



1 2 9 0
UNIVERSIDADE D
COIMBRA

João Pedro Reis Silva

INCORPORAÇÃO DAS ARMADURAS NO
PROJETO DE ESTRUTURAS EM *BIM*

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas, orientada pelo Professor Doutor Luís Costa Neves e pelo Professor Doutor José Carlos Lino e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2019

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

João Pedro Reis Silva

INCORPORAÇÃO DAS ARMADURAS NO PROJETO DE ESTRUTURAS EM *BIM*

**INCORPORATION OF THE REINFORCEMENT AT THE
STRUCTURAL DESIGN IN *BIM***

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas,
orientada pelo Professor Doutor Luís Costa Neves e pelo Professor Doutor José Carlos Lino

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Julho 2019



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, nomeadamente o **Professor José Carlos Lino** e ao **Professor Luís Costa Neves** pelos conselhos, ajuda, críticas, e que permitiram a realização desta dissertação em colaboração com a **Newton**, onde adquiri bastantes conhecimentos e competências como engenheiro, ajudando-me bastante na preparação para o mercado de trabalho.

Quero também agradecer à **Engenheira Ana Sofia Peixoto**, que foi a pessoa que mais esteve presente durante todo o meu trabalho e mais me acompanhou, dando conselhos e transmitindo diversos conhecimentos que adquiriu através da experiência profissional, que foram bastante importantes para a realização deste trabalho.

Seguidamente quero agradecer aos meus **Pais**, que foram as pessoas que tornaram este feito possível, ajudando-me financeiramente, e sempre me aconselharam e apoiaram em todas as decisões tomadas, tanto ao longo do meu percurso académico como na vida.

A toda a minha restante **família** que esteve sempre presente em todas as situações, nunca duvidando das minhas capacidades e do meu sucesso académico, dando conselhos e apoio sempre que necessitei.

Quero também deixar o meu agradecimento a todos os meus **amigos**, os que adquiri ao longo do meu percurso académico e os que adquiri ao longo dos anos, que estiveram sempre presentes em todos os momentos, e sempre me apoiaram no decorrer desta dissertação.

A todas as pessoas da **Newton** que me receberam muito bem e me acompanharam ao longo dos últimos meses, principalmente aos **colegas do gabinete de estruturas**, a Sofia, o Marcelo, o João, o António, a Fabiana e o Luís com quem tive mais contacto diariamente, troquei ideias e foram grandes companheiros ao longo deste tempo em que estive na Newton.

RESUMO

Na modelação de armaduras de betão armado segundo uma metodologia BIM, os softwares atuais ainda apresentam algumas limitações que tornam o processo de criação do modelo 3D das mesmas bastante complexo e moroso. Assim sendo, o grande objetivo desta dissertação é encontrar novas alternativas e soluções na criação do modelo 3D de armaduras, onde o software ainda necessita de melhorias nesta fase do projeto estrutural. Deste modo, através de dois casos de estudo identificam-se as capacidades e dificuldades presentes nos softwares de cálculo e modelação 3D a que se recorreu nesta dissertação, o Autodesk Robot Structural Analysis e o Autodesk Revit Structures respetivamente. Para além do Autodesk Robot Structural Analysis, também será estudado um novo software (Sofistik Analysis) que se apresenta sob o formato de extensão para o Autodesk Revit Structures, que permite realizar a análise estrutural dentro deste, sem haver a necessidade de utilizar dois softwares distintos nesta fase do projeto.

Seguidamente estudou-se a automatização da exportação do modelo de armaduras que o Autodesk Robot Structural Analysis permite criar para o Autodesk Revit Structures, diminuindo assim o tempo dedicado à modelação das armaduras neste último, já que há uma facilidade na partilha de informação entre os dois, pois pertencem à mesma empresa, a Autodesk. Desta forma, apenas será necessário por parte do projetista modelar parte da armadura no Autodesk Revit Structures, cujo software de análise estrutural ainda tem dificuldades para exportar, principalmente armaduras de lajes, paredes estruturais, elementos de fundações e as ligações entre os elementos estruturais.

Após a exportação da armadura de elementos estruturais do tipo viga e pilar, encontraram-se falhas no modelo das vigas no Autodesk Revit Structures, cujas armaduras não foram transferidas corretamente e encontram-se deslocadas da mesma. Neste sentido, foi usado um software de programação visual, o Dynamo, presente no Autodesk Revit Structures com a finalidade de corrigir o problema encontrado após a importação das armaduras do Autodesk Robot Structural Analysis. Esta aplicação permitirá corrigir a posição de qualquer armadura através de alguns *inputs* introduzidos pelo utilizador, não só em elementos do tipo viga, mas também em qualquer outro tipo de elemento estrutural.

Palavras chave: *BIM, Software*, modelo de armaduras, Sofistik, Dynamo.

ABSTRACT

Related to the concrete reinforcement modeling with the BIM methodology, current software still has some limitations that make the 3D modeling process very complex and time-consuming. Thus, the main purpose of this dissertation is to find new alternatives and solutions in the creation of the 3D reinforcement model, where the software still requires a lot of improvements in this phase of the structural design. Being this the main purpose, through two case studies will be identified the capacities and difficulties in this calculation and 3D modeling software that was used in this dissertation, the Autodesk Robot Structural Analysis and the Autodesk Revit Structures respectively. Beyond the Autodesk Robot Structural Analysis, will also be studied a new software (Sofistik Analysis) that is presented under the extension format for Autodesk Revit Structures, that allows a structural analysis to be carried out within it, without needed to use two different software's in this stage of the project.

Next, we studied the automation of the export of the reinforcement model that Autodesk Robot Structural Analysis allows to create for Autodesk Revit Structures, reducing the time dedicated to the reinforcement modeling in the latter, since they belong to the same company, Autodesk. In this way, it would only be necessary for the designer to model a part of the structural reinforcement in Autodesk Revit Structures, whose structural analysis software still has difficulties to export, mainly slab reinforcements, structural walls, foundation elements and connections between structural elements.

Following the export of the structural beams and column reinforcements, the Autodesk Revit Structures beams model failed, whose reinforcements haven't been transferred correctly and are displaced from the same. In this way, we used a visual programming software, Dynamo, in Autodesk Revit Structures in order to fix the problem previously founded after importing the reinforcements from Autodesk Robot Structural Analysis. This application will be able to correct the position of any reinforcement, not only in beam elements, through some *inputs* introduced by the user, but also in any other type of structural element.

Keywords: *BIM, Software, reinforcement model, Sofistik, Dynamo.*

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	ix
SIMBOLOGIA	x
ABREVIATURAS	xi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Âmbito e Objetivos.....	2
1.3. Estruturação da Dissertação.....	2
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1. Conceito de BIM.....	5
2.2. Formatos IFC	6
2.3. LOD (Level of Development)	7
2.4. BIM associado ao projeto de estruturas.....	9
2.5. Modelos 3D paramétricos.....	10
2.6. Condicionantes	11
2.7. Software de análise e dimensionamento.....	11
2.7.1. PAC-Pórticos	12
2.7.2. Autodesk Robot Structural Analysis	13
2.7.3. Sofistik e Sofistik Analysis.....	14
2.8. Software de modelação e pormenorização	15
2.8.1. Autodesk Revit Structures	15
2.8.2. Sofistik Reinforcement Detailing	16
2.8.3. Naviate Rebar Extension	17

2.9. Dynamo.....	18
3 CÁLCULO ESTRUTURAL E MODELOS 3D.....	20
3.1. Estrutura do trabalho.....	20
3.2. Análise e dimensionamento estrutural.....	22
3.2.1. Bases para o projeto estrutural.....	23
3.2.2. Autodesk Robot Structural Analysis	26
3.2.3. Autodesk Robot Structural Analysis vs Sofistik Analysis	29
3.3. Modelos 3D de armaduras no Autodesk Revit Structures.....	34
3.3.1. Melhorias necessárias na modelação 3D	37
4 AUTOMATIZAÇÃO ROBOT VS REVIT	40
4.1. Modelo 3D no Autodesk Robot Structural Analysis	40
4.2. Modelo 3D no Autodesk Revit Structures.....	43
4.3. Dynamo.....	44
4.3.1. <i>Plug-in</i> 1	45
4.3.2. <i>Plug-in</i> 2	47
5 CONCLUSÕES	51
5.1. Trabalhos futuros	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXO A – MOMENTOS FLETORES ROBOT VS SOFIKTIK	A-1
ANEXO B – ESFORÇOS TRANSVERSO E AXIAL NO AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS	B-1
ANEXO C - MODELOS 3D DE ARMADURAS	C-1
ANEXO D – CÓDIGOS EM DYNAMO PARA CORREÇÃO DAS ARMADURAS	D-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: BIM vs CAD 2D (BibLus@, 2017)	5
Figura 2.2: Partilha de informação entre os softwares de cada especialidade através de IFC (Cadenas@, 2015).	6
Figura 2.3: Níveis de desenvolvimento.	8
Figura 2.4: Aplicação da abordagem BIM ao projeto. (Lino et. al., 2012b)	9
Figura 2.5: Interface do Pac-Pórticos. (Pires, 2017).....	12
Figura 2.6: Software PAC-Pórticos. (Newton@, 2012)	12
Figura 2.7: Exemplo de modelo de cálculo no Autodesk Robot Structural Analysis (Projeto Struplano Engenharia, Lda).....	13
Figura 2.8: Extensão Sofistik Analysis para cálculo estrutural no Autodesk Revit Structures.	15
Figura 2.9: Exemplo de estrutura modelada no Autodesk Revit Structures 2019 (Projeto Struplano Engenharia, Lda).....	16
Figura 2.10: Extensão <i>Sofistik Reinforcement Detailing</i> para pormenorização e detalhe de armaduras no Autodesk Revit Structures.	17
Figura 2.11: Separador do Naviate Rebar Extension no Autodesk Revit Structures.	18
Figura 2.12: Exemplo prático de utilização do Dynamo.	19
Figura 3.1: Plantas base para os casos de estudo 1 (esquerda) e 2 (direita).	21
Figura 3.2: Modelo Autodesk Revit Structures com dimensões e secções do caso de estudo 1.	21
Figura 3.3: Modelo Autodesk Revit Structures com dimensões e secções do caso de estudo 2.	22
Figura 3.4: Modelo analítico para o caso de estudo 1 no Robot Structural Analysis.....	27
Figura 3.5: Modelo analítico para o caso de estudo 2 no Robot.	27
Figura 3.6: Momentos fletores na laje segundo as direções X (esquerda) e Y (direita) do caso 1.	29
Figura 3.7: Momentos fletores na laje e nas paredes estruturais segundo as direções X (esquerda) e Y (direita) do caso 2.	29
Figura 3.8: Verificação do modelo analítico no Sofistik Analysis.....	30
Figura 3.9: Análise estrutural no Sofistik Analysis.....	31

Figura 3.10: Diagramas de momentos fletores em vigas e pilares segundo a direção y para o caso de estudo 1.....	31
Figura 3.11: Diagramas de momentos fletores em vigas e pilares segundo a direção y para o caso de estudo 2.....	32
Figura 3.12: Diagramas de momentos fletores na laje do segundo caso de estudo na direção x, para ambos os softwares.....	33
Figura 3.13: Diagramas de momentos fletores na laje do segundo caso de estudo na direção y, para ambos os softwares.....	33
Figura 3.14: Modelação da armadura transversal de um pilar em Autodesk Revit Structures.....	34
Figura 3.15: Modelação da armadura de uma viga com o Naviate Rebar Extension.....	35
Figura 3.16: Separação das armaduras de uma <i>array</i> de estribos com o Sofistik Reinforcement Detailing.....	36
Figura 3.17: Modelo 3D de armaduras do caso de estudo 1.....	36
Figura 3.18: Modelo 3D de armaduras do caso de estudo 2.....	37
Figura 3.19: Pormenor de nó de ligação de duas vigas com interseção armaduras.....	37
Figura 3.20: Função Structural area reinforcement para a armadura da laje.....	38
Figura 3.21: Pormenor da sobreposição das armaduras superior e inferior da laje.....	38
Figura 4.1: Parâmetros do elemento estrutural.....	41
Figura 4.2: Opções de cálculo da armadura.....	41
Figura 4.3: Padrão da armadura a colocar no elemento estrutural.....	42
Figura 4.4: Opção que permite criar o modelo 3D de armaduras no Autodesk Robot Structural Analysis.....	42
Figura 4.5: Exemplo do modelo 3D de uma das vigas a exportar para o Autodesk Revit Structures.....	43
Figura 4.6: Armaduras das vigas deslocadas após importar o modelo do Autodesk Robot Structural Analysis.....	44
Figura 4.7: Separador onde se encontram as funções do Dynamo.....	45
Figura 4.8: Input dos elementos a alterar.....	46
Figura 4.9: Código elaborado na interface do Dynamo.....	46
Figura 4.10: Erro ocorrido na fase final do código.....	47
Figura 4.11: Criação do vetor através de sliders para cada direção.....	48
Figura 4.12: Código final utilizado na correção dos estribos.....	48
Figura 4.13: Dynamo Player pronto a receber os inputs.....	49
Figura 4.14: Exemplo de execução do programa criado para corrigir estribos.....	50
Figura A.1: Momentos fletores (ULS) nas vigas e pilares do caso de estudo 2 segundo as direções y (esquerda) e z (direita) no Autodesk Robot Structural Analysis.....	1

Figura A.2: Momentos fletores (ULS) nas vigas e pilares do caso de estudo 2 segundo as direções y (esquerda) e z (direita) no Autodesk Revit Structures.	1
Figura A.3: Momentos fletores (ULS) na laje do caso de estudo 2 segundo as direções x (esquerda) e y (direita) no Autodesk Robot Structural Analysis.....	2
Figura A.4: Momentos fletores (ULS) na laje do caso de estudo 2 segundo as direções x (esquerda) e y (direita) no Autodesk Revit Structures.	2
Figura A.5: Momentos fletores (ULS) nas vigas e pilares do caso de estudo 1 segundo as direções y (esquerda) e z (direita) no Autodesk Robot Structural Analysis.....	3
Figura A.6: Momentos fletores (ULS) nas vigas e pilares do caso de estudo 1 segundo as direções y (esquerda) e z (direita) no Autodesk Revit Structures.	3
Figura A.7: Momentos fletores (ULS) na laje do caso de estudo 1 segundo as direções x (esquerda) e y (direita) no Autodesk Robot Structural Analysis.....	4
Figura A.8: Momentos fletores (ULS) na laje do caso de estudo 1 segundo as direções x (esquerda) e y (direita) no Autodesk Revit Structures.	4
Figura B.1: Esforço transversal (ULS) para vigas e pilares do caso de estudo 1 nas direções y (esquerda) e z (direita).	1
Figura B.2: Esforço transversal (ULS) para vigas e pilares do caso de estudo 2 nas direções y (esquerda) e z (direita).	1
Figura B.3: Esforço axial (ULS) para vigas e pilares dos casos de estudo 1 (esquerda) e 2 (direita).	2
Figura C.1: Modelo de armaduras do Autodesk Revit Structures para o caso de estudo 1.....	1
Figura C.2: Modelo de armaduras do Autodesk Revit Structures para o caso de estudo 2.....	1
Figura D.1: Plug-in 1 desenvolvido em Dynamo com os erros obtidos na parte final.....	1
Figura D.2: Plug-in 2 desenvolvido em Dynamo para resolver o problema encontrado.	1
Figura D.3: Detalhe do primeiro input do código (Seleção da armadura).	2
Figura D.4: Detalhe da criação do vetor através da introdução da distância em cada direção cartesiana.	2

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1: Cronologia dos incrementos e novas versões do IFC.....	7
Quadro 2.2: Os 3 campos principais para o projeto de estruturas em BIM. (Ferreira et. al., 2012b).....	10
Quadro 3.1: Categoria de utilização da estrutura (NP EN 1991-1-1, 2009).....	23
Quadro 3.2: Sobrecargas em pavimentos, varandas e escadas de edifícios (NP EN 1991-1-1, 2009).....	24
Quadro 3.3: Valores dos coeficientes ψ para edifícios (NP EN 1990, 2009).....	24
Quadro 3.4: Valores de cálculo das ações.	25
Quadro 3.5: Combinações de ações aplicadas em cada caso.	28

SIMBOLOGIA

- ψ_0 – Coeficiente para determinação do valor de combinação de uma ação variável
- ψ_1 – Coeficiente para determinação do valor frequente de uma ação variável
- ψ_2 – Coeficiente para determinação do valor quase-permanente de uma ação variável
- $\gamma_{G,j}$ - Coeficiente parcial relativo à ação permanente j
- $\gamma_{Q,i}$ - Coeficiente parcial relativo à ação variável i
- $G_{k,j}$ – Valor característico da ação permanente j
- $Q_{k,1}$ – Valor característico da ação variável de base da combinação 1
- $Q_{k,i}$ – Valor característico da ação variável acompanhante i
- P – Valor representativo de uma ação de pré-esforço
- γ_P – Coeficiente parcial relativo a ações de pré-esforço
- $PP1$ – Valor característico do peso próprio estrutural do caso de estudo 1
- $PP2$ – Valor característico do peso próprio estrutural do caso de estudo 2
- $RCP1$ – Valor característico das restantes cargas permanentes do caso de estudo 1
- $RCP2$ – Valor característico das restantes cargas permanentes do caso de estudo 2
- $q1$ – Valor característico da sobrecarga do caso de estudo 1
- $q2$ – Valor característico da sobrecarga do caso de estudo 2

ABREVIATURAS

BIM – *Building Information Modeling*

AIA – *American Institute of Architects*

AECO – *Architecture, Engineering, Construction and Operation*

LOD – *Level of Development*

IFC – *Industry Foundation Classes*

STEP – *STandard for the Exchange of Product model data*

ISO – *International Organization for Standardization*

2D – *Two Dimensions*

3D – *Three Dimensions*

CAD – *Computer Aided Design*

1 INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A metodologia BIM (*Building Information Modeling*) ao longo dos últimos anos, tem vindo a revolucionar o mundo da indústria AECO (Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação), permitindo uma melhor coordenação entre os vários intervenientes do projeto das diferentes especialidades.

