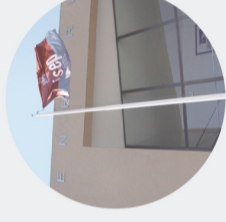




AUTOMAÇÃO DA PORMENORIZAÇÃO DE ARMADURAS EM BIM E MODELAÇÃO NUMÉRICA DO EMBOQUILHAMENTO DE UM TÚNEL

FELIPE BUENO BRANDÃO SIMÕES

Outubro de 2020



AUTOMAÇÃO DA PORMENORIZAÇÃO DE ARMADURAS EM BIM E MODELAÇÃO NUMÉRICA DO EMBOQUILHAMENTO DE UM TÚNEL

FELIPE BUENO BRANDÃO SIMÕES
Outubro de 2020



AUTOMAÇÃO DA PORMENORIZAÇÃO DE ARMADURAS EM BIM E MODELAÇÃO NUMÉRICA DO EMBOQUILHAMENTO DE UM TÚNEL

FELIPE BUENO BRANDÃO SIMÕES

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS

Orientador: Carlos Manuel da Silva Félix

Co-Orientador: Rodrigo Esmeriz Falcão Moreira

Supervisor: Hugo Marques (GEG - Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Lda)

OUTUBRO DE 2020

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tabelas.....	xxi
Glossário.....	xxiii
Abreviaturas	xxv
CAPÍTULO 1 Introdução.....	1
CAPÍTULO 2 Parametrização de projeto na engenharia estrutural	5
CAPÍTULO 3 Modelação e análise do emboquilhamento de um túnel.....	13
CAPÍTULO 4 Introdução ao estudo de caso.....	55
CAPÍTULO 5 Modelação automatizada e paramétrica de armaduras em BIM.....	65
CAPÍTULO 6 Considerações finais	101
Referências Bibliográficas	105

RESUMO

A atual mudança global imposta ao setor AEC – Arquitetura, Engenharia e Construção, em resultado da utilização cada vez mais generalizada de modelos paramétricos no projeto e na execução de estruturas de engenharia civil, exige uma maior especialização dos intervenientes na área da utilização de ferramentas informáticas, sobretudo num momento em que se reconhece as potencialidades da utilização da metodologia BIM (*Building Information Modelling*). Embora os profissionais disponham já de um conjunto consolidado de aplicações informáticas que resolvem com eficiência diversos problemas, nem sempre essa resposta é transversal ou aplicável a questões de projeto mais específicas, motivo pelo qual é ainda muito frequente a necessidade de desenvolvimento de personalizações e de extensões ou *plug-ins* dessas mesmas aplicações.

O presente trabalho, desenvolvido no âmbito do protocolo estabelecido entre o DEC-ISEP e o Gabinete de Estruturas e Geotecnia – GEG, é dedicado ao desenvolvimento de ferramentas de automação da modelação BIM em elementos de betão armado. Inclui a modelação tridimensional por elementos finitos e dimensionamento de armaduras do emboquilhamento de um túnel, a análise das ferramentas disponíveis para a modelação e a pormenorização de armaduras, e, finalmente, o desenvolvimento de um algoritmo específico para a modelação das armaduras de um caso de estudo.

O algoritmo desenvolvido para a modelação das armaduras, que recorre à interoperabilidade entre ferramentas informáticas com um elevado grau de automatização, apresenta precisão satisfatória mesmo quando aplicado a estruturas mais complexas, contribuindo assim para a promoção da metodologia BIM no projeto de estruturas de betão armado.

Palavras-chave: BIM; Projeto de estruturas; Pormenorização de armaduras; Modelação paramétrica; Projeto assistido; Interoperabilidade entre softwares.

ABSTRACT

The current global change imposed on the AEC sector - Architecture, Engineering and Construction, as a result of the increasingly widespread use of parametric models in the design and execution of civil engineering structures, requires greater specialization of the players in the making use of computer tools, especially at a time when the potential of using the BIM (Building Information Modeling) methodology is recognized and established. Although professionals already have a consolidated set of computer applications that efficiently solve several problems, the software outputs are not always transversal or applicable enough to more specific design questions, a reason for the current need to develop customizations and extensions of those same applications.

In the present work, in a protocol between DEC-ISEP and Gabinete de Estruturas e Geotecnia - GEG, were studied tunnel design methodologies and was investigated the development of an automation tool for BIM modelling of beam reinforcements. Initially, three-dimensional modelling and determination of the need for reinforcement was performed using computer-aided calculation in a program based on the Finite Element Method (FEM). Subsequently, tools for modelling and detailing were investigated, and algorithms for reinforcement modelling automation were developed. The tools used to determine the desired project production process were compiled, a case study was elaborated and the advantages, disadvantages, boundary conditions and potential improvements of the process were discussed.

The developed model, which uses interoperability between computer tools with a high degree of automation, presents satisfactory precision even when applied to more complex structures, thus contributing to the promotion of the BIM methodology in the design of reinforced concrete structures.

Keywords: BIM; Structural design; Reinforced Concrete Detailing; Parametric modelling; Computational Design; software Interoperability.

AGRADECIMENTOS

À quem tento ser genuinamente boa continuação e às continuações que tentam comigo.

ÍNDICE DE TEXTO

CAPÍTULO 1	Introdução.....	1
1.1	Considerações iniciais.....	1
1.2	Motivação e objetivos.....	3
1.3	Estrutura do documento.....	3
CAPÍTULO 2	Parametrização de projeto na engenharia estrutural	5
2.1	Ferramentas digitais na prática de projeto	5
2.1.1	Ferramentas orientadas para a forma e geometria	5
2.1.2	Ferramentas orientadas para a análise	6
2.1.3	Normatização BIM como objetivo europeu	7
2.2	<i>Building information model</i> e a modelação paramétrica	8
CAPÍTULO 3	Modelação e análise do emboquilhamento de um túnel.....	13
3.1	Introdução.....	13
3.2	Descrição geral da estrutura.....	13
3.3	Método construtivo “ <i>cut and cover</i> ”	18
3.4	Requisitos de resistência e serviço da estrutura	21
3.4.1	Normas técnicas e bases para projeto	21
3.4.2	Princípio de projeto por Estados-Limite	22
3.5	Modelo numérico	23
3.5.1	Modelação geométrica.....	23
3.6	Quantificação de ações.....	27
3.6.1	Ações permanentes e sobrecargas.....	27
3.6.2	Sucção e pressão devido à passagem do comboio.....	31

ÍNDICE DE TEXTO

3.6.3	Ação sísmica.....	32
3.6.4	Ação da neve.....	40
3.6.5	Ação da temperatura.....	41
3.6.6	Ações devidas à retração e à fluência do betão.....	45
3.7	Casos de carga e combinações de ações no modelo numérico.....	46
3.8	Cálculo automático de diagramas de esforços solicitantes e análise estrutural.....	49
CAPÍTULO 4	Introdução ao estudo de caso.....	55
4.1	Generalidades.....	55
4.2	Análise estrutural da viga.....	56
4.3	Aspectos e parâmetros associados a elementos de armadura no Revit.....	57
4.4	<i>Shape Grammars</i> e concepção do algoritmo.....	57
4.4.1	<i>Shape Grammars</i> como fundamentação do algoritmo.....	57
4.4.2	<i>Shape Grammars</i> e operações de Boole em formas.....	57
4.4.3	Concepção da rotina.....	62
CAPÍTULO 5	Modelação automatizada e paramétrica de armaduras em BIM.....	65
5.1	Enquadramento e objeto de estudo.....	65
5.2	Caso de estudo.....	65
5.2.1	Pacotes do Dynamo.....	66
5.3	Modelação BIM de viga em betão armado.....	67
5.4	Algoritmo desenvolvido.....	68
5.5	API do Revit e propriedades de edição de elementos.....	68
5.6	Script para garantia de processamento de comprimentos em milímetros.....	70
5.7	Obtenção e processamento da geometria proveniente do ambiente BIM.....	71
5.7.1	Definição de eixos locais.....	73
5.8	Obtenção e processamento da informação contida na folha de cálculo.....	74
5.9	Criação de curvas e elementos de armadura (<i>Rebar</i>).....	76
5.9.1	Curvas associadas a estribos.....	78

5.9.2	Curvas associadas a armaduras longitudinais	78
5.10	Parâmetros BIM associados aos varões	86
5.10.1	Amarrações e seus parâmetros BIM	86
5.10.2	Demais entradas para criação de armaduras	89
5.10.3	Disposição de armaduras no espaço	89
5.11	Resultado em interface gráfica da armadura no modelo BIM.....	92
5.11.1	Dynamo como utilizador (Dynamo Player).....	93
5.11.2	Visualização tridimensional de sólidos BIM	94
5.11.3	Visualização de cortes e pormenores 2D a partir de modelo BIM.....	97
5.12	Mapas de quantidades e informação BIM	98
CAPÍTULO 6	Considerações finais	101
6.1	Conclusões	101
6.2	Desenvolvimentos futuros.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de ferramenta orientada à forma e geometria em 2D (Fonte: Autor).....	6
Figura 2.2 – Exemplo de resultados de esforços solicitantes em ferramenta orientada à análise (Fonte: Autor).....	7
Figura 2.3 – Ilustração das partes constituintes da ISO 19650.	8
Figura 2.4 – Esquema de integração de modelos BIM no projeto de estruturas (Ferreira, Lima, Rio e Poças Martins, 2012).....	11
Figura 2.5 – Exemplo de Geometria complexa modelada com auxílio de programação visual (Fonte: dynamobim.org).....	12
Figura 3.1 – Secção transversal do túnel e alçado do tímpano.....	14
Figura 3.2 – Antevisão do emboquilhamento do do túnel.	15
Figura 3.3 – Secção transversal na zona do emboquilhamento.....	16
Figura 3.4 – Alçado lateral do emboquilhamento.....	17
Figura 3.5 – Planta da laje de topo do emboquilhamento modelado.	17
Figura 3.6 – Hipóteses de cortes e de estabilização de taludes no método “cut and cover” em túneis (Mouratidis, 2008).	18
Figura 3.7 – Cortina de estacas associadas a estrutura de túnel executada pela técnica “cut and cover” (Mouratidis, 2008).	19
Figura 3.8 – Método “Cut and cover” e variação “Cover and cut” aplicado à execução de emboquilhamentos de túneis (Mouratidis, 2008).	20
Figura 3.9 – Riscos de falhas geotécnicas em emboquilhamentos de túneis (Mouratidis, 2008).	20
Figura 3.10 – Representação da geometria da estrutura modelada.	23
Figura 3.11 – Vista frontal do tímpano.....	24
Figura 3.12 – Apoios associados às estacas no modelo numérico.....	25

Figura 3.13 – a) Visualização do modelo e suas malhas de elementos finitos; b) Vista aproximada do modelo.	26
Figura 3.14 – Impulsos e pesos do solo considerados no cálculo.	28
Figura 3.15 – Representação visual de peso de terras modelada.	29
Figura 3.16 – Isolinhas de bolbos de tensão no solo devido a carga vertical externa.	30
Figura 3.17 – Variáveis usadas no cálculo de tensões horizontais.	30
Figura 3.18 – Quantificação e modelação dos impulsos horizontais nas estacas devido ao solo arenoso.	31
Figura 3.19 – Acelerações de referência na Eslovênia em função da aceleração gravítica.	34
Figura 3.20 – Espectro de resposta elástico da estrutura (Fonte: Autor).	35
Figura 3.21 – Espectro de resposta de cálculo da estrutura (Fonte: Autor).	37
Figura 3.22 – Acesso a análises dinâmicas no <i>Robot</i>	38
Figura 3.23 – Definição de massas mobilizadas a partir de carregamentos no Robot Structural (Fonte: Autor).	39
Figura 3.24 – Configuração de Análise Modal no Robot Structural (1/2) (Fonte: Autor).	39
Figura 3.25 – Configuração de Análise Modal no Robot Structural (2/2) (Fonte: Autor).	40
Figura 3.28 – Temperatura máxima em período de retorno de 50 anos.	42
Figura 3.29 – Temperatura mínima em período de retorno de 50 anos.	42
Figura 3.30 – Representação das componentes do perfil de ações térmicas em secção de elemento. ...	43
Figura 3.31 – Representação visual de ações térmicas diferenciais positivas.	44
Figura 3.32 – Representação visual de ações térmicas uniformes negativas.	45
Figura 3.33 – Mapas de momento flector negativo (superior) no emboquilhamento em torno de XX'	50
Figura 3.34 – Mapas de momento flector positivo (inferior) no emboquilhamento em torno de YY'	51
Figura 3.35 – Mapas de momento flector negativo (superior) no emboquilhamento em torno de XX'	52
Figura 3.36 – Mapas de momento flector positivo (inferior) no emboquilhamento em torno de YY'	53
Figura 4.2 – Envoltentes máxima e mínima de momento flector atuante.	56
Figura 4.11 – <i>Shape Grammar</i> que inscreve quadrados em quadrados. (a) Regras de forma, (b) <i>forma inicial</i>	58

Figura 4.12 – Geração de forma a partir do <i>Shape Grammar</i> da figura 4.5.....	59
Figura 4.13 – Algumas formas na <i>linguagem</i> definida pelo <i>shape grammar</i> da figura 4.5.	59
Figura 4.14 – Um <i>Shape Grammar Paramétrico</i> que inscreve quadriláteros convexos em quadriláteros convexos. (a) <i>Esquemas</i> de regras de forma, (b) <i>Forma inicial</i>	60
Figura 4.15 – Geração de formas ao utilizar o <i>Shape Grammar Paramétrico</i> da Figura 4.14.....	60
Figura 4.16 – Representação da concepção inicial de funcionamento do algoritmo (Fonte: Autor)	63
Figura 5.1 – Pacotes do Dynamo explorados ao longo deste trabalho.....	66
Figura 5.2 – Visualização tridimensional das vigas modeladas em ambiente BIM para estudo de caso...	67
Figura 5.3 – Vista em planta das vigas modeladas em ambiente BIM para estudo de caso.	67
Figura 5.4 – Algoritmo desenvolvido para ferramenta de automação da modelação de armaduras de vigas em ambiente BIM (Fonte: Autor).....	68
Figura 5.5 – Exemplo de dicionário como tipo de informação de saída do nó <i>Geometry.ConcreteBeamColumnCharacteristics</i> (Fonte: Autor).....	69
Figura 5.6 – Exemplo de Script em linguagem Python desenvolvido para conversão das unidades de comprimento no Revit.	70
Figura 5.7 – Exemplo de informações inicialmente importadas pelo Dynamo a partir de seleção de elemento no Revit pelo usuário (Fonte: Autor).....	71
Figura 5.8 – Exemplo de nós envolvidos na obtenção de geometrias associadas à viga (Fonte: Autor)...	72
Figura 5.9 – Obtenção das seis superfícies envolventes da viga de secção retangular na ferramenta desenvolvida (Fonte: Autor).	73
Figura 5.10 – Nós referentes aos vectores que determinam os eixos locais da viga na ferramenta desenvolvida (Fonte: Autor).	74
Figura 5.11 – Funções associadas à importação de ficheiros e folhas de cálculo Excel para o Dynamo (Fonte: Autor).....	75
Figura 5.12 – Exemplo de fragmentação da informação extraída de uma folha de cálculo (Fonte: Autor).	76
Figura 5.13 – Função de criação de armaduras a partir de curvas de entrada.....	77
Figura 5.14 – Ilustração do tratamento das curvas de entrada do nó <i>Create.FromCurves</i> (Fonte: Autor).77	
Figura 5.15 – Exemplo de criação de curvas como entrada na geração de armaduras (Fonte: Autor)....	78

Figura 5.16 – Funções e bloco de código associados à criação de <i>geometria de construção</i> das <i>Curvas finais</i> na ferramenta desenvolvida.....	79
Figura 5.17 – Representação gráfica em ambiente de desenvolvimento das <i>Linhas de referência</i> para disposição das armaduras de reforços longitudinais superiores e inferiores.....	80
Figura 5.18 - <i>Shape Code</i> 00 adotado para referenciação de armaduras longitudinais principais (Fonte: BSI).....	81
Figura 5.19 – Representação em ambiente de desenvolvimento de <i>Sketch Lines</i> para geração de reforços longitudinais superiores cujo <i>Shape Code</i> = 00.....	81
Figura 5.20 – Representação gráfica da geração de geometrias a partir de transformações de forma parametrizadas (1/2) (Fonte: Autor).....	82
Figura 5.21 – Representação gráfica da geração de geometrias a partir de transformações de forma parametrizadas (2/2) (Fonte: Autor).....	83
Figura 5.22 – Criação de <i>geometrias de construção</i> a partir de intersecções Booleanas entre <i>Formas Iniciais</i> (Fonte: Autor).....	84
Figura 5.23 – <i>Shape Code</i> 21 adotado para referenciação de armaduras longitudinais principais (Fonte: BSI).....	84
Figura 5.24 – Nós para criação de Curva Final utilizada para criação de armadura longitudinal principal superior (Fonte: Autor).	86
Figura 5.25 – Definições gerais de armaduras selecionadas no modelo Revit para desenvolvimento da ferramenta.	88
Figura 5.26 - Representação das definições de armadura e amarrações na API do Revit.....	89
Figura 5.27 – Exemplo de criação de armaduras por listas de eixos de barras no Dynamo (Fonte: Autor).	91
Figura 5.28 – Parte das funções e bloco de código que definem <i>Linhas de referência</i> na ferramenta desenvolvida.	91
Figura 5.29 – Exemplo de função de definição de disposição de grupo de armaduras a partir da geração de um elemento <i>Rebar</i> a ser replicado.....	92
Figura 5.30 – Visualização do Dynamo Player para acesso à ferramenta desenvolvida.....	93
Figura 5.31 – Entradas necessárias para funcionamento da ferramenta em interface orientada ao usuário (Fonte: Autor).....	94

Figura 5.32 – Seleção da viga modelada e suas armaduras e filtragem da seleção no Revit.	95
Figura 5.33 – Configuração de visualização de sólidos para renderização das armaduras.	95
Figura 5.34 – Viga modelada e armaduras automaticamente geradas pela ferramenta desenvolvida (Fonte: Autor).....	96
Figura 5.35 – Armaduras geradas automaticamente e grupo de estribos de reforço selecionado (Fonte: Autor).	96
Figura 5.36 – Vista aproximada das armaduras geradas automaticamente pela ferramenta desenvolvida (Fonte: Autor).....	97
Figura 5.37 – Peça desenhada de secção transversal da viga no modelo BIM.	98
Figura 5.38 – Peça desenhada de corte longitudinal no modelo BIM.	98
Figura 5.39 – Acesso aos mapas de quantidades em modelo BIM no Revit.	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-1 – Diagrama de Gantt das atividades desenvolvidas em DIPRE.	2
Tabela 3-1 – Propriedades do betão adotadas em projeto.	21
Tabela 3-2 – Quadro 8.1N da EN 1992 1-1.	22
Tabela 3-2 – Parâmetros geotécnicos.	28
Tabela 3-3 – Quantificação de tensões horizontais no solo devido a carregamentos verticais externos.	30
Tabela 3-4 – Valores de referência de pressão e sucção devido à passagem do comboio.	31
Tabela 3-5 – Parâmetros de entrada para o cálculo do espectro de acelerações (Fonte: Autor).	34
Tabela 3-6 – Resultados da Análise Modal para a estrutura modelada (Fonte: Autor).	40
Tabela 3-8 – Ações térmicas consideradas no modelo.	44
Tabela 3-9 – Casos de carga introduzidas no modelo numérico.	46
Tabela 3-10 – Combinações de ações consideradas (1/3).	47
Tabela 3-11 – Combinações de ações consideradas (2/3).	48
Tabela 3-12 – Combinações de ações consideradas (3/3).	49
Tabela 5-1 - Mapa de quantidades gerado inicialmente a partir do modelo BIM.	99

GLOSSÁRIO

Computational Design – Projeto Computacional

Dynamo – Programa de desenvolvimento de ferramentas associadas aos programas BIM da empresa Autodesk através de acesso a uma API

Emboquilhamento – Estrutura que faz a interface da extremidade de um túnel com o exterior

Generative Design – Projeto Generativo

Revit – Programa para elaboração e integração de modelo BIM

Robot Structural – Programa para modelação numérica e cálculo assistido de estruturas

Tímpano – Parede estrutural de emboquilhamento delimitada pelo gabarito geométrico de veículos considerado em projeto

ABREVIATURAS

AEC – Setor de Arquitectura, Engenharia e Construção

API – *Application Programming Interface* | Interface de programação de aplicações

BIM – *Building Information Modelling*

CAD – Projeto assistido por computador

DIPRE – Dissertação/Projeto/Estágio

EC0 – Eurocódigo 0

EC1 – Eurocódigo 1

EC2 – Eurocódigo 2

EC3 – Eurocódigo 3

EC4 – Eurocódigo 4

EC7 – Eurocódigo 7

EC8 – Eurocódigo 8

JRC – *Joint Research Centre* da Comissão Europeia

MEF – Método dos Elementos Finitos

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O conceito BIM assenta, essencialmente, numa metodologia de partilha da informação entre todos os intervenientes, durante as fases do ciclo de vida de um edifício (projeto, construção, manutenção, demolição, nomeadamente entre a arquitetura, as especialidades, os construtores e os donos de obra, materializando-se na existência de um modelo digital tridimensional, acessível através de software e que permite a construção virtual desse mesma estrutura (Lino, Azenha e Lourenço, 2012).

Na indústria da construção foram desenvolvidos, em paralelo com as tecnologias de informação e comunicação, métodos colaborativos de trabalho em ambientes multidisciplinares. Recentemente, têm sido concentrados esforços na combinação desses métodos para facilitar a integração de disciplinas de projeto. Investigação em trabalho cooperativo e colaborativo resultou na promissora “metodologia integrada de elaboração de projetos”, enquanto investigação em tecnologias da informação e de comunicação resultou no BIM (Rempling, Fall e Lundgren, 2015).

O presente relatório refere-se ao trabalho de estágio desenvolvido no Gabinete de Estruturas e Geotecnia – GEG, no âmbito da Unidade Curricular DIPRE do Mestrado em Engenharia Civil – Ramo de Estruturas, conforme protocolo estabelecido entre o GEG e o DEC-ISEP.

O GEG é um gabinete estabelecido no Porto como uma organização proeminente no desenvolvimento de atividade de projeto. A empresa atua reconhecidamente em Portugal e no estrangeiro, sobretudo em projetos de estruturas de edifícios e obras de arte, geotecnia e vias de comunicação férrea e rodoviária. No contexto da institucionalização internacional da elaboração de projetos BIM, optou-se por explorar o desenvolvimento de ferramentas que otimizem diferentes etapas e gestão da informação ao longo do desenvolvimento e alteração de seus projetos.

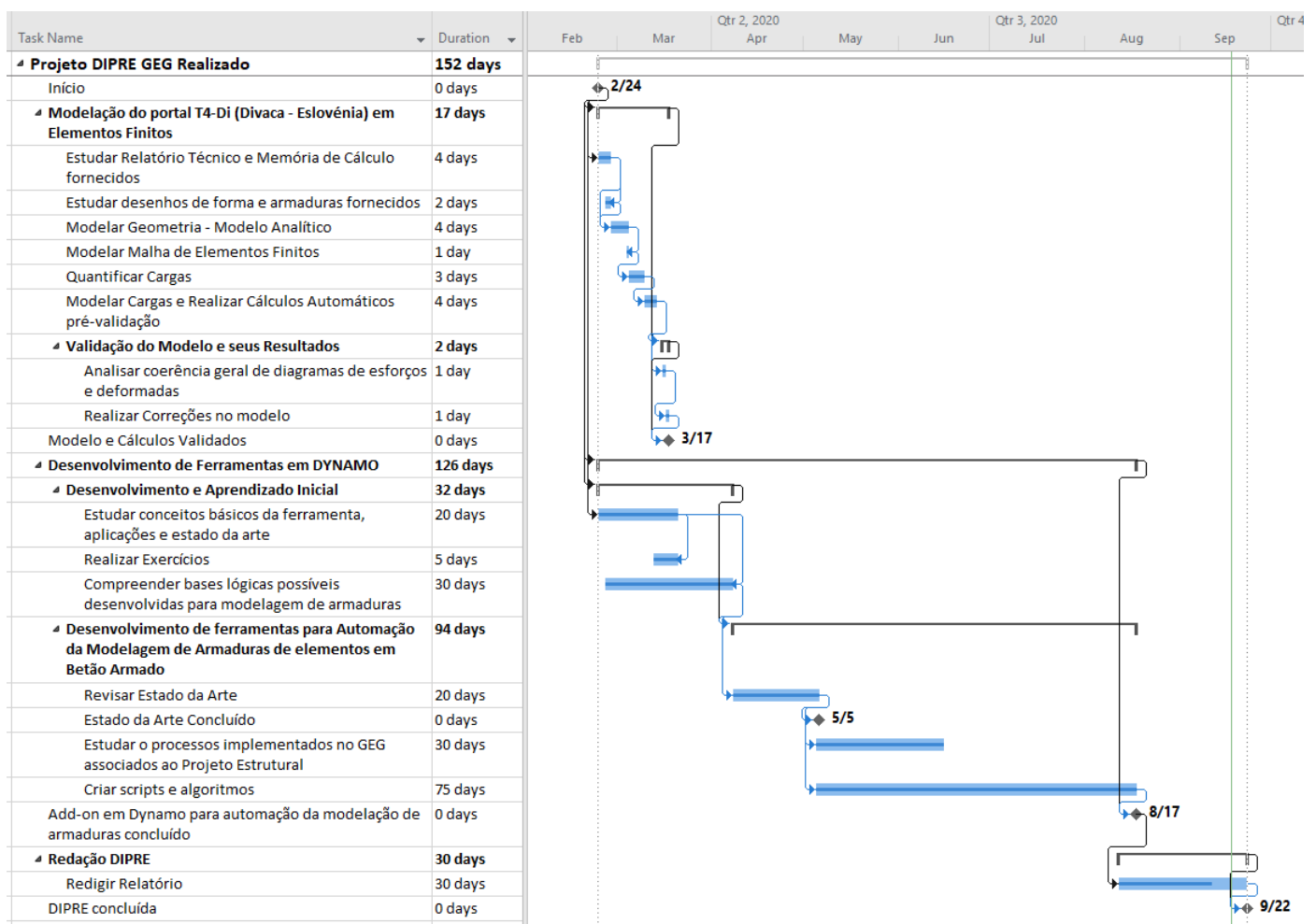
No âmbito do presente trabalho foram desenvolvidas atividades relacionadas com a modelação estrutural e com as técnicas construtivas e de elaboração de projetos correntes na empresa. São abordados neste documento aspetos e considerações acerca da modelação estrutural por elementos finitos e análise estrutural, lançando-se mão de um caso de estudo. A estrutura usada como caso de

CAPÍTULO 1

estudo é parte do projeto de um túnel em betão armado no Leste da Europa, componente de linha ferroviária a ser construída.

Posteriormente foram desenvolvidos algoritmos de programação visual para automatizar etapas do projeto estrutural, tendo sido este o principal objetivo deste trabalho. Em particular, foi automatizada a etapa de pormenorização de armaduras de vigas em betão armado com sucessivos vãos. A calendarização das atividades desenvolvidas encontra-se no diagrama de Gantt apresentado na Tabela 1-1.

Tabela 1-1 – Diagrama de Gantt das atividades desenvolvidas em DIPRE.



Foram utilizadas sobretudo ferramentas digitais correntes na criação de projetos de Arquitectura e Engenharia, sendo elas o Revit para elaboração de modelos BIM, MS Excel para folhas de cálculo de dimensionamento e, para a interoperabilidade entre esses, o Dynamo. Esse último programa permite acessar a API do Revit (2.2 deste documento) para a criação de ferramentas que otimizam o uso dos

atuais programas de apoio ao projeto de estruturas. Sua utilização e interface com o usuário é primariamente em interface gráfica de programação visual, representando as funções como nós e a relação de entradas e saídas (*inputs* e *outputs*) por linhas conectoras. É também usual a necessidade de desenvolver códigos ou alterar partes de códigos, sobretudo com a finalidade de adaptação do tipo de informação de entrada de funções. Para isto o Dynamo é adaptado com nós específicos que permitem ao usuário desenvolver códigos na linguagem *Python*, como será abordado adiante neste documento.

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Tendo em vista a consolidação do BIM, a velocidade de sua implementação em diferentes disciplinas é variada em diferentes países e contextos empresariais. O desenvolvimento de ferramentas digitais de automação de modelação aplicadas à engenharia estrutural mostra-se como um forte nicho de expressão do BIM em projetos de estruturas. Além disso, a alta potencialidade de otimização em paralelo com a necessidade da disciplina de estruturas acompanhar outras frentes já mais consolidadas na parametrização de informações pode ser visto como elementos para a emergência da necessidade de gabinetes desenvolverem suas próprias ferramentas digitais de apoio ao projeto de estruturas.

É neste contexto que o presente estágio teve como objetivo mais geral contribuir com respostas à procura por inovação por parte do GEG, no que diz respeito ao desenvolvimento de ferramentas digitais próprias de apoio ao projeto estrutural. Em particular, com o desenvolvimento de *software* para BIM aplicado à automação da modelação de armaduras. Por outro lado, permitiu desenvolver competências acrescidas na área do projeto de estruturas, nomeadamente no que diz respeito à modelação numérica e à análise de resultados de estruturas mais complexas, e ao dimensionamento e representação de armaduras.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente relatório está dividido em seis capítulos, dos quais o primeiro é a presente introdução.

- O Capítulo 2 faz uma síntese do estado da arte do BIM, com ênfase na sua interface com a engenharia de estruturas;
- No Capítulo 3 apresenta-se as bases para o dimensionamento e pormenorização de elementos estruturais em betão armado;
- No Capítulo 4 é feita uma introdução ao estudo de caso, em que se apresenta a concepção inicial de funcionamento do algoritmo desenvolvido, além de considerações canónicas que são mais exploradas no capítulo a seguir;

CAPÍTULO 1

- No Capítulo 5 é abordado o algoritmo desenvolvido para a automação da pormenorização das armaduras e avaliadas diferentes perspectivas e pontos-chave de projeto e programação da ferramenta e, por fim,
- O Capítulo 6 apresenta as conclusões acerca da eficácia e funcionamento do algoritmo, e estipula trabalhos futuros acerca do tema.

CAPÍTULO 2

PARAMETRIZAÇÃO DE PROJETO NA ENGENHARIA ESTRUTURAL

2.1 FERRAMENTAS DIGITAIS NA PRÁTICA DE PROJETO

As práticas atuais na arquitectura e engenharia fazem amplo uso de ferramentas computacionais na elaboração de projetos, e as ferramentas atualmente disponíveis refletem e consolidam estratégias de projeto existentes (Hsu & Liu, 2000; Wang et al., 2002). Na presente secção são categorizados diferentes tipos de ferramentas para a elaboração de projetos no setor AEC – Arquitectura Engenharia e Construção.

2.1.1 Ferramentas orientadas para a forma e geometria

Ferramentas para elaboração de *Projeto Assistido por Computador* – CAD foram primeiramente desenvolvidas na década de 1980. Inicialmente permitiam aos utilizadores documentar e, posteriormente, gerar projetos conceptuais e pormenores. Um interesse crescente em geometrias complexas levou ao desenvolvimento de poderosos programas de modelação 3D que, juntamente com valências de programação de computadores, permitem a geração de formas seguindo geometrias altamente complexas (Mueller, 2014). Na Figura 2.1 apresenta-se a interface gráfica do AutoCAD, uma ferramenta do tipo referido.

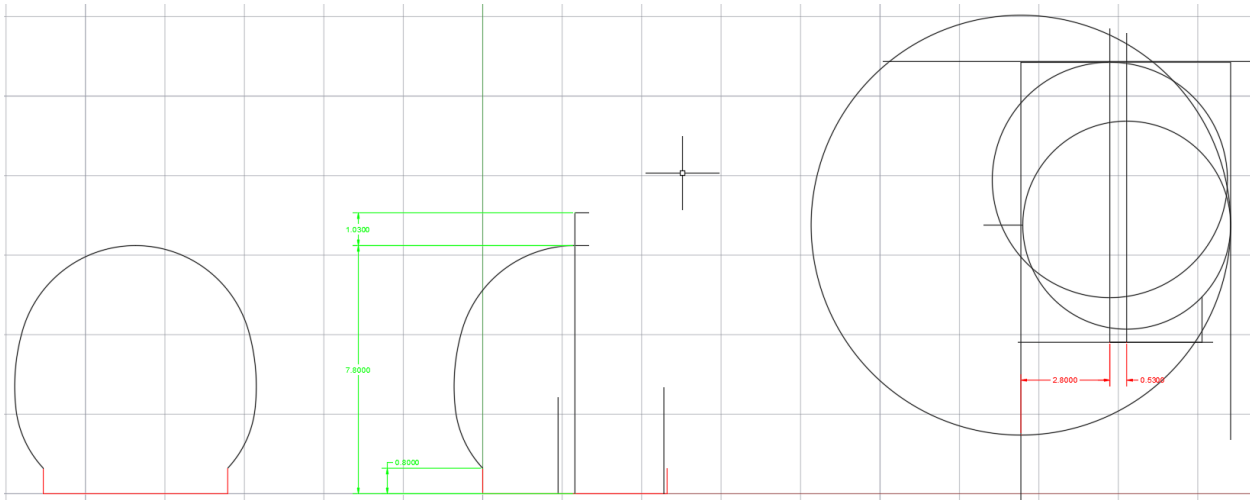


Figura 2.1 – Exemplo de ferramenta orientada à forma e geometria em 2D (Fonte: Autor).

2.1.2 Ferramentas orientadas para a análise

Ferramentas computacionais para apoio à análise estrutural contemplam a complexidade geométrica das ferramentas orientadas para a forma, sendo diversas opções comerciais correntes baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF) (Mueller, 2014). Estas ferramentas permitem a determinação de esforços solicitantes e deformações, tensões e comportamento dinâmico de geometrias analiticamente complexas. Uma das primeiras ferramentas orientadas à análise é o NASA Structure Analysis - NASTRAN, que realiza cálculo assistido de estruturas aeroespaciais desde análises estáticas a dinâmica. Originalmente desenvolvido no final da década de 1960, as primeiras versões do programa não contavam com recurso a interface gráfica de representação do modelo numérico introduzido. Na Figura 2.2 apresenta-se a interface gráfica do Robot Structural Analysis, ferramenta utilizada para modelação numérica e análise estrutural abordada no Capítulo 3.

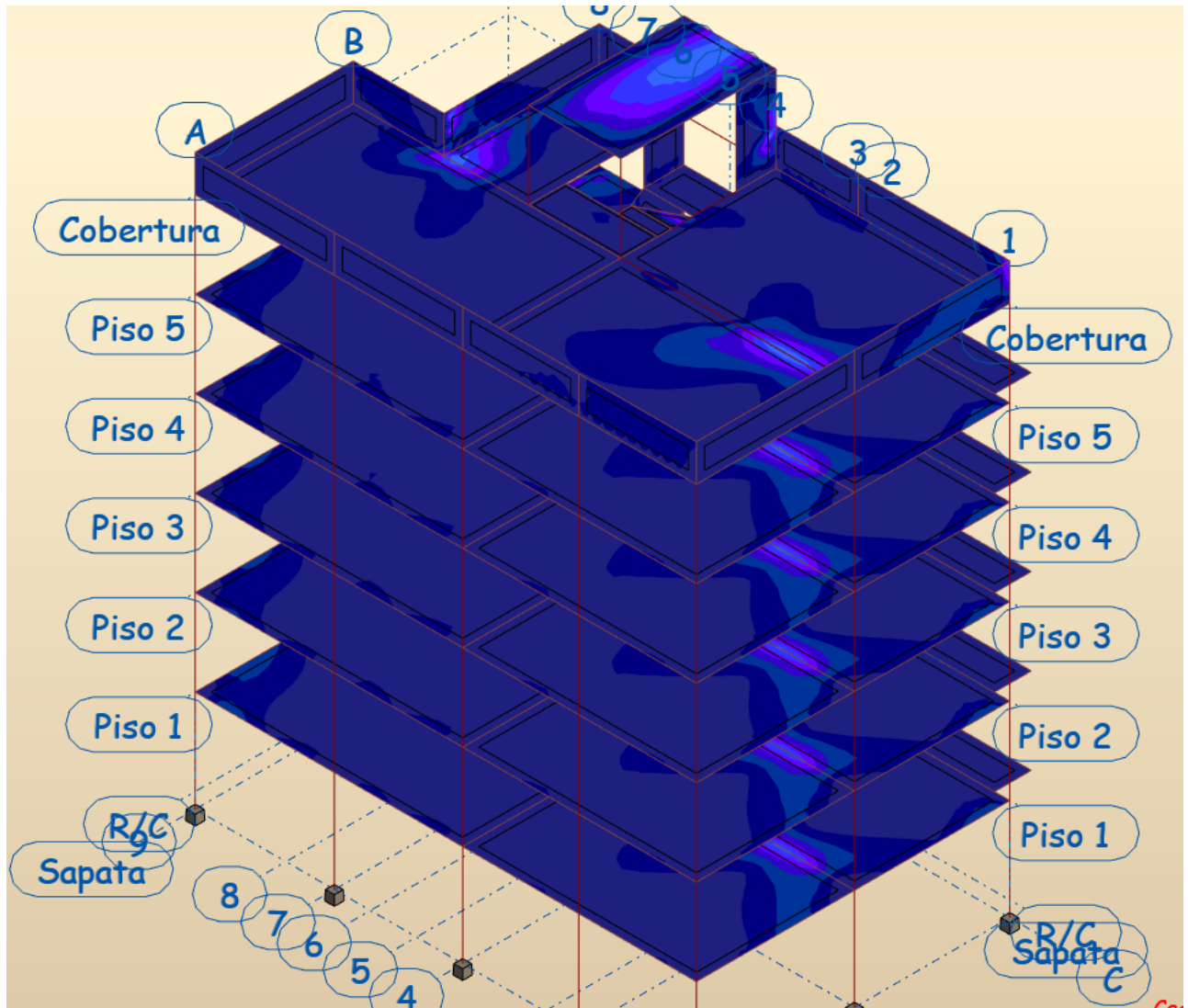


Figura 2.2 – Exemplo de resultados de esforços solicitantes em ferramenta orientada à análise (Fonte: Autor).

2.1.3 Normatização BIM como objetivo europeu

Em publicação do *Joint Research Centre (JRC)* da Comissão Europeia (EUR 29782 EN, 2019), é referido que apesar das muitas vantagens prometidas pela adoção do BIM, uma série de fatores limitaram sua difusão, até então. Um dos maiores obstáculos é o alto custo de implementação devido à necessidade de mais fácil acesso a *hardwares* mais poderosos, *software* mais sofisticados e profissionais habilitados (Gestor BIM, coordenador, especialista, gerente CDE). Além disso, a adoção do BIM apenas em pequenas partes do processo de construção limita as vantagens para o investimento necessário. Neste contexto, regulamentos e requisitos europeus podem levar a uma adoção mais generalizada desta ferramenta e poderia ajudar as PME a enfrentar os custos e investimentos iniciais que nem sempre são

sustentáveis atualmente. Ainda de acordo com a publicação referida, o *Building information modelling* (BIM; EN-ISO 19650-1-2:2019) é considerado o próximo estágio do projeto assistido por computador (CAD).

Foi observado que, em paralelo com a elaboração da ISO 19650 fundamentada principalmente nas normas BIM da série PAS 1192 do Reino Unido, onde encontra-se em período de transição de implementação da norma internacional. A ISO 19650 está em estágio de desenvolvimento, onde encontram-se redigidas duas das cinco partes previstas como constituintes da norma. A primeira parte tem como objetivo delinear conceitos, objetivos e bases para implementação das demais partes, enquanto a segunda parte preconiza normas BIM na fase de entrega do projeto. A Figura 2.3 ilustra as partes constituintes da ISO 19650.

