura 3.10 – Folha de cálculo do projeto para o cálculo das coordenadas dos diversos elementos estruturais e geometria de traçado.	33
Figura 3.11 – “ <i>Corridor Points Report</i> ” – Relatório das coordenadas dos pontos do eixo viário do viaduto.	34
Figura 3.12 – Planta, alçado e quadro de parâmetros dos pilares no Revit, respetivamente da esquerda para a direita.	35
Figura 3.13 – Planta e alçado da família das sapatas no Revit.	36
Figura 3.14 – Quadro de parâmetros da família sapatas no Revit.	36
Figura 3.15 – Identificação dos elementos de extrusão vazios (<i>voids</i>) a criar.	37
Figura 3.16 – Elementos associados a parâmetros de visibilidade.	37
Figura 3.17 – Quadro para a criação dos parâmetros de visibilidade (tipo de parâmetro – Sim/Não).	38
Figura 3.18 – Quadro para criação de parâmetros.	38
Figura 3.19 – Parâmetros de família associados.	39
Figura 3.20 – Família travessa criada no Revit.	39
Figura 3.21 – Quadro de parâmetros.	41
Figura 3.22 – Elevação Lateral parametrizado.	42
Figura 3.23 – Elevação Frontal parametrizado.	42
Figura 3.24 – Visualização 3D.	42
Figura 3.25 – Vista Superior.	42
Figura 3.26 – Organização dos dados na folha de Excel.	44
Figura 3.27 – Layout geral da rotina do Dynamo para definição dos limites laterais da laje do tabuleiro e exportação das respetivas coordenadas.	44
Figura 3.28 – Importação de dados de geometria no Dynamo.	45
Figura 3.29 – Folha de Excel com os dados para importação no Dynamo.	45
Figura 3.30 – Parâmetros definidos na família adaptativa criada no Revit.	45
Figura 3.31 – Quadro de parâmetros e quadro de categoria da família adaptativa.	46

Figura 3.32 – Rotina do Dynamo para a criação do tabuleiro com família adaptativa.....	46
Figura 3.33 – Rotina Dynamo para filtragem de dados.....	47
Figura 3.34 – Rotina Dynamo para exportação de dados para folha de Excel.....	47
Figura 3.35 – Dados exportados do Dynamo para o Excel.....	47
Figura 3.36 – Código textual do Excel para retirar os números referentes às coordenadas.	48
Figura 3.37 – Coordenadas da laje do tabuleiro no sistema de eixos real.....	48
Figura 3.38 – Rotina Dynamo para a criação da família Laje do Tabuleiro.	48
Figura 3.39 – Imagem da laje do tabuleiro em ambiente Dynamo.....	49
Figura 3.40 – Imagem final da família adaptativa paramétrica da laje do tabuleiro no Revit.....	49
Figura 3.41 – Rotina Dynamo para implantação da laje do tabuleiro no projeto em Revit.	49
Figura 3.42 – <i>Layout</i> geral da rotina Dynamo para a criação e implantação das vigas.	50
Figura 3.43 – Corte longitudinal nos pilares.....	50
Figura 3.44 – Corte transversal da viga.	50
Figura 3.45 – Corte longitudinal nos encontros.	50
Figura 3.46 – Folha de Excel com as coordenadas transformadas para a implantação das vigas.	51
Figura 3.47 – Rotina Dynamo para a definição dos pontos que servirão de base para a implantação das vigas.	51
Figura 3.48 – Rotina Dynamo para a definição dos vetores para a orientação de cada viga.	52
Figura 3.49 – Rotina Dynamo para a translação dos pontos para as extremidades das vigas.	52
Figura 3.50 – Rotina Dynamo para a implantação das vigas.....	53
Figura 3.51 – Visualização 3D no plano de fundo do Dynamo.....	53
Figura 3.52 – Visualização 3D Revit após criação das vigas no projeto.	53
Figura 3.53 – <i>Layout</i> geral da rotina Dynamo para a definição dos Aparelhos de Apoio.	54
Figura 3.54 – Rotina Dynamo para implantação dos aparelhos de apoio.	55
Figura 3.55 – Rotina Dynamo para determinação do ângulo de rotação dos aparelhos de apoio.....	55
Figura 3.56 – <i>Node</i> para a rotação do elemento.....	56
Figura 3.57 – Implantação dos Aparelhos de apoio no Revit.....	56

Figura 3.58 – Rotinas Dynamo para edição dos parâmetros da família dos aparelhos de apoio.	56
Figura 3.59 – Imagem final dos aparelhos de apoio implantados no Revit.	57
Figura 3.60 – Pontos a definir do eixo na base da carlinga.	58
Figura 3.61 – Rotina Dynamo para determinação dos pontos de implantação dos aparelhos de apoio. .	59
Figura 3.62 – Rotina Dynamo para a definição dos vetores transversais do eixo das carlingas.	59
Figura 3.63 – Rotina Dynamo para obtenção dos pontos do eixo longitudinal da base da carlinga.	60
Figura 3.64 – Pontos (azul) referentes ao número 1 assinalado na rotina da figura 3.63.	60
Figura 3.65 – Pontos (azul) referentes ao número 2 assinalado na rotina da figura 3.63.	60
Figura 3.66 – Pontos (azul) referentes ao número 3 assinalado na rotina da figura 3.63.	60
Figura 3.67 – Rotina Dynamo para a definição das linhas do eixo longitudinal na base da carlinga.....	61
Figura 3.68 – Linhas (azul) referentes ao número 1 assinalado na rotina da figura 3.67.	61
Figura 3.69 – Linhas (azul) referentes ao número 2 assinalado na rotina da figura 3.67	61
Figura 3.70 – Visualização 3D no plano de fundo do Dynamo da linha do eixo da face inferior da carlinga.	61
Figura 3.71 – Rotina Dynamo para a definição das linhas laterais na base da carlinga.	62
Figura 3.72 – Visualização 3D no plano de fundo do Dynamo das linhas laterais na base da carlinga.	62
Figura 3.73 – Rotina Dynamo para definição do plano de referência para a criação das lajes.....	63
Figura 3.74 – Rotina Dynamo para projeção das linhas laterais da base da carlinga e definição das linhas transversais nas extremidades.	63
Figura 3.75 – Visualização 3D no plano de fundo do Dynamo das linhas rebatidas no plano horizontal..	63
Figura 3.76 – Rotina Dynamo para agrupar as linhas por alinhamento de encontros.....	64
Figura 3.77 – Rotina Dynamo para a criação da laje com face superior igual à face inferior da carlinga..	64
Figura 3.78 – Imagem Revit, ilustrativa da laje criada.....	65
Figura 3.79 – Criação do elemento de categoria parede correspondente à carlinga.	65
Figura 3.80 – União da laje e da parede para seccionar e definir a base da carlinga.	66
Figura 3.81 – Filtro do elemento laje após definição total da carlinga.	66
Figura 3.82 – Rotina Dynamo para a implantação das fundações, pilares e travessa.	67
Figura 3.83 – Rotina Dynamo para implantação e rotação das fundações.....	67

Figura 3.84 – Rotina Dynamo para criação dos pontos de inserção das fundações.....	68
Figura 3.85 – Rotina Dynamo para edição de parâmetros da fundação e implantação no Revit.....	68
Figura 3.86 – Rotina Dynamo para definição dos ângulos de rotação das fundações.....	69
Figura 3.87 – Rotina Dynamo para a rotação das fundações.....	69
Figura 3.88 – Imagem final das fundações no Revit.....	69
Figura 3.89 – Rotina Dynamo para implantação das travessas.....	70
Figura 3.90 – Rotina Dynamo para definição dos pontos de inserção da travessa.	70
Figura 3.91 – Rotina Dynamo para implantação das travessas no Revit.	71
Figura 3.92 – Visualização 3D do plano de fundo do Revit com a travessa implantada.....	71
Figura 3.93 – Rotina Dynamo completa para definição dos pilares.....	72
Figura 3.94 – Rotina Dynamo para definição dos pontos de inserção dos pilares e das travessas.	72
Figura 3.95 – Rotina Dynamo para criação das linhas base dos pilares e definição dos planos de corte.	73
Figura 3.96 – Rotina Dynamo para implantação dos pilares.....	73
Figura 3.97 – Visualização 3D no plano de fundo do Dynamo da definição dos pontos, linhas e planos (imagem da esquerda) e o resultado no Revit (imagem da direita).	74
Figura 3.98 – Família paramétrica da guarda.....	75
Figura 3.99 – Família paramétrica adaptativa da guarda.....	75
Figura 3.100 – Quadro de parâmetros da família paramétrica da guarda.....	75
Figura 3.101 – Rotina Dynamo (parte 1) para importação, organização e seleção de dados.	75
Figura 3.102 – Rotina Dynamo (parte 2) para criação de pontos e linhas referenciadas.	76
Figura 3.103 – Visualização 3D no plano de fundo do Dynamo, ilustrativa da definição linhas.....	76
Figura 3.104 – Divisão da linha em segmentos.	76
Figura 3.105 – Alterar para segmentos de 1m.	76
Figura 3.106 – Colocação da família guarda.....	77
Figura 3.107 – Executar comando “array”.....	77
Figura 3.108 – Criar forma da guarda.....	77
Figura 3.109 – Rotina Dynamo para a implantação das guardas no projeto.....	77

Figura 3.110 – Alerta do Revit ligadas às extensões da geometria elevadas.	78
Figura 3.111 – Alerta do Revit para a impossibilidade de alterar coordenadas.	78
Figura 3.112 – Imagem do terreno natural importado de um ficheiro desenvolvido em CAD.....	79
Figura 3.113 – Visualização 3D da ponte.....	79
Figura I.1 – Planta viária.	91
Figura I.2 – Alçado Longitudinal da ponte.	91
Figura I.3 – Corte Transversal do Tabuleiro.....	92
Figura I.4 – Alçado do alinhamento dos pilares.	92
Figura I.5 – Corte Longitudinal nos Pilares.	92
Figura I.6 – Corte Longitudinal nos Encontros.....	92
Figura I.7 – Esquema e coordenadas das fundações.....	92
Figura I.8 – Alçado Frontal de um Encontro da Ponte.....	93
Figura I.9 – Geometria dos Pilares e Fundações.....	93
Figura I.10 – Quadro de Coordenadas de Projeto.	93
Figura III.1 – Rotina Dynamo Implantação dos pilares, fundações e travessa.....	97
Figura III.2 – Rotina Dynamo criação das Carlingas sobre os pilares (parte 1).....	98
Figura III.3 – Rotina Dynamo criação das Carlingas sobre os pilares (parte 2).....	98
Figura III.4 – Rotina Dynamo criação das Carlingas sobre os pilares (parte 3).....	99
Figura III.5 – Rotina Dynamo criação das Carlingas nos Encontros (parte 1).	99
Figura III.6 – Rotina Dynamo criação das Carlingas nos Encontros (parte 2)	100
Figura III.7 – Rotina Dynamo criação das Carlingas nos Encontros (parte 3).	100
Figura III.8 – Rotina Dynamo Implantação das Guardas.	101
Figura III.9 – Rotina Dynamo Implantação das Vigas.	101
Figura III.10 – Rotina Dynamo Implantação dos Aparelhos de Apoio.	102
Figura III.11 – Rotina Dynamo exportação de coordenadas dos limites da laje do tabuleiro para uma folha de cálculo.	102

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas das fundações e da base dos pilares.	67
Tabela 2 – Coordenadas dos pontos no topo dos pilares	70

ABREVIATURAS

BIM – Building Information Modeling

BrIM – Bridge Information Modeling

CAD – Computer-aided Design (Desenho assistido por computador)

AEC – Arquitetura, Engenharia e Construção

API – Application Programming Interface

2D – Bidimensional

3D – Tridimensional

4D – Quarta Dimensão

5D – Quinta Dimensão

6D – Sexta Dimensão

MEP – Mechanical, Electrical and Plumbing

IFC – Industry Foundation Classes

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Durante longos anos de história da construção civil, a indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) tem sofrido evoluções importantíssimas para que se abranjam novos objetivos ou metas, que até à data não seriam possíveis. Dentro desta perspetiva evolutiva do setor, insere-se a revolução industrial promovida pela integração do Desenho Assistido por Computador (CAD), que deixou para trás o desenho manual do projeto, mais recentemente a aplicação da metodologia *Building Information Modeling* (BIM), que, por sua vez, pretende tornar o processo CAD obsoleto.

Neste âmbito, a implementação da metodologia BIM nas empresas ligadas à indústria da AEC, tem como objetivo acabar com muitas das fragilidades inerentes à aplicação de um modelo assente no desenho bidimensional (2D) em CAD. Durante muitos anos amplamente utilizado, este modelo foi apresentando debilidades ligadas à ocorrência de erros e omissões de projeto que apenas eram detetadas em fases avançadas da realização do projeto ou em construção, acarretando diversas consequências desde alteração ao projeto inicial, demolições, realização de trabalhos a mais, com os consequentes aumentos dos custos e duração das obras.

Assim, o BIM apresenta-se atualmente como uma metodologia que promove um conjunto de ideais, ligados ao envolvimento dos diferentes intervenientes e partes interessadas (*stakeholders*) na realização do projeto, na criação de um modelo de informação da construção partilhado por todos. A partir desta metodologia, os intervenientes podem assim partilhar a informação entre eles, tendo por base um modelo tridimensional com a informação do projeto.

Inteiramente ligada à implementação do BIM está assente o surgimento de novos *softwares* cada vez mais capazes e providos de ferramentas inovadoras que possibilitam e pressionam o impulsionamento da metodologia BIM nas empresas da indústria da AEC.

Uma das ferramentas BIM mais utilizadas neste âmbito é o Revit da empresa AutoDesk, que apesar de estar já bastante desenvolvida para a modelação de edifícios, no caso das pontes apresenta, ainda, muitas limitações. Assim, tendo em vista o mercado do projeto de pontes, a AutoDesk apresenta duas extensões de forma a colmatar esta falha do *software* Revit, o Dynamo e o Bridge Module.

1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS

Em concordância com o enquadramento referido anteriormente, este trabalho tem como objetivo principal a implementação do BIM em projetos de pontes em betão armado. Partindo deste princípio de concretização expectável, a sua implementação implica a realização de um conjunto de objetivos intermédios. Neste contexto surge como ponto crucial, a realização de um modelo tridimensional (3D) realista de uma ponte do tipo vigada em betão armado, que suportasse todo o envolvimento da aplicação da metodologia BIM. Para a realização deste modelo 3D foi proposto a análise das capacidades do *software* da Autodesk ligado ao BIM, o Revit e a sua extensão, o Dynamo.

Partindo de uma análise profunda do estado da arte da aplicação da metodologia BIM em projetos de pontes em betão armado, foi necessário reajustar objetivos, perante conclusões obtidas logo em fase inicial do desenvolvimento do trabalho, visando assim a mudança do enfoque da análise, para a exploração das potencialidades da utilização do Dynamo, como ferramenta para a definição de elementos mais complexos ou formas menos padronizadas.

Neste âmbito descrito, pretendeu-se, assim, com a realização deste projeto atingir os seguintes objetivos:

- Analisar o estado da arte da metodologia BIM em projetos de pontes vigadas pré-esforçadas de betão armado;
- Avaliar as potencialidades, desenvolvimentos presentes e futuros da aplicação das ferramentas BIM em projetos do âmbito referido;
- Estudo dos diversos órgãos constituintes das obras de arte;
- Integração das ferramentas Revit, Dynamo, Civil 3D e Excel com os seguintes objetivos:
 - Modelação 3D rigorosa da geometria do traçado de uma ponte;
 - Criação de famílias estruturais e não estruturais, por forma a serem parametrizáveis e facilmente alteradas e adaptadas a cada projeto específico. É fundamental a criação de uma base de dados robusta, detalhada e parametrizável por forma a acelerar os processos de modelação e obtenção das peças processuais do projeto;
 - Importação dos parâmetros viários do programa de modelação de vias (Civil 3D) para o Revit, a partir da interligação entre o Civil 3D, o Excel e o Dynamo, por forma a modelar a superfície superior do tabuleiro (plano de rolamento);
 - Geração de cotas e coordenadas de implantação dos diversos órgãos constitutivos da estrutura, como sejam as vigas pré-fabricadas, aparelhos de apoio, carlingas, travessas,

pilares, encontros e fundações, com base na georreferenciação do modelo tridimensional. Inclui-se neste ponto a adaptação da estrutura a todos os condicionalismos sejam de traçado, topográficos, construtivos, ou outros;

- Integração do terreno natural na modelação;
- Obtenção da documentação do projeto.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está dividido em quatro capítulos principais, sendo o primeiro o da Introdução.

O segundo capítulo refere-se ao Estado da Arte, onde foram desenvolvidos, de forma teórica, todos os temas chave deste projeto, estando dividido em quatro subcapítulos que se apresentam sucintamente, nos parágrafos seguintes:

- O primeiro subcapítulo faz a abordagem ao tema “*Bridge Information Modeling*” (BrIM) e à sua evolução ao longo dos últimos anos. São aqui analisados os benefícios e inconvenientes ligados à sua aplicação, bem como a sua interoperabilidade no BIM.
- No segundo subcapítulo apresentam-se e analisam-se os *softwares* BIM utilizados nesta dissertação.
- No terceiro subcapítulo é feita referência à programação visual em Dynamo, ligada à modelação em Revit. São assim definidos os conceitos de programação visual ou gráfica com particular ênfase em relação ao Dynamo. É realizado um enquadramento histórico da programação visual, a definição do conceito algoritmo e efetuada uma visão geral do ambiente Dynamo.
- Por fim, o quarto subcapítulo aborda a preparação da modelação em BIM; tendo em conta que os projetos de pontes ainda são realizados em CAD, é abordada a análise a este tipo de dados e estabelecidos objetivos de desempenho BIM associados à escolha do *add-in* do Revit.

O terceiro capítulo está dividido em dois subcapítulos, sendo o primeiro a apresentação do caso de estudo desenvolvido e a descrição dos dados essenciais de traçado e estruturais, essenciais para uma melhor interpretação e conseqüente acréscimo de eficiência e qualidade na modelação. No segundo subcapítulo é desenvolvida a parte prática da dissertação ligada à produção do modelo BIM, desde a interação do Excel com o Dynamo, passando pela criação de famílias paramétricas no Revit até à realização das rotinas em Dynamo.

CAPÍTULO 1

Por fim, no quarto capítulo, “Conclusões e Desenvolvimentos Futuros” são apresentadas as conclusões obtidas com a realização deste trabalho, bem como as ilações a tirar de forma a melhorar o processo de modelação, e a ser possível integrar a metodologia completa do BrIM.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. BRIDGE INFORMATION MODELING (BRIM)

2.1.1. O conceito BrIM

O BrIM (*Bridge Information Modeling*) surgiu como uma especificação ao ramo de pontes de uma metodologia aplicada às construções em geral designada por BIM (*Building Information Modeling*). Assim, podemos definir o BrIM como um conceito, metodologia ou tecnologia que consiste na criação de um modelo virtual tridimensional coordenado da ponte, onde todos os documentos de construção e as características intrínsecas de toda a estrutura são armazenados numa base de dados, inteiramente ligada às características geométricas da ponte e partilhada por todos os intervenientes durante todas as fases do ciclo de vida da ponte (projeto, construção, manutenção, demolição), nomeadamente entre as diversas especialidades, construtores e o dono de obra.

Embora todo o modelo de gestão do processo aconteça em torno de um modelo 3D da estrutura, existem ainda outras dimensões, que importa referir, quando se aborda o BIM na construção de pontes, como sejam a 4D, a 5D e a 6D:

- Quarta dimensão (4D) corresponde à inclusão do fator tempo na modelação tridimensional (3D), correspondendo à sequência do projeto em tempo real e agendamento de tarefas ou fluxos de trabalho;
- Quinta dimensão (5D) inclui a integração do modelo 3D com o tempo e custo estimados para cada fase da construção durante todo o ciclo de vida;
- Sexta dimensão (6D) integra a 4D e 5D dimensões com a gestão da manutenção da ponte até ao fim do seu ciclo de vida.

De referir que as dimensões do BIM têm vindo a evoluir ao longo do tempo, correspondendo cada nova dimensão à integração na medida de uma nova valência.

2.1.2. Evolução do BrIM

Embora não se trate de uma ideia nova, a aplicação da metodologia BrIM, tem evoluído e vem-se desenvolvendo ano após ano, mas mesmo assim de forma mais lenta relativamente ao BIM (*Building Information Modeling*) aplicado a edifícios. Assim, tendo em conta este atraso, o desenvolvimento e evolução das ferramentas disponíveis para pontes também acompanha este ritmo mais lento relativamente a edifícios.

Embora dentro dos mesmos objetivos e fundamentos do BIM, os desafios ligados à implementação do BrIM assentam essencialmente no desenvolvimento do modelo tridimensional de toda a ponte, devido às evidentes diferenças da estrutura relativamente aos edifícios. No caso da aplicação do BIM em edifícios, com base em famílias e objetos paramétricos, já disponíveis em bibliotecas internas ao *software* e outros criados facilmente pelos utilizadores, torna-se mais fácil e rápida a gestão de toda a informação. (MONTEIRO, et al., 2011) No caso de pontes, as diferenças evidentes ao nível da geometria (curvas, clotóides, desníveis, inclinações, etc.), bem como na própria estrutura (vigas, carlingas, tabuleiro, cornijas, pilares, encontros, etc.), resultam numa modelação em três dimensões (3D) do BrIM logo à partida muito mais complexa.

Contudo, devido ao crescimento económico e tecnológico ao longo dos últimos anos e à exigência por parte dos utilizadores e dos consumidores do produto final, tornou-se essencial o surgimento de novos *softwares* e novas funcionalidades em *softwares* existentes, capazes de assegurar em primeiro lugar, a total modelação tridimensional da ponte, para que seja possível a implementação da metodologia alargada do BrIM.

Atualmente existe uma panóplia de *softwares* com ferramentas BrIM, entre os quais o Revit e o Tekla, os mais comuns entre nós, que possibilitam a implementação da metodologia para todo o ciclo de vida da ponte.

Nesta dissertação, foram avaliadas as capacidades do Revit para aplicação do BrIM para desenvolver um modelo tridimensional de pontes com complexidade geométrica elevada através da extensão Dynamo ligada ao Revit.

2.1.3. Benefícios do BrIM

Para se perceber os benefícios da aplicação da metodologia BrIM importa referir o processo convencional, para a elaboração de um projeto sem BrIM. Em fase de projeto, este processo assenta no desenvolvimento de um conjunto de desenhos bidimensionais (2D) organizados e desenvolvidos pelas diferentes especialidades, em que cada equipa de trabalho desenvolve o seu processo independentemente, dando origem a erros e omissões, que apenas serão detetados em fases posteriores à realização do projeto. Com a aplicação da metodologia BrIM, estas situações são perfeitamente evitáveis, sendo este um dos principais efeitos/benefícios da adoção desta metodologia. Porém, esta é apenas uma das potenciais vantagens identificadas para a indústria da construção, de que são ainda exemplos (POÇAS MARTINS, 2009) (MEADATI, 2009):

- Observação e análise do modelo tridimensional contribuem para uma melhor abordagem da construção e análise de eventuais opções alternativas;
- Automatização dos fluxos de trabalho;
- As alterações efetuadas são replicadas rápida e diretamente por toda a documentação envolvida;
- Redução do número de alterações mais graves em fase posteriores ao projeto devido à deteção e eliminação de eventuais erros e omissões em fases preliminares;
- Padronização e codificação dos dados, evitando-se assim erros associados à inserção repetida de dados;
- Partilha de informação ao longo do projeto é mais rápida e clara, através da centralização num único modelo, trazendo benefícios claros na sua produtividade;
- Projetos com maior detalhe, permitindo um melhor entendimento por parte dos intervenientes, inclusive melhor perceção dos desenhos na fase de construção;
- Produção de informação de forma mais expedita e fiável;
- Reutilização da informação, aumentando assim a eficiência;
- Otimização geral dos custos e prazos na execução de tarefas;
- Melhor análise geométrica;
- Maior precisão na obtenção das quantidades e estimativas orçamentais.

Para além destes benefícios da adoção do BIM nos processos de gestão de todo o projeto, podemos perceber através do gráfico da figura 2.1, as diferenças entre o método tradicional de projeto (linha 3) e o método alternativo (BIM) (linha 4).

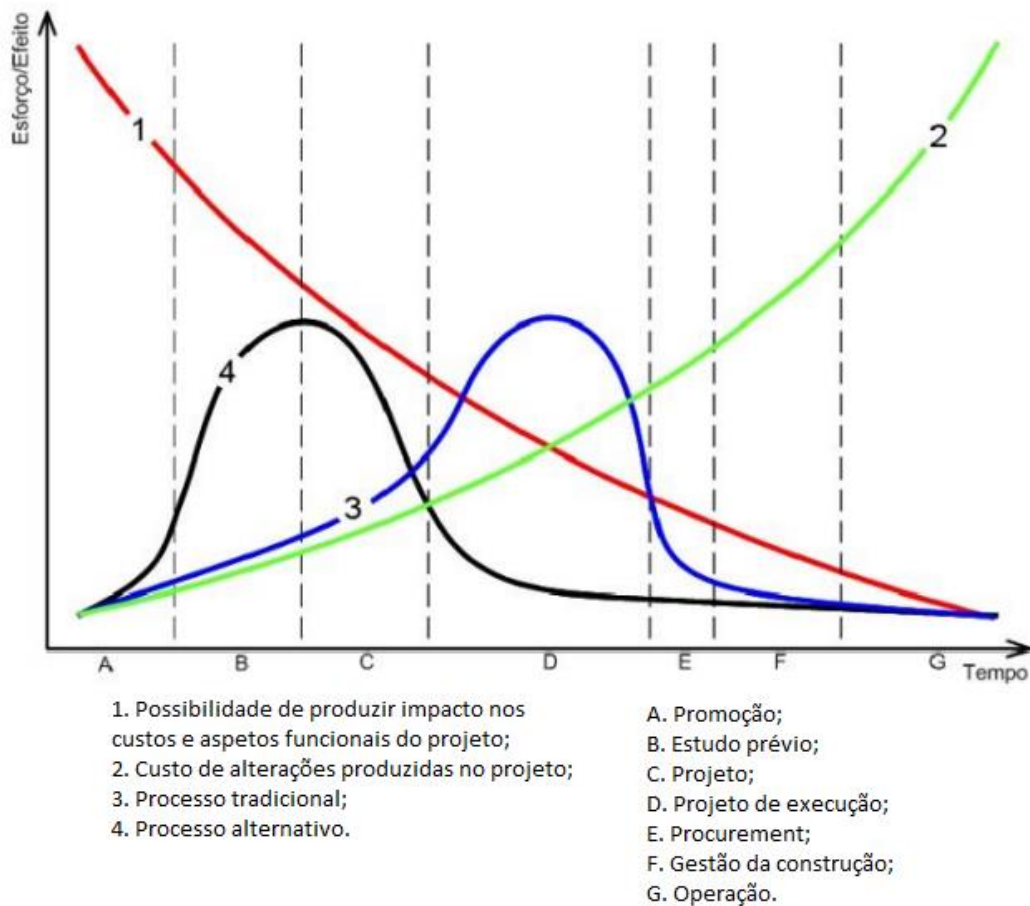


Figura 2.1 – Vantagens da antecipação da tomada de decisões. Curva de MacLeamy, adaptado de (Council, 2007) (FERREIRA, 2011).

Conforme se pode ver no gráfico de MacLeamy (Council, 2007), a implementação do BIM no processo alternativo, condiciona eficiente e economicamente a capacidade de impacto do custo e das capacidades funcionais no ciclo de vida do projeto, sendo a altura de maior esforço nas fases de estudo prévio e de projeto, contrariando o sucedido nos processos tradicionais em que o maior esforço é feito numa fase já posterior ao projeto, em projeto de execução. Desta forma, pode-se concluir que efetivamente a metodologia impõe uma gestão da informação mais eficiente e com melhorias significativas na antecipação para a fase de projeto, de eventuais alterações futuras. (FERREIRA, 2011)

2.1.4. Inconvenientes do BRIM

Dentro destas limitações ou inconvenientes, podem ser mencionados os seguintes pontos de análise:

- Devido à complexidade de alguns *softwares*, o processo de aprendizagem é bastante moroso, exigindo por parte das empresas uma maior aposta na formação concedida pelas empresas;
- Falta de informação disponível na Internet, acerca de determinados *softwares*;
- Olhando para a implementação do BIM numa empresa, ao nível do *software*, o tempo para a formação por vezes é condicionado por projetos em curso com prazos para cumprir, que faz com que as formações passem para segundo plano e atrase o processo de aprendizagem;
- A implementação do BIM numa empresa, ao nível dos processos de gestão, requer também, uma normalização e regulamentação de processos e procedimentos BIM que dentro da empresa, quer para o relacionamento com as empresas associadas a um projeto. Esta normalização requer bastante tempo desde a preparação dos processos até à sua implementação coordenada;
- Inexistência de regulamentação em vigor para a aplicação do BIM em Portugal;
- Custos do *software*; dependendo da dimensão da empresa, por vezes a implementação de um *software* BIM implica custos muito elevados que comprometem a sua utilização;
- Custo para a melhoria do *hardware* atual da empresa. Normalmente estes novos *softwares* BIM exigem muito mais do *hardware*, sendo suscetível ter de haver uma melhoria geral das capacidades dos computadores, para que os novos *softwares* funcionem a bom nível, de forma a tirar o máximo proveito e não condicionar prazos;
- *Software* com especializações e aplicações diferentes, em que cada programa usa o seu próprio formato de arquivo de dados e por vezes a sua leitura por parte de outros programas é incompatível.
- Para solucionar o ponto anterior, criou-se o formato IFC (referido no subcapítulo seguinte) de forma a permitir a interoperabilidade entre os programas. Constata-se que mesmo este formato apresenta algumas limitações, pois perde informação quando utilizado por outros programas;

Contudo, é importante referir que muitos dos pontos mencionados atrás, embora sejam condicionantes a curto prazo, a médio/longo prazo tornam-se nulos e o retorno do investimento, segundo vários estudos já efetuados, é bastante evidente.

2.1.5. Interoperabilidade

Aliada à tentativa de modernização do setor da construção civil, tem sido lançadas ao longo dos últimos anos novas ferramentas BIM por diversas empresas fabricantes de *software*. Embora com objetivos equiparados entre si, funcionam de maneiras diferentes e apresentam um conjunto de funcionalidades também diversificadas. Desta forma, na hora de definir o *software* a utilizar para o projeto dever-se-á ter em conta as suas potencialidades, de maneira a que o utilizador possa tirar o máximo proveito do *software*. Contudo, para o desenvolvimento de um projeto, são necessários vários *softwares*, tendo em vista a realização de várias especialidades do projeto. Tendo em conta que o projeto está partido e distribuído por especialidades, por diferentes empresas especializadas em determinadas matérias, cada um dos intervenientes no projeto pode utilizar *softwares* diferentes entre si. Com o objetivo de assegurar a ligação entre estes diferentes *softwares* e dar continuidade na aplicação BIM, a organização BuildingSMART desenvolveu um formato normalizado e aberto designado por IFC (*Industry Foundation Classes*), permitindo assim a troca de informações de objetos 3D. Desta forma, torna-se possível a utilização dos diferentes *softwares* BIM ao longo das diferentes fases de projeto, usufruindo das vantagens ligadas à visualização atualizada do modelo 3D, análise e edição. Eliminando-se assim a necessidade de repetir a introdução de dados já concebidos anteriormente, imprimindo rapidez nos processos, minimizando os desperdícios e tempo.

Apesar desta grande inovação, existem atualmente, ainda assim, alguns entraves à interoperabilidade entre alguns *softwares* BIM relacionado com a implementação e versão de cada software, sendo esta uma das áreas ainda a explorar e desenvolver. (FERREIRA, 2011) Conforme desenvolvido nesta dissertação, o facto de serem utilizados *softwares* da mesma empresa fabricante, permite um grau de interoperabilidade bastante consistente, dispensando *softwares* intermédios para efetuar a interoperabilidade.

2.2. SOFTWARES BIM UTILIZADOS NA DISSERTAÇÃO

Tendo como objetivo a utilização de um *software* da companhia AutoDesk para a modelação BIM, a escolha do *software* recaiu no Revit. Esta escolha teve em conta a possibilidade de utilização de uma extensão de maior foco na modelação de pontes, o Dynamo. Foi ainda inicialmente utilizado o AutoCAD Civil 3D para criação do corredor do viaduto, o que irá permitir exportar para o Revit a geometria do plano de rolamento da ponte em análise.

2.2.1. AutoCAD Civil 3D® 2017

Este *software* foi o ponto de partida para o desenvolvimento de todo o processo de modelação. A partir do projeto de vias gerado e representado em AutoCAD Civil 3D obteve-se a informação relevante para a modelação, tal como a localização dos elementos estruturais coordenados, topografia, curvaturas de tramos, etc.

2.2.2. Autodesk® Revit Structure® 2017

O *software* Revit foi desenvolvido especificamente para o modelo de construção BIM, oferecendo ferramentas para a conceção de arquitetura, engenharia MEP (mecânica, eletricidade e águas), engenharia estrutural e construção, permite a coordenação e ligação entre estas diferentes especialidades. (VOGT, 2016)

Este *software* foi inicialmente desenhado para a modelação de edifícios com todos os componentes em si subjacentes, mas com a evolução tecnológica ao longo dos últimos anos, crescente necessidade de melhoria de processos e expansão do BIM no ramo de pontes, o *software* evoluiu e atualmente detém duas extensões providas de funcionalidades para desenvolver projetos de pontes: Autodesk® Revit Structure Extensions® e o Dynamo®.

Com a utilização destas extensões ligadas ao Revit é possível a modelação da geometria da estrutura, das armaduras, a interoperabilidade e a obtenção organizada de toda a documentação inerente à sua construção, extraído diretamente do modelo BIM criado no Revit. Permitindo a introdução de elementos referentes a outras especialidades, como sejam ligados à drenagem, iluminação, segurança, bilhética, etc, que em conjunto com a modelação da estrutura em si, permitirá completar o modelo e a deteção de eventuais incompatibilidades entre eles.

O Revit é um *software* de modelação paramétrica e suporta nativamente um conjunto de famílias de elementos estruturais (e não estruturais), tais como vigas, pilares, lajes e paredes que podem ser modificadas de forma a serem obtidos outros elementos. Esta solução, de modificação de famílias

existentes, torna-se muito vantajosa em fases posteriores, como por exemplo a de modelação das armaduras.

Existe ainda a possibilidade de criar elementos genéricos ou massas para elementos cuja forma ou tipo não se encaixa em nenhuma das categorias referidas anteriormente (vigas, pilares, lajes ou paredes). Embora nestes elementos se possa colocar armaduras, nestes casos não funcionam bem com as ferramentas automáticas de colocação de armaduras do Revit, obrigando assim a utilização do *add-in* Dynamo para a colocação das armaduras, sendo este um processo ainda pouco explorado e assim sendo bastante moroso.

Conforme referido anteriormente, o Revit apresenta ainda muita dificuldade na modelação de pontes geometricamente mais complexa, como por exemplo: pontes pré-esforçadas com cabos parabólicos, pontes em curva (parabólica) vertical e pontes com diferentes larguras da plataforma ou curvaturas complexas com espirais. (MAIER, 2012) Contudo, a partir da sua extensão Dynamo, torna-se possível resolver estes tipos de dificuldades inerentes às geometrias mais complexas, dada a possibilidade de programarem rotinas de modelação.

Nesta tese de mestrado pretende-se apresentar e testar as possibilidades inovadoras que a AutoDesk desenvolveu no Revit através da extensão Dynamo, de forma a eliminar estas fragilidades da modelação integral em Revit deste tipo de estruturas evidentemente mais complexas.

A utilização do Dynamo apresenta também uma enorme vantagem dada a sua possibilidade de ligação ao Excel, sendo possível a leitura de dados diretamente das folhas de cálculo. A vantagem reside no fato de ser possível programar uma folha de cálculo com os inputs geométricos para uma determinada estrutura, informação essa que é lida e processada pelo Dynamo, sendo depois exportada para o Revit para acertos finais da modelação. Esta é a grande mais-valia da interoperabilidade entre estes vários softwares referidos e que, com base numa boa programação, poderão agilizar fortemente todos os processos de modelação, com ganhos diretos para as empresas que implementam estas rotinas.

2.3. PROGRAMAÇÃO GRÁFICA / VISUAL EM DYNAMO NA MODELAÇÃO

Como referido anteriormente, apesar dos avanços já efetuados, tendo em vista as limitações dos *softwares* no que se refere à aplicação da metodologia BIM em casos de pontes com maior complexidade, a quantidade de informação e os ciclos rápidos de iteração de projetos, o desenvolvimento da terceira dimensão (3D) do BrIM torna-se bastante condicionado ou limitado por ferramentas padrão, muitas delas desenvolvidas a pensar na modelação de edifícios ou modelos mais simplistas e regulares. Houve, assim a necessidade de explorar outros campos, em áreas menos confortáveis para o utilizador comum de *software* BIM. Esta evolução tem por base a programação visual e textual, através de técnicas computacionais com *softwares* usando algoritmos. (KRON, 2013)

2.3.1. Definição de programação visual/Gráfica

“Linguagem de Programação visual é qualquer linguagem de programação que permite aos usuários criar programas manipulando elementos do programa graficamente ao invés de especificá-los textualmente. A programação visual permite a programação com expressões visuais, arranjos espaciais de texto e símbolos gráficos, usado tanto como elementos de sintaxe ou notação secundária.” (MYERS, 1990)

Esta é uma interação entre o utilizador e o *software* que é feita através de um interface gráfico de programação, que uma vez ligado a outro *software*, o utilizador é capaz de manipular parâmetros, componentes, geometria, documentos, entre outras ações, dependendo do *software* em que está instalado o *add-in*.

Através do estabelecimento de relações, combinações, ou sequências personalizadas entre *nodes* pré-criados, o utilizador consegue obter respostas imediatas conforme vai dando as instruções. Estes *nodes* podem ter entradas, saídas ou as duas opções em simultâneo, tendo embutido e escondido um código ou algoritmo de programação. Assim, é possível criar, combinar e modificar algoritmos, através de uma gestão criteriosa e lógica da ligação entre estes *nodes* pré-definidos e compartilhados na base de dados aberta, presente no Dynamo. (MYERS, 1990) (KRON, 2013)

Ao implementar os algoritmos, é possível ter um *feedback* e uma perceção lógica do algoritmo em tempo real, e assim perceber o estado de erro. Para isso, contribuem as características gráficas dos *nodes* com aparência semi-abstrata, que ao detetar alguma incompatibilidade, erro ou omissão, apresenta uma cor diferente do habitual, servindo assim para o utilizador como um sinal de alerta. Estes erros podem decorrer de múltiplos fatores, mas podem ser inseridos num dos três seguintes grupos: erros de entrada, erros de função e erros de saída. Tendo como principais razões o facto de a informação estar mal definida ou incompatível com o input necessário dos *nodes* de entrada. Ao ser

alertado do erro, o utilizador rapidamente percebe qual a sua origem, através dos seus botões, controles deslizantes, expressões matemáticas, ícones e cores dos *nodes* e procede à sua correção.

Code Block

As plataformas de programação visual, têm ao dispor dos utilizadores uma biblioteca (base de dados) com pacotes de *nodes* (*packages*) pré-criados, quer por outros utilizadores quer pela equipa de desenvolvimento original do *software*.

Os utilizadores mais avançados podem criar funcionalidades de acordo com as suas necessidades através da linguagem *script*, usando o *node Code Block* através de um editor de texto embutido na *interface*. Após serem criados, estes blocos podem ser convertidos num *node* e ficam reutilizáveis para outros algoritmos futuros de outros projetos.

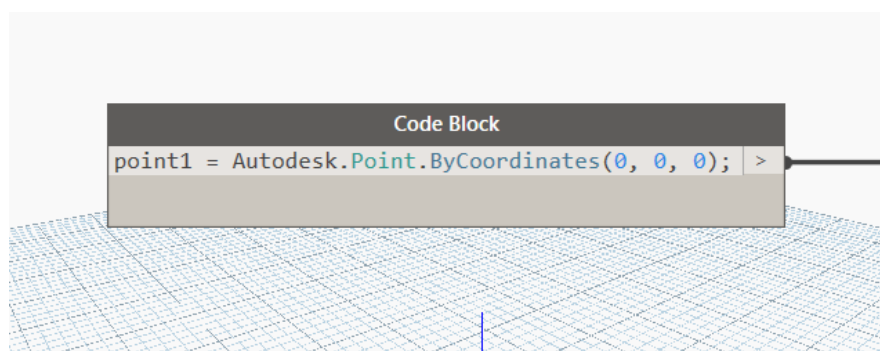


Figura 2.2 – Imagem de um “Code Block” no Dynamo para a criação de um ponto de coordenadas (0,0,0).