O BIM vem introduzir novas metodologias na elaboração do projeto de estruturas e na produção de documentação (Lino *et. al.* 2012a). Assim sendo, é necessário que os engenheiros projetistas saibam lidar com esta mudança porque, através de um modelo virtual que contém toda a informação necessária para a elaboração da construção, será possível detetar erros e conflitos entre as várias especialidades intervenientes com maior facilidade, que conseqüentemente provocará uma redução significativa nos custos e no tempo de conceção do projeto e construção.

Até aos dias de hoje é necessário recorrer a desenhos 2D que contêm todos os pormenores construtivos dos vários elementos estruturais como vigas, pilares, lajes, pormenorização de armaduras, ou de elementos de redes de águas, gás ou eletricidade da construção, e que por vezes podem não ser claros e bastante complexos de interpretar em obra, levando algumas vezes a erros durante o processo de construção. Este problema, pode ser solucionado recorrendo à modelação BIM, tendo como base um modelo tridimensional com todos os pormenores construtivos da estrutura e das restantes especialidades, que permite identificar conflitos que possam existir entre eles como, por exemplo, interseção de varões de armaduras ou conflitos entre elementos estruturais e redes de águas onde um tubo possa eventualmente atravessar uma viga ou um pilar. Estes casos, por vezes não são perceptíveis em desenhos 2D e acabam por levar a alterações no projeto inicial que irão condicionar o desenvolvimento da construção.

A modelação de armaduras pode ser realizada através de diversos softwares existentes no mercado. No entanto, estes softwares ainda se encontram bastante limitados neste campo, sendo este um processo complexo e bastante moroso na obtenção de um modelo tridimensional com todos os pormenores construtivos de armaduras de betão armado.

1.2. Âmbito e objetivos

Esta dissertação irá focar-se essencialmente no dimensionamento e modelação em ambiente BIM de armaduras de betão armado, procurando encontrar por um lado, métodos inovadores de melhorar este processo, utilizando softwares de cálculo adequados, e por outro recurso a programação de forma a aperfeiçoar o desempenho dos mesmos.

Tendo como base dois casos de estudo, este trabalho tem como objetivo identificar, avaliar e corrigir falhas existentes nos softwares de modelação e cálculo estrutural. Pretende-se também criar novas soluções que permitam melhorar a automatização da exportação das armaduras calculadas através do software Autodesk Robot Structural Analysis para o Autodesk Revit Structures, sendo estes pertencentes à mesma empresa (Autodesk), e por isso uma vantagem na medida em que existe uma melhor interoperabilidade entre eles.

Com esta automatização, e sabendo que o Autodesk Revit Structures ainda apresenta bastantes limitações no campo de modelação e detalhe de armaduras, essa fase do projeto seria bastante mais otimizada, na medida em que grande parte das armaduras seria transferida e modelada automaticamente após o cálculo no Autodesk Robot Structural Analysis, permitindo uma otimização de recursos necessários na elaboração do modelo 3D.

De modo a otimizar a exportação das armaduras do software de cálculo para o de modelação 3D será utilizado o Dynamo, um plug-in do Autodesk Revit Structures que permite criar novas funcionalidades através da programação visual, levando no caso do presente estudo, à correção de desacertos obtidos na transição das armaduras entre os softwares. Este plug-in pode ser utilizado, não só para o caso específico de armaduras, mas também em diversas situações que Autodesk Revit Structures não possua nenhuma funcionalidade que execute o que o utilizador pretende, como por exemplo criar estruturas de complexidade mais elevada e irregular que o software de modelação não tenha capacidade para tal.

Através do modelo 3D será possível obter com maior facilidade entregáveis como peças desenhadas (quadros de pilares, pormenorizações de lajes, vigas, sapatas ou paredes estruturais, etc.) e mapas de quantidades, através de uma forma automática com base no modelo.

1.3. Estruturação da dissertação

Na presente dissertação abordar-se-ão duas questões principais, relacionadas com a incorporação das armaduras de betão armado no projeto de estruturas segundo uma metodologia BIM. Estas duas questões passam por, primeiro realizar o cálculo estrutural recorrendo ao

software Autodesk Robot Structural Analysis, seguido da modelação das armaduras de betão armado no Autodesk Revit Structures, identificando eventuais dificuldades que possam surgir com os softwares. Em segundo será abordada a possibilidade de corrigir e melhorar as dificuldades encontradas, de forma a otimizar o projeto de estruturas e como consequência um futuro mais promissor no mundo BIM.

No capítulo 2 designado por Estado da Arte, será feito um estudo de toda a informação necessária para o trabalho a realizar nesta dissertação. Serão abordados assuntos como o formato de ficheiros IFC (Industry Foundation Classes) necessário para a interoperabilidade entre os softwares de diferentes fabricantes, a organização das várias etapas de desenvolvimento de um modelo BIM classificados como LOD (Level of Development), o enquadramento do BIM no projeto de estruturas, a modelação paramétrica 3D, o uso desta metodologia a nível profissional e o tipo de softwares disponíveis no mercado para análise, dimensionamento, modelação e detalhe a que será necessário recorrer na presente dissertação.

O capítulo 3 será dedicado a dois casos práticos de estudo, que servirão de base para identificar possíveis dificuldades que existam atualmente com os softwares de modelação 3D e cálculo estrutural, sendo neste caso efetuado o estudo no Autodesk Robot Structural Analysis e no Autodesk Revit Structures. Visto que ambos os softwares pertencem à mesma empresa, e existindo uma melhor interoperabilidade entre eles, este capítulo irá focar-se essencialmente na análise, dimensionamento e pormenorização das armaduras para cada um dos casos de estudo. Numa primeira fase será efetuada uma análise estrutural no Autodesk Robot Structural Analysis e o dimensionamento das armaduras, seguidos da modelação das mesmas em Autodesk Revit Structures para ambas as estruturas. Numa segunda fase, será realizada essa mesma análise estrutural no Autodesk Revit Structures, através da extensão de cálculo *Sofistik Analysis* concebida pela Sofistik, bem como a comparação destes resultados com os resultados obtidos no Autodesk Robot Structural Analysis.

No capítulo 4, com base nos dois casos de estudo anteriormente calculados e modelados, será elaborada uma breve abordagem aos problemas encontrados nessa modelação de armaduras em Autodesk Revit Structures, no sentido de encontrar novas soluções que melhorem e otimizem este processo na procura de uma maior valia no projeto de estruturas e mais um passo para ser possível implementar esta metodologia de trabalho no mundo da engenharia. Após esta abordagem, avalia-se a possibilidade da exportação automática do modelo 3D de armaduras de betão armado que o software Autodesk Robot Structural Analysis consegue produzir de cada elemento estrutural para o software Autodesk Revit Structures, de modo a identificar eventuais lacunas que possam surgir na execução desta tarefa, bem como desenvolver soluções de modo a corrigir essas limitações. Com esta automatização, no futuro do projeto de estruturas apenas seria necessário modelar parte das armaduras de cada estrutura, nomeadamente em ligações dos elementos estruturais ou casos em que o Autodesk Robot Structural Analysis não permita

exportar o modelo de armaduras, sendo o caso de elementos tipo painéis como lajes e paredes estruturais.

No capítulo 5 serão retiradas conclusões sobre todo o trabalho desenvolvido nesta dissertação, acerca dos pontos onde são necessários intervenções por parte da Autodesk e da Sofistik, com especial atenção aos inconvenientes encontrados na modelação de armaduras de betão armado no Autodesk Revit Structures, no cálculo estrutural através do Sofistik Analysis e na exportação dos modelos 3D de armaduras do Autodesk Robot Structural Analysis para o Autodesk Revit Structures, de forma a melhorar este processo na fase de projeto estrutural através do BIM.

Também serão abordados no capítulo 5 temas para possíveis projetos futuros que servirão de base para outras dissertações ou estudos que contribuam para a implementação do BIM no mundo da construção, que será definitivamente uma metodologia a adotar bastante mais vantajosa do que a existente atualmente.

2 ESTADO DA ARTE

2.1. Conceito de BIM

O BIM é uma metodologia de trabalho, que está associada à criação de um ou mais modelos virtuais interoperáveis entre si, possibilitando a partilha de informação entre as diversas fases do projeto, cujo objetivo é aumentar a produtividade, eficiência e qualidade de construção, reduzindo custos e prazos de execução ao longo do ciclo de vida útil do empreendimento, contornando alguns dos erros que podem ocorrer nos modelos CAD 2D que se usa atualmente e que têm uma execução mais morosa (Patacas e Cachadinha, 2012).

Na Figura 2.1 temos uma representação esquemática da facilidade de partilha de informação de um modelo BIM, quando comparado com um modelo em CAD 2D.

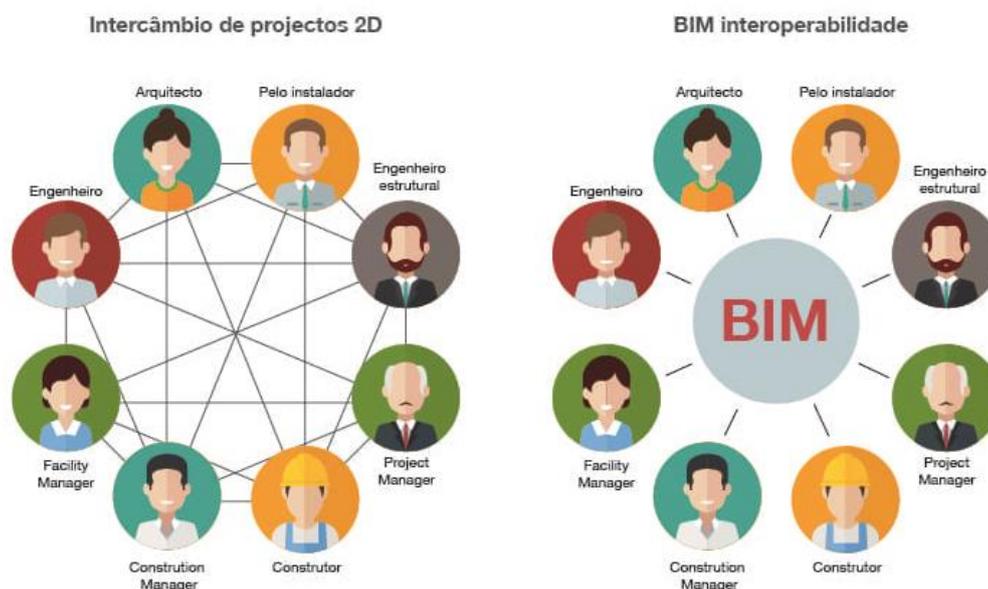


Figura 2.1: BIM vs CAD 2D (BibLus@, 2017)

Através desta metodologia, é possível criar um modelo virtual de um edifício, não sendo apenas uma representação 3D que, tanto na parte estrutural como nas restantes especialidades, contém

toda a informação necessária ao projeto como geometria, materiais, estrutura, características térmicas, instalações, custos, segurança, manutenção, etc.

2.2. Formatos IFC

O IFC (Industry Foundation Classes) é um formato de ficheiro desenvolvido pela buildingSMART aberto e neutro, com o objetivo de facilitar a partilha de informação entre várias aplicações e softwares de fabricantes diferentes da indústria AEC, sendo bastante usado em modelos BIM. A Figura 2.2 apresenta um esquema da partilha de informação através do formato IFC, entre os softwares de trabalho utilizados nas várias especialidades da indústria AEC, que permite criar o modelo global com toda a informação.

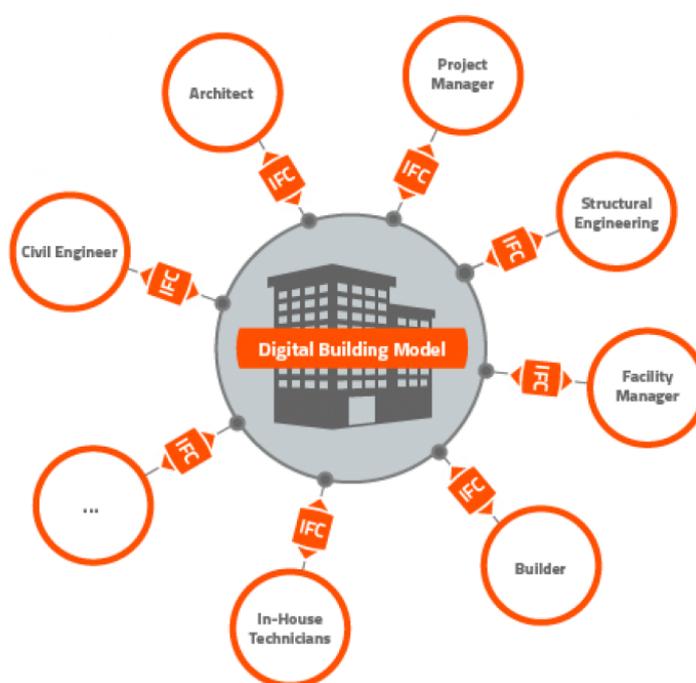


Figura 2.2: Partilha de informação entre os softwares de cada especialidade através de IFC (Cadenas@, 2015).

A ISO (International Organization for Standardization), em Genebra, organizou um comité técnico para o desenvolvimento de um padrão chamado STEP (STandard for the EXchange of Product Model), ISO-10303, formando a organização ISO-STEP. (Eastman *et. al.* 2011a).

A linguagem EXPRESS foi um dos principais produtos do ISO-STEP, desenvolvida por Douglas Schenk e com contribuição de Peter Wilson (Schenk e Wilson, 1994), sendo a base dos formatos IFC. Neste tipo de linguagem, um objeto refere-se a muito mais do que apenas uma

representação física do mesmo. A EXPRESS é a ferramenta principal de suporte à modelação de produtos não só para a indústria AECO, mas também para outros tipos de indústrias. (Eastman *et. al.* 2011b).

O IFC até ao momento já teve diversas versões que marcaram a sua evolução. A primeira versão, **IFC 1.0**, foi lançada em 1996, e desde então sendo atualizada encontrando-se nos dias de hoje na versão 4, segundo os dados fornecidos pela buildingSMART. Esta última fornece a certificação para as diversas empresas de software, sendo que estas adicionam às suas aplicações a possibilidade de exportação de dados em IFC, facilitando a partilha de informação entre os vários softwares utilizados numa construção (Manziona, 2016). Atualmente a buildingSMART encontra-se a desenvolver o **IFC5x**, que ainda não tem data prevista para o seu lançamento, sendo que está previsto que esta possua suporte completo para vários domínios de infraestruturas e mais capacidades paramétricas.

Até ao momento atual, já foram lançadas diversas versões e atualizações do IFC. No Quadro 2.1 apresentam-se todas as atualizações do IFC até aos dias de hoje, bem como os anos em que uma nova versão foi lançada ou sofreu incrementos.

Quadro 2.1: Cronologia dos incrementos e novas versões do IFC.

IFC 1.0	1996	IFC 2x3	2005
IFC 1.5	1998	IFC 2x3 TC1	2007
IFC 1.5 Add1	1998	IFC 4 (IFC2x4)	2013
IFC 2.0	1999	IFC 4 Add1	2015
IFC 2x	2000	IFC 4 Add2	2016
IFC 2x Add1	2001	IFC 4.1	2018
IFC 2x2	2003	IFC 4.2	2019 (Versão atual)
IFC 2x2 Add1	2004	IFC 5	(Em desenvolvimento)

2.3. LOD (Level of Development)

O LOD é uma classificação sugerida pelo AIA (American Institute of Architects), que organiza as várias etapas de desenvolvimento de um modelo BIM. Desta forma é possível saber quais as informações necessárias em cada etapa, ajudando a identificar em que parte do processo um dado elemento está (Edson Sant'Ana, 2017), (Figura 2.3).

As classificações atribuídas pelo AIA a cada nível de desenvolvimento são as seguintes:

LOD 100 – É caracterizado por um modelo geral desenvolvido para representar a informação num nível mais básico, onde são definidos parâmetros como área, altura, volume, localização e orientação, não satisfazendo os requerimentos para o LOD 200.

LOD 200 – É um modelo geral onde ainda se está a planear as quantidades, tamanho, forma, preços, localização e orientação próximos dos valores reais, antes de ser aprovado para execução.

LOD 300 – Modelação precisa e desenhos detalhados onde os elementos são definidos especificamente em termos de quantidades, tamanho, forma, preços, localização e orientação.

LOD 350 – Modelação precisa e desenhos detalhados onde os elementos são definidos especificamente em termos de quantidades, tamanho, forma, preços, localização, orientação e troca de informação entre outros elementos da construção.

LOD 400 – Os elementos são modelados contendo a informação necessária para a fabricação, montagem e detalhe, para além das quantidades, tamanho, forma, preços, localização e orientação reais e precisos. Este nível de desenvolvimento é o mais recomendado para o processo de construção.

LOD 500 – Os elementos do modelo contêm toda a informação após a conclusão da construção, que servirá de base para a manutenção durante todo o tempo de vida da mesma, contendo toda a informação relativa a quantidades, tamanho, forma, preços, localização e orientação reais e precisos (Srinsofttech@, 2019).

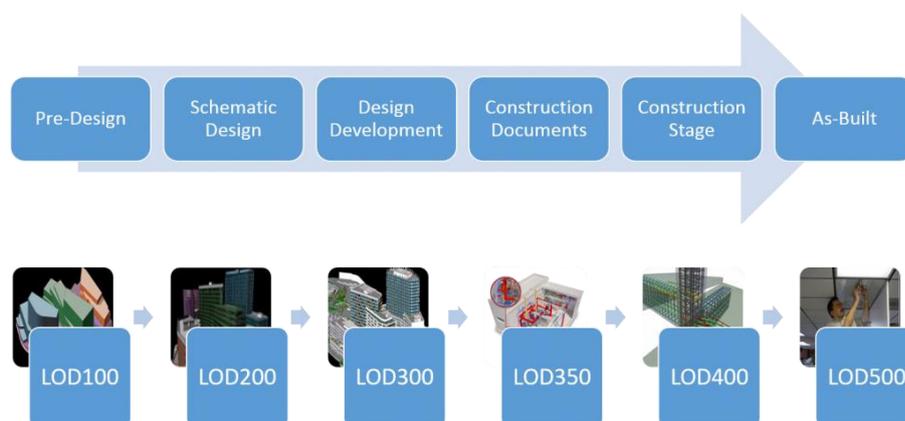


Figura 2.3: Níveis de desenvolvimento.