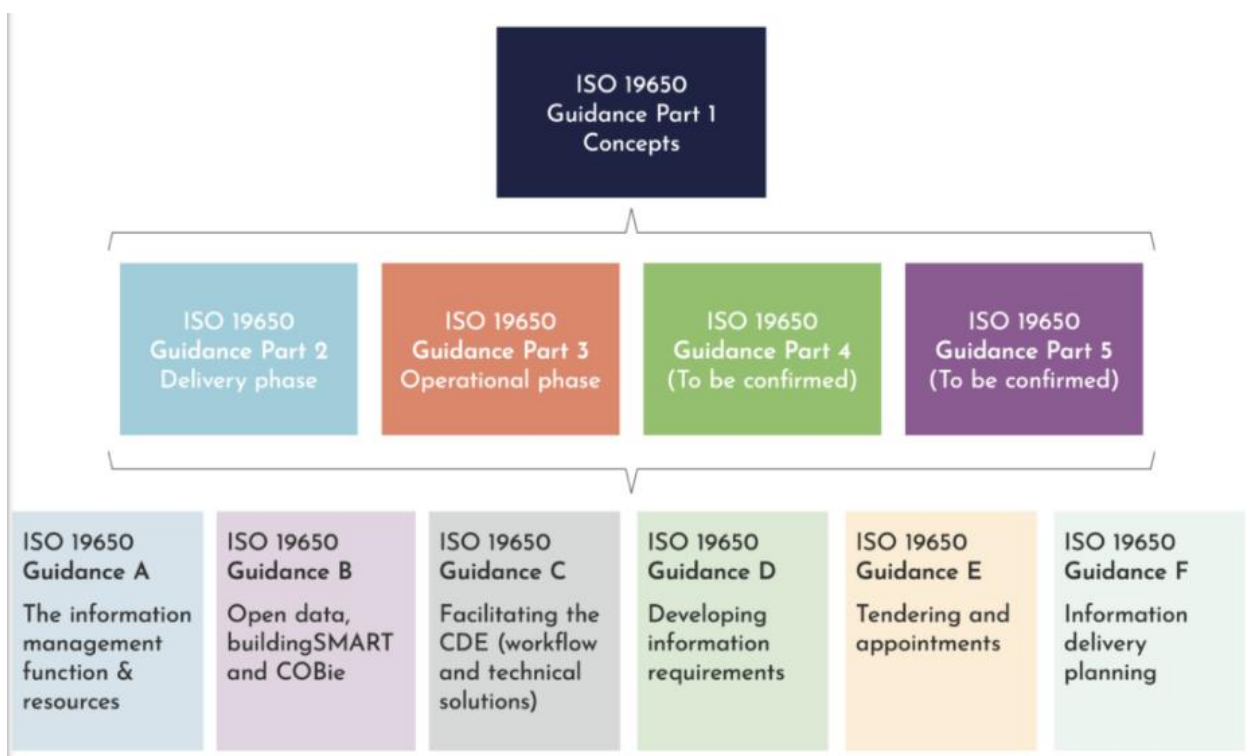


Figura 2.3 – Ilustração das partes constituintes da ISO 19650.

2.2 BUILDING INFORMATION MODEL E A MODELAÇÃO PARAMÉTRICA

O conceito BIM é uma metodologia de trabalho que tem por base a partilha contínua de informação entre os diversos intervenientes, durante todo o ciclo de vida do empreendimento, desde a sua conceção, passando pela reabilitação, até à demolição. A partilha de informação na metodologia BIM

assenta num modelo virtual do projeto. No entanto, a importância do BIM não reside no modelo 3D, mas sobretudo na informação que este contém, funcionando como um repositório central de informação. Este repositório gere toda a informação e integra todos os intervenientes, simplificando o processo de comunicação e transmissão de informação entre todos.

O BIM não só permite otimizar a comunicação entre intervenientes, mas também facilitar o acesso a toda a informação, estando atualizado e disponível aos projetistas sempre que necessário. Esta mudança de paradigma permite compreender, resolver e acompanhar complexidade e exigência dos projetos modernos com um maior rigor e celeridade.

A estrutura é modelada parametricamente, ou seja, todos os objetos possuem um conjunto de propriedades e características que o envolvem com os restantes elementos estruturais. Está inerente ao modelo paramétrico o modelo analítico. Este modelo digital vai apoiar os arquitetos, os engenheiros, e os construtores no projeto e no planeamento da construção.

Tem vindo a ser prática corrente na elaboração dos projetos a utilização conjunta de múltiplos modelos globais e locais na análise das estruturas. Estes vários modelos são desenvolvidos com um objetivo muito específico dentro do processo global de análise e dimensionamento, com recurso a ferramentas distintas. De uma forma geral, a biblioteca de programas disponível num gabinete de projetos apresenta pouca ou nenhuma interoperacionalidade entre si, resultando num processo informal de gestão do fluxo de informação. A forma mais comum de apresentação do projeto ainda é o formato CAD 2D, em que as peças desenhadas desenvolvidas são geradas de raiz sem qualquer interligação com os modelos 3D de cálculo que as suportam. Aumenta assim a necessidade de sincronização entre as diferentes plataformas, que se processa com forte dependência da componente humana (Ferreira, Lima, Rio e Poças Martins, 2012).

Nesse sentido, desde 2007, têm sido desenvolvidas ferramentas que permitem uma melhor interoperabilidade entre diferentes programas BIM e o aumento da exploração das suas potencialidades, sobretudo por parte de programadores com maior transversalidade entre especialidades de projetos. Atualmente estas ferramentas têm a função de facilitar o acesso e desenvolvimento de programas por meio de uma Interface de Programação de Aplicações – API (do inglês, *Application Programming Interface*). A principal vantagem no desenvolvimento de uma API é permitir que usuários acessem funções e peças de código para sua manipulação na criação de ferramentas ou *plug-ins* não existentes por defeito no programa, sem que se fira a propriedade intelectual do código-fonte do desenvolvedor do programa.

No presente trabalho foram utilizados programas da empresa Autodesk, nomeadamente o Robot Structural Analysis, Revit e Dynamo. O Robot foi empregado nas atividades relacionadas com modelação e análise estrutural e será mais abordado no capítulo seguinte. Para o desenvolvimento de ferramenta

de apoio à pomernorização de vigas, foram utilizados o Revit e o Dynamo, sendo este último o programa de interface com a API do Revit, ambos a serem mais explorados no Capítulo 5 deste documento.

Em resumo, o Dynamo permite uma melhor interoperabilidade entre programas de diferentes especialidades. Mais concretamente, permite o desenvolvimento de comandos e funcionalidades personalizados à forma de trabalho do utilizador e aos objetivos de projeto. Este fator dá mais liberdade à prática de projeto sem a dependência da criação, alteração ou preservação de comandos de programas de apoio ao projeto ao longo de diferentes versões no mercado. Outro exemplo de aplicação do Dynamo é na geração de geometrias complexas e parametrizadas para modelos de integração BIM e numéricos para análise estrutural. Uma das grandes vantagens de modelos com geometrias parametrizadas é permitir analisar repercussões de alterações de soluções durante fases mais iniciais de projeto com elevada agilidade.

É importante salientar que o conceito BIM não se refere apenas a uma evolução tecnológica suportada por um qualquer software mas é fundamentalmente uma alteração profunda no processo produtivo de toda a indústria da construção, nomeadamente: 1) ao nível da conceção inicial do projeto, com a possibilidade de desenvolverem múltiplos cenários a partir de variações paramétricas da conceção global, simulando de forma antecipada a influência de variáveis como a organização espacial, o desempenho energético, a morfologia estrutural, o custo, entre outros; 2) ao nível da interação e colaboração entre os diversos intervenientes do processo, com a possibilidade de implementação de plataformas de trabalho colaborativo quer dentro de uma dada especialidade do projeto, quer de uma forma interdisciplinar; 3) ao nível da forma como a própria construção se processa, nomeadamente no que diz respeito à preparação e fabrico de subcomponentes da construção geral; 4) ao nível da exploração e gestão da obra construída com a utilização de modelos virtuais onde são registadas todas as ocorrências relevantes ao longo do ciclo de vida da estrutura ou estrutura (Ferreira, Lima, Rio e Poças Martins, 2012).

No âmbito do projeto de estruturas existem três campos principais para a implementação de um processo BIM (ver Figura 2.4) designadamente, a coordenação interdisciplinar, a análise e dimensionamento de estruturas e a documentação do projeto (Ferreira, Lima, Rio e Poças Martins, 2012).

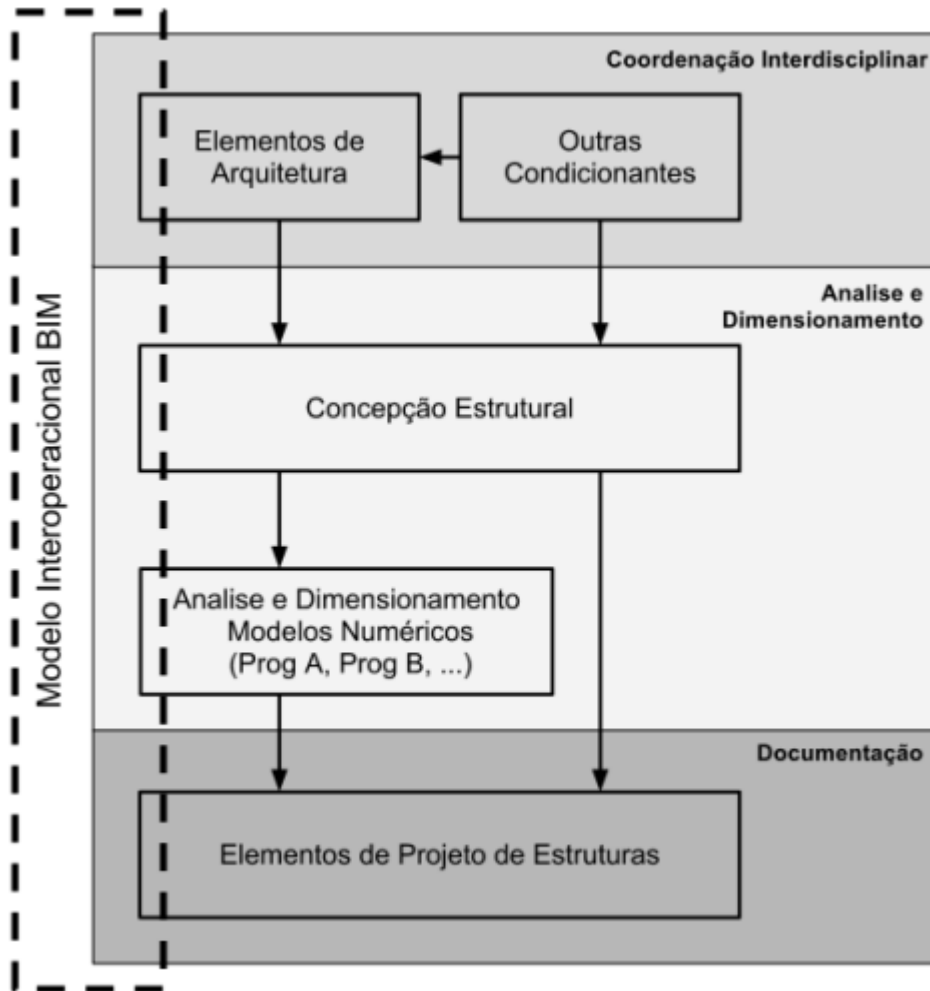


Figura 2.4 – Esquema de integração de modelos BIM no projeto de estruturas (Ferreira, Lima, Rio e Poças Martins, 2012).

Ao nível da coordenação interdisciplinar a adoção de um processo BIM permite um ganho de eficiência face às práticas correntes por duas vias: (1) desenvolvimento e utilização de famílias de software comercial que contenham funções colaborativas que permitam, por exemplo, a partilha de modelos de trabalho atendendo a um conjunto de permissões dadas a cada interveniente e; (2) o desenvolvimento e utilização de plataformas abertas para a troca de modelos (projetos) completos, em que cada interveniente contribui para a construção de um modelo global que incorpora um conjunto alargado de informação. A documentação do projeto é porventura o domínio de aplicação do processo BIM onde os benefícios imediatos a obter pelos projetistas são mais evidentes (Ferreira, Lima, Rio e Poças Martins, 2012).

No presente trabalho a ferramenta de apoio ao projeto está inserida, no contexto da Figura 2.4, no grupo de Documentação, utilizando como entradas as informações em folha de cálculo de

dimensionamento de vigas em betão armado e os respectivos elementos modelados em ambiente BIM a serem pormenorizados. A Figura 2.5 ilustra a representação da programação visual disponível no Dynamo e geometrias geradas em seu ambiente que são modeladas no Revit.

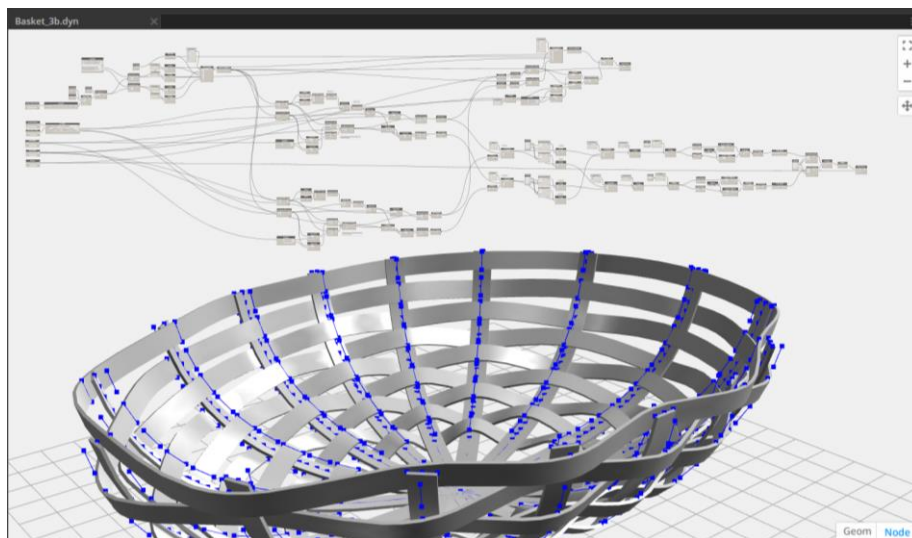


Figura 2.5 – Exemplo de Geometria complexa modelada com auxílio de programação visual (Fonte: dynamobim.org).

CAPÍTULO 3

MODELAÇÃO E ANÁLISE DO EMBOQUILHAMENTO DE UM TÚNEL

3.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo é dedicado à análise do comportamento do emboquilhamento de um túnel, com recurso a um modelo tridimensional baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) desenvolvido para o efeito. A análise dos resultados deste modelo permitiu validar outras soluções encontradas para esta estrutura.

Atendendo à sua relevância para o cálculo dos esforços na estrutura, apresenta-se o método construtivo adotado. Seguem-se depois uma descrição das etapas de modelação geométrica da estrutura, a quantificação e modelação de ações no modelo. O capítulo termina com uma análise estrutural, tendo por base os resultados de esforços encontrados, e tecem-se algumas considerações sobre as disposições regulamentares.

3.2 DESCRIÇÃO GERAL DA ESTRUTURA

A travessia ferroviária da zona montanhosa de Divača na Eslovénia, conduziu à conceção de um túnel com uma secção transversal corrente que na base tem 5,80m de largura e um arco de raio variável, sendo de 3,70 m o troço centrado no coroamento (ver Figura 3.1).

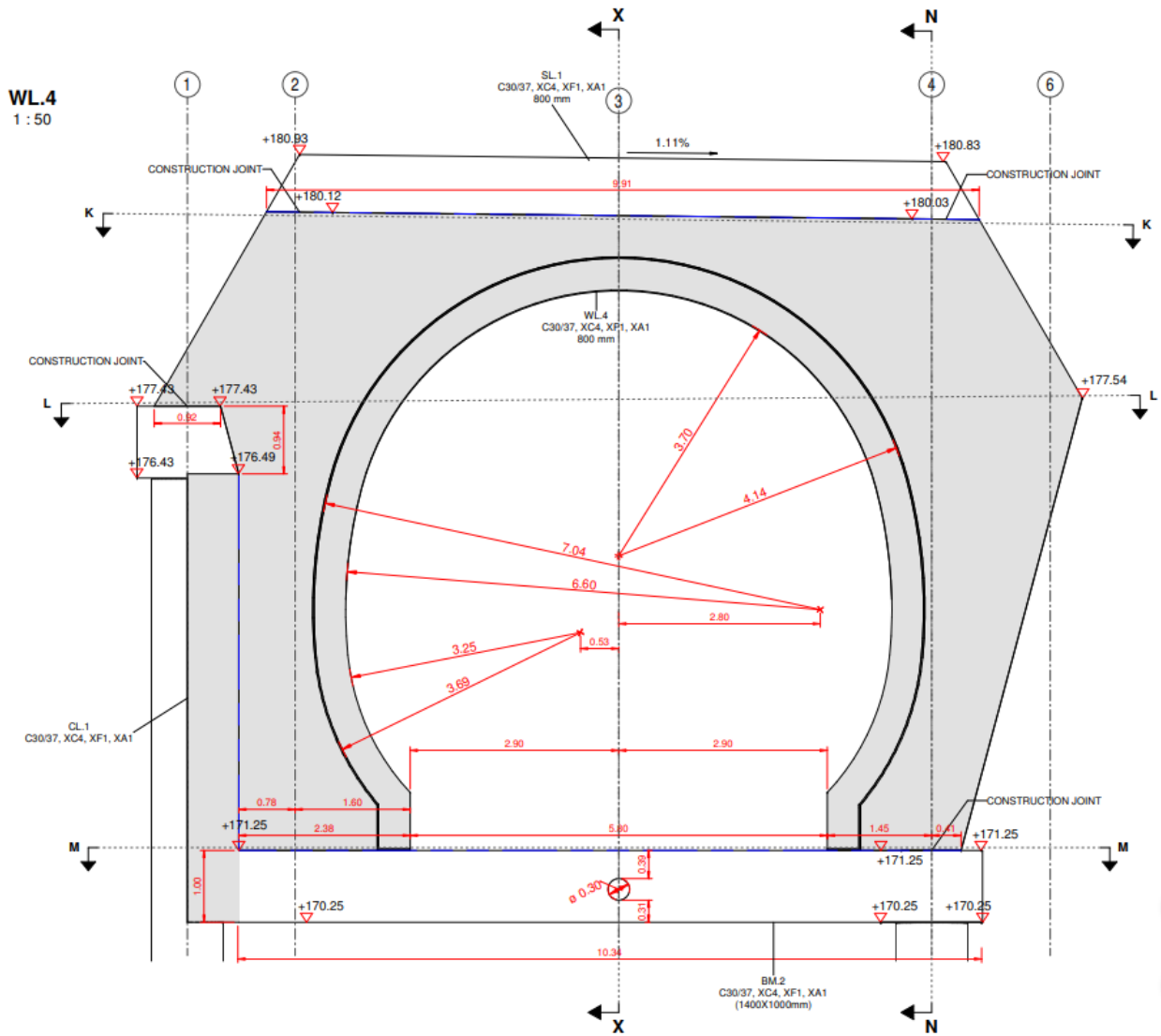


Figura 3.1 – Secção transversal do túnel e alçado do tímpano.



Figura 3.2 – Antevisão do emboquilhamento do do túnel.

A Figura 3.2 ilustra a estrutura que marcará a saída do túnel, estando assinalada a subestrutura que se designa por emboquilhamento. Consiste em dois pares de paredes estruturais inclinadas, fundadas em dois alinhamentos paralelos de estacas (ver Figura 3.1), uma laje superior e uma parede estrutural vertical com a abertura que delimita o gabarito geométrico de passagem dos comboios, também denominada tímpano. Este tímpano apoia-se linearmente sobre uma viga (BM2, em branco na Figura 3.1), que por sua vez é suportada por cada estaca inicial. Cada um dos dois alinhamentos de estacas são agrupados por uma viga de coroamento que também promove adequada interface entre as paredes e suas estacas de fundação.

O tímpano tem aproximadamente 8,80m de altura, sua viga de apoio 1,0m, totalizando 10,60m de altura do emboquilhamento. A abertura de gabarito geométrico no tímpano é constituída por três diferentes raios associados a cinco segmentos de arco, conforme também pode-se observar na Figura 3.1.

Todas as paredes e a laje superior têm 80cm de espessura e as estacas 1,00m de diâmetro, espaçadas a cada 2,00m em cada alinhamento. Todos os elementos estruturais foram projetados em betão armado, sendo o betão da classe C30/37 e o aço da classe S500. O par de paredes estruturais laterais do emboquilhamento é representado nas Figura 3.3 e Figura 3.4.

3.3 MÉTODO CONSTRUTIVO “CUT AND COVER”

A técnica "cut and cover" já é internacionalmente consolidada e recorrente na construção de túneis rodoviários e ferroviários. O método "cut and cover" é usado, entre outras situações, na execução de estações de metro em área urbana, e também em projetos de transporte interurbano, na construção de rodovias e de túneis ferroviários relativamente curtos e pouco profundos. Ultimamente, o método tem sido adequadamente adaptado para facilitar a construção de emboquilhamentos de túneis. (Mouratidis, 2008)

O conceito básico do método é na execução de paredes laterais de perímetro de trabalho na estrutura e adicionar uma laje superior ou inferior que garante condições de escavação e progresso da execução da estrutura. Esta técnica envolve escavação escalonada e implementação de suporte por meios de paredes provisórias e sistemas de contraventamento de modo a suportar os taludes de escavação. A Figura 3.6 representa hipóteses de cortes e de estabilização de taludes no método "cut and cover" para a execução de túneis.

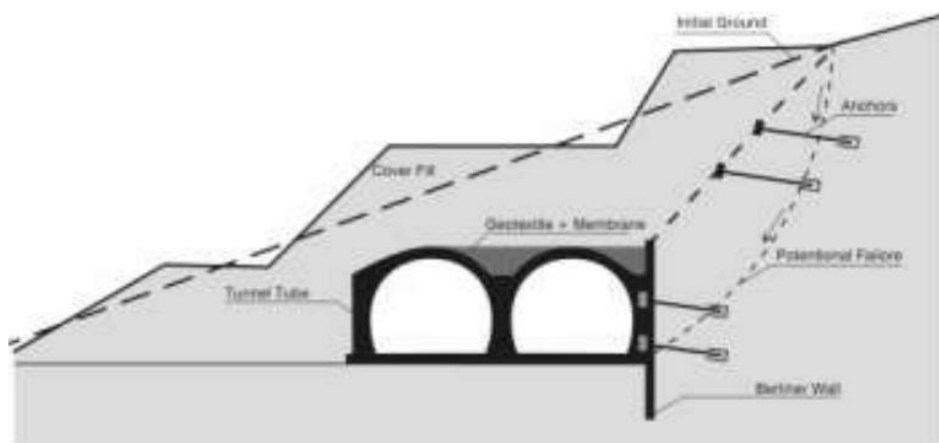


Figura 3.6 – Hipóteses de cortes e de estabilização de taludes no método “cut and cover” em túneis (Mouratidis, 2008).

Em casos de condições geotécnicas extremamente adversas, um reforço prévio pode ser necessário, a fim de minimizar ou evitar problemas de estabilidade durante a fase de escavação. Portanto, técnicas como muros de berlim, pregagens e ancoragens tornaram-se uma prática comum do método “cut and cover”. (Mouratidis, 2008)

Uma vez atingido o nível da fundação, inicia-se a betonagem do túnel, que será seguida por impermeabilização e aterro. Frequentemente uma cortina de estacas combinadas com ancoragens ou paredes de berlim pode ser necessária para garantir contenção lateral à escavação vertical, conforme a Figura 3.7. Note-se que este é um elemento associado ao modelo numérico desenvolvido durante este trabalho.

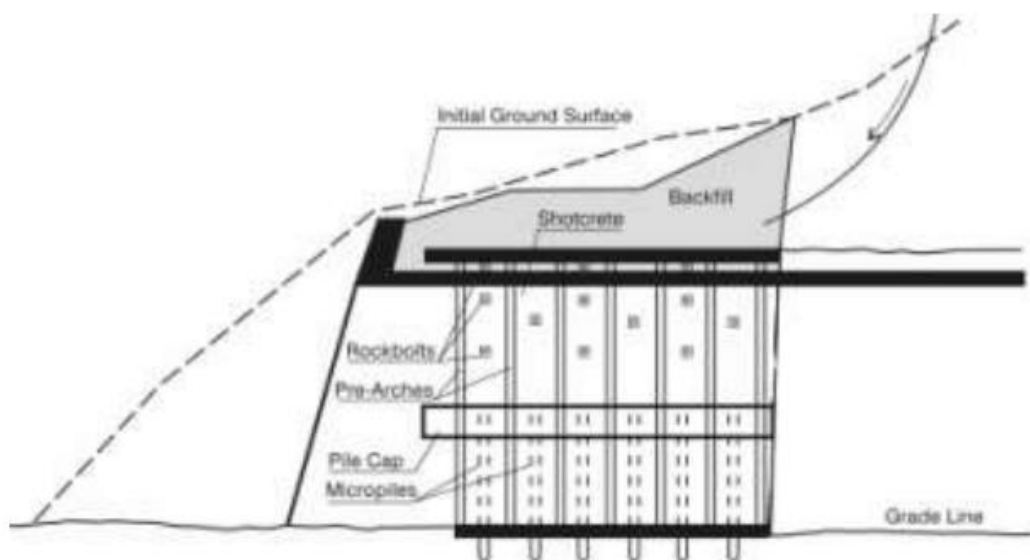


Figura 3.7 – Cortina de estacas associada a estrutura de túnel executada pela técnica “cut and cover” (Mouratidis, 2008).

Mais especificamente, o método “cut and cover” é viável e apresenta vantagens quando:

- O perfil geológico durante escavação subterrânea inicial puder gerar instabilidade nas aberturas;
- Deslizamentos controlados ou quedas de rochas são expectáveis sobre os emboquilhamentos independente da qualidade do corpo rochoso;
- São possíveis ocorrências de condições geotécnicas fracas ou deslizamentos laterais devido à orientação desfavorável de descontinuidades.

A Figura 3.8 e a Figura 3.9 representam, respetivamente, a aplicação desta técnica construtiva na execução de emboquilhamentos, como os de túneis, e as condições geotécnicas que justificam a aplicação da técnica nessas estruturas.

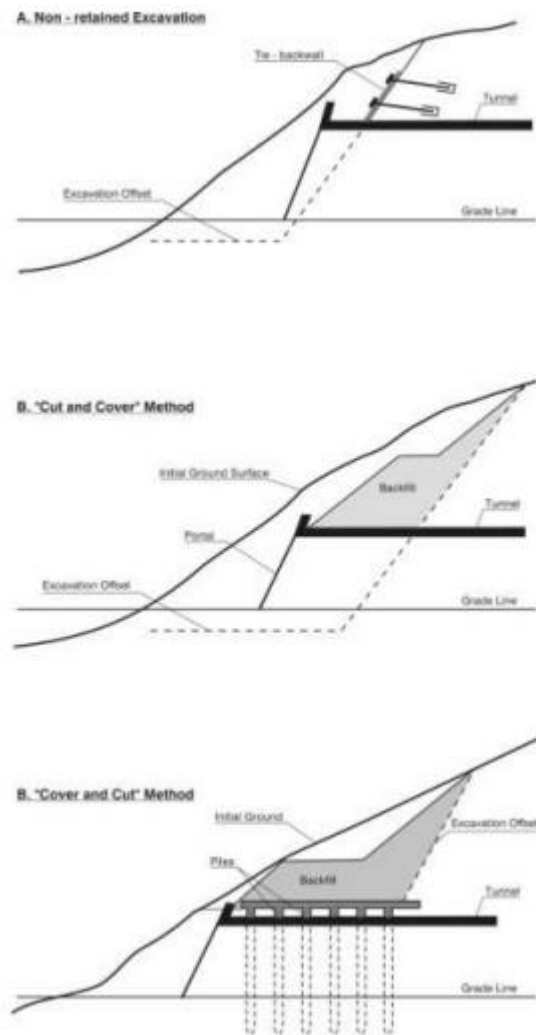


Figura 3.8 – Método “Cut and cover” e variação “Cover and cut” aplicado à execução de emboquilhamentos de túneis (Mouratidis, 2008).

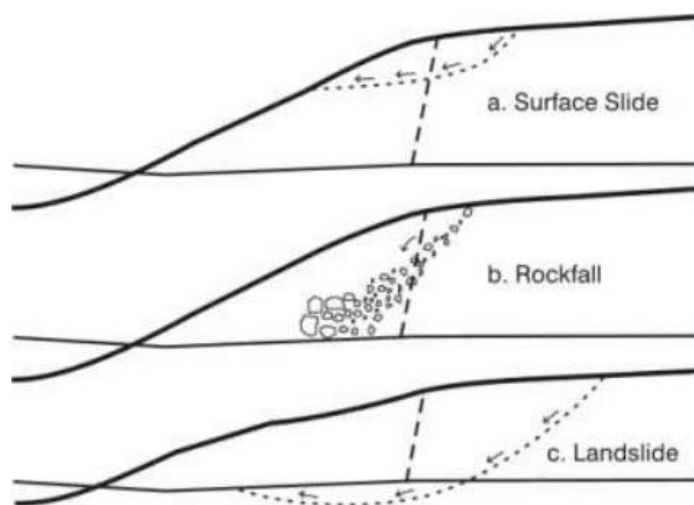


Figura 3.9 – Riscos de falhas geotécnicas em emboquilhamentos de túneis (Mouratidis, 2008).

3.4 REQUISITOS DE RESISTÊNCIA E SERVIÇO DA ESTRUTURA

3.4.1 Normas técnicas e bases para projeto

O projeto e as modelações e análises tomaram por base os Eurocódigos, nomeadamente:

- EN1990: Bases para o projeto de estruturas (EC0);
- EN 1991: Acções em estruturas (EC1);
- EN 1992: Projeto de estruturas de betão (EC2);
- EN 1993: Projeto de estruturas metálicas (EC3);
- EN 1994: Projeto de estruturas mistas aço-betão (EC4);
- EN 1997: Projeto geotécnico (EC7);
- EN 1998: Projeto de estruturas para resistência aos sismos (EC8).

Foi também considerado, para quantificação das pressões positivas e negativas sobre os elementos estruturais de superfície, a norma *Deutsche Bahn Regulation DB-Rail-853-2014*, bem como considerações de Anexos Nacionais da Eslovênia. Foi também referenciada a DIN FB 101 ao ter em atenção a perda de rigidez do betão no tempo infinito. A Tabela 3-1 **Error! Reference source not found.** representa os diferentes elementos em betão e algumas características associadas.

Tabela 3-1 – Propriedades do betão adotadas em projeto.

Betão	Classe (Horizonte de projeto de 100 anos)	Resistência característica à compressão corpo cilíndrico aos 28 dias [N/mm ²]	Máxima dimensão do agregado [mm]	Classe de Exposição (de acordo com tabela 401 EN 1992-1-1)	Classe de Cloretos (máximo teor de cloretos no betão, de acordo com tabela 10 EN206)	Recobrimento Mínimo [mm] (Horizonte de projeto de 100 anos)
Estrutural para pilares	C30/37	30	16	XF1, XC4, PV-II	Cl 0.40	50
Estrutural para lajes e vigas	C30/37	30	16	XF1, XC4, PV-II	Cl 0.40	50

Estrutural para paredes de contenção	C30/37	30	32	XF1, XC4, PV-II	CI 0.40	50
Laje intermediária	C30/37	30	32	XC2, XA1, PV-I	CI 0.40	50
Fundações rasas	C30/37	30	32	XC2, XA1, PV-I	CI 0.40	50
Estacas	C30/37	30	32	XC2, XA1, PV-II	CI 0.40	75
Betão de limpeza	C30/37	16	12	X0	CI 1.00	-

Foram utilizadas como base normativa de pormenorização o preconizado nas EN 1990, EN 1992 e EN 1998, e a norma britânica BS 8666:2005. Os diâmetros de mandril adotados foram os valores mínimo apresentados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 – Quadro 8.1N da EN 1992 1-1.

<i>Diâmetro do varão</i>	<i>Diâmetro mínimo do mandril para cotovelos, ganchos e laços (ver a Figura 8.1)</i>
$\phi \leq 16 \text{ mm}$	4ϕ
$\phi > 16 \text{ mm}$	7ϕ

3.4.2 Princípio de projeto por Estados-Limite

Estados-Limite são associados a situações de projeto. Estas situações podem ser classificadas como permanentes, variáveis ou acidentais, aplicadas de acordo com o os Estados-Limite Último e Estado-Limite de Utilização.

3.5 MODELO NUMÉRICO

3.5.1 Modelação geométrica

Para a análise estrutural foi utilizado o programa de cálculo assistido *Robot Structural Analysis*, com algoritmos baseados no método dos elementos finitos (MEF). Algumas representações gráficas do modelo podem ser visualizadas na presente secção, bem como aspectos da modelação desta estrutura de emboquilhamento.

No total foram modeladas, em termos de tipos de elementos estruturais do Robot, um elemento de laje, quatro paredes estruturais, três vigas e elementos de pilares como representação das estacas. As paredes e a laje, sendo elementos de superfície no modelo numérico, foram modeladas como painéis a partir de seus vértices e dos nós extremos dos elementos lineares. Das três vigas, duas foram discretizadas ao longo de seus comprimentos de acordo com os nós de interface com as estacas que coroam, e uma de acordo com a interface com o tímpano. A Figura 3.10 ilustra a geometria da estrutura modelada.

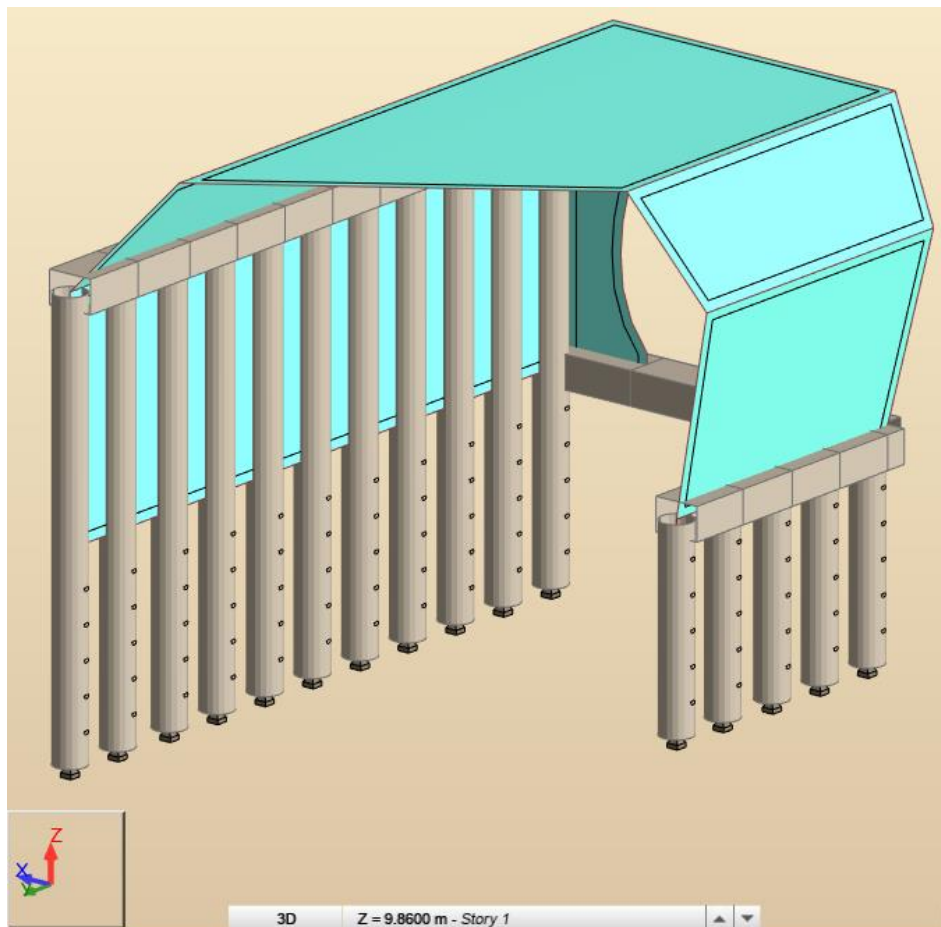


Figura 3.10 – Representação da geometria da estrutura modelada.

O tímpano foi modelado como uma parede estrutural sendo, portanto, um elemento de superfície delimitado por um polígono plano com propriedades de resistência e espessura constante associada (0,80m). O programa de cálculo somente admite troços retos ao declarar um elemento estrutural, de maneira que a geometria do gabarito geométrico foi discretizada em troços de 30cm de comprimento previamente no programa AutoCAD e importada no Robot. A Figura 3.11 representa a parede estrutural modelada como representação do tímpano.

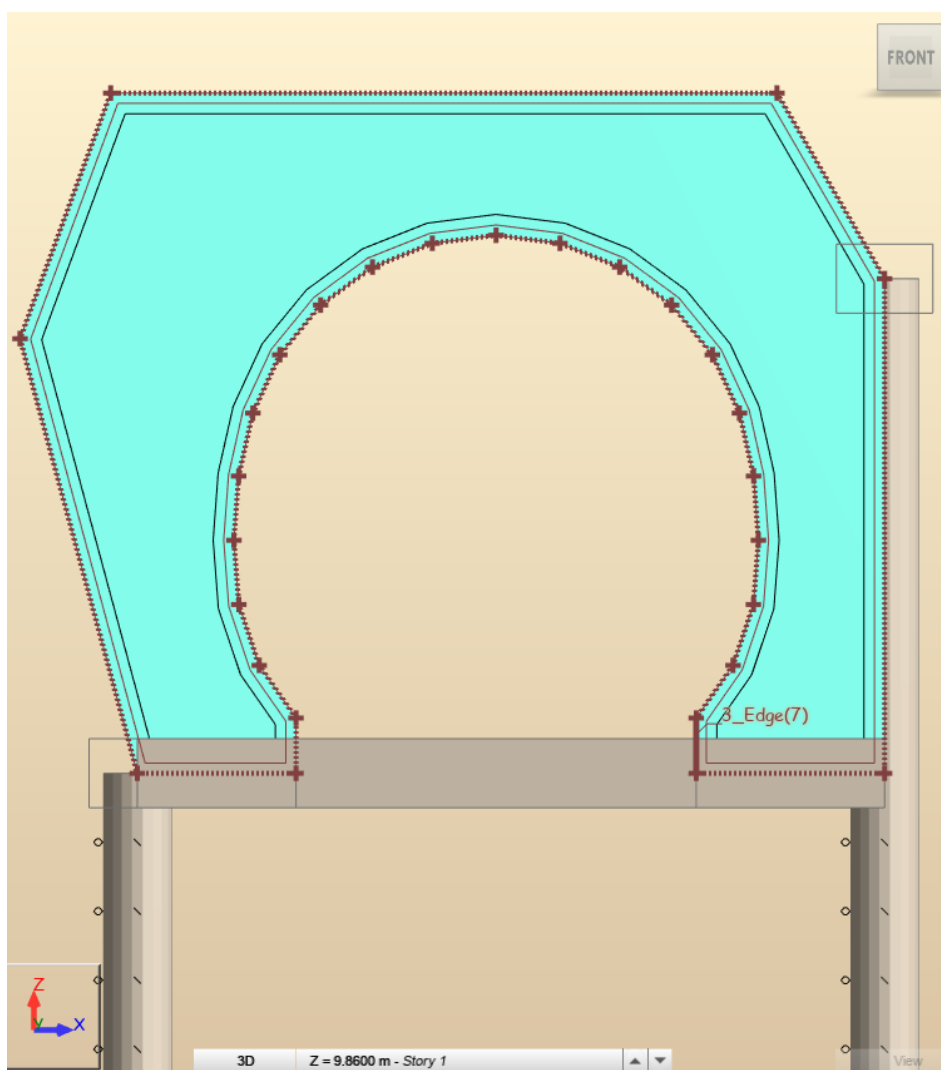


Figura 3.11 – Vista frontal do tímpano.