Black-Box vs White-Box

Na programação visual existem dois grupos de *nodes* bem definidos, os *nodes* de caixa branca (*white-box*) e os *nodes* de caixa preta (*black-box*). Ambos possuem uma codificação interna definida através de algoritmos internos (linguagem de programação visual) ou através de código de texto (linguagem de programação textual através do Python).

Apesar da sua semelhança visual, intrinsecamente eles contem características distintas, ou seja, o *nodes* caixa-branca permite o acesso ou modificação das suas características ou composição interior, enquanto que em *nodes* caixa-negra o seu código é oculto e conseqüentemente, não é possível alterar a sua codificação. Embora para o utilizador comum e independente, o *nodes* caixa-preta não seja muito prático, pois não é possível verificar as rotinas criadas, este *nodes* é apropriado para empresas, pois podem ser protegidos e escondidos os direitos de inteligência individual do criador dos algoritmos em relação à concorrência. (CORNELIUS, et al., 2015)

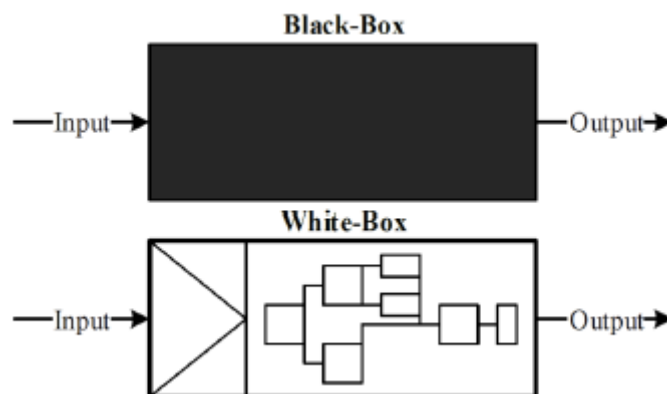


Figura 2.3 – Esquema representativo de blocos de caixa preta e caixa branca (VOGT, 2016)

2.3.2. Definição de Algoritmo

Dentro do âmbito da programação, quer gráfica, quer textual, a criação de algoritmos é um dos pontos principais a abordar. Assim, torna-se necessário primeiro percebermos o significado um algoritmo e qual o seu papel na programação.

“Um algoritmo é um conjunto finito de instruções que visam cumprir um propósito claramente definido num número finito de passos. Um algoritmo assume um valor ou um conjunto de valores como entrada, executa uma série de passos computacionais que transformam a entrada, e finalmente produz um valor ou um conjunto de valores como de saída. Algoritmos podem computacionalmente gerar e manipular entidades de *design*, como forma geométrica, variáveis de projeto, estruturas de dados que contêm entidades numéricas ou geométricas, expressões matemáticas e operações lógicas.” (Ipek, 2012)

Assim, podemos perceber o elevado nível de controlo obtido através da programação com base em algoritmos, sendo que os desenvolvedores de *design*, conseguem assim alcançar estruturas de elevado grau de complexidade.

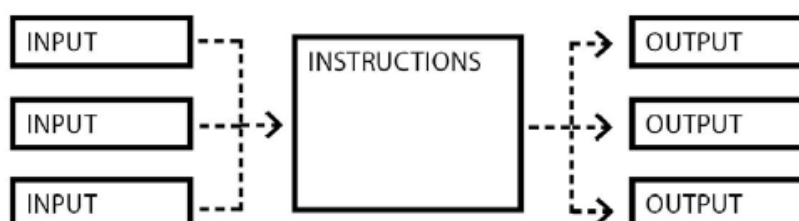


Figura 2.4 – A lógica de um algoritmo (ALHADIDI, et al., 2014)

2.3.3. Dynamo: *Interface de programação visual*

O Dynamo é um programa da AutoDesk que utiliza a linguagem de programação visual para criar a sua própria geometria com relações paramétricas e ler e escrever de e para bancos de dados externos. (SGAMBELLURI, 2015)

Embora seja um programa independente, o Dynamo tem como principal objetivo a conexão com outros *softwares*, permitindo aos utilizadores adicionar e criar ferramentas personalizadas aos seus recursos nativos. Neste âmbito, está implícita a necessidade de interoperabilidade entre os diversos programas ligados ao BIM, como o Naviswork, o Robot ou Civil 3D, entre outros, de forma a concretizar eficientemente os objetivos.

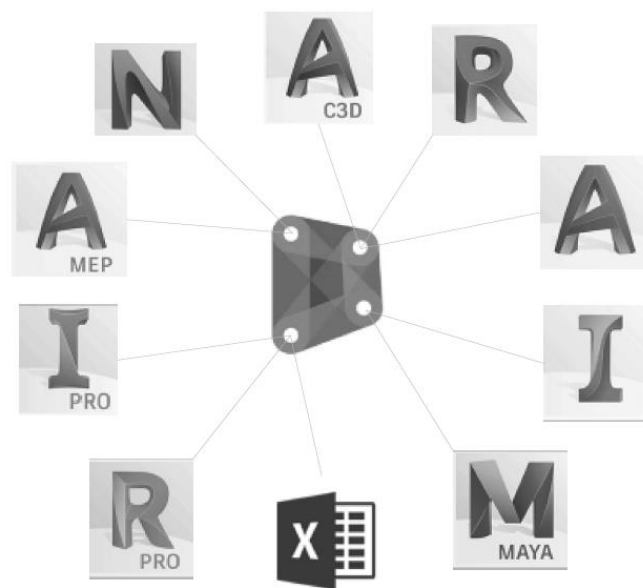


Figura 2.5 – Interoperabilidade entre o Dynamo e outros *softwares*.

Tendo por base a programação visual de código aberto, não programadores são capazes de utilizar o *software*, evitando o conhecimento dos formalismos de uma programação tradicional textual. Por outro lado, este *software* também é um desafio para programadores pois através da criação de *nodes* com linguagem de programação textual em Python, podem-se obter melhorias de desempenho e funcionalidades extra mais eficazes para os algoritmos do Dynamo.

Outra das mais-valias do Dynamo é o facto de existir uma política de partilha de informação entre os utilizadores, através dos denominados "Packages", que são conjuntos de "nós embalados" e disponíveis através da "Comunidade Dynamo". Estes conjuntos de elementos do Dynamo podem ser criados, desenvolvidos e testados pelos utilizadores, ficando assim ao dispor de todos, recorrendo a uma biblioteca disponível no Dynamo.

Interação Dynamo – Revit – Excel

Conforme referido anteriormente, o Dynamo pode ser ligado a qualquer *software*, elevando os seus níveis de competência. Elevando o enfoque para a sua ligação ao Revit, o Dynamo permite otimizar e automatizar tempo e tarefas de trabalho, tornando os fluxos de trabalho mais rápidos e mais produtivos. Ou seja, de uma forma mais ou menos prática (dependendo da experiência do utilizador), o Dynamo ao combinar dados geométricos, provenientes do Revit ou de uma folha de cálculo, *inputs* paramétricos/algoritmos do Dynamo, e *outputs* de dados para diversos formatos (como texto, folha de cálculo ou IFC), permite uma abordagem muito eficiente de todo o processo de aplicação BIM. (JAMISON, 2014)

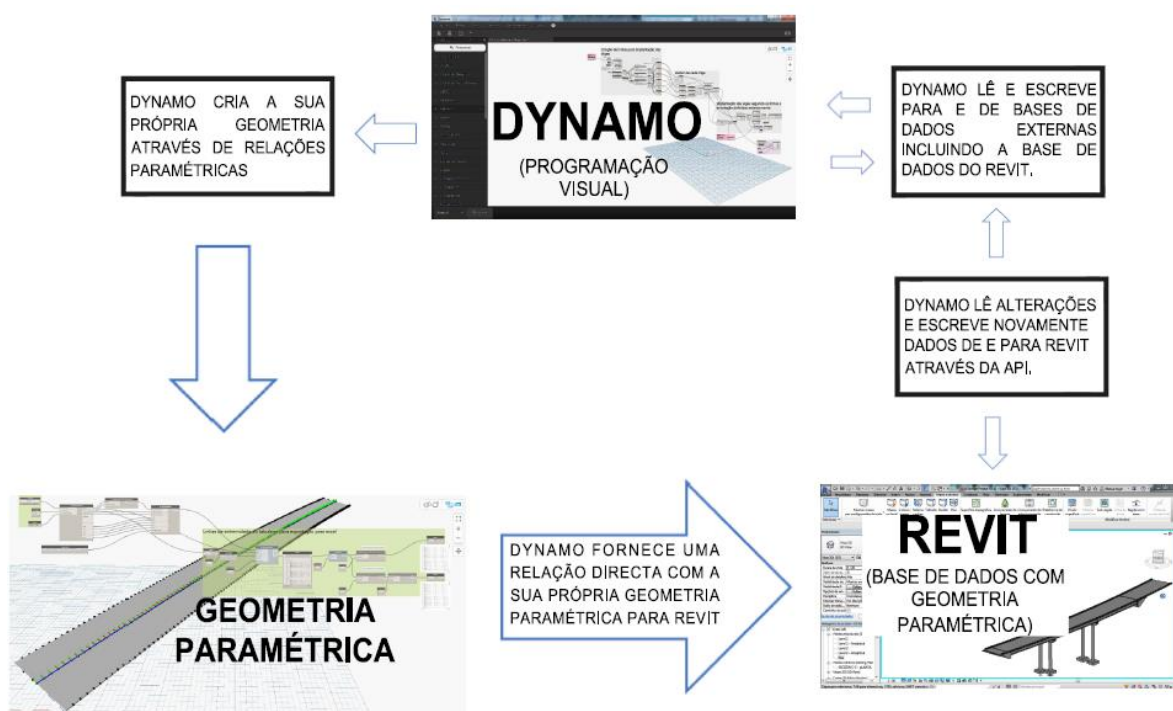


Figura 2.6 – Processo BrIM através da ligação do Dynamo, Excel e Revit. (baseado em (SGAMBELLURI, 2014))

O Dynamo ao criar ou transferir os elementos para o Revit, permite que o Revit os assuma com total propriedade, seja como uma família própria do Revit (parede, fundação, pilar, viga, etc.) ou como elemento genérico ou massa.

Após criar estes elementos através do Dynamo, ficam totalmente disponíveis para a sua edição, quer de parâmetros intrínsecos à família criada, quer da geometria da própria família do elemento, como também a sua localização pode ser reajustada no interface do Revit. Todas estas alterações são também possíveis de executar através do Dynamo com sub-rotinas ou através da gestão faseada dos fluxos de trabalho dos algoritmos criados, sendo assim possível tanto a sua edição como reexecuta-los de

novamente. A gestão destes fluxos de trabalho no Dynamo são um dos pontos a explorar, sendo que a experiência diária dos utilizadores com o Dynamo, trará bastantes melhorias no que toca à antecipação de problemas e assim criar algoritmos para assegurarem as alterações futuras e resolve-las eficientemente. Na figura 2.7, é apresentada uma ilustração que traduz a abordagem correta para o fluxo de trabalho no Dynamo. (SGAMBELLURI, 2014)

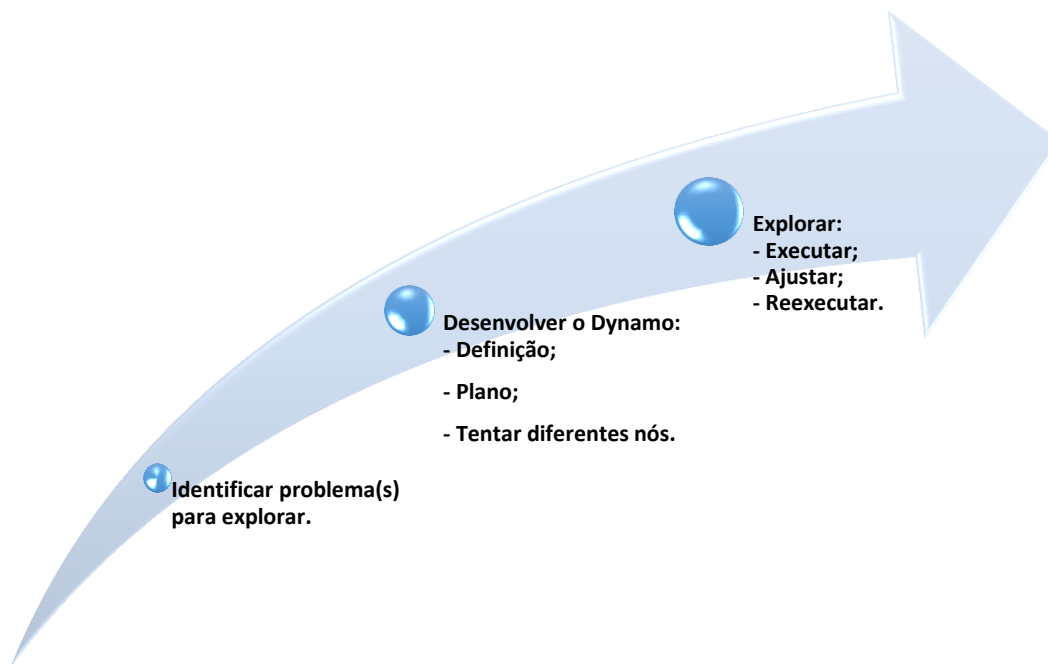


Figura 2.7 – Fluxo de trabalho em Dynamo (baseado em (Guerra, 2014))

2.3.4. Enquadramento Histórico da Programação Visual / Gráfica

Ao longo dos últimos anos, a programação visual tem vindo a ganhar espaço nas práticas dos utilizadores de *softwares* BIM. Tendo em conta a evolução das tecnologias de construção e de *softwares* de projeto, a construção de estruturas com níveis de complexidade muito elevados, quer para o desenvolvimento de projeto quer para a própria construção, tornam-se assim cada vez mais possíveis.

A utilização da programação gráfica não é uma ideia nova, no entanto a sua aplicação em engenharia civil nem sempre foi muito consensual no que se refere aos seus benefícios. No entanto, é de referir que esta técnica tem várias décadas de experiência, sendo que os primeiros desenvolvimentos, mais efetivos, foram há já cinquenta anos atrás (1966), através do lançamento de uma das primeiras linguagens de programação gráfica, o “Graphical Program Editor”, criado por William Sutherland. O seu irmão Ivan Sutherland também teve um papel muito importante ao influenciar W. Sutherland através da criação do sistema de comunicação gráfica homem-máquina, o “Sketchpad” em 1963. (SUTHERLAND, 2003)

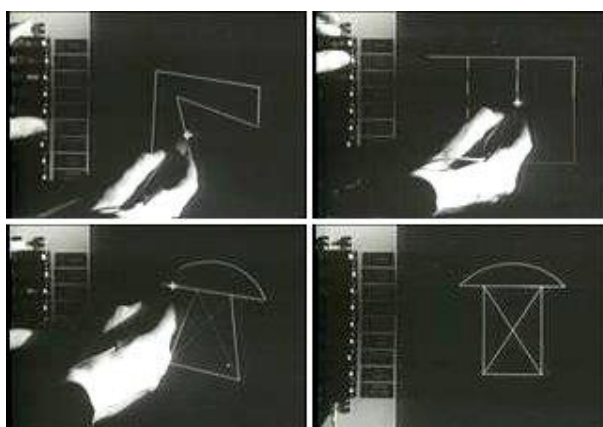


Figura 2.8 – SketchPad (1963)

Este, também seria o forte argumento que influenciaria Smiths para a criação do seu ambiente de programação criativa, o Pygmalion em 1977, que cunhou o termo “icon”, deixando claros os benefícios deste tipo de interação direta e feedback e que “imagens gráficas poderiam representar entidades abstratas de uma linguagem de programação”. (SUTHERLAND, 2003) (SMITH, 1975)

Atualmente o mais conhecido ambiente de programação gráfica é o Grasshopper pelo Rhino. Apesar de ser um *software* bastante capacitado, o facto de não apoiar, na totalidade, o conceito BIM com objetos parametrizados e a sua falta de interoperabilidade direta com o *software* BIM, o que num contexto atual de evolução em BIM, o deixa bastante limitado. Neste sentido, a AutoDesk foi desenvolvendo capacidades ligadas à programação gráfica, enquadrando sempre estas potencialidades no âmbito do BIM. Assim, atualmente o Dynamo aparece como o *software* de programação visual bastante desenvolvido e em constante evolução. (BOSHERNITSAN, et al., 2004) (HOSICK, 2014)

2.3.5. Visão Geral do Ambiente Dynamo

Interface do Dynamo

O interface do Dynamo está organizado em cinco áreas principais. Conforme se pode ver na figura 2.9, o aspeto geral é bastante simples.

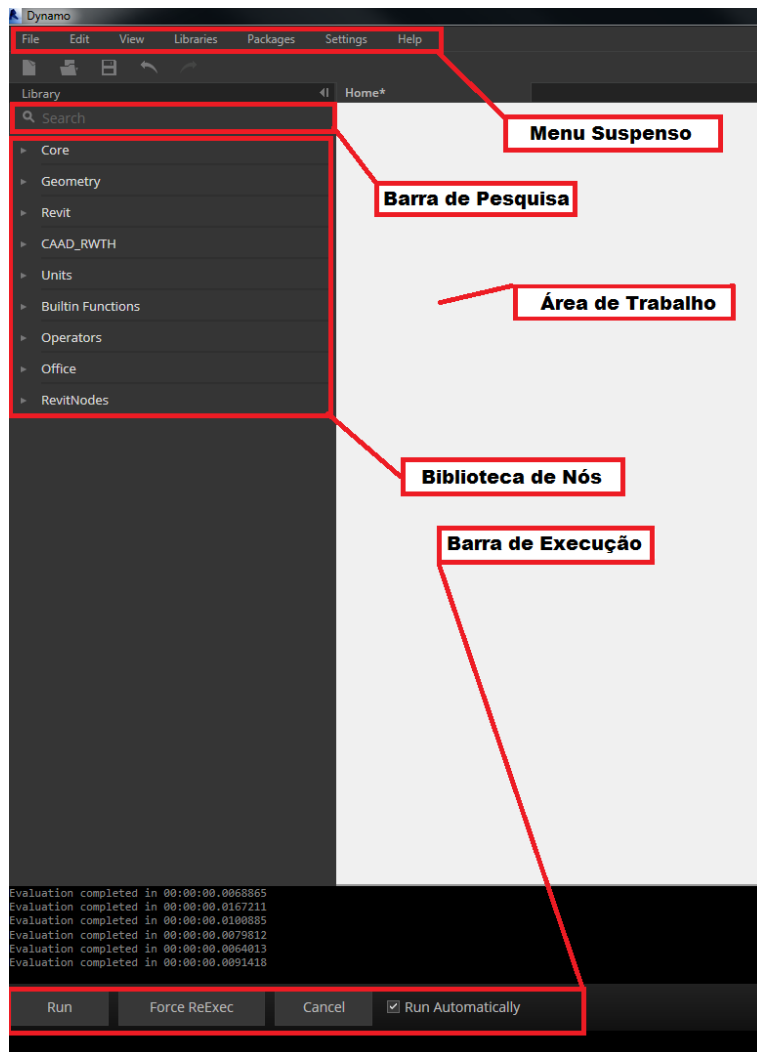


Figura 2.9 – Interface do Dynamo (SGAMBELLURI, 2014)

Barra de Menus

Trata-se de uma barra de menu típica localizada no canto superior esquerdo, onde podemos procurar algumas das funcionalidades básicas tais como gestão de arquivos e operações de seleção e edição de conteúdo, ou funções específicas para o Dynamo, como gestão dos *packages*, configuração, visualização e a ajuda para o Dynamo (*Help*).

Biblioteca de *Nodes*

Um pouco abaixo da barra de menus, encontra-se a biblioteca de *nodes*, onde se pode ir buscar os *nodes* necessários para a criação dos algoritmos. Esta biblioteca é constituída por categorias e subcategorias de *nodes*. Ao permanecer com o ponteiro em cima da subcategoria (havering), o Dynamo apresenta uma descrição do menu, de forma a facilitar a compreensão do mesmo. O Dynamo disponibiliza ainda um local de busca de *nodes*, bastante útil nas situações em que o utilizador necessita de fazer uma pesquisa mais direta.



Figura 2.10 – Biblioteca do Dynamo (JEZYK, et al., 2015)

Área de Trabalho

A área de trabalho do Dynamo é o espaço onde o utilizador desenvolve os seus algoritmos e utilizando os botões de navegação localizados no canto superior direito, pode alternar entre a vista gráfica do algoritmo e a navegação para a vista 3D no plano de fundo, onde se pode inspecionar a geometria criada na vista gráfica.

Barra de Execução

Ao longo do desenvolvimento do programa visual, o utilizador pode ir executando a sua rotina, de maneira a poder ir testando e avaliando os resultados das ações desenvolvidas na vista gráfica. Ao acionar o botão executar, o Dynamo, mediante a rotina criada pelo utilizador, cria a geometria tanto na vista 3D no plano de fundo como na própria área de trabalho do *software* associado, neste caso, no Revit. Para algoritmos de menores dimensões é ainda possível trabalhar em modo de execução

automática, permitindo ao utilizador visualizar em tempo real as alterações/criações desenvolvidas na vista gráfica do Dynamo.

Nodes

Os *nodes* são objetos com características intrínsecas que executam uma única operação, no entanto permitem, uma vez ligados uns aos outros, a criação de rotinas visuais através do interface e área de trabalho Dynamo. Estes *nodes* podem ser constituídos por diferentes formas dependendo da linguagem de programação visual utilizada.

Anatomia de um Node

Conforme já foi mencionado, existem vários tipos de *nodes*, mas a maioria está organizado em cinco partes.

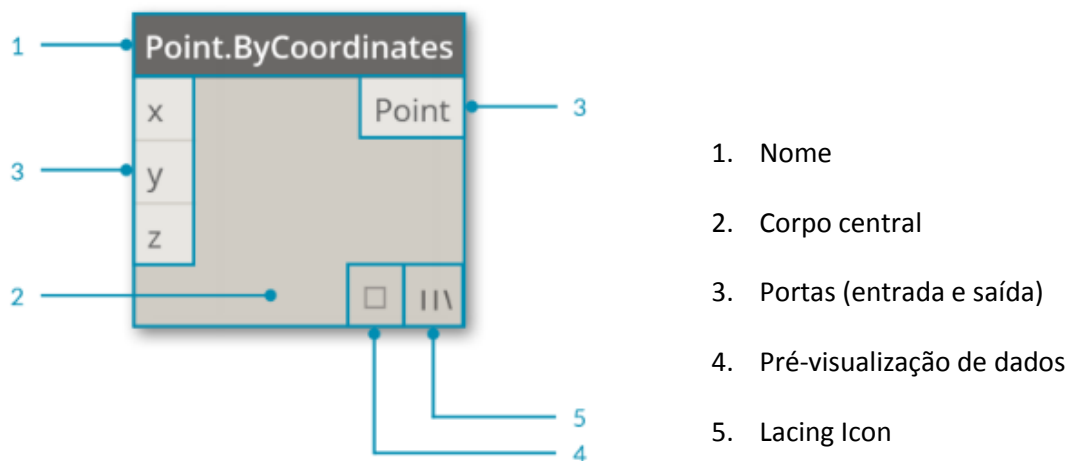


Figura 2.11 – Exemplo de *Node* (JEZYK, et al., 2015)

As portas são os pontos onde conectam os fios de ligação entre os nodes. As portas da esquerda funcionam como elos de ligação de entrada de informação para os algoritmos. Após processados os dados de entrada, o resultado fica disponível para visualização no ponto pré-visualização de dados e ao mesmo tempo faz a transmissão dos resultados pelas portas da direita, também através de fios de ligação. De referir que, dependendo do tipo de *nodes*, os dados de entrada para as portas da esquerda, serão diferentes ou específicos dependendo do tipo de dados que essas portas esperam.

2.4. PREPARAÇÃO DA MODELAÇÃO BIM

2.4.1. Leitura e compreensão do modelo CAD

Para a realização deste trabalho foi disponibilizado o processo completo do viaduto. O processo é constituído por peças desenhadas, memórias descritivas e uma folha de cálculo para a geometria do viaduto. Para o objetivo em estudo apenas foram necessárias as peças desenhadas e a folha de cálculo.

De referir que se trata de um processo desenvolvido em CAD bidimensional sem aplicação da metodologia BIM. Esta metodologia de trabalho apresenta níveis de desenvolvimento bastantes consistentes.

Em contraste com a metodologia BIM não existe um modelo global da estrutura, mas sim um conjunto de peças desenhadas bidimensionais que permitam a compreensão de todos os elementos estruturais, estando assim limitado num dos pontos mais importantes do BIM que é a interligação entre as diferentes especialidades do projeto, entre elementos estruturais e as respetivas armaduras.

Esta limitação dá origem a erros e omissões em fase de construção que através deste trabalho se poderá simular e comprovar, tendo em conta que o BIM permite uma abordagem tridimensional do faseamento construtivo do viaduto.

Para a leitura e compreensão de todo o processo foi necessário uma organização dos desenhos CAD para que permitam interpretar, da melhor forma, a informação disponível para desenvolver o modelo BIM, processo que é equiparável ao processo de construção em obra.

2.4.2. Objetivos de Desempenho BIM

A aplicação do BIM, por si só, impõe um conjunto de rotinas por parte dos intervenientes, visando a interligação ou partilha de processos de forma consistente, assegurada contratualmente.

Dentro deste processo pretende-se a partilha de um modelo global assegurando a ligação assim de todos os intervenientes. Para o efeito, um dos principais objetivos do desempenho BIM seria assegurar a criação do modelo BIM em tempo útil, de maneira a que todos os outros intervenientes e dependentes do modelo BIM pudessem dar seguimento aos respetivos fluxos de trabalho.

Outro objetivo ligado à gestão do modelo BIM prende-se à necessidade de o modelo ficar aberto a possíveis alterações subsequentes. A concretização deste objetivo tornou-se um ponto bastante crítico e complexo da criação do modelo BIM através da extensão Dynamo, conforme se explica mais à frente. De forma a contornar este ponto optou-se por criar um modelo de gestão da rotina de Dynamo para a

criação inicial dos elementos e para uma fase posterior solucionou-se através da subdivisão e criação de outras rotinas para alterações localizadas, de forma a não afetar o modelo global.

De forma a tirar o máximo proveito das potencialidades do BIM, outro objetivo da modelação foi que o modelo ficasse passivo de colocação de armaduras em todos os elementos estruturais, de maneira a podermos tirar proveito das ferramentas disponíveis no Revit para a colocação de armaduras em elementos estruturais ligados a edifícios, tais como vigas, paredes, pilares e lajes. Este ponto revelou-se muito importante pois torna o processo de colocação de armaduras mais simples.

No que se refere aos requisitos do BIM o objetivo foi criar um modelo de gestão global que integrasse a gestão individual de cada obra de arte. Este modelo passou pela identificação de cada ponte segundo características intrínsecas ao seu tipo e em relação aos seus elementos estruturais e secundários através da definição de características de cada elemento inseridas no modelo BIM, de forma a obter-se de forma automática, a documentação que no projeto tradicional é inserida ou extraída manualmente. Este objetivo intrínseco ao BIM permite uma gestão mais eficiente de todos os dados e informações associados ao projeto.

2.4.3. Escolha do *Add-in* do Revit para BIM

Tendo como principal objetivo desenvolver o modelo tridimensional com o *software* Autodesk Revit, após recolha de informação acerca do seu potencial e/ou limitações para a modelação de pontes, neste caso, pontes vigadas pré-esforçadas de betão armado, chegou-se à conclusão que as opções disponíveis seriam: a extensão de pontes Revit Structure e o *Add-in* Dynamo.

Dentro das duas hipóteses selecionadas para o desenvolvimento do modelo BIM, em conjunto com a empresa optou-se por explorar apenas o *add-in* Dynamo.

Esta escolha justifica-se devido à extensão de pontes Revit Structure apresentar algumas limitações relacionadas com:

- Tipos de geometria de pontes mais complexas ou diferentes das disponíveis na extensão;
- Dificuldades no controlo de alguns parâmetros geométricos;
- Integração com *softwares* de análise estrutural;
- É possível modelar a laje do tabuleiro com inclinação, mas esse perfil será usado para o trecho inteiro;
- As curvas são simples ou planas.

Analisando as limitações, a opção de explorar as potencialidades do Dynamo tornou-se evidente. O Dynamo é uma ferramenta ainda não muito explorada e conseqüentemente com pouca informação

CAPÍTULO 2

disponível tanto em relação às suas limitações como também às limitações do próprio Revit ligado à modelação de pontes, sendo que o Dynamo cria os elementos no Revit.

Através do *feedback* de alguns utilizadores e análise dos trabalhos já realizados decidiu-se que seria uma potencial aposta.

De referir que para a tomada de decisão contribuiu também o facto de se tratarem de *add-in's* para o Revit, que pertence à Autodesk. Este facto torna-se importante a nível económico devido ao facto da empresa utilizar na generalidade *software* da Autodesk nos seus diferentes setores, o que torna a aposta da empresa economicamente mais viável. Outro fator relevante, derivado de pertencerem à mesma companhia, é a interoperabilidade direta entre as diferentes ferramentas da Autodesk. Embora esta funcionalidade não tenha sido testada nesta dissertação, após recolha de informação sobre o assunto e opiniões de utilizadores mais experientes, constata-se que embora possa haver algumas limitações se trata de uma interoperabilidade bastante consistente.

3. CASO DE ESTUDO

3.1. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

3.1.1. Apresentação

O caso de estudo corresponde a um viaduto inserido no tramo 1 de uma estrada denominada por Periférico Sul de Xalapa, construída no México.

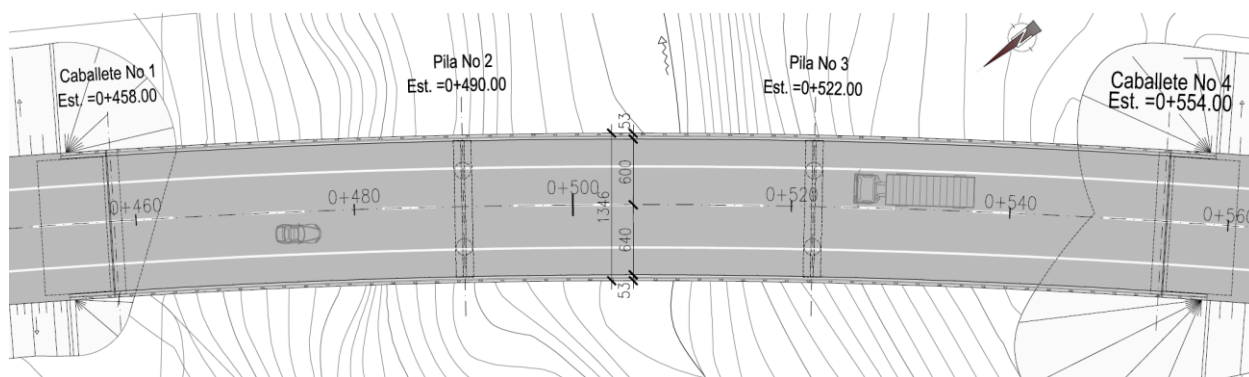


Figura 3.1 – Planta de localização da Obra de Arte Especial 1 em análise.

3.1.2. Dados de Traçado

As características do eixo viário, na zona de inserção do viaduto:

- Em planta: curva circular à direita com raio em planta de 763.944m.
- Em perfil: curva vertical côncava de raio $R_v = 4500\text{m}$.

A sobrelevação é constante ao longo de todo o comprimento do viaduto, sendo -7.30% no lado esquerdo e +7.30% do lado direito.

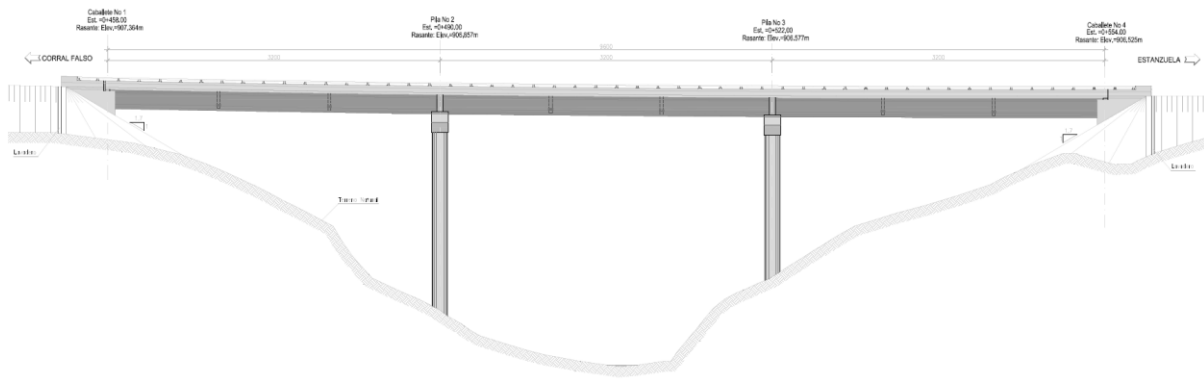


Figura 3.2 – Alçado Longitudinal da ponte.

3.1.3. Descrição da Estrutura

Trata-se de um viaduto em curva com tabuleiro de vigas pré-fabricadas tipo I e pré-lajes, construído em betão armado.

Na figura 3.3, apresenta-se o esquema da forma e as dimensões da secção transversal do viaduto:

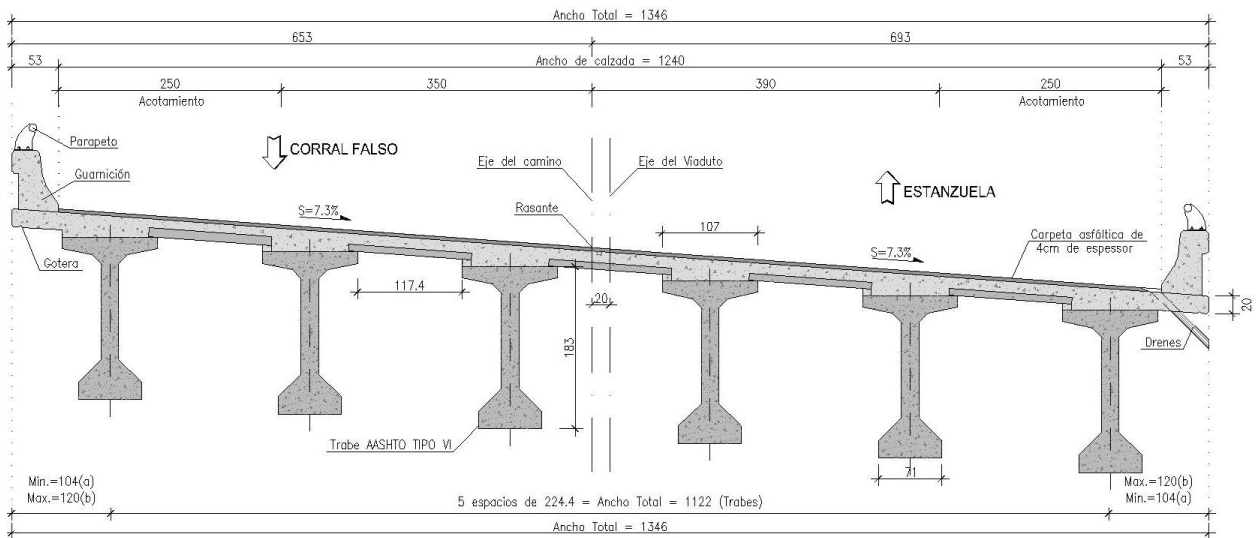


Figura 3.3 – Corte Transversal do tabuleiro.

Tabuleiro

A superestrutura do viaduto é constituída por:

- Três vãos de 32m, num total de 96m de comprimento;
- Um tabuleiro com seis vigas pré-fabricadas e pré-esforçadas, do tipo AASHTO tipo VI (1.83m de altura), espaçadas transversalmente de 2.24m, definindo um secção transversal tipo com largura total de 13.46m;

- Uma laje de betão armado, trabalhando em conjuntos com as vigas pré-fabricadas, é constituída por pré-lajes pré-fabricadas com 7.5cm de espessura, aplicadas entre as vigas e por uma camada de betão, totalizando 20cm de espessura;
- Guarnições em betão armado nos extremos do tabuleiro;
- A camada de asfalto tem uma espessura de 4 cm;
- Calços nas extremidades dos banzos superiores das vigas, que servem de apoio às pré-lajes, assegurando uma espessura constante para a laje do tabuleiro.

Em relação ao seu funcionamento é simplesmente apoiado em fase construtiva e com continuidade sobre os pilares em fase de exploração, depois da betonagem e cura da laje de betão.

O tabuleiro apoia nos pilares e encontros com recurso a apoios de neopreno.

Pilares e Fundações

A subestrutura é constituída por pilares de secção circular de $\varnothing 150\text{cm}$, em betão armado, dois por alinhamento de apoio.

As fundações são constituídas por sapatas individuais com dimensões 450x450x120cm.

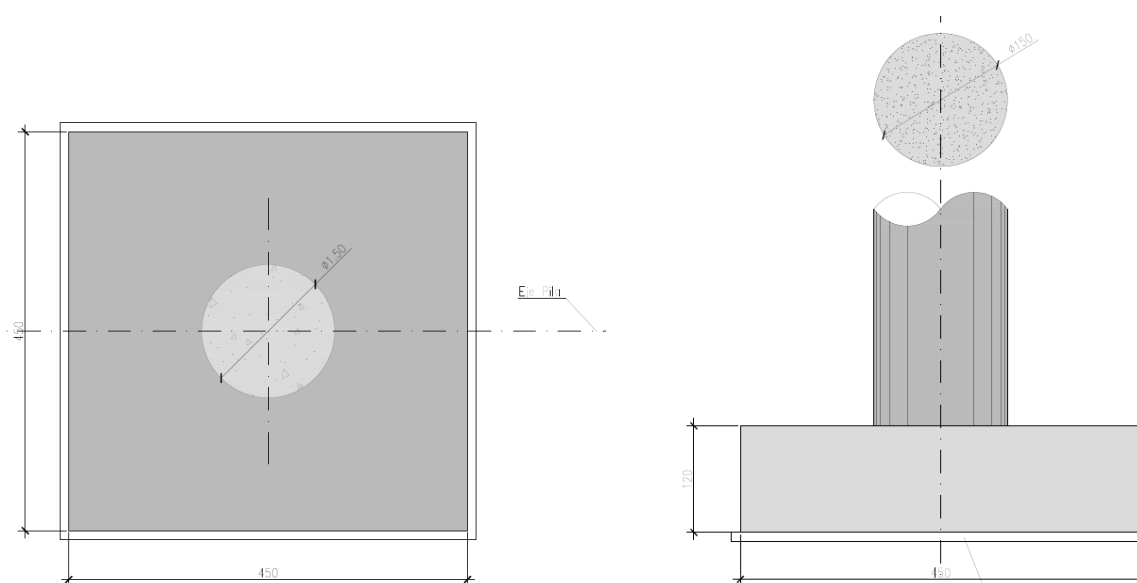


Figura 3.4 – Planta e alçado tipos das sapatas e pilares.

Travessa ou Viga de Encabeçamento

No topo dos pilares está unida uma viga de encabeçamento mais comumente designada por Travessa, de secção transversal 160x150cm que suporta os apoios do tabuleiro.

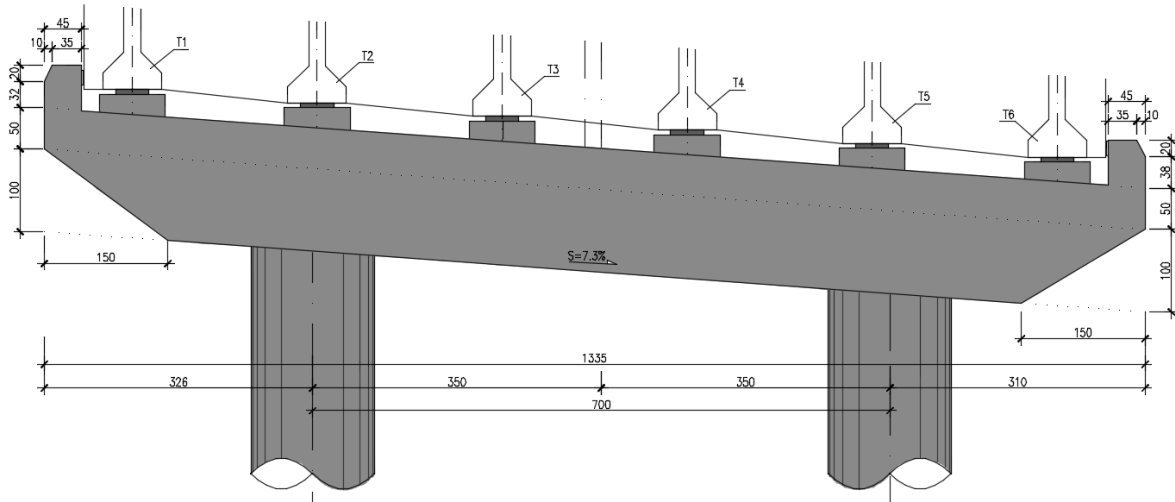


Figura 3.5 – Alçado da viga de encabeçamento (Travessa).