2.4. BIM associado ao projeto de estruturas

Atualmente, num gabinete de projetos, os programas disponíveis apresentam pouca interoperabilidade entre si, e a forma comum de apresentação do projeto é através de desenhos em CAD 2D sem nenhuma relação direta com os modelos computacionais de cálculo 3D. Com o BIM será possível contornar este problema, fazendo a interligação direta entre os modelos de cálculo e a pormenorização.

É possível fazer a partilha de informação entre as diversas fases do projeto, através de um modelo global que contém toda a informação necessária que define a estrutura. Neste modelo, cada elemento que compõe a estrutura é reconhecido como um objeto com a informação relativa a todas as propriedades que o caracterizam (Ferreira et. al., 2012a), (Figura 2.4).

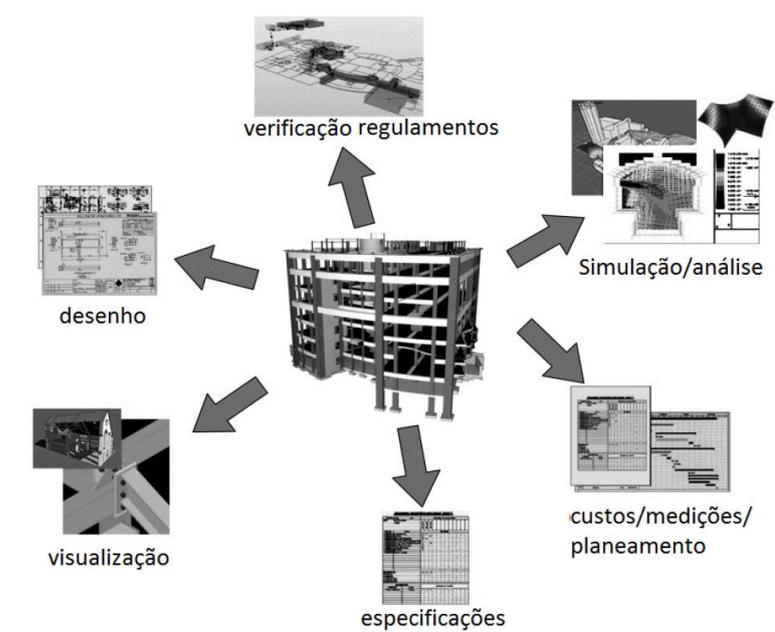


Figura 2.4: Aplicação da abordagem BIM ao projeto. (Lino et. al., 2012b)

Para o projeto de estruturas temos 3 campos principais no processo BIM:

- Coordenação interdisciplinar;
- Análise e dimensionamento de estruturas;
- Documentação do projeto.

No Quadro 2.2 apresenta-se uma breve descrição de cada um dos 3 campos neste processo.

Quadro 2.2: Os 3 campos principais para o projeto de estruturas em BIM. (Ferreira et. al., 2012b)

<p style="text-align: center;">Coordenação interdisciplinar</p>	<p>Permite ganho de eficiência em relação à prática atual através de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desenvolvimento e utilização de famílias de software comercial que permitam a partilha de modelos de trabalho; • Desenvolvimento e utilização de plataformas para a troca de modelos completos, onde cada interveniente contribui pra a criação de um modelo global que contém toda a informação.
<p style="text-align: center;">Análise e dimensionamento de estruturas</p>	<p>Esta é uma das áreas em que o contributo do engenheiro civil é mais importante e necessário. Existe uma ideia para a criação de uma plataforma comum que permita gerir e partilhar os dados entre as diversas aplicações de forma unificada, mas ainda há um longo caminho a percorrer para a concretização da mesma. O modelo IFC ainda revela limitações neste campo, mas é necessário para o sucesso do futuro com BIM, visto que é um formato aberto de transferência de informação.</p>
<p style="text-align: center;">Documentação do projeto</p>	<p>Na documentação do projeto os benefícios são bastante evidentes. A partir do modelo 3D torna-se muito mais fácil obter peças desenhadas através da produção automática das mesmas, que é uma função de base das ferramentas BIM, sendo, para além disso, possível criar mapas de quantidades e fazer medições, reduzindo bastante os custos e tempo de conceção do projeto aumentando a produtividade.</p>

2.5. Modelos 3D paramétricos

Com a introdução da modelação 3D paramétrica é possível transformar os desenhos em CAD 2D, que servem de base para a construção, para um novo tipo de documentação que é interpretada com recurso aos computadores.

Com o modelo virtual é possível criar cortes, alçados, plantas e pormenores construtivos tornando possível extrair automaticamente mapas de quantidades necessários para a construção, e também a execução de várias atividades analíticas (verificação de normas, regulamentos, análise estrutural, etc.). Este modelo, também apresenta a vantagem de detetar conflitos ou incompatibilidades entre os elementos de cada especialidade, o que permite aos respetivos

projetistas de encontrar uma nova solução, vindo reduzir significativamente os erros de projeto não sendo necessária essa alteração durante o processo de construção. O modelo digital virtual 3D contém também informações acerca de outro tipo de dados como os catálogos dos fabricantes, consegue introduzir no projeto o tempo como uma quarta dimensão e o planeamento de obra, e ainda o custo como quinta dimensão (Lino et al., 2012c).

2.6. Condicionantes

A metodologia BIM possui ainda várias condicionantes que limitam a sua adoção para o uso profissional. Entre outras, podemos destacar algumas de maior importância como:

- O investimento para aquisição de todo o software necessário e formação inicial;
- A lenta aprendizagem deste tipo de software devido à complexidade e múltiplas opções que o mesmo apresenta;
- A difícil tarefa de coordenação e envolvimento de todos os projetistas de cada equipa, que permitirá detetar erros e conflitos no projeto entre as várias especialidades de modo imediato antes da aprovação para a construção;
- A interoperabilidade permitindo a exportação e importação de ficheiros de fabricantes de softwares diferentes que ainda apresenta falhas;
- A necessidade de criar novas formas de comunicação do modelo entre os diferentes projetistas e ainda com o construtor, que passa por um contrato de confiança e delegação, que permita a partilha sem comprometer direitos de autor e responsabilidade de cada um dos intervenientes no projeto. (Lino et. al., 2012d)

2.7. Software de análise e dimensionamento

O mercado atualmente conta com uma vasta gama de softwares de análise e dimensionamento estrutural, que são ferramentas indispensáveis e que servem de suporte ao engenheiro durante a fase de cálculo estrutural, ajudando a prevenir erros de cálculo e a reduzir o tempo de conceção do projeto.

Neste vasto mercado de softwares temos por exemplo o Autodesk Robot Structural Analysis, Cypecad, PAC-Pórticos, SAP2000, Sofistik, RFEM-Dlubal, Bentley Structures e muitos mais, a que os engenheiros projetistas podem recorrer durante o processo de análise e dimensionamento estrutural. Neste capítulo vamos destacar alguns destes softwares, dando a conhecer as capacidades destas ferramentas de análise e dimensionamento estrutural, como o PAC-Pórticos, Autodesk Robot Structural Analysis e Sofistik, sendo os dois últimos utilizados como ferramentas de cálculo para esta dissertação.

2.7.1. PAC-Pórticos

O PAC-Pórticos é um software de análise e dimensionamento estrutural desenvolvido pela empresa Newton Consultores de Engenharia, Lda., e fruto de vários anos de investigação científica e de prática profissional que assegura eficiência máxima no dimensionamento estrutural (Newton@, 2012). Nesta ferramenta, é possível dimensionar vigas, pilares e elementos de fundação, com saídas automáticas de desenhos pormenorizados para CAD 2D, bem como uma análise estática e dinâmica de ações horizontais com 3 graus de liberdade por piso, e dimensionar e pormenorizar lajes fungiformes (Figuras 2.5 e 2.6).



Figura 2.5: Interface do Pac-Pórticos. (Pires, 2017)



Figura 2.6: Software PAC-Pórticos. (Newton@, 2012)

2.7.2. Autodesk Robot Structural Analysis

O Autodesk Robot Structural Analysis é uma ferramenta de análise estrutural pertencente à Autodesk capaz de realizar análises lineares e não-lineares de modelos estruturais. Com este software é possível analisar elementos estruturais não só de betão armado, mas também metálicos ou de madeira, tendo como base o método dos elementos finitos e também diversos regulamentos que servem de base para o cálculo estrutural, entre eles o Eurocódigo que se trata da norma atualmente em vigor na Europa.

Nesta dissertação, recorreu-se a este software para análise e dimensionamento estrutural de dois casos de estudo, que serão apresentados mais à frente, sendo que esta ferramenta, tal como o Autodesk Revit Structures, pertencente à Autodesk, possibilitando assim uma melhor interoperabilidade entre ambos.

Na Figura 2.7 temos um mero exemplo de um modelo analítico utilizado para cálculo estrutural no Autodesk Robot Structural Analysis.

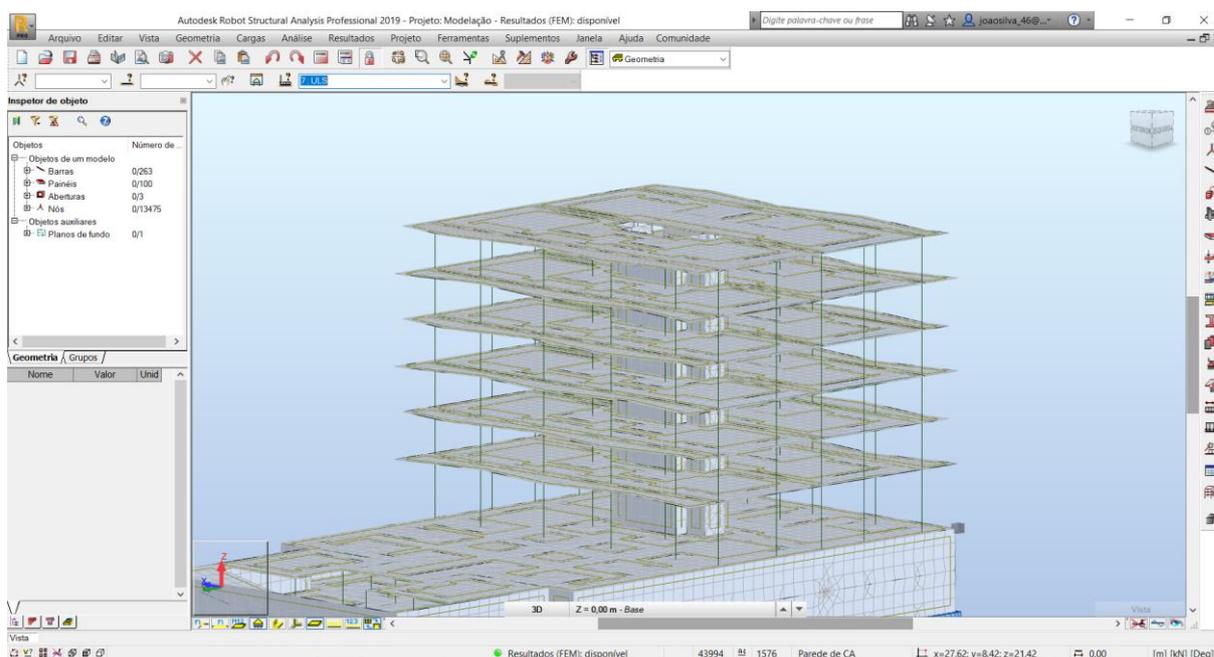


Figura 2.7: Exemplo de modelo de cálculo no Autodesk Robot Structural Analysis (Projeto Struplano Engenharia, Lda).

2.7.3. Sofistik e Sofistik Analysis

A Sofistik é uma empresa que tem vindo a aumentar a sua gama de software de engenharia, cujo principal objetivo passa por desenvolver novos softwares de cálculo e modelação estrutural, capazes de concorrer diretamente com o software da Autodesk, sendo atualmente esta a empresa com uma maior variedade de produtos e a mais conhecida em todo o mundo, ou outros mais conceituados, a que os engenheiros recorrem e confiam de modo a poderem realizar o seu trabalho.

Hoje, empregando mais de 70 pessoas, é uma das empresas principais a desenvolver software com base no método dos elementos finitos no setor da construção, bem como software de detalhe integrado com base no Autodesk AutoCAD e no Autodesk Revit. A subsidiária da Sofistik e centro de treino autorizado BiMOTiON, oferecem formação e consultoria para todos os aspetos de implementação de fluxos de trabalho BIM (Sofistik@, 2019).

O software principal Sofistik permite a modelação, análise, pormenorização e detalhe, cobrindo quase todas as especialidades da engenharia estrutural, nomeadamente edifícios, pontes, fundações, entre outras, permitindo a análise estrutural de acordo com 18 regulamentos internacionais (Structuralwiki@, 2009).

No decorrer desta pesquisa surgiu uma nova ferramenta, o *Sofistik Analysis*, que possibilita a análise e o dimensionamento estrutural recorrendo ao método dos elementos finitos no ambiente do Autodesk Revit Structures, que foi desenvolvida pela Sofistik e disponibilizada na loja de aplicações da Autodesk como uma extensão. Mais à frente no presente trabalho iremos realizar algumas análises, de modo a avaliar se os resultados obtidos através do Autodesk Robot Structural Analysis coincidem com os resultados desta recente ferramenta de cálculo estrutural (Figura 2.8).

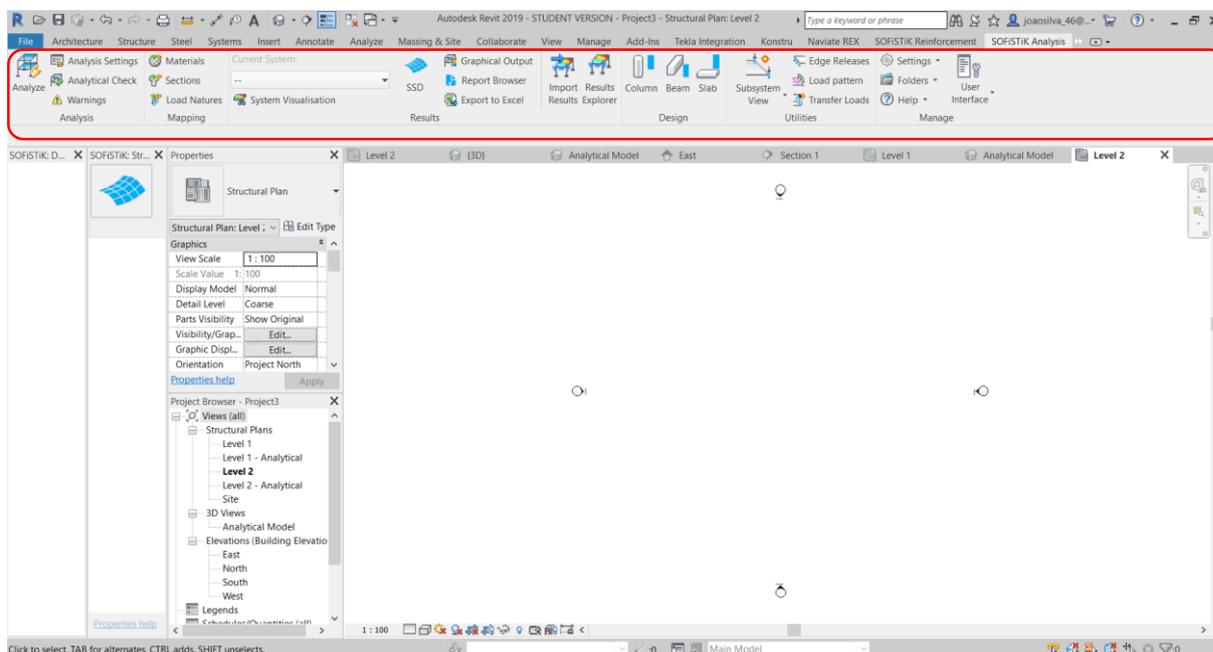


Figura 2.8: Extensão Sofistik Analysis para cálculo estrutural no Autodesk Revit Structures.

2.8. Software de modelação e pormenorização

Para a modelação e pormenorização também existe uma gama de softwares no mercado bastante vasta. Neste campo, temos ferramentas como o Autodesk Revit Structures, Tekla Structures, Sofistik, Bentley Structures, Archicad, entre outros. Vamos destacar dois destes softwares a que se recorreu nesta dissertação, o Autodesk Revit Structures e o Sofistik, sendo que o segundo foi abordado mais uma vez dentro ambiente do primeiro com o formato de extensão para detalhe de armaduras disponibilizada pela própria Autodesk (“*Sofistik Reinforcement Detailing*”), para além da extensão de análise estrutural já mencionada anteriormente.

2.8.1. Autodesk Revit Structures

O Autodesk Revit Structures é um software desenvolvido pela Charles River Software, empresa que em 2002 foi comprada pela Autodesk, que permite realizar projetos de edifícios ou outro tipo de estruturas em 3D, fazer anotações no modelo em 2D, visualizar plantas ou alçados de um edifício ou estrutura, e ter acesso à informação da construção através da base de dados do modelo (Wikipedia@, 2019). Esta ferramenta permite a elaboração de um planeamento das várias fases de desenvolvimento do projeto durante todo o ciclo de vida da construção, incluindo a sua manutenção e possível demolição ou reformulação.

Na Figura 2.9 podemos ver um exemplo do projeto estrutural de um edifício modelado no Autodesk Revit Structures 2019.