Para a adequada consideração da interação solo-estrutura nas estacas, estas foram modeladas como possuindo apoios que impedem as três translações e permitem as três rotações, para efeito de ponta, e apoios elásticos nas duas direções perpendiculares ao eixo da estaca, afastados entre si de 1,00m ao longo

do seu fuste, conforme se ilustra na Figura 3.12. Note-se que as estacas estão representadas como elementos lineares.

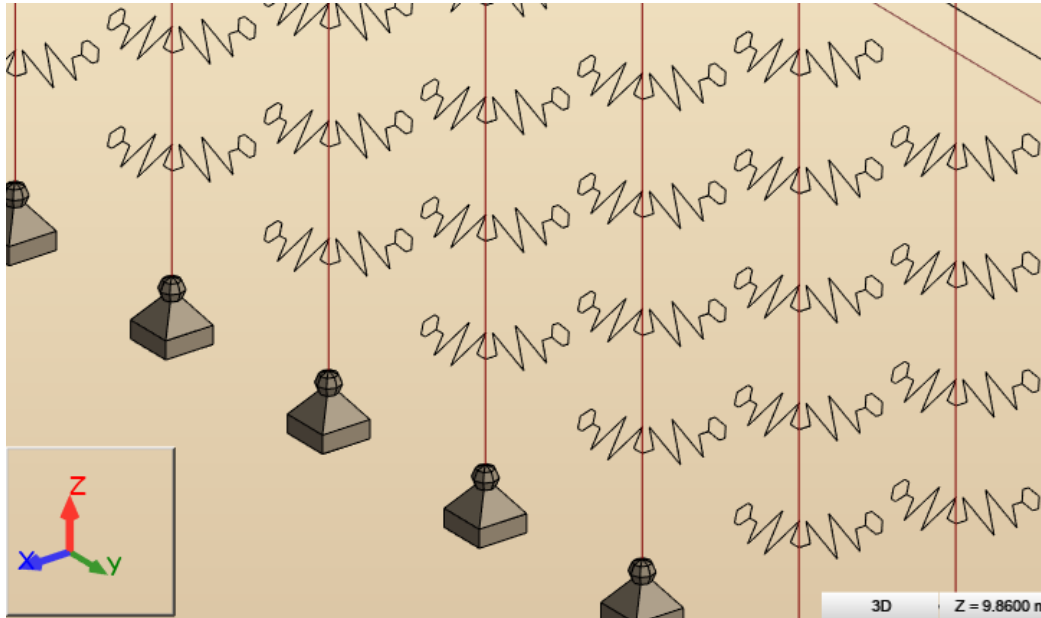


Figura 3.12 – Apoios associados às estacas no modelo numérico

A Figura 3.13 ilustra duas perspectivas da malha de elementos finitos desenvolvida. Neste modelo, um aspecto importante considerado foi a coesão dos nós analíticos definidos no modelo. Esta coesão pode ser avaliada através de erros no programa provenientes de avaliação automática de estabilidade de cada nó analítico (translações e rotações de cada elemento finito) ou através da detecção pelo usuário de zonas de alta concentração de nós na geração assistida de malhas. Foi adotado por base uma solução de malha predominantemente quadrada, com ajustes triangulares nos bordos de acordo com o necessário. Foi tido em atenção que elementos de superfície adjacentes devem ter malhas cujos nós analíticos de suas arestas comuns sejam congruentes e compartilhados. A Figura 3.13 b) detalha a malha de elementos finitos na zona do tímpano do emboquilhamento. Note-se que a malha do tímpano foi gerada com orientação de acordo com uma das paredes à qual está associada e não necessariamente na vertical.

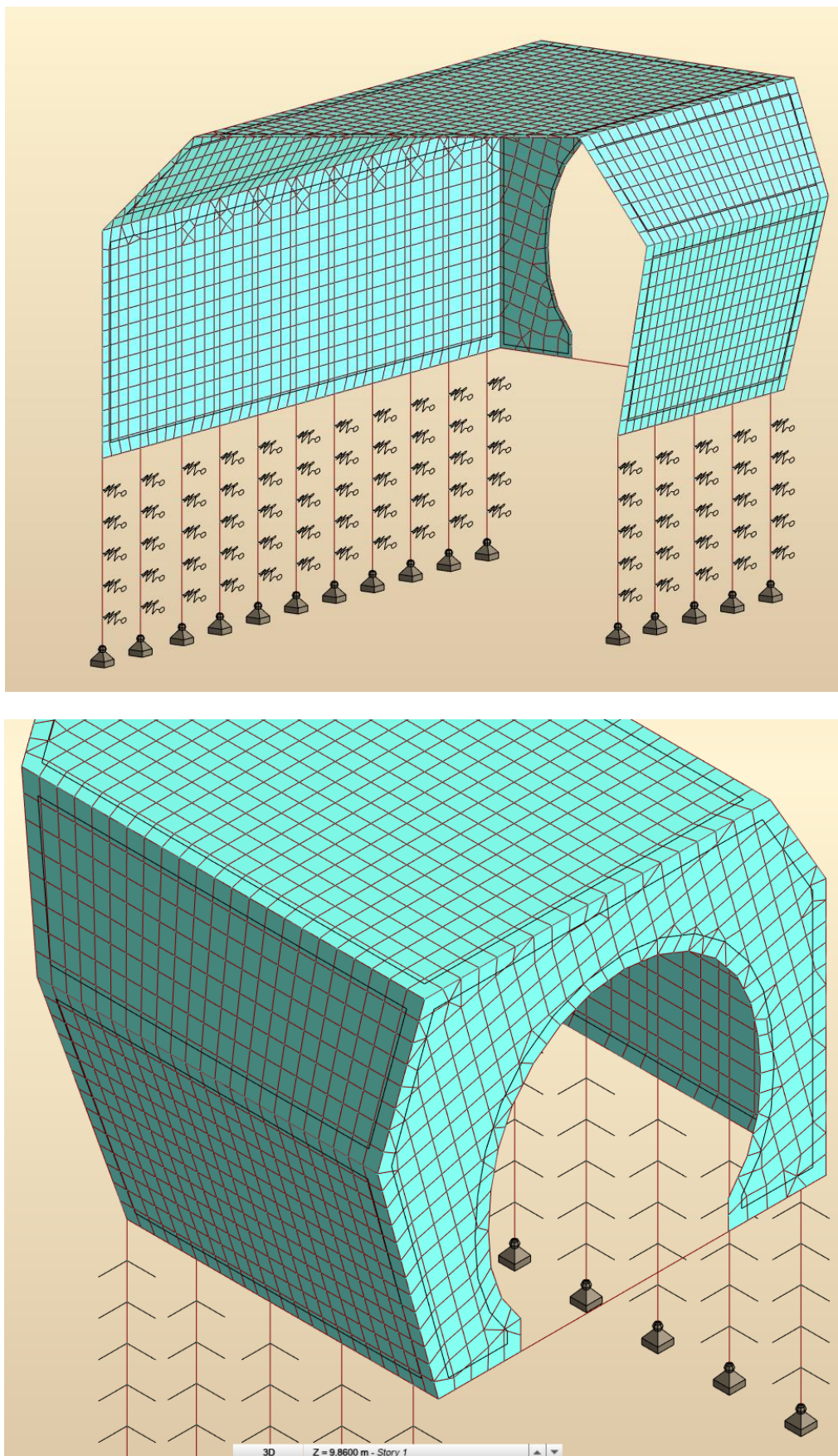


Figura 3.13 – a) Visualização do modelo e suas malhas de elementos finitos; b) Vista aproximada do modelo.

3.6 QUANTIFICAÇÃO DE AÇÕES

Na presente análise foram contempladas como ações permanentes o peso próprio, o peso e o impulso do solo, a ação devida à neve, de entre outras. Como ações variáveis foram consideradas a sobrecarga regulamentar, a pressão e a sucção devidos à passagem de comboios e a carga devida à operação de um rolo vibradora usar na compactação do solo. Também foram consideradas a ação térmica, a ação sísmica e as ações reológicas devidas à retração e à fluência do betão. Seguem considerações acerca da quantificação das ações consideradas no modelo numérico.

3.6.1 Ações permanentes e sobrecargas

Foi considerado o peso-próprio dos elementos estruturais considerando o peso específico do betão armado de 25 kN/m^3 , do betão simples de 24 kN/m^3 , do aço de $7850 \text{ kg/m}^3 \approx 77 \text{ kN/m}^3$ e o do solo de 21 kN/m^3 (material reaproveitado para aterro).

As restantes cargas permanentes consistem nas cargas permanentes associadas a revestimentos e acabamentos como de tetos, serviços, paredes e todas as outras construções permanentes além do peso-próprio, com exceção das cargas devido ao solo.

As sobrecargas consistem nas cargas variáveis associadas com o uso da estrutura. Foi considerada uma sobrecarga adicional equivalente a um rolo vibrador (VDM70) a atuar na laje superior. A ação de 22 kN foi modelada como dois alinhamentos paralelos de cargas lineares constantes, referentes ao contacto das rodas do equipamento. Para obtenção de uma envolvente de esforços mais completa, foram considerados casos de carga no modelo em diferentes posições críticas, nomeadamente a meio vão e sobre bordos da laje superior.

Com apoio do departamento de geotecnia da empresa foram determinados parâmetros geotécnicos e quantificadas as ações verticais e laterais provenientes da presença do terreno. A Figura 3.14 representa os pesos e os impulsos do solo considerados. A tabela 3-4 apresenta os parâmetros geotécnicos adotados na quantificação destas ações.

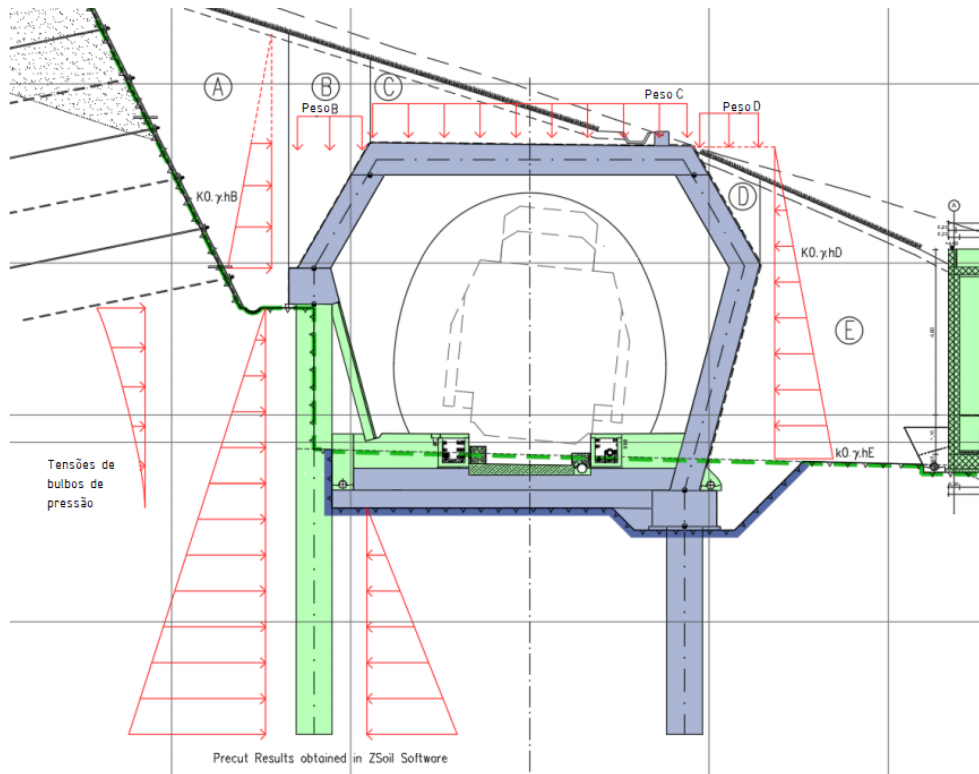


Figura 3.14 – Impulsos e pesos do solo considerados no cálculo.

Tabela 3-3 – Parâmetros geotécnicos.

Parâmetros geotécnicos do solo de aterro	
v	0.30
c	0
ϕ	35°
γ	21 kN/m ³
E	30 MPa
K0	0.43

A Figura 3.15 pormenoriza a modelação do peso do solo sobre a laje de topo e sobre uma das paredes laterais.

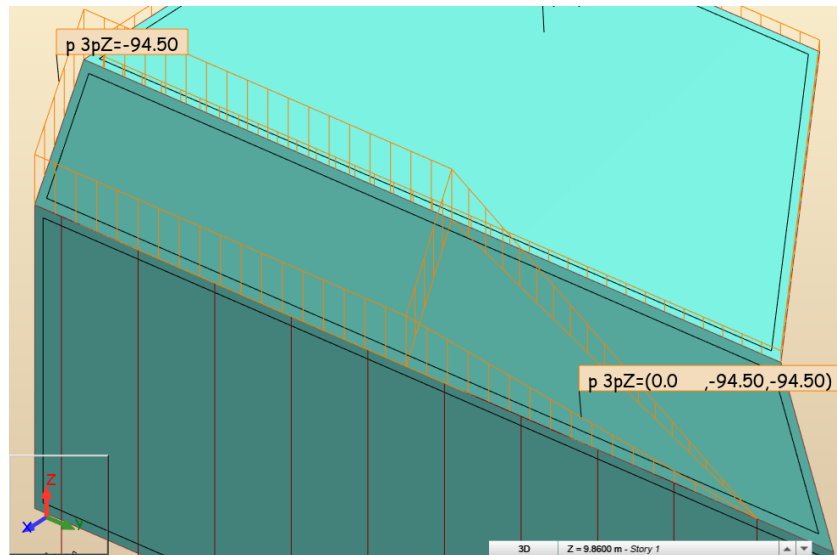


Figura 3.15 – Representação visual de peso de terras modelada.

Para contabilização dos impulsos devido a bolbo de tensões proveniente de cargas aplicadas no terrapleno, em zona próxima da estrutura analisada, recorreu-se a estudos anteriores no projeto. A **Error! Reference source not found.** representa modelo de visualização da ação devido a bolbos de tensão e a Tabela 3-4 apresenta cálculos auxiliares realizados para quantificação da ação modelada enquanto na **Error! Reference source not found.** se dá o significado às variáveis utilizadas. Admitiu-se uma variação polinomial de segundo grau de suas tensões inversamente proporcionais à profundidade da camada de solo, obtendo-se um valor máximo de 93,45kPa.

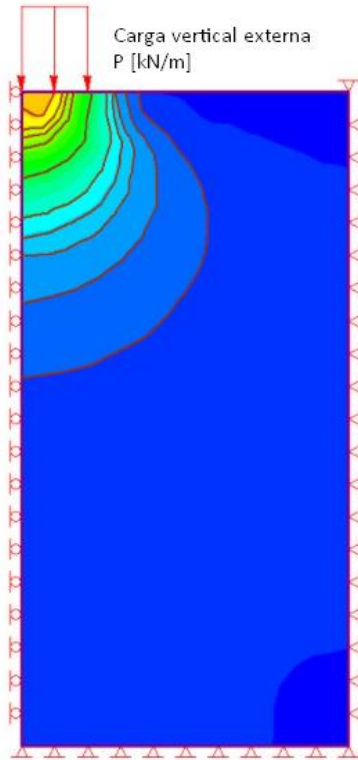


Figura 3.16 – Isolinhas de bolbos de tensão no solo devido a carga vertical externa.

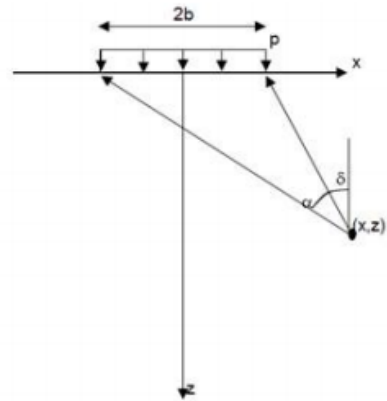
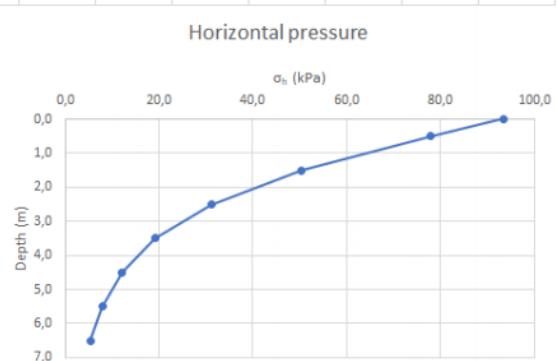


Figura 3.17 – Variáveis usadas no cálculo de tensões horizontais.

Tabela 3-4 – Quantificação de tensões horizontais no solo devido a carregamentos verticais externos.

Earth Pressure due to Uniform Surface Load - Elastic and Homogenous Material							
Δq_z (kPa) =	186,9	$\nu =$	0,3				
b (m) =	1,88						
x (m) =	1,88						
z (m)	α (rad)	δ (rad)	$\Delta\sigma_z$ (kPa)	$\Delta\sigma_x$ (kPa)	$\Delta\sigma_y$ (kPa)	$\Delta\tau_{xz}$ (kPa)	
0,0	1,6	0,0	93,450	93,450	56,070	59,492	
0,5	1,4	0	93,359	77,811	51,351	58,458	
1,5	1,2	0	91,342	50,392	42,520	51,324	
2,5	1,0	0	85,971	31,112	35,125	41,254	
3,5	0,8	0	78,525	19,185	29,313	31,874	
4,5	0,7	0	70,682	12,137	24,846	24,459	
5,5	0,6	0	63,392	7,958	21,405	18,948	
6,5	0,5	0	56,985	5,414	18,720	14,916	



Para consideração da interação solo-estrutura, foi utilizado o programa Zsoil pelo departamento geotécnico, o que permitiu quantificar tensões no solo e calcular as ações atuantes nas estacas em fases construtivas anteriores ao corte do solo adjacente à estrutura. Dado o perfil de solo constituído por uma areia compacta, atravessada por camada rochosa fraturada, os impulsos sobre as estacas aumentam em profundidade até ao patamar de 239kN/m, conforme se ilustra na Figura 3.18.

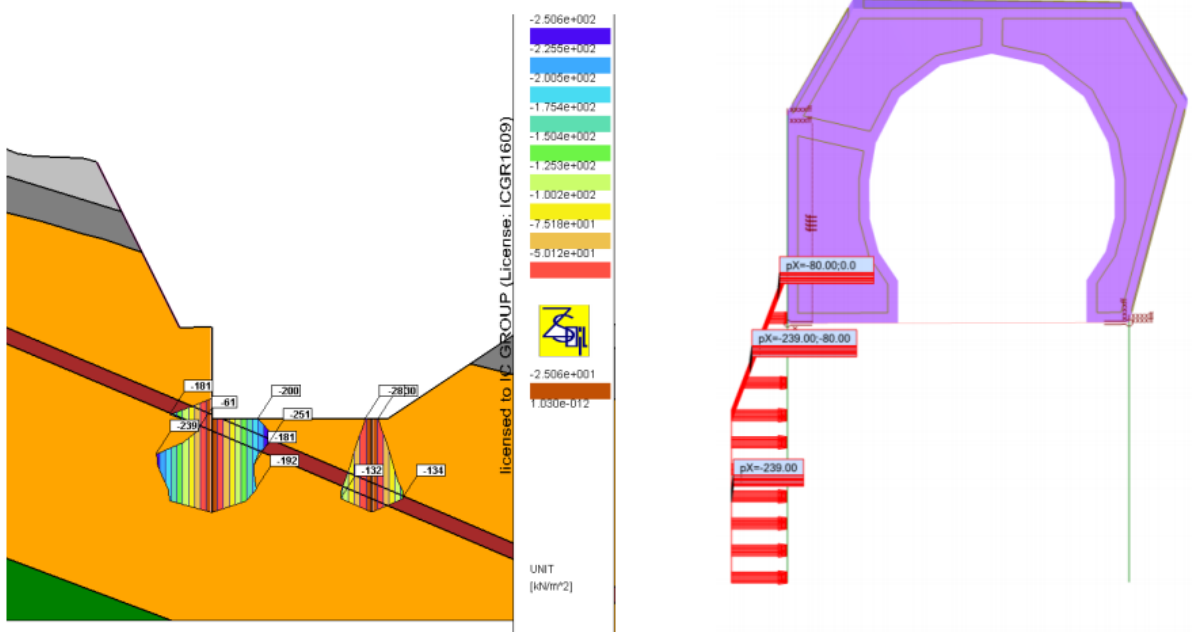


Figura 3.18 – Quantificação e modelação dos impulsos horizontais nas estacas devido ao solo arenoso.

3.6.2 Sucção e pressão devido à passagem do comboio

Como preconizado na norma adotada *Deutsche Bahn Regulation DB-Rail-853-2014*, foram consideradas sobrecargas adicionais devidas a efeitos de movimento do comboio. Cargas de pressão e de sucção são estipuladas de acordo com as dimensões da secção transversal do túnel e a velocidade de referência de trânsito, conforme a Tabela 3-5.

Tabela 3-5 – Valores de referência de pressão e sucção devido à passagem do comboio.

Tunnelquerschnittsfläche A_{tu} [m ²]	Geschwindigkeit V_{tr} [km/h]	Maximaler Druckanstieg Δp [kPa]	Maximale Druckabsenkung Δp [kPa]
50	160	2,3	2,2
	200	3,4	3,3
	230	4,4	4,3
60	160	1,7	1,8
	200	2,6	2,8
	230	3,3	3,6
	250	3,3	3,8
	280	4,0	4,6
	300	4,6	5,3

3.6.3 Ação sísmica

A EN 1998 contempla e preconiza diferentes métodos de análise sísmica, de acordo com a regularidade geométrica da estrutura, de entre outros fatores. Os métodos incluem a obtenção de acelerações do solo em diferentes direções, um ou mais períodos fundamentais, correlacioná-los com outros fatores para se chegar a uma aceleração atuante de cálculo na estrutura, que será utilizada para explorar resultados de deformadas e esforços para verificação à segurança face à capacidade resistente da estrutura com grandezas estáticas equivalentes. O sismo pode ser representado por acelerações na base do mesmo, provenientes e calculadas a partir das atividades geológicas que os geram e as condições ambientais que os afetam. De acordo com o item 4.3.3.5.2 da EN 1998 não foi considerada a componente vertical (Z) de mobilização da massa. Para simplificação das análises, foi adaptada metodologia da EN 1998 aplicável a edifícios para a estrutura de emboquilhamento modelada. Isto gera imperfeições de resultados que podem ser calibradas e afetam critérios como regularidade em planta, graus de liberdade analisados (somente um piso).

Espectro de Resposta Regulamentar

Para projeto, a EN 1998 fornece dados para geração do espectro de projeto para análise elástica, que resulta do espectro de resposta elástico, dividido pelo coeficiente de comportamento q , calibrado para 5% de amortecimento. Este espectro é calculado para combinações do estado limite último, respeitando exigências como a limitação de danos (DLR), entre outras. Foi levantada informação referente à caracterização sísmica da Eslovénia para cálculo do espectro de cálculo.

Para os referidos parâmetros de entrada, obtém-se o espectro de resposta característico para um tipo de sismo de acordo com as equações e domínios a seguir:

$$0 \leq T \leq T_B : \quad S_e(T) = a_g \times S \times \left[1 + \frac{T}{T_B} \times (\eta \times 2.5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : \quad S_e(T) = a_g \times S \times [\eta \times 2.5]$$

$$T_C \leq T \leq T_D : \quad S_e(T) = a_g \times S \times \left[\eta \times 2.5 \times \frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : \quad S_e(T) = a_g \times S \times \left[\eta \times 2.5 \times \frac{T_C T_D}{T} \right]$$

Em que:

$S_e(T)$ – Espectro de resposta elástica;

T – Período de vibração de um sistema linear com um grau de liberdade;

a_g – Valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno do tipo A ($a_g = \gamma_I \times a_{gr}$);

T_B – Limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante;

T_C – Limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante;

T_D – Valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante;

S – Coeficiente do solo;

η – Coeficiente de correção do amortecimento, com o valor de referência $\eta = 1$ para 5% de amortecimento

O coeficiente de comportamento da estrutura é aplicado na obtenção dos espectros de cálculo. Outras incógnitas relacionadas com este espectro como, o tipo estrutural e a classe de ductilidade serão abordadas adiante, com exceção à regularidade geométrica. A classe de ductilidade traduz a capacidade de dissipação histerética da estrutura e interfere consideravelmente no coeficiente de comportamento; a regularidade em planta depende de, entre outros fatores, do grau de simetria dos elementos estruturais, da relação entre as áreas dos pisos e suas respectivas poligonais convexas, bem como do sistema estrutural implementando.

Foi considerado o mapa sísmico de acelerações ilustrado na Figura 3.19. A aceleração de pico de referência (a_{gR}) considerada foi de $0,15g \sim 1,50m/s^2$.

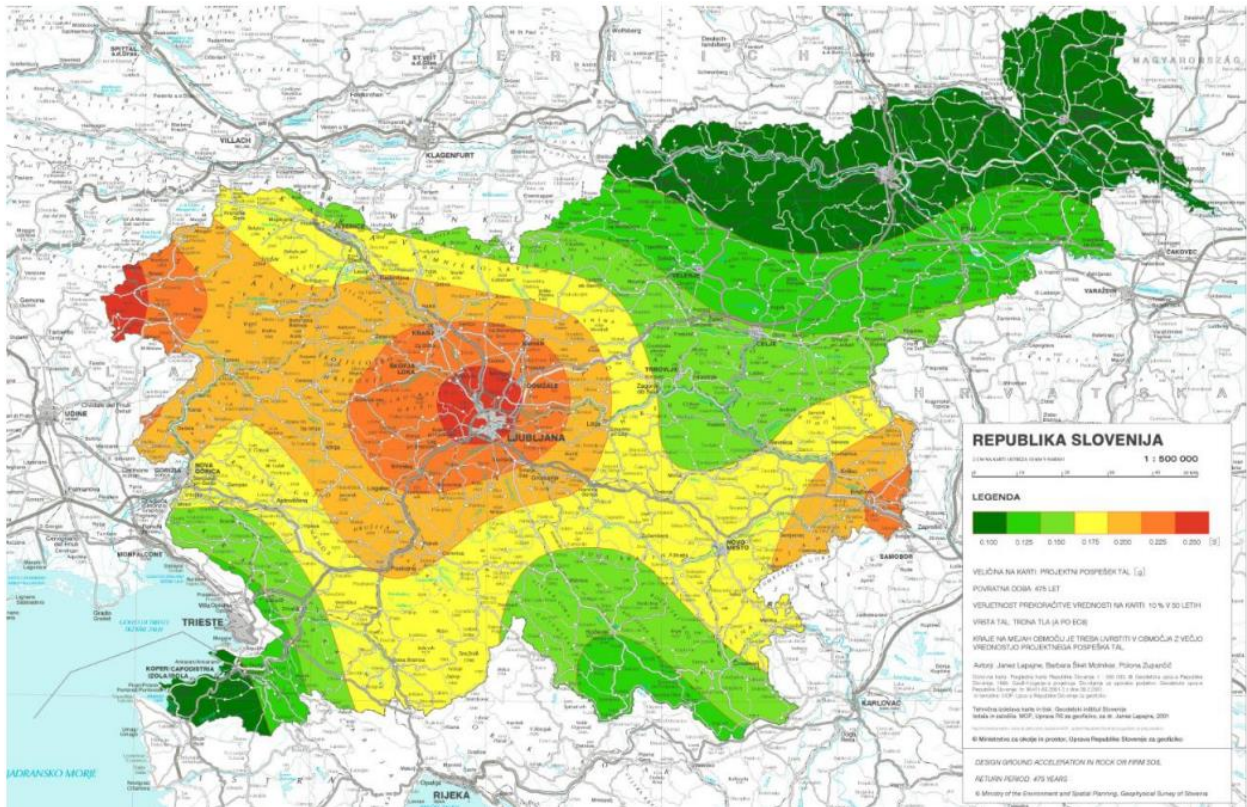


Figura 3.19 – Acelerações de referência na Eslovênia em função da aceleração gravítica.

O tipo de solo adotado na perspectiva de comportamento sísmico/geotécnico, foi do tipo A, conforme Quadro 3.1 da EN 1998, sendo a aceleração de cálculo dada por:

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$$

Onde γ_I é o factor de importância e a_{gR} é a aceleração de pico de referência no solo tipo A. Foi adotado um factor de importância de 1,40, correspondente a um período de retorno de referência de 1303 anos.

Para a determinação das acelerações de cálculo a serem consideradas na análise sísmica, recorreu-se a uma folha de cálculo desenvolvida na Unidade Curricular de Dinâmica de Estruturas. Foram definidos os dados de entrada e as condições de contorno para o cálculo do espectro de acelerações, conforme se apresenta na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 – Parâmetros de entrada para o cálculo do espectro de acelerações (Fonte: Autor).

BASE INPUTS		
	Domínio Geográfico	
Local (Concelho):	Divaca	Eslovenia
Classe Import	IV	
Tipo Terreno	A	
$\xi[\%]$	0.05	0.05
Classe de Ductilidade (DC)	DCM (Média)	
Tipo Estrutural	Sistema porticado, sistema misto, sistema de paredes acopladas	3
α/α_1 planta regular	1.3	
Regularidade em planta	NÃO	

Foi aplicável analisar exclusivamente sismos do Tipo 1 e, a partir do cálculo do espectro, foi gerado o gráfico de espectro de resposta elástico, apresentado na Figura 3.20.

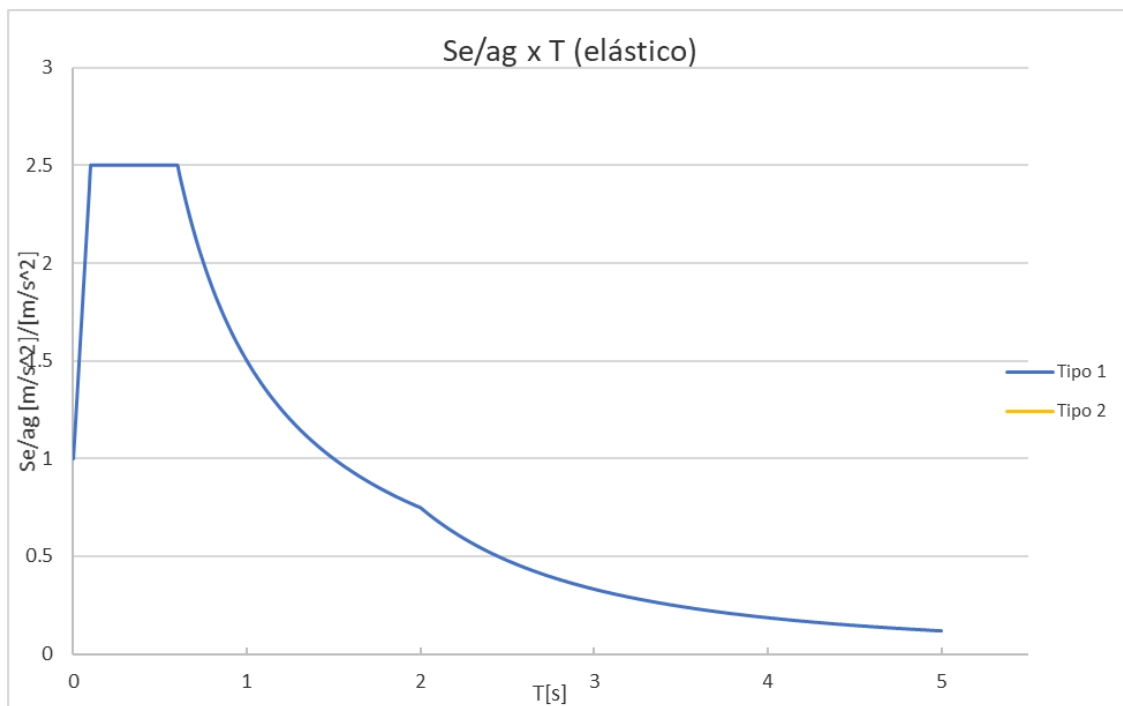


Figura 3.20 – Espectro de resposta elástico da estrutura (Fonte: Autor).

O espectro de cálculo cumpre com o estipulado na EN 1998 no que diz respeito a seus diferentes domínios de períodos e as respectivas variações do espectro.

Coefficiente de comportamento (q)

O coeficiente de comportamento relaciona-se com capacidade da estrutura de dissipar energia e pode ser interpretado como a relação entre o valor máximo de uma grandeza em regime não linear e a grandeza quando se atinge a cedência.

Determina-se q a partir do valor básico do coeficiente de comportamento, q_0 , e k_w , factor que reflete o modo de rotura predominante nos sistemas estruturais de paredes.

$$q = q_0 \times k_w$$

A estrutura foi considerada não regular em planta, logo o valor de q é a média entre α_u/α_1 (igual a 1,30, como já verificado nas tabelas acima) e 1,00, sendo assim o valor de $q=2,76$, valor que pode ser fundamentado com base no parágrafo (6) do item 5.2.2.2 da EN 1998. Para este caso, segundo a EN 1998, $k_w=1$ para sistemas porticados ou sistemas mistos equivalentes a pórticos. Assim é possível calcular q sendo este dado por:

$$q = 3,00 \times ((1,30 + 1)/2) \times 1 \times 0,80 = 2,76$$

Desta maneira, obtemos o espectro de acelerações de cálculo

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \times S \times \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \times \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \times S \times \frac{2,5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D \quad \left\{ \begin{array}{l} S_d(T) = a_g \times S \times \frac{2,5}{q} \times \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ S_d(T) \geq a_g \times \beta \end{array} \right.$$

$$T_D \leq T \quad \left\{ \begin{array}{l} S_d(T) = a_g \times S \times \frac{2,5}{q} \times \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \\ S_d(T) \geq a_g \times \beta \end{array} \right.$$

Em que:

- $S_d(T)$ – Espectro de calculo;
- q – Coeficiente de comportamento;

- a_g – Valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno do tipo A ($a_g = \gamma I \times a_{gR}$);
- β – coeficiente correspondente ao limite inferior do espectro de calculo horizontal, o valor adotado é de 0,2 conforme o disposto na EN 1998;

A Figura 3.21 apresenta o espectro de resposta de cálculo da estrutura encontrado e que vai ser considerado no cálculo automático da análise sísmica no Robot Structural.

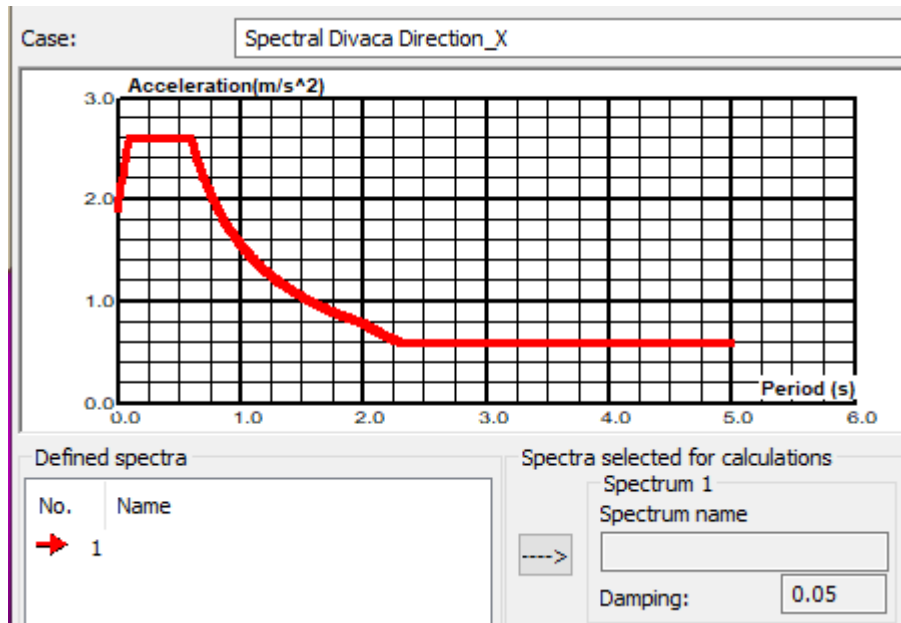


Figura 3.21 – Espectro de resposta de cálculo da estrutura (Fonte: Autor).

ANÁLISE MODAL

Para realização da análise modal, recorreu-se à ferramenta de análise sísmica contida no programa de cálculo Robot a partir da geometria modelada, definindo-se a Combinação Quadrática Completa (CQC), bem como os parâmetros a seguir indicados.

Efeitos Inerciais

Os carregamentos gravíticos e permanentes, bem como uma parcela dos carregamentos variáveis são considerados como massa mobilizada nas análises modal e sísmica, de acordo com os itens 3.2.4 e 4.2.4. Define-se a carga total a ser contabilizada através de

$$\Sigma G_{k,j} + \Sigma \psi_{E,i} \cdot Q_{k,i}$$

Sendo

$$\psi_{Ei} = \varphi \cdot \psi_{2i}$$

Onde considerou-se $\psi_{2i} = 0,6$ – Categoria F: zonas de tráfego (EN1990 - Quadro A1.1) e $\varphi=1,0$ (Quadro 4.2 da EN 1998).

Configuração de parâmetros para cálculo assistido

Foram configurados os parâmetros de maneira análoga ao representado na Figura 3.22.

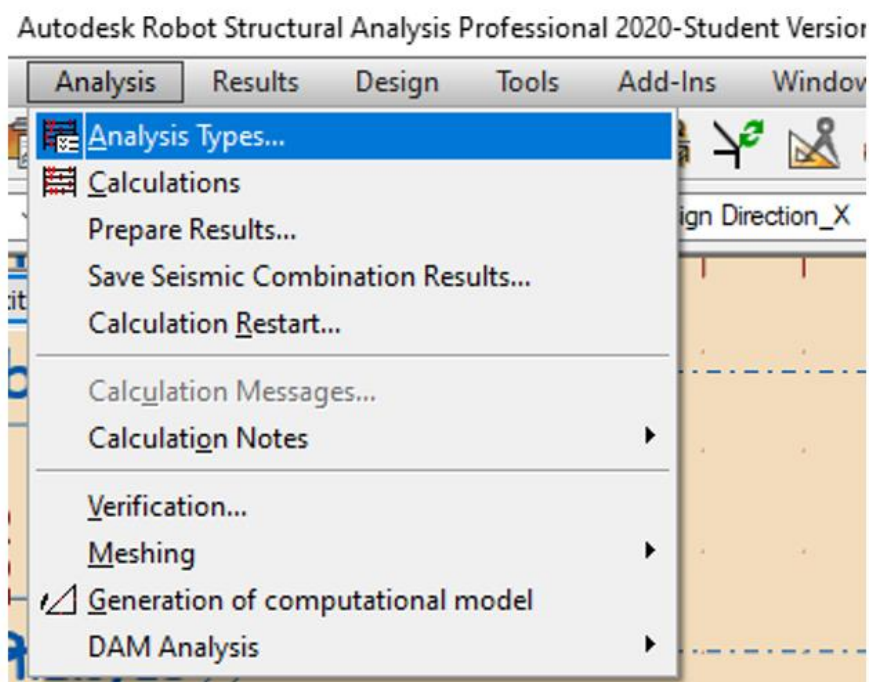


Figura 3.22 – Acesso a análises dinâmicas no *Robot*.