Encontros

Os encontros são do tipo aberto, com contrafortes, fundados em sapatas. Lateralmente estão rematados por muros.

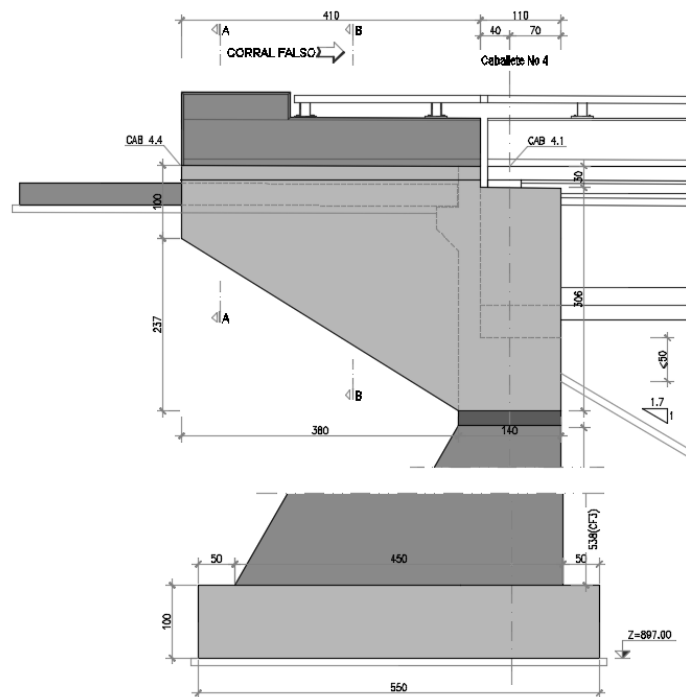


Figura 3.6 – Alçado lateral tipo do encontro.

Nota: Para uma melhor compreensão do caso de estudo, seguem no anexo I os desenhos correspondentes aos elementos estudados.

3.2. PRODUÇÃO DO MODELO BIM

Conforme referido anteriormente, o Dynamo tem vindo a ser cada vez mais utilizado no mundo da engenharia. A par da evolução e implementação do BIM, o Dynamo tem arrancado melhorias significativas nas tarefas diárias dos seus utilizadores para a criação de estruturas mais complexas. Tendo em conta que se trata de um programa que trabalha num ambiente colaborativo com o Revit, o facto de o Revit estar mais preparado para edifícios, permite que o Revit apresente um grande conjunto de elementos estruturais parametrizados para edifícios. No que se refere às pontes, o Revit não possui todos os elementos necessários para a modelação 3D da maior parte dos seus elementos. Assim sendo, para solucionar este entrave, admitem-se dois caminhos possíveis: o primeiro é de criar os elementos através de algoritmos no Dynamo, sendo esta uma hipótese cada vez mais desenvolvida; o segundo é de criar elementos com categoria de famílias do Revit, como pilar, viga ou laje, conseguindo assim manter as funcionalidades do Revit para a colocação de armaduras nos elementos. Neste projeto, optou-se por tentar, sempre que possível, que as famílias pudessem manter as referidas funcionalidades. Desta forma, no que se refere a criação da carlinga, optou-se por criar um elemento de categoria parede e para a travessa um elemento de categoria viga. Para o tabuleiro, após algumas tentativas, optou-se por criar um elemento genérico.

Neste capítulo pretende-se descrever o processo de desenvolvimento do modelo BIM da ponte do projeto proposto, que foi desenvolvido anteriormente em CAD. Este processo foi subdividido em 4 subprocessos interligados:

1. Exportação dos pontos coordenados do eixo da via a partir do Civil 3D;
2. Desenvolvimento de uma folha de cálculo em Excel para integração no Dynamo;
3. Criação e edição de famílias no Revit, ficando estes parametrizados com ligação à folha de cálculo desenvolvida;
4. Desenvolvimento da rotina no Dynamo para integração dos pontos anteriores.

3.2.1. Folha de Cálculo em Excel para Integração no Dynamo

Neste processo, pretendeu-se integrar algumas das rotinas de trabalho da empresa, de forma a não modificar radicalmente todo o processo de desenvolvimento de um projeto de uma ponte. Assim, teve-se em linha de conta as folhas de cálculo utilizadas anteriormente para a definição da geometria do viaduto para AutoCAD, efetuando-se as alterações necessárias a partir destas bases já existentes.

Para a integração desta folha de cálculo no processo de implantação dos diversos elementos do viaduto através do Dynamo, foi adotada por fim a ideia apresentada numa das palestras da AutoDesk University pelos oradores Matthias Stark e Lejla Secerbegovic (AutoDesk University).

Desta forma, conforme mencionado no vídeo referido (AutoDesk University), para um sistema de georreferenciação muito afastado do ponto zero torna-se necessário efetuar uma transformação das coordenadas reais exportadas do Civil 3D em coordenadas mais próximas da origem.

Este ponto revelou-se muito importante para o desenvolvimento da rotina no Dynamo, tendo em conta a limitação deste em termos de resolução gráfica para a definição e implantação de elementos com coordenadas muito distantes do ponto de origem das coordenadas (X=0, Y=0, Z=0). Assim, definiu-se o denominado “ponto de transformação” de origem com as coordenadas X e Y do primeiro ponto do perfil exportado do Civil 3D e para cota Z, o número inteiro mais próximo da cota do primeiro ponto.

Transformation happens with the first	
TransformX	734028,643
TransformY	2153634,698
TransformZ	900,000

Figura 3.7 – Coordenadas base adotadas para a transformação das coordenadas.

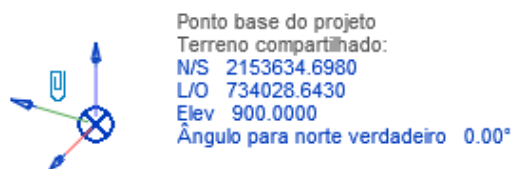


Figura 3.8 – Alteração das coordenadas do ponto base do projeto.

Para a implantação dos restantes elementos constituintes do viaduto, optou-se por manter o mesmo princípio, transformando-se, assim, todas as coordenadas reais de implantação a partir do ponto de referência utilizado para a criação do tabuleiro.

De salientar que embora estejamos a inserir os elementos em relação a um ponto de referência não real, este ponto de referência pode a qualquer altura ser alterado dentro do projeto no Revit para a origem real correspondente ao ponto (0, 0, 0). Assim torna-se possível a exportação de dados do viaduto georreferenciados.

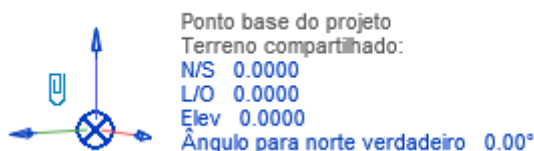


Figura 3.9 – Alteração das coordenadas do ponto base do projeto para a origem nula.

Coordenadas dos elementos estruturais

Estes dados foram definidos aquando da realização do projeto. Assim sendo, foram disponibilizadas as folhas de cálculo referentes ao cálculo geométrico do viaduto. Partindo do princípio, referido anteriormente, de não alterar muito os processos e elementos de cálculo já integrados na empresa, optou-se por adaptar essas folhas de cálculo para a integração no Dynamo.

A folha de cálculo base para este viaduto integra dados da geometria do traçado e a definição das coordenadas de cada elemento estrutural, tais como: laje de betão, camada betuminosa, vigas, carlingas e localização dos aparelhos de apoio.

		ESQ					DIR			
CAB1 - P2		V1	V2	V3	V4	V5	V6			
	L vigas (horizontal)	31,778	31,684	31,590		31,496	31,402	31,308		
	Total dist	1,040	3,284	5,528	6,530	7,772	10,016	12,260	13,460	
OAE1 - Tablero										
CAB1	Posición	T(ESQ)	T1	T2	T3	T(EJE)	T4	T5	T6	T(DIR)
	dist. (al eje)	6,53	5,49	3,246	1,002	0	-1,242	-3,486	-5,73	-6,93
	Carpeta Asfalt. - Z1	907,841	907,765	907,601	907,437	907,364	907,273	907,110	906,946	906,858
	Losa Top - Z2	907,801	907,725	907,561	907,397	907,324	907,233	907,070	906,906	906,818
	Trabe Top - Z3	907,523	907,447	907,283	907,119	907,046	906,955	906,792	906,628	906,540
	Trabe Base - Z4	905,697	905,621	905,458	905,294	905,221	905,130	904,966	904,802	904,715
	Cabezal - Z5	905,447	905,371	905,208	905,044	904,971	904,880	904,716	904,552	904,465
	M (m)	734018,936	734018,071	734016,206	734014,340	734013,508	734012,475	734010,610	734008,745	734007,747
	P (m)	2153607,514	2153608,092	2153609,339	2153610,587	2153611,144	2153611,834	2153613,082	2153614,329	2153614,996

Figura 3.10 – Folha de cálculo do projeto para o cálculo das coordenadas dos diversos elementos estruturais e geometria de traçado.

De forma a ser possível integrar os dados da folha de cálculo da empresa, foi necessário efetuar um rearranjo dos dados de forma a facilitar os procedimentos de inserção através do Dynamo. Criaram-se assim várias folhas, dentro do mesmo ficheiro, referentes a cada elemento estrutural e à sua implantação e edição com o Dynamo.

Coordenadas do Eixo Central da Via

Para obterem-se os elementos referentes à geometria do traçado, foi disponibilizado o ficheiro desenvolvido pelo departamento de vias de comunicação para a definição do traçado. Para o efeito foi necessário utilizar o *software* AutoDesk Civil 3D e assim retirar-se os dados referentes à definição do eixo viário do viaduto. Estes dados foram facilmente obtidos com o auxílio de um colaborador do departamento de vias da empresa, tendo em conta que a empresa já tinha feito o corredor da via anteriormente, aquando da realização do projeto. Para obtermos este *input* apenas foi necessário exportar um relatório onde constam as coordenadas “X”, “Y” e “Z” em função do desenvolvimento longitudinal do traçado da via. De referir que neste trabalho se optou por retirar coordenadas espaçadas de um metro em desenvolvimento longitudinal do traçado, mas de forma a aumentar a precisão, poder-se-á retirar com menor espaçamento. A figura 3.11 é referente à parte de um relatório extraído do Civil 3D.

Corridor Points Report					
Client: GEG	Prepared by: Ricardo Pinto				
Client	Preparer				
Client Company	Your Company				
Client Company	Name				
Address 1	123 Main Street				
Date: 30.10.2015 15:53:07					
Corridor Name: Bridge					
Reference Alignment Name: Alignment					
Station	Easting	Northing	Elevation	Offset	Description
0+430.00	734028,6432	2153634,6984	907,9940	0,000	ProfileCodePoint
0+431.00	734028,1175	2153633,8477	907,9690	0,000	ProfileCodePoint
0+432.00	734027,5908	2153632,9977	907,9440	0,000	ProfileCodePoint
0+433.00	734027,0629	2153632,1484	907,9190	0,000	ProfileCodePoint

Figura 3.11 – “Corridor Points Report” – Relatório das coordenadas dos pontos do eixo viário do viaduto.

Este relatório serviu de base para a definição dos limites laterais da via. Para isso, foi utilizada uma folha de cálculo disponibilizada pelo Dynamo para a realização de pontes. Este elemento é acessível através do denominado *Package* disponível através do *download* do *Bridge Package* a partir do Dynamo.

Este pacote contém, para além da referida folha de cálculo, um conjunto de elementos de Dynamo, tais como *nodes* associados à referida folha de cálculo para definição do tabuleiro e outros elementos estruturais, como também algumas famílias de elementos para pontes.

Neste trabalho foram utilizados alguns desses *nodes* e a folha de cálculo, com a finalidade principal de modelar a laje de betão. Esta opção baseou-se fundamentalmente em dois princípios com vantagens diretas para os fluxos de trabalho:

1. Ligação direta ao relatório exportado do Civil 3D com as coordenadas do eixo central viário;
2. Obtenção das coordenadas dos pontos das linhas que delimitam o tabuleiro lateralmente, através de *nodes* do pacote “Bridge Package” inseridos numa rotina adaptada para a criação da laje de betão.

Nota: Estes pontos serão explicados mais detalhadamente na parte referente ao Dynamo.

3.2.2. Criação de famílias parametrizadas em REVIT

Neste subcapítulo serão apresentadas todas as famílias utilizadas e criadas para a modelação do viaduto proposto. Este ponto do trabalho requer uma análise global e estratégica da forma como serão implantados ou definidos cada elemento do viaduto, sendo obrigatória uma análise detalhada quer das potencialidades que se vão exigir dessa família quer da sua ligação ou interdependência com outros elementos justapostos. Torna-se assim essencial analisar este ponto no início da modelação.

Dentro desta análise é essencial levar em linha de conta os seguintes fatores:

1. Categoria da família;
2. Função que irá desempenhar no modelo BIM;
3. Se irá ostentar futuramente armaduras;
4. Parâmetros que deverão ser editáveis ou fixos;
5. Parâmetros que funcionarão como instâncias ou tipo, ou seja, os parâmetros que, uma vez alterados num elemento, alterarão todos os outros elementos presentes no projeto ou apenas o elemento editado;

Pilares, Vigas e Fundações

As famílias de pilares, vigas e fundações utilizadas foram as já disponíveis no Revit estrutural. Assim sendo, foi necessário criar o algoritmo adequado para a sua implantação e edição. O algoritmo de cada uma das famílias será explicado mais à frente na parte ligada ao Dynamo.

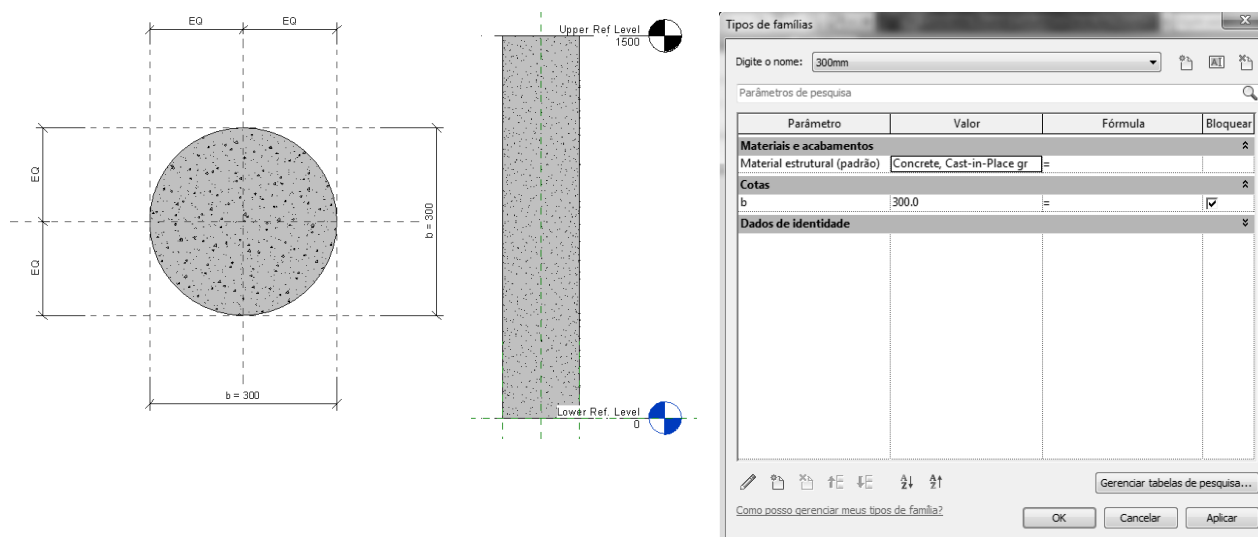


Figura 3.12 – Planta, alçado e quadro de parâmetros dos pilares no Revit, respetivamente da esquerda para a direita.

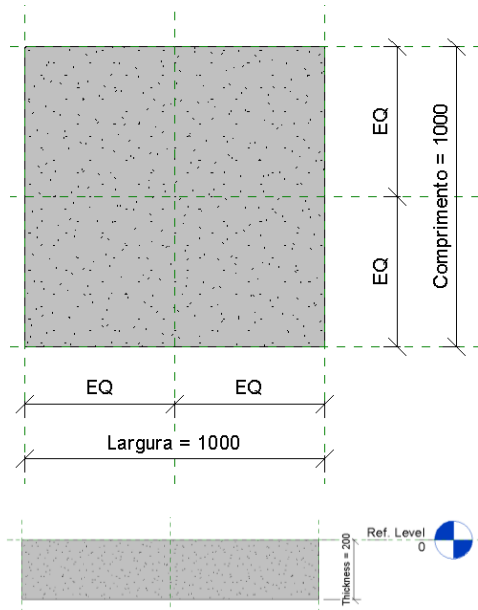


Figura 3.13 – Planta e alçado da família das sapatas no Revit.

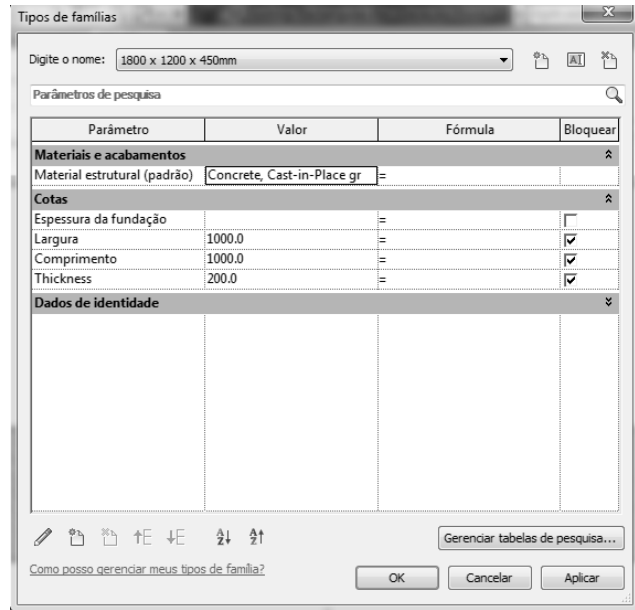


Figura 3.14 – Quadro de parâmetros da família sapatas no Revit.

Travessa ou Viga de Encabeçamento dos Pilares

No que se refere ao elemento estrutural designado por travessa, foi uma tarefa bastante morosa e exigente em termos de tempo e algum nível de conhecimento de modelação em Revit. Dentro de variadíssimas hipóteses de criação deste elemento, a solução final que se apresenta, constitui uma família paramétrica, com o objetivo de inserção em dois pontos correspondentes à interseção da superfície inferior desta com o topo dos pilares.

Este elemento foi criado com base num *template* de viga de forma a poder variar a sua inclinação longitudinal de acordo com os pontos inseridos no Dynamo.

Para controlar a sua forma chanfrada nas extremidades, foram criados “voids” (elementos de extrusão vazios), com a finalidade de seccionar o elemento sólido de uma forma controlada e regulada por parâmetros geométricos agarrados às dimensões desses elementos “void”. De maneira a permitir que a travessa incline para os dois lados, mantendo a sua estrutura bem definida, criou-se uma condição sim/não associada à visibilidade de dois elementos em função da inclinação da travessa, conforme se descreve a seguir:

1. Com base numa família viga genérica de perfil retangular, procede-se à criação dos batentes laterais com elementos de massa parametrizados.

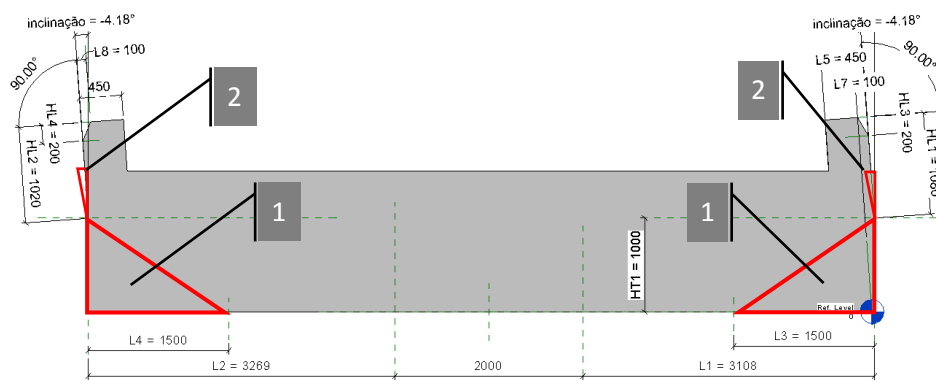


Figura 3.15 – Identificação dos elementos de extrusão vazios (*voids*) a criar.

2. Criação de elementos de extrusão vazios (*voids*) parametrizados. No caso dos elementos identificados na figura anterior com o número 1, foram criados elementos de extrusão vazios do Revit com controlos dimensionais paramétricos, com a finalidade de sectionar o elemento sólido visível da forma pretendida.
3. A definição dos elementos identificados na figura anterior com o número 2 seguiu o procedimento descrito nos pontos seguintes:
 - a. Criação dos elementos referidos através de elementos de massa e elementos de extrusão vazios, sobrepondo-os com o objetivo de poder atribuir um parâmetro de visibilidade associado aos elementos *sólidos* de cada lado;

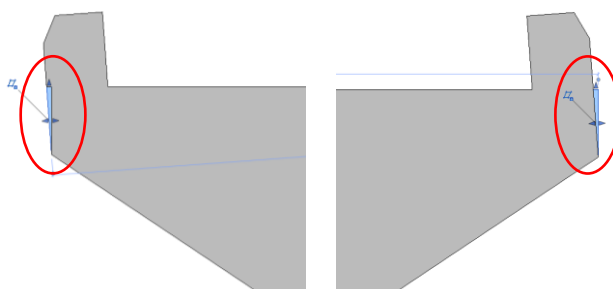


Figura 3.16 – Elementos associados a parâmetros de visibilidade.

b. Criação dos parâmetros de visibilidade:

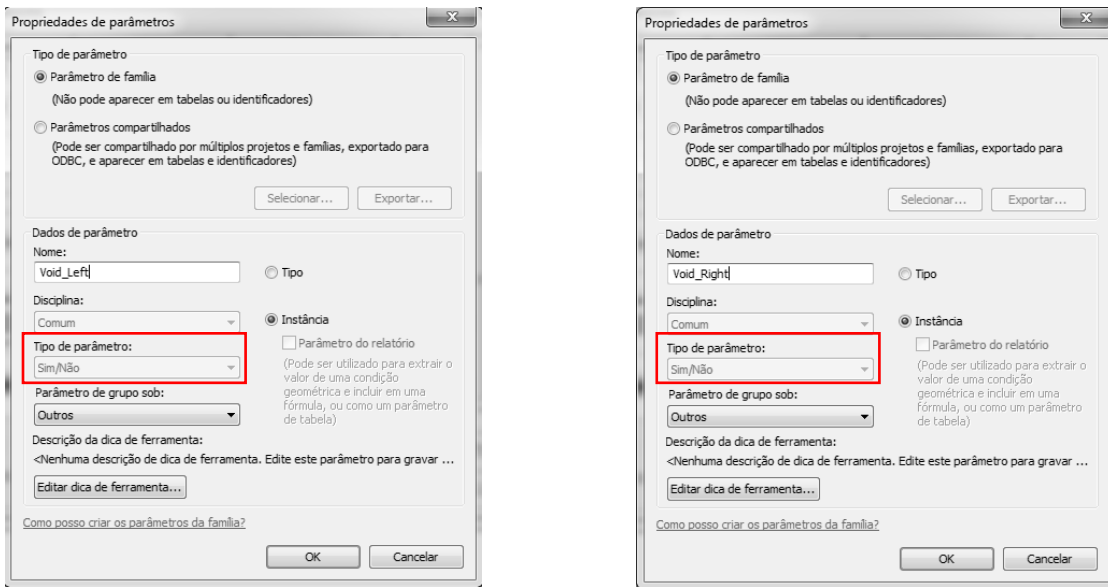


Figura 3.17 – Quadro para a criação dos parâmetros de visibilidade (tipo de parâmetro – Sim/Não).

c. Criação dos parâmetros Sim/Não e definição da condição de visibilidade dos respetivos elementos associados. Neste caso, definiu-se a condição: mediante seja positiva ou negativa a inclinação da travessa, ativa o parâmetro de visibilidade do lado direito ou do lado esquerdo respetivamente.

Parâmetro	Valor	Fórmula	Bloquear
Materiais e acabamentos			
Material estrutural (padrão)	Concreto, aerado	=	
Cotas			
HL1 (padrão)	1080.0		
HL2 (padrão)	1020.0		
HL3 (padrão)	200.0		
HL4 (padrão)	200.0		
HT	1500.0		
HT1 (padrão)	1000.0		
HT2 (padrão)	1000.0		
L1 (padrão)	3108.2	= L1_inc / cos(inclinação)	<input checked="" type="checkbox"/>
L1_inc (padrão)	3100.0		<input checked="" type="checkbox"/>
L2 (padrão)	3268.7	= L2_inc / cos(inclinação)	<input checked="" type="checkbox"/>
L2_inc (padrão)	3260.0		<input checked="" type="checkbox"/>
L3 (padrão)	1500.0		
L4 (padrão)	1500.0		
L5 (padrão)	450.0		
L6 (padrão)	450.0		
L7 (padrão)	100.0		
L8 (padrão)	100.0		
Comprimento (padrão)	2000.0		
a	-7.3		<input checked="" type="checkbox"/>
e	1600.0		<input checked="" type="checkbox"/>
inclinação (padrão)	-4.18°	= atan(a / 100 mm)	<input checked="" type="checkbox"/>
Outros			
Void_Right (padrão)	<input type="checkbox"/>	= inclinação > 0°	
Void_Left (padrão)	<input checked="" type="checkbox"/>	= inclinação < 0°	
Dados de identidade			

Figura 3.18 – Quadro para criação de parâmetros.

- d. Associação dos parâmetros criados aos elementos sólidos criados no ponto a., à esquerda e direita respetivamente.

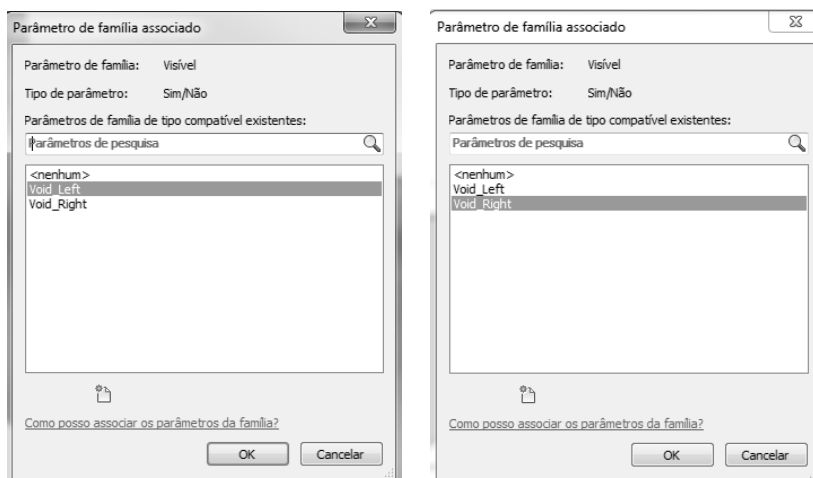


Figura 3.19 – Parâmetros de família associados.

A figura 3.20 mostra a geometria final dentro da família da travessa no Revit e todos os parâmetros associados à sua edição e inserção em projeto através do Dynamo.

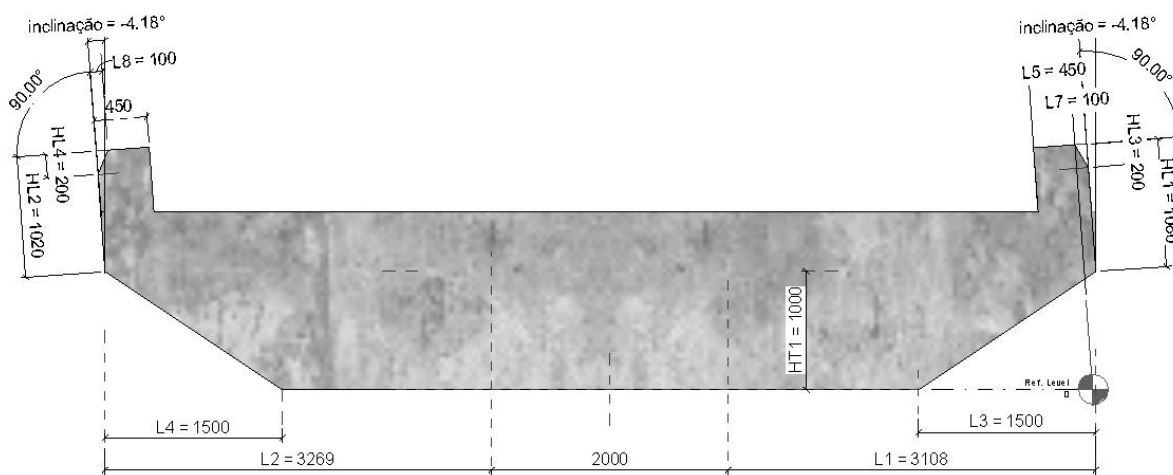



Figura 3.20 – Família travessa criada no Revit.

Para adicionar parâmetros nas famílias ou criar novas famílias, o Revit tem presente uma tabela de preenchimento de acesso através do ícone  (tipos de famílias), após entrar dentro da família.

Para a definição do número de parâmetros, local de amarração ou tipo de parâmetro, é necessário um estudo prévio das necessidades de edição futuras e o modo mais adequado para a sua inserção e edição, quer no Revit, quer no Dynamo.

É importante referir que todos estes parâmetros podem ser controlados através de *nodes* de controlo manual ou por via de uma folha de Excel ligados ao Dynamo. Neste trabalho dado o tempo disponível

optou-se por assegurar apenas a parte da implantação georreferenciada, deixando em aberto esta possibilidade de criação de uma folha de cálculo especial para este tipo de famílias, com os respetivos parâmetros associados de edição personalizada.

Carlingas

Para além de ser o elemento com a forma mais variável, quer no sentido longitudinal, quer no sentido transversal, trata-se de um elemento em contacto direto com outros elementos estruturais e não estruturais. No sentido longitudinal é interseçada pelas vigas quer de um lado quer do outro, no sentido vertical, inferiormente, apoia-se nos plintos dos aparelhos de apoio e superiormente serve de apoio ao tabuleiro.

Desta forma, torna-se bastante condicionante correlacionar a ligação a todos estes elementos, tendo em conta que a posição e forma geométrica de uns condicionam a também posição e forma geométrica de outros.

Tendo em conta todos estes fatores, foi importante definir algumas estratégias e objetivos finais para este elemento. Após serem efetuadas algumas pesquisas acerca da melhor categoria para a definição deste elemento, chegou-se à conclusão que, para além da sua definição de formas, também seria bastante importante assegurar a capacidade de ostentar armaduras no seu interior. Mesmo sabendo que o Dynamo tem evoluído bastante nos últimos anos, ainda não está bem preparado ao nível da colocação das armaduras de uma forma mais expedita e que garantisse uma correta inserção dos comprimentos dos varões, bem como, os mapas de quantidades e geometria dos varões.

Para esta finalidade optou-se inicialmente por criar uma família inserida numa tipo estrutural de acordo com as suas características, de maneira a tirar proveito das competências que esse tipo estrutural pode assegurar. O tipo de estrutura mais equiparado à geometria e características deste elemento é o de uma parede estrutural. Ao definirmos este elemento como parede estrutural, após a sua criação e implantação é possível aproveitar as capacidades do Revit para a colocação de armaduras nas paredes, tornando-se assim uma vantagem clara para inserir de forma mais expedita e controlada as armaduras.

Para além do critério ligado à colocação das armaduras, o facto de poder ser subtraída com uma laje, também pesou nesta opção, deixando para trás a hipótese de elemento viga. Este ponto será explicado mais à frente na definição das rotinas Dynamo associadas.

De seguida, apresenta-se a descrição dos passos para a definição geométrica e paramétrica das carlingas:

1. Criação de uma família de parede estrutural em betão;
2. Criação de uma primeira rotina em Dynamo para obtenção dos pontos de inserção das carlingas;

3. Criação da segunda rotina em Dynamo para a criação de um elemento de laje como elemento de extrusão vazio (Void), que servirá para efetuar o corte na base da carlinga. Este elemento será depois filtrado, após definir a face inferior da carlinga;
4. Subtração da interseção dos dois elementos.

Os pontos 2 e 3 serão desenvolvidos mais à frente no capítulo do Dynamo.

Aparelhos de Apoio

Os aparelhos de apoio foram criados, de forma a serem inseridos no projeto a partir de um único ponto georreferenciado. O ponto definido para a sua inserção foi o da face superior no centro do plinto.

Optou-se por definir este ponto através de uma rotina no Dynamo, a partir das coordenadas de inserção das vigas. O elemento foi parametrizado de modo a ser possível efetuar alteração das duas dimensões ao longo do projeto. De seguida apresentam-se imagens da família de aparelhos de apoio, retiradas do Revit e os parâmetros definidos:

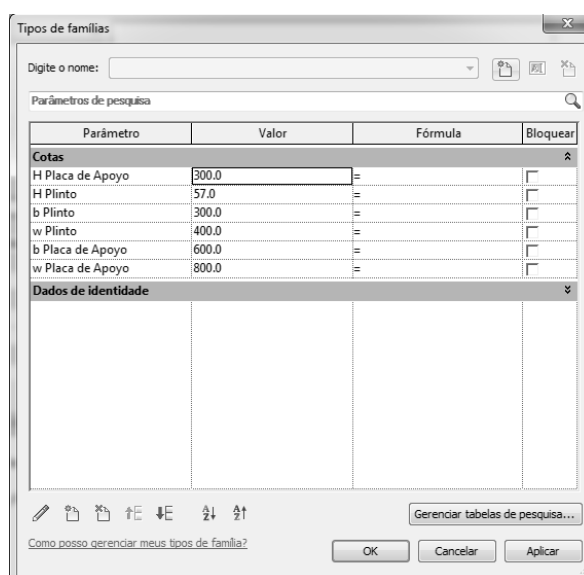


Figura 3.21 – Quadro de parâmetros.

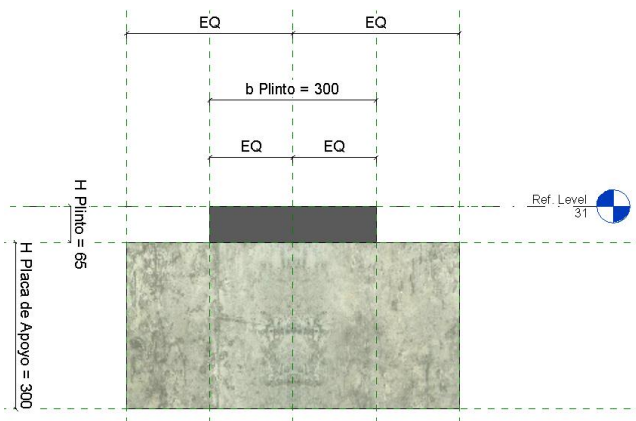


Figura 3.22 – Elevação Lateral parametrizado

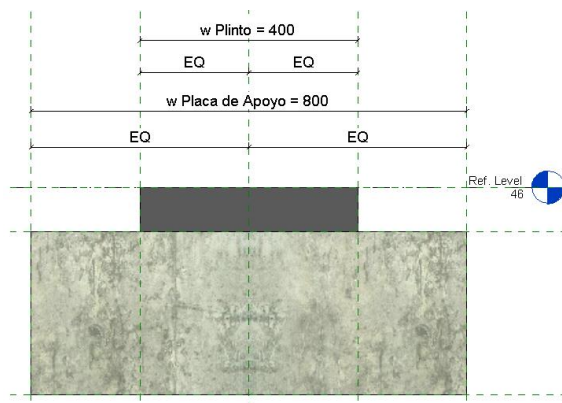


Figura 3.23 – Elevação Frontal parametrizado.

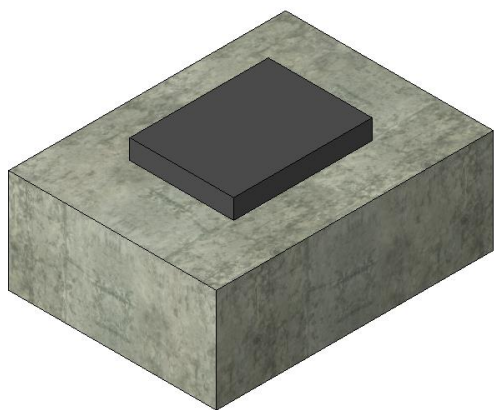


Figura 3.24 – Visualização 3D.

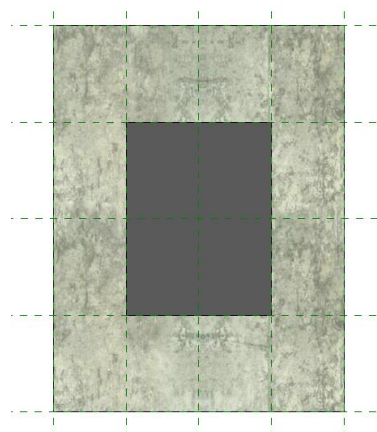


Figura 3.25 – Vista Superior.

No subcapítulo 3.2.3, referente ao Dynamo, será apresentada a rotina para a sua implantação e edição em projeto.

3.2.3. Parametrização de Rotina em Dynamo

Conforme introduzido no capítulo do estado da arte, o Dynamo apresenta-se como uma aplicação de auxílio ao Revit. Assim sendo, antes de iniciar a criação dos elementos, torna-se essencial avaliar uma série de pontos cruciais, para que todo este processo colaborativo funcione, ao nível das funcionalidades quer do Revit, quer do Dynamo. Esta avaliação pode-se sintetizar através dos pontos seguintes:

1. Definir as famílias que necessitam de ser criadas e implantadas pelo Dynamo;
2. Definir dependências entre elementos, ao nível da sua implantação ou dimensão;
3. Definir grupos no Dynamo por elemento criado;
4. Definir o faseamento da criação dos elementos;
5. Avaliar a possibilidade de criar sub-rotinas diretamente independentes umas das outras.

Devido ao facto da maior parte dos elementos estarem dependentes do posicionamento das vigas e do tabuleiro, torna-se essencial a criação de uma rotina que englobe a criação desses elementos e dos restantes que de estes dependem. Numa fase posterior poder-se-á optar por sub-rotinas para a criação ou edição de parâmetros ou mesmo a família completa, evitando assim a criação e alteração de famílias que não necessitem de ser modificadas ou criadas de novo.

Nos pontos seguintes serão apresentadas, de forma sucinta, todas as rotinas criadas no Dynamo para a criação e edição dos diversos componentes da ponte. Sendo que o processo se inicia na importação das coordenadas dos pontos e acaba na edição da família criada pelo Dynamo, no ambiente Revit.

Importação das Coordenadas dos pontos do Eixo da via e exportação dos pontos limites do Tabuleiro

De modo a obterem-se os pontos das extremidades do tabuleiro, na criação desta rotina, optou-se por utilizar os algoritmos disponíveis no pacote de pontes designado por *“BridgePackage”* no Dynamo. Tendo por base a organização de uma folha de Excel de forma criteriosa ao nível da disposição da informação necessária para a importação do algoritmo no Dynamo, criou-se uma rotina capaz de interpretar essa informação.

Sendo este o ponto de partida para o desenvolvimento da rotina no Dynamo, é de total interesse que a folha de Excel seja o mais simplificada possível, criando-se assim folhas anexas de dados finais organizados, para serem importados pelo Dynamo, reduzindo o número de iterações da rotina para efetuar essa organização.

Com foco neste princípio, após exportação dos dados do formulário com as coordenadas dos pontos do eixo da via do Civil 3D, criou-se uma outra folha de Excel onde são definidas as larguras em relação ao eixo da via, bem como a inclinação transversal e a espessura da laje, conforme apresentado na figura 3.26.

Easting	Northing	Elevation	Width_Left	Width_Right	iTrans_Left	iTrans_Right	SlabThickness
0,00000	0,00000	7,99400	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-0,52570	-0,85070	7,96900	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-1,05240	-1,70070	7,94400	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-1,58030	-2,55000	7,91900	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-2,10930	-3,39860	7,89400	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-2,63940	-4,24660	7,86900	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-3,17060	-5,09380	7,84500	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-3,70290	-5,94040	7,82100	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-4,23630	-6,78620	7,79700	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-4,77090	-7,63140	7,77300	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-5,30650	-8,47580	7,74900	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-5,84320	-9,31960	7,72600	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2

Figura 3.26 – Organização dos dados na folha de Excel.