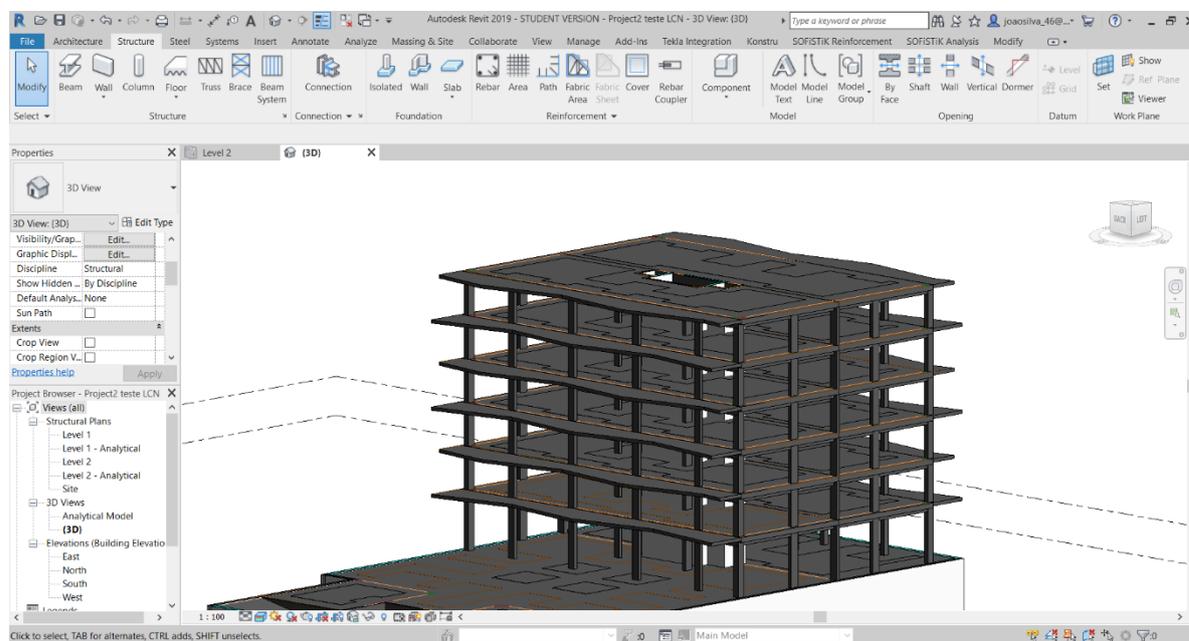


Figura 2.9: Exemplo de estrutura modelada no Autodesk Revit Structures 2019 (Projeto Struplano Engenharia, Lda).

2.8.2. Sofistik Reinforcement Detailing

Neste trabalho vamos recorrer ao *Sofistik Reinforcement Detailing*, extensão ao Autodesk Revit Structures de apoio à modelação e detalhe de armaduras de betão armado, que irá complementar as funções atuais deste, pois ainda apresenta inúmeros campos onde são necessárias melhorias significativas nesta área específica e que esta extensão vem ajudar a complementar (ver Figura 2.10).

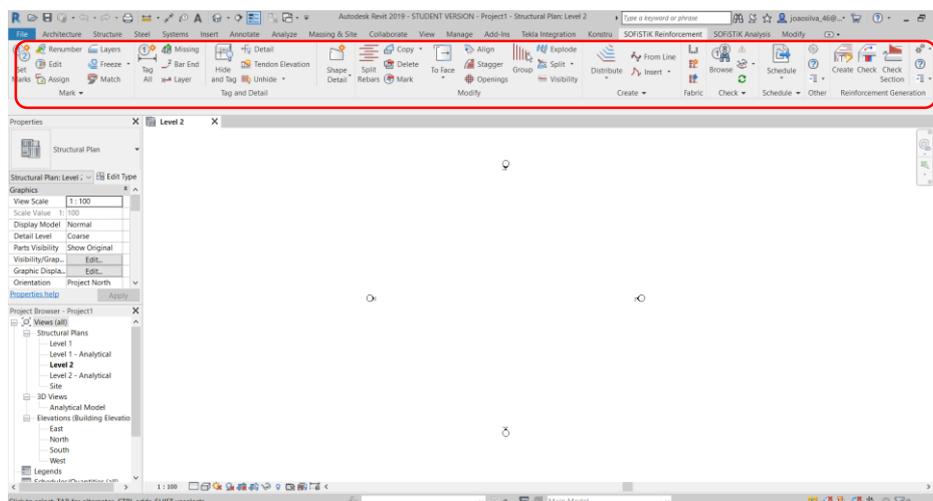


Figura 2.10: Extensão *Sofistik Reinforcement Detailing* para pormenorização e detalhe de armaduras no Autodesk Revit Structures.

2.8.3. Naviate Rebar Extension

O Naviate é um portfólio de produtos para utilizadores do Autodesk Revit Structures e do Civil 3D, criado com base nas necessidades dos mesmos. As suas soluções consistem em seis áreas principais:

- **Ferramentas** - recursos programados com o objetivo de gerar resultados rápidos, economizar tempo na criação de modelos e interagir com outras disciplinas;
- **Biblioteca** - Banco de dados de componentes e produtos com base nas fontes de fabricantes para usar diretamente nos modelos criados e onde cada utilizador individual pode adicionar os seus próprios objetos à biblioteca;
- **Configurações** - Modelos e bancos de dados que otimizam a plataforma, e que podem ser alteradas com base nas necessidades de cada um;
- **Interação** - Forma de garantir e otimizar o fluxo de informação entre outras plataformas e formatos;
- **Métodos** – Com o intuito de uma melhoria contínua dos fluxos de trabalho, da metodologia, das práticas e da experiência;
- **Comunidade** – Permite a visualização de vídeos, ler dicas, e adquirir os últimos lançamentos (Naviate@, 2019).

Esta ferramenta também pode ser utilizada como uma extensão do Autodesk Revit Structures, mas ao contrário das restantes extensões onde se recorre à loja de aplicações da Autodesk, esta é disponibilizada pela própria Naviate. Esta extensão permite criar uma armadura

automaticamente para cada elemento estrutural selecionado, com base nas especificações dadas pelo utilizador de acordo o tipo de armadura que pretende e com o tipo de elemento estrutural como, número e diâmetro dos varões longitudinais, número e diâmetros dos estribos, tipo de disposição das armaduras do elemento estrutural, espaçamentos, comprimentos de amarração, recobrimento, etc.

Na Figura 2.11 podemos observar este separador no Autodesk Revit Structures que pode ser bastante útil em casos específicos onde não se consegue modelar as armaduras corretamente apenas com recurso ao separador do Autodesk Revit Structures.

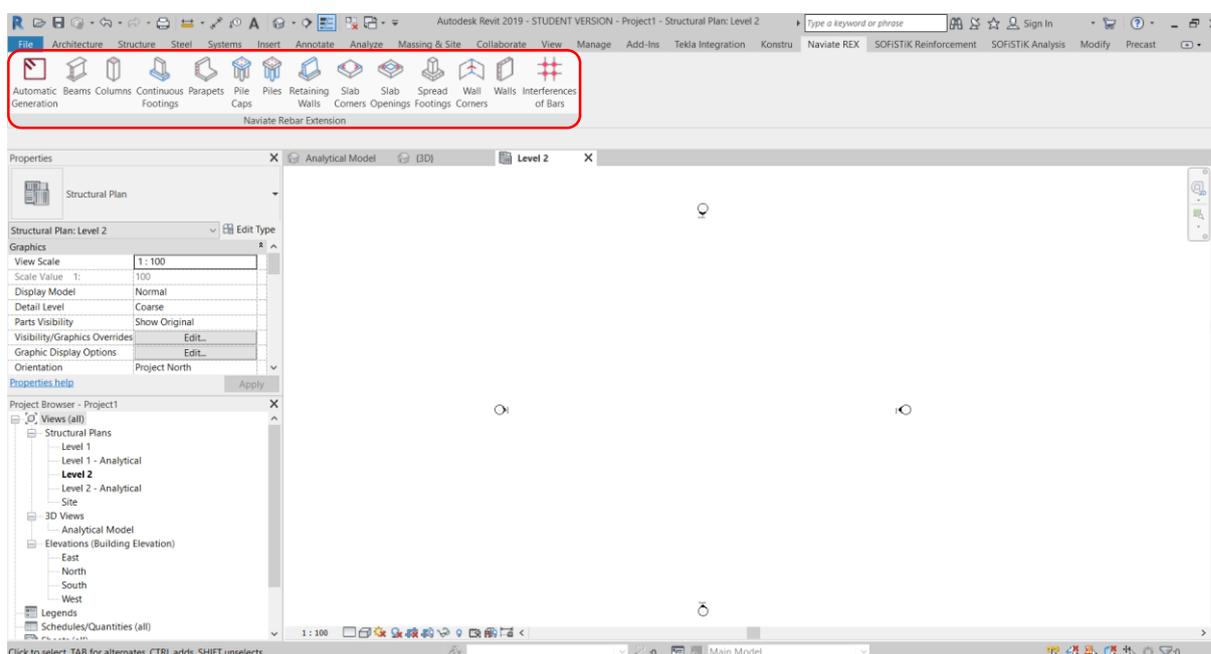


Figura 2.11: Separador do Naviate Rebar Extension no Autodesk Revit Structures.

2.9. Dynamo

O Dynamo é um software de programação visual, capaz de criar novas funcionalidades dentro do Autodesk Revit Structures, sendo que, mesmo com poucos conhecimentos em termos de programação, os utilizadores podem criar as suas próprias aplicações de apoio à modelação em Autodesk Revit Structures.

Esta ferramenta permite, tanto criar aplicações de interação com o modelo do Autodesk Revit Structures que estamos a desenvolver como criar um modelo a partir de regras mais complexas ou de dados externos (Autodesk@, 2018) como por exemplo o Excel.

3 CÁLCULO ESTRUTURAL E MODELOS 3D

3.1. Estrutura do trabalho

Neste capítulo vamos avaliar as potencialidades dos softwares de análise, dimensionamento, modelação e pormenorização em ambiente BIM. Através de 2 casos de estudo, serão analisadas as diversas funcionalidades, tanto do Autodesk Robot Structural Analysis como do Autodesk Revit Structures, de forma a ser possível analisar onde necessário uma intervenção que melhore a interoperabilidade entre os dois softwares, otimizando a pormenorização e detalhe de armaduras em BIM.

O primeiro caso de estudo é referente a uma estrutura simples em betão armado, constituída por uma laje maciça retangular apoiada em vigas, com um pilar em cada canto que por sua vez apoiam em fundações diretas.

O segundo caso de estudo é de um nível de complexidade um pouco superior ao primeiro, sendo que se considerou o piso como sendo de um hotel com acumulação de pessoas no interior, e apresenta, para além da laje, vigas, pilares e sapatas, uma abertura central para uma caixa de escadas e paredes estruturais no contorno da mesma.

Em ambos os modelos, a laje possui uma altura de 20 cm, e as secções transversais das vigas e dos pilares são quadrangulares de 40x40 cm. Na Figura 3.1 podem consultar-se as plantas desenhadas em Autodesk AutoCAD que serviram de base para a criação dos modelos estruturais em Autodesk Revit Structures dos casos de estudo 1 e 2, e que posteriormente foram exportados para o Autodesk Robot Structural Analysis com a finalidade de realizar a análise e dimensionamento estruturais.

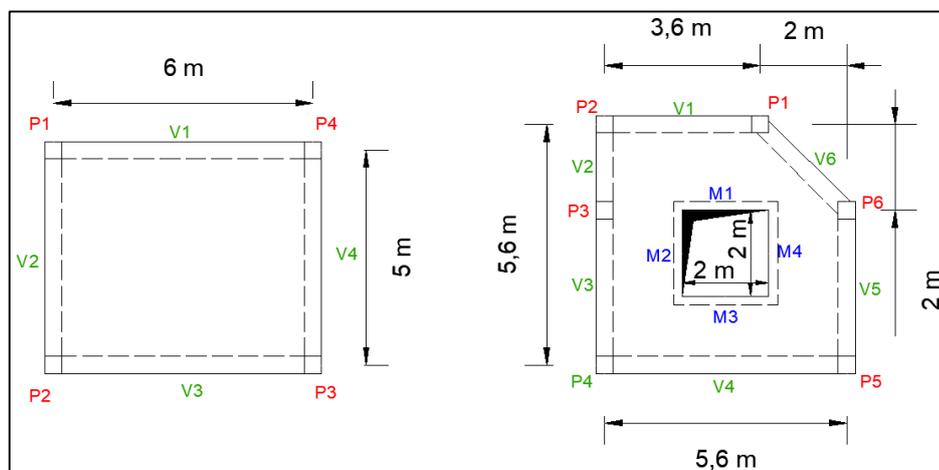


Figura 3.1: Plantas base para os casos de estudo 1 (esquerda) e 2 (direita).

Nas Figuras 3.2 e 3.3 podemos ver as duas estruturas modeladas no Autodesk Revit Structures com as respetivas dimensões e seções de todos os tipos de elementos estruturais.

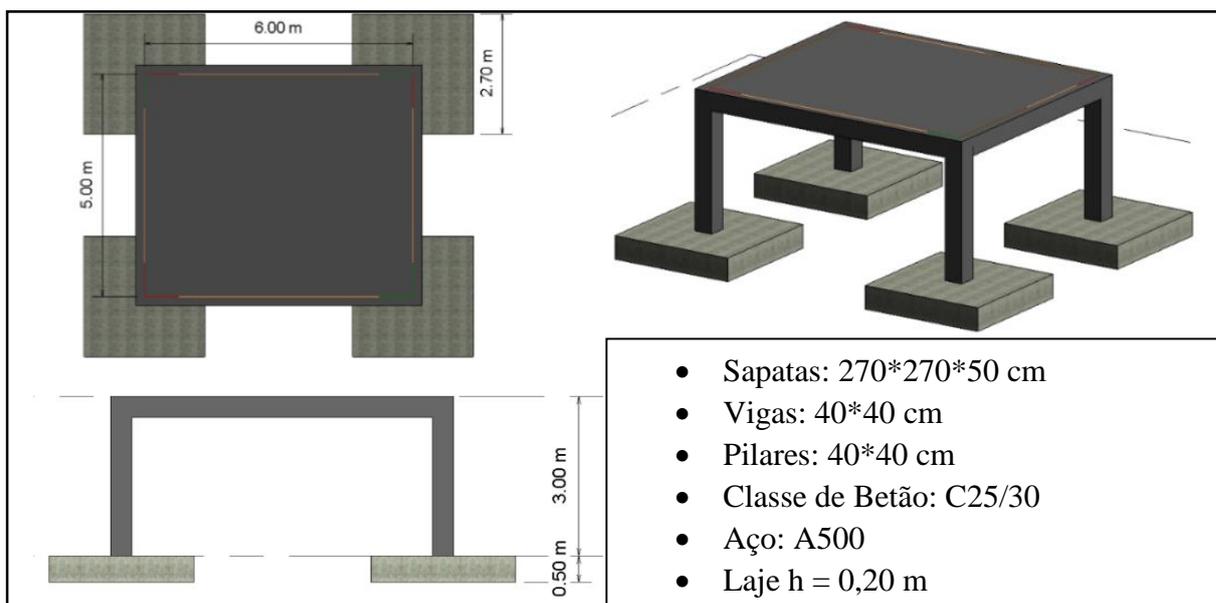


Figura 3.2: Modelo Autodesk Revit Structures com dimensões e seções do caso de estudo 1.

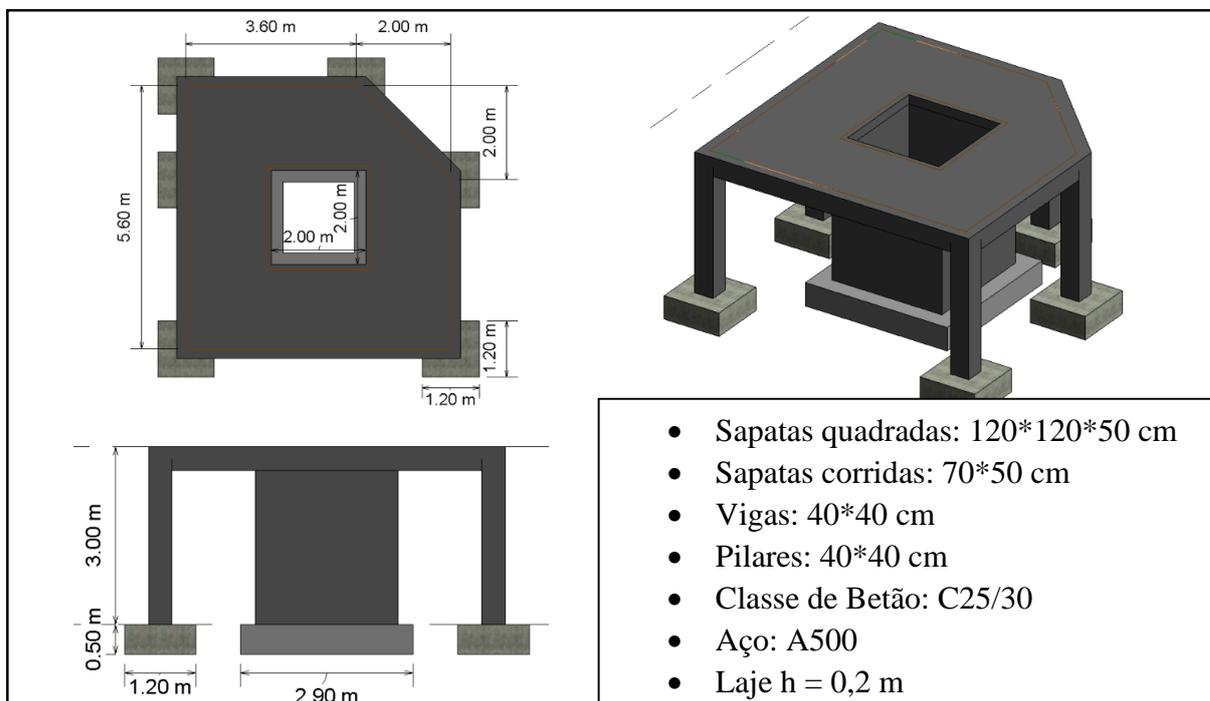


Figura 3.3: Modelo Autodesk Revit Structures com dimensões e secções do caso de estudo 2.