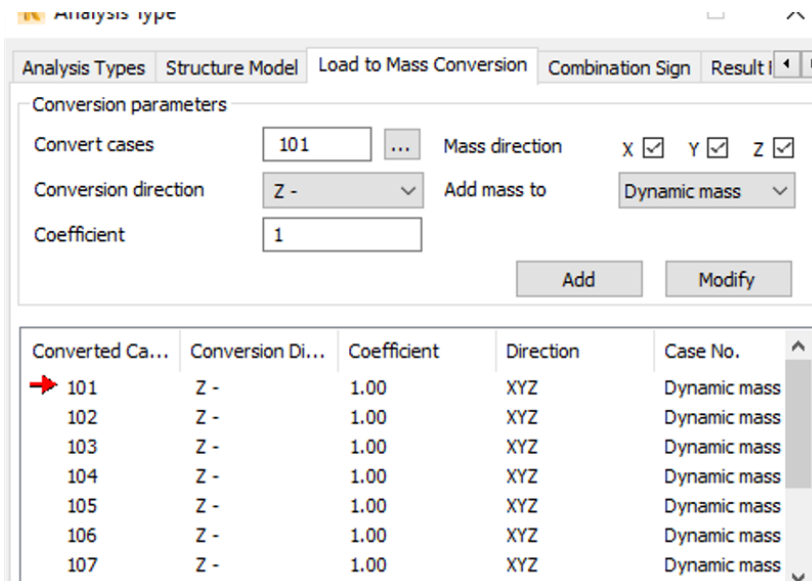


Figura 3.23 – Definição de massas mobilizadas a partir de carregamentos no Robot Structural (Fonte: Autor).

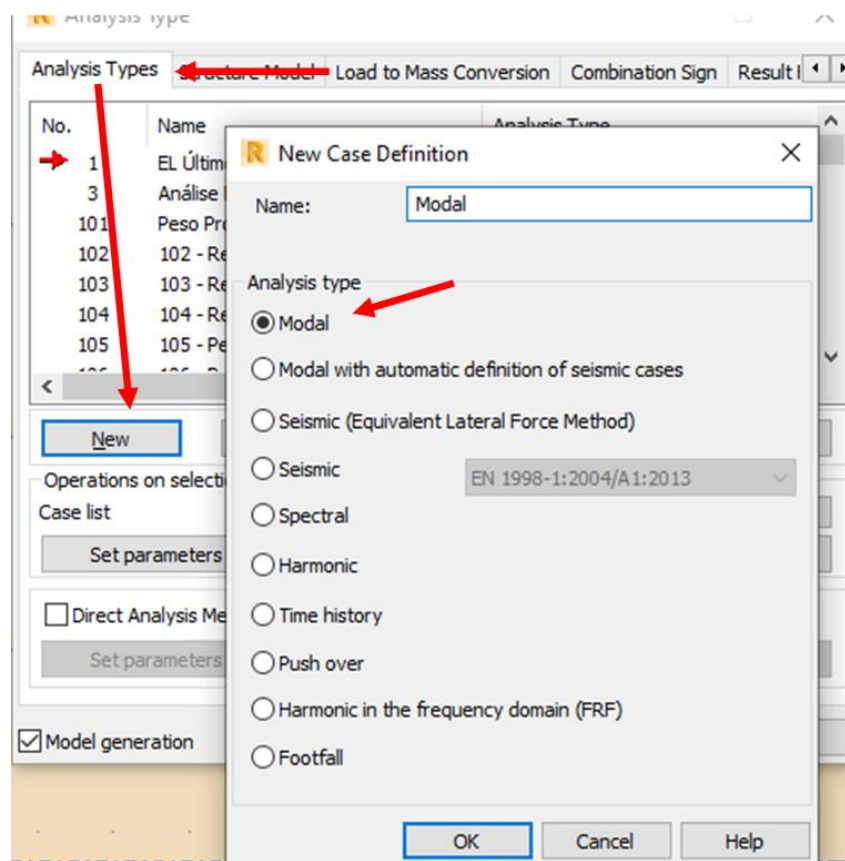


Figura 3.24 – Configuração de Análise Modal no Robot Structural (1/2) (Fonte: Autor).

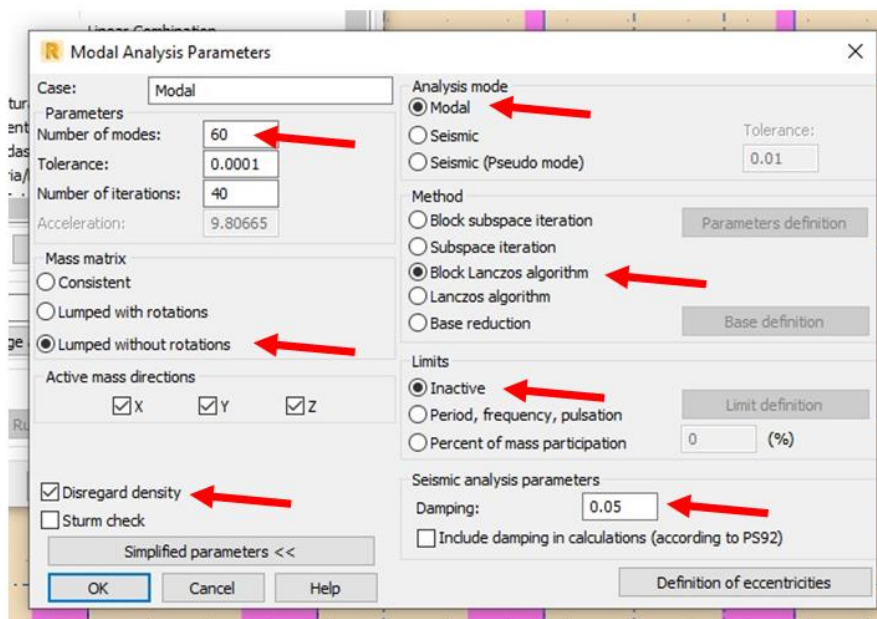


Figura 3.25 – Configuração de Análise Modal no Robot Structural (2/2) (Fonte: Autor).

Case/Mode	Frequency (Hz)	Period (sec)	Rel.mas.UX (%)	Rel.mas.UY (%)	Cur.mas.UX (%)	Cur.mas.UY (%)	Tj/Ti	Total mass UX (kg)	Total mass UY (kg)
16/ 1	2.50	0.40	85.00	0.01	85.00	0.01	0.49	2291119.74	2291119.74
16/ 2	5.10	0.20	86.11	26.79	1.12	26.78	0.77	2291119.74	2291119.74
16/ 3	6.65	0.15	86.49	93.77	0.38	66.98	0.55	2291119.74	2291119.74
16/ 4	12.10	0.08	88.93	93.89	2.44	0.12	0.82	2291119.74	2291119.74
16/ 5	14.84	0.07	89.27	93.95	0.34	0.06	0.88	2291119.74	2291119.74
16/ 6	16.88	0.06	93.25	93.97	3.99	0.02	0.86	2291119.74	2291119.74
16/ 7	19.55	0.05	93.79	95.05	0.54	1.08	0.84	2291119.74	2291119.74
16/ 8	23.29	0.04	93.79	95.30	0.00	0.25	0.97	2291119.74	2291119.74
16/ 9	24.12	0.04	93.81	95.86	0.02	0.57	0.81	2291119.74	2291119.74
16/ 10	29.76	0.03	94.58	96.00	0.77	0.13	CQC	2291119.74	2291119.74

Tabela 3-7 – Resultados da Análise Modal para a estrutura modelada (Fonte: Autor).

Foi optado por trabalhar com os 6 primeiros modos de vibração por mobilizarem cumulativamente 90% da massa em X e em Y, conforme parágrafo (3) do item 4.3.3.3.1 da EN 1998.

Note-se que há acoplamento ($T_j/T_i > 0,90$) entre os modos 7 e 8, portanto foram usados somente modos desacoplados.

3.6.4 Ação da neve

Foi considerado que todas as estruturas situadas em Divača estão a uma elevação média de 450 metros acima do nível do mar. Assim, o valor característico da carga de neve é $S_k=0,90$ kPa (EN 1990).

3.6.5 Ação da temperatura

Foram adotadas as especificações preconizadas na EN 1991-1-5 que estabelece princípios e regras para o cálculo da ação da temperatura em edifícios e outras estruturas e seus elementos estruturais.

De acordo com a EN 1992-1-1:2004, os efeitos térmicos devem ser levados em consideração na verificação da segurança em condições serviço (estados limites de utilização). Devem ser considerados nos estados-limite últimos apenas quando significativos, como pode ser exigido por condições de fadiga ou quando há consideráveis efeitos de segunda ordem, por exemplo. Em outros casos e combinações os efeitos térmicos podem ser desprezados, desde que seja garantido que a ductilidade e capacidade de rotação dos elementos é suficiente e adequada.

Trata-se uma ação que deve ser considerada como ação variável à qual é aplicado o fator ψ , definido nas EN 1990 e EN 1991-1-5. Foram consideradas as temperaturas máxima e mínima de referência do ar sob sombra em Divača. Foram consultadas as temperaturas extremas projetadas para um horizonte de 50 anos, como apresentado na Figura 3.26 e na Figura 3.27, a partir das quais efetua-se tratamento logaritmico que projeta os valores para um horizonte de 100 anos. Foram consultados 39°C para a temperatura máxima e -22,50°C para temperatura mínima aos 50 anos. Esses valores foram tratados para contemplar 100 anos de horizonte, por equação logarítmica de ajuste de acordo com os cálculos a seguir.

$$T_{\max} (100 \text{ anos}) = 39,0 * [0,781 - 0,056] * \ln[-\ln(1 - 1/100)] = 40,50^\circ\text{C}$$

$$T_{\min} (100 \text{ anos}) = -22,50 * [0,393 - 0,156] * \ln[-\ln(1 - 1/100)] = -25,00^\circ\text{C}$$

Najvišja dnevna temperatura zraka s povratno dobo 50 let

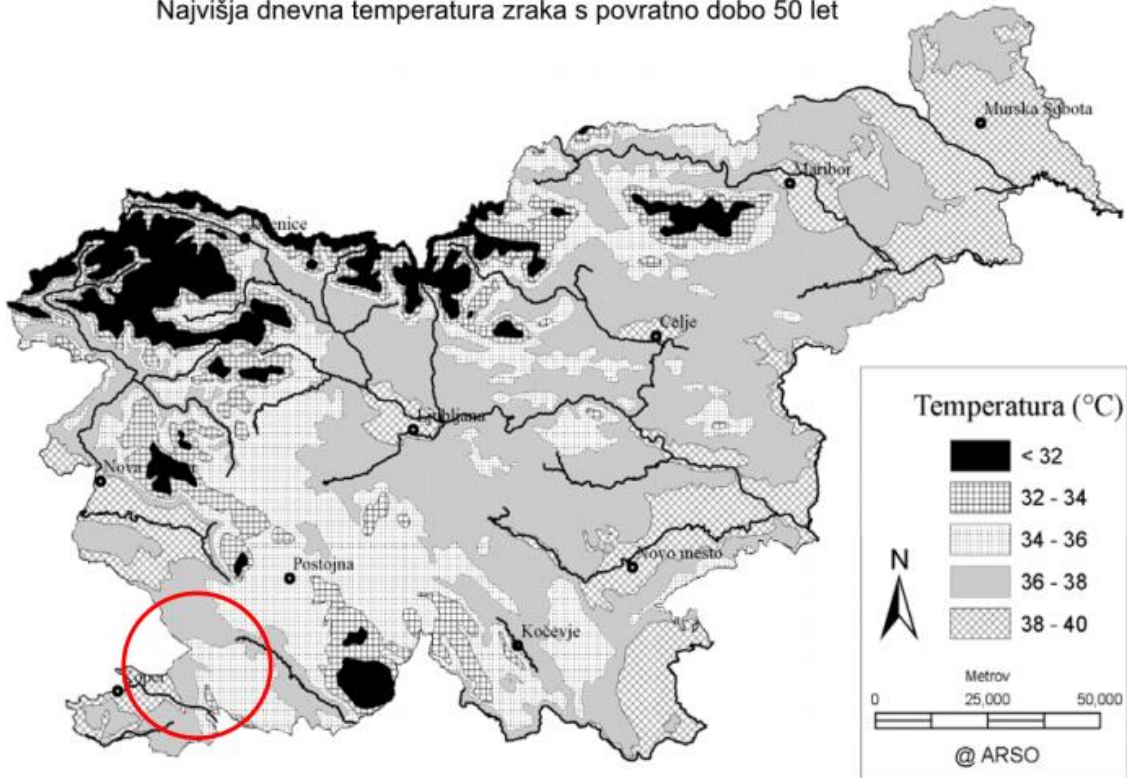


Figura 3.26 – Temperatura máxima em período de retorno de 50 anos.

Najnižja dnevna temperatura zraka s povratno dobo 50 let

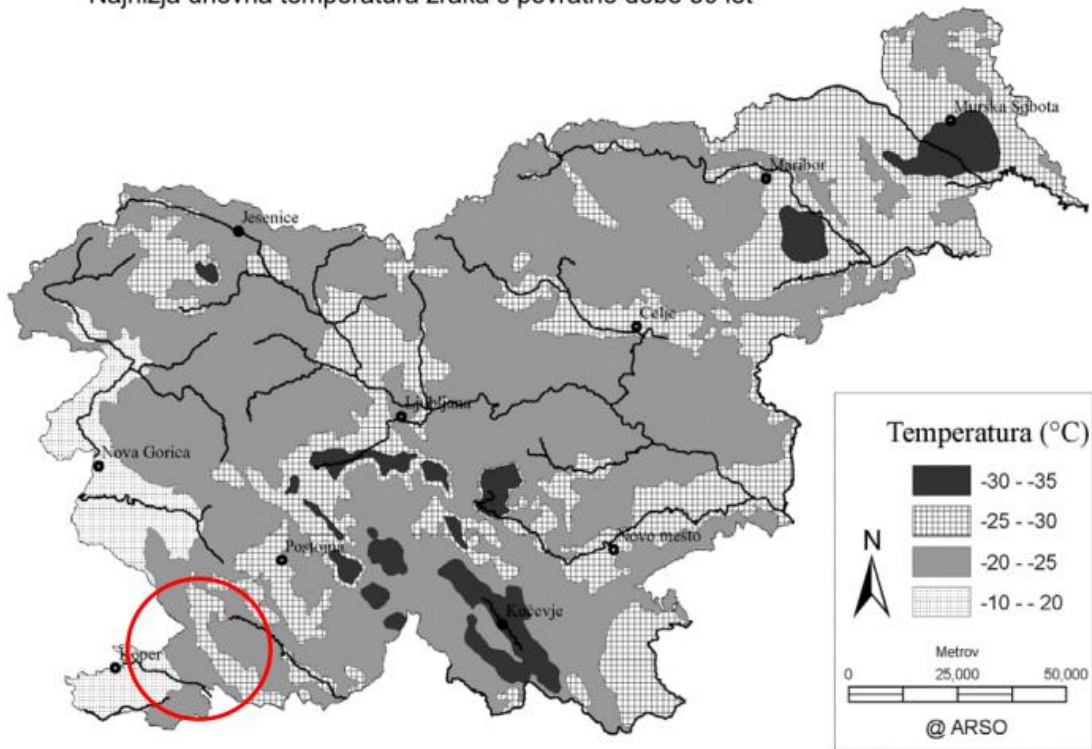


Figura 3.27 – Temperatura mínima em período de retorno de 50 anos.

Após a determinação dessas temperaturas máximas e mínimas de referência, foram também consultados valores de referência associados ao denominado perfil térmico de cada elemento, de acordo com trocas térmicas com os ambientes interior e exterior. Estas temperaturas de perfil térmico foram tratadas, assumindo uma temperatura inicial $T_0 = 10^\circ\text{C}$, para a obtenção dos valores finais de temperaturas no modelo numérico, conforme será abordado em cada tipo de ação térmica a seguir.

Temperatura uniforme e temperatura diferencial

A distribuição de temperatura num elemento estrutural pode ser decomposta em quatro componentes, como ilustrado na Figura 3.28, sendo as suas componentes as seguintes:

- Distribuição uniforme de temperatura ΔT_u ;
- Distribuição linear em relação ao eixo z_{local} , ΔT_{My} ;
- Distribuição linear em relação ao eixo y_{local} , ΔT_{Mz} ;
- Uma componente diferencial não-linear, ΔT_E . A resultante trata-se de um regime de tensões auto-equilibradas que produzem um efeito efetivo no elemento.

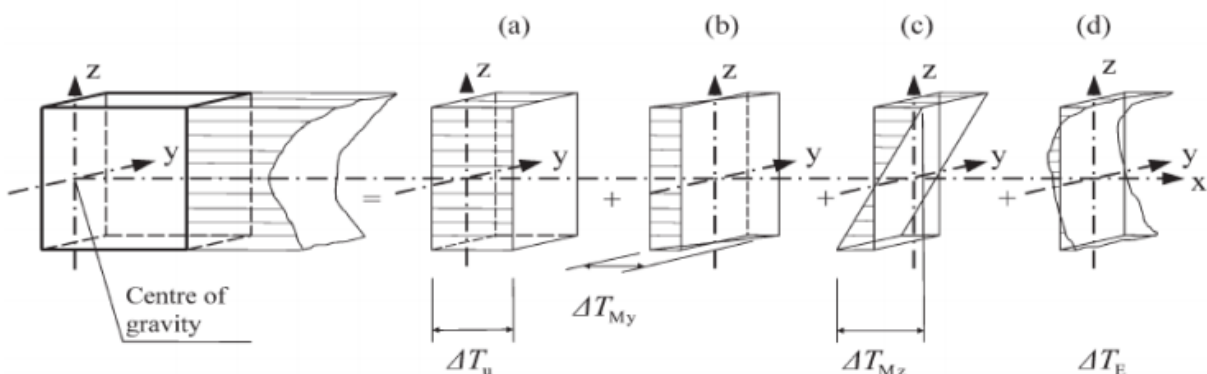


Figura 3.28 – Representação das componentes do perfil de ações térmicas em secção de elemento.

Asações térmicas consideradas no modelo são as apresentadas na Tabela 3-8. Para a determinação dos efeitos térmicos, o coeficiente linear de dilatação térmica adotado para o betão armado foi de $10 \times 10^{-6} \text{ 1}/^\circ\text{C}$.

Tabela 3-8 – Ações térmicas consideradas no modelo.

	ΔT_u		ΔT_M	
	Estruturas enterradas	+20.0°C	-30.0°C	+10.0°C
Estruturas exteriores	+6.5°C	-20.0°C	+17.0°C	-10.0°C

Foram consideradas diferentes combinações e elementos. Os cenários de verão e inverno foram adotados para diferentes combinações. De acordo com a norma DIN FB 101, 60% da rigidez da estrutura pode ser reduzida devido à microfissuras. Portanto, as temperaturas da tabela acima serão afetadas pelo coeficiente $1,50 \times 0,60 = 0,90$. A título ilustrativo, a Figura 3.29 representa a visualização de ações térmicas diferenciais consideradas no modelo.

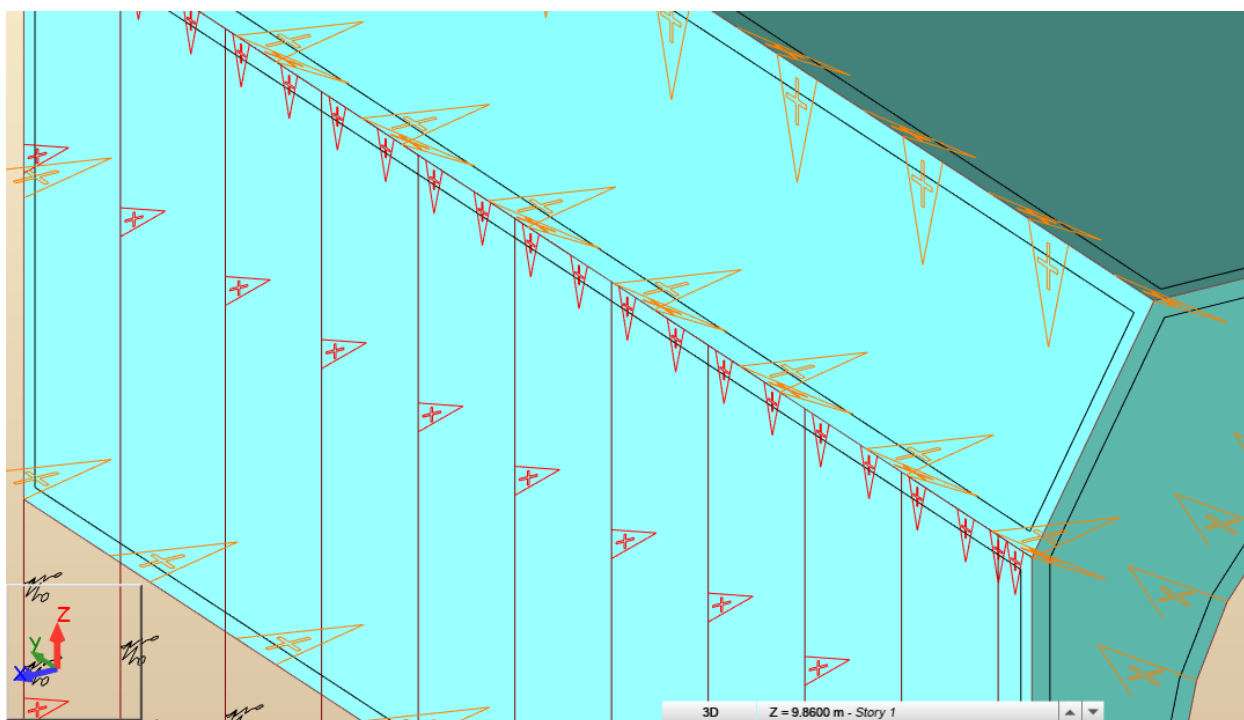


Figura 3.29 – Representação visual de ações térmicas diferenciais positivas.

3.6.6 Ações devidas à retração e à fluência do betão

A retração e a fluência a tempo infinito do betão foram consideradas em conjunto com variações térmicas periódicas ao longo da vida útil da estrutura. A retração foi modelada numericamente como uma carga térmica equivalente de $-13,2^{\circ}\text{C}$ e o valor do coeficiente de fluência adotado foi de 1,75, conforme fornecido. A Figura 3.30 representa a modelação das ações equivalentes à retração.

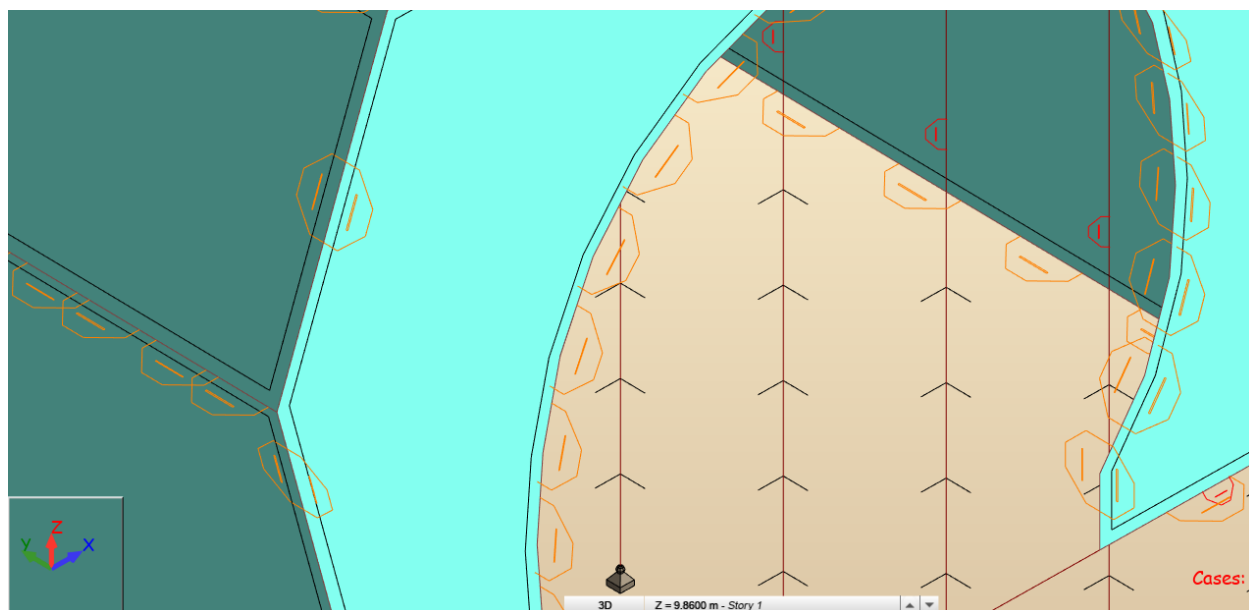


Figura 3.30 – Representação visual de ações térmicas uniformes negativas.

3.7 CASOS DE CARGA E COMBINAÇÕES DE AÇÕES NO MODELO NUMÉRICO

A Tabela 3-9 identifica os casos de carga considerados, enquanto a Tabela 3-10 resume as combinações de ações usadas na análise da estrutura. As combinações estão de acordo com a EN 1990, nomeadamente tendo em atenção os Estados-Limite Último e Estados-Limite de Serviço (Combinações Característica, Freqüente, Quase-Permanente), bem como situações sísmicas.

Tabela 3-9 – Casos de carga introduzidas no modelo numérico.

Case	Label	Case name	Nature	Analysis type
1	SW	Self Weight	Structural	Static - Linear
2	ODL	Other Dead Loads	Non-structural	Static - Linear
3	SPP	Soil Precut Phase	Non-structural	Static - Linear
4	SBP	Soil Backfill Pressure	Non-structural	Static - Linear
5	SBC	Soil Backfill Surcharge	Non-structural	Static - Linear
6	LL_Mach1	Live Load Machine_MidSpan	Category F	Static - Linear
7	LL_Mach2	Live Load Machine_Border	Category F	Static - Linear
8	SNO	Snow Load H<1000m	Snow H<1000 m abo	Static - Linear
9	TPr	Train Pressure	Category A	Static - Linear
10	TSu	Train Suction	Category A	Static - Linear
11	UT+	Uniform + Temperature Load	temperature	Static - Linear
12	UT-	Uniform - Temperature Load	temperature	Static - Linear
13	dT+	differential + Temperature Load	temperature	Static - Linear
14	dT-	differential - Temperature Load	temperature	Static - Linear
15	Shr	Shrinkage	temperature	Static - Linear

Tabela 3-10 – Combinações de ações consideradas (1/3).

Combinations	SW	ODL	SOIL PRECUT PHASE	SOIL BACKFILL PRESSURE	SOIL BACKFILL SURCHARGE	LL_VMD70_MS	LL_VMD70_SUP	SNOW	TRAIN P	TRAIN S	TEMP UNI+	TEMP UNI-	TEMP DIF+	TEMP DIF-	SOIL SEISMIC	SHRINKAGE
ULS100	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50										1,00
ULS101	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50		0,75								1,00
ULS102	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50			0,90							1,00
ULS103	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50				0,90						1,00
ULS104	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50					0,54					1,00
ULS105	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50						0,54				1,00
ULS106	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50							0,54			1,00
ULS107	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50								0,54		1,00
ULS108	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		1,50									1,00
ULS109	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		1,50	0,75								1,00
ULS110	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		1,50		0,90							1,00
ULS111	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		1,50			0,90						1,00
ULS112	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		1,50				0,54					1,00
ULS113	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		1,50					0,54				1,00
ULS114	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		1,50						0,54			1,00
ULS115	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		1,50							0,54		1,00
ULS200	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35			1,50								1,00
ULS201	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	0,90		1,50								1,00
ULS202	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		0,90	1,50								1,00
ULS203	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35			1,50	0,90							1,00
ULS204	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35			1,50			0,54					1,00
ULS205	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35			1,50				0,54				1,00
ULS206	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35			1,50					0,54			1,00
ULS207	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35			1,50						0,54		1,00

Tabela 3-11 – Combinações de ações consideradas (2/3).

Combinations	SW	ODL	SOIL PRECUT PHASE	SOIL BACKFILL PRESSURE	SOIL BACKFILL SURCHARGE	LL_VMD70_MS	LL_VMD70_SUP	SNOW	TRAIN P	TRAIN S	TEMP UNI+	TEMP UNI-	TEMP DIF+	TEMP DIF-	SOIL SEISMIC	SHRINKAGE
ULS300	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35				1,50							1,00
ULS301	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	0,90			1,50							1,00
ULS302	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		0,90		1,50							1,00
ULS303	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35			0,75	1,50							1,00
ULS304	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35				1,50		0,54					1,00
ULS305	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35				1,50			0,54				1,00
ULS306	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35				1,50				0,54			1,00
ULS307	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35				1,50					0,54		1,00
ULS308	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35				1,50							1,00
ULS309	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	0,90				1,50						1,00
ULS310	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		0,90			1,50						1,00
ULS311	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35			0,75		1,50						1,00
ULS312	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35					1,50	0,54					1,00
ULS313	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35					1,50		0,54				1,00
ULS314	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35					1,50			0,54			1,00
ULS315	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35					1,50				0,54		1,00
ULS400	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35						0,90					1,00
ULS401	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	0,90					0,90					1,00
ULS402	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		0,90				0,90					1,00
ULS403	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35				0,90		0,90					1,00
ULS404	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35					0,90	0,90					1,00
ULS405	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35						0,90		0,90			1,00
ULS406	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35						0,90			0,90		1,00
ULS407	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35							0,90				1,00
ULS408	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	0,90						0,90				1,00
ULS409	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		0,90					0,90				1,00
ULS410	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35			0,75				0,90				1,00
ULS411	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35				0,90			0,90				1,00
ULS412	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35					0,90		0,90				1,00
ULS413	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35							0,90	0,90			1,00
ULS414	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35							0,90		0,90		1,00

Tabela 3-12 – Combinações de ações consideradas (3/3).

Combinations	SW	ODL	SOIL PRECUT PHASE	SOIL BACKFILL PRESSURE	SOIL BACKFILL SURCHARGE	LL_VMD70_MS	LL_VMD70_SUP	SNOW	TRAIN P	TRAIN S	TEMP UNI+	TEMP UNI-	TEMP DIF+	TEMP DIF-	SOIL SEISMIC	SHRINKAGE
ULS500	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35								0,90			1,00
ULS501	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	0,90							0,90			1,00
ULS502	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		0,90						0,90			1,00
ULS503	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35			0,75					0,90			1,00
ULS504	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35				0,90				0,90			1,00
ULS505	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35					0,90			0,90			1,00
ULS506	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35						0,90		0,90			1,00
ULS507	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35							0,90	0,90			1,00
ULS508	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35									0,90		1,00
ULS509	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	0,90								0,90		1,00
ULS510	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		0,90							0,90		1,00
ULS511	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35			0,75						0,90		1,00
ULS512	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35				0,90					0,90		1,00
ULS513	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35					0,90				0,90		1,00
ULS514	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35						0,90			0,90		1,00
ULS515	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35							0,90		0,90		1,00
SLS600	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00											
SLS601	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,60										
SLS602	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		0,60									
ACC700	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00										1,00	
ACC701	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,60									1,00	
ACC702	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		0,60								1,00	

3.8 CÁLCULO AUTOMÁTICO DE DIAGRAMAS DE ESFORÇOS SOLICITANTES E ANÁLISE ESTRUTURAL

Foram gerados diagramas de esforços solicitantes no modelo numérico através do programa de cálculo automático Robot. Nesta secção serão apresentados alguns mapas desses esforços para análise estrutural. A partir dos resultados já devido ao peso próprio apresentados na Figura 3.31 e na Figura 3.32, constatou-se valores máximos [kN*m] e zonas de solicitação adequados nos elementos de superfície da estrutura. O lado mais solicitado à flexão em todos as combinações é o destacado nas isolinhas da Figura 3.31. A rigidez

relativa do lado oposto é elevada em relação aos demais elementos estruturais devido à solidarização de uma parede com estacas coroadas na interface entre as paredes deste lado, o que justifica a transmissão de esforços para a zona destacada. A Figura 3.33 e a Figura 3.34 apresentam exemplos de resultados de momentos flectores na combinação de Estado-Limite Último ULS100 (conforme Tabela 3-10), em torno dos eixos globais XX' e YY' os resultados são apresentados na também em $kN*m$.

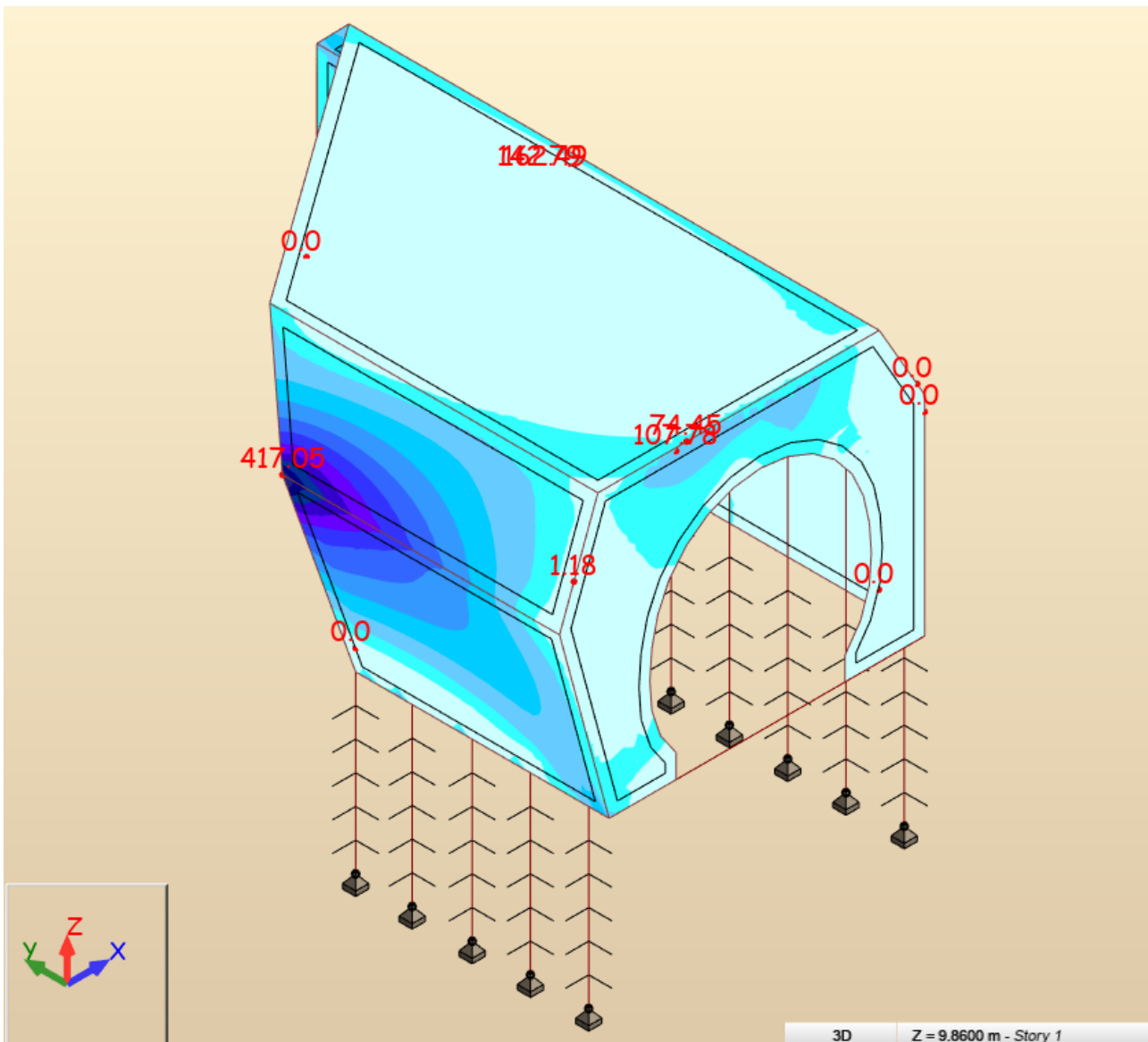


Figura 3.31 – Mapas de momento flector negativo (superior) no emboquilhamento em torno de XX' .

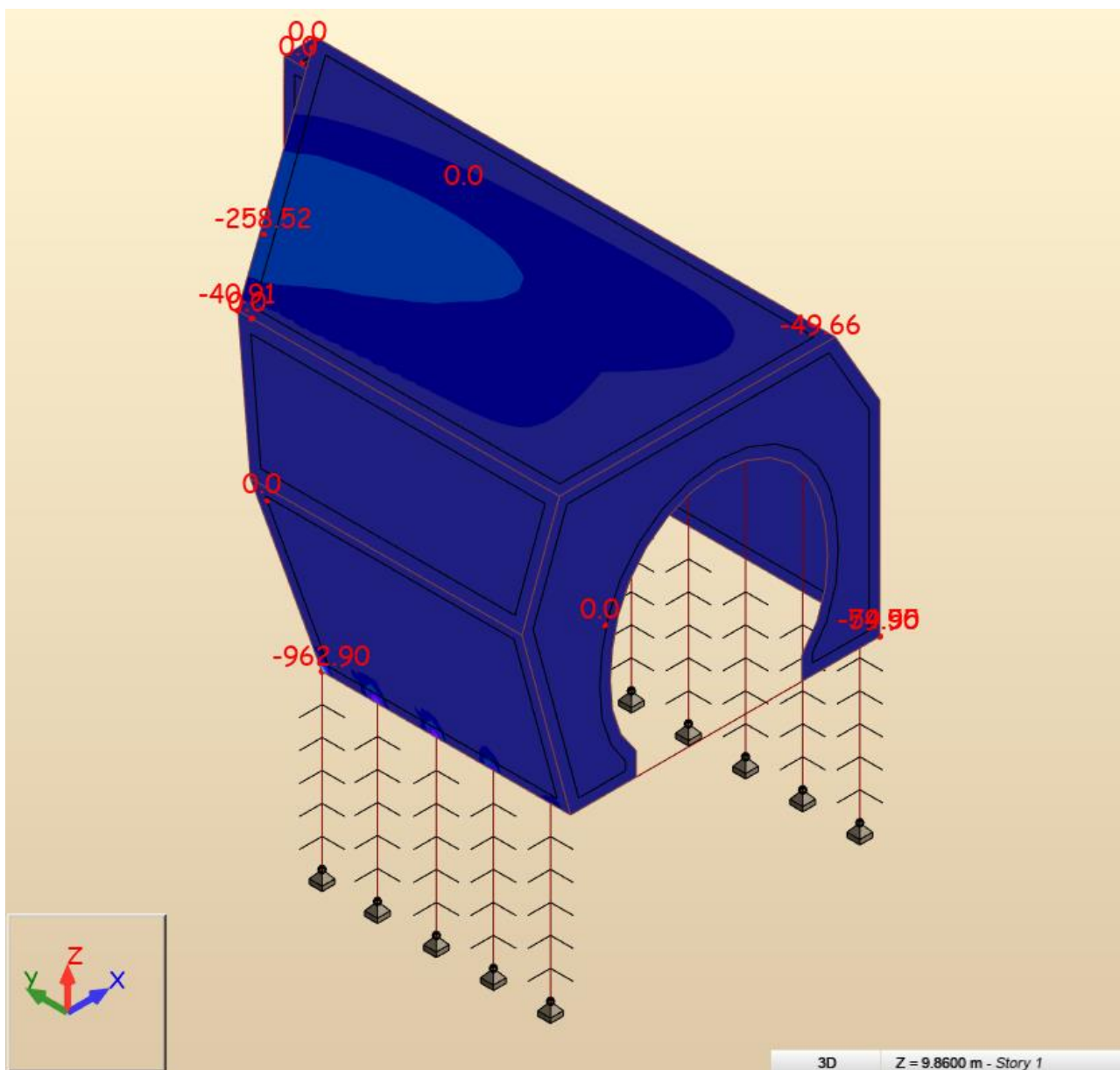


Figura 3.32 – Mapas de momento flector positivo (inferior) no emboquilhamento em torno de YY'.