De referir que para que os elementos sejam criados adequadamente, é necessário efetuar uma transformação das coordenadas, conforme explicado anteriormente na parte do Excel.

De seguida explica-se a rotina criada com a finalidade de importar os dados da folha de Excel obtendo assim as coordenadas dos limites laterais do tabuleiro através do Dynamo:

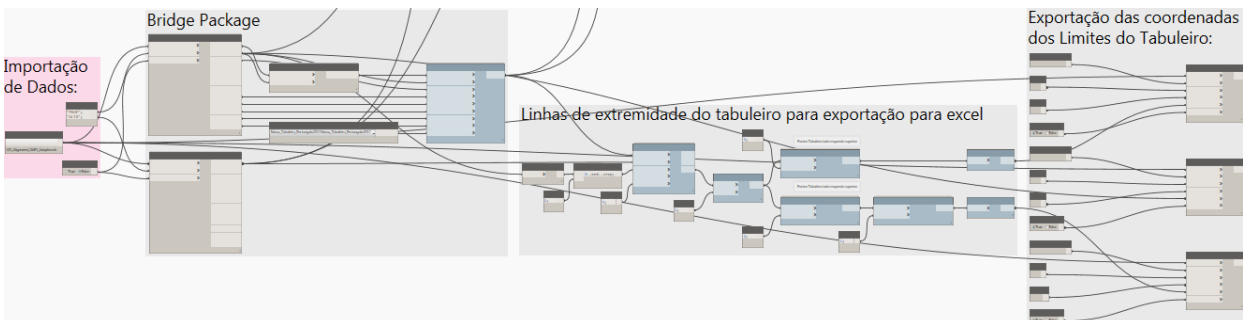


Figura 3.27 – Layout geral da rotina do Dynamo para definição dos limites laterais da laje do tabuleiro e exportação das respectivas coordenadas.

1. Importação dos dados da folha de Excel definida anteriormente:

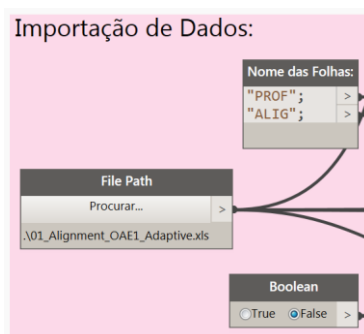


Figura 3.28 – Importação de dados de geometria no Dynamo.

2. Criação de uma família de massa adaptativa da secção transversal do tabuleiro, a que se deu o nome de “Massa_Tabuleiro_Rectângulo2017”. Esta família é constituída por parâmetros pré-definidos e iguais aos nomes definidos nas células de topo das colunas da folha de Excel com o nome “PROF”.

Easting	Northing	Elevation	Width_Left	Width_Right	iTrans_Left	iTrans_Right	SlabThickness
0,00000	0,00000	7,99400	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-0,52570	-0,85070	7,96900	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-1,05240	-1,70070	7,94400	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-1,58030	-2,55000	7,91900	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-2,10930	-3,39860	7,89400	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-2,63940	-4,24660	7,86900	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-3,17060	-5,09380	7,84500	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-3,70290	-5,94040	7,82100	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-4,23630	-6,78620	7,79700	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-4,77090	-7,63140	7,77300	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-5,30650	-8,47580	7,74900	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2
-5,84320	-9,31960	7,72600	6,93	6,3	4,17519	-4,17519	0,2

Figura 3.29 – Folha de Excel com os dados para importação no Dynamo.

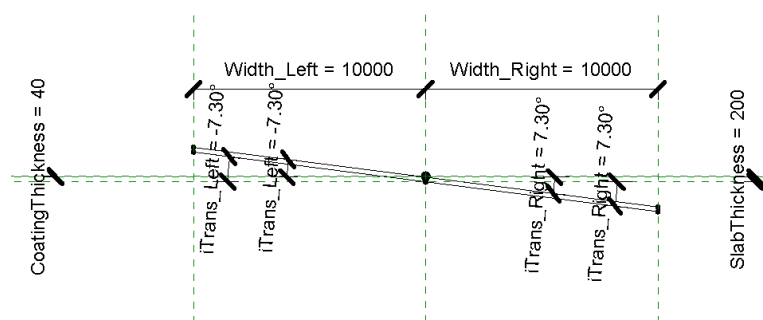


Figura 3.30 – Parâmetros definidos na família adaptativa criada no Revit.

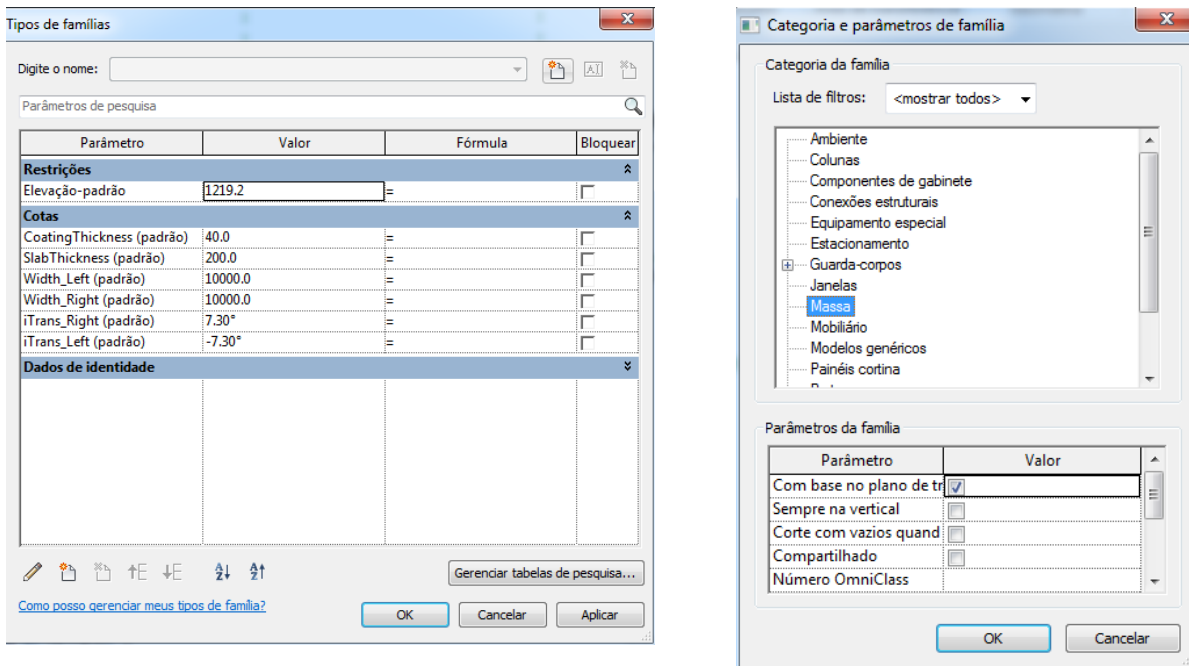


Figura 3.31 – Quadro de parâmetros e quadro de categoria da família adaptativa.

3. Ao atribuírem-se os mesmos parâmetros na folha de Excel e na família adaptativa, permite-se ao Dynamo fazer a sua ligação através de um algoritmo e construir o tabuleiro do viaduto. O grupo designado na figura 3.32 por “*Bridge Package*” cria inicialmente o eixo viário e depois com o *input* da família adaptativa obtém-se os limites laterais do tabuleiro.

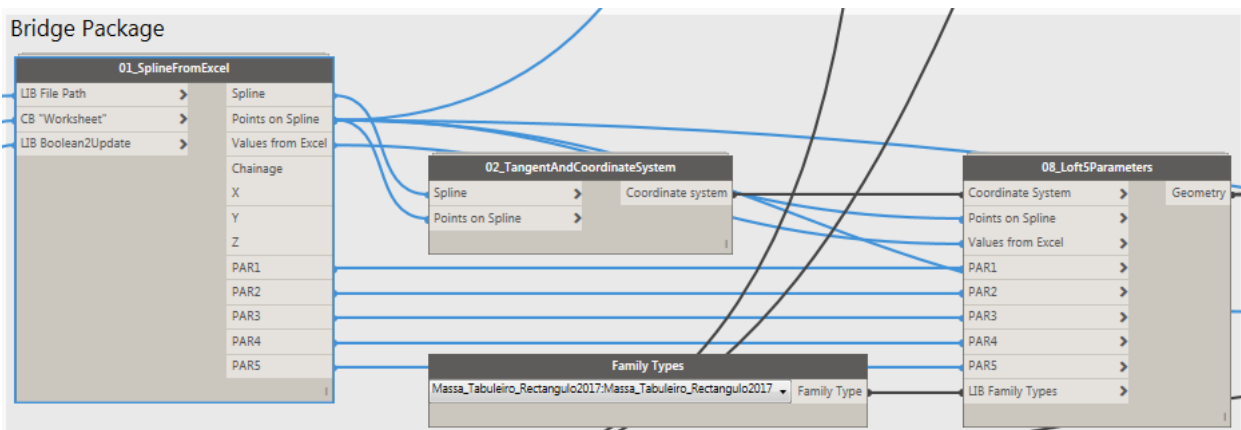


Figura 3.32 – Rotina do Dynamo para a criação do tabuleiro com família adaptativa.

4. Tendo em conta a geometria criada com a rotina anterior, a rotina que se segue permite determinar os pontos das extremidades superiores da laje do tabuleiro através do *node* “*11_SectionElevation*”, especificando através de um “*code block*” o espaçamento pretendido, neste caso optou-se por obter as coordenadas nos pontos com espaçamento longitudinal de 1 metro. Posteriormente procede-se à filtragem e organização dos dados obtidos (texto, curvas e pontos).

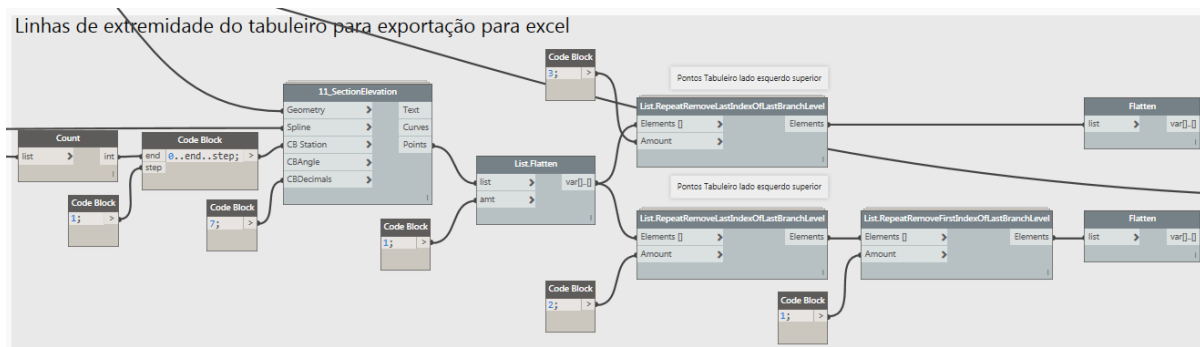


Figura 3.33 – Rotina Dynamo para filtragem de dados.

- De seguida, executa-se a exportação das respetivas coordenadas para uma folha de Excel, através do *node* "Excel.WriteToFile", definindo o local exato para a sua colocação. Estes dados foram utilizados posteriormente para a colocação das guardas laterais do viaduto.

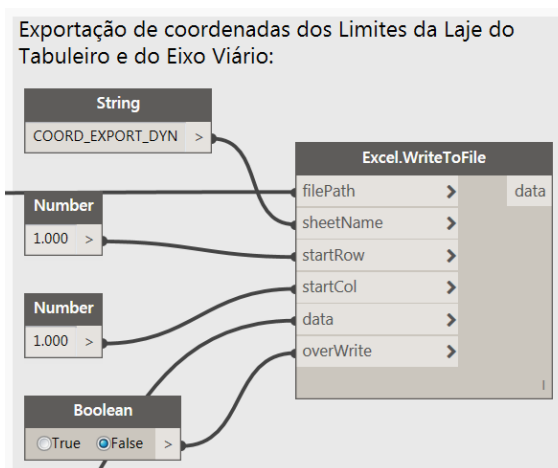


Figura 3.34 – Rotina Dynamo para exportação de dados para folha de Excel.

Os dados extraídos do Dynamo são apresentados em formato de texto, como se apresenta na figura 3.35:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	
11																	
12																	

Figura 3.35 – Dados exportados do Dynamo para o Excel.

De forma a ser possível utilizar os dados é necessário efetuar algumas transformações com recurso a linguagem de Excel, com a finalidade de obtermos os valores das coordenadas separadas e em formato

de número. Tendo em conta que se efetuou a transformação das coordenadas, em sentido contrário é necessário efetuar a transformação para os eixos reais.

B2 =SUBST(SEG.TEXTO(COORD_EXPORT_DYN!B2;(LOCALIZAR("X=";COORD_EXPORT_DYN!B2;1))+3;(LOCALIZAR("Y=";COORD_EXPORT_DYN!B2;LOCALIZAR("X=";COORD_EXPORT_DYN!B2;1)))-(LOCALIZAR("X=";COORD_EXPORT_DYN!B2;1))-3);";";";1)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1		Xi	Yi	Zi				Xi	Yi	Zi				Xi	Yi	Zi				
2		5,361	-3,309	8,374				0,000	0,000	7,994				-5,897	3,640	7,408				
3		4,832	-4,166	8,349				-0,526	-0,851	7,969				-6,419	2,796	7,383				
4		4,301	-5,023	8,324				-1,052	-1,701	7,944				-6,941	1,954	7,358				
5		3,768	-5,879	8,299				-1,580	-2,550	7,919				-7,464	1,112	7,333				

Figura 3.36 – Código textual do Excel para retirar os números referentes às coordenadas.

Índice:	Xi	Yi	Zi	Xi	Yi	Zi	Xi	Yi	Zi
1	734034,004	2153631,389	908,374	734028,643	2153634,698	907,994	734022,746	2153638,338	907,408
2	734033,475	2153630,532	908,349	734028,117	2153633,847	907,969	734022,224	2153637,494	907,383
3	734034,004	2153631,389	908,374	734027,591	2153632,997	907,944	734022,746	2153638,338	907,408
4	734033,475	2153630,532	908,349	734027,063	2153632,148	907,919	734022,224	2153637,494	907,383
5	734032,944	2153629,675	908,324	734026,534	2153631,299	907,894	734021,702	2153636,652	907,358
6	734032,411	2153628,819	908,299	734026,004	2153630,451	907,869	734021,179	2153635,810	907,333
7	734031,878	2153627,963	908,274	734025,472	2153629,604	907,845	734020,655	2153634,969	907,308
8	734031,343	2153627,108	908,249	734024,940	2153628,758	907,821	734020,130	2153634,129	907,283
9	734030,808	2153626,254	908,225	734024,407	2153627,912	907,797	734019,603	2153633,289	907,259
10	734030,271	2153625,401	908,201	734023,872	2153627,067	907,773	734019,076	2153632,450	907,235
11	734029,733	2153624,548	908,177	734023,336	2153626,222	907,749	734018,547	2153631,612	907,211
12	734029,194	2153623,695	908,153	734022,800	2153625,378	907,726	734018,018	2153630,775	907,187
13	734028,655	2153622,845	908,129	734022,262	2153624,535	907,703	734017,487	2153629,938	907,163

Figura 3.37 – Coordenadas da laje do tabuleiro no sistema de eixos real.

Criação da Família Laje de Tabuleiro

Dentro das várias hipóteses avaliadas para a criação da laje de betão do tabuleiro, optou-se por criar uma laje através da criação prévia de uma família adaptativa paramétrica da laje, para posteriormente inserir-se no projeto. A criação da família segue o princípio utilizado para a extração das coordenadas, mas neste caso, a rotina criada é executada dentro de uma família adaptativa.

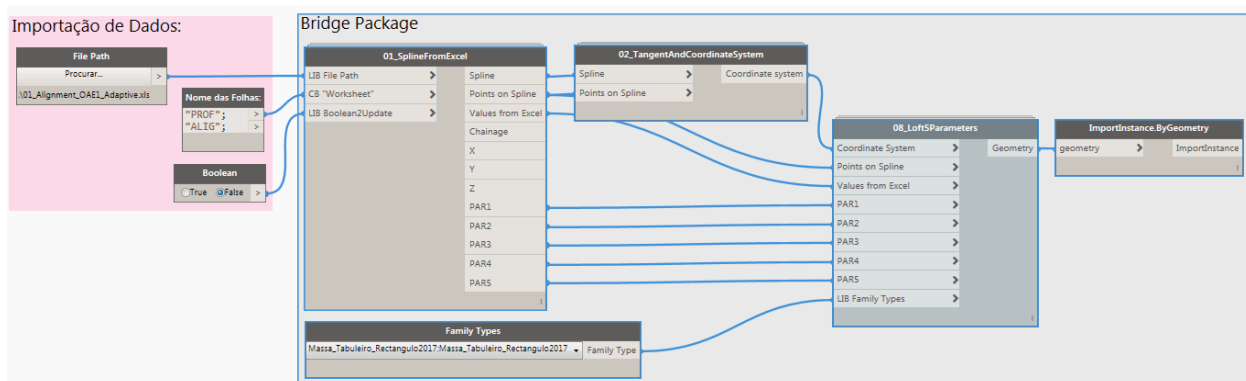


Figura 3.38 – Rotina Dynamo para a criação da família Laje do Tabuleiro.

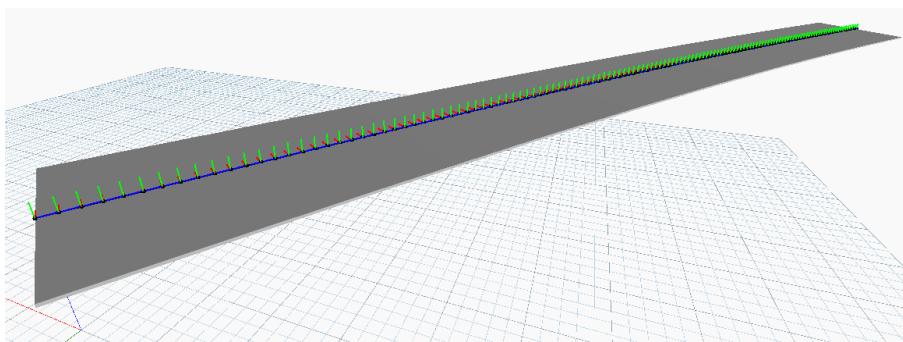


Figura 3.39 – Imagem da laje do tabuleiro em ambiente Dynamo.

Ao acrescentar o node “*ImportInstance.ByGeometry*” na rotina apresentada no subcapítulo anterior (3.2.3.1), executa-se a laje dentro do ambiente da família adaptativa no Revit, como elemento genérico. Após criar o elemento no Revit, é necessário explodir o elemento através do comando presente no Revit para o efeito e assim transformar o elemento de importação num modelo genérico.

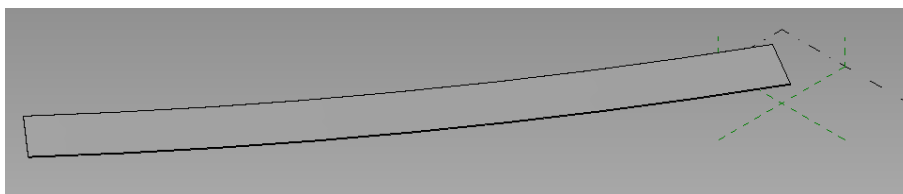


Figura 3.40 – Imagem final da família adaptativa paramétrica da laje do tabuleiro no Revit.

Implantação da Laje do Tabuleiro no Projeto

Após a conclusão da família anterior, a sua implantação no projeto realiza-se através da execução de uma nova rotina apresentada na figura 3.41:

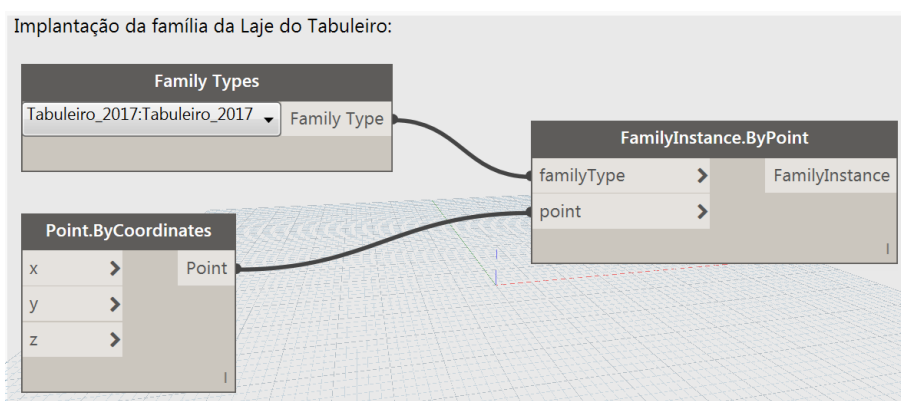


Figura 3.41 – Rotina Dynamo para implantação da laje do tabuleiro no projeto em Revit.

Tendo em conta o tempo disponível para a realização deste projeto foi necessário simplificar alguns elementos de forma a demonstrar o processo. No caso do tabuleiro, não foi possível em tempo útil solucionar a definição das pré-lajes. De referir, que à conclusão do trabalho verificou-se como solução

viável a utilização de elementos adaptativos com base em pontos coordenados pré-determinados para a definição completa da laje de betão do tabuleiro, bem como as pré-lajes.

Implantação das Vigas

Para a implantação das vigas criou-se uma rotina baseada nas coordenadas definidas na folha de Excel do projeto. Cada viga foi implantada segundo a definição dos dois pontos da extremidade da mesma, segundo a orientação do respetivo vetor correspondente ao seu eixo longitudinal.

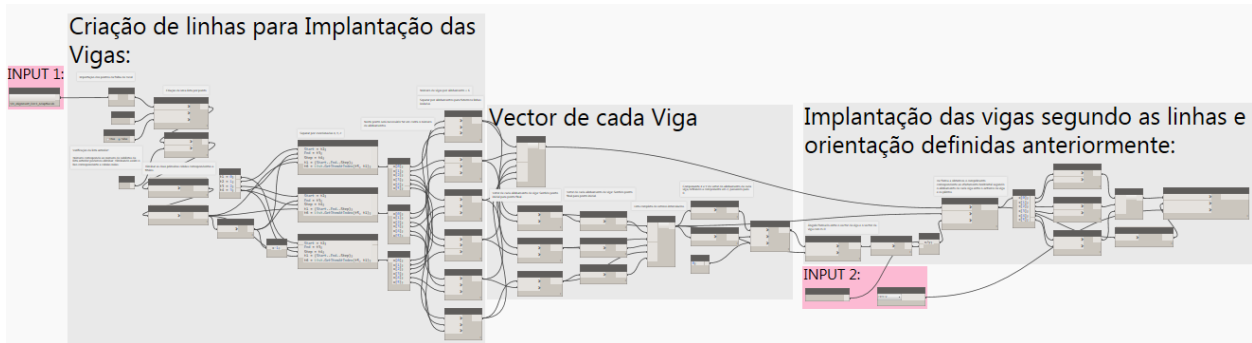


Figura 3.42 – Layout geral da rotina Dynamo para a criação e implantação das vigas.

Descrição da rotina Dynamo:

1. Indicação da folha de cálculo do projeto com referência às vigas e importação das coordenadas dos pontos no topo das vigas segundo o plano vertical do eixo dos aparelhos de apoio, conforme descrito nas figuras 3.43, 3.44 e 3.45.

Indicação dos pontos correspondentes às coordenadas da folha de Excel:

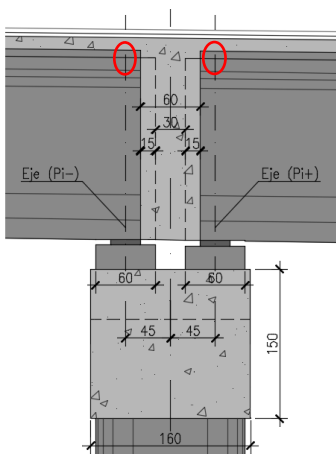


Figura 3.43 – Corte longitudinal nos pilares.

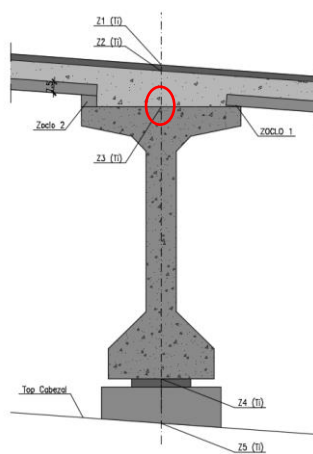


Figura 3.44 – Corte transversal da viga.

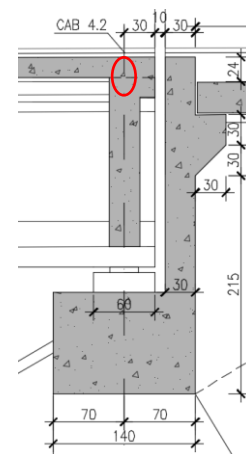


Figura 3.45 – Corte longitudinal nos encontros.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	CAB 1	Trabe Top - Z3	7,446817	7,283005	7,119193	6,955381	6,791569	6,627757
2		M (m)	-10,572200	-12,437500	-14,302800	-16,168100	-18,033300	-19,898600
3		P (m)	-26,606600	-25,359100	-24,111600	-22,864100	-21,616600	-20,369200
4	P2 -	Trabe Top - Z3	6,945200	6,781388	6,617576	6,453764	6,289952	6,126140
5		M (m)	-28,779900	-30,591300	-32,402700	-34,214100	-36,025500	-37,836900
6		P (m)	-52,650900	-51,326400	-50,001900	-48,677400	-47,352800	-46,028300
7	P2 +	Trabe Top - Z3	6,934136	6,770324	6,606512	6,442700	6,278888	6,115076
8		M (m)	-29,311100	-31,122500	-32,933900	-34,745300	-36,556700	-38,368100
9		P (m)	-53,377400	-52,052900	-50,728400	-49,403900	-48,079300	-46,754800
10	P3 -	Trabe Top - Z3	6,662384	6,498572	6,334760	6,170948	6,007136	5,843324
11		M (m)	-48,327800	-50,082200	-51,836500	-53,590900	-55,345200	-57,099600
12		P (m)	-78,273100	-76,873900	-75,474700	-74,075500	-72,676300	-71,277100
13	P3 +	Trabe Top - Z3	6,657720	6,493908	6,330096	6,166284	6,002472	5,838660
14		M (m)	-48,889000	-50,643400	-52,397700	-54,152100	-55,906400	-57,660800
15		P (m)	-78,976700	-77,577500	-76,178300	-74,779100	-73,379900	-71,980700
16	CAB 4	Trabe Top - Z3	6,607969	6,444157	6,280345	6,116533	5,952721	5,788909
17		M (m)	-69,226600	-70,920900	-72,615100	-74,309300	-76,003500	-77,697700
18		P (m)	-103,394000	-101,922600	-100,451100	-98,979700	-97,508200	-96,036800
19								
20							TransformX	734028,643
21							TransformY	2153634,698
22							TransformZ	900,000

Figura 3.46 – Folha de Excel com as coordenadas transformadas para a implantação das vigas.

Através de algumas iterações no Dynamo de modo a organizar os dados importados da folha de Excel por coordenadas em X, Y e Z, com a finalidade de servirem de *input* para a criação dos pontos coordenados.

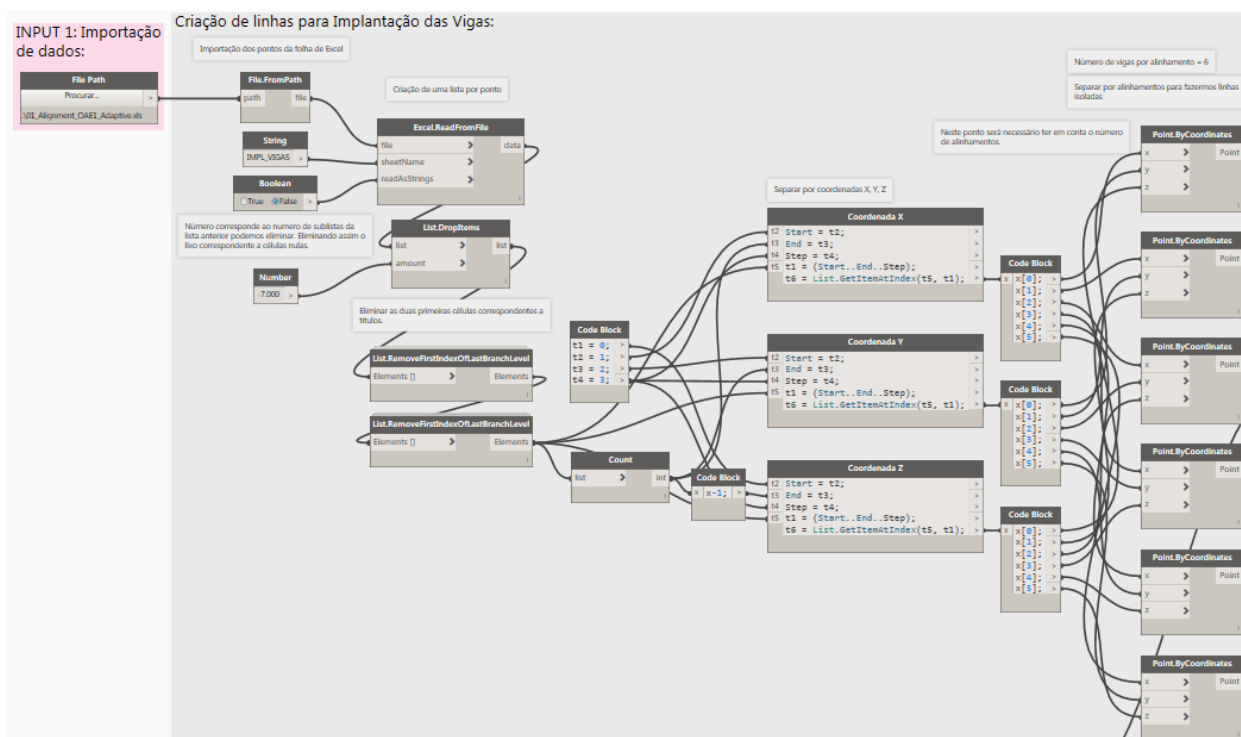


Figura 3.47 – Rotina Dynamo para a definição dos pontos que servirão de base para a implantação das vigas.

2. Tendo em conta a posição dos pontos criados, em concordância com as figuras de indicação da posição dos pontos nos pilares e nos encontros no ponto anterior, torna-se necessário efetuar uma translação segundo a orientação dos vetores correspondentes ao alinhamento de cada viga (ponto 1 da figura 3.48) para obtermos os pontos das extremidades das vigas. Assim, com a

rotina seguinte retiram-se as componentes em X e Y dos vetores de cada viga e transformam-se as componentes em Z em zero, dando origem a um novo vetor de igual orientação mas de componente horizontal (ponto 2 da figura 3.48).

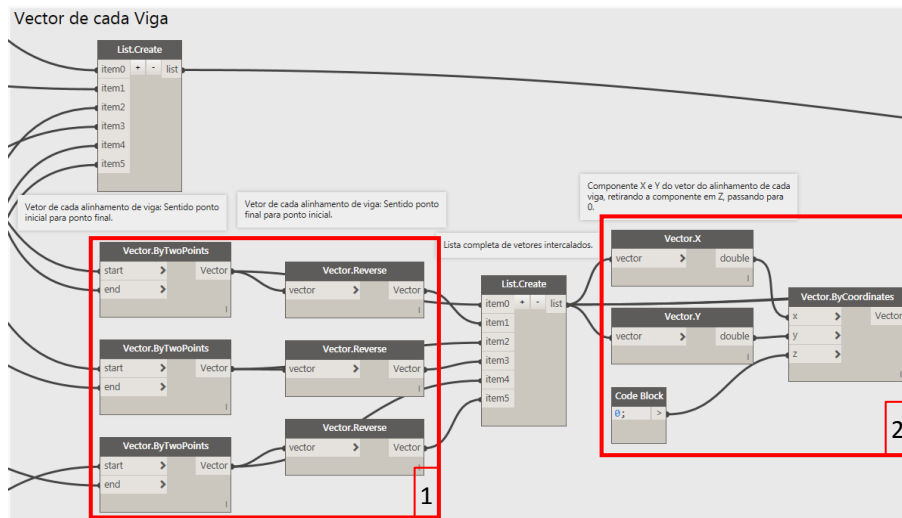


Figura 3.48 – Rotina Dynamo para a definição dos vetores para a orientação de cada viga.

3. Após se definirem os dois grupos de vetores, o *node* “*Vector.AngleWithVector*” obtém o ângulo vertical formado por estes, que servirá de *input* para o cálculo da distância de translação no sentido dos vetores das vigas (ponto 1 figura 3.48), correspondente a 0.30 metros segundo o sentido dos vetores horizontais (ponto 2 da figura 3.48). A distância é calculada a partir do resultado de 0.30 metros a dividir pelo cosseno do respetivo ângulo, conforme assinalado na figura 3.49.

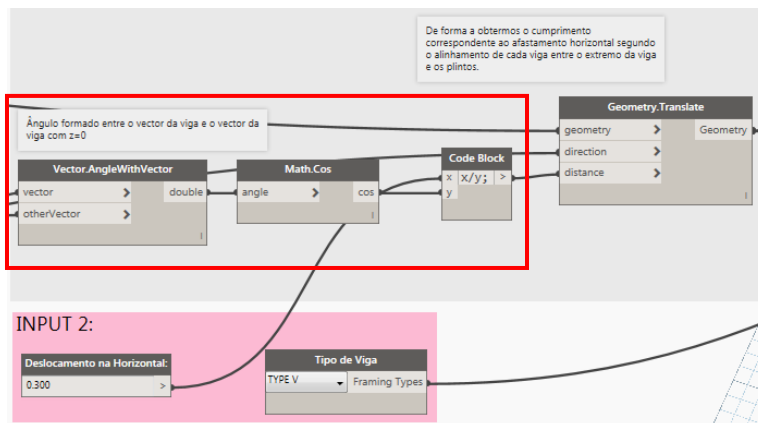


Figura 3.49 – Rotina Dynamo para a translação dos pontos para as extremidades das vigas.

4. Para finalizar a rotina esta rotina, é efetuada a translação dos pontos para a extremidade das vigas (ponto 1 da figura 3.49) e criadas as linhas (ponto 2) que servirão de base para a implantação das vigas através do *node* “*StructuralFraming.BeamByCurve*” (ponto 3).

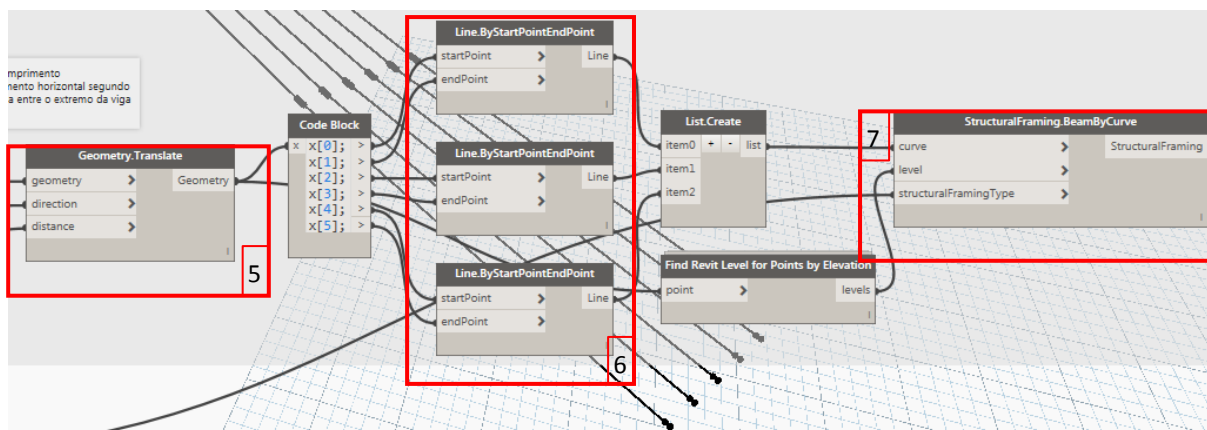


Figura 3.50 – Rotina Dynamo para a implantação das vigas.

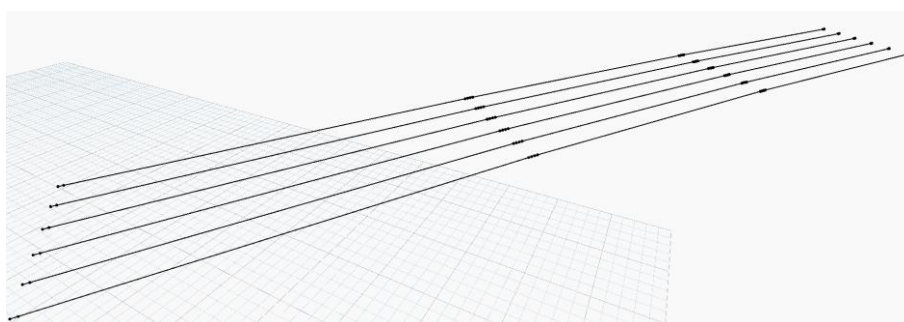


Figura 3.51 – Visualização 3D no plano de fundo do Dynamo.

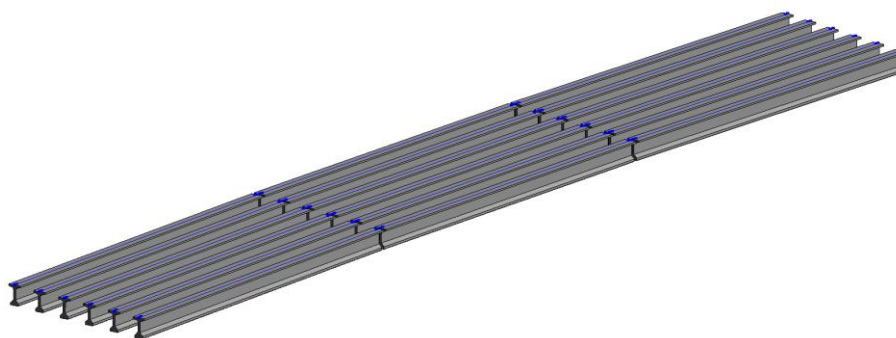


Figura 3.52 – Visualização 3D Revit após criação das vigas no projeto.

Implantação dos Aparelhos de Apoio

A implantação dos aparelhos de apoio vem no seguimento da rotina apresentada anteriormente para a implantação das vigas. Assim, a posição dos elementos é definida a partir das coordenadas importadas para a implantação das vigas (figura 3.46) e aproveitando os mesmos, para a definição dos vetores necessários para a orientação dos aparelhos de apoio. A figura 3.53 representa o *Layout* geral da rotina Dynamo para a criação e orientação dos aparelhos de apoio.

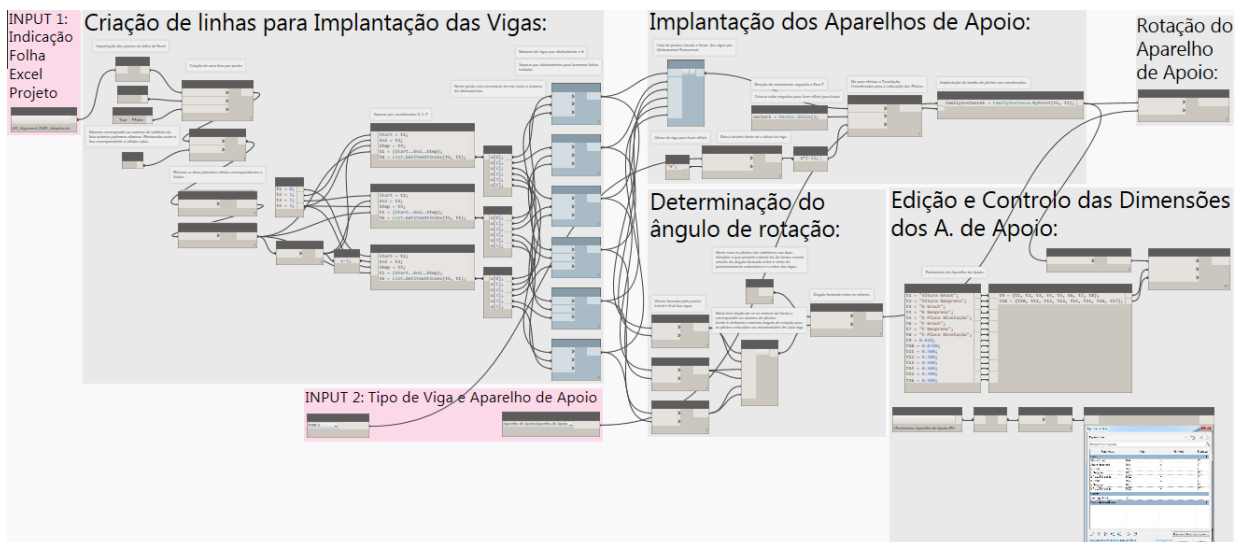


Figura 3.53 – *Layout* geral da rotina Dynamo para a definição dos Aparelhos de Apoio.