3.2. Análise e dimensionamento estrutural

Na fase de análise e dimensionamento, existem inúmeros softwares de cálculo no mercado que podem ser utilizados como é o caso do Autodesk Robot Structural Analysis, PAC-Pórticos, Sofistik, entre outros, como foi referido anteriormente. Esta fase do projeto é essencial para que posteriormente seja possível criar o modelo 3D de armaduras pretendido.

Para ambos os casos de estudo, recorreu-se ao software Autodesk Robot Structural Analysis Structural Analysis Professional 2019 disponibilizado pela Autodesk para uso académico numa primeira fase. Este software já contém disposições relativas a diversos regulamentos e normas de cálculo estrutural que o utilizador pode alterar de acordo com as suas necessidades.

Com base nos Eurocódigos (regulamentos atualmente em vigor na Europa de apoio ao cálculo estrutural), foram criadas combinações de cargas para ambos os casos práticos de estudo abordados anteriormente. Como o objetivo desta dissertação é o estudo da incorporação de armaduras de betão armado no projeto estrutural em BIM, foram apenas consideradas algumas combinações referentes aos estados limites últimos e estados limite de serviço, e não foram tidas em conta ações como vento, neve ou sismos, de modo a simplificar o processo de cálculo,

focando-nos essencialmente nas armaduras e nos pontos onde será necessária uma intervenção de melhoria para esta fase do projeto.

3.2.1. Bases para o projeto estrutural

Para o cálculo estrutural de ambos os casos de estudo anteriormente especificados, foram consideradas ações com base nos Eurocódigos, nomeadamente Eurocódigo 0 (NP EN 1990, 2009), Eurocódigo 1 (NP EN 1991-1-1, 2009) e Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010).

As **ações permanentes** incluem o peso próprio dos materiais constituintes da estrutura bem como o peso dos restantes materiais utilizados como paredes divisórias, revestimentos, etc.

As **ações variáveis** são determinadas atendendo à função da estrutura a construir, e de acordo com a legislação em vigor (Eurocódigos). Neste caso, as únicas ações variáveis a atuar nas duas estruturas serão as sobrecargas, que naturalmente serão diferentes uma da outra de acordo com a função de cada estrutura.

De modo a definir as **sobrecargas** atuantes em cada estrutura, deve definir-se previamente que tipo de estrutura se trata e qual a categoria em que está inserida segundo o Quadro 3.1.

Quadro 3.1: Categoria de utilização da estrutura (NP EN 1991-1-1, 2009).

Categoria	Utilização específica	Exemplos
A	Actividades domésticas e residenciais	Salas em edifícios de habitação; quartos e enfermarias de hospitais; quartos de hotéis, cozinhas e lavabos.
B	Escritórios	
C	Locais de reunião (com excepção das utilizações correspondentes às categorias A, B e D) ¹⁾	<p>C1: Zonas com mesas, etc.; por exemplo, em escolas, cafés, restaurantes, salões de jantar, salas de leitura, recepções.</p> <p>C2: Zonas com assentos fixos; por exemplo, em igrejas, teatros ou cinemas, salas de conferências, salas de aulas, salas de reunião, salas de espera.</p> <p>C3: Zonas sem obstáculos para a movimentação de pessoas; por exemplo, em museus, salas de exposição, etc. e em acessos de edifícios públicos e administrativos, hotéis, hospitais, e em átrios de entrada de estações de comboio.</p> <p>C4: Zonas em que são possíveis actividades físicas; por exemplo, salões de dança, ginásios, palcos.</p> <p>C5: Zonas de possível acolhimento de multidões; por exemplo, edifícios para eventos públicos, tais como salas de concertos, salas para actividades desportivas incluindo bancadas, terraços e zonas de acesso; plataformas ferroviárias.</p>
D	Actividades comerciais	<p>D1: Zonas de lojas em geral.</p> <p>D2: Zonas de grandes armazéns.</p>
<p><small>1) Chama-se a atenção para 6.3.1.1(2), em particular para C4 e C5. Ver a EN 1990 quando for necessário considerar efeitos dinâmicos. Para a Categoria E, ver o Quadro 6.3.</small></p> <p><small>NOTA 1: Dependendo das utilizações previstas, as zonas que seriam normalmente classificadas como C2, C3 e C4 poderão ser classificadas como C5 por decisão do dono de obra e/ou do Anexo Nacional.</small></p> <p><small>NOTA 2: O Anexo Nacional poderá estabelecer subcategorias para A, B, C1 a C5, D1 e D2.</small></p> <p><small>NOTA 3: Ver 6.3.2 para zonas de armazenamento ou de actividades industriais.</small></p>		

Após a atribuição da categoria a cada estrutura, é necessário atribuir o valor da sobrecarga atuante de acordo com a mesma. No Quadro 3.2 é possível consultar os valores das sobrecargas de acordo com a categoria da estrutura.

Quadro 3.2: Sobrecargas em pavimentos, varandas e escadas de edifícios (NP EN 1991-1-1, 2009).

<i>Categorias de zonas carregadas</i>	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
<i>Categoria A</i>		
- Pavimentos	1,5 a <u>2,0</u>	<u>2,0</u> a 3,0
- Escadas	<u>2,0</u> a 4,0	<u>2,0</u> a 4,0
- Varandas	<u>2,5</u> a 4,0	<u>2,0</u> a 3,0
<i>Categoria B</i>	2,0 a <u>3,0</u>	1,5 a <u>4,5</u>
<i>Categoria C</i>		
- C1	2,0 a <u>3,0</u>	3,0 a <u>4,0</u>
- C2	3,0 a <u>4,0</u>	2,5 a 7,0 (<u>4,0</u>)
- C3	3,0 a <u>5,0</u>	<u>4,0</u> a 7,0
- C4	4,5 a <u>5,0</u>	3,5 a <u>7,0</u>
- C5	<u>5,0</u> a 7,5	3,5 a <u>4,5</u>
<i>Categoria D</i>		
- D1	<u>4,0</u> a 5,0	3,5 a 7,0 (<u>4,0</u>)
- D2	4,0 a <u>5,0</u>	3,5 a <u>7,0</u>

No Quadro 3.3 podemos consultar os valores recomendados pelo Eurocódigo 0 para os coeficientes ψ em edifícios de minoração das sobrecargas aplicadas na estrutura.

Quadro 3.3: Valores dos coeficientes ψ para edifícios (NP EN 1990, 2009).

Acção	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecargas em edifícios (ver a EN 1991-1-1)			
Categoria A: zonas de habitação	0,7	0,5	0,3
Categoria B: zonas de escritórios	0,7	0,5	0,3
Categoria C: zonas de reunião de pessoas	0,7	0,7	0,6
Categoria D: zonas comerciais	0,7	0,7	0,6
Categoria E: zonas de armazenamento	1,0	0,9	0,8
Categoria F: zonas de tráfego, peso dos veículos ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categoria G: zonas de tráfego, 30 kN < peso dos veículos ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Categoria H: coberturas	0	0	0
Acção da neve em edifícios (ver a EN 1991-1-3) ¹⁾			
- Finlândia, Islândia, Noruega, Suécia	0,70	0,50	0,20
- Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H > 1000$ m acima do nível do mar	0,70	0,50	0,20
- Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H \leq 1000$ m acima do nível do mar	0,50	0,20	0
Acção do vento em edifícios (ver a EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatura (excepto incêndio) em edifícios (ver a EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
<i>NOTA: Os valores de ψ poderão ser definidos no Anexo Nacional.</i>			
<i>¹⁾ Para os países não mencionados, considerar as condições locais relevantes.</i>			

3.2.1.1. Estados Limites Últimos

Para a verificação da segurança aos estados limites últimos, consultou-se o Eurocódigo 0, considerando apenas a combinação fundamental.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \tag{3.1}$$

Os coeficientes parciais de segurança a considerar para os valores de cálculo das ações são determinados com base no mesmo regulamento de acordo com o Quadro 3.4.

Quadro 3.4: Valores de cálculo das ações.

Situações de projecto persistentes e transitórias	Acções permanentes		Acção variável de base da combinação *)	Acções variáveis acompanhantes	
	Desfavoráveis	Favoráveis		Principais (caso existam)	Outras
(Expressão 6.10)	$\gamma_{G,sup} G_{k,sup}$	$\gamma_{G,inf} G_{k,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
<p>*) As acções variáveis são as consideradas no Quadro A1.1.</p> <p>NOTA 1: Os valores de γ poderão ser definidos no Anexo Nacional. O conjunto de valores recomendados para γ é: $\gamma_{G,sup} = 1,10$ $\gamma_{G,inf} = 0,90$ $\gamma_{Q,1} = 1,50$ nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis) $\gamma_{Q,i} = 1,50$ nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis)</p> <p>NOTA 2: Nos casos em que a verificação do equilíbrio estático também envolva a resistência dos elementos estruturais, como alternativa às duas verificações separadas baseadas nos Quadros A1.2(A) e A1.2(B) poderá ser adoptada uma verificação combinada, caso o Anexo Nacional o permita, baseada no Quadro A1.2(A) e com o seguinte conjunto de valores recomendados, que poderão ser alterados nesse Anexo: $\gamma_{G,sup} = 1,35$ $\gamma_{G,inf} = 1,15$ $\gamma_{Q,1} = 1,50$ nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis) $\gamma_{Q,i} = 1,50$ nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis) desde que a aplicação de $\gamma_{G,inf} = 1,00$, tanto às parcelas favoráveis como desfavoráveis das acções permanentes, não produza um efeito mais desfavorável.</p>					

Segundo os dados do quadro acima, os valores para os coeficientes parciais de segurança para os valores de cálculo das ações são os seguintes:

- $\gamma_{G,j} = 1,35$ ou $1,0$ (respetivamente se a ação for desfavorável ou favorável);
- $\gamma_{Q,1}$ e $\gamma_{Q,i} = 1,5$ ou $0,0$ (respetivamente se a ação for desfavorável ou favorável).

3.2.1.2. Estados Limites de Utilização

Para os a verificação da segurança aos estados limites de utilização foram consideradas 3 combinações, nomeadamente características, frequentes e quase-permanentes, de acordo com o Eurocódigo 0.

- Combinação característica (rara):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.2)$$

- Combinação Frequente:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.3)$$

- Combinação quase-permanente:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.4)$$

De acordo com as expressões 3.2, 3.3 e 3.4 e com os coeficientes ψ indicados no Quadro 3.4 e os respectivos coeficientes parciais de segurança para os valores de cálculo das ações, podem ser calculadas as combinações consideradas na verificação aos estados limites de utilização de cada uma das estruturas.

3.2.2. Autodesk Robot Structural Analysis

De acordo com as bases para o projeto estrutural mencionadas anteriormente, foi realizada a análise estrutural para cada um dos casos de estudo recorrendo ao software Autodesk Robot Structural Analysis 2019. De seguida procedeu-se ao respetivo dimensionamento com o intuito de obter uma solução de armaduras para posteriormente modelar no software Autodesk Revit Structures 2019.

Para o **caso de estudo 1**, cujo modelo analítico é apresentado na Figura 3.4, foram consideradas as seguintes ações:

- Peso próprio estrutural (**PPI**);
- Restantes cargas permanentes (**RCPI**) com um valor de 4,5 kN/m²;
- Sobrecarga (**q1**) de 2 kN/m²;

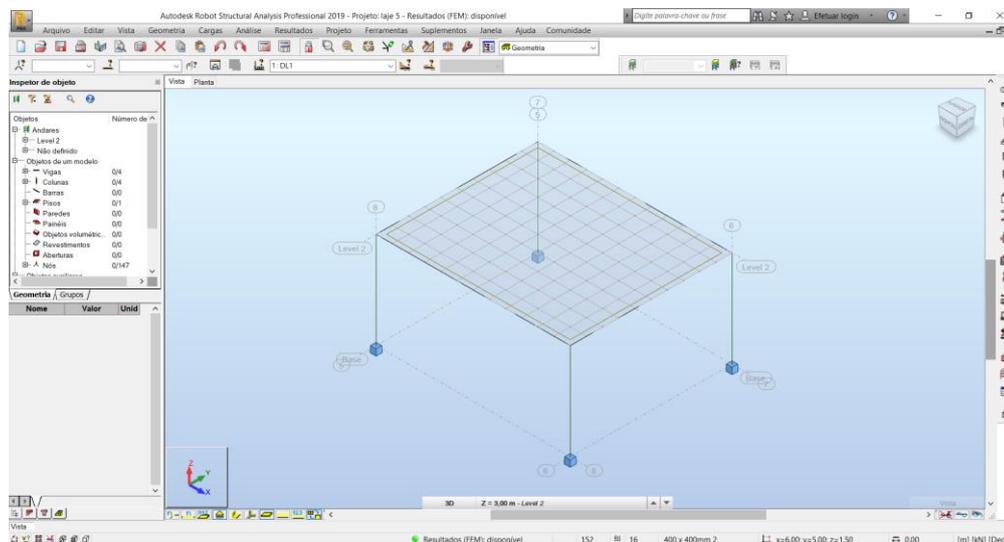


Figura 3.4: Modelo analítico para o caso de estudo 1 no Robot Structural Analysis.

Para o **caso de estudo 2**, cujo modelo analítico é apresentado na Figura 3.5 e sendo de complexidade mais elevada do que o primeiro, as ações consideradas foram as seguintes:

- Peso próprio estrutural (**PP2**);
- Restantes cargas permanentes (**RCP2**):
 - Betonilha de 15 cm de 3kN/m²;
 - Alvenarias de 2,1 kN/m².
- Sobrecarga (**q2**), tendo em conta que o piso equivale ao de um hotel com acumulação de pessoas, de 5 kN/m², equivalente à categoria C3 de acordo com o Quadro 3.1 do Eurocódigo 0 apresentado anteriormete.

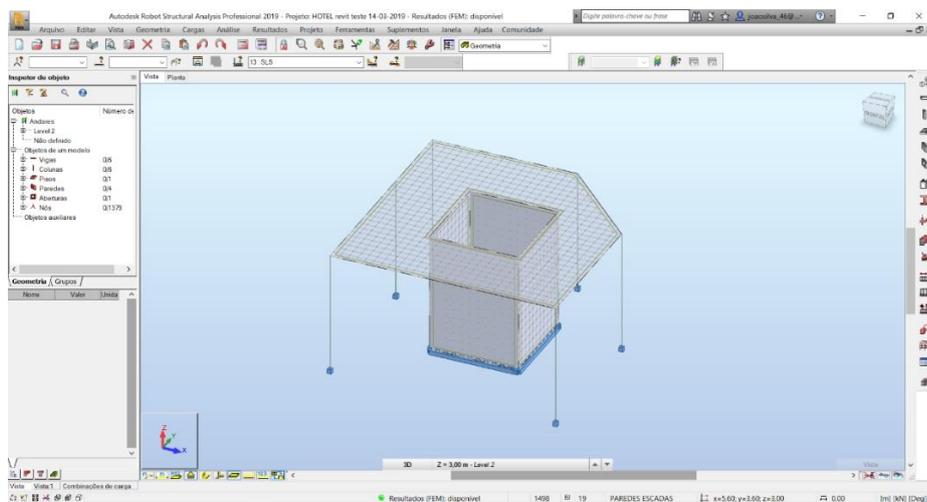


Figura 3.5: Modelo analítico para o caso de estudo 2 no Robot.

Para os coeficientes ψ_1 e ψ_2 das combinações frequente e quase-permanente, consultou-se o Quadro 3.4 presente no Eurocódigo 0 e utilizaram-se os valores tabelados relativos a edifícios da categoria C. Posto isto, foram criadas as combinações de ações necessárias para a análise estrutural que se encontram especificadas no Quadro 3.5.

Quadro 3.5: Combinações de ações aplicadas em cada caso.

Combinações	Caso 1	Caso 2
ULS (Combinação Fundamental)	$1,35 * (PP1 + RCP1) + 1,5*q1$	$1,35 * (PP2 + RCP2) + 1,5*q2$
SLS (Combinação Característica)	$PP1 + RCP1 + q1$	$PP2 + RCP2 + q2$
SLS (Combinação Frequente)	$PP1 + RCP1 + \psi_1*q1$	$PP2 + RCP2 + \psi_1*q2$
SLS (Combinação Quase-permanente)	$PP1 + RCP1 + \psi_2*q1$	$PP2 + RCP2 + \psi_2*q2$

Após a análise estrutural de cada estrutura, irão calcular-se as respetivas armaduras que serão posteriormente modeladas no Autodesk Revit Structures de acordo com os resultados obtidos.

Nas Figuras 3.6 e 3.7 podem observar-se os mapas de esforços referentes aos momentos fletores nas lajes para combinação fundamental dos estados limites últimos, resultantes do cálculo estrutural para os casos de estudo 1 e 2 no Autodesk Robot Structural Analysis. Os esforços dos restantes elementos estruturais como vigas e pilares encontram-se nos anexos desta dissertação.