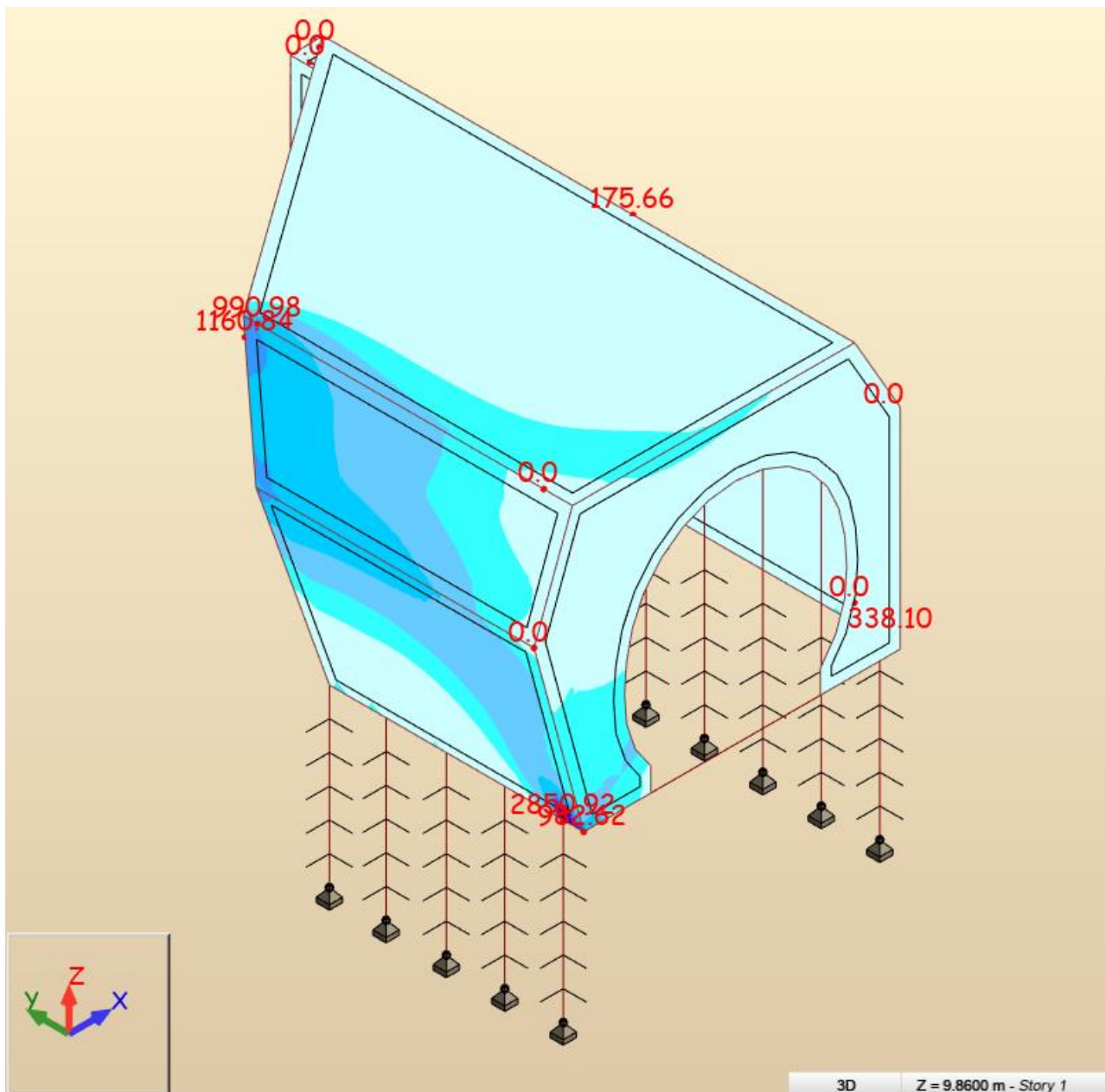


Figura 3.33 – Mapas de momento flector negativo (superior) no emboquilhamento em torno de XX' .

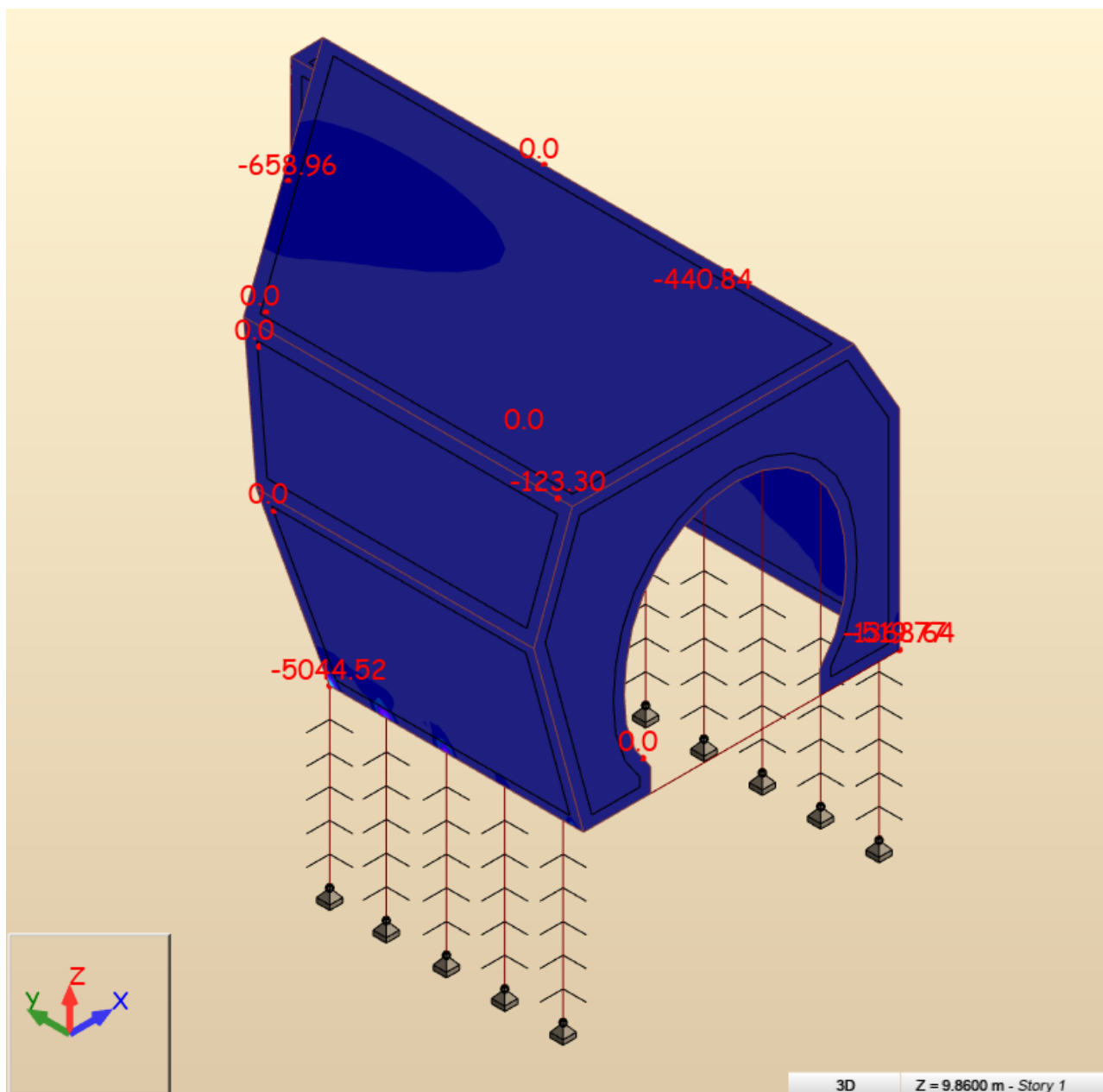


Figura 3.34 – Mapas de momento flector positivo (inferior) no emboquilhamento em torno de YY'.

CAPÍTULO 4

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE CASO

4.1 GENERALIDADES

Após explorar a modelação numérica de emboquilhamento de túnel apresentadas até esta secção, foram fornecidas informações e folhas de cálculo de dimensionamento de uma viga cujas armaduras foram modeladas em ambiente BIM (de acordo com o que será discutido no Capítulo 5 deste documento). Trata-se de uma viga não associada ao emboquilhamento modelado de 5 vãos sucessivos de 5 metros cada, como será também abordada na secção 5.3 deste documento.

O processo de projetos em betão armado é um processo sequencial e iterativo de tomadas de decisões (MacGregor and Wight, 2005, p. 12) e consiste em três macro etapas: (1) quantificação das cargas de projeto, (2) seleção de sistema estrutural para resisti-las, e (3) projeto e pormenorização dos elementos do sistema estrutural (Parrish, 2009).

Uma das frentes de observação durante este trabalho foi a de adequadamente englobar atuais aspectos práticos da modelação BIM em projeto de estruturas. A modelação numérica de um emboquilhamento de túnel, abordada no capítulo anterior, também foi explorada como uma oportunidade de melhor percepção sobre a utilização de ferramentas computacionais em diferentes etapas do projeto de estruturas. Isso permitiu consolidar formas eficientes de interpretar informações fornecidas sobre a estrutura e de conceber e executar ideias e procedimentos na modelação BIM. O objetivo de se ter realizado atividades adjacentes e anteriores à etapa de pormenorização foi de melhor compreender as etapas reais de trabalho adotadas na indústria. Isso permite melhor estabelecer as heurísticas associadas à ferramenta de automação da modelação de armaduras cujo desenvolvimento foi explorado. Atualmente as ferramentas orientadas à análise (2.1.2 deste trabalho) amplamente permitem apoiar o projeto de estruturas até a etapa final, de pormenorização (*detailing*). A otimização desta etapa final tem se mostrado com soluções menos alinhadas entre diferentes desenvolvedores de programas BIM. O estudo de caso, portanto, revolve em torno da elaboração e exploração de ferramenta de automação da modelação de armaduras da viga cujas informações foram fornecidas. No presente capítulo serão abordadas e discutidas algumas das

considerações feitas antes da consolidação de objetivos mais particulares como planeamento da ferramenta a ser desenvolvida. Dentre elas, a relação entre esforços e soluções de armaduras na viga, bem como diretrizes de pormenorização adotadas.

4.2 ANÁLISE ESTRUTURAL DA VIGA

Para uma mais completa compreensão da viga em estudo, foram exploradas as envolventes de momentos flectores solicitantes para análise estrutural de seus resultados. A Figura 4.1 representa essas envolventes, sendo a de momentos negativos em vermelho e os positivos em azul.

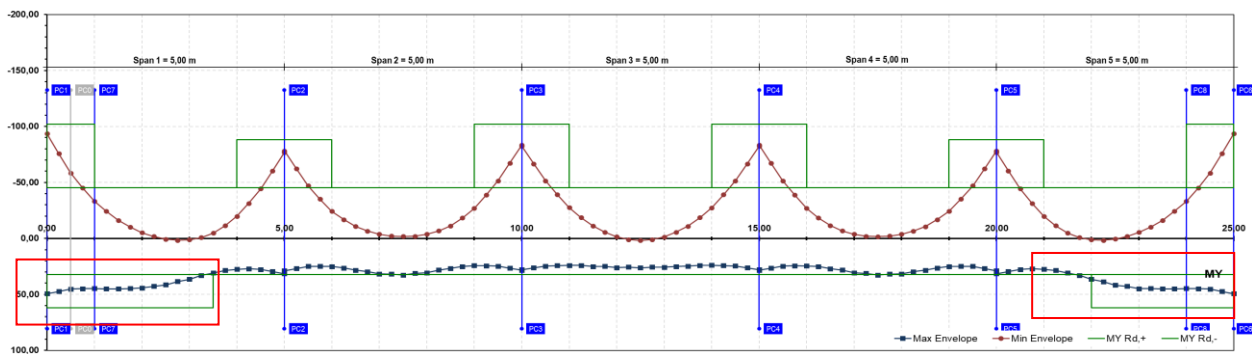


Figura 4.1 – Envolventes máxima e mínima de momento flector atuante.

As zonas de momentos máximos positivos encontram-se nos apoios extremos, determinando uma configuração não usual de disposição de armaduras. A solução definida para o caso estudado não contemplou reforços positivos aos meios-vãos, tendo sido as solicitações nessas zonas absorvidas pela armadura longitudinal inferior principal. Nas zonas de apoios extremos destacados na Figura 4.1 a solução de armaduras envolveu armaduras longitudinais inferiores de reforço. Como o projeto contemplou modelação de ações sísmicas, foi estudada a hipótese de influencia do sismo no perfil de diagramas de momentos flectores. Após essas análises sobre a relação entre o sistema estrutural associado à viga e a solução de armaduras, procedeu-se ao desenvolvimento da ferramenta de automação da modelação da solução dimensionada, que será abordada no Capítulo 4. Na secção a seguir serão discutidos aspectos considerados sobre a pormenorização de elementos em betão armado em modelo BIM.

4.3 ASPECTOS E PARÂMETROS ASSOCIADOS A ELEMENTOS DE ARMADURA NO REVIT

No Revit os elementos de armadura são uma Instância definidos contidos em um elemento hospedeiro válido. Um elemento hospedeiro válido consiste em uma Família de elementos do Revit cujo parâmetro *Material for Model Behavior* é (*Concrete*) ou (*Precast Concrete*). Paredes, lajes e bordas de lajes podem ser hospedeiros válidos contanto que contenham uma camada de betão e tenham sua propriedade de Instância diferente de (*non-structural*). Assume-se que as vigas em que serão aplicadas o algoritmo discutido no capítulo 4: (1) fazem parte da Família *Structural Framing*, (2) *Material for Model Behavior* definido como (*Concrete*) e (3) propriedade de Instância definida como (*Structural*)=*true*.

4.4 SHAPE GRAMMARS E CONCEPÇÃO DO ALGORITMO

4.4.1 Shape Grammars como fundamentação do algoritmo

Como será abordado no capítulo a seguir, a partir da seleção do elemento é possível importar informação BIM, nomeadamente todos os parâmetros e propriedades manipuláveis como diferentes tipos de informação no ambiente Dynamo. Esta informação disponível deve ser conjugada com a informação extraída das abas da folha de cálculo para serem computadas e modeladas as armaduras dimensionadas.

Optou-se por interpretar a viga como um prisma de base rectangular e manipular geometrias e dimensões associadas ao elemento selecionado para a obtenção das seis superfícies que compõem esse prisma. A estratégia concebida foi a manipulação da geometria do elemento que conterà suas próprias armaduras a modelar. A manipulação dessas geometrias gera *geometrias de construção*, que também manipuladas geram Geometrias Finais que expressam o lugar geométrico do eixo dos varões e as projeções de seus segmentos rectos. Estas serão convertidas em elementos de armadura em conformidade com o diâmetro mínimo do mandril estipulado na EN 1992 1-1. A ideia de computacionalmente realizar transformações em geometrias e formas pode ser fortemente associada à ideia de *Shape Grammars* desenvolvida no final dos anos 1970 no campo de Projeto Computacional (*Computational Design*).

4.4.2 Shape Grammars e operações de Boole em formas

O formalismo do *Shape Grammar* permite que sejam definidos algoritmos directamente em termos de formas (*shapes*) identificadas e formas identificadas parametrizadas (Stiny, 1980). Um *Shape Grammar* é composto por quatro componentes:

- (1) S é um conjunto finito de formas;
- (2) L é um conjunto finito de símbolos;
- (3) R é um conjunto finito de *regras de forma* da notação $\alpha \rightarrow \beta$, em que α é uma forma identificada em $(S,L)^+$, e β é uma forma identificada em $(S,L)^*$; e
- (4) I é uma forma identificada em $(S,L)^+$ denominada *forma inicial*.

Uma forma é definida como uma disposição limitada de linhas rectas definidas em um sistema de coordenadas cartesiano composto por eixos reais e uma métrica euclidiana associada. Aspectos de uma forma podem ser distinguidos identificando-a. A identificação permite, por exemplo, diferenciar todas as formas que são pontos, linhas ou quaisquer outras formas no conjunto S considerado.

Um *Shape Grammar* define um conjunto de formas denominado *linguagem*. Essa *linguagem* contém todas as formas s geradas pelo *Shape Grammar* que não contenham símbolos associados. Cada uma dessas formas é proveniente da *forma inicial* sob aplicação das regras; cada forma é composta por formas ou subformas das formas no conjunto S .

A definição de *Shape Grammars* pode tentar ser clarificada pelo exemplo da Figura 4.2. Considere o *Shape Grammar* da Figura 4.2 e seu funcionamento e o resultado de sua linguagem na Figura 4.4.

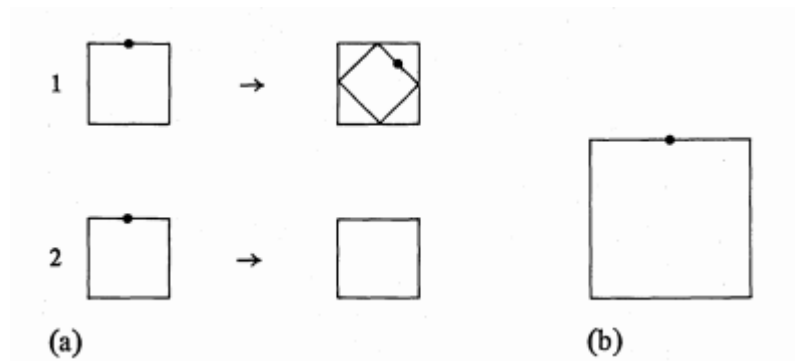


Figura 4.2 – *Shape Grammar* que inscreve quadrados em quadrados. (a) Regras de forma, (b) *forma inicial*.

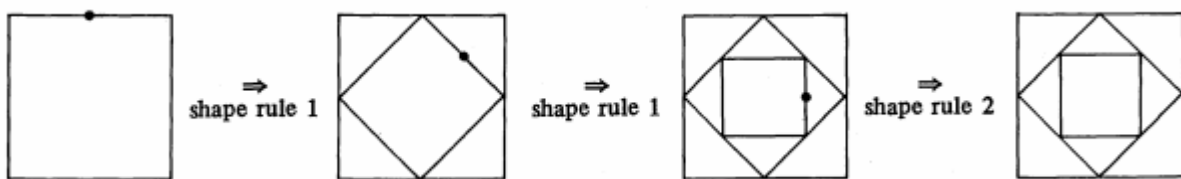


Figura 4.3 – Geração de forma a partir do *Shape Grammar* da figura 4.5.



Figura 4.4 – Algumas formas na *linguagem* definida pelo *shape grammar* da figura 4.5.

Num contexto espacial, com coordenadas associadas a um sistema global, aplica-se o conceito de *Shape Grammars Paramétricos*.

Shape Grammars Paramétricos são uma extensão dos *Shape Grammars* em que regras de forma são definidas por preencherem os termos vazios em um *esquema* geral. Um *esquema* de regras $\alpha \rightarrow \beta$ consiste em formas identificadas parametrizadas α e β , onde nenhum membro da família de formas identificadas especificadas por α é a forma identificada *vazio*.

A implicação destas generalizações são ilustradas na Figura 4.5 e Figura 4.6.

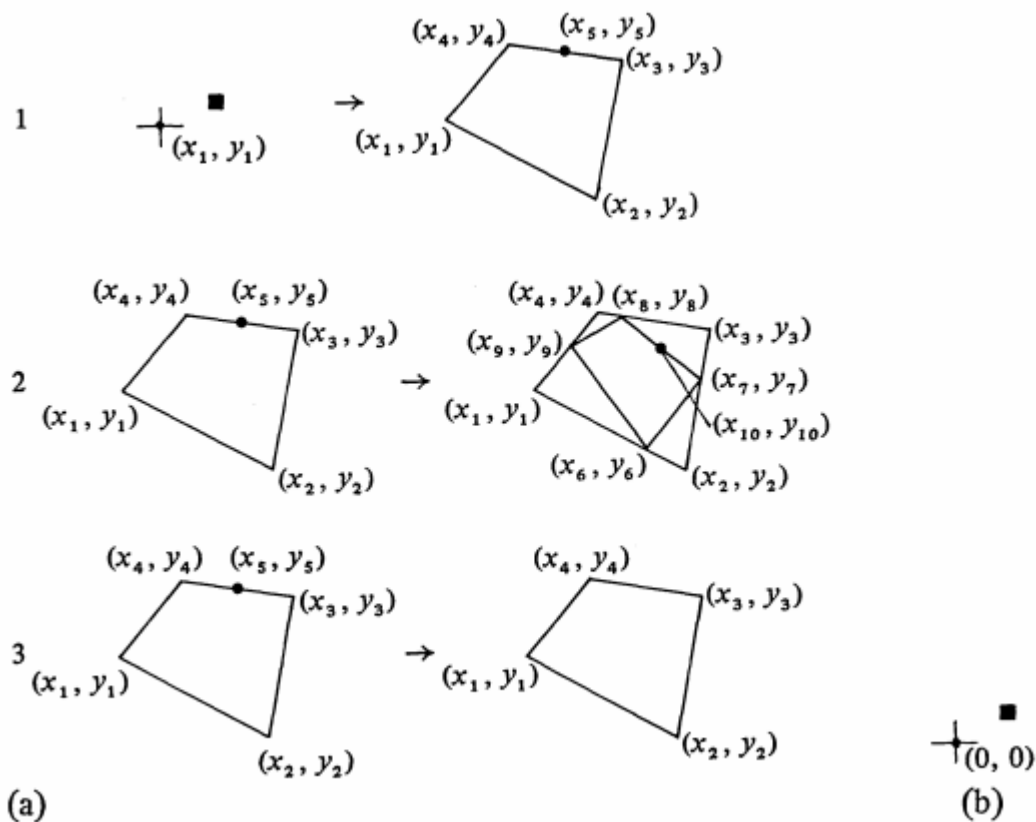


Figura 4.5 – Um *Shape Grammar Paramétrico* que inscreve quadriláteros convexos em quadriláteros convexos. (a) *Esquemas* de regras de forma, (b) *Forma inicial*.

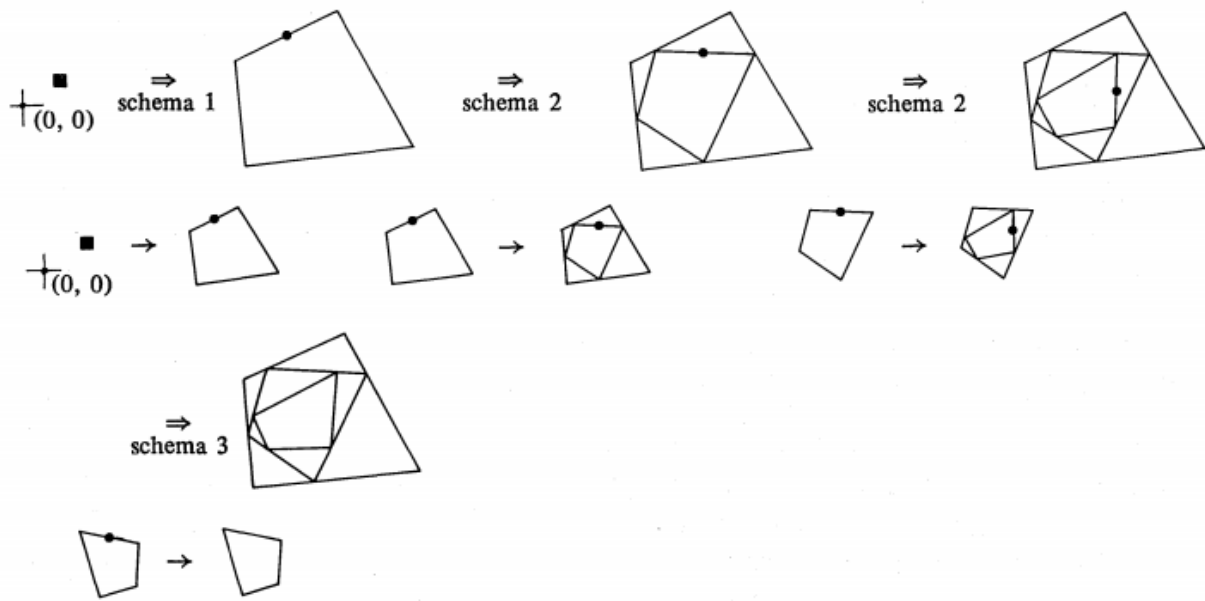


Figura 4.6 – Geração de formas ao utilizar o *Shape Grammar Paramétrico* da Figura 4.5.

As transformações euclidianas permitem que sejam produzidas novas formas pela alteração da localização, orientação ou tamanho de uma dada forma. Estas *transformações* são *translação*, *rotação*, *reflexão*, *escala*, ou *composições* finitas destas. Uma transformação que não envolve escala é designada uma *isometria*. Qualquer transformação da forma vazia é a própria forma vazia.

Por fim, os conceitos associados a operações booleanas se mostram como uma opção de diretriz e fundamento para a estratégia definida para a automatização da modelação de armaduras desejada.

A *união* de dadas formas $s1$ e $s2$ (denotada por $s1+s2$) é a forma constituída por todas as linhas em $s1$ ou $s2$ ou ainda produzidas pela combinação de linhas em $s1$ ou $s2$. Uma linha máxima de $s1$ e uma linha máxima de $s2$ pode ser combinada para formar uma nova, mais longa linha máxima na sua união. Logo, podem haver linhas nesta forma que não são $s1$ tampouco $s2$. As formas $s1$ e $s2$ são subformas de $s1+s2$.

A *intersecção* de dadas formas $s1$ e $s2$ (denotada por $s1 \bullet s2$) é constituída exclusivamente pelas linhas tanto em $s1$ quanto em $s2$. A forma $s1 \bullet s2$ é uma subforma da forma $s1$ e uma subforma da forma $s2$.

A *diferença* das formas $s1$ e $s2$ (denotada por $s1-s2$) é a forma constituída somente pelas linhas em $s1$ que não são também linhas em $s2$. A forma $s1-s2$ é sempre uma subforma de $s1$ porém não necessariamente uma subforma da forma $s2$.

As operações de união, intersecção e diferença de formas tratam formas da mesma maneira básica como definido nas operações de teoria de conjuntos de união, intersecção e diferença tratam conjuntos. Mais precisamente, o conjunto de todas as subformas de uma dada forma s e as operações de união e intersecção formam uma *Álgebra Booliana* (Stiny, 1980).

Desta maneira, é possível traduzir numérica e computacionalmente as abstrações de resultados espaciais e analíticos de interseções entre formas já formalizadas matematicamente.

As camadas de código que são disponibilizadas pelo Dynamo, juntamente com os fatores BIM não-geométricos da informação que se pretende processar e gerar evidenciam uma oportunidade de desenvolvimento de linguagens mais informacionalmente densas e integradas no que diz respeito ao projeto assistido por computador. Isso permitiria ainda mais eficiência e fidelidade tanto para profissionais cujo objetivo em recorrer a ferramentas digitais seja orientado à geometria e representação gráfica, quanto orientado à análise, o que beneficiaria o prazo e qualidade na conclusão de projetos.

4.4.3 Concepção da rotina

A partir das ideias de manipulação computacional de geometrias, foi concebido na fase de aprendizagem de Dynamo o seguinte fluxo de trabalho para desenvolvimento do algoritmo em questão:

- 1) Obter lista das 6 Superfícies da viga (prisma de base rectangular)
- 2) A partir destas, gerar listas de “*Geometrias de construção*” (Pontos, Curvas e Superfícies de apoio)
- 3) Elaboração de “*Curvas de base*” (Curvas que efetivamente serão parcial ou integralmente convertidas a elemento Armadura no Revit)
- 4) Consolidação de “*Policurva Final*” de cada grupo de armadura (“*Policurva Final*” é aquela que descreverá o eixo geométrico de cada uma das barras definidas) (barras de um grupo possuem geometrias locais congruentes entre si)
- 5) Distribuição das “*Policurvas finais*” de acordo com “*Layouts de Distribuição*” (aplica-se repetição baseada em regras)
- 6) Declaração de Armaduras no Revit a partir das “*Policurvas finais*”
- 7) Definir opções de Visualização

A concepção desta rotina teve por base a utilização do mínimo de informação e processamento computacional possível, bem como desenvolver etapas replicáveis e facilmente adaptáveis para catalização do desenvolvimento de algoritmos com aplicações similares. A Figura 4.7 ilustra até e inclusive a etapa 5).

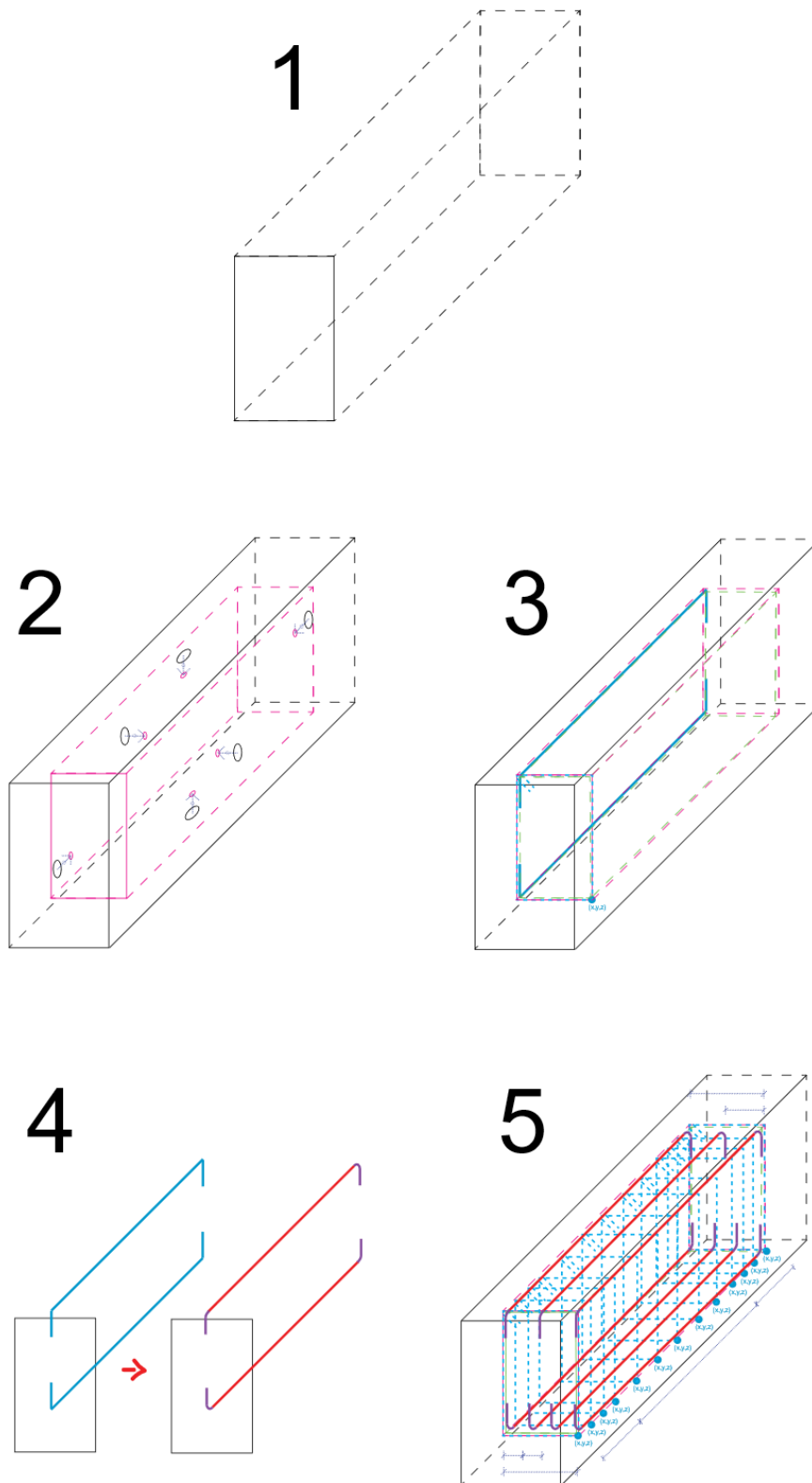


Figura 4.7 – Representação da concepção inicial de funcionamento do algoritmo (Fonte: Autor)

CAPÍTULO 5

MODELAÇÃO AUTOMATIZADA E PARAMÉTRICA DE ARMADURAS EM BIM

5.1 ENQUADRAMENTO E OBJETO DE ESTUDO

Como mencionado nos capítulos 1 e 2, o principal objetivo deste trabalho foi explorar o desenvolvimento de ferramenta para automatização da modelação BIM de armaduras. No presente capítulo será introduzido o programa utilizado e se discutirá sobre a ferramenta desenvolvida. O elemento em betão armado optado por ser objeto de desenvolvimento da ferramenta foi uma viga recta, de secção transversal retangular (0,30 x 0,50 m) de 25 metros de comprimento composta por cinco vãos sucessivos de 5 metros. As armaduras dimensionadas são nomeadamente uma armadura principal (transversal, longitudinal superior e longitudinal inferior), reforços transversal e longitudinal superior nas zonas sobre os pilares, bem como armadura longitudinal inferior nos pilares extremos para resistir a cargas sísmicas.

5.2 CASO DE ESTUDO

A viga em betão da classe C30/37 armada por aço S500 foi dimensionada pela empresa com recurso a folhas de cálculo de vigas em betão armado, que interopera com programa de modelção numérica e cálculo assistido por importar resultados de esforços automaticamente. Uma das folhas é atualmente utilizada para organização da informação ao pormenor das armaduras a serem modeladas pela equipa da empresa, que contém nomeadamente códigos de formas (*shape codes*), suas dimensões, posições e quantidades. Foi então explorado o desenvolvimento de ferramenta em Dynamo para automação da modelação das armaduras da viga em estudo sem a alteração das folhas de cálculo existentes. O algoritmo desenvolvido para a ferramenta representa, resumidamente, 1) uma tentativa de metodicamente interpretar geometricamente informações de uma tabela de pormenores para obtenção e processamento de grandezas como comprimentos e ângulos; em paralelo, 2) a de interpretação e processamento da geometria e orientação espacial da viga no modelo BIM, para que por fim o algoritmo adequadamente aplique transformações que produzam outras *geometrias de construção* em sua linguagem; para 3) a conjugação das *geometrias de construção* com as grandezas processadas para definição de linhas de esboço (*Sketch Lines*) no Revit; o que permite 4) a definição dos

elementos de armadura no modelo BIM. O objetivo era englobar o caso mais genérico possível de apresentação das informações tanto sobre as grandezas quanto das vigas retas de secção retangular possíveis.

Foram utilizadas sobretudo ferramentas digitais correntes na criação de projetos de Arquitectura e Engenharia, sendo elas o Revit para elaboração de modelos BIM, MS Excel para folhas de cálculo de dimensionamento e, para a interoperabilidade entre esses, o Dynamo. Este programa permite acessar a API do Revit (2.2 deste documento) para a criação de ferramentas que otimizam o uso dos atuais programas de apoio ao projeto de estruturas. Sua utilização e interface com o usuário é primariamente em interface gráfica de programação visual, representando as funções como nós e a relação de entradas e saídas (*inputs* e *outputs*) por linhas conectoras. É também usual a necessidade de desenvolver códigos ou alterar partes de códigos, sobretudo com a finalidade de adaptação do tipo de informação de entrada de funções. Para isto o Dynamo é adaptado com nós específicos que permitem ao usuário desenvolver códigos na linguagem *Python*, como será abordado adiante neste documento.

5.2.1 Pacotes do Dynamo

Sendo o programa parcialmente em código aberto, torna-se usual a criação e partilha de pacotes de nós e funções entre desenvolvedores e usuários do Dynamo. Os pacotes utilizados ao longo deste trabalho se encontram de acordo com a Figura 5.1. Foram utilizados, sobretudo, DynamoRebar, Structural Design e Clockwork.

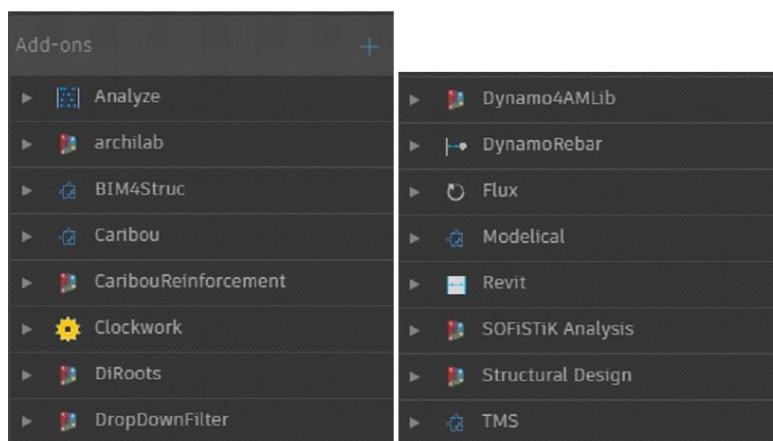


Figura 5.1 – Pacotes do Dynamo explorados ao longo deste trabalho.

5.3 MODELAÇÃO BIM DE VIGA EM BETÃO ARMADO

Para exploração dos objetivos deste trabalho e para elaboração de estudo de caso, bem como exploração do funcionamento do algoritmo (a ser abordado na secção a seguir), foram modeladas três vigas idênticas de acordo com as características e condicionantes já apresentadas. As réplicas servem para a validação do funcionamento da ferramenta em diferentes orientações possíveis de vigas horizontais. Durante a investigação por conhecimentos aplicáveis de Dynamo verificou-se que a grande maioria das ferramentas apresentadas como exemplo em tutoriais e grupos internacionais de discussão, institucionais ou não, contempla apenas vigas modeladas orientadas ao longo de apenas um eixo global. As réplicas também permitiram avaliar o adequado funcionamento de selecção de elementos, e que apesar de se tratar de cópias o Revit gera números de identificação única para todos os elementos físicos modelados. A Figura 5.2 e a Figura 5.3 representam os elementos modelados.

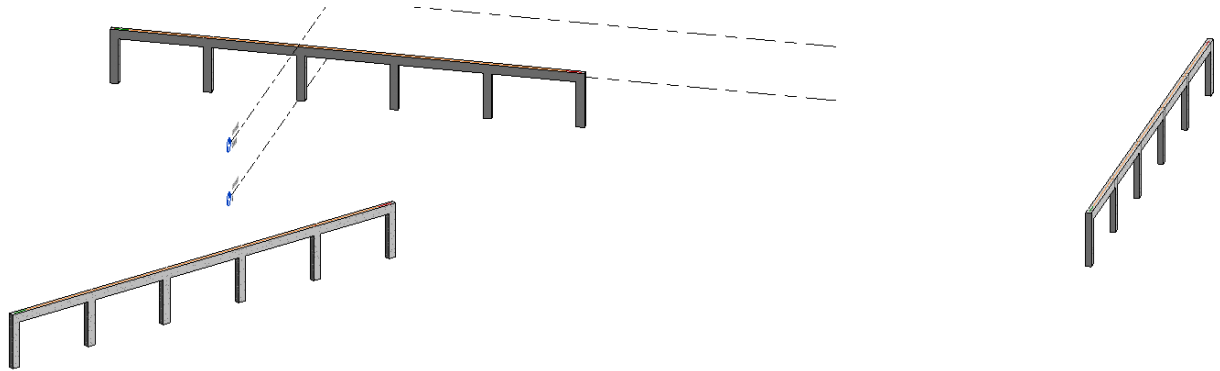


Figura 5.2 – Visualização tridimensional das vigas modeladas em ambiente BIM para estudo de caso.