Descrição da rotina Dynamo para a implantação dos aparelhos de apoio:

1. Importação das mesmas coordenadas utilizadas no ponto 1 da rotina anterior para implantação das vigas e criação dos respetivos pontos.
2. Tendo em conta o ponto de inserção definido na família do aparelho de apoio (face superior), realiza-se a translação vertical dos pontos definidos no ponto anterior, segundo o comprimento da altura da viga (assinalado na figura 3.54) e executa-se a implantação dos aparelhos de apoio a partir do *node* “*FamilyInstance.ByPoint*”.

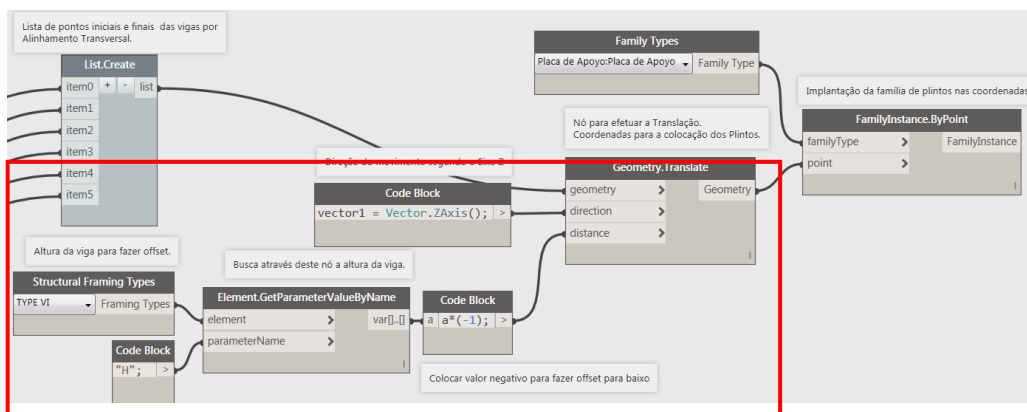


Figura 3.54 – Rotina Dynamo para implantação dos aparelhos de apoio.

3. Ao inserir os aparelhos de apoio nos pontos coordenados, estes ficam orientados segundo o eixo global do projeto, tornando-se necessário efetuar a sua rotação de modo a ficarem alinhados segundo a orientação da viga que apoia sobre o respetivo aparelho de apoio. Conforme se pode observar na rotina abaixo, primeiro determinaram-se os vetores de cada viga, sendo que o ponto inicial para a determinação do vetor é o ponto sobre o aparelho de apoio, para posteriormente serem obtidos os ângulos formados pelos respetivos vetores de cada viga e os vetores correspondentes ao eixo dos “X” do projeto.

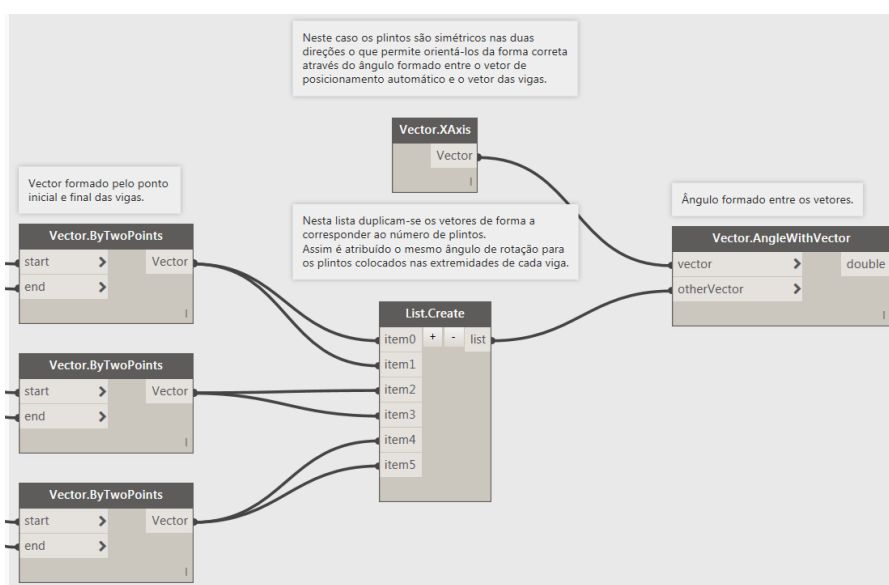


Figura 3.55 – Rotina Dynamo para determinação do ângulo de rotação dos aparelhos de apoio.

4. Após determinar o ângulo executa-se a rotação e implantação dos elementos, usando o *node* “FamilyInstance.SetRotation” apresentado na figura 3.56:

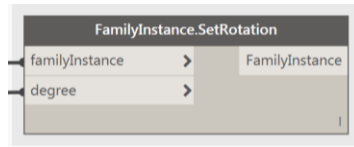


Figura 3.56 – Node para a rotação do elemento.

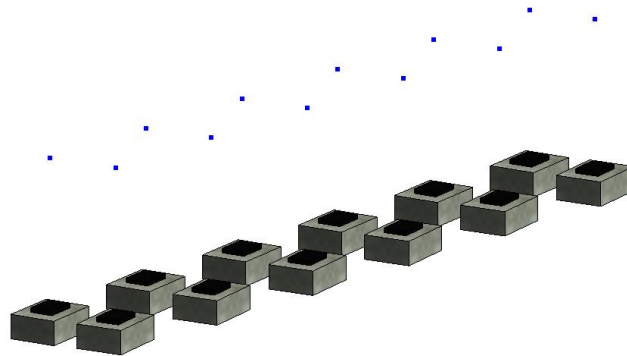


Figura 3.57 – Implantação dos Aparelhos de apoio no Revit.

5. Tendo em conta, a possibilidade de alteração das dimensões do aparelho de apoio ao longo da realização do projeto, criou-se uma rotina para edição e controlo da geometria dos aparelhos de apoio, segundo os parâmetros criados na família dos mesmos.

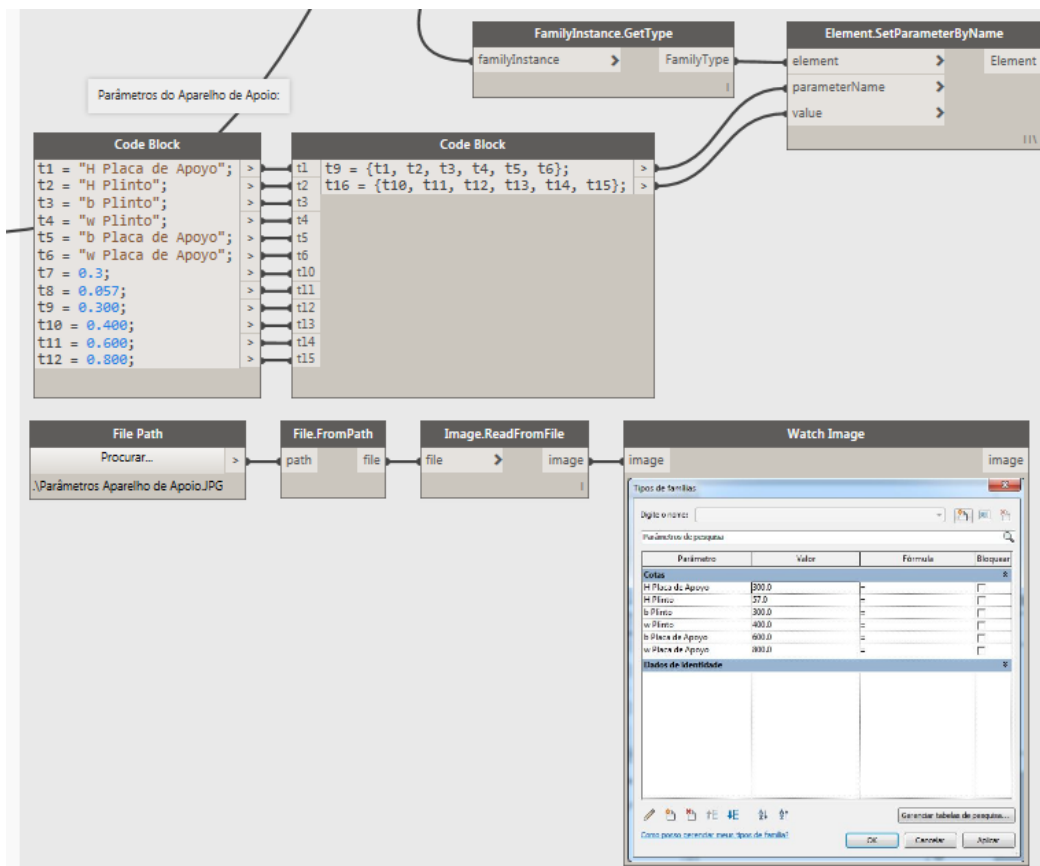


Figura 3.58 – Rotinas Dynamo para edição dos parâmetros da família dos aparelhos de apoio.



Figura 3.59 – Imagem final dos aparelhos de apoio implantados no Revit.

Definição da Carlinga

Para a definição da carlinga analisaram-se várias formas de a construir, tais como:

1. Definir todos os pontos do seu contorno e criar um elemento genérico baseado em linhas que definem esse contorno;
2. Criar a carlinga como um elemento da categoria parede e posteriormente criar uma laje adaptada à forma da superfície inferior da carlinga e efetuar o corte e subtração do excedente da parede através da união dos dois elementos;
3. Elemento adaptativo aos contornos da carlinga.

Neste trabalho, optou-se por desenvolver a segunda hipótese, tendo em conta que manter-se-ia as funcionalidades do Revit para a colocação posterior de armaduras.

Devido à complexidade do processo de criação deste elemento, optou-se por dividir a rotina em duas sub-rotinas separadas, podendo assim reduzir a carga sobre o computador, resultando numa maior fluidez no Dynamo e Revit.

- Rotina 1 - corresponde à definição das carlingas dos alinhamentos dos Encontros.
- Rotina 2 - corresponde à definição das carlingas dos alinhamentos dos pilares.

Tendo em conta as semelhanças nos processos de criação destas duas rotinas apresentar-se-á com exemplo a rotina 1 referente aos alinhamentos dos encontros.

De referir que estas rotinas, estão inseridas na rotina global do projeto apresentada no anexo III, onde é efetuada uma gestão da execução de cada grupo da rotina global. Esta gestão do faseamento de ativação de cada grupo é realizada através do designado “congelar” de *nodes* no Dynamo. Através desta

ferramenta é possível definir as execuções, mantendo toda a informação dentro do mesmo ficheiro, o que se torna importante pelo facto de umas rotinas estarem dependentes dos dados das antecedentes.

Explicação geral da Rotina 1:

1. Obter as linhas que definem o eixo na base da carlinga;

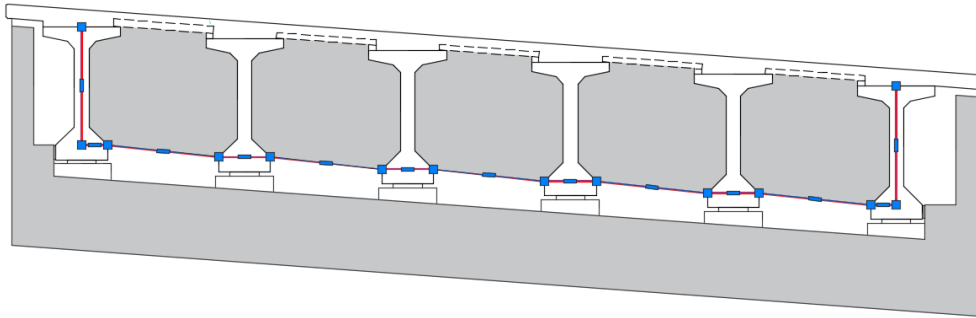


Figura 3.60 – Pontos a definir do eixo na base da carlinga.

2. Efetuar o *offset* (copiar na perpendicular) dessa “*polyline*” metade da espessura da carlinga para cada lado, para se obterem as linhas de contorno longitudinal da carlinga;
3. Fechar a face que define a base da carlinga nas extremidades;
4. Projetar as linhas que definem a base da carlinga num plano horizontal inferior;
5. Criação de uma laje nesse plano;
6. Extrusão dessa laje para os pontos definidos anteriormente, da base da carlinga.

Explicação detalhada da Rotina 1:

1. Tendo em conta o pressuposto referido anteriormente, esta rotina desenvolve-se a partir dos pontos definidos para implantação dos aparelhos de apoio, descrito anteriormente a partir da rotina apresentada na figura 3.61.

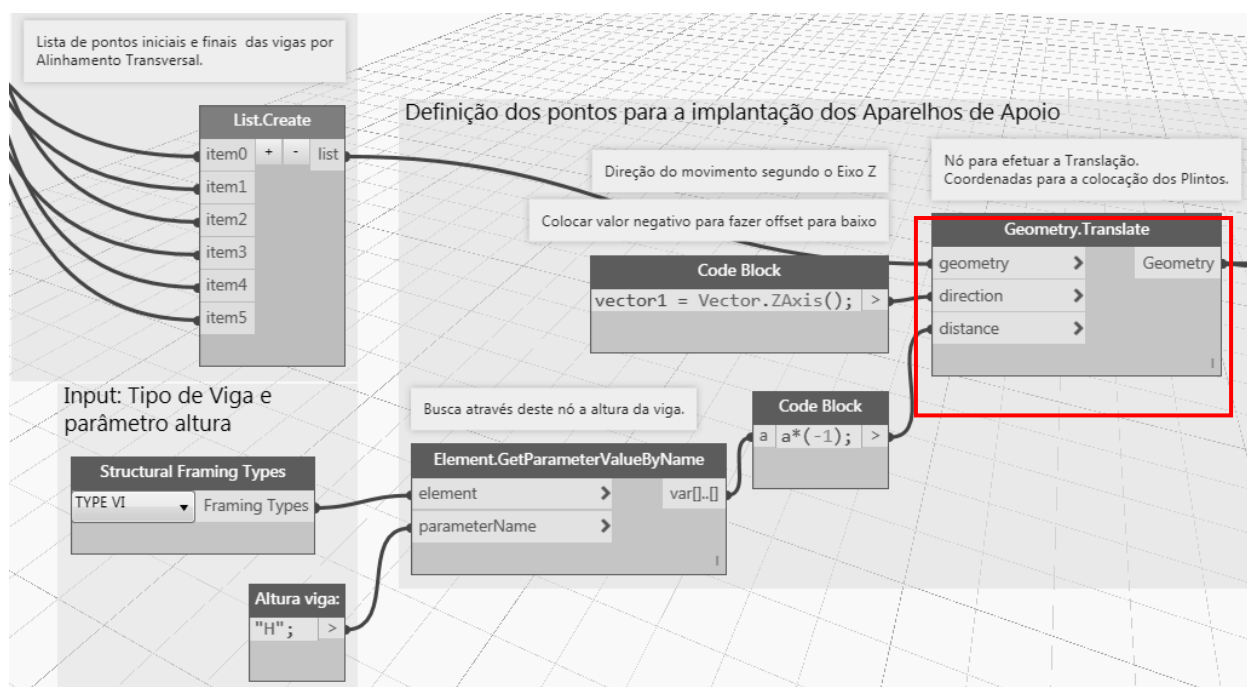


Figura 3.61 – Rotina Dynamo para determinação dos pontos de implantação dos aparelhos de apoio.

2. A partir da lista dos pontos dos aparelhos de apoio, selecionam-se os pontos das extremidades por alinhamento transversal para a definição da orientação dos vetores segundo o eixo da carlinga, na horizontal.

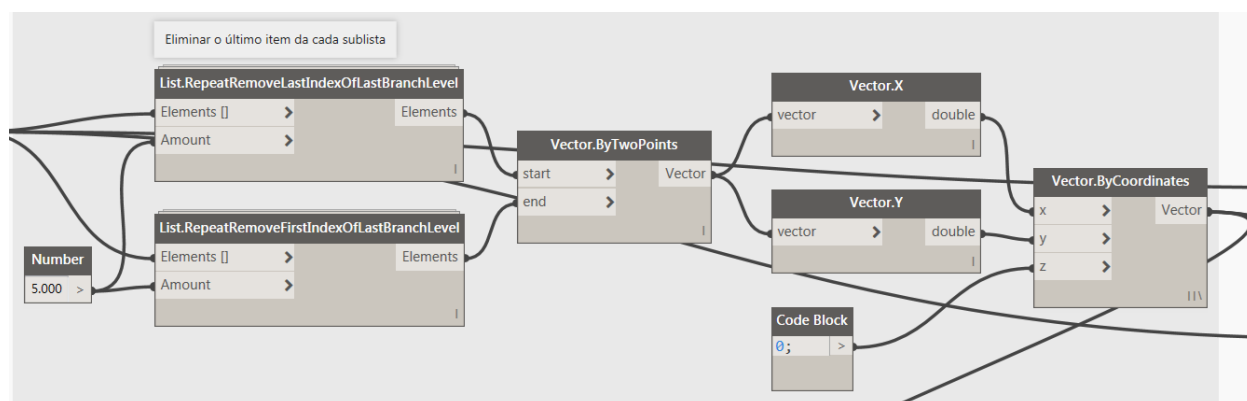


Figura 3.62 – Rotina Dynamo para a definição dos vetores transversais do eixo das carlingas.

3. A rotina seguinte efetua a translação dos pontos de inserção dos aparelhos de apoio, segundo a orientação dos respectivos vetores pré-determinados. Para realizar a referida translação entrará como *input* a largura do banzo da viga e nas extremidades uma dimensão predefinida no projeto. Obtêm-se assim, todos os pontos do eixo da base da carlinga que irão definir a superfície inferior da carlinga.

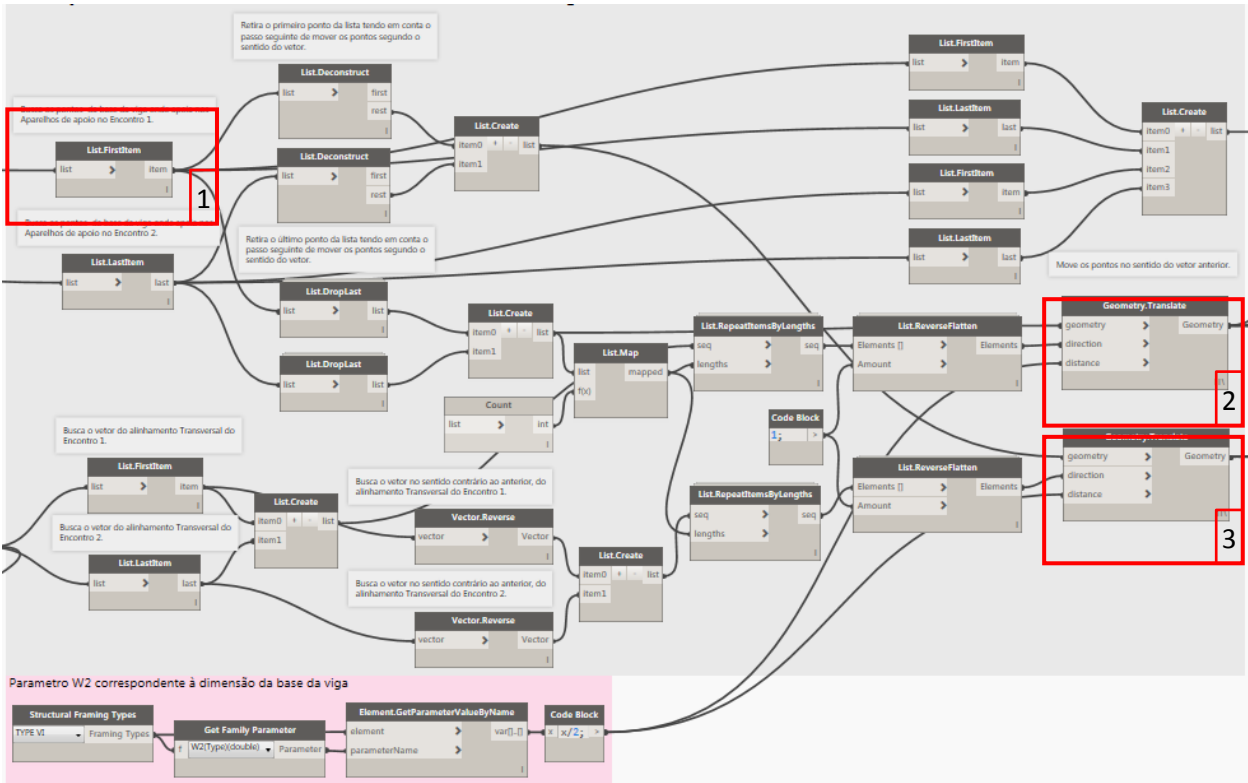


Figura 3.63 – Rotina Dynamo para obtenção dos pontos do eixo longitudinal da base da carlinga.

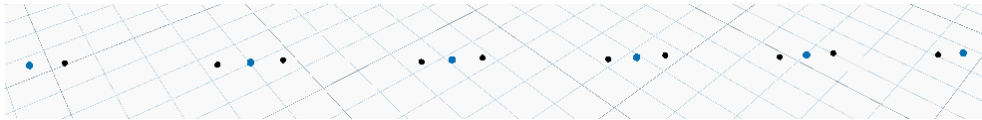


Figura 3.64 – Pontos (azul) referentes ao número 1 assinalado na rotina da figura 3.63.

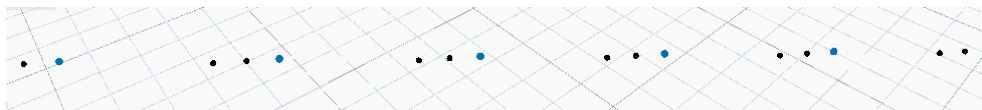


Figura 3.65 – Pontos (azul) referentes ao número 2 assinalado na rotina da figura 3.63.

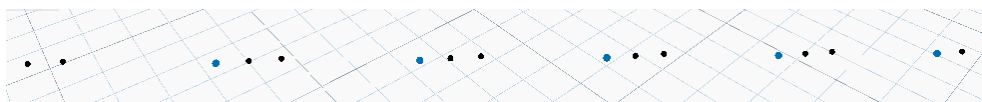


Figura 3.66 – Pontos (azul) referentes ao número 3 assinalado na rotina da figura 3.63.

4. A rotina seguinte organiza os dados de modo a servirem de *input* para os *nodes* “*Line.ByStartPointEndPoint*” e *definirem-se* as linhas que correspondem ao eixo transversal da face inferior da carlinga.

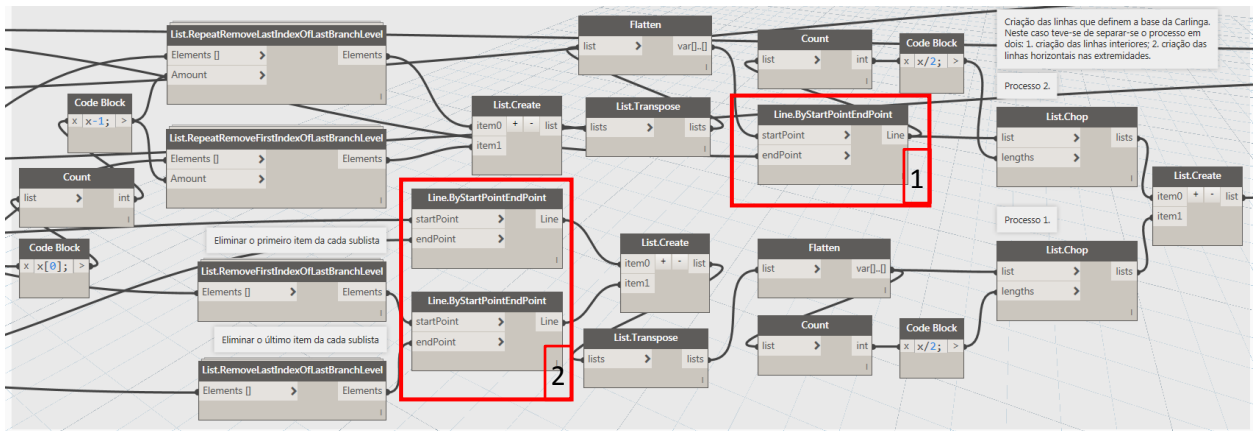


Figura 3.67 – Rotina Dynamo para a definição das linhas do eixo longitudinal na base da carlinga.

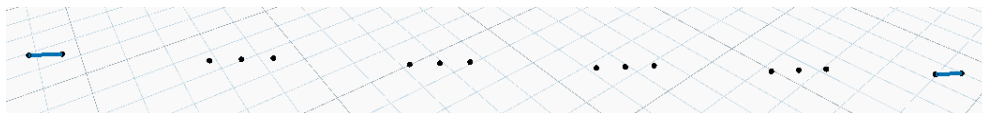


Figura 3.68 – Linhas (azul) referentes ao número 1 assinalado na rotina da figura 3.67.

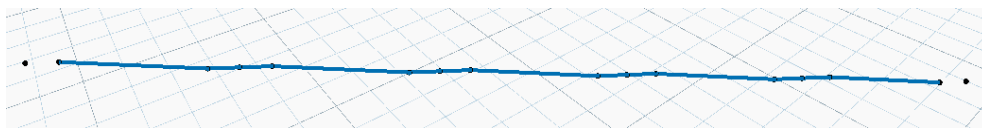


Figura 3.69 – Linhas (azul) referentes ao número 2 assinalado na rotina da figura 3.67

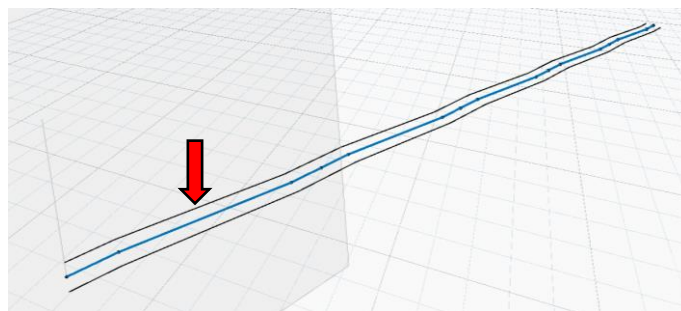


Figura 3.70 – Visualização 3D no plano de fundo do Dynamo da linha do eixo da face inferior da carlinga.

5. Tendo em conta que as faces laterais da carlinga são perpendiculares entre elas, para a definição das linhas laterais da base das carlingas, determinou-se o plano vertical (ponto 2 na figura 3.71) do alinhamento dos pilares através de uma linha criada a partir dos pontos das extremidades da linha definida no ponto anterior (ponto 1) e o seu vetor normal (ponto 3). A partir deste vetor efetuou-se a translação lateral do eixo da carlinga (ponto 4), definindo assim as linhas laterais da mesma (ponto 5).

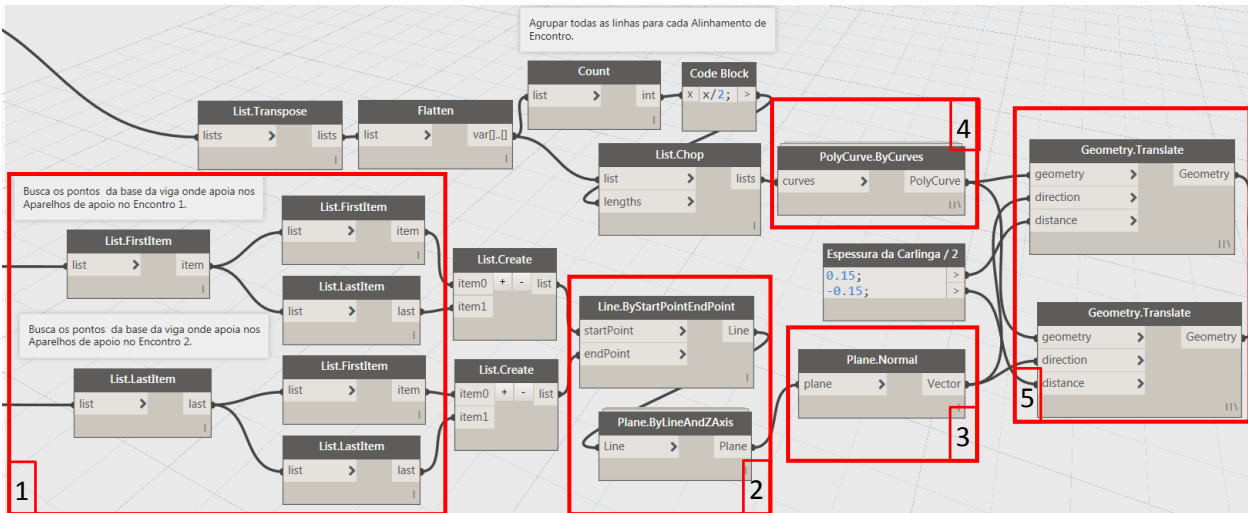


Figura 3.71 – Rotina Dynamo para a definição das linhas laterais na base da carlinga.

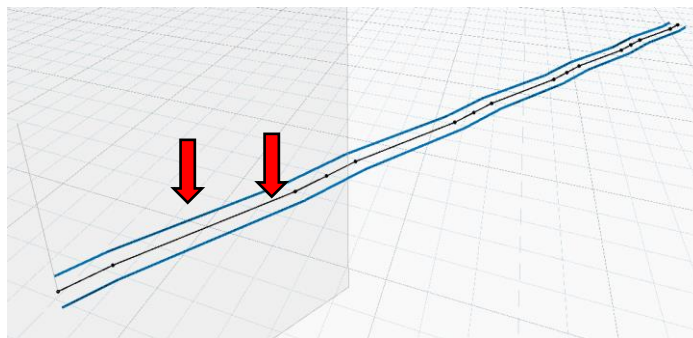


Figura 3.72 – Visualização 3D no plano de fundo do Dynamo das linhas laterais na base da carlinga.

6. Neste ponto, pretende-se obter o plano horizontal de cota mais baixa, que servirá de base para a criação das lajes pretendidas. Para isso, de uma lista com os pontos da base da carlinga, a rotina seleciona o ponto de cota mais baixa através do *node* “*BoundingBox.MinPoint*” (ponto 1 da figura 3.73) e cria um plano horizontal a essa cota, a partir do *node* “*Plane.ByOriginNormal*” (ponto 2).

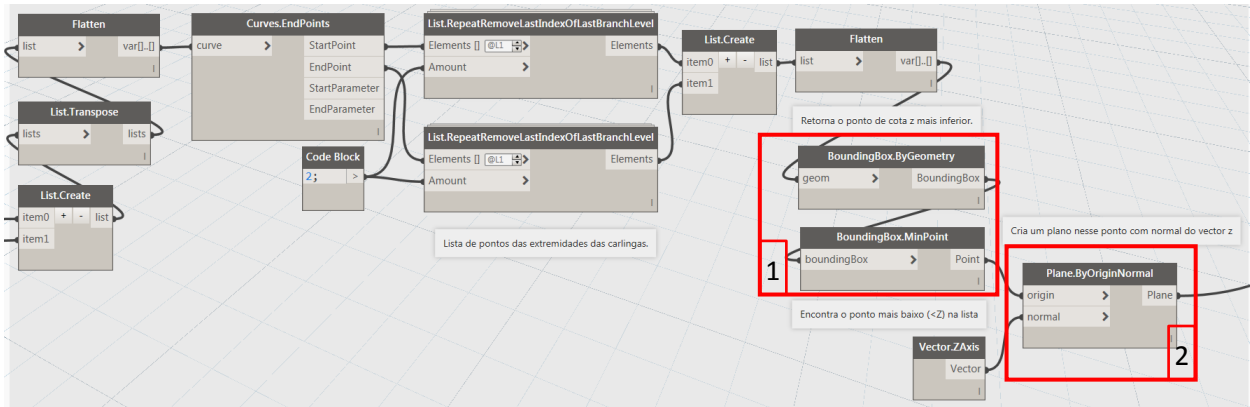


Figura 3.73 – Rotina Dynamo para definição do plano de referência para a criação das lajes.

7. Projeção das linhas laterais da base da carlinga (definidas no ponto 5, anteriormente) no plano horizontal (definido no ponto anterior) através do *node* “*Curve.PullOntoPlane*”. De modo a criar um contorno fechado no plano, definiram-se as linhas transversais das extremidades a partir dos “*endpoints*” das “*polycurves*” criadas no ponto 2 da figura 3.74.

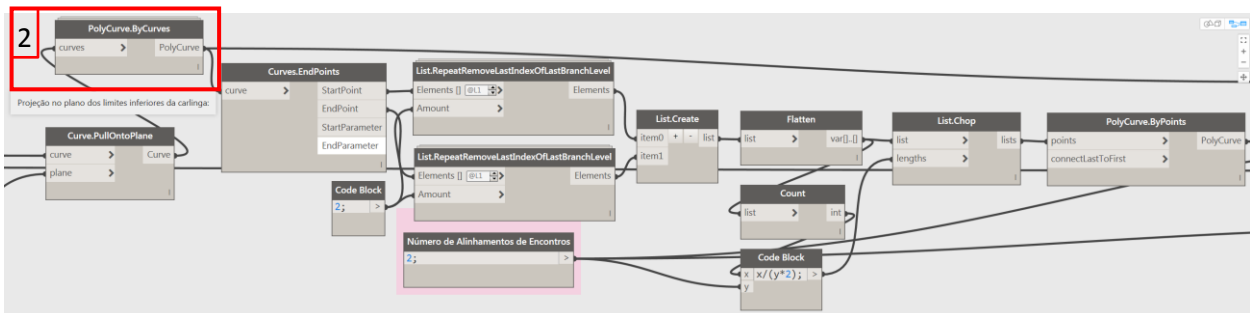


Figura 3.74 – Rotina Dynamo para projeção das linhas laterais da base da carlinga e definição das linhas transversais nas extremidades.

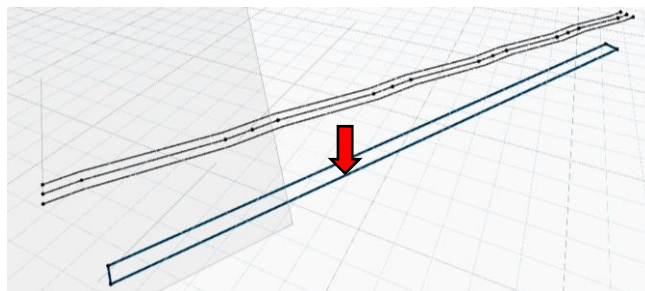


Figura 3.75 – Visualização 3D no plano de fundo do Dynamo das linhas rebatidas no plano horizontal.

8. A rotina apresentada na figura 3.76 organiza as linhas definidas nos pontos anteriores numa nova lista por alinhamento de encontros.

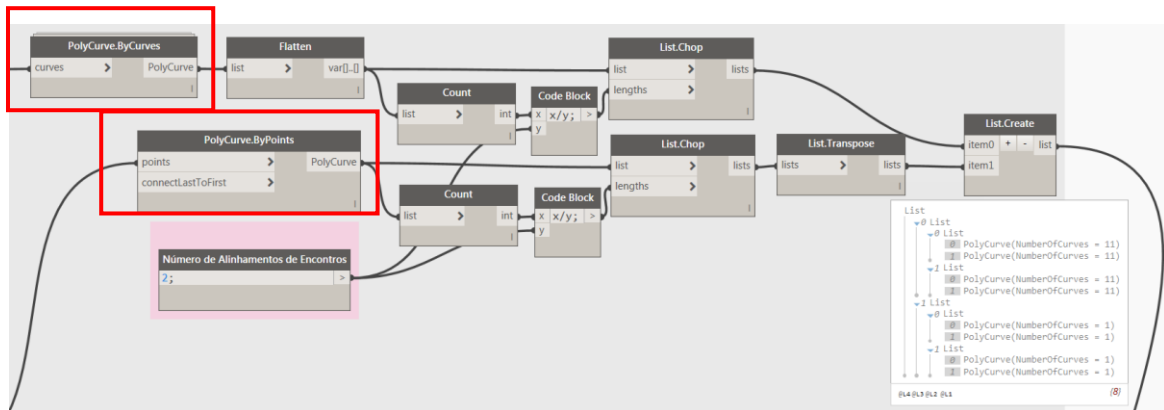


Figura 3.76 – Rotina Dynamo para agrupar as linhas por alinhamento de encontros.

9. Criação da laje através do node “Floor.SlabShapeByPoints” que executa a projeção da laje criada no plano horizontal (assinalado com o número 1), nos pontos que definem o contorno da base da carlinga (assinalado com o número 2), criando assim os elementos de laje (assinalado com o número 3), com a face superior comum à face inferior da carlinga.

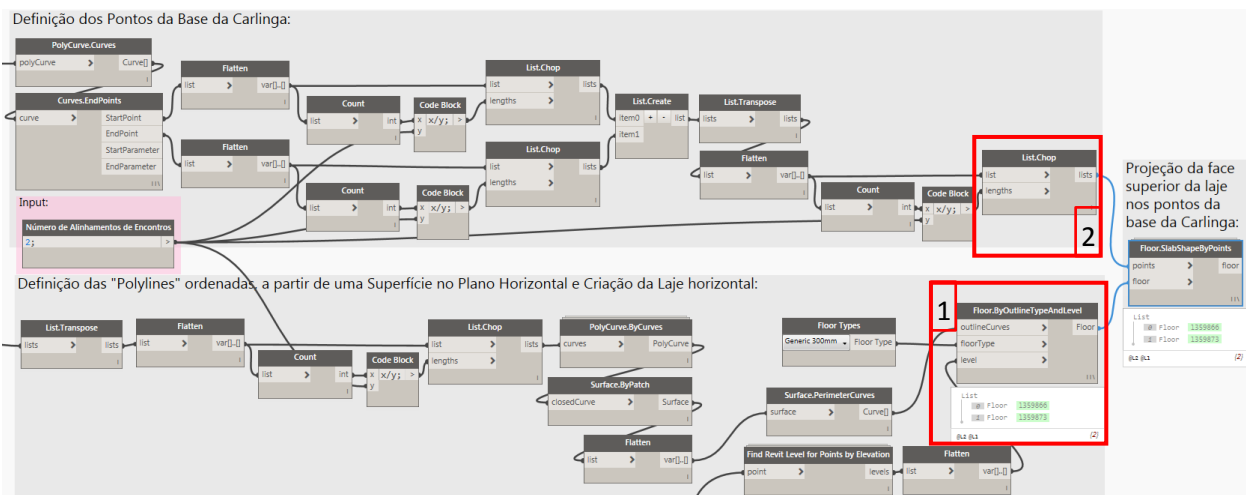


Figura 3.77 – Rotina Dynamo para a criação da laje com face superior igual à face inferior da carlinga.

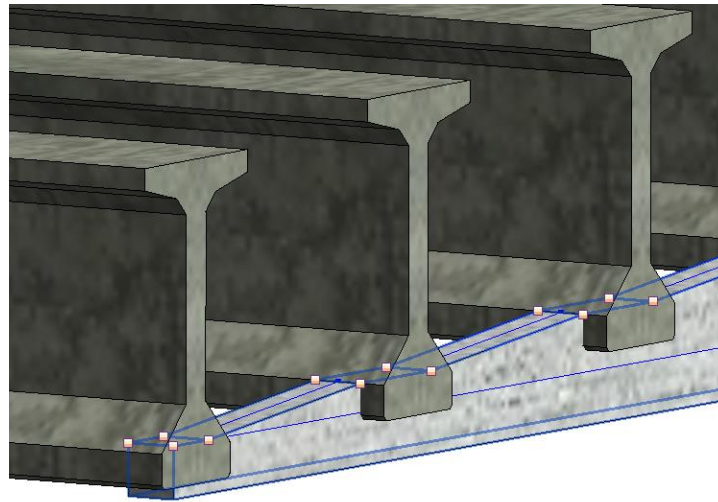


Figura 3.78 – Imagem Revit, ilustrativa da laje criada.

10. Para completar a rotina 1, efetuou-se de seguida a criação da carlinga, através de um elemento parede. Para definir este elemento foi necessário determinar o eixo da carlinga para servir como base. O eixo foi definido através do ponto médio (“*Curve.MidPoint*”) das linhas laterais das extremidades definidas no ponto 7 da rotina anterior, tendo estes servido como linha base para a criação da parede.