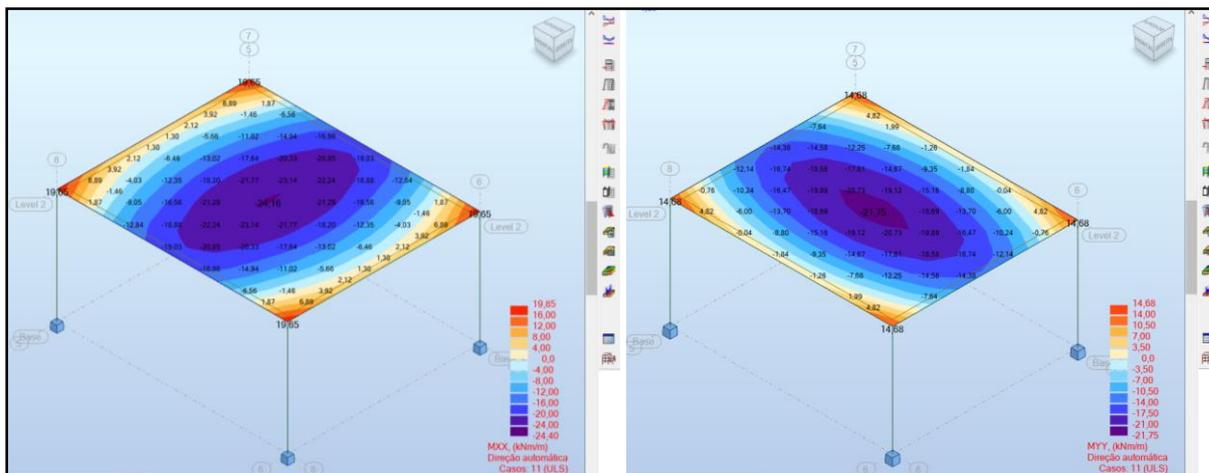


Figura 3.6: Momentos fletores na laje segundo as direções X (esquerda) e Y (direita) do caso 1.

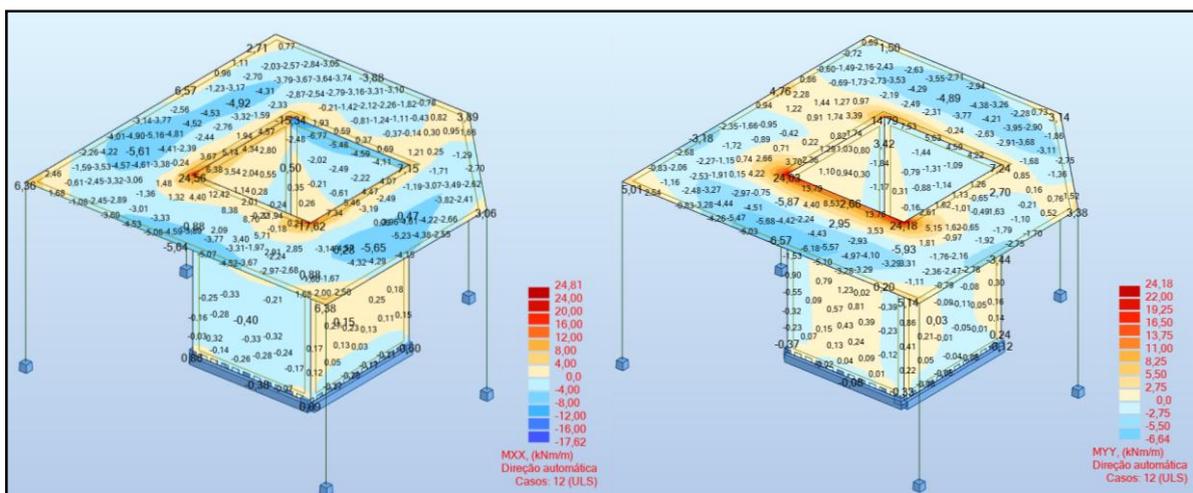


Figura 3.7: Momentos fletores na laje e nas paredes estruturais segundo as direções X (esquerda) e Y (direita) do caso 2.

3.2.3. Autodesk Robot Structural Analysis vs Sofistik Analysis

Atualmente, quando se procede à exportação do modelo do Autodesk Revit Structures para o Autodesk Robot Structural Analysis, ou vice-versa, é necessário que o engenheiro tenha em atenção o modelo analítico gerado pelo Revit, pois por vezes pode haver alguma incorreção na geração do mesmo, visto que tem como base o modelo 3D que pode apresentar por vezes algumas diferenças após a importação do Autodesk Robot Robot Structural Analysis. Deste modo, o engenheiro deve verificar esse modelo antes de realizar a exportação para o Robot com

a finalidade de proceder seguidamente à análise estrutural. Ainda que seja recomendado verificar o modelo analítico antes da exportação do mesmo, a modelação de toda a estrutura no Revit não deixa de ser bastante mais vantajosa do que modelar a mesma no software de cálculo com base numa planta previamente criada em CAD 2D. Para além do modelo analítico, o Revit também permite criar cargas e as respetivas combinações de ações, que também serão exportadas juntamente com o modelo analítico gerado.

Como referido anteriormente nesta dissertação, no decorrer do trabalho surgiu uma nova ferramenta que possibilita a realização da análise estrutural através do método dos elementos finitos dentro do Autodesk Revit Structures, que futuramente poderá ser uma mais valia no mundo do BIM.

Para realizar a análise estrutural no Autodesk Revit Structures realizaram-se os seguintes passos:

- Importou-se o modelo do Autodesk Robot Structural Analysis com as cargas e combinações de ações previamente definidas e aplicadas à estrutura, ainda que o Autodesk Revit Structures também permita adicionar cargas e combinações de ações aos modelos;
- Executou-se a verificação do modelo analítico como se pode ver na Figura 3.8;

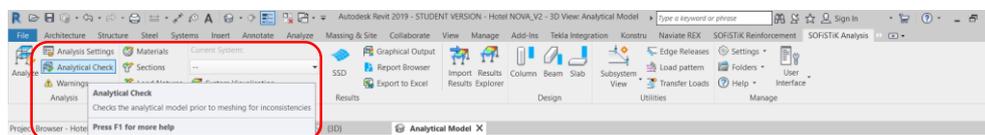


Figura 3.8: Verificação do modelo analítico no Sofistik Analysis.

- Procedeu-se ao cálculo estrutural do modelo como é exemplificado na Figura 3.9.

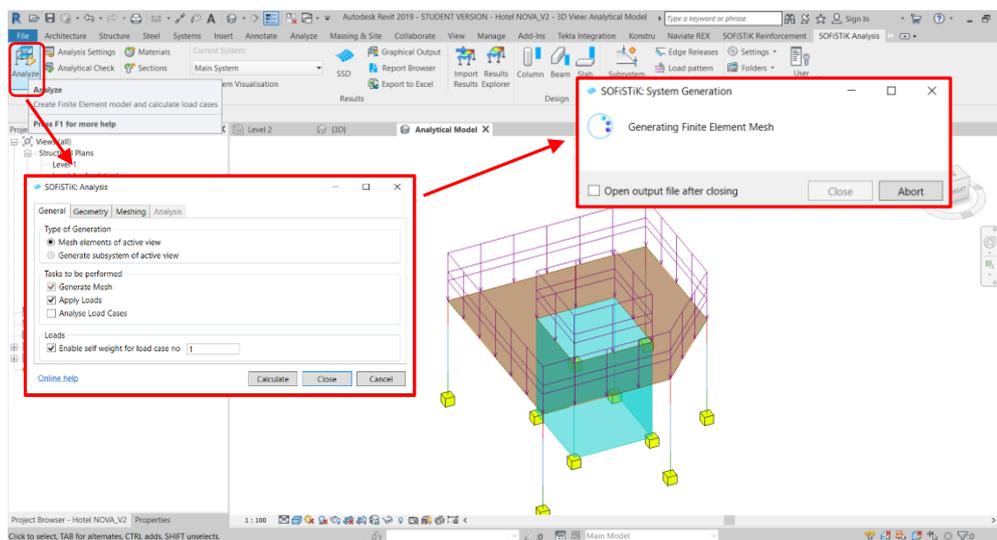


Figura 3.9: Análise estrutural no Sofistik Analysis.

De seguida são apresentados os diagramas de momentos fletores com base na combinação fundamental dos estados limites últimos para os elementos estruturais dos tipos viga e pilar, determinados a partir do Sofistik Analysis segundo a direção X, após a importação do modelo que se utilizou para o cálculo no Autodesk Robot Structural Analysis. Nas Figuras 3.10 e 3.11 podemos consultar esses diagramas para o caso de estudo 1 e 2 respetivamente, obtidos pelo Sofistik Analysis (esquerda), bem como os diagramas resultantes do mesmo cálculo no Autodesk Robot Structural Analysis (direita), e verificar que, embora haja algumas diferenças nos resultados obtidos estas não são significativas, sendo da ordem dos 3%, quando se realiza a comparação de ambos os resultados.

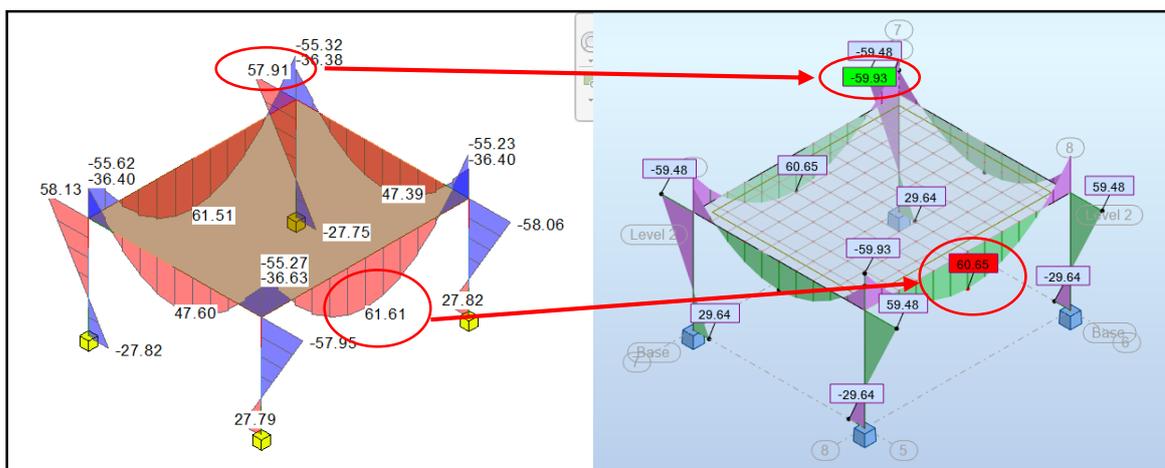


Figura 3.10: Diagramas de momentos fletores em vigas e pilares segundo a direção y para o caso de estudo 1.

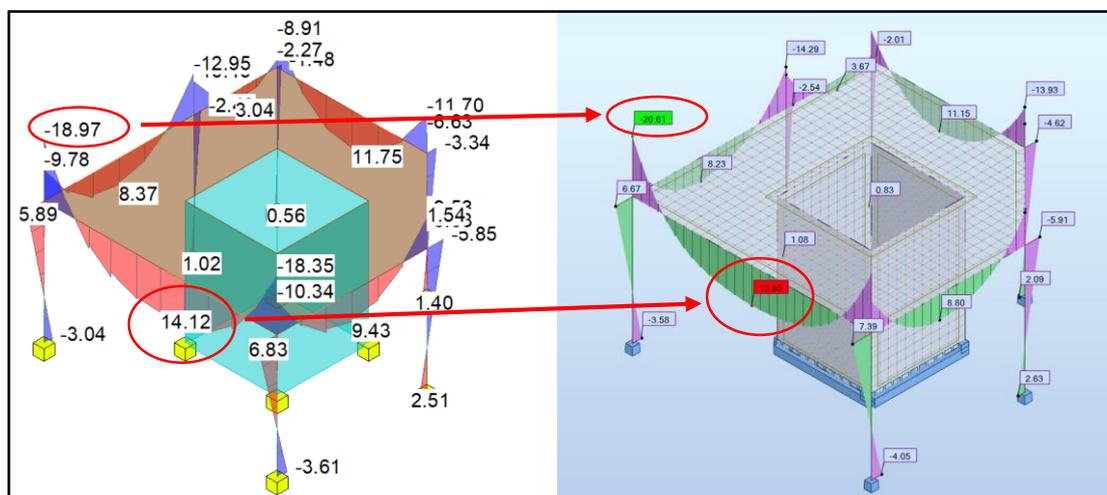


Figura 3.11: Diagramas de momentos fletores em vigas e pilares segundo a direção y para o caso de estudo 2.

Os diagramas de momentos fletores para vigas e pilares segundo as restantes direções cartesianas obtidos por ambos os softwares de análise estrutural, bem como os diagramas de esforços transverso e axial, podem ser consultados nos anexos desta dissertação.

Ainda que os esforços dos elementos estruturais do tipo viga e pilar sejam bastante semelhantes aos esforços obtidos através do Autodesk Robot Structural Analysis, acontece que no mapa de esforços dos elementos do tipo laje obtiveram-se diferenças significativas, da ordem dos 37% para momentos máximos, no Sofistik Analysis para o primeiro. Este resultado é deveras inesperado, e deve ser analisado com maior detalhe de forma a averiguar o que pode ter ocorrido com o modelo analítico do Autodesk Revit Structures que tivesse este desfecho. Realizou-se este mesmo cálculo alterando o valor do módulo de elasticidade para metade em ambos os softwares, obtendo mais uma vez diferenças nos momentos fletores das lajes e valores semelhantes para vigas e pilares, confirmando assim os resultados obtidos anteriormente. Nas Figuras 3.12, 3.13 podemos ver os mapas de momentos fletores segundo as direções x e y, e comparar com os mapas obtidos pelo Autodesk Robot Structural Analysis para o segundo caso de estudo da Figura 3.7. A comparação dos resultados para o primeiro caso de estudo encontram-se, mais uma vez, nos anexos desta dissertação.

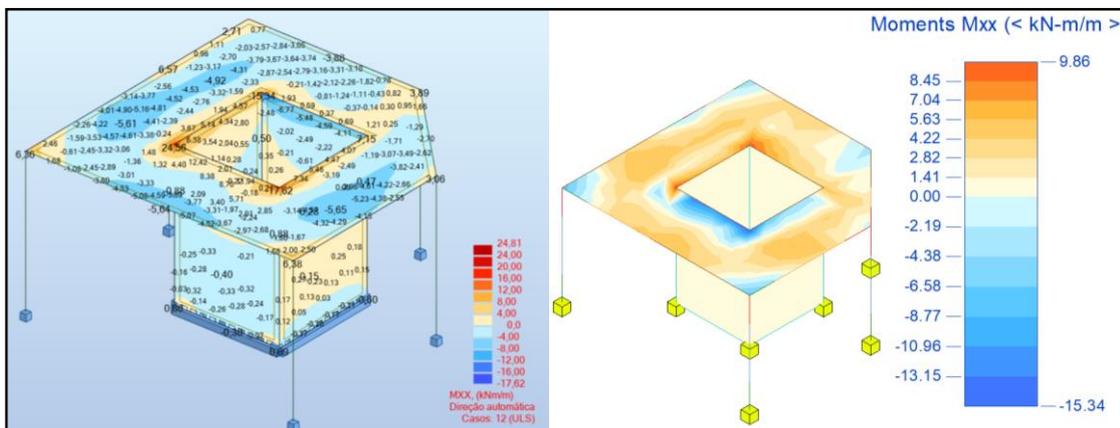


Figura 3.12: Diagramas de momentos fletores na laje do segundo caso de estudo na direção x, para ambos os softwares.

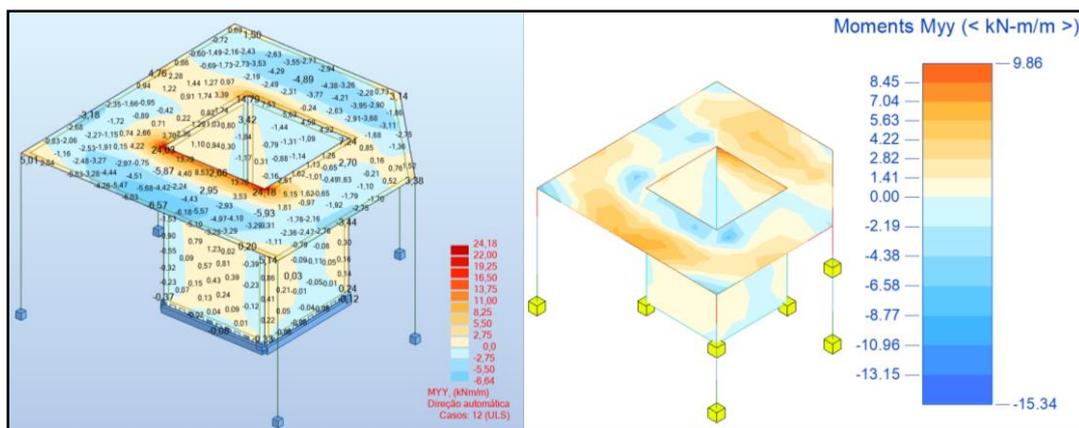


Figura 3.13: Diagramas de momentos fletores na laje do segundo caso de estudo na direção y, para ambos os softwares.

Após realizar os cálculos inúmeras vezes, e obtendo constantemente os mesmos resultados, chegou-se à conclusão que o facto de os valores dos momentos fletores das lajes obtidos através do Sofistik Analysis serem bastante diferentes dos valores obtidos pelo Autodesk Robot Structural Analysis, pode ter duas origens distintas que não foram analisadas ao pormenor nesta dissertação pelo simples facto de a prioridade do presente estudo ser a exportação automática das armaduras do Autodesk Robot Structural Analysis para o Autodesk Revit Structures.

Uma das causas deste resultado nos esforços das lajes pode dever-se à diferença nos modelos analíticos gerados pelo Autodesk Revit Structures, quando se importa a estrutura do Autodesk

Robot Structural Analysis. Este erro será abordado no capítulo 4, na exportação automática das armaduras do software de cálculo para o de modelação 3D.

A segunda causa pode estar diretamente relacionada com extensão de cálculo da Sofistik, sendo que não foi possível tirar uma conclusão concreta. Ainda que possam existir algumas limitações atualmente, este software apresenta uma grande potencialidade para no futuro ser possível realizar a análise estrutural diretamente no modelo criado no Autodesk Revit Structures, o que será bastante vantajoso para ajudar a implementar o BIM no mundo da engenharia.

3.3. Modelos 3D de armaduras no Autodesk Revit Structures

Após a análise e dimensionamento estrutural procedeu-se à elaboração dos modelos de armaduras para cada um dos casos de estudo com base nos resultados obtidos no dimensionamento estrutural.