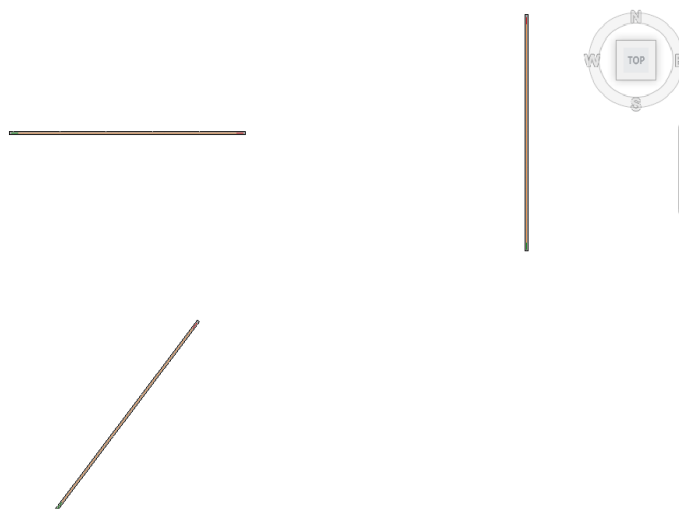


Figura 5.3 – Vista em planta das vigas modeladas em ambiente BIM para estudo de caso.

5.4 ALGORITMO DESENVOLVIDO

Após período de aprendizagem inicial do Dynamo e tendo estabelecido o fluxo de trabalho apresentado anteriormente, procedeu-se à elaboração do algoritmo, cujo grafo de representação em programação visual apresentado na Figura 5.4.

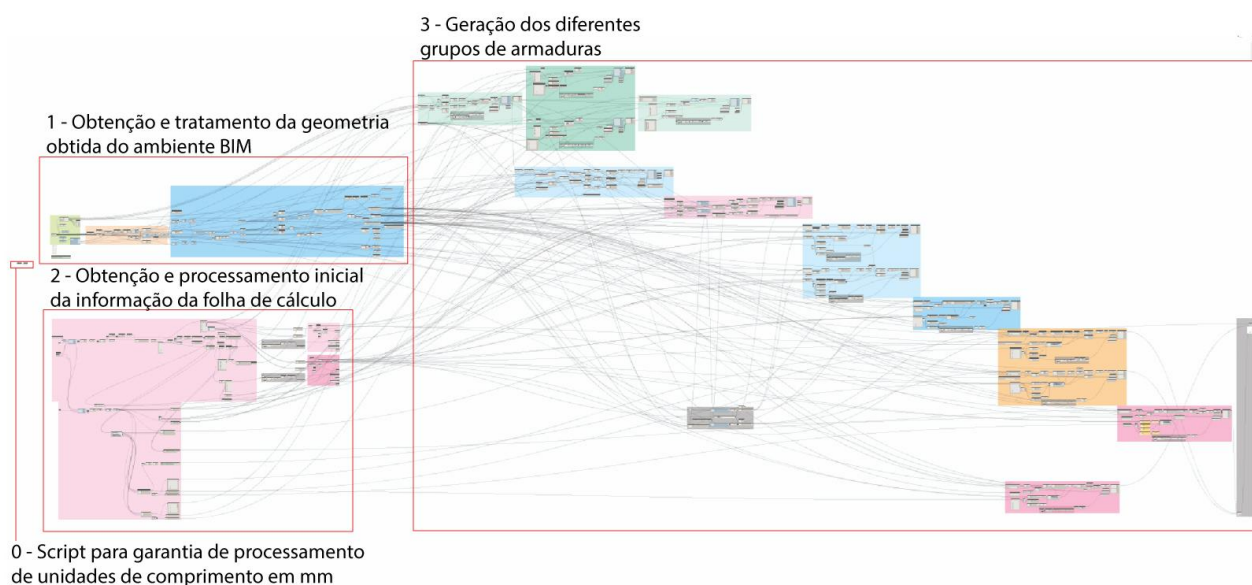


Figura 5.4 – Algoritmo desenvolvido para ferramenta de automação da modelação de armaduras de vigas em ambiente BIM (Fonte: Autor).

Nas próximas secções deste documento será discorrido sobre aspectos e condições de contorno associados à ferramenta desenvolvida e o funcionamento de suas partes. Particularmente a respeito do grupo de blocos 3 representado na figura 4.11 serão abordados algumas das principais partes da rotina na realização da concepção do algoritmo descrito em 4.3.3 deste documento.

5.5 API DO REVIT E PROPIEDADES DE EDIÇÃO DE ELEMENTOS

Na tradução da informação da API do Revit para processamento no Dynamo, foi tido em atenção a manipulação dos dados de maneira a preservar a liberdade de alteração de parâmetros associados no ambiente Revit. Foram efetuados testes para avaliação do completo acesso e alteração de parâmetros da informação BIM de elementos do modelo Revit. Alguns tipos de informação definidos no Dynamo

que foram utilizados são (*Curve*), (*Polycurve*), (*Point*), (*Line*), (*Rebar*), (*Solid*), (*Surface*), (*Polysurface*), (*Plane*), (*Parameters[]*), (*Geometry[]*), (*Double*), (*Integer*), (*String*), (*Boolean*), (*Var[]*), tipicamente geridos na forma de listas ou dicionários. Os nós do Dynamo utilizam diferentes tipos de informação de entrada, cujas listas terão suas respectivas dimensões (níveis de aninhamento), e produzem listas ou dicionários de dimensões coerentes com a função. Os dicionários são uma maneira referenciada de se organizar conjuntos de listas com valores associados ou simplesmente por representarem parâmetros agrupados. Um bom exemplo da aplicação de dicionários é o conjunto de propriedades ou parâmetros de um elemento BIM no Revit. Ao importar um elemento para o Dynamo, por exemplo, uma laje, esta terá um conjunto finito de parâmetros a ela associada, ainda que não totalmente utilizados pelos usuários do modelo durante um projeto. Esta laje possui propriedades físicas e computacionais que podem ser hierarquizadas e organizadas em dicionários associados. Um outro tipo de elemento, como uma porta, terá outras propriedades de interesse de projeto e modelo, tendo dicionários cujos parâmetros são comuns a outras portas da mesma família, e cujos valores, por exemplo de coordenadas de ponto de referência são únicos associados a cada elemento porta.

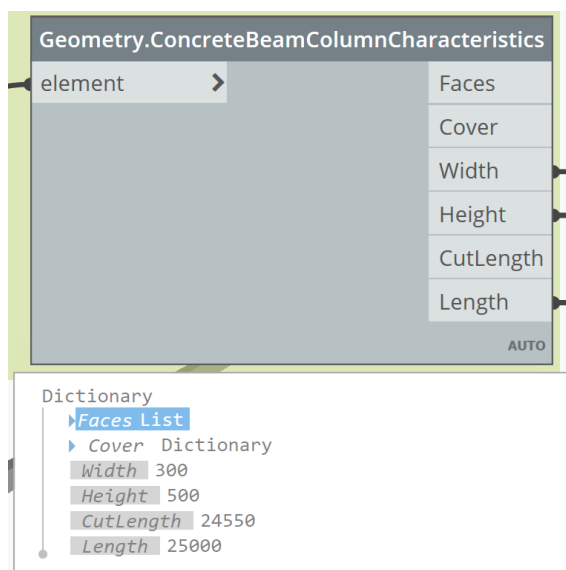
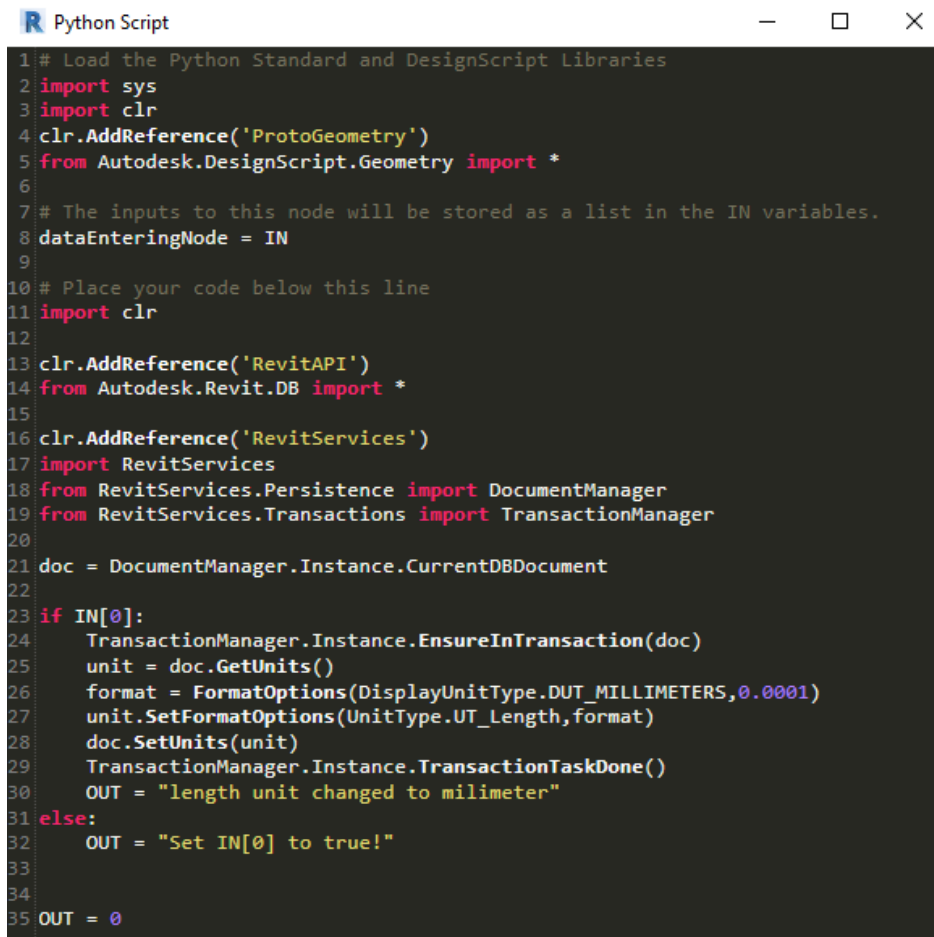


Figura 5.5 – Exemplo de dicionário como tipo de informação de saída do nó *Geometry.ConcreteBeamColumnCharacteristics* (Fonte: Autor).

Note-se que no exemplo de dicionário da Figura 5.5 cada parâmetro possui seu próprio tipo de informação. O elemento selecionado se trata de uma viga em betão armado. O nó utilizado fornece uma lista de faces (*Surface[]*), um dicionário de recobrimentos e os demais parâmetros sendo um inteiro (*integer*) cada. A seleção de mais de uma viga em betão armado implicaria em uma lista de dicionários.

5.6 SCRIPT PARA GARANTIA DE PROCESSAMENTO DE COMPRIMENTOS EM MILÍMETROS

Para melhor adaptação a diferentes possíveis configurações do Revit utilizado pela empresa, foi introduzido na ferramenta um script em Python no algoritmo desenvolvido. A finalidade do script é conter as primeiras funções a serem executadas, que acessam o modelo Revit associado e automaticamente alteram a unidade de comprimento para milímetros [mm]. A unidade foi adotada para tirar partido de trabalhar o algoritmo com parte da informação ser números inteiros (*integers*). O script é facultado na Figura 5.6 e requer como entrada exclusivamente um Booleano verdadeiro.



```

Python Script
1 # Load the Python Standard and DesignScript Libraries
2 import sys
3 import clr
4 clr.AddReference('ProtoGeometry')
5 from Autodesk.DesignScript.Geometry import *
6
7 # The inputs to this node will be stored as a list in the IN variables.
8 dataEnteringNode = IN
9
10 # Place your code below this line
11 import clr
12
13 clr.AddReference('RevitAPI')
14 from Autodesk.Revit.DB import *
15
16 clr.AddReference('RevitServices')
17 import RevitServices
18 from RevitServices.Persistence import DocumentManager
19 from RevitServices.Transactions import TransactionManager
20
21 doc = DocumentManager.Instance.CurrentDBDocument
22
23 if IN[0]:
24     TransactionManager.Instance.EnsureInTransaction(doc)
25     unit = doc.GetUnits()
26     format = FormatOptions(DisplayUnitType.DUT_MILLIMETERS,0.0001)
27     unit.SetFormatOptions(UnitType.UT_Length,format)
28     doc.SetUnits(unit)
29     TransactionManager.Instance.TransactionTaskDone()
30     OUT = "length unit changed to millimeter"
31 else:
32     OUT = "Set IN[0] to true!"
33
34
35 OUT = 0
  
```

Figura 5.6 – Exemplo de Script em linguagem Python desenvolvido para conversão das unidades de comprimento no Revit.

5.7 OBTENÇÃO E PROCESSAMENTO DA GEOMETRIA PROVENIENTE DO AMBIENTE BIM

A interface gráfica do Dynamo permite que o usuário pré-visualize boa parte da geometria associada a elementos importados do Revit. Alguns elementos não graficamente representados muitas vezes são vectores não constituintes de um objeto do tipo Sistema de Coordenadas. Inicialmente, verificou-se que a importação do sólido associado à viga em questão apresentava interrupções no espaço. Estas interrupções puderam também ser verificadas ao analisar a lista de faces constituída por 30 superfícies e não 6 como inicialmente desejado. A Figura 5.7 contém, em primeiro plano, diferentes nós para obtenção de parâmetros geométricos da viga e, em segundo plano, pré-visualização em ambiente Dynamo do sólido associado à viga importada.

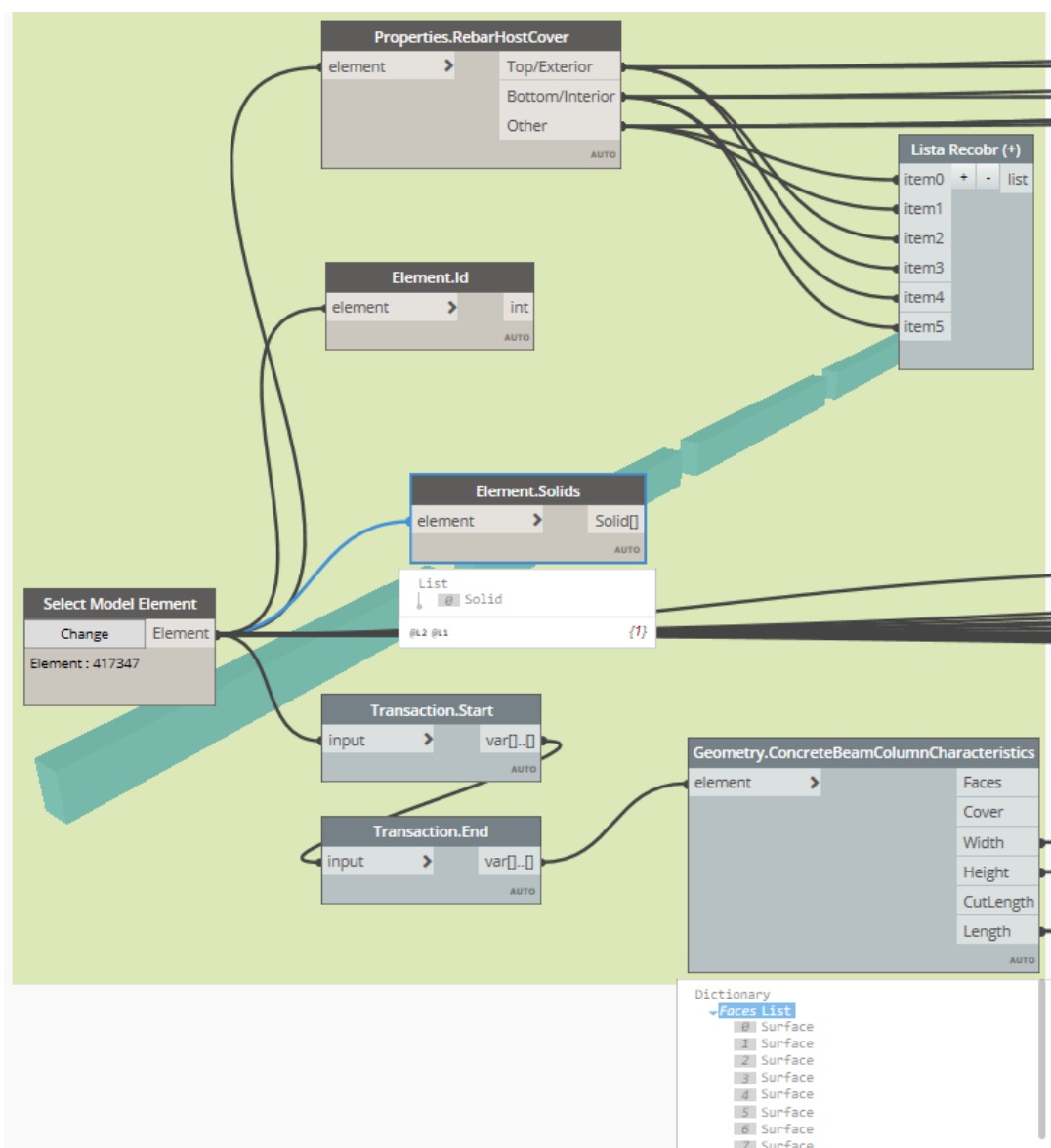


Figura 5.7 – Exemplo de informações inicialmente importadas pelo Dynamo a partir de seleção de elemento no Revit pelo usuário (Fonte: Autor).

Foi optado, portanto, por construir um sólido contínuo para obtenção das superfícies associadas às 6 faces envolventes da viga. Com o objetivo de minimizar a informação necessária a ser computada, chegou-se à solução de utilizar: (1) dimensões da secção transversal e (2) o nó *Element.GetLocation*, cuja saída para um elemento de viga é definido por uma linha (*Line*). Uma linha contém intrinsecamente um ponto inicial e um ponto final associados, independente da justificação espacial da viga em relação à esta linha. O critério do Revit de definição do ponto inicial é o primeiro a ter sido modelado e por definição a viga é justificada de maneira que a linha esteja contida e centrada na sua face superior. Desta maneira, também foi possível iniciar a determinação de sistema de eixos locais para referenciar a criação de outras geometrias de apoio até a criação das *linhas de referência* para geração de elementos de armadura (*Rebar*). A definição de eixos locais será abordada mais ao pormenor na secção a seguir.

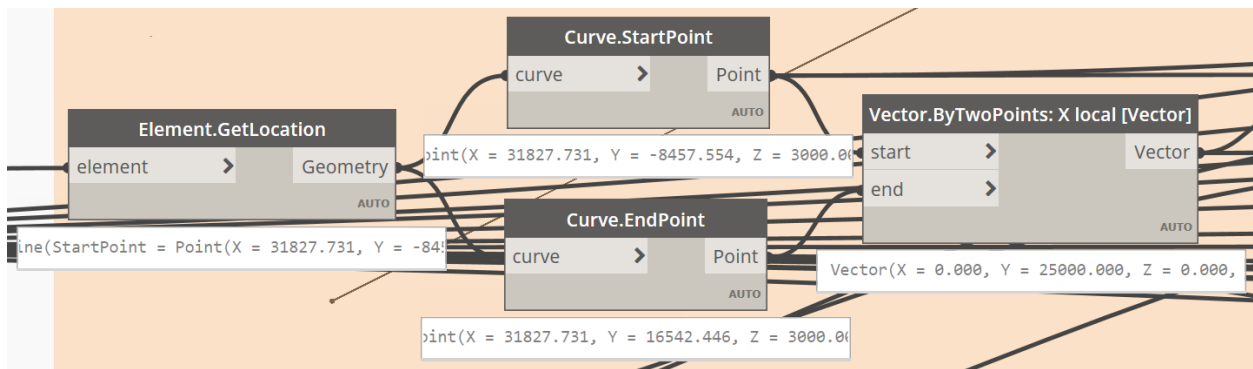


Figura 5.8 – Exemplo de nós envolvidos na obtenção de geometrias associadas à viga (Fonte: Autor).

O sólido pretendido é portanto criado a partir da extrusão de um retângulo (*Rectangle*); (*Curve*) ao longo da linha, com recurso aos nós representados na Figura 4.6. Desta maneira, pôde-se obter as 6 superfícies desejadas.

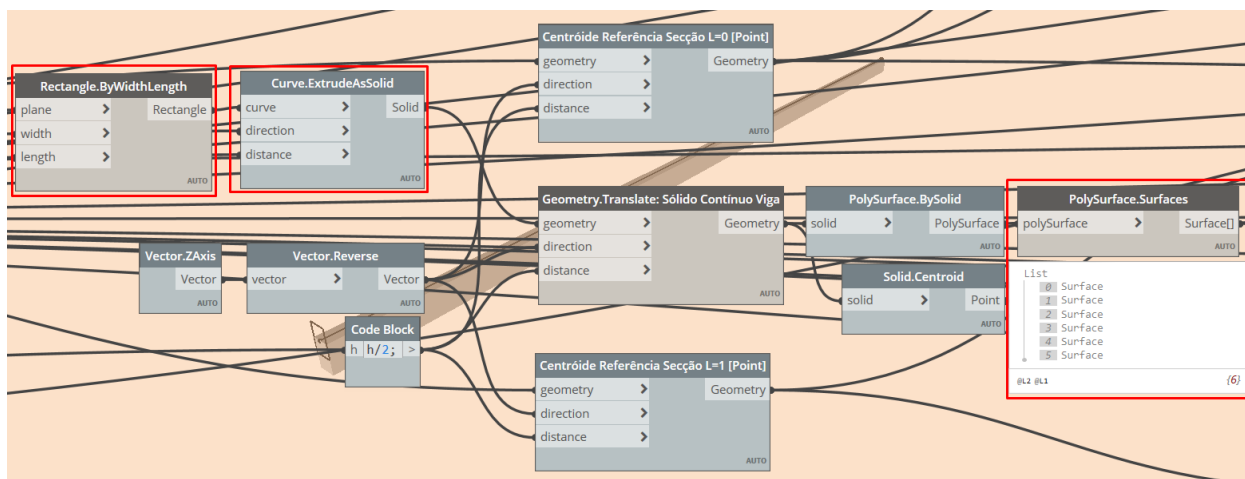


Figura 5.9 – Obtenção das seis superfícies envolventes da viga de secção retangular na ferramenta desenvolvida (Fonte: Autor).

5.7.1 Definição de eixos locais

Foi desenvolvido método para determinação de sistemas de eixos locais de acordo com qualquer orientação espacial da viga e que garanta perpendicularidade entre seus vectores constituintes. A parametrização com referenciais globais poderia comprometer o funcionamento da ferramenta desenvolvida para vigas inclinadas em relação a qualquer plano, sobretudo o que é correntemente o XY global por defeito no Revit. Foi determinado que: (1) o ponto de origem do sistema de eixos locais é o do centroide da superfície que representa a secção transversal inicial da viga; a secção transversal considerada como inicial da viga é aquela que contém também o ponto inicial (*Curve.StartPoint*) da linha de orientação da viga, (2) o eixo X seguirá paralelo ao eixo de maior dimensão da viga, representado por um vector (*Vector*) utilizando os pontos de criação da viga como ilustrado na Figura 4.15, (3) o eixo Z é representado pelo vector com início na origem local e fim no ponto mais próximo da origem pertencente à face superior; a face superior é definida a partir da ordenação decrescente das 6 superfícies de acordo com a coordenada Z global dos centroides de cada uma dessas superfícies, (4) o eixo Y é formado pelo produto vectorial entre o vector que representa o eixo X e o vector que representa o eixo Z. O produto vectorial no Dynamo segue a regra da mão direita, que se mostra uma forma confiável de garantir a criação de geometrias coerentemente da esquerda para a direita uma vez determinado o critério para o eixo X local.

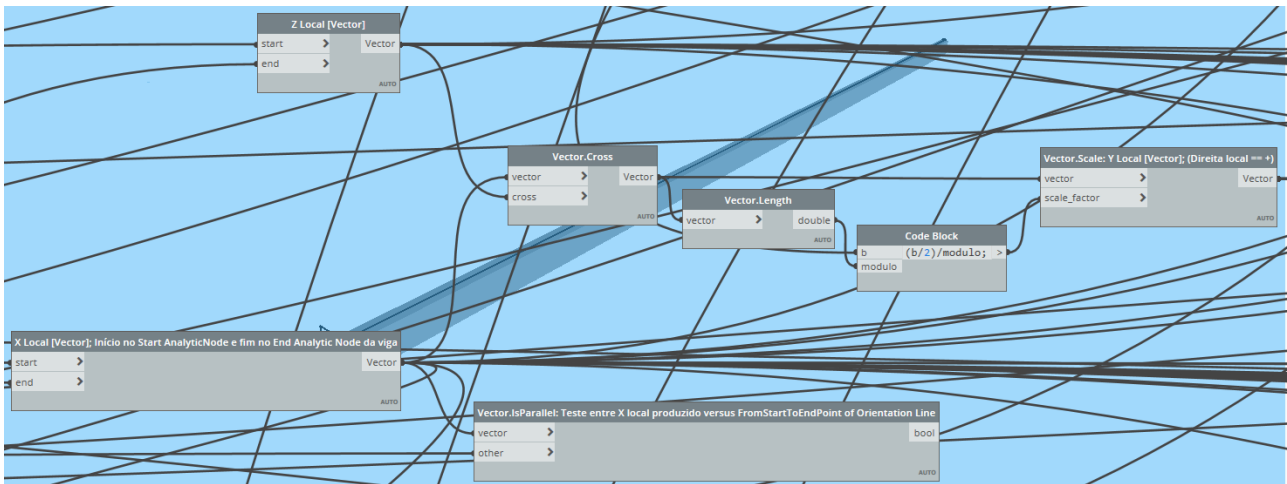


Figura 5.10 – Nós referentes aos vetores que determinam os eixos locais da viga na ferramenta desenvolvida (Fonte: Autor).

Com as 6 superfícies obtidas e origem e eixos locais definidos, têm-se em mãos o mínimo de informação necessária para ser geometricamente manipulada de acordo com as informações predominantemente numéricas provenientes da folha de cálculo. Através da seleção do elemento, também foi possível a obtenção dos recobrimentos. Essas informações, abordadas na próxima secção deste documento, permitem parametrizar a manipulação espacial das geometrias obtidas nessa parte do algoritmo de maneira a promover maior flexibilidade na alteração de projetos com a variação de qualquer uma das variáveis consideradas.

5.8 OBTENÇÃO E PROCESSAMENTO DA INFORMAÇÃO CONTIDA NA FOLHA DE CÁLCULO

Para interface com as folhas de cálculo utilizadas para dimensionamento de vigas em betão armado o Dynamo possui funções para acesso e importação da informação de ficheiros elaborados em MS Excel. A Figura 5.11 ilustra a importação de informação da folha denominada “Folha1” do ficheiro na extensão “.xlsx”.

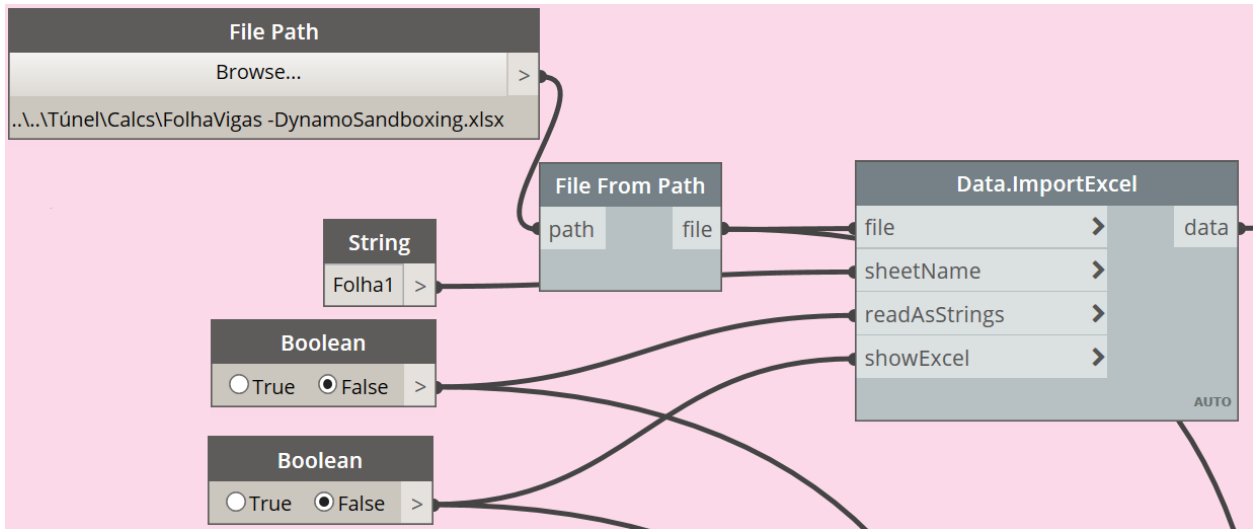


Figura 5.11 – Funções associadas à importação de ficheiros e folhas de cálculo Excel para o Dynamo (Fonte: Autor).

Optou-se por não importar as células das folhas de cálculo como listas cujos objetos fossem tipos de informação *String*, o que comprometeria o processamento de inteiros e outros números. Como as folhas facultadas tiveram previamente suas fórmulas e operações lógicas substituídas por seus resultados, caso não tivesse sido descaracterizada isto implicaria a importação de suas funções como caracteres de texto, o que geraria erro de funcionamento do algoritmo. Por defeito o Dynamo compõe a lista que representa a informação da folha de cálculo como colunas aninhadas em cada linha, por sua vez aninhadas à aba da folha de cálculo. Recorreu-se à informação de duas abas de um ficheiro Excel. Foi possível desenvolver o algoritmo sem a necessidade de criação de nova aba ou ficheiro de texto (puramente *strings*) para apoio ao funcionamento da ferramenta. Da primeira folha se extrai uma tabela de apoio ao dimensionamento de armaduras em que se define (1) a localização ao longo da viga de secções transversais de referência e (2) informações geométricas associadas às soluções de armadura determinada pela equipa de estruturas do projeto. Da segunda folha se extrai também uma tabela de auxílio à modelação das armaduras no Revit, em que se define dimensões de cotagem de acordo com a norma de pormenorização BS 8666:2005. Por proteção à propriedade intelectual da empresa, opta-se por não serem disponibilizadas imagens do ficheiro.

A manipulação da informação extraída em ambas folhas iniciou-se por assumir serem constantes ao longo de sua utilização (1) a célula de início da tabela de interesse e (2) as colunas da tabela de interesse. O objetivo em um primeiro momento foi desenvolver maneira de detectar o número de linhas introduzidas pelo usuário e obter uma lista por folha de cálculo que contém exatamente as células da

tabela. Na Figura 5.12 é possível observar a fragmentação da lista extraída diretamente de uma das folhas de cálculo através de diferentes nós.

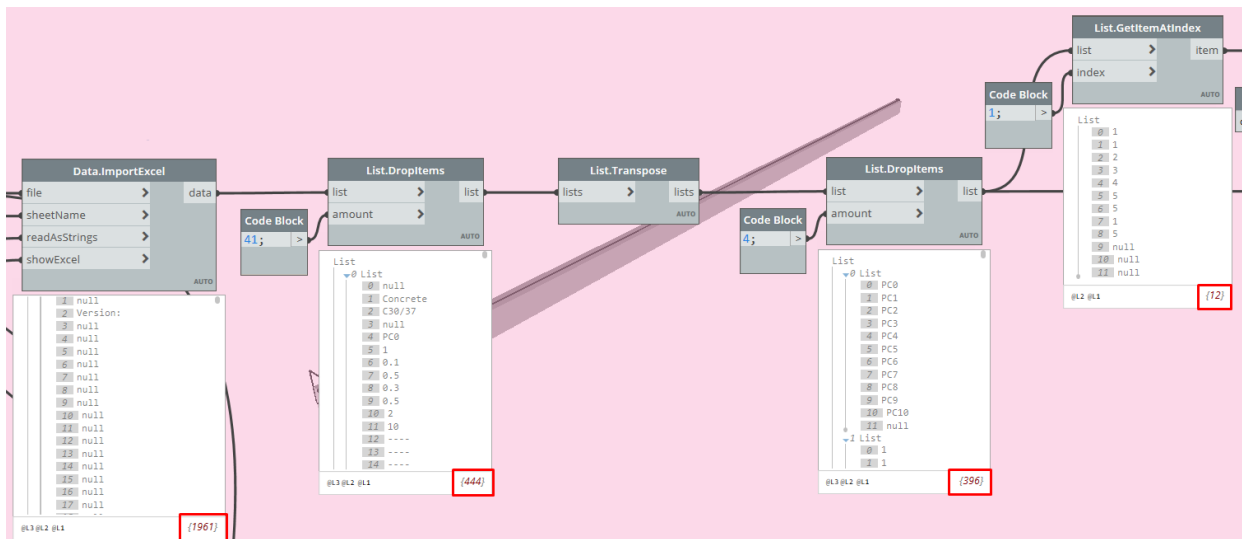


Figura 5.12 – Exemplo de fragmentação da informação extraída de uma folha de cálculo (Fonte: Autor).

A partir de padrões específicos associados à determinação de secções de análise e suas posições, bem como da introdução de informações pelo usuário, foi possível associar parametricamente listas específicas provenientes do Excel a *geometrias de construção* preparadas e a diferentes tipos de armadura.

5.9 CRIAÇÃO DE CURVAS E ELEMENTOS DE ARMADURA (*REBAR*)

O principal nó adotado para geração das armaduras é a função *Create.FromCurves*, representado na Figura 5.13, tanto para armaduras de esforço transversal quanto longitudinais. Verificou-se que o Dynamo modela de acordo com *linhas de referência* (*Sketch Lines*) cotadas a partir da projeção dos eixos dos segmentos rectos dos varões. Esse fator tornou desnecessária a etapa 4 do fluxo de trabalho apresentado na figura 4.10. O Dynamo accede à biblioteca corrente de barras e normas técnicas selecionadas no Revit e modela as armaduras a partir das curvas de entrada e os demais parâmetros.

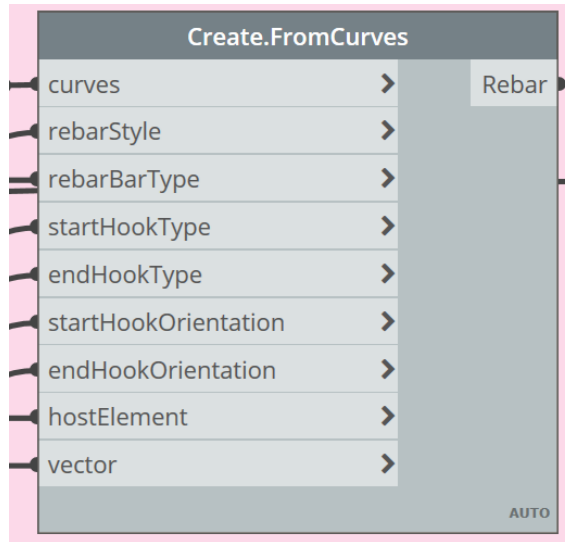


Figura 5.13 – Função de criação de armaduras a partir de curvas de entrada.

Note-se que o nó depende de um vector associado. Isso se deve ao fato de o Revit ser mais preparado para computar elementos de armadura cujas *linhas de referência* são contidas em um único plano, uma vez que um plano deve ter intrínsecamente associado um vector normal também na definição em código do Dynamo. Esse vector também auxilia na distribuição de armaduras ao longo de uma direção como será abordado adiante. A Figura 5.14 ilustra a conversão automática das denominadas “*Sketch Lines*” em representação de barra dobrada de acordo com diâmetro mínimo do mandril estipulado na EN 1992 1-1.

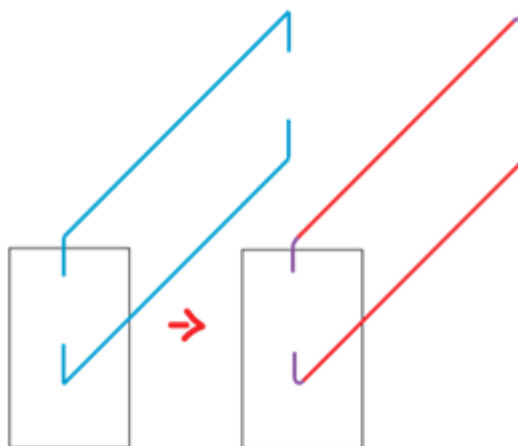


Figura 5.14 – Ilustração do tratamento das curvas de entrada do nó *Create.FromCurves* (Fonte: Autor).

Todas as *Sketch Lines* para cada grupo de armaduras foram centradas na posição e orientação da superfície que representa a secção transversal na posição x_{local} transladada a partir da superfície localizada em $x_{local}=0m$.

5.9.1 Curvas associadas a estribos

Para elaboração das curvas para geração de estribos (tendo sido estes a solução como armadura transversal), foi criado um retângulo (quatro linhas que se interstam somente em seus pontos extremos e cujos ângulos internos são 90 graus) a partir do nó *Designs.StirrupShapeCurves*. Dimensões dos segmentos foram determinadas a partir das dimensões da secção transversal, recobrimentos e diâmetro do estribo, conforme representado na Figura 5.15.

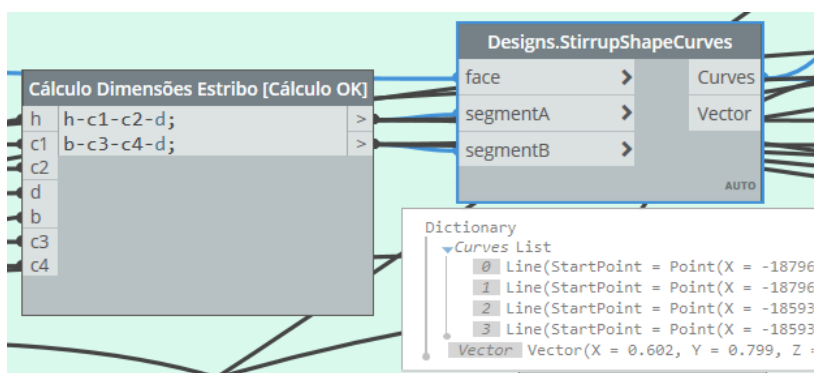


Figura 5.15 – Exemplo de criação de curvas como entrada na geração de armaduras (Fonte: Autor).

5.9.2 Curvas associadas a armaduras longitudinais

Foi definido que as armaduras longitudinais seriam criadas da esquerda para a direita local – ou ainda, pelo vector (*vector*) y_{local} , tal que o domínio de y_{local} é $[-b/2; +b/2]$ onde b é a largura da viga em mm – de uma secção transversal e à partir de curvas (*curves*) e policurvas (*polycurve[]*) denominadas de *curvas de base*, para melhor controlo das entradas da função *Create.FromCurves*. Com o objetivo de garantia de melhor precisão e facilidade de distribuição de varões no espaço (tópico abordado posteriormente neste documento) foram definidas, como *geometria de construção* das *Sketch Lines* a serem declaradas como armaduras longitudinais, uma *Linha de referência (line)* associada às armaduras superiores e outra associada às inferiores. Ambas as *Linhas de referência* foram criadas contidas na superfície (*surface*) associada à secção transversal $x_{local}=0$ e representam a cota e as posições de afastamento válidas para eixos de armaduras em uma secção transversal, subtraídas as dimensões associadas às armaduras

principais que são modeladas anteriormente de acordo com a primeira opção contemplada para geração das *Curvas finais*.