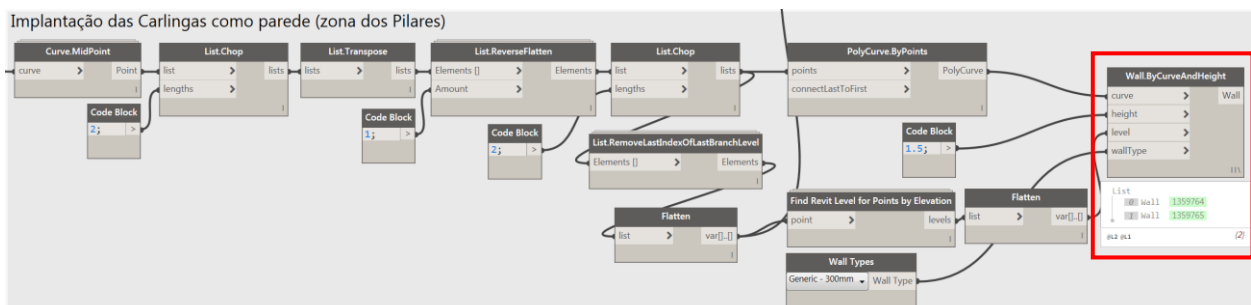



Figura 3.79 – Criação do elemento de categoria parede correspondente à carlinga.

Edição dos elementos no Revit:

Após finalizar a rotina anterior, torna-se necessário efetuar os ajustes finais do elemento no Revit.

1. Em primeiro lugar é necessário efetuar a união dos dois elementos criados através do comando unir ( Unir) do Revit, obtendo assim a geometria pretendida da base da carlinga.

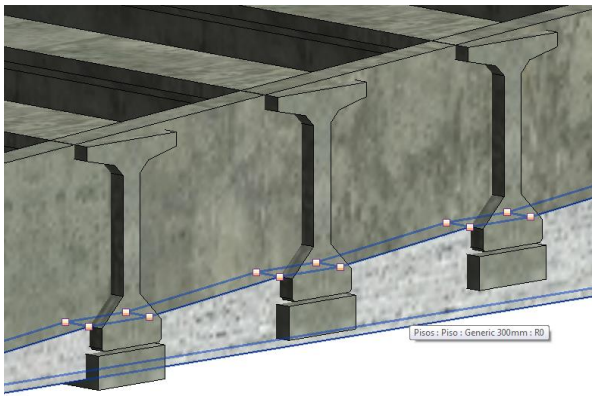


Figura 3.80 – União da laje e da parede para seccionar e definir a base da carlinga.

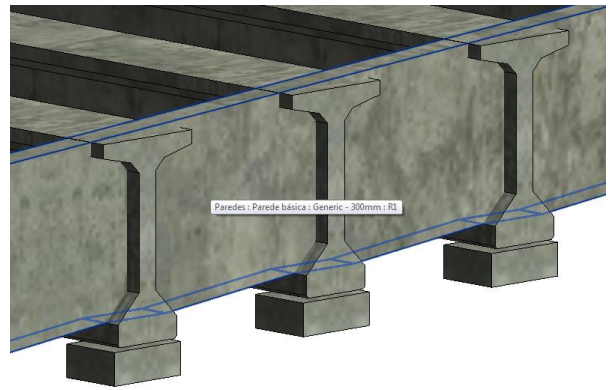



Figura 3.81 – Filtro do elemento laje após definição total da carlinga.

2. Em segundo lugar é necessário anexar o topo da parede à base da laje de betão do tabuleiro, usando para o efeito o comando “Anexar topo/base” (). Para finalizar basta filtrar o elemento laje criado.

Implantação das Carlingas na zona dos Pilares

À semelhança da rotina 1 para implantação das carlingas na zona dos encontros, a rotina para a criação das carlingas na zona dos pilares foi definida como uma parede do Revit, posteriormente seccionada através da subtração da parte em contacto com uma laje modelada a partir da base desta.

De referir que uma das diferenças entre este elemento e o das carlingas na zona dos encontros, está localizada na base das carlingas, sendo que a carlinga sobre os pilares apresenta três faces na sua secção longitudinal, enquanto a dos encontros apenas apresenta uma face. A partir deste pressuposto, a diferença entre as rotinas desenvolvidas reside na definição desses mesmos pontos da face inferior das carlingas. Por conseguinte, optou-se por apresentar apenas uma rotina explicativa do processo, neste caso, a rotina de criação das carlingas dos encontros.

As rotinas completas das carlingas sobre os pilares e encontros seguem no anexo III desta dissertação.

Implantação das Fundações, Pilares e Travessas

A implantação das fundações, pilares e travessas foi realizada com base em coordenadas pré-definidas pelo projetista e apresentadas no projeto em forma de tabela. Estas coordenadas foram inseridas e organizadas na folha de Excel do projeto para serem manipuladas no Dynamo.

No que se refere à elaboração da rotina no Dynamo, optou-se por desenvolver as rotinas para cada um dos elementos, dentro de um único ficheiro Dynamo. Esta opção deveu-se ao facto dos elementos

estarem em contacto uns com os outros e os dados obtidos na suas implantações serem necessários para a implantação de outros. Apresenta-se na figura 3.82 a rotina desenvolvida envolvente dos três elementos.

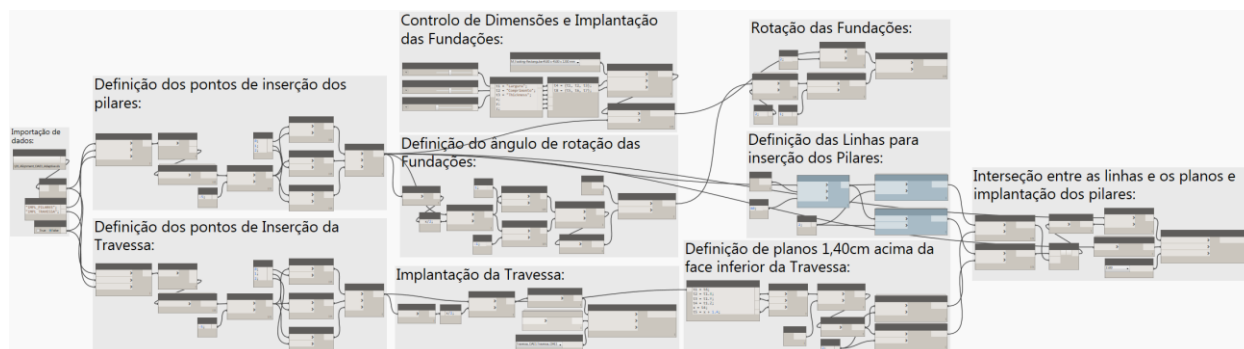


Figura 3.82 – Rotina Dynamo para a implantação das fundações, pilares e travessa.

De seguida será explicado detalhadamente a criação de cada elemento separadamente.

Implantação das Fundações

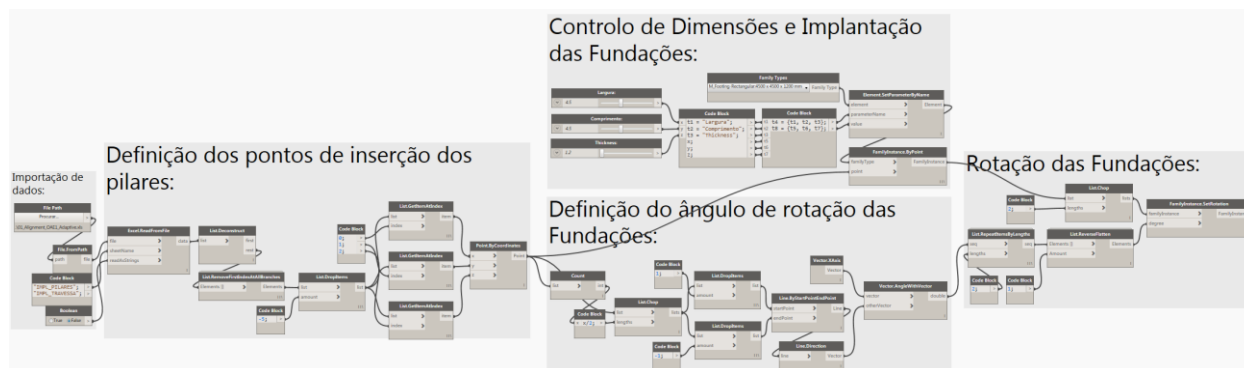


Figura 3.83 – Rotina Dynamo para implantação e rotação das fundações.

Descrição da rotina:

1. Importação das coordenadas definidas na folha de cálculo após reescalamto, para a definição dos pontos de inserção das fundações.

Tabela 1 – Coordenadas das fundações e da base dos pilares.

Pilar	M (m)	P (m)	Z top (m)
P2I	-30,813	-51,721	-17,000
P2D	-36,464	-47,589	-17,000
P3I	-50,320	-77,259	-13,000
P3D	-55,793	-72,894	-14,500

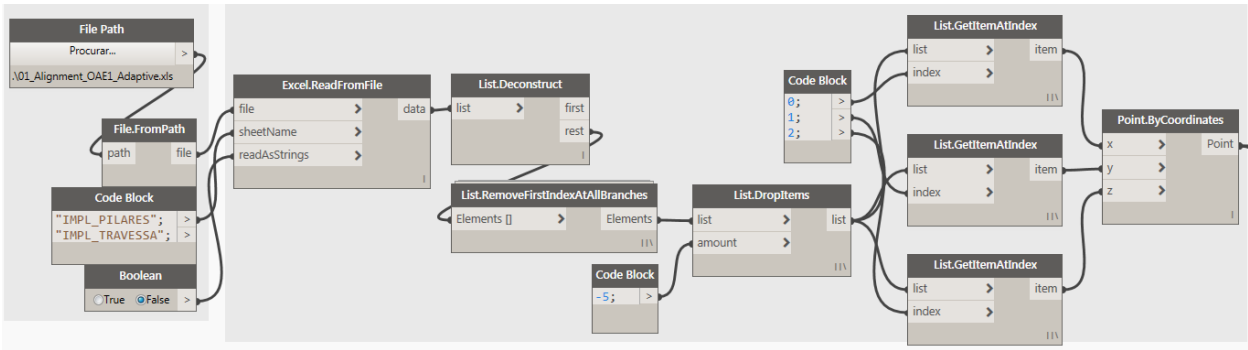


Figura 3.84 – Rotina Dynamo para criação dos pontos de inserção das fundações.

- Com a rotina seguinte pretende-se efetuar a edição e controlo das dimensões da fundação, bem como alterar a família de fundação, antes da sua inserção no Revit. De referir, que este deve ser um princípio a aplicar, se possível, a todos os elementos do viaduto.

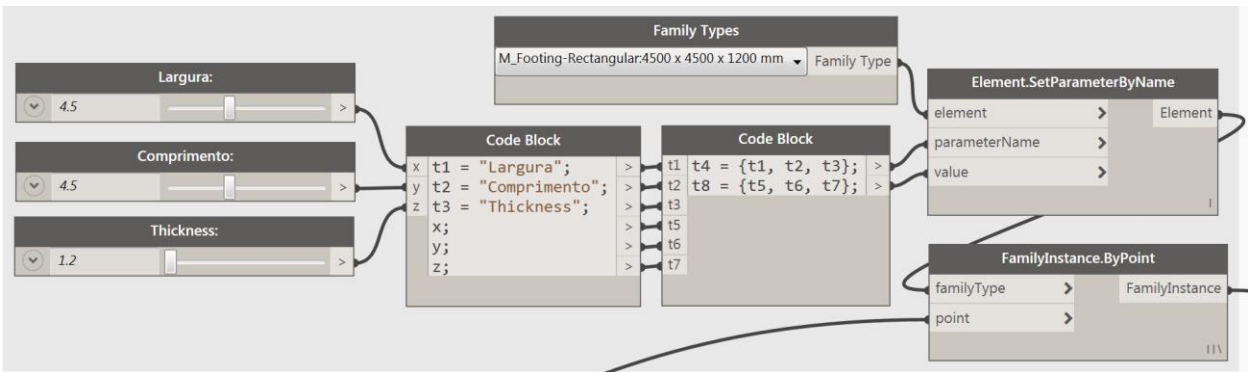


Figura 3.85 – Rotina Dynamo para edição de parâmetros da fundação e implantação no Revit.

- Tendo em conta que a fundação é um elemento de inserção em pontos, e não é circular, ao inserir o elemento no Revit, será implantado segundo a orientação do sistema de eixos global do projeto. Torna-se assim necessário efetuar a rotação do elemento para a orientação desejada. A rotina apresentada abaixo tem como objetivo a definição do vetor da orientação das fundações e através da subtração das componentes segundo o eixo dos “X” desse vetor e do vetor “X” do sistema de eixos global, são determinados os ângulos de rotação para as fundações.

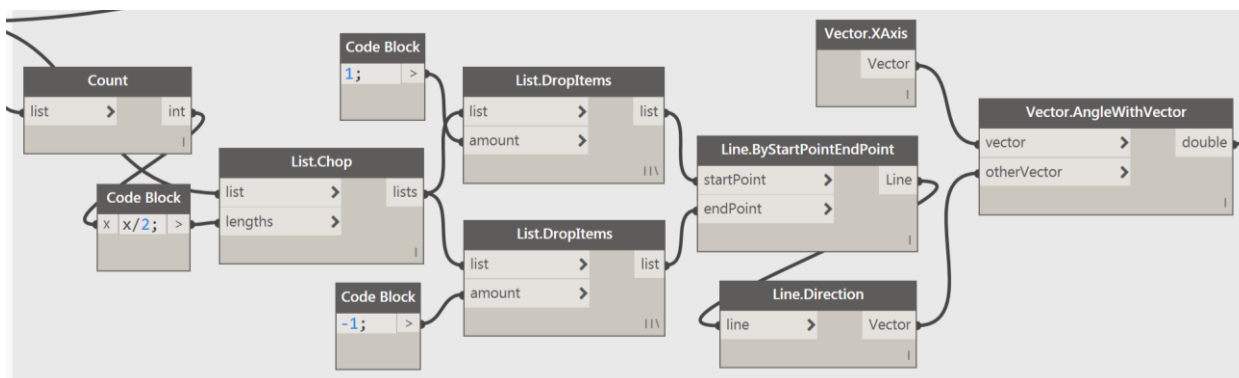


Figura 3.86 – Rotina Dynamo para definição dos ângulos de rotação das fundações.

4. A partir do ângulo e família definidos anteriormente, a rotina apresentada na figura 3.87 conjuga os dois *input's* para efetuar a rotação das fundações automaticamente antes da sua implantação em projeto, a partir do *node* "FamilyInstance.SetRotation".

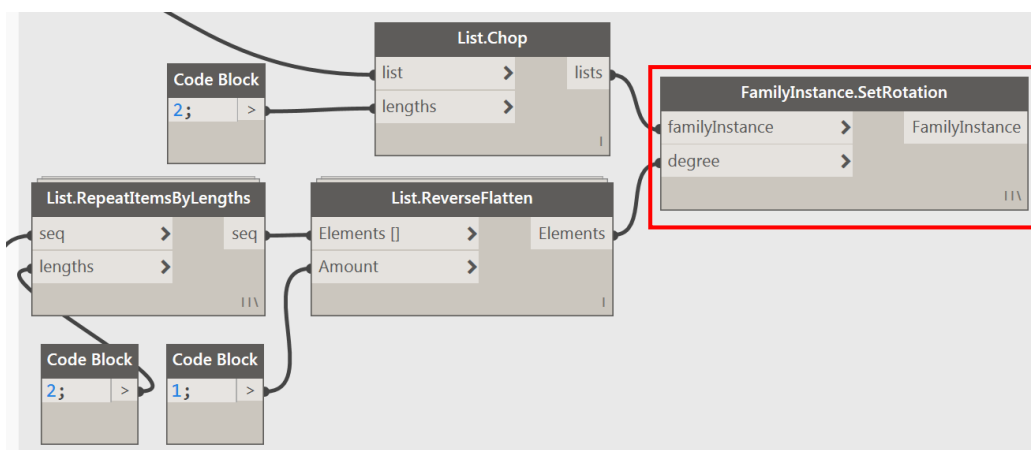


Figura 3.87 – Rotina Dynamo para a rotação das fundações.



Figura 3.88 – Imagem final das fundações no Revit.

Implantação das Travessas

Conforme descrito no capítulo das famílias, a travessa constitui um dos elementos mais irregular, tornando o processo de criação de família bastante complexo, onde à data é necessário definir o método de inserção da mesma, bem como a localização dos pontos de inserção. Neste contexto, foram definidos os pontos do topo dos pilares para a inserção da travessa, para um elemento do tipo viga.

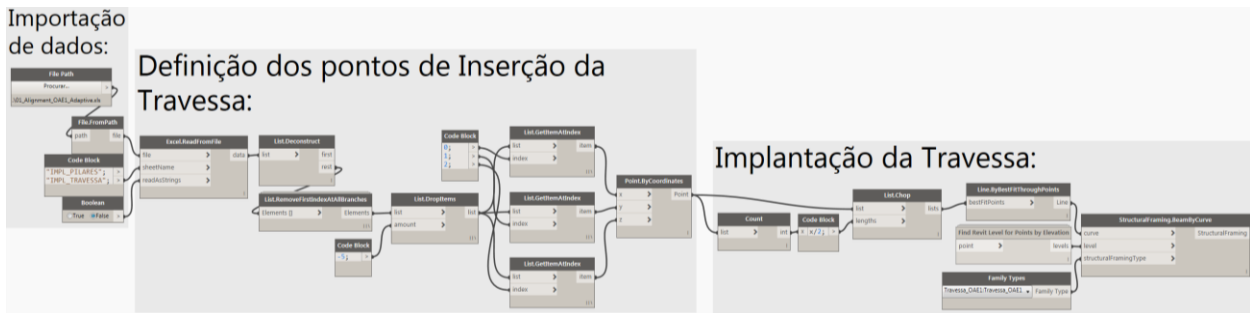


Figura 3.89 – Rotina Dynamo para implantação das travessas.

Descrição da rotina Dynamo:

1. Importação das coordenadas definidas na folha de cálculo com reescalamo, para a definição dos pontos de inserção das travessas.

Tabela 2 – Coordenadas dos pontos no topo dos pilares

Pilar	M (m)	P (m)	Z top (m)
P2I	-30,813	-51,721	3,147
P2D	-36,464	-47,589	2,636
P3I	-50,320	-77,259	2,868
P3D	-55,793	-72,894	2,358

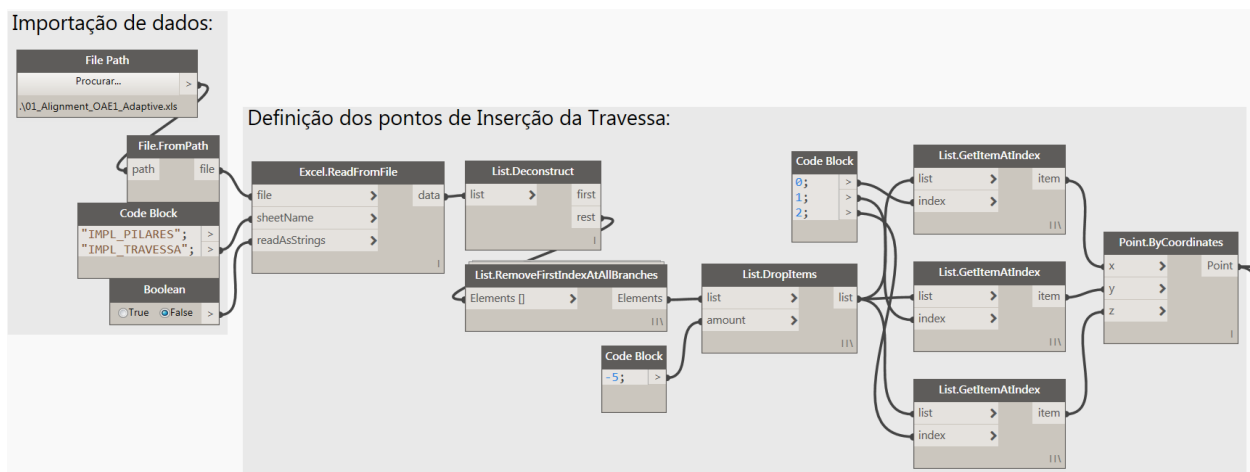


Figura 3.90 – Rotina Dynamo para definição dos pontos de inserção da travessa.

2. Com base nestes pontos, são criadas linhas de base para a implantação das travessas.

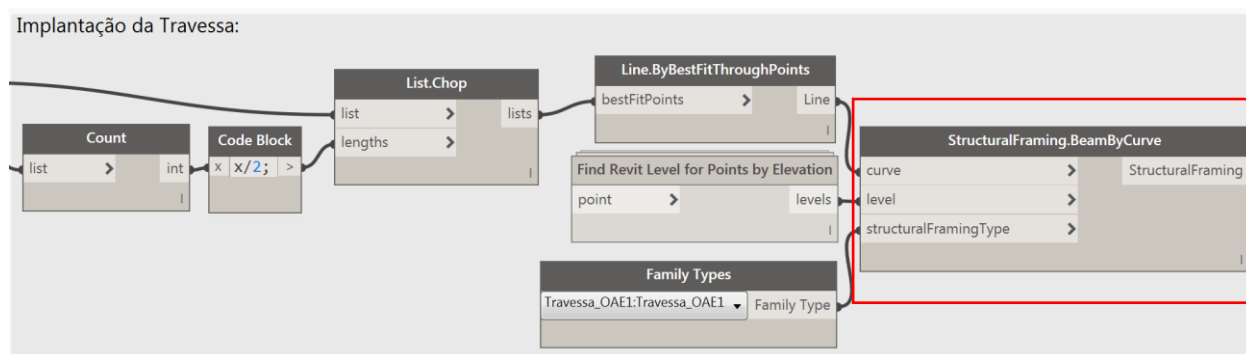


Figura 3.91 – Rotina Dynamo para implantação das travessas no Revit.



Figura 3.92 – Visualização 3D do plano de fundo do Revit com a travessa implantada.

Implantação dos Pilares

Tal como os outros elementos, os pilares foram inseridos com base em coordenadas de pontos pré-definidos pelo projetista. No caso dos pilares, a sua inserção no Revit através do Dynamo, pressupõe a criação de linhas, por sua vez, na rotina apresentada optou-se por definir os topos dos pilares através da interseção destes com planos pré-definidos. Para o efeito, torna-se necessário a definição dos pontos de inserção da base dos pilares como também os pontos de inserção das travessas. A partir destes últimos, foi possível definir o topo “visível” dos pilares. De referir, que nesta rotina, optou-se por prolongar os pilares para dentro da travessa mais 1.40m, de forma a poder facilitar, posteriormente, a colocação de armaduras nessa zona.

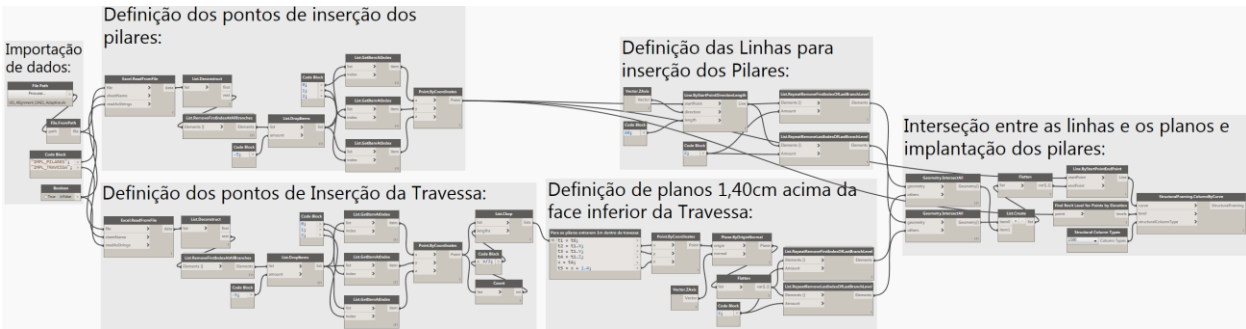


Figura 3.93 – Rotina Dynamo completa para definição dos pilares.

Descrição da rotina Dynamo:

1. Importação das coordenadas da folha de Excel do projeto e definição dos pontos de inserção das travessas e dos pontos que servirão de base para a criação de linhas para a implantação dos pilares.

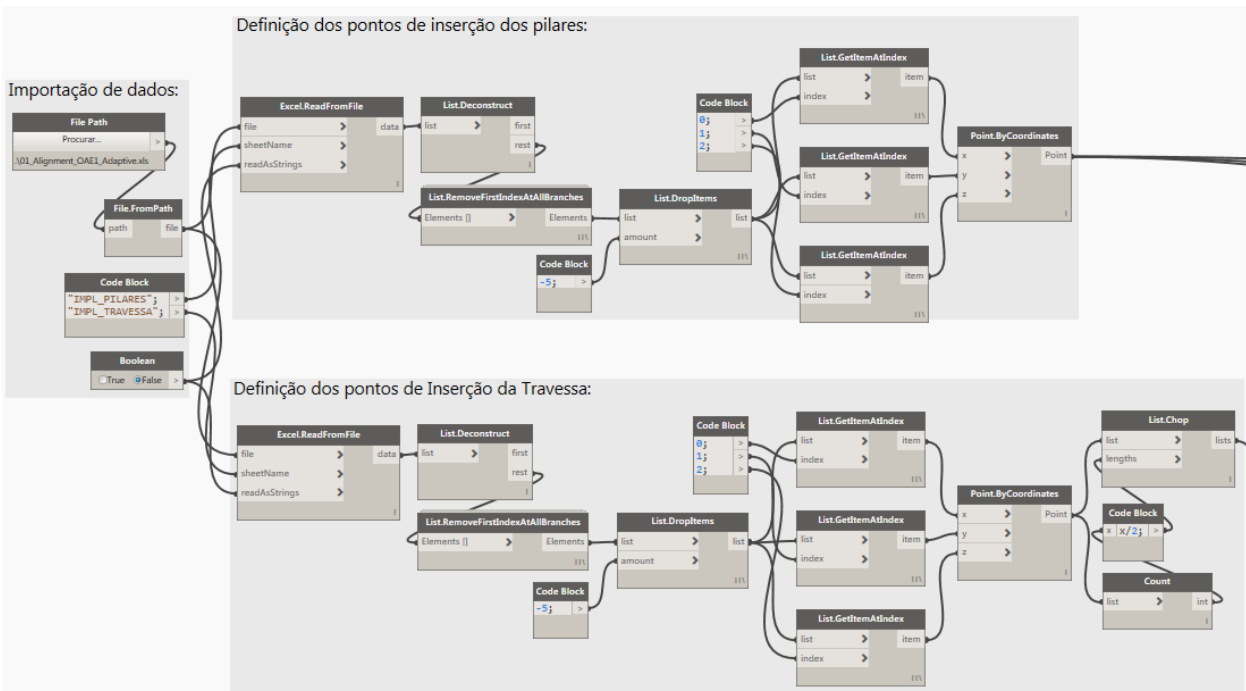


Figura 3.94 – Rotina Dynamo para definição dos pontos de inserção dos pilares e das travessas.

2. Definição das referidas linhas que servirão de base para a inserção dos pilares. Para a definição do topo do pilar criaram-se planos de referência por pilar e tendo em conta que a armadura longitudinal do pilar entra na travessa, optou-se por aumentar 1.40m a partir da interseção do pilar com a travessa.

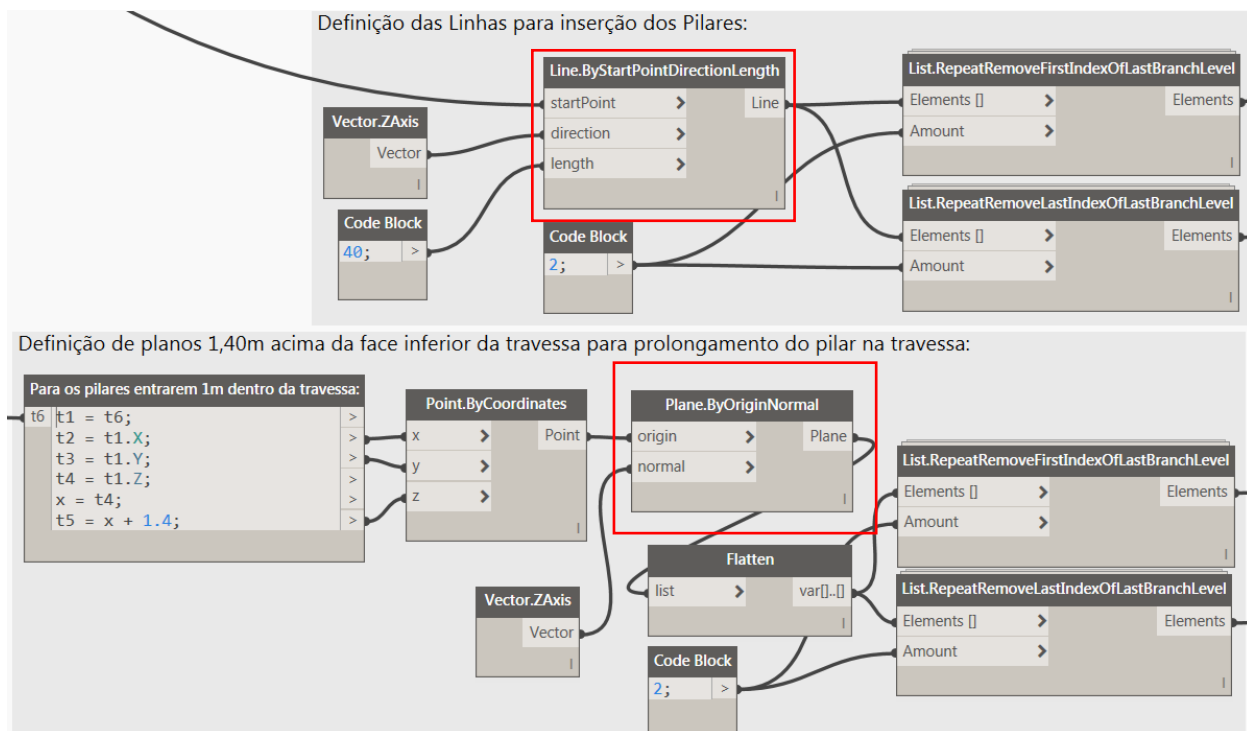


Figura 3.95 – Rotina Dynamo para criação das linhas base dos pilares e definição dos planos de corte.

3. Para finalizar, o último passo da rotina faz a interseção das linhas com os planos definidos no ponto anterior. A interseção destes elementos constitui os pontos da extremidade superior dos pilares.

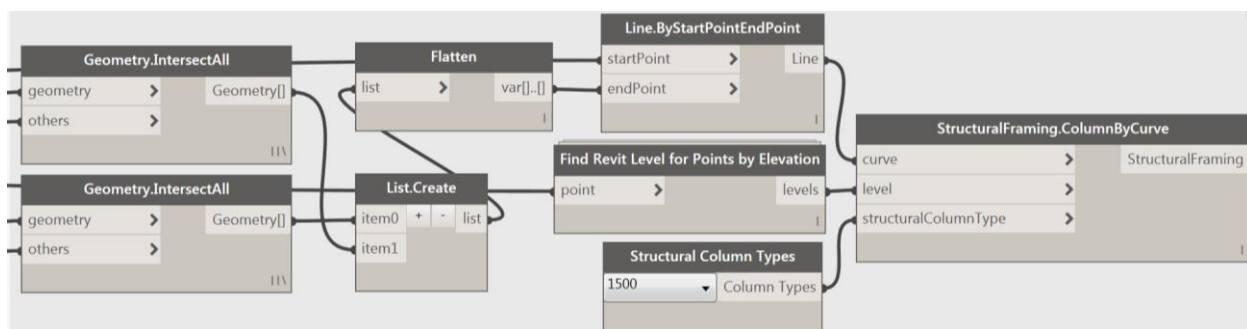


Figura 3.96 – Rotina Dynamo para implantação dos pilares.

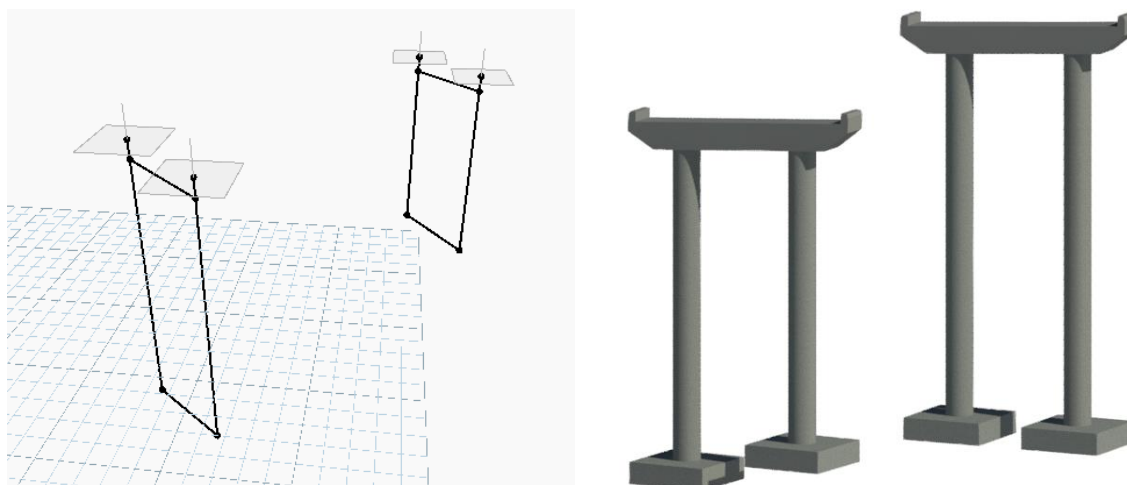


Figura 3.97 – Visualização 3D no plano de fundo do Dynamo da definição dos pontos, linhas e planos (imagem da esquerda) e o resultado no Revit (imagem da direita).

Criação das Guardas Laterais

A guarda trata-se de um elemento que segue o alinhamento longitudinal da ponte, neste sentido, foi necessário dividir a sua crua criação em quatro partes separadas, conforme se descreve nos pontos seguintes:

1. Criação de uma família genérica parametrizada de guardas que serviu de input para a família adaptativa paramétrica;
2. Criação de rotina Dynamo para a criação das linhas definidoras dos limites laterais da laje de betão do tabuleiro, dentro de um *template* de família adaptativa;
3. Aplicação da família criada no ponto 2 na linha definida em 3, para a criação do elemento de massa da guarda;
4. Implantação da família adaptativa das duas guardas no projeto através de uma rotina Dynamo.

Explicação Detalhada da definição da guarda:

1. Tendo como finalidade capacitar a família com parâmetros editáveis de forma a poderem ser alterados posteriormente, optou-se por criar uma família genérica parametrizada, para posteriormente inserir na família adaptativa individual da guarda. Tendo em conta que a geometria da família varia em função da inclinação criou-se o respetivo parâmetro, conforme apresentado nas imagens seguintes:

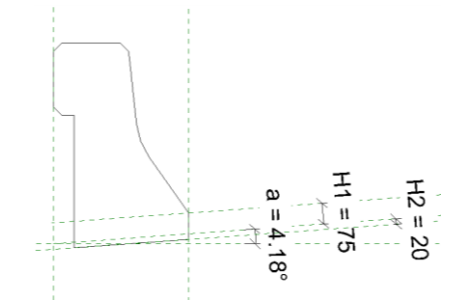


Figura 3.98 – Família paramétrica da guarda.

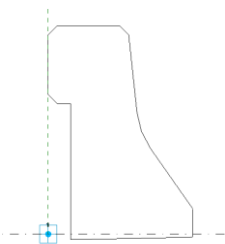


Figura 3.99 – Família paramétrica adaptativa da guarda.

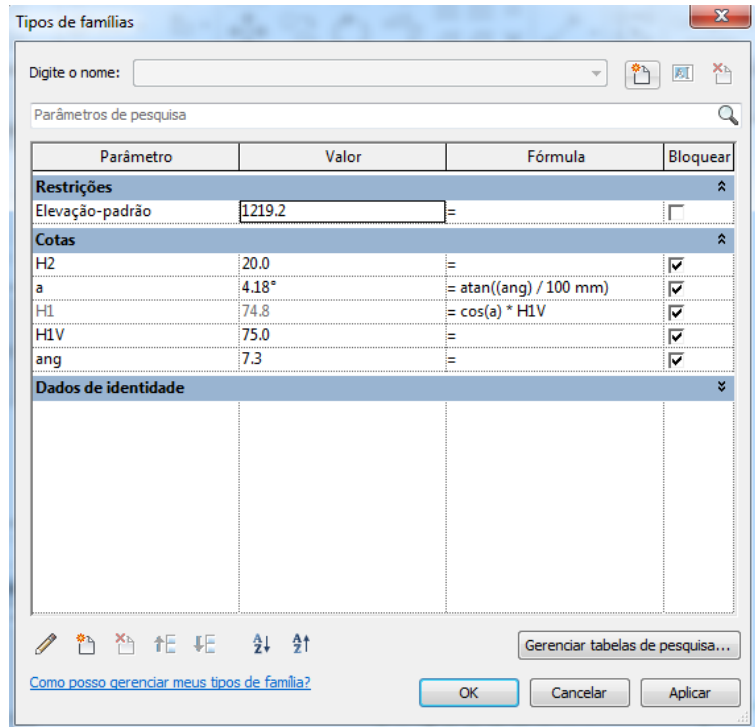


Figura 3.100 – Quadro de parâmetros da família paramétrica da guarda.

- Após a criação da família paramétrica adaptativa, foi necessário desenvolver uma rotina no Dynamo para a sua definição segundo as linhas laterais da extremidade da laje de betão do tabuleiro. Para o efeito, criou-se uma rotina para importação das coordenadas dos limites da laje do tabuleiro, obtidos anteriormente através da rotina para a criação do tabuleiro (subcapítulo 3.2.3.1, ponto 5), organizando os dados e selecionando apenas as coordenadas das linhas das extremidades laterais.

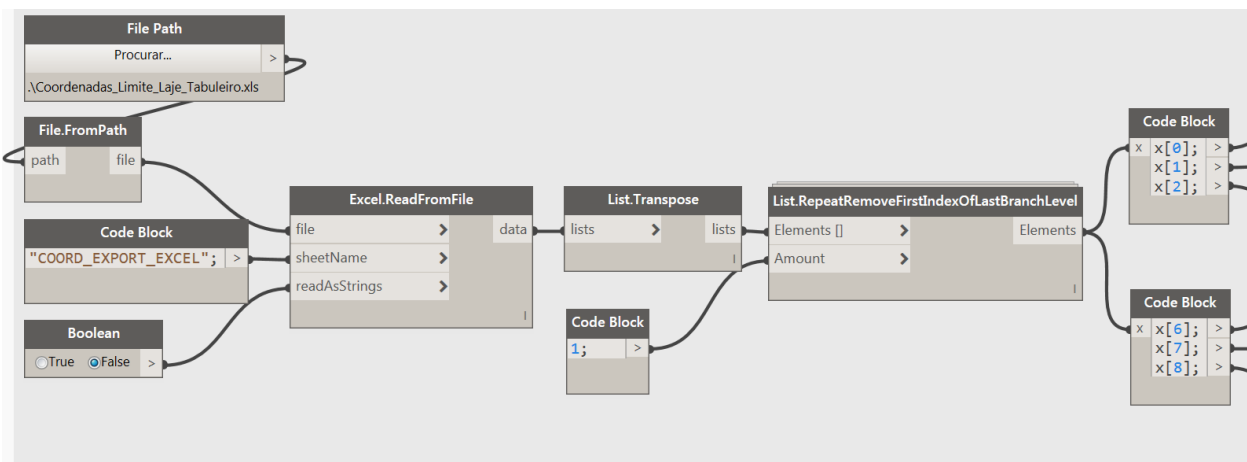


Figura 3.101 – Rotina Dynamo (parte 1) para importação, organização e seleção de dados.

Após organização dos dados por extremidade esquerda e direita, procede-se à criação dos pontos referenciados e definição das respectivas curvas com base nestes mesmos pontos. Apresenta-se na figura 3.102 a rotina Dynamo correspondente a esta função.

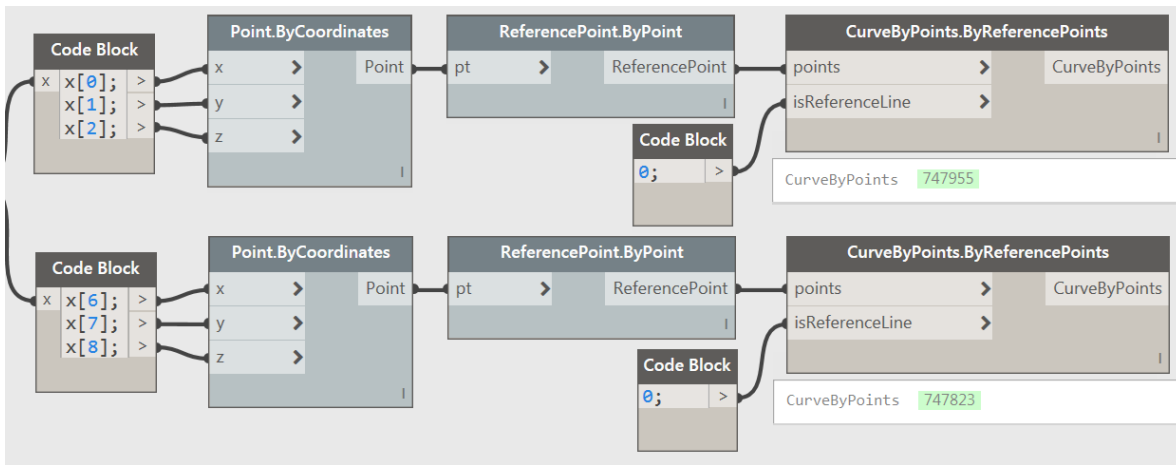


Figura 3.102 – Rotina Dynamo (parte 2) para criação de pontos e linhas referenciadas.