No separador “Structure” do Autodesk Revit Structures podemos realizar a modelação das armaduras de betão armado necessárias para obter o modelo final 3D das mesmas. No entanto, este ainda apresenta bastantes falhas na execução deste tipo de modelação, principalmente nos detalhes de amarrações ou de ligações entre elementos estruturais, e nas armaduras de lajes ou paredes estruturais. Na Figura 3.14 temos um exemplo da modelação da armadura de um pilar recorrendo apenas às funções existentes no software.

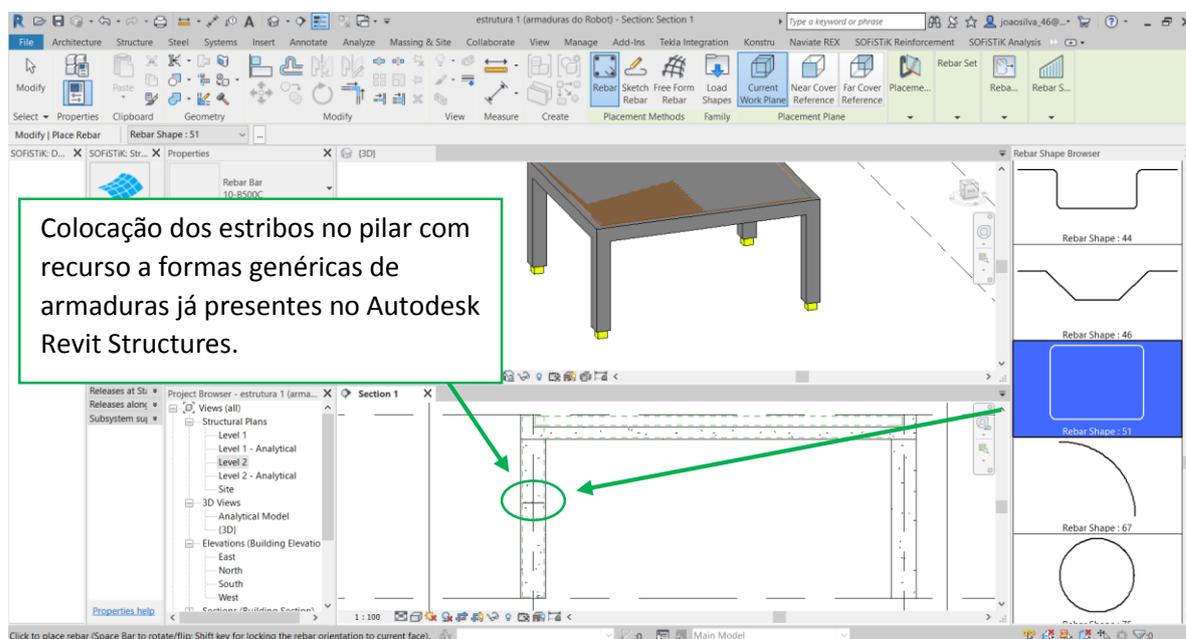


Figura 3.14: Modelação da armadura transversal de um pilar em Autodesk Revit Structures.

Para além deste separador, também existem extensões que ajudam neste tipo de modelação, como é o caso do “*Sofistik Reinforcement Detailing*” disponibilizado na loja de aplicações da Autodesk, ou do “*Naviate Rebar Extension*”, disponibilizado pela própria Naviate. Na Figura 3.15 é possível ver a aplicação desta última na modelação automática de uma viga para o caso de estudo 1.

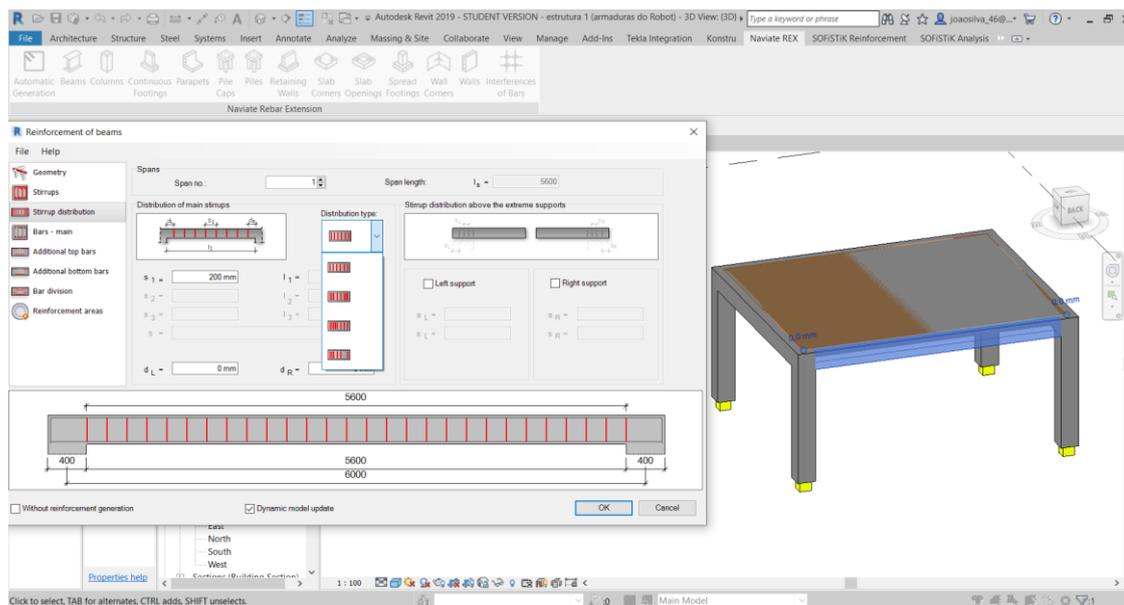


Figura 3.15: Modelação da armadura de uma viga com o Naviate Rebar Extension.

Como mero exemplo, uma das lacunas encontradas na fase de modelação das armaduras no separador Structure do Autodesk Revit Structures acontece ao criar os estribos ou armaduras longitudinais de um pilar ou viga. Essa armadura, dado que é possível colocar todos os varões ao mesmo tempo, fica toda como um só elemento, ou seja, uma array que possui todos os estribos ou varões longitudinais de uma das faces do pilar ou viga. Neste caso, havendo necessidade de eliminar parte da armadura por alguma razão, não é possível eliminar apenas um elemento sem que os outros sejam também eliminados. Assim sendo, neste caso específico contamos com o apoio do *Sofistik Reinforcement Detailing* com o comando “*isolate rebar*”, que permite isolar o varão e de seguida eliminar ou editar o mesmo separadamente dos restantes. Também existe o comando “*explode*”, semelhante ao comando com a mesma designação no AutoCad, que separa o conjunto de varões um por um. Estes são apenas pequenos exemplos da utilidade do *Sofistik Reinforcement Detailing* que estão exemplificados na Figura 3.16.

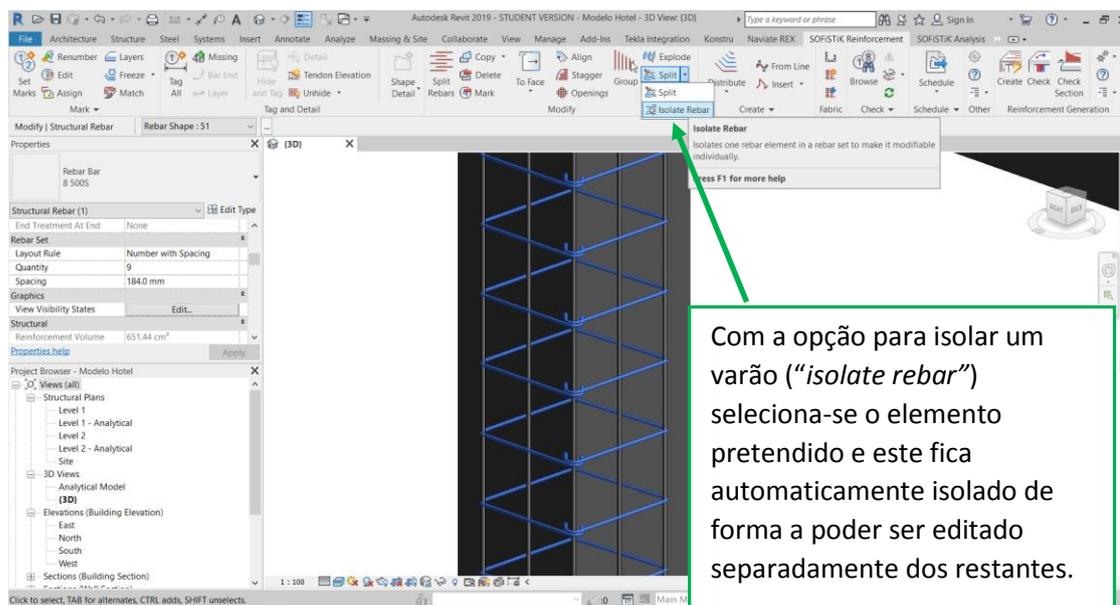


Figura 3.16: Separação das armaduras de uma *array* de estribos com o Sofistik Reinforcement Detailing.

Através destas ferramentas, e maioritariamente com o separador “Structure” e o “Sofistik Reinforcement Detailing”, pois apenas se utilizou o “Naviate Rebar Extension” em muito poucas ocasiões quando não foi possível obter resultados com as outras duas ferramentas, realizou-se a modelação e detalhe das armaduras com base nos resultados obtidos pelo Autodesk Robot Structural Analysis e criaram-se os modelos das Figuras 3.17 e 3.18 dos casos de estudo 1 e 2 respetivamente.

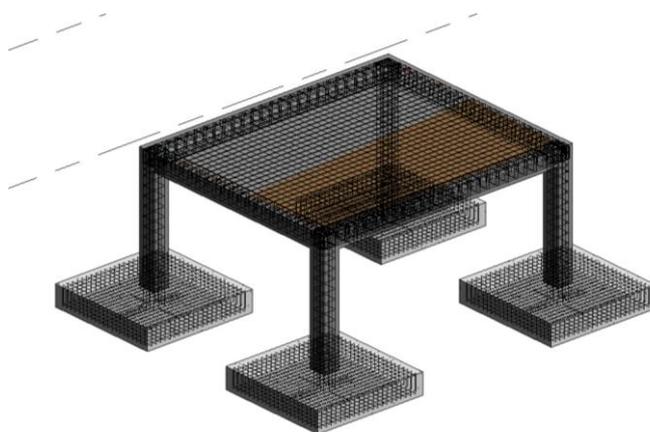


Figura 3.17: Modelo 3D de armaduras do caso de estudo 1.

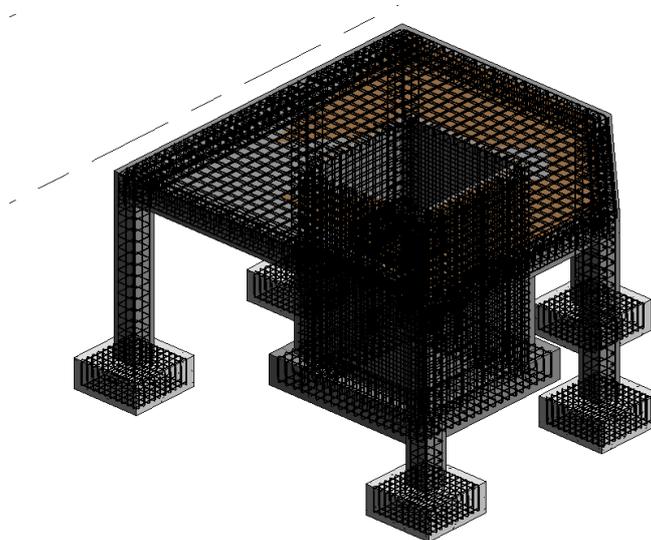


Figura 3.18: Modelo 3D de armaduras do caso de estudo 2.

3.3.1. Melhorias necessárias na modelação 3D

Durante todo o processo de modelação das armaduras de betão armado através do Autodesk Revit Structures e das extensões “Sofistik Reinforcement Detailing” e “Naviate Rebar Extension” mencionadas anteriormente, observou-se que continuam a existir uma série de problemas que surgem durante essa modelação como interseção de varões em amarrações ou nós de ligação entre elementos estruturais. Na Figura 3.19 está exemplificado o caso de um desses nós de ligação entre duas vigas onde se interseam os varões longitudinais para o caso de estudo 2.

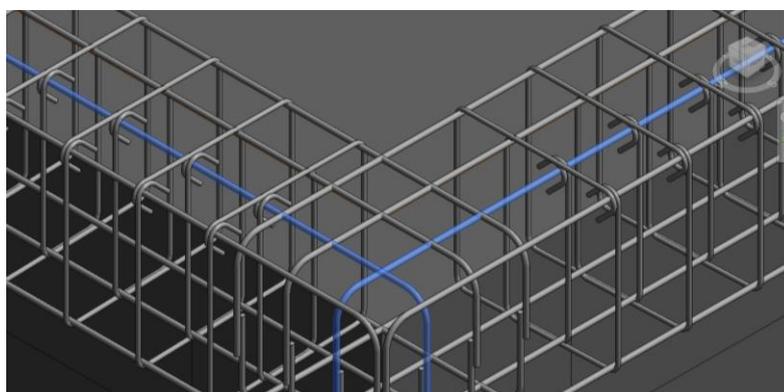


Figura 3.19: Pormenor de nó de ligação de duas vigas com interseção armaduras.

Outro fator que também necessita de melhoria é na criação das armaduras das lajes ou paredes estruturais, cujo comando presente no Autodesk Revit Structures não permite uma modelação totalmente correta, mesmo nos casos mais simples, e onde mais uma vez acontece uma sobreposição dos elementos da armadura. Para visualizar este aspeto podemos consultar a Figura 3.20, que apresenta a função “*Structural Area Reinforcement*” para criar a armadura de uma laje, e a Figura 3.21 onde se pode ver um pormenor da sobreposição dos elementos das armaduras superior e inferior na amarração. Esta função cria automaticamente a armadura da laje através da introdução pelo utilizador da direcção principal, diâmetro dos varões, espaçamentos ou número de varões necessários e os respetivos ângulos e comprimentos de amarração para as armaduras superior e inferior em cada direcção.

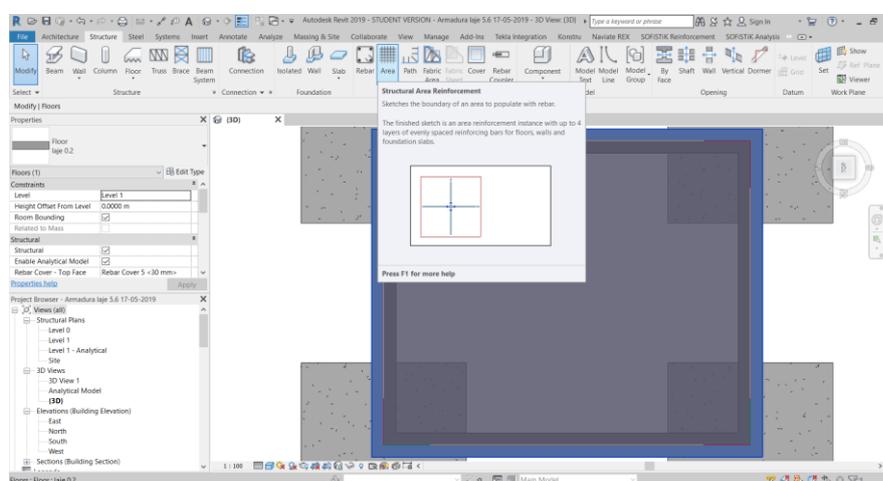


Figura 3.20: Função Structural area reinforcement para a armadura da laje.

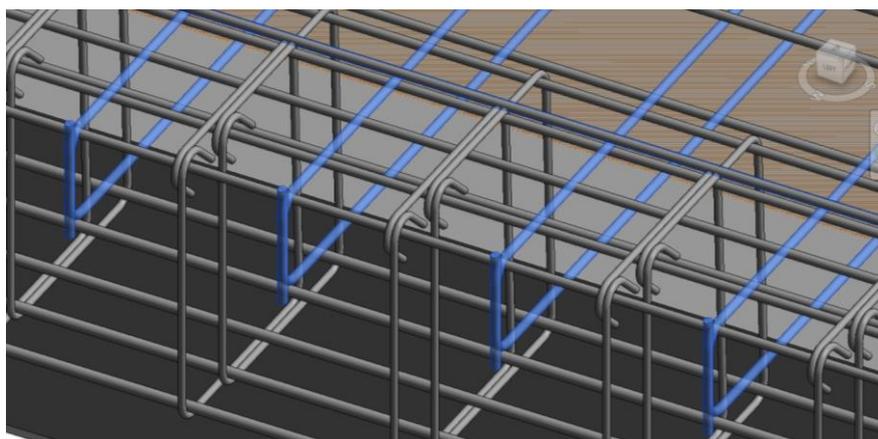


Figura 3.21: Pormenor da sobreposição das armaduras superior e inferior da laje.

De forma a encontrar uma solução para este tipo de inconvenientes podemos recorrer ao Dynamo, pois este software de programação visual permite desenvolver plug-ins capazes de criar a armadura pretendida. Outra solução possível passa por procurar novas extensões de outros fabricantes de software compatíveis ao Autodesk Revit Structures, que ajudem neste tipo de modelação encontrando novas soluções para estes possíveis inconvenientes, que necessitam de uma intervenção por parte da Autodesk que ajude o utilizador a desenvolver um modelo 3D o mais realista possível. Nesta segunda opção, também é necessário ter em consideração que demasiadas extensões adicionadas ao Autodesk Revit Structures podem provocar uma diminuição do desempenho do mesmo, ou o software acaba por se tornar demasiado confuso por ter uma excessiva quantidade de funções.

Para um futuro mais promissor no mundo do BIM, é necessário que seja dada a devida importância à modelação de armaduras, de forma a otimizar esta fase do projeto e ser possível trabalhar com os modelos 3D que serão sem dúvida apropriados e mais fáceis de interpretar, havendo assim uma alternativa aos desenhos em CAD 2D que se usam atualmente e que em certos casos são de interpretação mais complexa para quem está em obra.