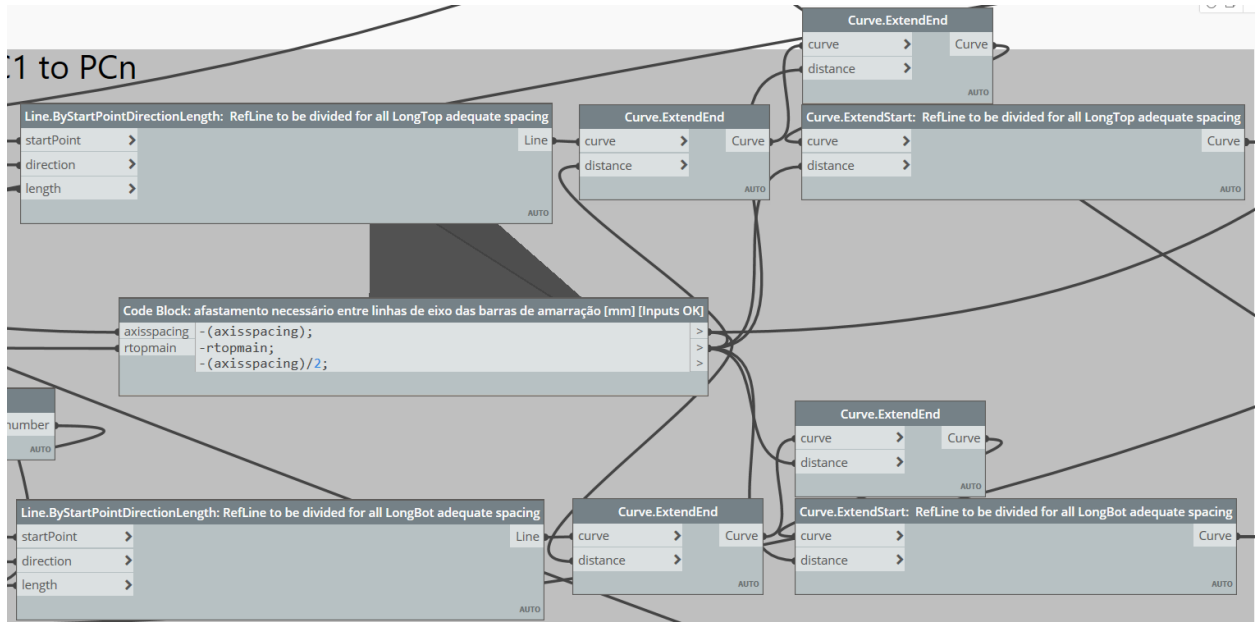


Figura 5.16 – Funções e bloco de código associados à criação de *geometria de construção* das *Curvas finais* na ferramenta desenvolvida.

A criação dessas *Linhas de referência* permite o desenvolvimento de uma abordagem sistemática de distribuição de todas as armaduras longitudinais a serem adequadamente dispostas em secções transversais mais condicionantes espacialmente, como apresentaram-se as secções associadas às intersecções da viga com pilares extremos e zonas de reforços. Foi utilizado um par de geometrias definido por (1) a superfície (*surface*) da secção transversal associada a $x_{local}=0$ e (2) uma das *Linhas de referência* (*line*). A Figura 5.17 representa (1) e ambas *Linhas de referência* possíveis de (2) em azul.

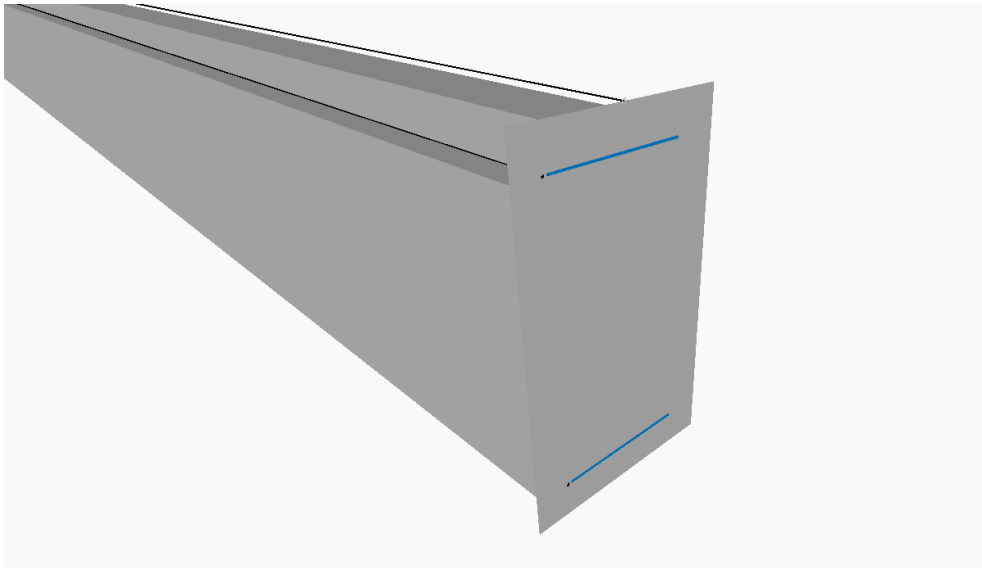


Figura 5.17 – Representação gráfica em ambiente de desenvolvimento das *Linhas de referência* para disposição das armaduras de reforços longitudinais superiores e inferiores.

A alternativa explorada foi de utilizar o par de geometrias definido anteriormente para controlar a posição da secção condicionante em questão e futuramente permitir a automatização de geração de vistas de secções transversais – como será abordado na secção de Desenvolvimentos Futuros deste documento. Transformações de translação deste par de geometrias inicial ao longo do vector (*vector*) que define *xlocal*^{*} permitem uma facilitada criação de linhas perpendiculares à cada superfície associada a uma secção condicionante. Por fim, foi definido que as *Linhas de referência* em cada par de geometria seria dividida em pontos de acordo com o número de barras previsto em cada secção, conforme extraído de folha de cálculo. Esses pontos podem ser utilizados como forma inteligente de eventual ajuste necessário da disposição das barras devido a conflitos geométricos inesperados aquando da geração de elementos *Rebar* ou definição de sua disposição via alguma função do tipo *Layout* que serão abordadas mais em específico em 4.3.9.6 deste documento.

i. **Reforços longitudinais superiores**

As linhas anteriormente definidas foram usadas como solução de base das *Curvas finais* para reforços constituídos por varões retos simples (*ShapeCode=00* conforme BS8666:2005, representado na Figura 5.18) e foram posicionadas de maneira que suas intersecções com as superfícies de cada par associado (*Point*) coincidam com o lugar geométrico (*Point*) entre os pontos de início (*startPoint*) e de fim (*endPoint*) de cada linha (“centradas” nas superfícies associadas). Desta maneira foi possível utilizar a

dimensão A proveniente da folha de cálculo (tal que $A=l_{total}$ [m]) como entrada (*double*) final de uma função *Line.ByStartPointDirectionLength* que cria as linhas que definem as *Curvas finais - Sketch Lines* para os nós associados à geração de reforços típicos de armaduras longitudinais para flexão. A Figura 5.19 representa em azul exemplos gráficos das *Sketch Lines* produzidas pelo algoritmo desenvolvido para adequada modelação das armaduras de acordo com o *Shape Code* 00.

Table 3 - Standard shapes, their method of measurement and calculation of length

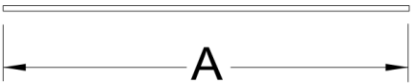
Shape Code	Shape Diagram	Total Length of Bar, L measured along centre line
00		A

Figura 5.18 - *Shape Code* 00 adotado para referência de armaduras longitudinais principais (Fonte: BSI).

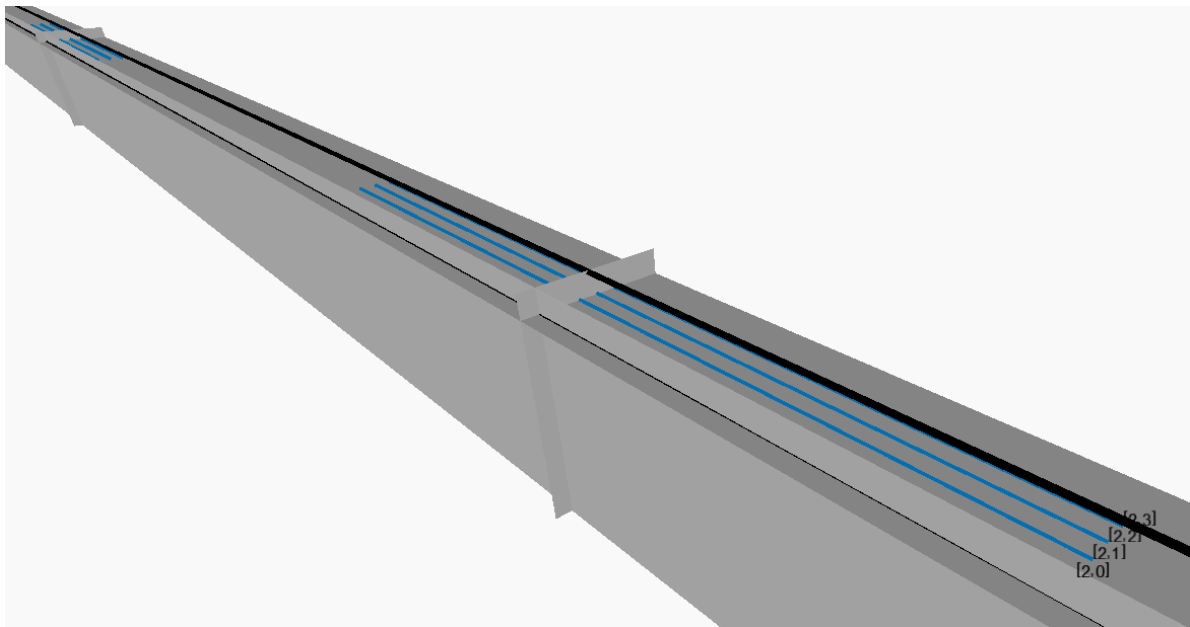


Figura 5.19 – Representação em ambiente de desenvolvimento de *Sketch Lines* para geração de reforços longitudinais superiores cujo *Shape Code* = 00.

ii. Armaduras longitudinais principais

De modo diferente às curvas necessárias para geração de estribos (*ShapeCode 00*), a criação de curvas para entrada na geração de armaduras longitudinais que amarram nos apoios – as quais também recorrem ao nó *Create.FromCurves* - envolveu a intersecção entre duas Superfícies (*surface[]*). Em termos de *Shape Grammars* e a exemplo específico da armadura longitudinal superior, foram utilizadas quatro superfícies (*s1* a *s4*) e três vectores para gerar uma linha e dois pontos (*s5* a *s7*), através de quatro transformações de translação (τ_1) e três de intersecção (τ_2). As superfícies, que representam as faces superior e esquerda e as secções transversais inicial e final da viga (referencial local previamente definido) são respectivamente transladadas em direção ao centro de massa (função *Solid.Centroid*) da viga. A primeira intersecção é entre as superfícies superior e lateral esquerda transladadas, que gera a linha *s5*, ou ainda $\tau_2(\tau_1(s1) \bullet \tau_1(s2)) \rightarrow s5$. A segunda intersecção é entre a linha *s5* e as superfícies *s3* e *s4*, de maneira que $\tau_2(s5 \bullet \tau_1(s3)) \rightarrow s6$ em paralelo com $\tau_2(s5 \bullet \tau_1(s4)) \rightarrow s7$. A Figura 5.20 representa o resultado gráfico em ambiente Dynamo, sendo as superfícies em cor cinza, a linha proveniente da intersecção em azul e pontos em negro, sendo ainda possível visualizar acima em negro a linha de orientação original.

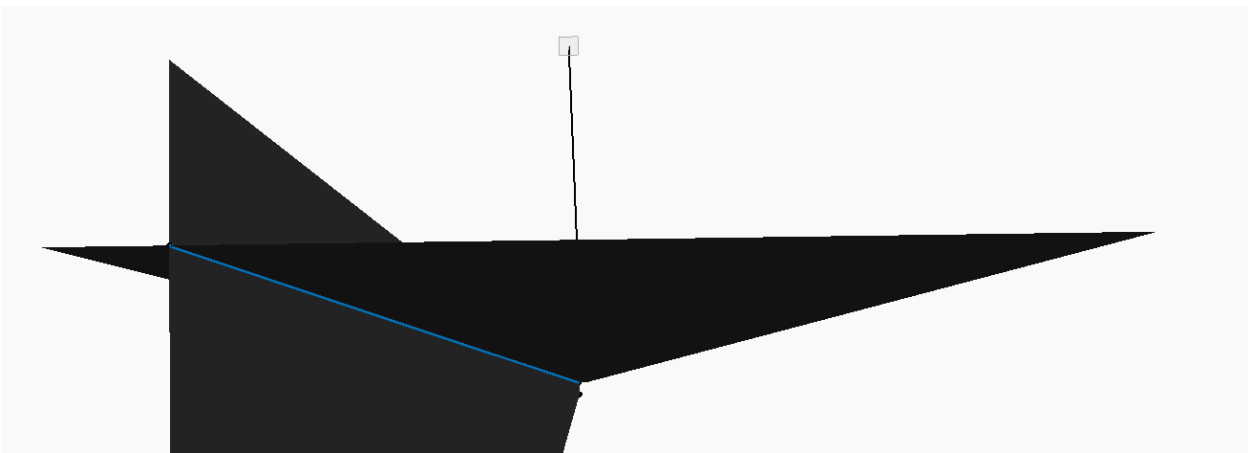


Figura 5.20 – Representação gráfica da geração de geometrias a partir de transformações de forma parametrizadas (1/2) (Fonte: Autor).

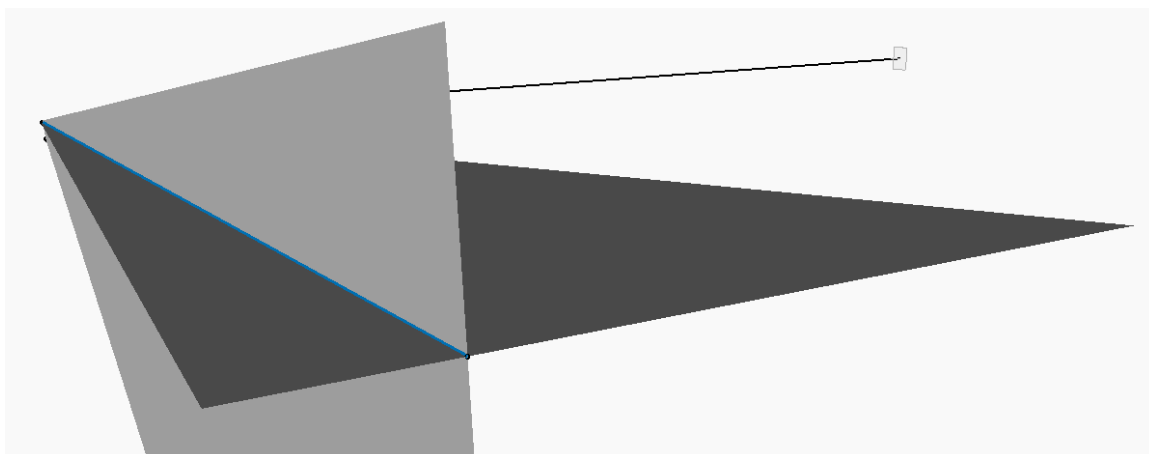


Figura 5.21 – Representação gráfica da geração de geometrias a partir de transformações de forma parametrizadas (2/2) (Fonte: Autor).

As transformações de translação (τ_1) foram representadas pela função *Geometry.Translate* no Dynamo, cujas distâncias são computadas por blocos de código como os à esquerda na Figura 5.22. Esses blocos de código (*Code Block*) permitem ao desenvolvedor tanto executar e manipular funções quanto inserir fórmulas matemáticas cujas saídas podem ser números (*double*). A direção da translação deve ser também entrada do nó na forma de um vector (*Vector*), sendo utilizados respectivamente o eixo Y_{local} e Z_{local} para as superfícies que representam as faces esquerda e superior da viga.

A segunda transformação de formas parametrizadas adotada (τ_2), representada pela função *Geometry.Intersect* (enquadradas em vermelho na Figura 5.22), é aplicada três vezes, cada uma com um único par de formas. Foi verificado que, como esperado, a intersecção entre as duas superfícies geraram uma linha, e as intersecções entre uma superfície e uma linha geraram um ponto. Em suma, o conjunto de transformações aplicadas às geometrias extraídas do elemento Revit é apresentado na Figura 5.22.

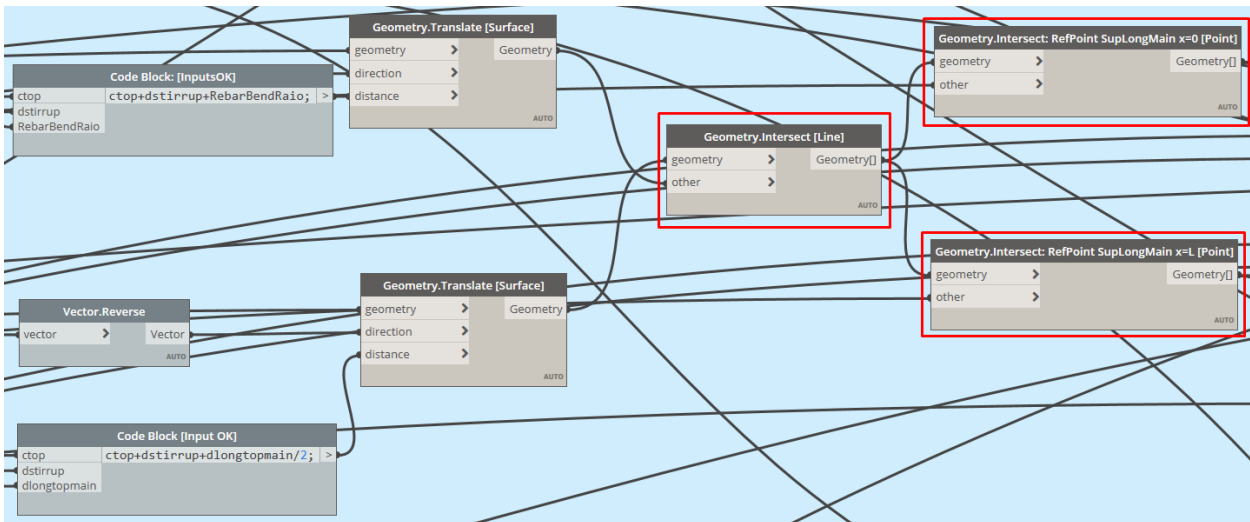


Figura 5.22 – Criação de *geometrias de construção* a partir de intersecções Booleanas entre *Formas Iniciais* (Fonte: Autor).

A partir dos pontos obtidos nesta etapa da rotina, procede-se à criação das *Curvas finais*. Foi admitido que as armaduras longitudinais principais correntemente seriam de acordo com o *Shape Code 21* da BS 8666:2005 representado na Figura 5.23.

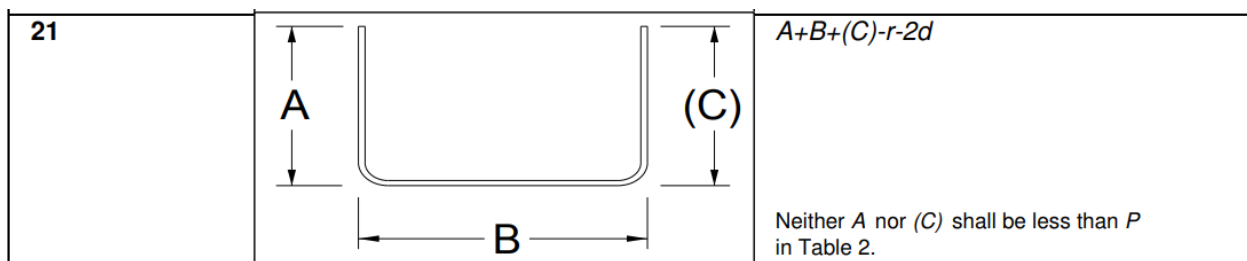


Figura 5.23 – *Shape Code 21* adotado para referência de armaduras longitudinais principais (Fonte: BSI).

Na folha de cálculo referente à representação em tabela de pormenorização de acordo com as dimensões consta a discriminação de armaduras por (1) secção transversal de análise e (2) tipo de reforço (estribos, longitudinal superior ou longitudinal inferior). Esse par de informações foi interpretado como forma de determinar o número de cópias da superfície da secção transversal inicial que serve de base para adequada posição de criação de reforços.

Os pontos obtidos conforme representado na Figura 4.25 são os vértices que concorrem conceptualmente as dimensões A, B e C da forma representada na Figura 4.26. Foi verificado que o nó *Create.FromCurve* identifica os segmentos rectos de suas curvas de entrada e corrige as discontinuidades geométricas por segmentos de arco com diâmetro mínimo de mandril de acordo com o EC2 (conforme configurado no Revit). Foi interpretado que para boa parte da geometria de armaduras correntes, esse aspecto permite a modelação de linhas rectas cujos comprimentos são congruentes às dimensões de entrada provenientes da folha de cálculo.

Desta maneira, foi possível a criação de três linhas rectas com as respectivas dimensões A,B e C. A recta da dimensão B foi definida utilizando o nó *Line.ByStartPointEndPoint*, cujas entradas são um ponto de início e um ponto de fim. Para este fim, foram utilizados os dois pontos de referência, sendo o de início o mais próximo do ponto de início da viga. Para os segmentos A e C recorreu-se ao nó *Line.ByStartPointDirectionLength*, uma vez que este nó aproveitaria melhor os comprimentos de amarração diretamente como um número (*double*). Esta forma de definir rectas do Dynamo depende de (1) um ponto de início (*Point*), (2) um vector direção (*Vector*) e (3) um comprimento (*double*). Desta maneira, foi definido que (1) o ponto de início para cada segmento é o respectivo ponto de referência mais próximo, sendo o segmento A adotado como mais próximo do início da viga, (2) o vector de cada segmento foi obtido através de dois pontos pelo nó *Vector.ByTwoPoints*, sendo o ponto inicial do vector o ponto inicial do segmento e o ponto final sendo o ponto contido na superfície da face oposta à armadura a ser modelada que mais esteja próximo do ponto inicial (para a definição sistêmica deste ponto foi utilizado o nó *Geometry.ClosestPointTo*) e (3) o comprimento da linha a partir da dimensão do segmento proveniente da folha de cálculo. Na Figura 5.24 é possível observar os nós referidos, bem como o nó *Curve.Join* que é utilizado para união das linhas dos segmentos A e B e também da Policurva (*Polycurve*) AB (resultado da união de curvas (*Curves*) no Dynamo) com a linha do segmento C. Desta maneira obtém-se o definido anteriormente neste documento como Curva Final, que é utilizada como entrada para geração de armadura.

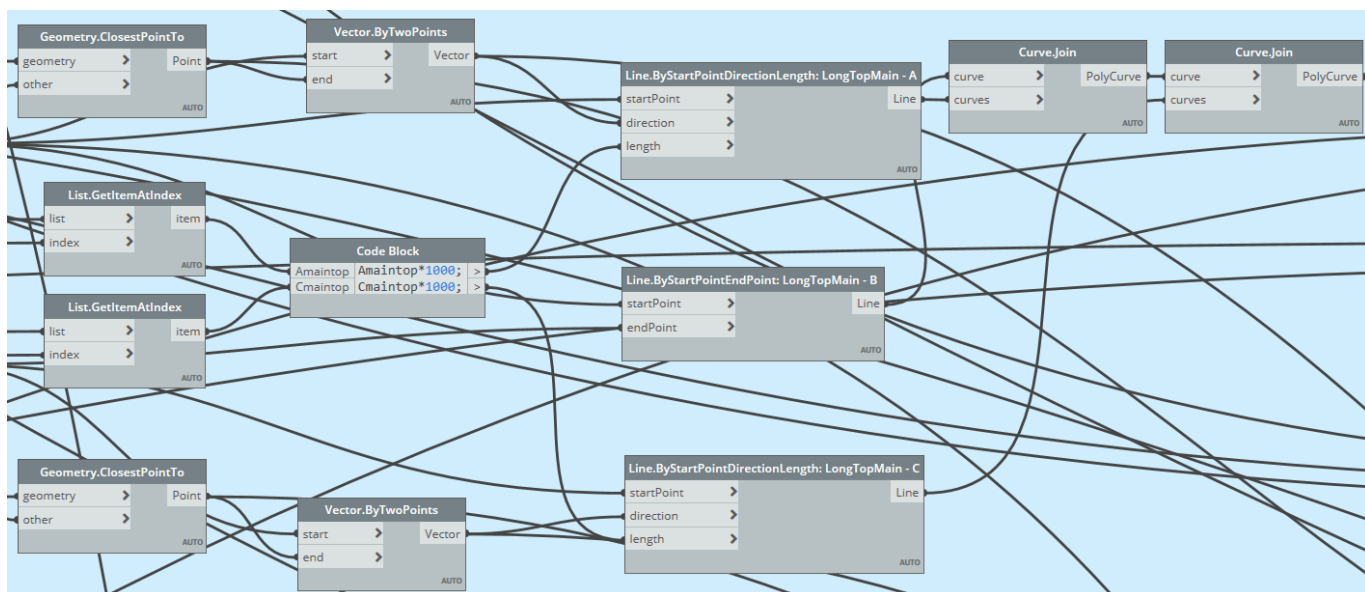


Figura 5.24 – Nós para criação de Curva Final utilizada para criação de armadura longitudinal principal superior (Fonte: Autor).

5.10 PARÂMETROS BIM ASSOCIADOS AOS VARÕES

Após a definição das curvas de entrada, os dois parâmetros de entrada a seguir são o (*rebarStyle*) e o (*rebarBarType*). O objeto (*rebarStyle*) ou estilo de barra define-se como a classificação da armadura quanto à função de estribos (*Stirrup*) ou não (*Standard*). (*rebarBarType*) ou tipo de barra define-se como a classificação do varão e seus parâmetros associados quanto às Famílias de varões carregadas no modelo BIM pelo usuário. Foi definido durante a realização do algoritmo que seria uma estratégia efectiva explorar o objeto (*rebarBarType*) para atribuição de propriedades de sólido - como diâmetro e massa específica - cruciais para a automatização do processamento de informação BIM relevante. O (*rebarBarType*) é um parâmetro em que se contém a propriedade (*rebarBarDiameter*) como (*double*) associado a cada elemento das Famílias de (*rebarBarType*) carregadas pela equipa de projeto. Foi desenvolvida maneira de aproveitamento de diâmetro dos varões em milímetros provenientes das folhas de cálculo como (*double*) de entrada para determinação do (*rebarBarType*) associado a cada nó *Create.FromCurves*.

5.10.1 Amarrações e seus parâmetros BIM

As amarrações, denominadas *Hooks* no Revit, são definidas em sua API e estão associadas a elementos *Rebar*, inclusive na função utilizada para a criação de armaduras. São definidas a partir dos pontos extremos das curvas e/ou policurvas declaradas como entrada para criação de armadura e suas

propriedades são diretamente associadas ao elemento *Rebar* a ser criado. A geometria final de elementos de armadura é automaticamente detetada e traduzida pelo Revit como *Shape Code* associado a cada elemento ou Conjunto de Armaduras – *RebarSet*. Esta atribuição automática de parâmetro aos elementos de armadura permite a contagem e discriminação de quantidades de armadura em termos de peças prontas à montagem pré-betonagem. O *Shape Code* segue os códigos de normas configurados pelo usuário aquando da criação do modelo BIM, como por exemplo o *Shape Code* 21 da BS 8666:2005 da figura 4.26 adequadamente associado no Revit no presente estudo de caso. A adequada deteção dos *Shape Codes* permite a geração automática de tabelas de dobragem e corte dos varões; a geração de tabelas de quantidades será abordada posteriormente neste documento. Ao utilizar o Revit para modelação BIM de armaduras é necessário definir se as amarrações modeladas são contabilizadas para deteção automática do *Shape Code*, dentre outros aspectos informacionais do programa. Foi definido que a geometria (*Curves*) de entrada da função de geração de armadura *Create.FromCurves* incluiria eventuais amarrações para maior controlo da geometria final das armaduras modeladas. Com este objetivo, optou-se por conjugar (1) definir nas configurações de armaduras do Revit que se incluiria as amarrações na definição da *Rebar Shape* (forma da armadura), que leva à atribuição de valor do *Shape Code* e (2) que na função de geração das armaduras não se recorreria a declarar *Hooks*, cumprindo-se assim o objetivo. A respeito dessa última definição, envolve-se a definição de diferentes entradas associadas a amarrações de maneira adequada. Na Figura 5.25 expõe-se a definição de (1) desta secção e em seguida serão abordadas as demais entradas associadas às amarrações comentadas a partir de (2) desta secção.

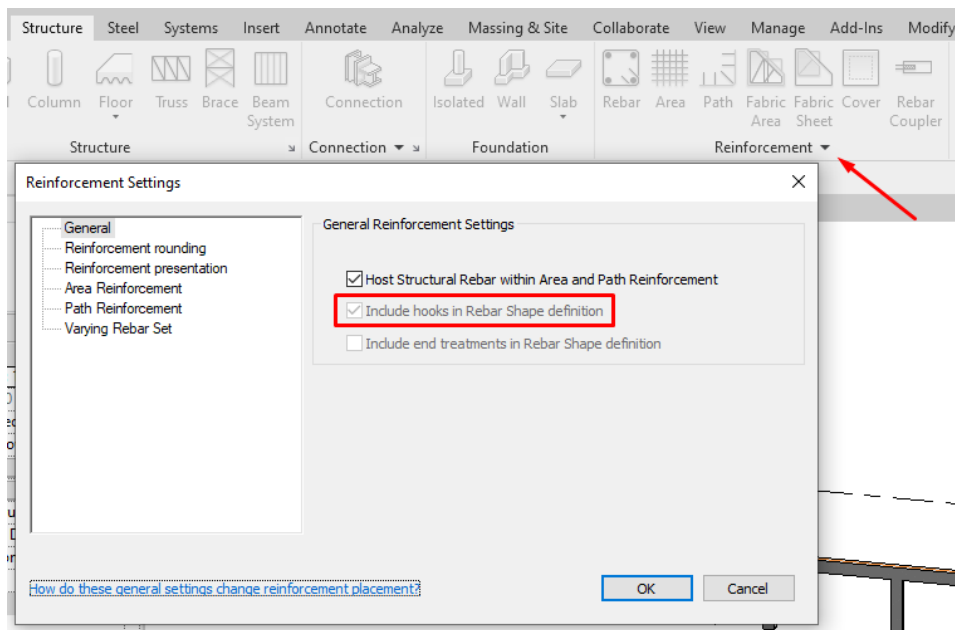


Figura 5.25 – Definições gerais de armaduras selecionadas no modelo Revit para desenvolvimento da ferramenta.

As entradas relacionadas com a definição das amarrações

- (*startHookType*) – tipos de amarração são definidos de acordo com o ângulo de dobra estipulado, como 135° ou 90° para estribos ou outras opções previamente carregadas como bibliotecas pelo usuário. As funções de amarrações (*startHook*) e (*endHook*) não foram utilizadas, tendo sido definida como (*None*);
- (*endHookType*) – também definido como (*None*);
- (*startHookOrientation*) – definido como a orientação entre (*Left*) ou (*Right*) da amarração do início da barra, neste caso relevante somente para estribos;
- (*endHookOrientation*) – também definido como como a orientação entre (*Left*) ou (*Right*) porém da amarração do fim da barra, neste caso relevante somente para estribos

A Figura 5.26 ilustra as definições de armadura e amarrações na API do Revit.

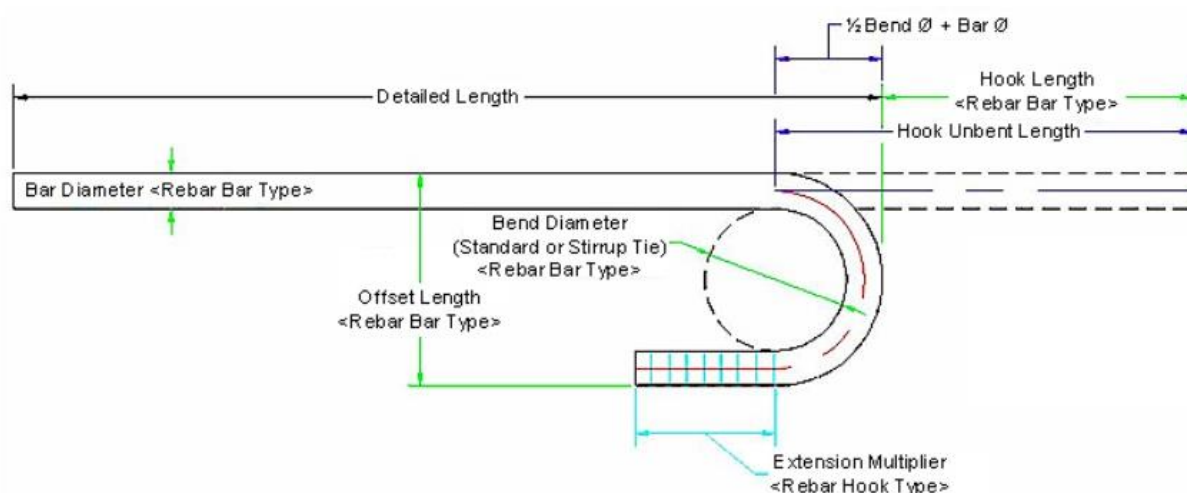


Figura 5.26 - Representação das definições de armadura e amarrações na API do Revit.

5.10.2 Demais entradas para criação de armaduras

Tendo sido definidas as curvas (*Curves*) de entrada do nó *Create.FromCurves*, suas demais entradas para adequada definição de armaduras serão abordadas nesta secção.

As entradas restantes do nó *Create.FromCurves* são os parâmetros (*hostElement*) e (*vector*). Desses, o primeiro é definido como o elemento hospedeiro da armadura a ser modelada e consiste no elemento selecionado pelo usuário aquando da utilização da ferramenta. Desta maneira o usuário deve selecionar um elemento hospedeiro elegível de acordo com o abordado na secção 3.10.1 deste documento. Por fim, o vector (*vector*) consiste em um vector perpendicular ao plano que contém as curvas a serem modeladas. Como são sempre possíveis mais de uma orientação dos eixos locais declarados de uma superfície, é necessário definir uma das duas direcções válidas para cada superfície plana. Esse vector também tem relevância por ter sido verificado que é o utilizado para criação de distribuições da armadura originalmente modelada para constituição do número adequado de barras, como será abordado a seguir neste documento.

5.10.3 Disposição de armaduras no espaço

O desenvolvimento de rotinas que acompanhem diferentes possíveis intersecções entre barras, por exemplo em uma secção transversal e também nas extremidades de elementos lineares, tem complexidade acrescida ao ser levado em consideração a sucessão de partições de comprimentos e posições disponíveis. Sobretudo ao considerar que foi evitado envolver análise de intersecção de sólidos devido a grande acréscimo da capacidade computacional exigida por esta via de modelação. Neste

aspecto no presente trabalho optou-se portanto por explorar e verificar formas mais eficientes de copiar e distribuir geometrias *Sketch Lines* a ser levado em consideração aspectos de adequada preservação e processamento da informação BIM para otimização do projeto de estruturas.

No caso da viga em questão, nas secções transversais de intersecções intermediárias com os pilares haveria a necessidade de compatibilização, por exemplo, ao modelar armaduras longitudinais superiores de reforço - entre essas e a já modelada armadura longitudinal superior principal. Ao passo que nas secções transversais extremas haveria não somente a necessidade de compatibilidade entre armaduras longitudinais superiores entre si, porém também com as inferiores devido aos comprimentos de amarração.

Para criação das armaduras considerou-se como primeira opção introduzir curvas associadas a somente uma única barra e posteriormente aplicar parâmetros associados à replicação de um elemento *Rebar* replicado para distribuição de armaduras. Outra opção também explorada consistiu em previamente gerar todas as curvas de um grupo de barras e declará-las como uma lista de curvas de entrada. Foram exploradas ambas opções para avaliação do impacto na geração de tabelas de quantitativos abordada posteriormente neste documento.

A primeira opção contemplada foi adotada para todos os estribos, para as armaduras principais longitudinais (abordados em 4.3.9.2.2) e para os reforços à flexão positivos para resistência ao sismo situados a partir da intersecção com pilares extremos. A segunda opção contemplada foi adotada para os reforços negativos nas intersecções com pilares intermédios tendo sido previsto que a armadura à flexão principal positiva absorveria os esforços solicitantes inclusive a meios-vãos, não sendo necessário contemplar distribuição de reforços longitudinais positivos típicos. A representação das armaduras em interface gráfica não permitiria meramente visualmente verificar as consequências de cada opção de criação de *Curvas finais* na geração automática de mapas de quantidades, tópico que será abordado posteriormente neste documento.

Para realização da segunda opção, sumarizada na declaração de curvas no Dynamo foram, portanto, gerados tantos pontos quanto o número de barras a ser modelado em cada grupo de barras. A partir destes pontos foram geradas as *Curvas finais* de entrada para geração das armaduras aplicáveis.

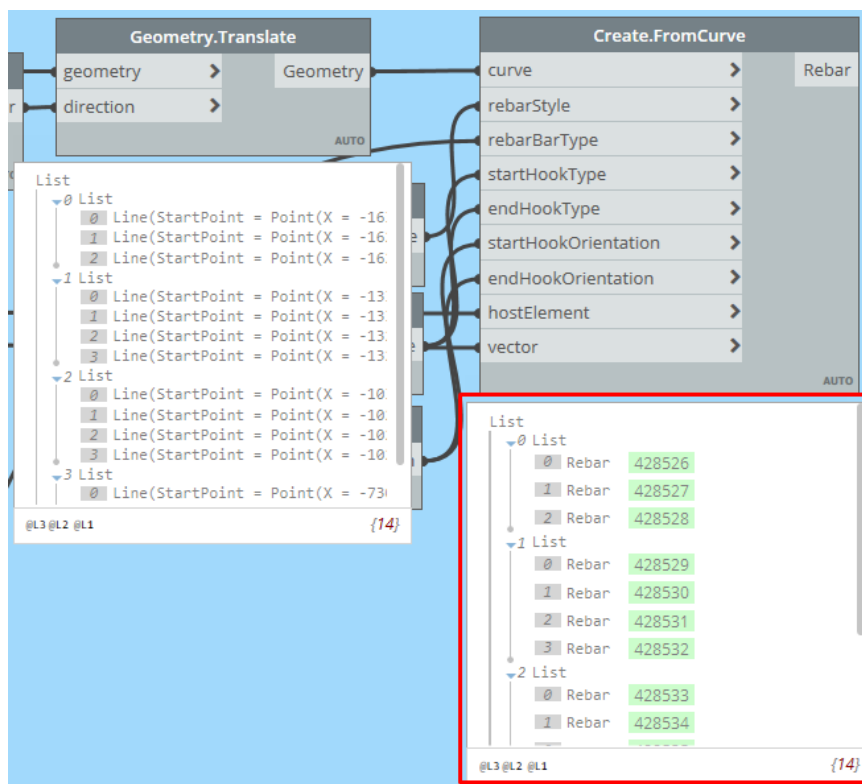


Figura 5.27 – Exemplo de criação de armaduras por listas de eixos de barras no Dynamo (Fonte: Autor).

Outro fundamento para o recurso às *Linhas de referência* estarem, portanto, associadas e contidas nas secções condicionantes na disposição de armaduras, jaz na oportunidade de eventual desenvolvimento de secções do algoritmo dedicadas à correção da posição das *Sketch Lines* baseada em regras. A Figura 5.28 representa parte dos nós e um bloco de código envolvidos no posicionamento de *Linha de referência*.

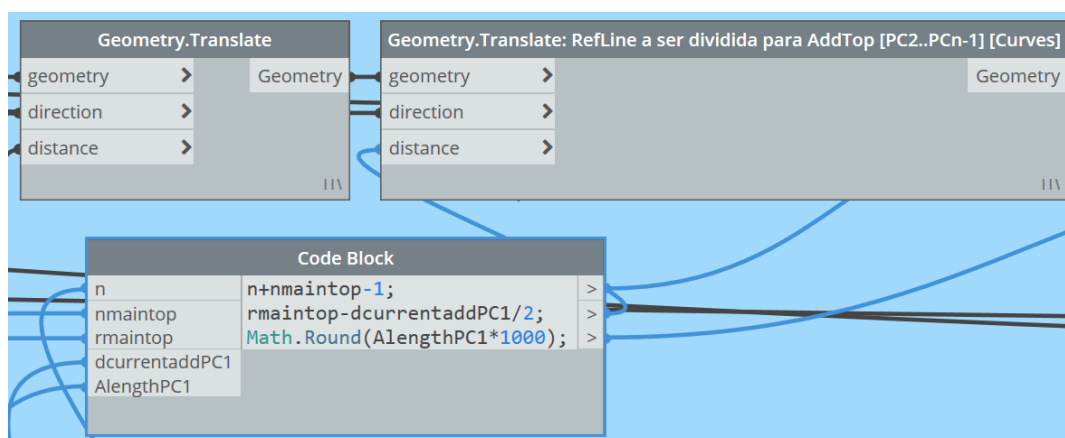


Figura 5.28 – Parte das funções e bloco de código que definem *Linhas de referência* na ferramenta desenvolvida.