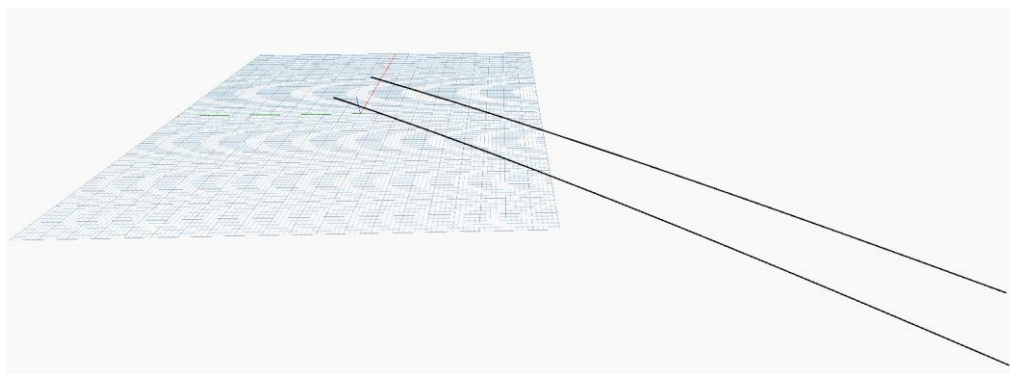


Figura 3.103 – Visualização 3D no plano de fundo do Dynamo, ilustrativa da definição linhas.

De seguida apresenta-se o faseamento construtivo da família adaptativa aplicada segundo a orientação das linhas definidas no ponto 2 anterior:

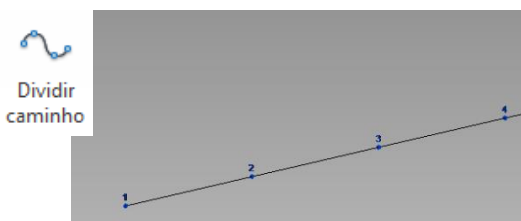


Figura 3.104 – Divisão da linha em segmentos.

Nós	
Layout	Distância fixa
Número	129
Distância	1.0000
Justificação	Início
Tipo de medida	Comprimento da ...
Número total de ...	129
Exibir números de...	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 3.105 – Alterar para segmentos de 1m.

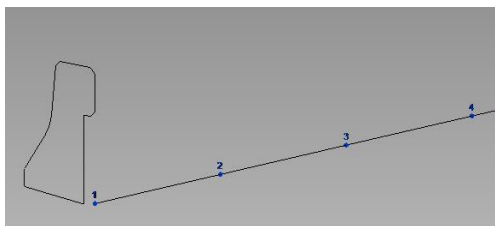


Figura 3.106 – Colocação da família guarda.

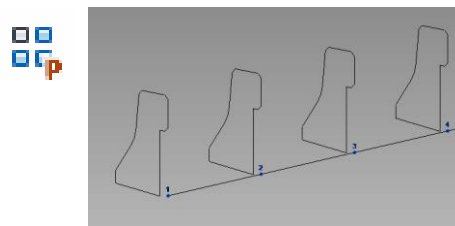


Figura 3.107 – Executar comando “array”.

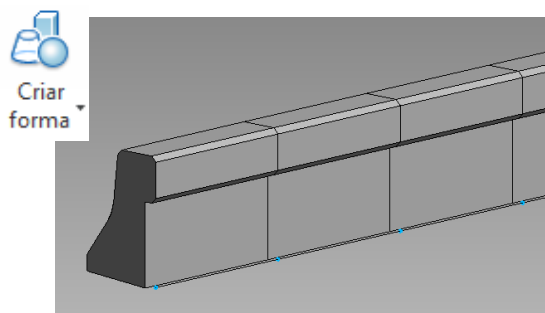


Figura 3.108 – Criar forma da guarda.

3. Para finalizar, abrir o ficheiro do projeto e executar a rotina apresentada na figura 3.109, que através do node “FamilyInstance.ByPoint” faz a implantação das guardas no projeto.

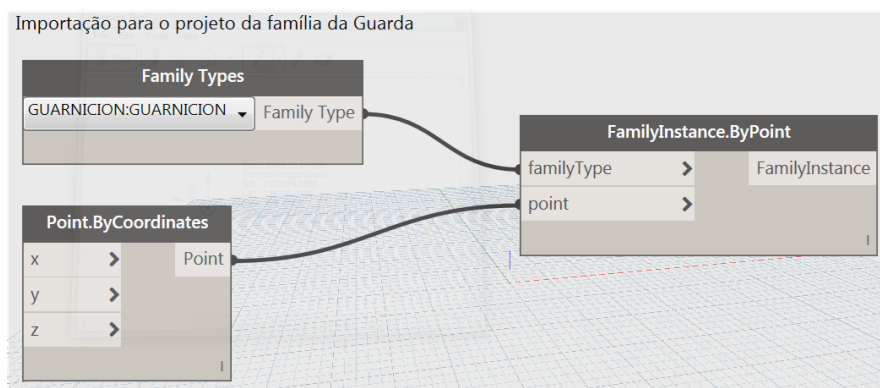


Figura 3.109 – Rotina Dynamo para a implantação das guardas no projeto.

3.2.4. Implantação do Terreno Natural

Para a definição do terreno natural, foi efetuada a importação das curvas de nível de um ficheiro DWG do projeto desenvolvido em CAD, para o Revit. Tendo em conta a transformação das coordenadas realizada para a implantação dos diversos elementos da ponte através do Dynamo, foi necessário efetuar a alteração das coordenadas do ponto base de projeto para a posição original (0, 0, 0). Durante a importação do terreno natural foi acionada uma janela de aviso com a mensagem de alerta em relação a extensões de geometria superiores a 33 quilômetros poder reduzir a confiabilidade dos gráficos.

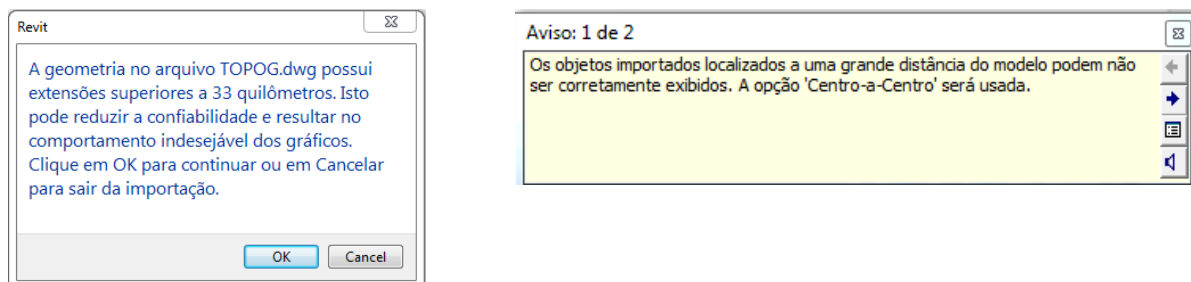


Figura 3.110 – Alerta do Revit ligadas às extensões da geometria elevadas.

Mesmo com os avisos expostos, a implantação é realizada nas coordenadas originais. Para a implantação dos elementos da ponte foi necessário efetuar a alteração das coordenadas do ponto base de projeto para as coordenadas de transformação. Neste ponto foi acionado outro aviso do Revit para a impossibilidade de alterar as coordenadas para distâncias superiores a 10 milhas da sua localização inicial, conforme apresentado na figura 3.111.

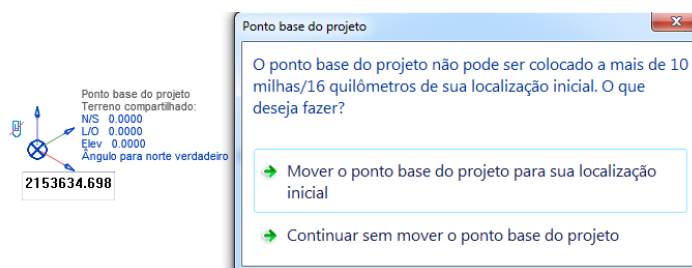


Figura 3.111 – Alerta do Revit para a impossibilidade de alterar coordenadas.

Assumindo esta limitação do Revit, não foi possível solucionar este problema em tempo útil. Apresenta-se assim, na figura 3.112, a imagem do terreno natural sem a implantação do viaduto.

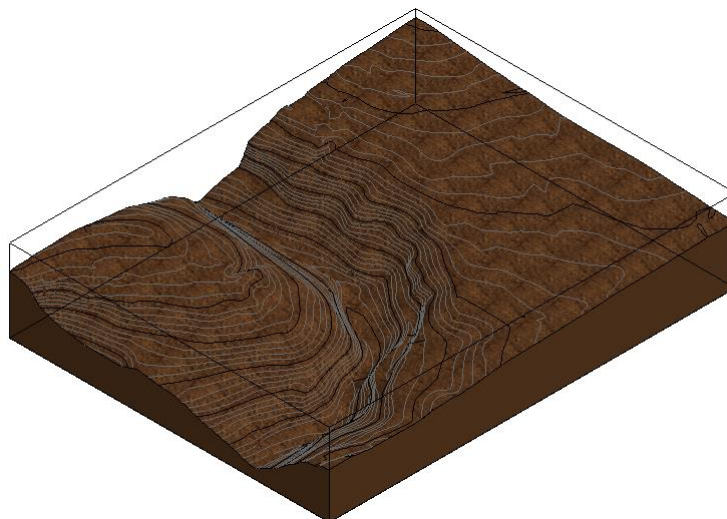


Figura 3.112 – Imagem do terreno natural importado de um ficheiro desenvolvido em CAD.

Apresentação Final

Para a apresentação final da ponte, procedeu-se à definição manual e aleatória do terreno natural, para desenvolver um enquadramento mais realista da visualização 3D do projeto, conforme apresenta a figura 3.113 e as imagens no anexo II.

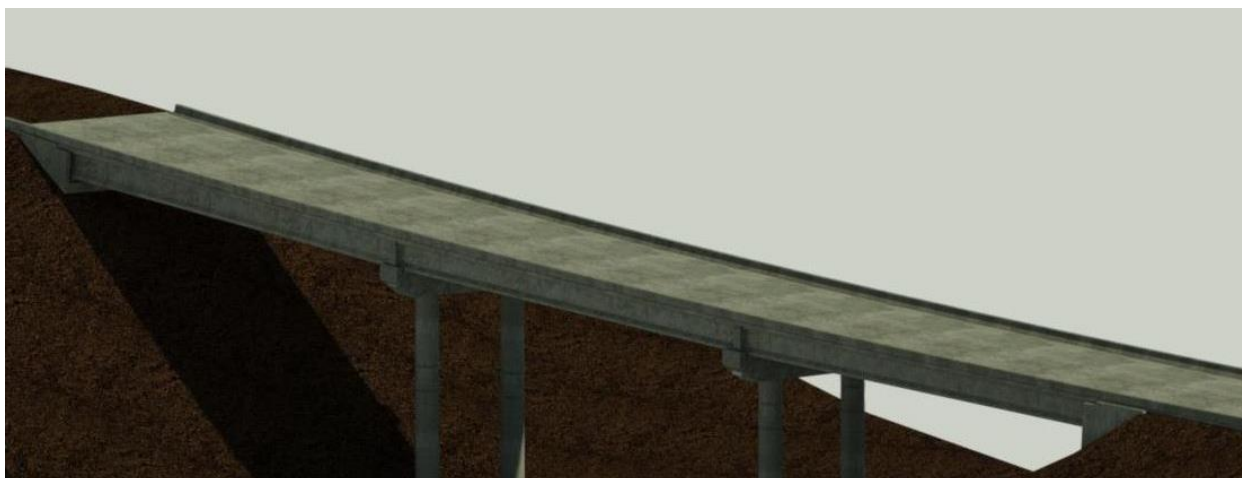


Figura 3.113 – Visualização 3D da ponte.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1. CONCLUSÕES

Tendo em conta o âmbito deste projeto de mestrado, neste capítulo pretende-se descrever as conclusões obtidas em relação a vários pontos-chave de análise desta dissertação. Apresentam-se seguidamente estas conclusões organizadas por tema abordado:

Como o próprio conceito *Bridge Information Modeling* (BrIM) indica, a criação de um modelo virtual da informação da construção em fases iniciais da realização do projeto, impõe de imediato uma expectativa bastante positiva relacionada com o poder de visualização 3D. Contudo, esta metodologia não se resume apenas a esta característica, a implementação da metodologia BrIM, impõe um conjunto de modificações aos processos de gestão das *workflows* dos intervenientes no projeto de uma ponte, que conduzem a benefícios a médio/longo prazo ao nível do tempo e custo da obra, culminando na obtenção dos principais objetivos de qualquer entidade envolvida no projeto, que é a minimização dos custos e do tempo despendidos para a realização das tarefas. Neste âmbito, são de salientar os benefícios relacionados com a simulação do processo construtivo, bem como a possibilidade de serem detetadas incompatibilidades, erros e omissões do projeto em fases iniciais da realização do projeto, reduzindo assim, de forma significativa, um dos maiores problemas da construção associado ao custo e tempo, que são os trabalhos a mais.

Tendo em conta os objetivos propostos inicialmente para este projeto, foi necessário efetuar previamente uma investigação e pesquisa acerca dos desenvolvimentos na área da modelação de pontes em Revit. Através da análise de toda a informação obtida foi possível chegar a algumas conclusões importantes para o desenvolvimento desta dissertação. A primeira conclusão respeita à viabilidade da modelação deste tipo de estruturas através do Revit, que foi verificada, dando assim origem à segunda conclusão acerca da escolha do *add-in* a utilizar para o Revit, que neste caso recaiu no Dynamo. É de salientar que, para a identificação do *add-in* a utilizar neste projeto, foram ainda realizados alguns testes de validação em relação aos dois *add-in's* disponíveis, tendo-se apontando algumas limitações no *add-in* Revit Structure, das quais se destaca a ligada à modelação de pontes de tipos estruturais diferentes dos que o programa inclui. Tendo em vista futuras aplicações em outros

tipos de esquemas estruturais ou tipos de pontes tornou-se assim evidente a escolha estratégica do *add-in* Dynamo.

No que concerne à aprendizagem do *software* BIM utilizado nesta dissertação, mais concretamente ao Dynamo, tendo em conta que se trata de uma ferramenta ainda pouco conhecida e explorada no mundo da engenharia, tendo como base uma linguagem própria de programação gráfica ou visual, é possível concluir que a sua aprendizagem inicial requer uma disponibilidade de tempo bastante significativa em busca de informação, observação ou recorrendo a tutoriais de aprendizagem. Tendo como princípio de programação a ligação entre *nodes* munidos de funcionalidades próprias com origem em scripts ou algoritmos internos, requereu uma análise inicial de alguns dos *nodes* utilizados, acerca das suas características internas, de maneira a se perceber melhor as suas funcionalidades numa rotina criada. Para além desta análise, existe ainda um trabalho que é necessário efetuar, que é de pesquisa de *packages* que poderiam ser importantes ou essenciais para o desempenho das rotinas. Neste aspeto, torna-se importante a partilha de conhecimento entre os utilizadores do Dynamo, utilizando como ferramenta de comunicação, a própria plataforma Dynamo, que tem presente no ambiente de abertura do programa, a ligação quer a um Fórum de discussão onde é possível esclarecer algumas questões, quer a um conjunto de tutoriais e ao *Dynamo Primer* para aprendizagem. Convém também referir que se trata de uma ferramenta a desenvolver-se dia após dia, sendo possível obter novos *nodes* com novas funcionalidades através de uma plataforma aberta disponível no ambiente Dynamo onde são partilhados entre os utilizadores “*packages*” com novos *nodes* e rotinas, não dispensando uma verificação da sua ação nas rotinas criadas.

No que se refere à aprendizagem do Revit, pode-se concluir que se trata de um *software* já bastante explorado nas empresas de engenharia, particularmente na modelação de edifícios, o que permitiu obter mais informação, quer ao nível de formações online através de tutoriais, quer ao nível de trabalhos práticos já realizados. De qualquer forma trata-se de um *software* com um leque vasto de capacidades quer para trabalhar com o programa de forma isolada, quer para servir de ligação a outros, possuindo assim um conjunto muito amplo de funcionalidades que demoram algum tempo a serem dominadas por parte dos utilizadores.

Tendo em conta o foco desta dissertação, para a criação dos diversos elementos da ponte, foi necessária a sua criação prévia no Revit através da definição de famílias paramétricas, de forma a poderem ser controladas posteriormente através do Dynamo. Sendo esta uma tarefa simples para a criação de um elemento regular de um edifício, para a definição de algumas das famílias de elementos da ponte com formas mais diversificadas e complexas e com necessidades de adaptabilidade dentro do Revit, tornou-se uma tarefa um pouco morosa, num processo recorrente de tentativa em erro.

Relativamente às conclusões obtidas da modelação 3D da ponte, são de salientar os seguintes pontos:

- Apesar das mais-valias inerentes à modelação 3D da ponte, no caso da aplicação do *add-in* Dynamo, é necessário efetuar uma gestão estratégica quer da criação das próprias rotinas, quer da execução dos vários algoritmos criados dentro de um único ficheiro Dynamo. Neste âmbito, são de mencionar duas estratégias que se mostraram cruciais para uma gestão controlada da criação de elementos no Revit. Em primeiro lugar, apesar da necessidade de ligação das rotinas para a criação dos diversos elementos, derivado da necessidade de dados criados pela rotina de implantação de elementos anteriores, devem ser criadas, sempre que possível, rotinas de forma separada. Obtém-se deste modo uma maior clareza e simplicidade das rotinas criadas, aliadas também a uma maior fluidez do *software*. A segunda opção encontrada seria a organização por grupos de execução, bem definidos no ambiente Dynamo e efetuar-se uma gestão de “congelamentos” (inativar *nodes* para a execução) de *nodes*, deixando apenas ativos os *nodes* necessário para criação atual pretendida, mantendo toda a rotina num só ficheiro Dynamo. Pode-se concluir que a primeira opção se tornou mais viável.
- Tendo em conta que no processo de desenvolvimento de um projeto vão sendo efetuadas diversas alterações quer de geometria quer de coordenadas, penso estar neste processo de alterações a maior desvantagem do uso do Dynamo. Após a criação de todos os elementos é efetuada a sua cotação e organização do processo de desenhos, no caso de serem necessárias alterações ao modelo, todo o processo de cotação terá de ser feito de novo. No entanto, é importante referir que o processo de alteração de geometria ou coordenadas necessárias em qualquer altura pode ser executado sem grandes dificuldades e com maior rapidez, sem que seja necessário verificar todos os documentos referentes à alteração.
- De forma a facilitar a organização de dados através da programação visual no Dynamo, é de enorme relevância efetuar uma análise e organização prévia dos dados através de uma folha de cálculo, minimizando assim o número de iterações no ambiente Dynamo.

Finalmente, analisando o enquadramento empresarial do BrIM, é possível concluir que apesar deste tipo de projetos de pontes ainda ser desenvolvido na generalidade através de desenhos 2D repartidos por uma vasta equipa com muitos anos de experiência em CAD e com rotinas já bem consolidadas para a realização deste tipo de projetos, faz com que as desvantagens ligadas ao desempenho em CAD, passem, de certa forma, um pouco despercebidas. Desta forma, é de referir que apesar das claras vantagens ligadas à implementação do BIM em edifícios, no caso das pontes existe ainda alguma hesitação por parte dos intervenientes. Para além dos custos associados à obtenção dos *softwares* BIM, existem ainda muitas dúvidas em relação à sua aplicabilidade em pontes, bem como o seu retorno quer

em tempo, quer em lucro, provocando assim uma certa inércia na sua implementação no projeto de pontes.

Contudo, pode-se também concluir que apesar da referida resistência inicial por parte dos intervenientes no projeto de pontes, é importante referir que a possibilidade de existirem períodos de formação e informação, através de uma gestão organizada dos *workflows* dos colaboradores, de forma a poderem conciliar as horas de formação e os seus compromissos em projetos em curso com prazos para cumprir, seria bastante positivo para a implementação da metodologia de forma mais consistente.

4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Durante a realização deste projeto foi possível perceber que ainda existe um longo caminho para percorrer na implementação da metodologia BIM na área do projeto de pontes vigadas pré-esforçadas de betão armado. Tendo como base de todo o processo, a definição de um modelo 3D da ponte, é de elevada importância a intervenção e desenvolvimentos futuros neste ponto de aplicação da metodologia BIM. Com base no trabalho desenvolvido a partir da ligação Revit e Dynamo foi possível serem detetados alguns pontos que é expectável serem desenvolvidos num futuro próximo, para que seja possível obter os benefícios inerentes à aplicação da metodologia BIM. Apresentam-se de seguida algumas das limitações encontradas, bem como propostas de melhoria a destacar:

- Limitação do Dynamo para trabalhar com coordenadas de projeto muito afastadas (na ordem dos milhares de metros) da origem (0, 0, 0). Obriga a efetuar uma transformação das coordenadas originais de implantação dos diversos elementos da ponte de modo a se poder utilizar o Dynamo. Para além do problema revelado no Dynamo, este trespassa posteriormente para o Revit devido à sua limitação para mover o ponto do projeto para distâncias superiores às 10 milhas. Desta forma, seria um bom desenvolvimento resolver esta limitação dos *softwares*;
- Tendo em conta que o processo de elaboração de um projeto incorpora a realização de alterações ao longo das diferentes fases, prevê-se neste âmbito limitações ao nível da interoperabilidade entre os *softwares* nas fases finais do projeto, em que os desenhos finais em 2D já estão preparados ao nível da cotagem e definição dos elementos, que percam todas estas cotagens e definições associadas, aquando da modificação do modelo tridimensional a partir do Dynamo. Como eventual solução a analisar em desenvolvimentos futuros, é a criação de rotinas de alteração do modelo geométrico 3D, ou por outro lado desenvolver rotinas mais expeditas para a cotagem no Revit;
- Relativamente à modelação em Revit, como desenvolvimentos futuros, assinala-se a dificuldade ou impossibilidade de união ou seccionamento de alguns elementos de categorias diferentes.

Penso que melhorias a este nível seriam bastante importantes para a aplicação na modelação de pontes;

- No que se refere à colocação de armaduras, são de apontar as limitações do Revit para a aplicação de armaduras a elementos fora do âmbito de categorias presentes no *software*. Sendo este ponto de elevada importância para desenvolvimentos futuros ao nível da capacidade do Revit para os projetos de pontes. Tendo em vista a possibilidade de colocação de armadura em elementos mais genéricos de forma mais expedita, seria um avanço bastante importante para impulsionar a integração da metodologia BIM no projeto de pontes. Tendo em conta as mais-valias ao nível da produtividade e eficiência associadas à metodologia BIM, no caso do projeto de pontes prevê-se melhorias significativas na gestão da informação relativa às armaduras como são as medições e mapas de quantidades elaborados no fim do projeto;
- Relativamente à plataforma do Dynamo, tendo em consideração a utilidade da partilha de *packages e nodes* desenvolvidos por outros utilizadores, seria relevante haver uma entidade reguladora e certificadora dos elementos partilhados, de modo a aumentar a sua fiabilidade. Por outro lado seria bastante importante existir uma regulamentação do nome dado aos *packages e nodes* de modo a melhorar a eficiência na pesquisa destes elementos;

Por fim, é relevante referir que apesar das dificuldades iniciais inerentes à aprendizagem da metodologia BIM, em condições de alta performance com a utilização das ferramentas BIM, perspetiva-se um aumento significativo de produtividade e eficiência. Repreende-se assim que a aposta na formação nesta área é um dos desenvolvimentos futuros mais importantes a referir.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SUTHERLAND, Ivan Edward . 2003. *Sketchpad: A man-machine graphical communication system.* United Kingdom : University of Cambridge - Computer Laboratory, 2003.

ALHADIDI, Suleiman e KIMM, Geoff. 2014. Computational Design Strategies in Revit Building complex forms using Dynamo . *onstudio*. [Online] 2014. http://onstudio.co/wp-content/uploads/2015/07/RTC2014_ComputationalDesignStrategiesinRevitBuildingcomplexformsusingDynamo_Handout-Reduced.pdf.

AutoDesk University. AutoDesk University. <http://au.autodesk.com>. [Online] <http://au.autodesk.com/au-online/classes-on-demand/class-catalog/2015/revit-for-construction/ci11198#chapter=0>.

BOSHERNITSAN, Marat e DOWNES, Michael. 2004. Visual Programming Languages: A Survey. [Online] 12 de 2004. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.73.2491&rep=rep1&type=pdf>.

COENDERS, Jeroe L. 2010. "Parametric and associative design as a strategy for conceptual design and delivery to BIM". *Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (50th. 2009. Valencia). Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures.* Universitat Politècnica de València., 2010.

CORNELIUS, Preidel e Borrmann, André. 2015. Automated Code Compliance Checking Based on a Visual Language and Building Information Modeling. *Proceedings of the 32nd ISARC 2015. 32nd ISARC 2015.* [Online] 2015. http://www.cms.bgu.tum.de/publications/2015_Preidel_ISARC.pdf.

Council, AIA National / AIA California. 2007. *Integrated Project Delivery: A Guide.* s.l. : The American Institute of Architects, 2007.

Features. *Autodesk*. [Online] <http://www.autodesk.com/products/revit-family/features/all>.

FERREIRA, Bruno. 2011. *Aplicação de conceitos BIM à instrumentação de estruturas.* Porto : FEUP, 2011.

GOULD, Fred and JOYCE, Nancy. 2011. *Construction Project Management. Third edition.* USA : Pearson Education inc., 2011.

Guerra, Edwin. 2014. One Version of the Truth. Dynamo: Visual Programming for Revit/Vasari. [Online] 29 de 01 de 2014. <https://www.youtube.com/watch?v=xm26L0P2MPE>.

HOSICK, Eric. 2014. Visual Programming Languages - Snapshots. *Interfacevision - Decoding Software Development*. [Online] 20 de Fevereiro de 2014. <http://blog.interfacevision.com/design/design-visual-programming-languages-snapshots/>.

Ipek, GURSEL DINOI. 2012. Creative Design Exploration by Parametric Generative Systems in Architecture. *Middle East Technical University - Journal of Faculty of Architecture*. [Online] 2012. http://jfa.arch.metu.edu.tr/archive/0258-5316/2012/cilt29/sayi_1/207-224.pdf.

JAMISON, Sharon . 2014. Two answers for “Why Dynamo”? *MODELAB*. [Online] 02 de 09 de 2014. <http://modelab.is/two-answers-for-why-dynamo/>.

JEZYK, Matt e team, Dynamo Development. 2015. *The Dynamo Primer*. s.l. : Autodesk, 2015.

KRON, Zach. 2013. Enhanced Parametric Design with Dynamo Visual Programming for Revit and Autodesk Vasari. *Autodesk University 2013*. [Online] 2013. http://aucache.autodesk.com/au2013/sessionsFiles/2551/1914/handout_2551_Dynamo%20Visual%20Programming%20for%20Design.pdf.

MAIER, Francesca. 2012. Bridge Information Modeling: Opportunities, Limitations, and Spanning the Chasm with Current Tools. *Autodesk University*. [Online] 2012.

MEADATI, Pavan. 2009. *BIM Extension into Later Stages of Project Life Cycle*. Marietta, Georgia : Southern Polytechnic State University, 2009.

MONTEIRO, André e MARTINS, João Poças. 2011. *BUILDING INFORMATION MODELING - FUNCIONALIDADES E APLICAÇÃO*. Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

MYERS, Brad. 1990. Taxonomies of Visual Programming and Program Visualization. *Carnegie Mellon University, Research Showcase @ CMU*. [Online] 1990. <http://repository.cmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1765&context=isr>.

POÇAS MARTINS, João Pedro. 2009. *Modelação do Fluxo de Informação no Processo de Construção - Aplicação ao Licenciamento Automático de Projectos*. Porto : FEUP, 2009.

SGAMBELLURI, Marcello. 2014. Dynamo for Dummies: An Intro to Dynamo and How It Interacts with Revit. *Autodesk University 2014*. [Online] 2014. <http://au.autodesk.com/au-online/classes-on-demand/class-catalog/2014/revit-for-structural-engineers/ab6545-l>.

—. 2015. More Practical Dynamo: Practical Uses for Dynamo Within Revit. *Autodesk University*. [Online] 2015.

http://aucache.autodesk.com/au2015/sessionsFiles/10613/8852/handout_10613_AS10613_More_Practical_%20Dynamo_Marcello_Sgambelluri_HANDOUT.pdf.

—. **2015**. The Dynamo interface. *Simply Complex*. [Online] 01 de 2015.

<http://therevitcomplex.blogspot.pt/2015/01/the-dynamo-interface.html>.

SMITH, David Canfield. 1975. *Pygmalion: A Creative Programming Environment*. s.l. : Computer Science Department Stanford University, 1975.

SUCCAR, Bilal. 2009. *The Five Components of BIM Performance Measurement*. NSW Australia : University of Newcastle, 2009.

SYMEY, Oscar. 2013. *BIM in Bridge Construction*. Stockholm, Sweden : Royal Institute of Technology (KTH), 2013.

VOGT, Thomas Michael. 2016. Current application of graphical programming in the design phase of a BIM project: Development opportunities and future scenarios with 'Dynamo'. s.l. : University of Northumbria at Newcastle - Faculty of Engineering and Environment, 01 de 2016.

1963. Wikipedia. *Sketchpad*. [Online] 1963. <https://en.wikipedia.org/wiki/Sketchpad>.

Wikipedia. *Visual Programming Language*. [Online]

https://en.wikipedia.org/wiki/Visual_programming_language.

ANEXO I – DESENHOS 2D DA PONTE DISPONIBILIZADOS PELA EMPRESA

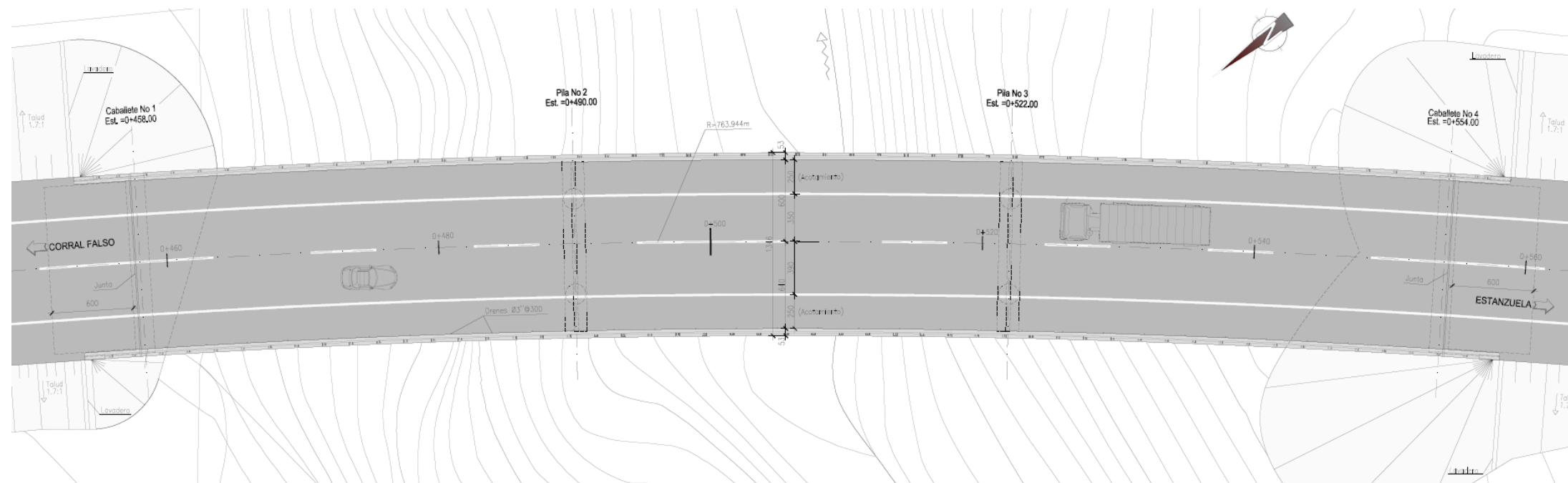


Figura I.1 – Planta viária.

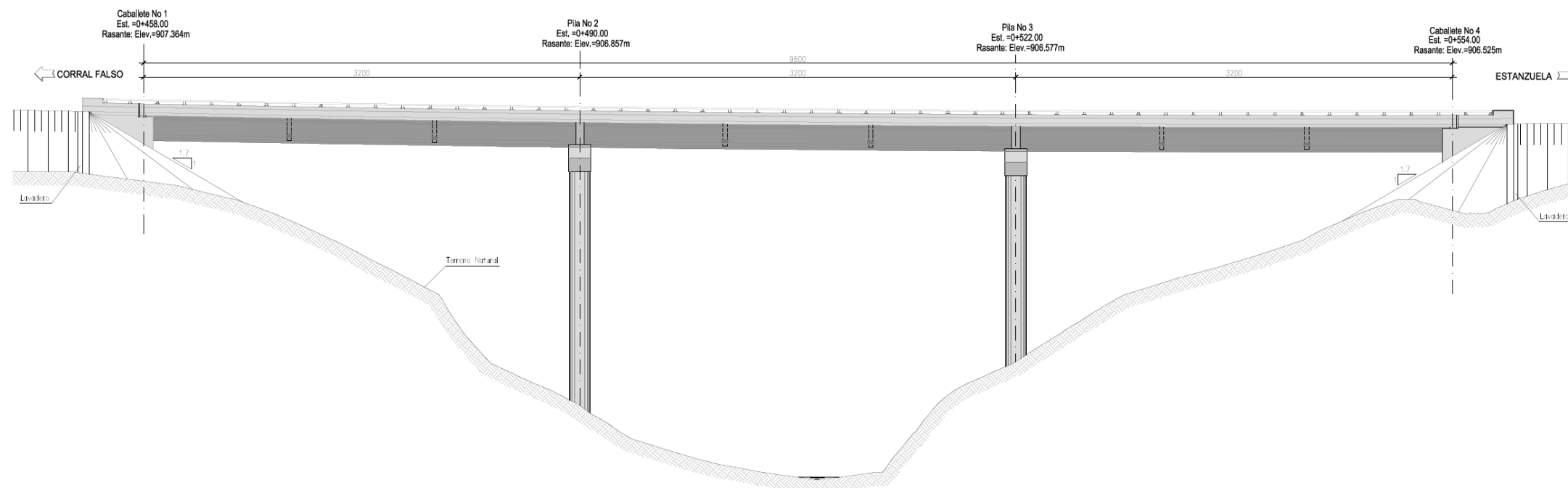


Figura I.2 – Alçado Longitudinal da ponte.

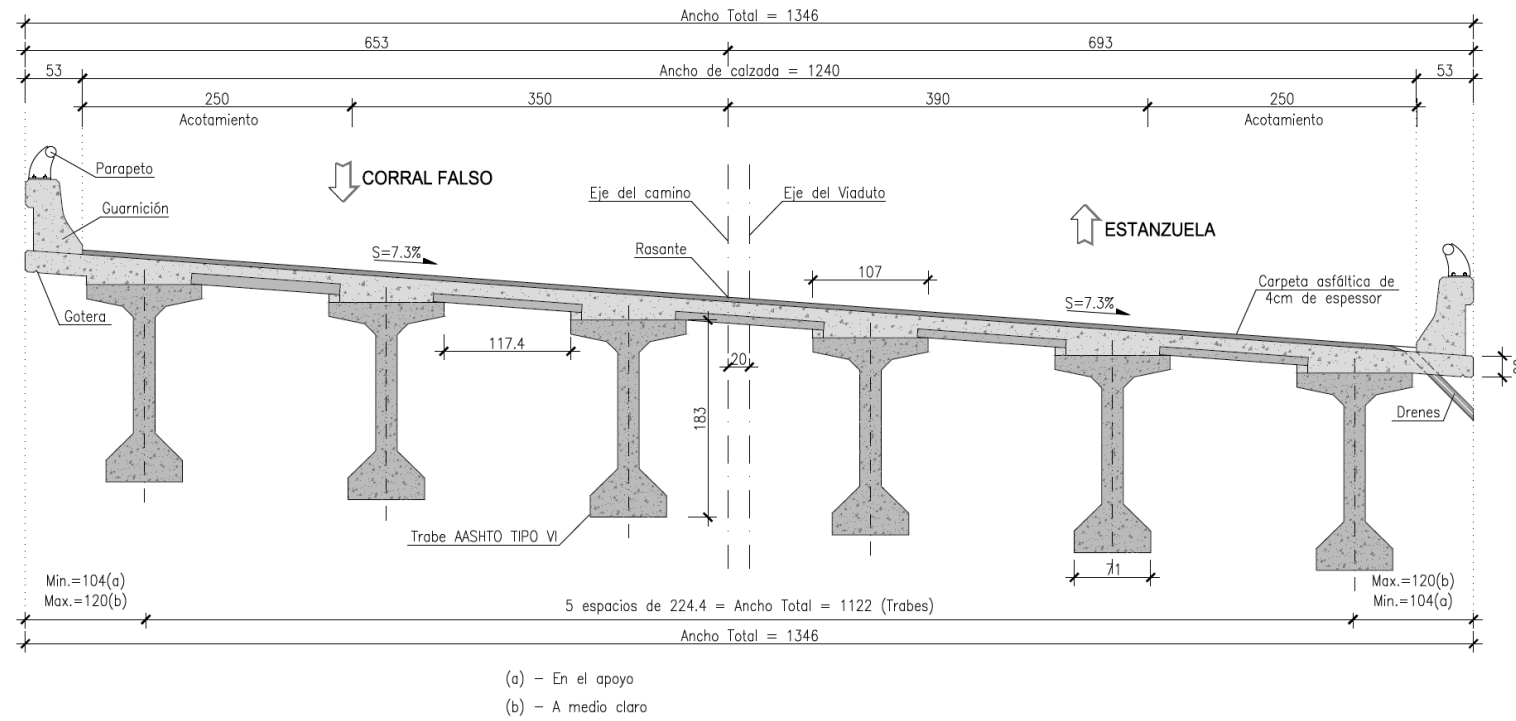


Figura I.3 – Corte Transversal do Tabuleiro

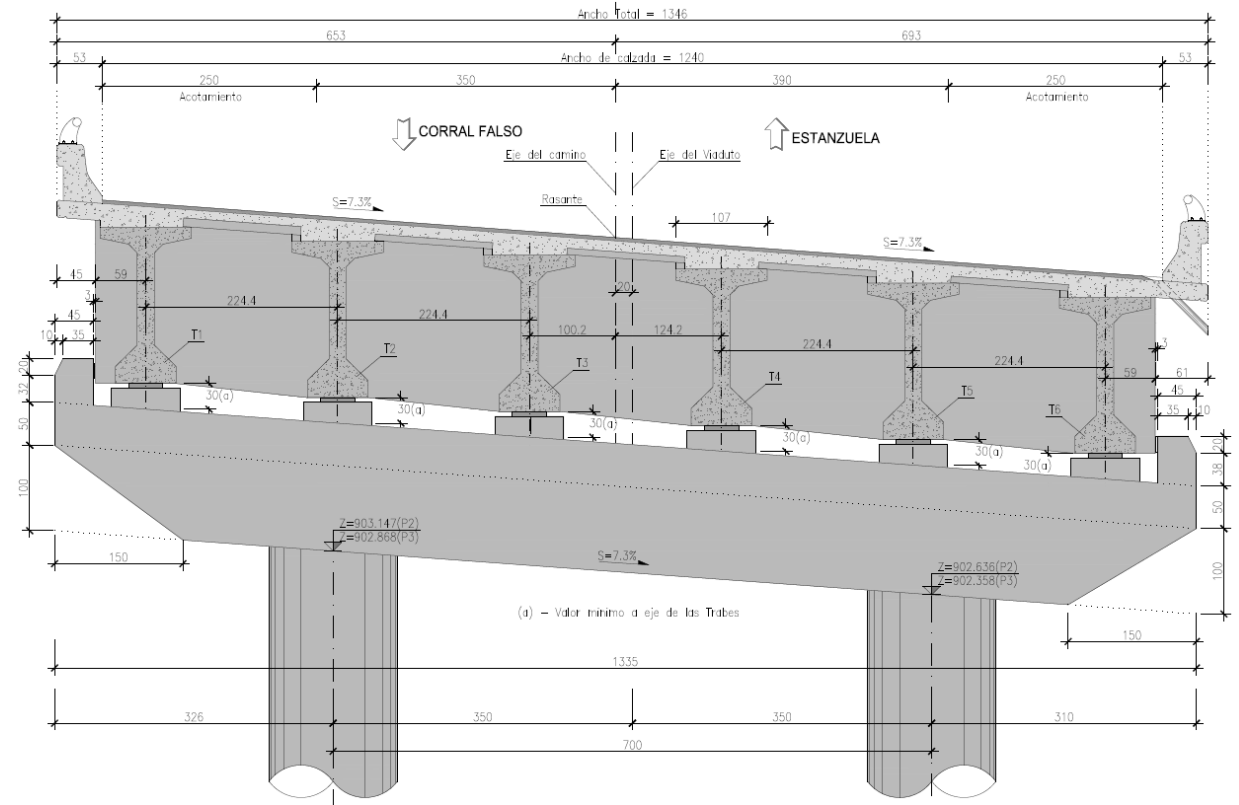


Figura I.4 – Alçado do alinhamento dos pilares.