Para a realização da primeira opção de disposição de armaduras no espaço recorreu-se a funções do tipo *Layout*, como o *Layout.SetLayoutAsFixedNumber* destacado na Figura 5.29. Essas funções representam diferentes maneiras de declaração da disposição de barras em grupos de armaduras, como de acordo com o número exato desejado de barras, ou espaçadas ao longo de um dado comprimento.

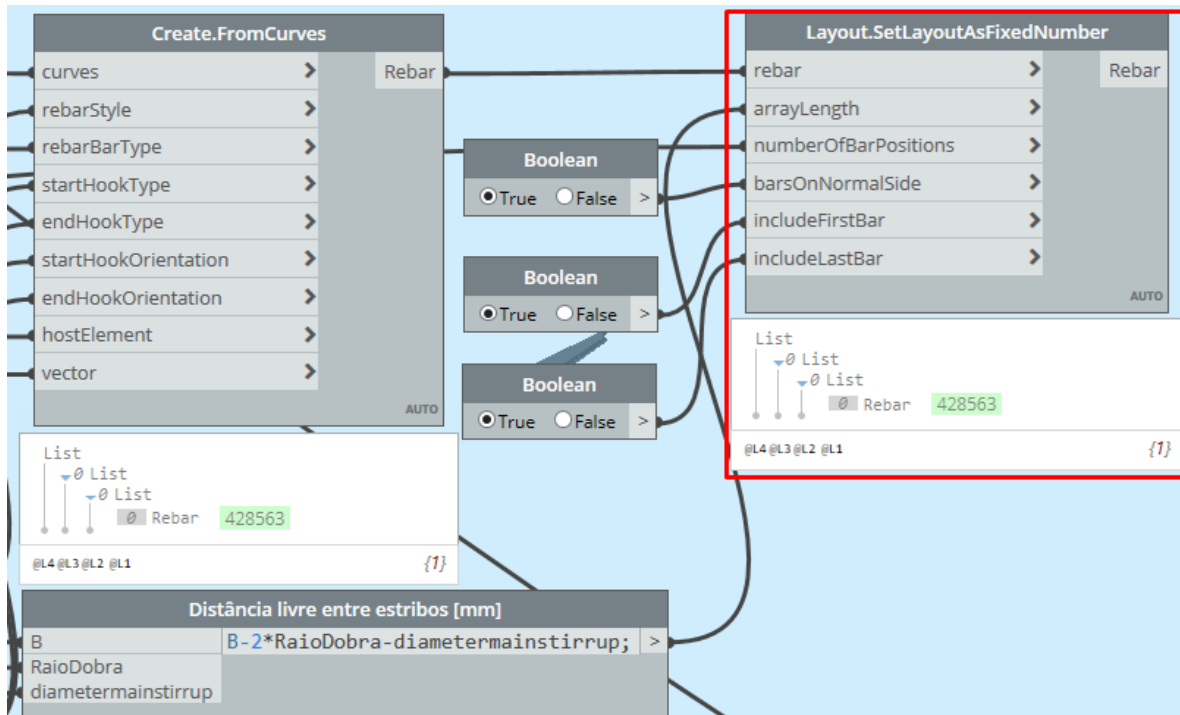


Figura 5.29 – Exemplo de função de definição de disposição de grupo de armaduras a partir da geração de um elemento *Rebar* a ser replicado.

Foi verificado que a criação de grupos de armaduras através das funções *Layout* não altera a lista original de barras de saída do nó *Create.FromCurves* apesar de processar a informação BIM e gráfica após a disposição declarada. A visualização dos processos mencionados estará presente na secção a seguir.

5.11 RESULTADO EM INTERFACE GRÁFICA DA ARMADURA NO MODELO BIM

Na presente secção serão apresentados resultados visuais da ferramenta desenvolvida, aplicados em reprodução isolada da viga de 25m em questão neste capítulo conforme apresentado na secção 5.3. Optou-se por utilizar imagens extraídas de resultados iniciais da geração de todas as armaduras dimensionadas para a viga, onde ocorrem interferências geométricas entre algumas das armaduras

geradas. Foi nesta etapa do trabalho onde foi verificado que (1) elementos *Rebar* criados em ambiente Dynamo não provocam erros no processamento do algoritmo em caso de interferência geométrica e (2) foram preservadas as capacidades de edição manual e suas funcionalidades de *snapping* espaciais dos elementos de armadura *Rebar*.

5.11.1 Dynamo como utilizador (Dynamo Player)

Até a presente secção, o Dynamo tem sido representado em sua interface de desenvolvimento. O acesso e utilização de ferramentas desenvolvidas é realizado de forma simplificada através do Dynamo Player, apresentado na Figura 5.30. O Dynamo Player permite acesso às pastas e a reprodução de ficheiros da extensão *.dyn* dos algoritmos desenvolvidos.

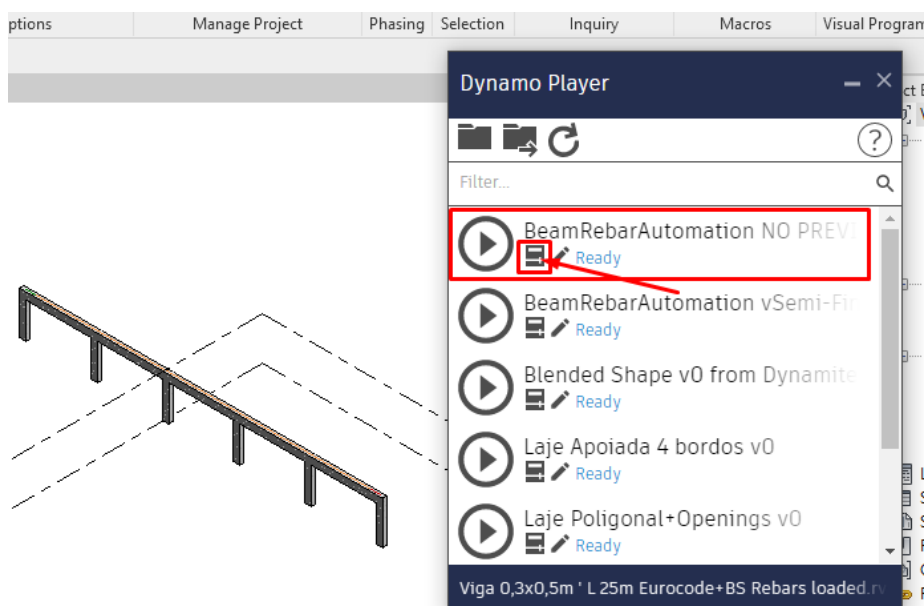


Figura 5.30 – Visualização do Dynamo Player para acesso à ferramenta desenvolvida.

A ferramenta desenvolvida também teve como objetivo diferenciar-se por minimizar a tarefa de seleção visual do usuário. O algoritmo foi concebido para eliminar a seleção de faces do elemento tendo, portanto, incutida uma necessidade de sistematização do processo de abstração visual de geometrias de interesse do usuário. A necessidade de seleção de faces por parte do usuário compromete a produtividade de atuais ferramentas análogas no que diz respeito tanto à morosidade desnecessária na modelação quanto à capacidade de automação da modelação de armaduras de múltiplos elementos, característica também contemplada na execução deste trabalho.

Ao seleccionar o ícone indicado na figura 4.38 o usuário procede a um ecrã de gestão das entradas de um algoritmo associado. Na Figura 5.31 pode-se verificar o resultado da minimização de entradas requeridas ao usuário para apenas (1) o elemento hospedeiro da armadura (seleccionado por qualquer ponto do elemento) e (2) o caminho digital do ficheiro que contém as folhas de cálculo associados ao elemento seleccionado.

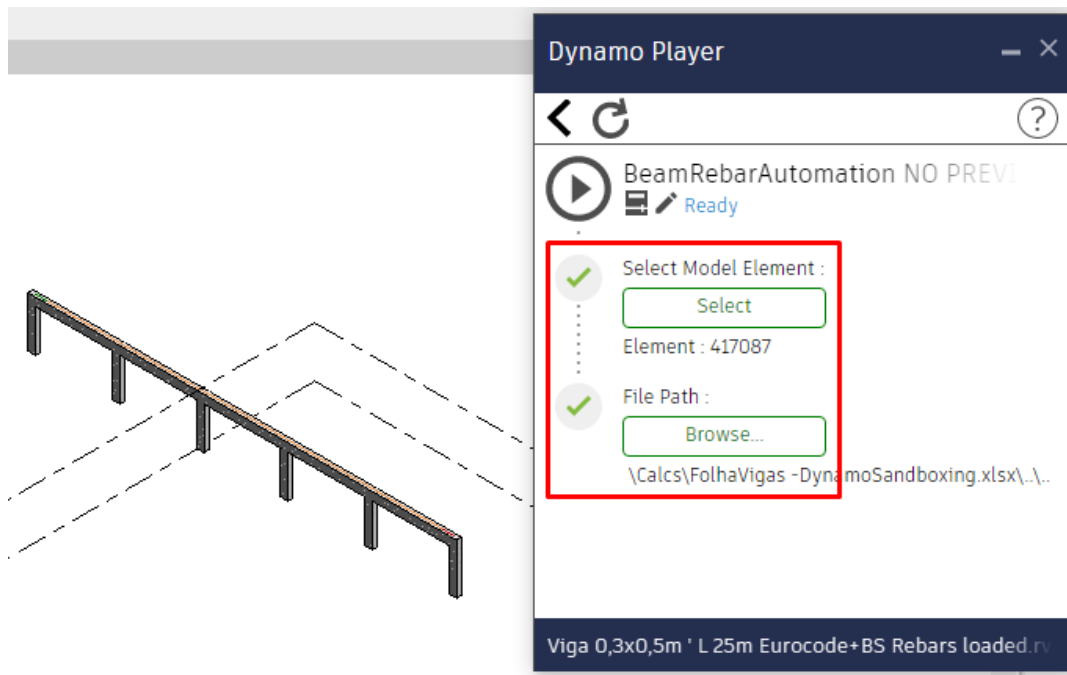


Figura 5.31 – Entradas necessárias para funcionamento da ferramenta em interface orientada ao usuário (Fonte: Autor).

5.11.2 Visualização tridimensional de sólidos BIM

Após cumprido o algoritmo, segue-se à visualização das armaduras, exemplificado da Figura 5.32 à Figura 5.36.

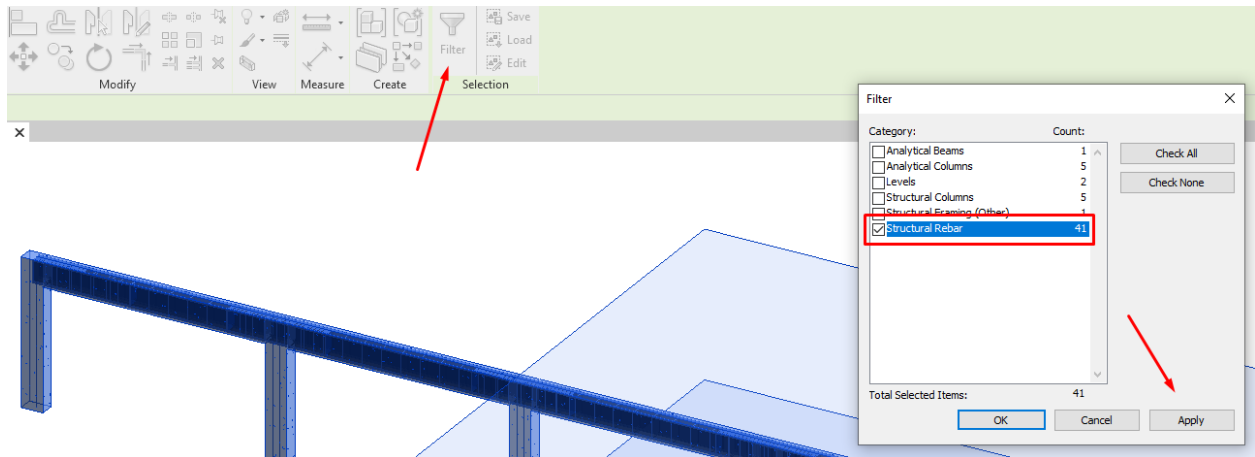


Figura 5.32 – Seleção da viga modelada e suas armaduras e filtragem da seleção no Revit.

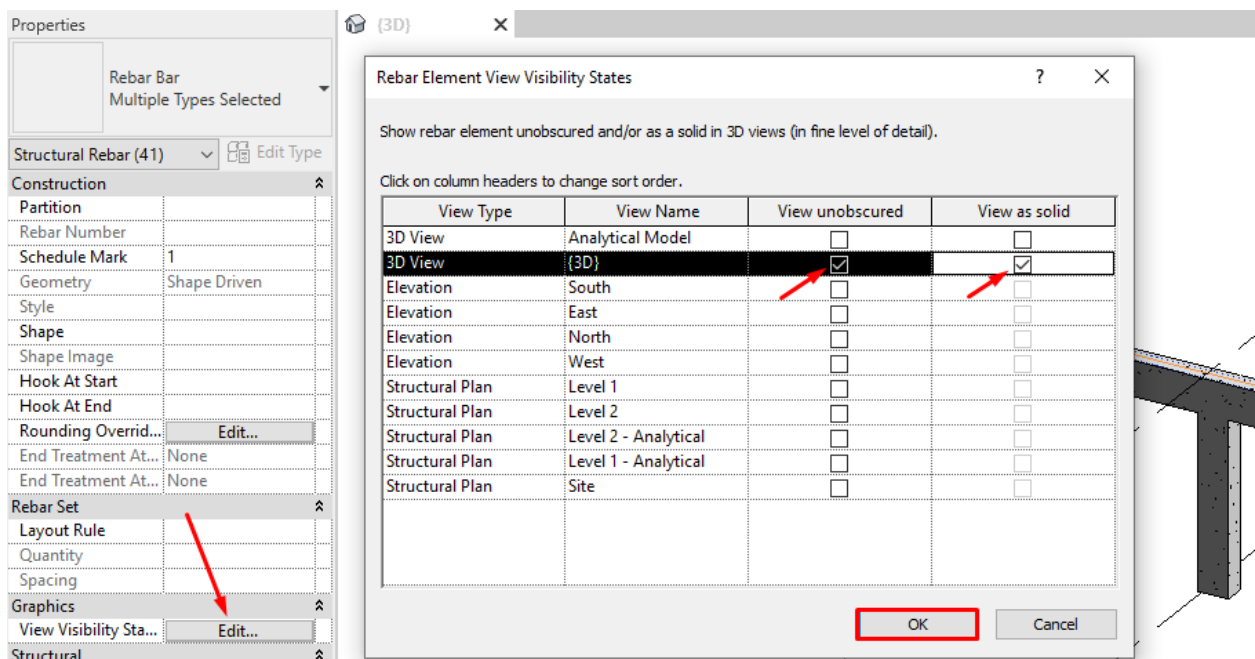


Figura 5.33 – Configuração de visualização de sólidos para renderização das armaduras.

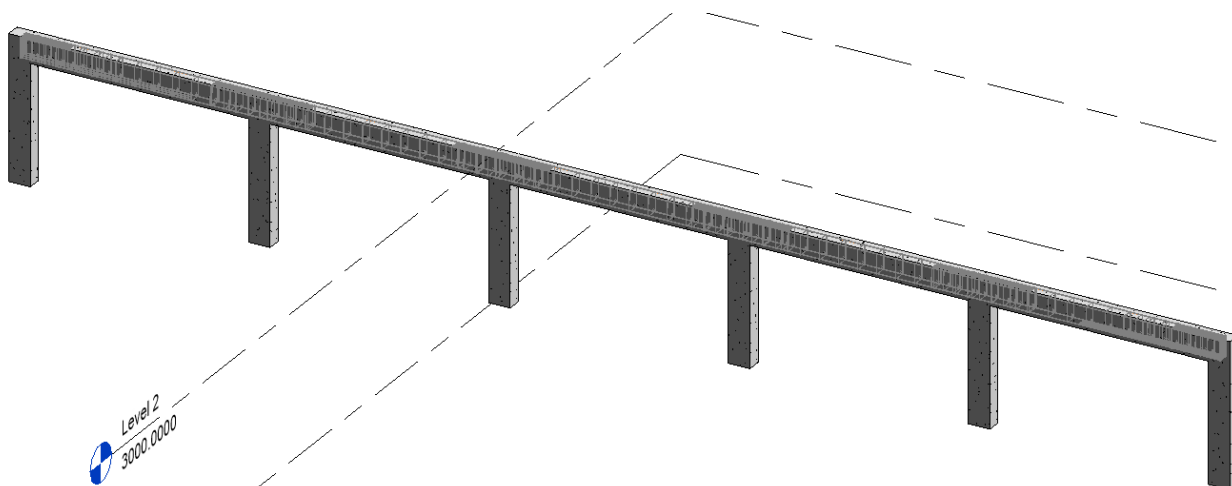


Figura 5.34 – Viga modelada e armaduras automaticamente geradas pela ferramenta desenvolvida (Fonte: Autor).

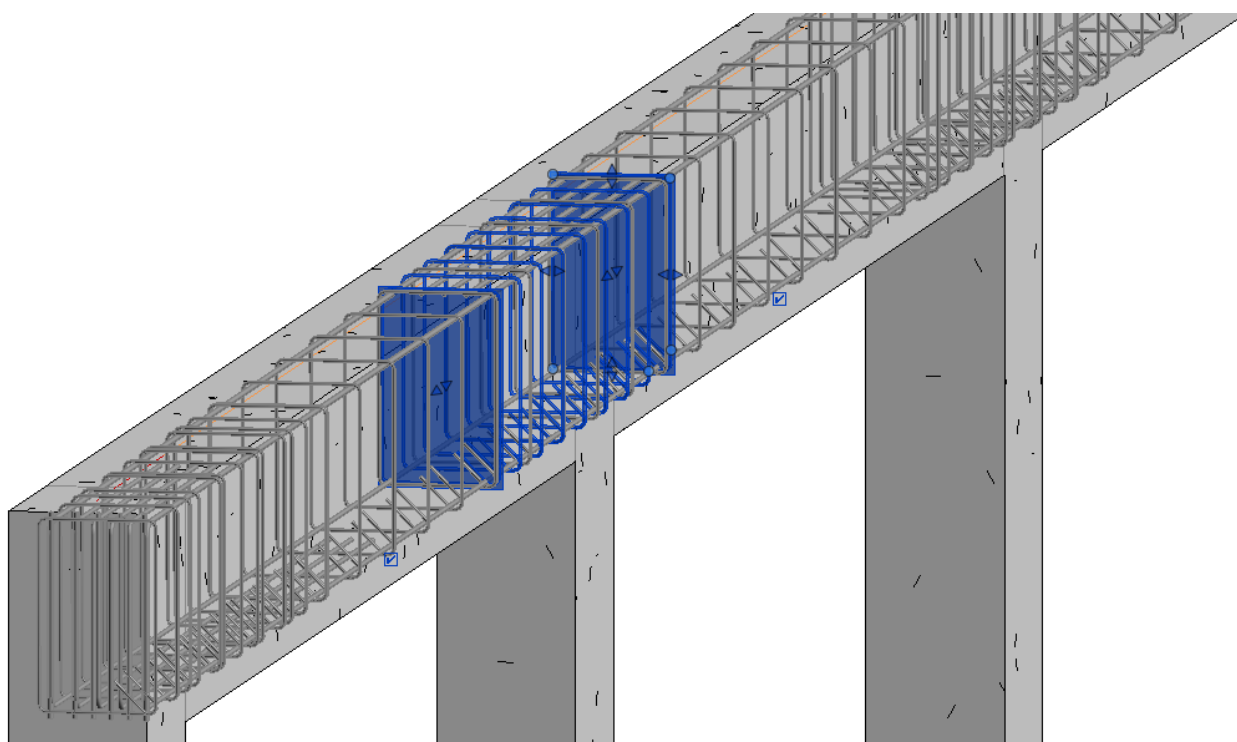


Figura 5.35 – Armaduras geradas automaticamente e grupo de estribos de reforço selecionado (Fonte: Autor).

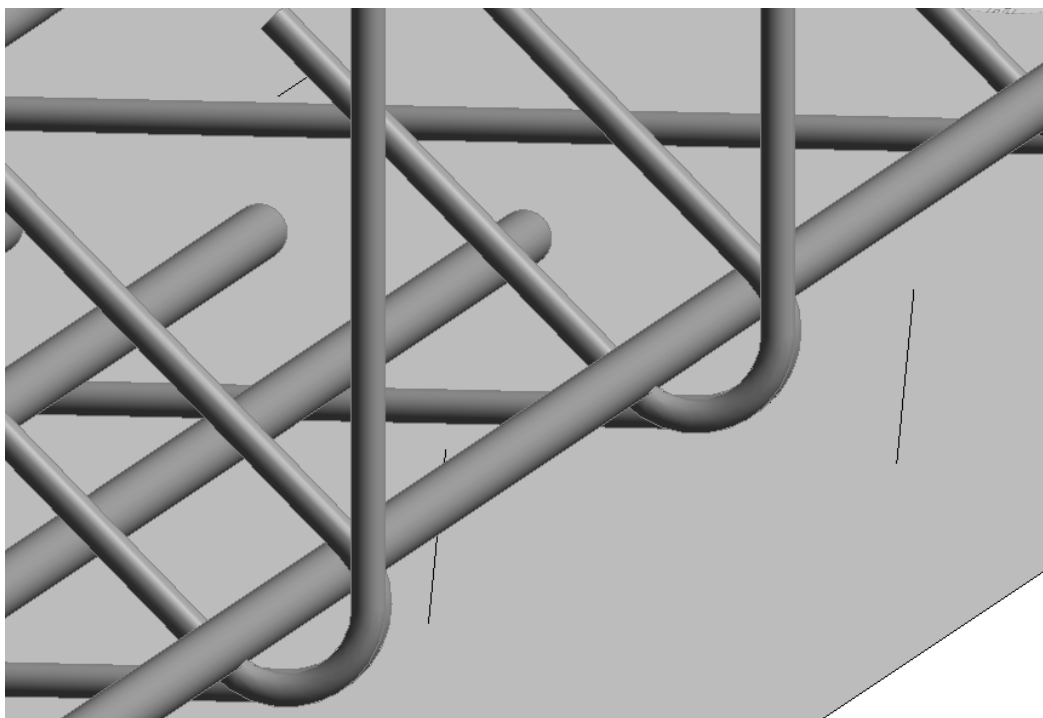


Figura 5.36 – Vista aproximada das armaduras geradas automaticamente pela ferramenta desenvolvida
(Fonte: Autor).

5.11.3 Visualização de cortes e pormenores 2D a partir de modelo BIM

Uma das otimizações promovidas pelo BIM é a de facilidade na extracção de peças desenhadas de forma parametrizada em 2D para produção de projeto. A Figura 5.37 e a Figura 5.38 representam algumas das vistas geradas para verificação de cumprimento de objetivos da ferramenta.

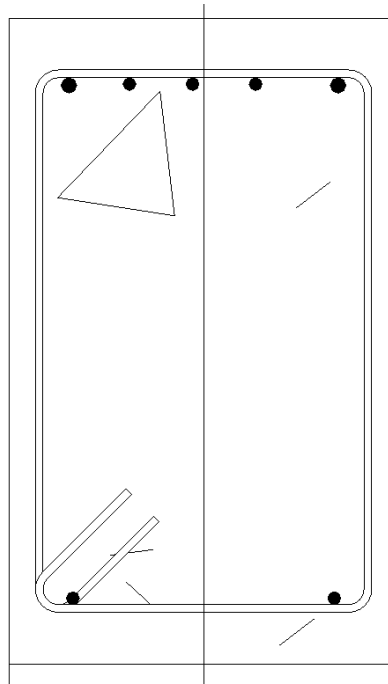


Figura 5.37 – Peça desenhada de secção transversal da viga no modelo BIM.

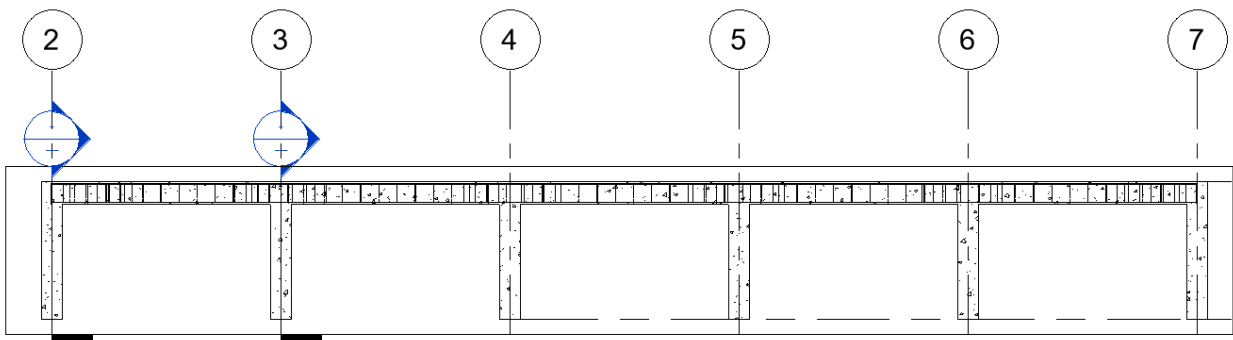


Figura 5.38 – Peça desenhada de corte longitudinal no modelo BIM.

5.12 MAPAS DE QUANTIDADES E INFORMAÇÃO BIM

Por fim, foi avaliado o adequado fluxo de informação BIM até a etapa de geração assistida de mapas de quantidades de armaduras. A Figura 5.39 indica o acesso à geração paramétrica de tabelas de quantidades e a Tabela 5-1 apresenta uma das tabelas geradas.

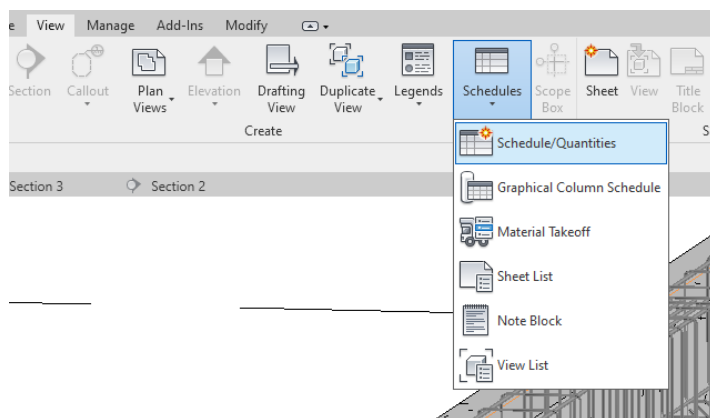


Figura 5.39 – Acesso aos mapas de quantidades em modelo BIM no Revit.

Tabela 5-1 - Mapa de quantidades gerado inicialmente a partir do modelo BIM.

Bar Diameter	Quantity	Bar Length	Reinforcement Volume	Cost
12 mm	2	25810 mm	5838.08 cm ³	
10 mm	1	2000 mm	157.08 cm ³	
10 mm	1	2000 mm	157.08 cm ³	
10 mm	1	2000 mm	157.08 cm ³	
10 mm	1	2000 mm	157.08 cm ³	
10 mm	1	2000 mm	157.08 cm ³	
10 mm	1	2000 mm	157.08 cm ³	
10 mm	1	2000 mm	157.08 cm ³	
10 mm	1	2000 mm	157.08 cm ³	
10 mm	1	2000 mm	157.08 cm ³	
10 mm	1	2000 mm	157.08 cm ³	
10 mm	1	2000 mm	157.08 cm ³	
10 mm	1	2000 mm	157.08 cm ³	
10 mm	1	2000 mm	157.08 cm ³	
10 mm	1	1400 mm	109.96 cm ³	
10 mm	1	1400 mm	109.96 cm ³	
10 mm	1	1400 mm	109.96 cm ³	
10 mm	1	1420 mm	111.53 cm ³	
10 mm	1	1420 mm	111.53 cm ³	
10 mm	1	1420 mm	111.53 cm ³	
10 mm	1	1420 mm	111.53 cm ³	
10 mm	1	420 mm	32.99 cm ³	
10 mm	1	420 mm	32.99 cm ³	
10 mm	1	420 mm	32.99 cm ³	
10 mm	1	3360 mm	263.89 cm ³	
10 mm	1	3360 mm	263.89 cm ³	
10 mm	1	3360 mm	263.89 cm ³	
10 mm	1	3880 mm	304.73 cm ³	
10 mm	1	3880 mm	304.73 cm ³	
10 mm	2	25820 mm	4055.80 cm ³	
6 mm	9	1540 mm	391.88 cm ³	
6 mm	9	1540 mm	391.88 cm ³	
6 mm	9	1540 mm	391.88 cm ³	
6 mm	9	1540 mm	391.88 cm ³	
6 mm	8	1540 mm	348.34 cm ³	
6 mm	8	1540 mm	348.34 cm ³	
6 mm	64	1540 mm	2786.72 cm ³	

A repetição individualizada na contabilização de certos elementos é resultado de estudo da diferença entre a criação de elementos de armadura a partir de *Curvas de base* já distribuídas e a criação de elemento inicial em posição notável sobre o qual se aplica definições de distribuição através de funções

CAPÍTULO 5

do tipo *Layout*. Foi observado que as armaduras distribuídas por funções *Layout* preservam o critério de agrupamento automático na geração da tabela de quantidades. Além disso, também foi verificado que armaduras declaradas a partir de elementos do tipo *Curve* já distribuídos ou ainda como *Free Form Rebar* são contabilizadas individualmente na geração de tabelas.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

São reconhecidas as inúmeras vantagens da aplicação da metodologia BIM ao setor da arquitetura e engenharia. A partir da revisão bibliográfica realizada no âmbito do presente trabalho, pode-se constatar a atual mobilização de diversos agentes económicos e políticos na Europa na direção da sua implementação na área da engenharia civil. Não obstante, o desenvolvimento de ferramentas adequadas às práticas do projeto de estruturas de cada empresa tem desafios de implementação resultado, sobretudo, da atual necessidade de domínio de ferramentas informáticas muito diversas e nem sempre de uso amigável. No âmbito do presente trabalho foram desenvolvidos conhecimentos associados à modelação paramétrica e exploradas algumas das atuais fronteiras de evolução da prática de projeto, tendo sido por esta via, mais uma vez, as potencialidades do BIM.

A modelação numérica e análise estrutural realizadas no Capítulo 3 em paralelo com a aprendizagem de programação aplicada ao BIM proporcionou a exploração de etapas de projeto que antecedem a pormenorização de maneira única. Esse contato catalisou consideravelmente o desenvolvimento de soluções efetivas na realização do estudo de caso, sobretudo no que diz respeito à obtenção e processamento das entradas provenientes da tabela de pormenor, uma vez que essas são utilizadas a partir dos resultados do modelo numérico.

Respondendo ao desafio colocado pela empresa, e ao interesse por ela demonstrado, optou-se por uma incursão inovadora na área do BIM, onde foram desenvolvidos algoritmos de programação que tiveram por objetivo a automação da pormenorização de armaduras, conforme apresentado no Capítulo 4 e no Capítulo 5. O caso de estudo a que se recorreu, não obstante ser de geometria simples, congrega a generalidade das questões que são colocadas à representação das armaduras em elementos de betão armado, e por isso revela do melhor modo as potencialidades destes algoritmos. O trabalho desenvolvido, que apresenta uma estrutura lógica e uma algoritmia eficiente, responde integralmente

ao solicitado e constituiu uma contribuição relevante para a internalização por parte da empresa desta metodologia na área do projeto.

Verificou-se que, como desejado previamente, a estrutura do algoritmo permite fácil implementação de eventuais melhorias futuras dos diferentes grupos de funções. As premissas e condições de contorno e a experiência do utilizador estabelecidas, tiveram como objetivo superar a eficiência e aplicabilidade da maioria das ferramentas de automação da modelação de armaduras disponíveis dentre o inestigado ao longo deste trabalho. A partir dessas, foram cumpridos os principais objetivos, nomeadamente o de minimização das entradas necessárias, de aproveitar as folhas de cálculo de dimensionamento sem a necessidade de alterações à mesma e o de aplicabilidade em vigas com secção transversal retangular, de vãos sucessivos ou não, orientadas em qualquer direção no espaço. Considera-se que para condição de teste de implementação efetiva da ferramenta, é necessário ajuste nos blocos de código da secção que calcula e determina no espaço o afastamento entre varões longitudinais para casos mais genéricos. O desenvolvimento do *script* para evitar divergências comuns de unidades cumpre adequadamente sua função ao ser o primeiro processo lido, que acessa e configura as unidades de medida de comprimento no modelo para milímetros. Portanto, considera-se que foi alargada a capacidade de traduzir raciocínios de maneira mais interdisciplinar entre conhecimentos de engenharia civil e de desenvolvimento de *software*.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A forma canónica com que se procurou desenvolver o algoritmo do estudo de caso levou à concepção ou consideração de trabalhos futuros com diferentes tipos de algoritmo tanto no campo de algoritmos correntes baseados em regras, como o direcionado a vigas explorado neste trabalho, quanto no campo de algoritmos através de técnicas de inteligência artificial - AI e *machine learning*, sobretudo no domínio de Projeto Generativo (*Generative Design*).

No que diz respeito a algoritmos baseados em regras corrente, considera-se sobretudo quatro possíveis frentes de trabalho:

- A automação da geração de desenhos de pormenores;
- Adaptação do atual algoritmo para ser aplicável a outras características geométricas de vigas (como vigas curvas, com descontinuidades em seu eixo e com secções transversais não retangulares);

- Adaptação do algoritmo para modelar armaduras de listas de vigas, ao invés de elemento a elemento em um modelo BIM; e
- O desenvolvimento de ferramentas que conjuguem com a desenvolvida para modelação da armadura de pilares e das intersecções pilar-viga.

A primeira potencialmente pode envolver a concepção de um volume de controle que percorre todo o modelo BIM e gera vistas automáticas baseado na densidade de elementos de armadura ao longo de suas diferentes posições no espaço. A segunda frente consistiria possivelmente em utilizar as derivadas das equações de superfícies do elemento selecionado ao longo de seus eixos locais, juntamente com os vetores normais associados às mesmas, para proporcionar um conjunto de dados que permita adequadamente manipular e criar *geometrias de construção*. Para aplicar o algoritmo a listas de vigas seria impreterível adaptação das folhas de cálculo, sendo possível elaborar secção do algoritmo que automaticamente seleciona elementos (recomenda-se evitar realizar a geração de vistas devido à capacidade de processamento exigida no caso de modelos com elevada quantidade de informação). Por fim, a quarta frente envolveria adaptação das atuais funções que obtém vetores que representam o eixo local do elemento, bem como a criação de grupos de funções específicos - tanto na ferramenta de vigas quanto de pilares - para preciso e adequado funcionamento em cadeia das ferramentas.

Mais na fronteira do potencial atualmente visto para *software* de programação como o utilizado (Dynamo), foram ponderadas as seguintes possibilidades de desenvolvimentos futuros:

- Estudo da aplicação de Shape Grammars no desenvolvimento de Algoritmos Generativos;
- Adaptação para que o algoritmo sirva como espécie de “rotina catalisadora” de algoritmos generativos de soluções estruturais com o objetivo de avaliar se há margem para redução significativa de tempo de processamento em modelos BIM de larga escala ou alta complexidade;
- Investigar sobre aplicabilidades, premissas e alternativas das referidas “rotinas catalisadoras” associados a algoritmos de inteligência artificial e *machine learning* de longo tempo de processamento.

Essas denominadas “rotinas catalisadoras” seriam algoritmos convencionais, desenvolvidos para serem “uma boa primeira geração” que reduza significativamente o número de ciclos de criação de herdeiros, por exemplo, em algoritmos genéticos de longa duração de processamento para convergência de funções objetivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LINO, José Carlos ; AZENHA, Miguel ; LOURENÇO, Paulo – Integração da Metodologia BIM na Engenharia de Estruturas, 2012. Encontro Nacional Betão Estrutural.
- REMPHING, Rasmus ; FALL, David ; LUNDGREN, Karin – Aspects of Integrated Design of Structures: Parametric Models, Creative Space and Linked Knowledge, 2015.
- REMPHING, Rasmus, et al. – Automatic structural design by a set-based parametric design method, 2019.
- HSU, W. ; LIU, B. - Conceptual Design: issues and challenges, 2000. Computer-Aided Design.
- MUELLER, Caitlin - Computational Exploration Structural Design Space, 2014.
- PLEVRIS, Vagelis ; TSIATAS, George – Computational Structural Engineering: Past Achievements and Future Challenges, 2018.
- MORA, Rodrigo ; BÉDARD, Claude ; RIVARD, Hugues – Computer Representation to Support Conceptual Structural Design within a Building Architectural Context, 2006.
- VERMEULEN, Dieter – Dynam(o)ite Your Rebar Design, 2013. ES 15357 Autodesk University.
- VASSHAUG, Håvard – Rebar modelling in Revit: Can You Model All Reinforcement?, 2013.
- PAUNESCU, Ovidiu – Rebar Modeling in Revit: Keep It in Check, 2013. FAB32242-L Autodesk University.
- WONOTO, Nixon – Integrating Parametric Structural Analysis and Optimization in the Architectural Schematic Design Phase, 2017.
- HOLZER, Dominik ; BURRY, Mark – Parametric Design and Structural Optimisation for Early Design Exploration, 2007.
- KU, Chiu, et al. – The Module of Rebar Modeling for Chinese Building Standard Detailing Drawings by BIM-based Methods
- Joint Research Centre - EUR 29782 EN, 2019.
- MACIEL, Alex ; CORRÊA, Fabiano – Interoperability with IFC in the automated rebar fabrication, 2016. 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction.
- British Standards Institution - ISO 19650-1:2008, 2008.

ANEXO

FERREIRA, Bruno, et al. – Integração da Tecnologia BIM no Projeto de Estruturas de Betão, 2012. Encontro Nacional Betão Estrutural.

MOURATIDIS, A. – The “Cut-and-Cover” and “Cover-and-Cut” Techniques in Highway Engineering, 2008.

Figura 2.5 – Exemplo de Geometria complexa modelada com auxílio de programação visual (Fonte: dynamobim.org acessado em 15/03/2020).

EN1990: Bases para o projeto de estruturas (EC0).

EN 1991: Acções em estruturas (EC1).

EN 1992: Projeto de estruturas de betão (EC2).

EN 1993: Projeto de estruturas metálicas (EC3).

EN 1994: Projeto de estruturas mistas aço-betão (EC4).

EN 1997: Projeto geotécnico (EC7).

EN 1998: Projeto de estruturas para resistência aos sismos (EC8).

Deutsche Bahn - Regulation DB-Rail-853, 2014.

British Standards Institution - BS 8666, 2005.

CADS – BS 8666:2005 Scheduling, dimensioning, bending and cutting of steel reinforcement for concrete, 2006. Literatura técnica.

The Institution of Structural Engineers – Standard Method of Detailing Structural Concrete. A manual for best practice, 2006.

GERBER, Burcin ; KENSEK – Building Information Modeling in Architecture, Engineering, and Construction: Emerging Research Directions and Trends, 2010. Journal of professional issues in engineering education and practice by ASCE.

ANG, Mei, et al. – Combining evolutionary algorithms and shape grammars to generate branded product design, 2006.

PARRISH, Kristen – Applying a set-based design approach to reinforcing steel design, 2009.

STINY, George – Introduction to shape and shape grammars, 1980.