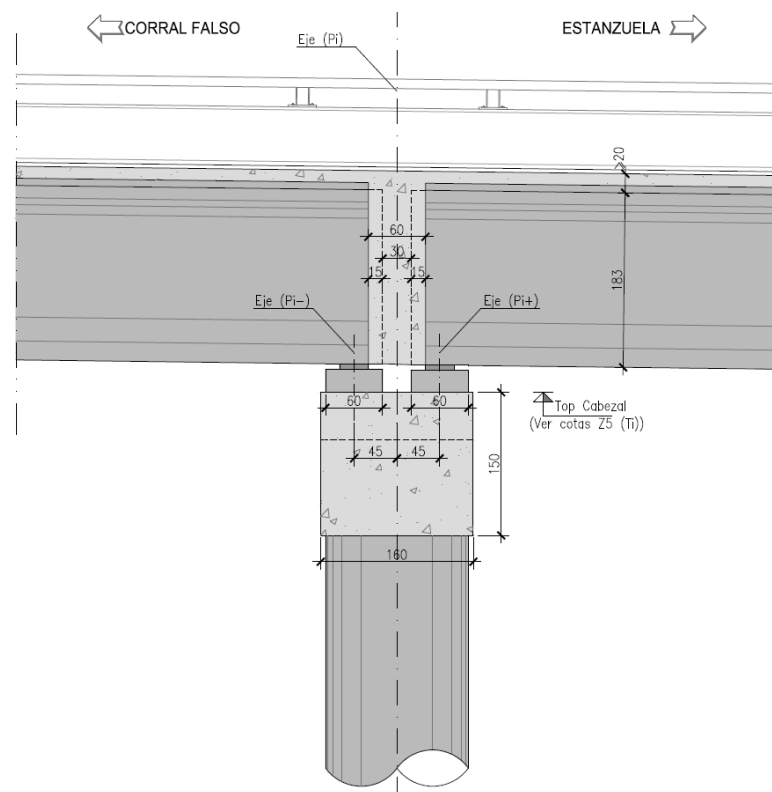


Figura I.5 – Corte Longitudinal nos Pilares.

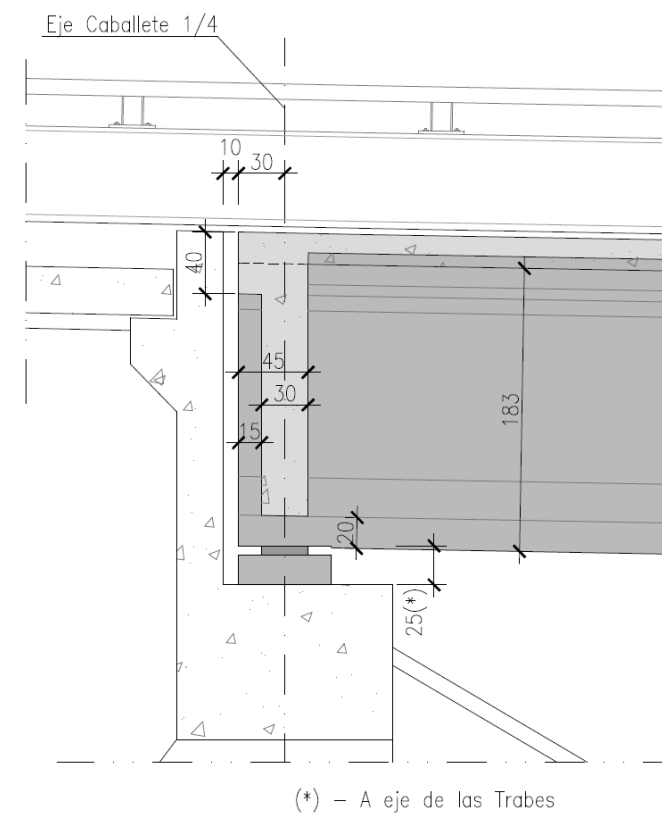


Figura I.6 – Corte Longitudinal nos Encontros.

COORDENADAS Y ELEVACIONES - ZAPATAS DE LAS PILAS				
Pilar	M (m)	P (m)	Z top (m)	Z base (m)
P2I	733997,830	2153582,977	883,00	881,80
P2D	733992,179	2153587,109	883,00	881,80
P3I	733978,323	2153557,439	887,00	885,80
P3D	733972,850	2153561,804	885,50	884,30

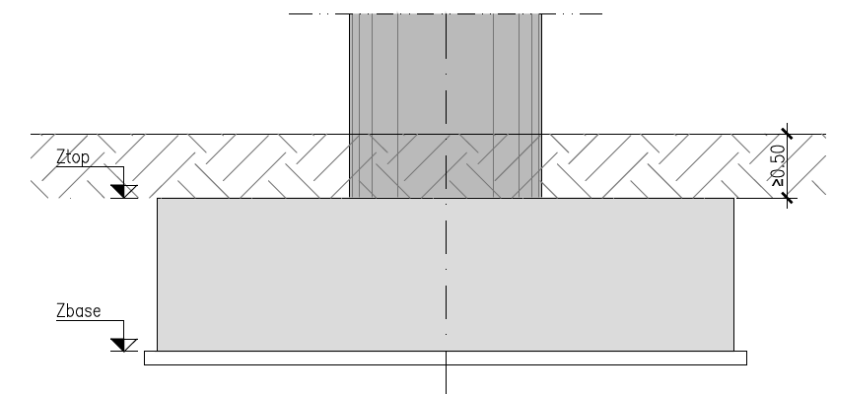


Figura I.7 – Esquema e coordenadas das fundações.

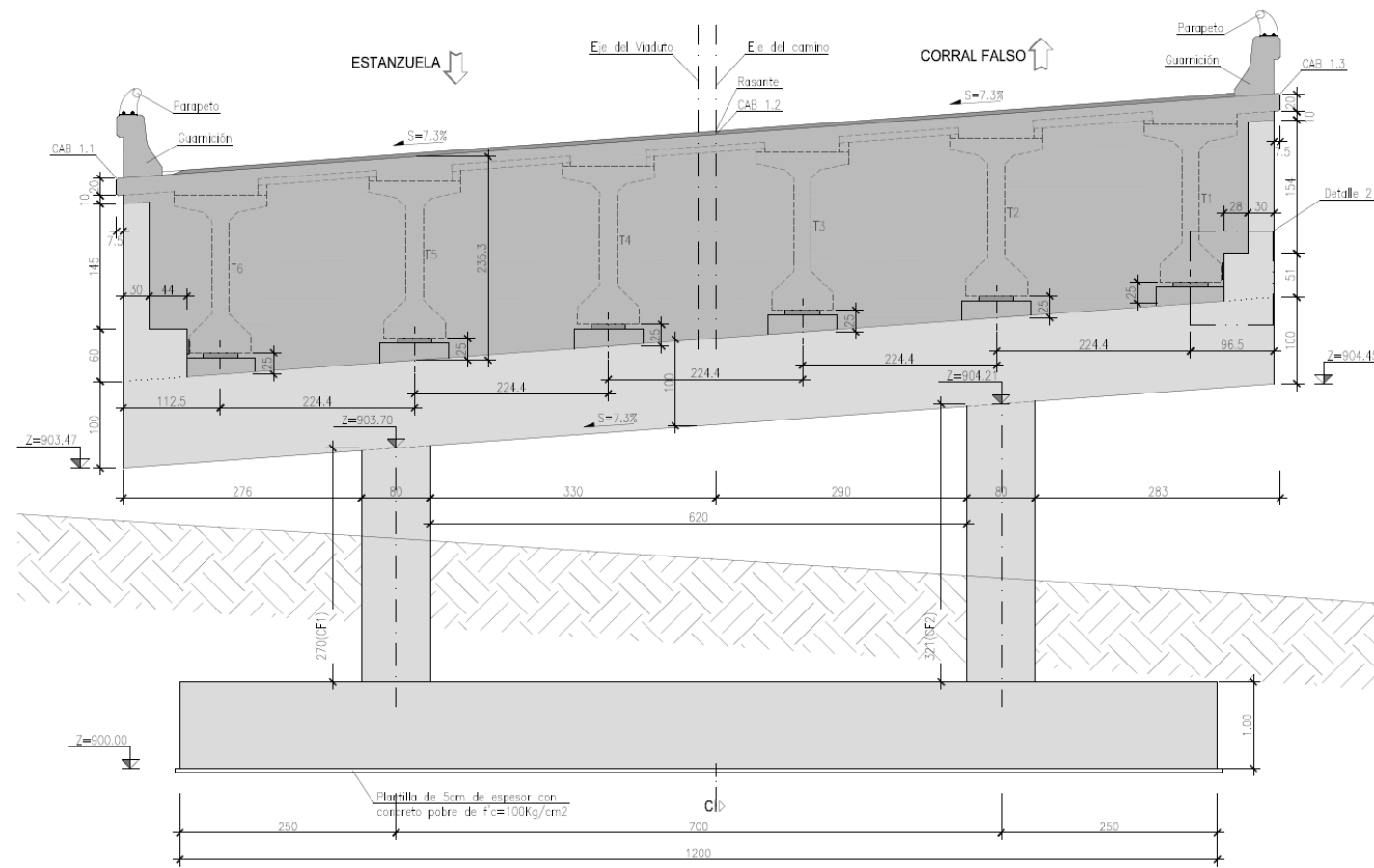


Figura I.8 – Alçado Frontal de um Encontro da Ponte.

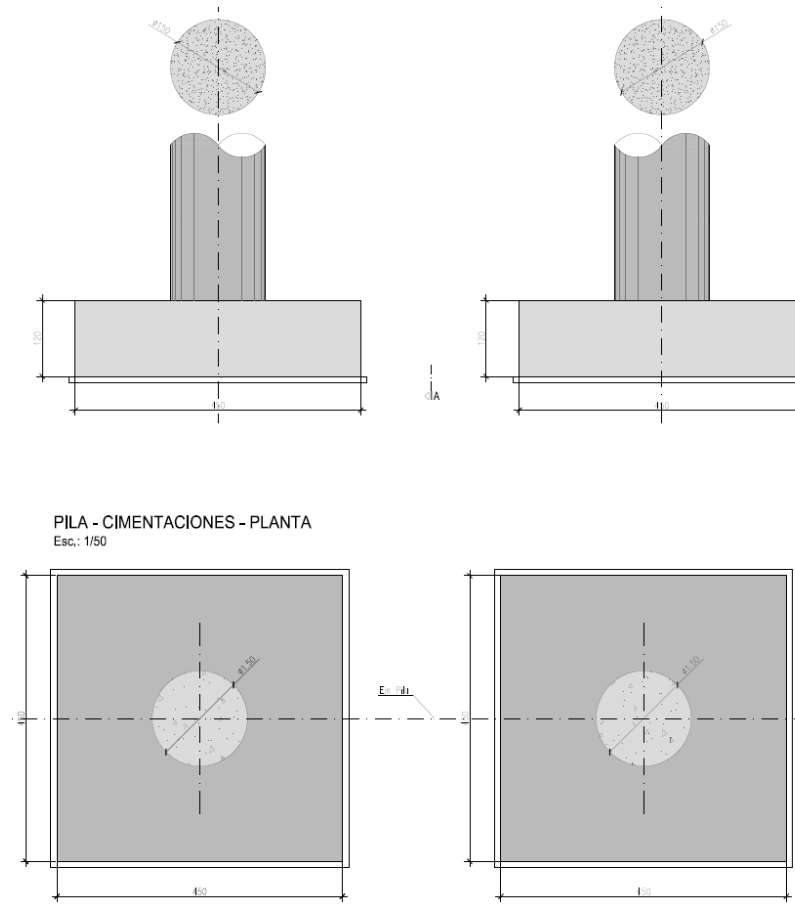


Figura I.9 – Geometria dos Pilares e Fundações.

OAE1 - TABLERO											
	Posición	T(ESQ)	T1	T2	T3	T(EJE)	T4	T5	T6	T(DIR)	
CAB1	dist. (al eje)	6,530	5,490	3,246	1,002	0,000	-1,242	-3,486	-5,730	-6,930	
	Carpeta Asfalt. - Z1	907,841	907,765	907,601	907,437	907,364	907,273	907,110	906,946	906,858	
	Losa Top - Z2	907,801	907,725	907,561	907,397	907,324	907,233	907,070	906,906	906,818	
	Trabe Top - Z3	-	907,447	907,283	907,119	-	906,955	906,792	906,628	-	
	Trabe Base - Z4	-	905,621	905,458	905,294	-	905,130	904,966	904,802	-	
	Cabezal - Z5	-	905,371	905,208	905,044	-	904,880	904,716	904,552	-	
	M (m)	734018,936	734018,071	734016,206	734014,340	734013,508	734012,475	734010,610	734008,745	734007,747	
	P (m)	2153607,514	2153608,092	2153609,339	2153610,587	2153611,144	2153611,834	2153613,082	2153614,329	2153614,996	
	P2-	dist. (al eje)	6,530	5,490	3,246	1,002	0,000	-1,242	-3,486	-5,730	-6,930
		Carpeta Asfalt. - Z1	907,339	907,263	907,100	906,936	906,863	906,772	906,608	906,444	906,357
Losa Top - Z2		907,299	907,223	907,060	906,896	906,823	906,732	906,568	906,404	906,317	
Trabe Top - Z3		-	906,945	906,781	906,618	-	906,454	906,290	906,126	-	
Trabe Base - Z4		-	905,120	904,956	904,792	-	904,628	904,464	904,301	-	
Cabezal - Z5		-	904,807	904,643	904,479	-	904,315	904,151	903,988	-	
M (m)		734000,703	733999,863	733998,052	733996,241	733995,432	733994,429	733992,618	733990,806	733989,838	
P (m)		2153581,434	2153582,048	2153583,372	2153584,697	2153585,288	2153586,021	2153587,346	2153588,670	2153589,378	
P2+		dist. (al eje)	6,530	5,490	3,246	1,002	0,000	-1,242	-3,486	-5,730	-6,930
		Carpeta Asfalt. - Z1	907,328	907,252	907,088	906,925	906,851	906,761	906,597	906,433	906,346
	Losa Top - Z2	907,288	907,212	907,048	906,885	906,811	906,721	906,557	906,393	906,306	
	Trabe Top - Z3	-	906,934	906,770	906,607	-	906,443	906,279	906,115	-	
	Trabe Base - Z4	-	905,107	904,943	904,779	-	904,615	904,451	904,288	-	
	Cabezal - Z5	-	904,807	904,643	904,479	-	904,315	904,151	903,988	-	
	M (m)	734000,172	733999,332	733997,521	733995,709	733994,900	733993,898	733992,087	733990,275	733989,306	
	P (m)	2153580,707	2153581,321	2153582,646	2153583,970	2153584,562	2153585,295	2153586,619	2153587,944	2153588,652	

P3-	Posición	T(ESQ)	T1	T2	T3	T(EJE)	T4	T5	T6	T(DIR)
	dist. (al eje)	6,530	5,490	3,246	1,002	0,000	-1,242	-3,486	-5,730	-6,930
	Carpeta Asfalt. - Z1	907,056	906,980	906,817	906,653	906,580	906,489	906,325	906,161	906,074
	Losa Top - Z2	907,016	906,940	906,777	906,613	906,540	906,449	906,285	906,121	906,034
	Trabe Top - Z3	-	906,662	906,499	906,335	-	906,171	906,007	905,843	-
	Trabe Base - Z4	-	904,835	904,671	904,507	-	904,344	904,180	904,016	-
	Cabezal - Z5	-	904,528	904,364	904,201	-	904,037	903,873	903,709	-
	M (m)	733981,128	733980,315	733978,561	733976,807	733975,023	733973,238	733971,454	733969,670	733967,886
	P (m)	2153555,777	2153556,425	2153557,825	2153559,224	2153559,849	2153560,623	2153562,022	2153563,421	2153564,170
	P3+	Posición	T(ESQ)	T1	T2	T3	T(EJE)	T4	T5	T6
dist. (al eje)		6,530	5,490	3,246	1,002	0,000	-1,242	-3,486	-5,730	-6,930
Carpeta Asfalt. - Z1		907,052	906,976	906,812	906,648	906,575	906,484	906,321	906,157	906,069
Losa Top - Z2		907,012	906,936	906,772	906,608	906,535	906,444	906,281	906,117	906,029
Trabe Top - Z3		-	906,658	906,494	-	906,257	906,166	906,002	905,839	-
Trabe Base - Z4		-	904,828	904,664	-	904,427	904,337	904,173	904,009	-
Cabezal - Z5		-	904,528	904,364	-	904,127	904,037	903,873	903,709	-
M (m)		733980,567	733979,754	733978,000	733976,246	733975,462	733974,491	733972,737	733970,982	733969,044
P (m)		2153555,073	2153555,722	2153557,121	2153558,520	2153559,145	2153559,919	2153561,319	2153562,718	2153563,466
CAB4		Posición	T(ESQ)	T1	T2	T3	T(EJE)	T4	T5	T6
	dist. (al eje)	6,530	5,490	3,246	1,002	0,000	-1,242	-3,486	-5,730	-6,930
	Carpeta Asfalt. - Z1	907,002	906,926	906,762	906,598	906,525	906,435	906,271	906,107	906,019
	Losa Top - Z2	906,962	906,886	906,722	906,558	906,485	906,395	906,231	906,067	905,979
	Trabe Top - Z3	-	906,608	906,444	906,280	-	906,117	905,953	905,789	-
	Trabe Base - Z4	-	904,778	904,615	904,451	-	904,287	904,123	903,959	-
	Cabezal - Z5	-	904,528	904,365	904,201	-	904,037	903,873	903,709	-
	M (m)	733960,202	733959,417	733957,722	733956,028	733955,272	733954,334	733952,640	733950,946	733949,040
	P (m)	2153530,622	2153531,304	2153532,776	2153534,247	2153534,904	2153535,719	2153537,190	2153538,662	2153539,449

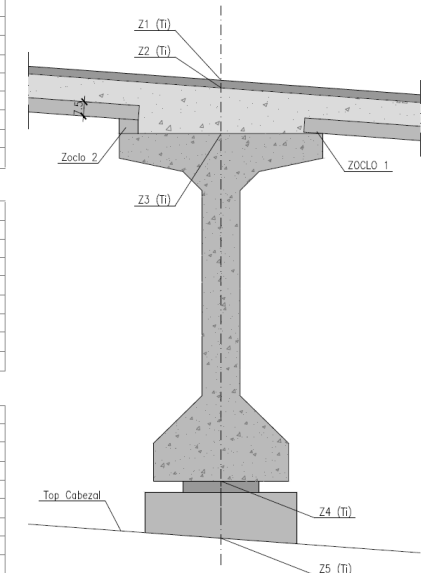
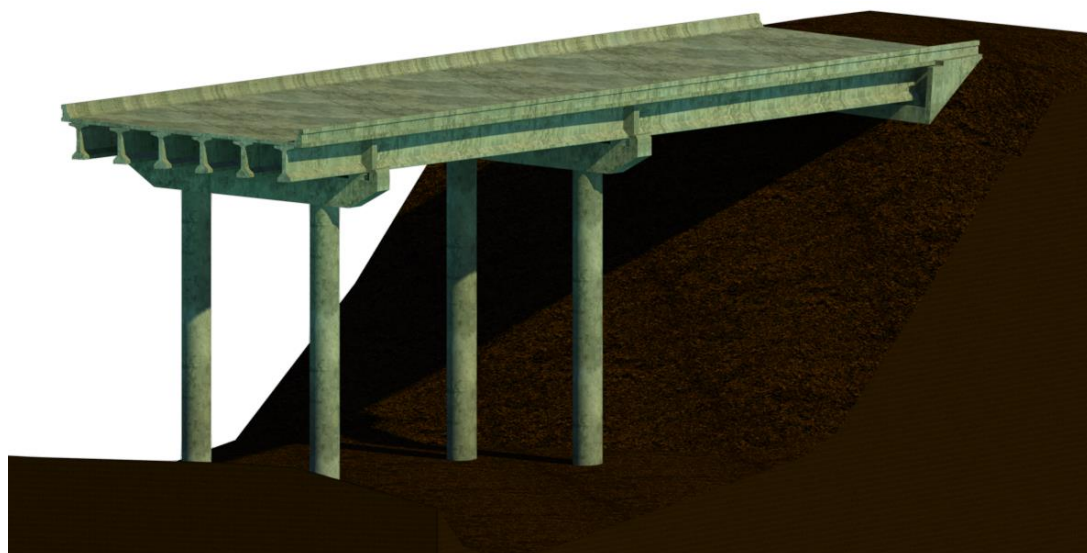


Figura I.10 – Quadro de Coordenadas de Projeto.

ANEXO II – VISUALIZAÇÃO 3D DA PONTE EM REVIT





ANEXO III – ROTINAS DYNAMO DESENVOLVIDAS

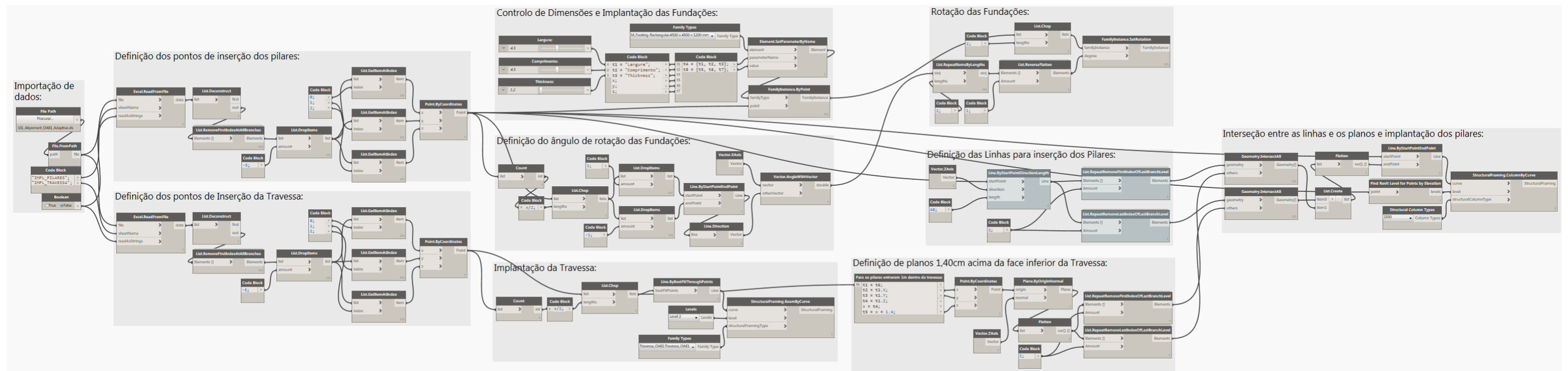


Figura III.1 – Rotina Dynamo Implantação dos pilares, fundações e travessa.

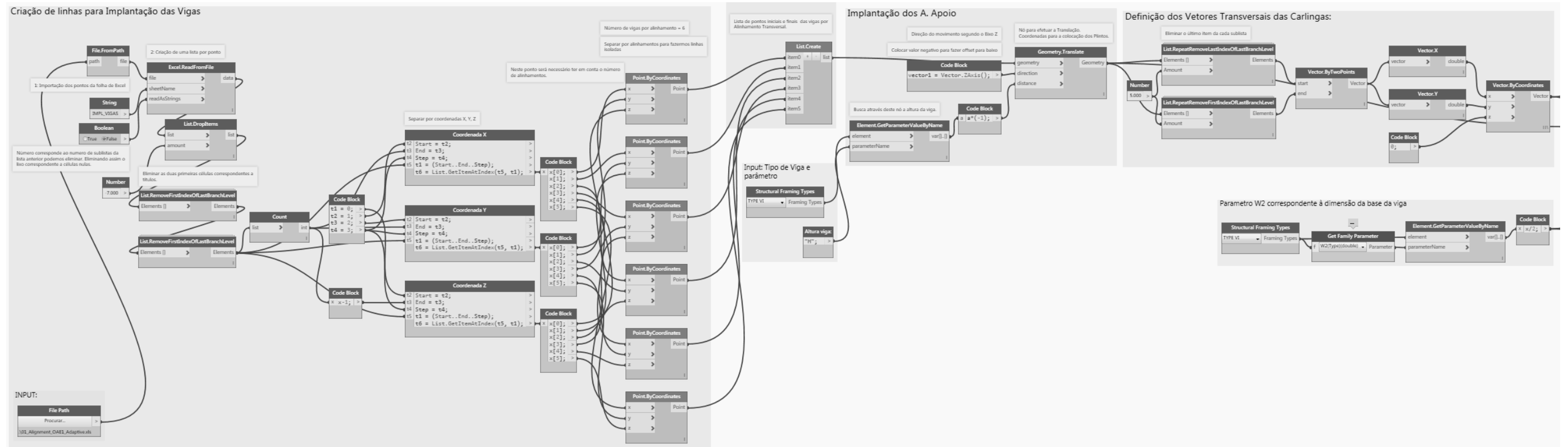


Figura III.2 – Rotina Dynamo criação das Carlingas sobre os pilares (parte 1).

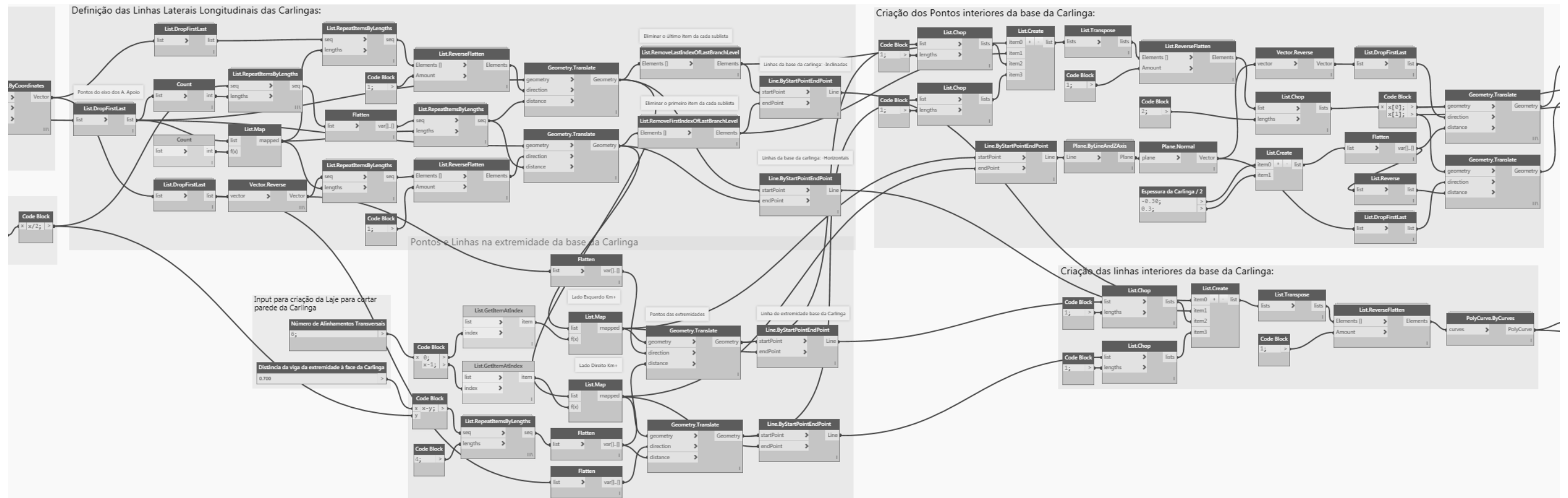


Figura III.3 – Rotina Dynamo criação das Carlingas sobre os pilares (parte 2).

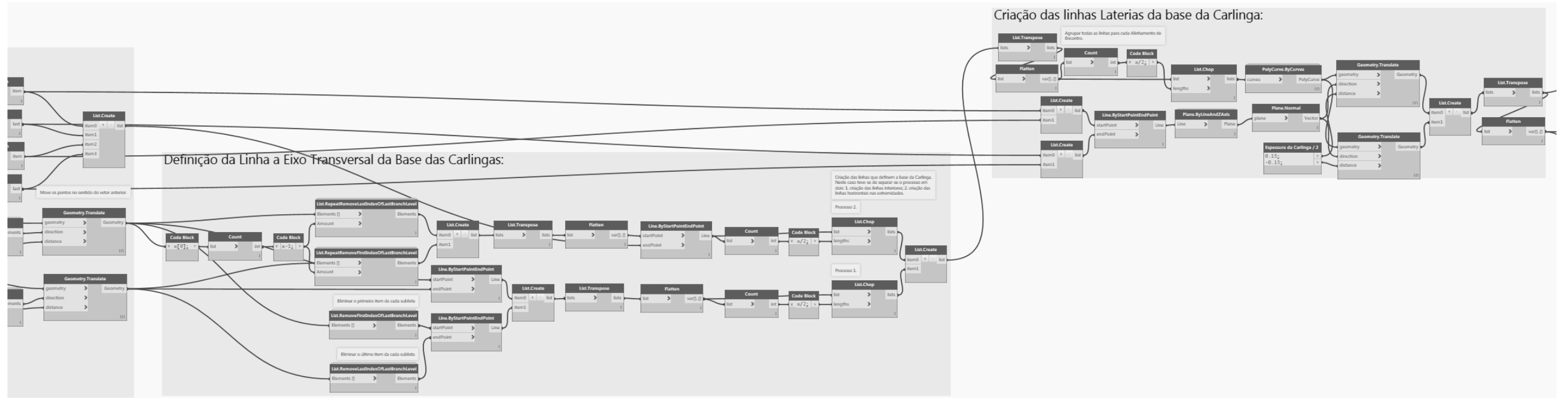


Figura III.6 – Rotina Dynamo criação das Carlingas nos Encontros (parte 2)

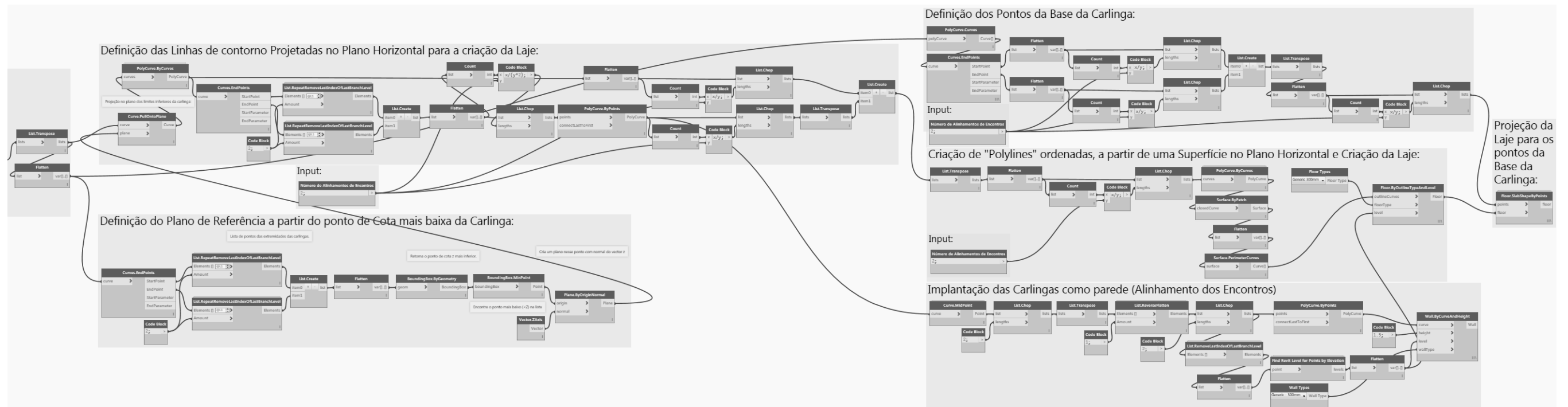


Figura III.7 – Rotina Dynamo criação das Carlingas nos Encontros (parte 3).

Criação das Linhas dos Limites Laterais do Tabuleiro para Implantação das Guardas:

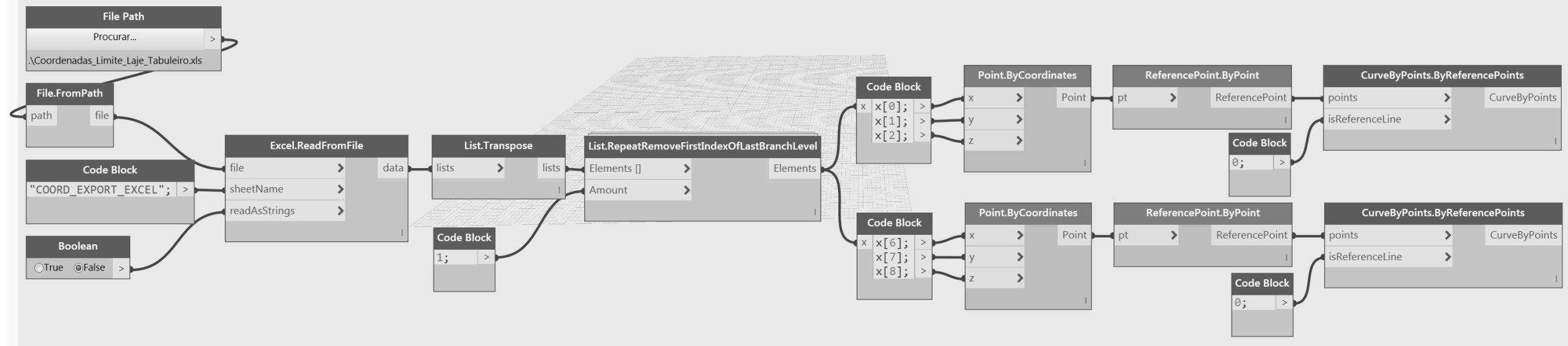


Figura III.8 – Rotina Dynamo Implantação das Guardas.

Criação de linhas para Implantação das Vigas:

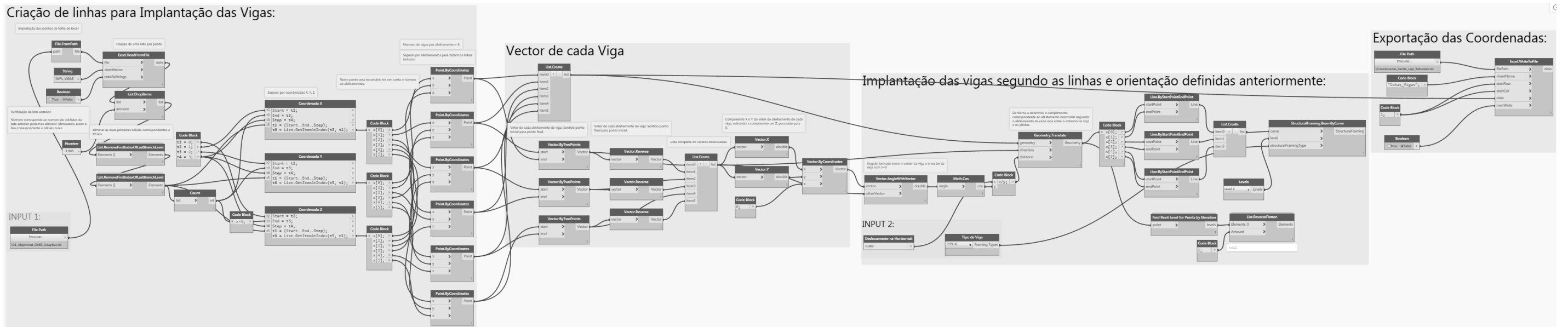


Figura III.9 – Rotina Dynamo Implantação das Vigas.

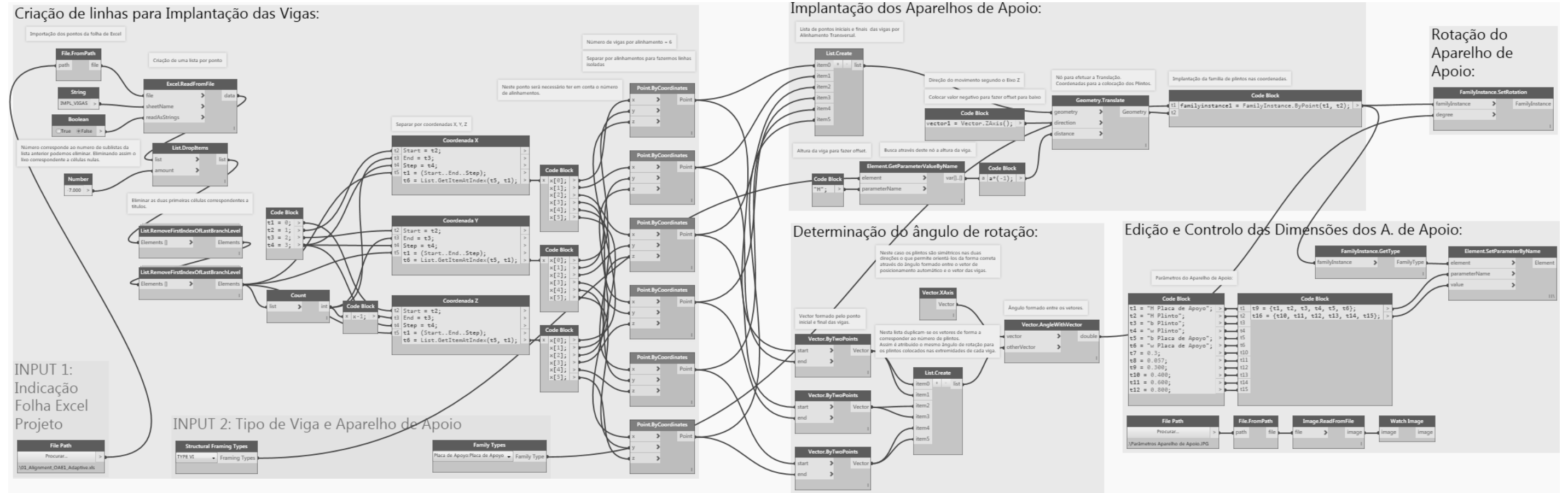


Figura III.10 – Rotina Dynamo Implantação dos Aparelhos de Apoio.

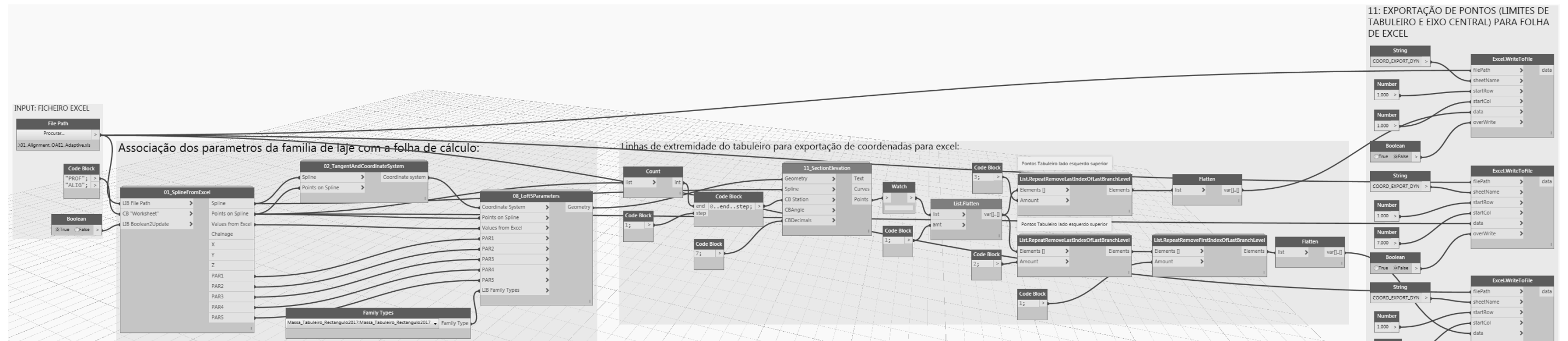


Figura III.11 – Rotina Dynamo exportação de coordenadas dos limites da laje do tabuleiro para uma folha de cálculo.