4 AUTOMATIZAÇÃO ROBOT VS REVIT

Com o decorrer do presente trabalho, e como já foi mencionado anteriormente, estudou-se a possibilidade da passagem automática do modelo de armaduras 3D que o Autodesk Robot Structural Analysis permite gerar para o Autodesk Revit Structures, de forma a diminuir a necessidade de modelar as armaduras “manualmente”, criando parte do modelo de forma automática e economizando bastante tempo na concepção do projeto.

Esta automatização torna-se mais acessível com estes dois softwares pois, como já foi referido, a interoperabilidade entre eles é mais vantajosa, na medida em que pertencem ao mesmo fabricante, permitindo assim ao utilizador uma maior facilidade para a troca de informação entre os dois. Neste caso específico, como ambos os softwares pertencem à Autodesk, não há a necessidade da conversão dos mesmos em formato IFC, podendo assim realizar a troca de informação exportando ou importando os modelos diretamente de um software para o outro.

4.1. Modelo 3D no Autodesk Robot Structural Analysis

O Autodesk Robot Structural Analysis possui uma funcionalidade que nem todos conhecem, que permite calcular a armadura de cada elemento estrutural e produzir um modelo 3D da mesma com base nas combinações de ações utilizadas na análise estrutural.

O procedimento de cálculo da armadura de um elemento estrutural seja viga, pilar, laje, parede ou fundação, passa por definir em primeiro lugar os parâmetros do elemento estrutural (classe ambiental, classe estrutural, etc).

Na Figura 4.1, 4.2 e 4.3 apresenta-se o procedimento de cálculo do Autodesk Robot Structural Analysis dos modelos 3D das armaduras com base nos esforços calculados e no dimensionamento efetuado após esse cálculo.

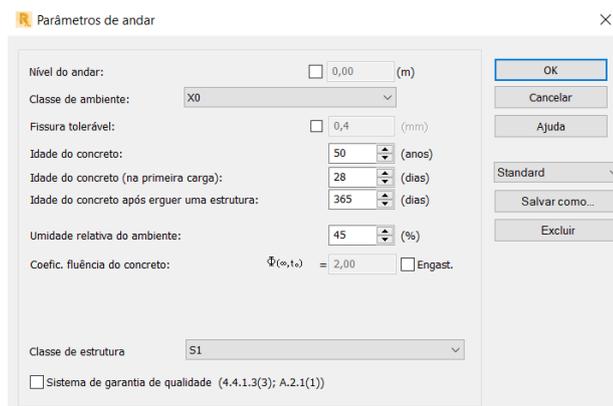


Figura 4.1: Parâmetros do elemento estrutural.

Em segundo lugar são introduzidos os dados para as opções de cálculo (classe de resistência do betão e do aço, diâmetros das armaduras, etc.). Na Figura 4.2 podemos ver alguns desses dados a introduzir.

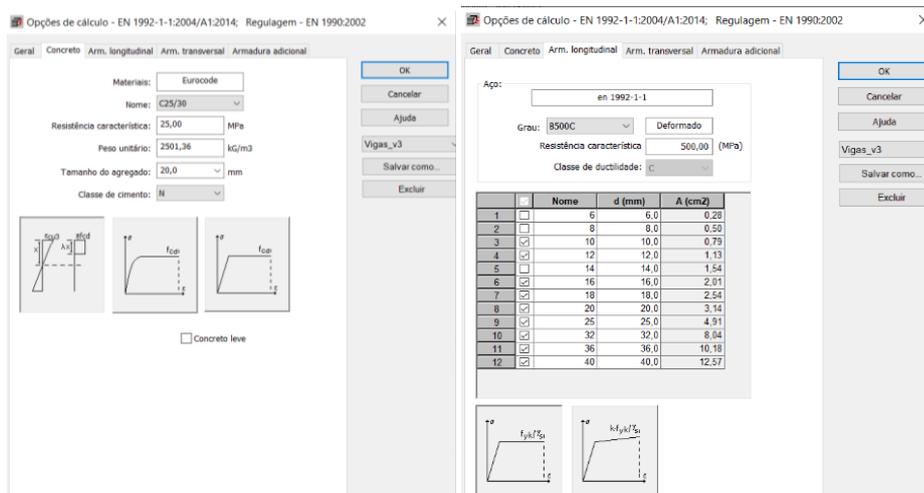


Figura 4.2: Opções de cálculo da armadura.

Em terceiro lugar são introduzidos os dados necessários do padrão da armadura pretendido para o elemento estrutural (disposição das armaduras superior e inferior e transversal, tipos de amarração, ângulos de dobragem dos varões, etc.), como se pode ver na Figura 4.3.

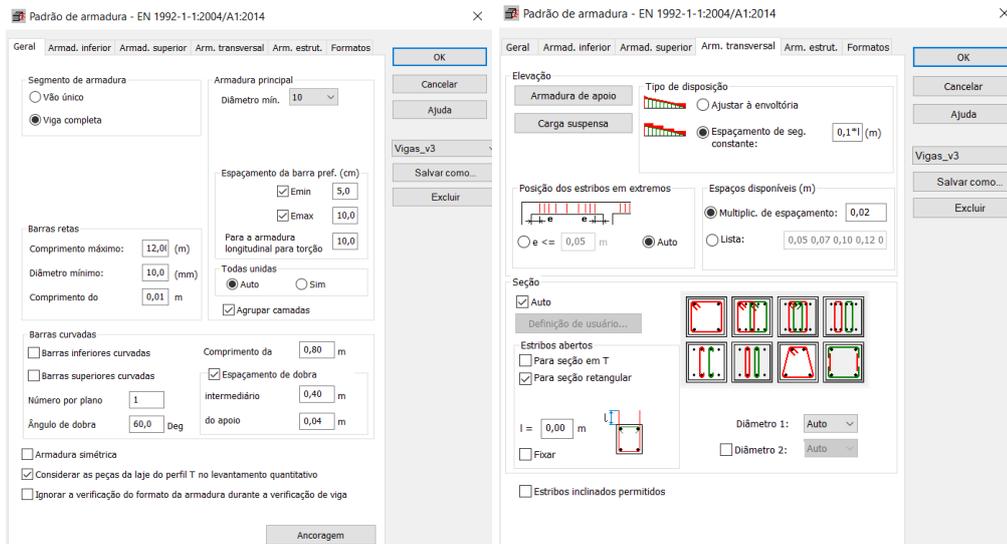


Figura 4.3: Padrão da armadura a colocar no elemento estrutural.

Finalmente através do ícone de cálculo da armadura, como podemos ver na Figura 4.4, calcula-se a mesma com base nos dados introduzidos e obtém-se o modelo 3D que será posteriormente exportado para o Autodesk Revit Structures.

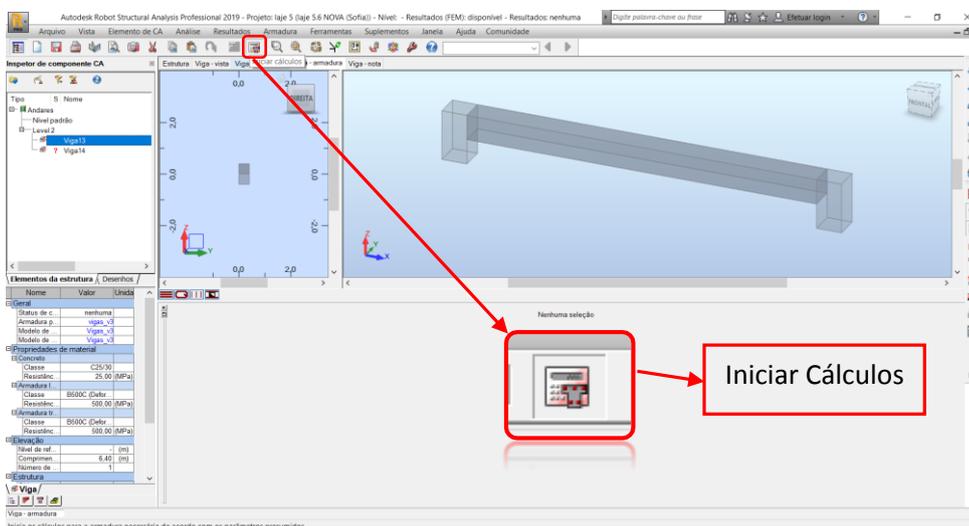


Figura 4.4: Opção que permite criar o modelo 3D de aramduras no Autodesk Robot Structural Analysis.

Na Figura 4.5 temos o resultado obtido numa das vigas do caso de estudo 1 que foi posteriormente exportado para o Autodesk Revit Structures. Neste resultado apresentado pelo

Autodesk Robot Structural Analysis não é possível criar corretamente as ligações entre as armaduras dos diferentes elementos estruturais porque o software apenas realiza o cálculo para cada um dos elementos individualmente. A modelação dessas ligações terá de ser corrigida no Autodesk Revit Structures após a exportação das armaduras.

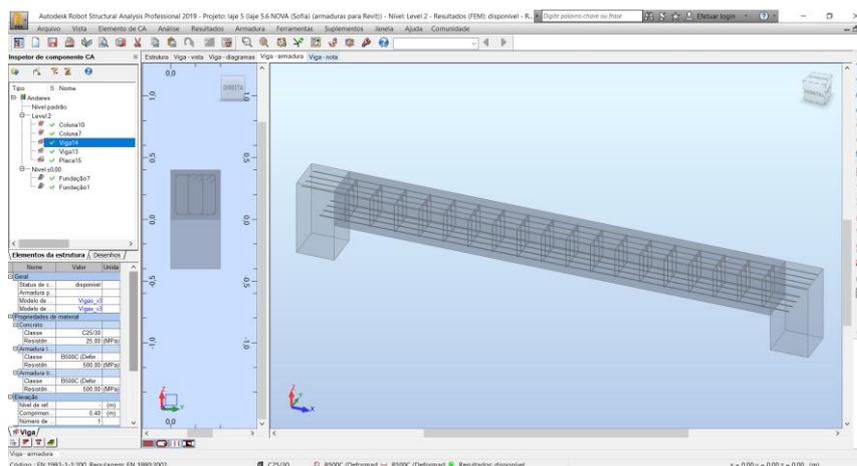


Figura 4.5: Exemplo do modelo 3D de uma das vigas a exportar para o Autodesk Revit Structures.

4.2. Modelo 3D no Autodesk Revit Structures

Realizaram-se vários testes com base nos casos de estudo 1 e 2, e verificou-se que existem algumas anomalias quando se executa a exportação das armaduras do Autodesk Robot Structural Analysis para o Autodesk Revit Structures, principalmente em vigas, cujas armaduras não se mantêm no local correto de acordo com o modelo 3D do Autodesk Robot Structural Analysis, movendo-se sempre para uma das extremidades da viga.

Através destes resultados, podemos deduzir que estas incorreções no modelo podem estar relacionadas com o facto de o Autodesk Robot Structural Analysis assumir os elementos estruturais pelo seu eixo central no modelo analítico. Por outro lado, é possível que o Autodesk Revit Structures por vezes assumira o modelo analítico pela face do pilar e não pelo eixo central, podendo assim diferir do primeiro e resultar numa diferente disposição das armaduras.

Após várias tentativas para perceber a origem deste resultado, verificou-se a ocorrência do mesmo em ambos os casos de estudo e nas diferentes vigas das estruturas. Desta forma, e tendo ao nosso dispor um poderoso software de programação visual como o Dynamo, optou-se por desenvolver uma ferramenta que permita corrigir estas anomalias, que ocorrem após a

exportação do modelo 3D de armaduras criado pelo Autodesk Robot Structural Analysis para o Autodesk Revit Structures.

Na Figura 4.6 pode observar-se o modelo 3D no Autodesk Revit Structures de uma das vigas, com os estribos da armadura da mesma descentrada após a importação do modelo, quando comparada com o modelo gerado pelo Autodesk Robot Structural Analysis da Figura 4.5.

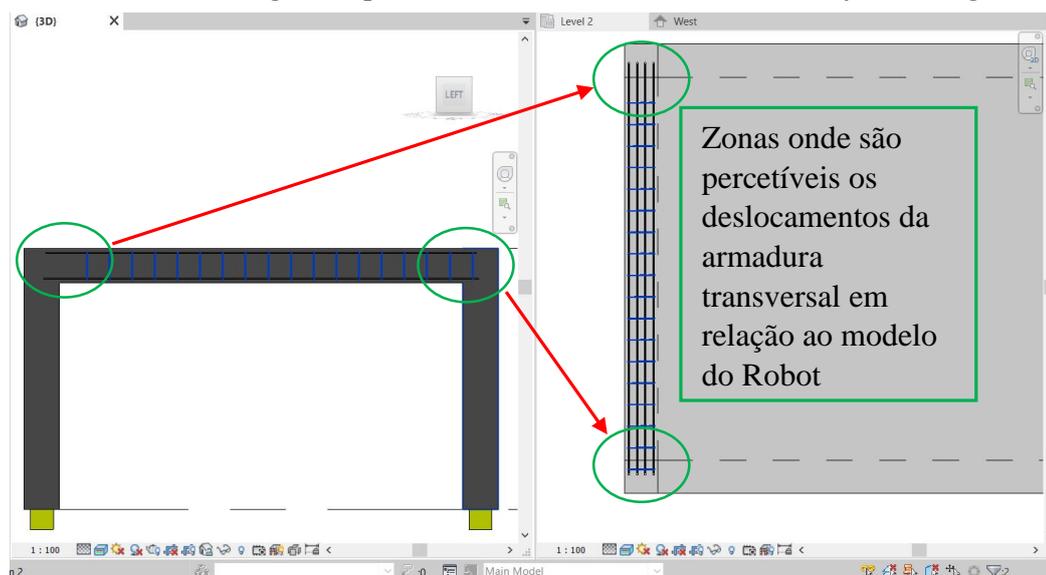


Figura 4.6: Armaduras das vigas deslocadas após importar o modelo do Autodesk Robot Structural Analysis.

4.3. Dynamo

De forma a corrigir os erros encontrados na exportação das armaduras para o Autodesk Revit Structures, e com particular foco para o erro encontrado nas vigas, procurou-se desenvolver uma ferramenta que permite colocar as armaduras das mesmas no seu local de origem como se encontram no Autodesk Robot Structural Analysis.

Para aceder ao Dynamo, é necessário ter o Autodesk Revit Structures aberto com a vista do modelo 3D da nossa estrutura, pois é nesta vista que ele permite correr os programas criados. No separador “Manage” temos dois ícones principais do software de programação visual, o “Dynamo” para criar novos programas e funções, e o “Dynamo Player” que permite correr os programas criados (ver Figura 4.7).

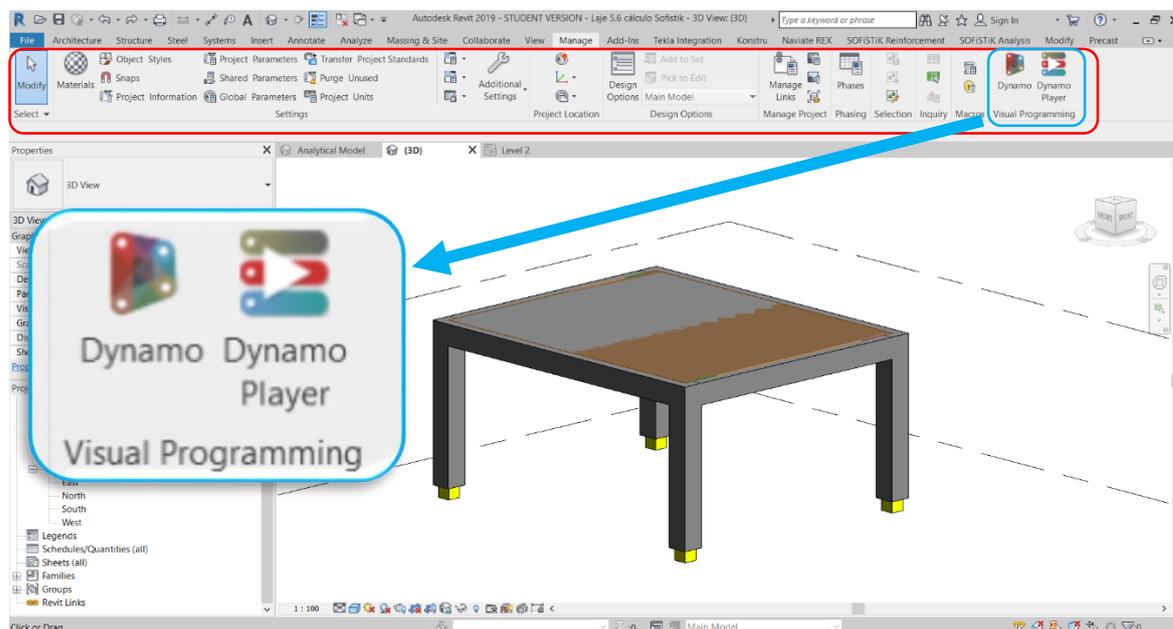


Figura 4.7: Separador onde se encontram as funções do Dynamo.

4.3.1. Plug-in 1

Inicialmente, antes de começar a desenvolver o código com a finalidade de encontrar uma solução para as anomalias encontradas nas vigas, foi necessária alguma pesquisa e dedicar algum tempo para a aprendizagem deste software, visto que no presente trabalho foi o primeiro contacto tido com o mesmo. Nesta fase começou-se por elaborar códigos de maior simplicidade que ajudaram a entender melhor o funcionamento do software de programação visual.

Numa primeira tentativa de corrigir o problema, foi utilizada uma função de *input* “*Select Model Elements*” que pede ao utilizador que selecione previamente a armadura que necessita de alterar, podendo assim adaptar-se este código uma vasta lista de elementos no Autodesk Revit Structures, como por exemplo armaduras principais de qualquer estrutura, elementos estruturais, etc. Na Figura 4.8 podemos ver esse *input* utilizado no Dynamo para a fase inicial do código a desenvolver.

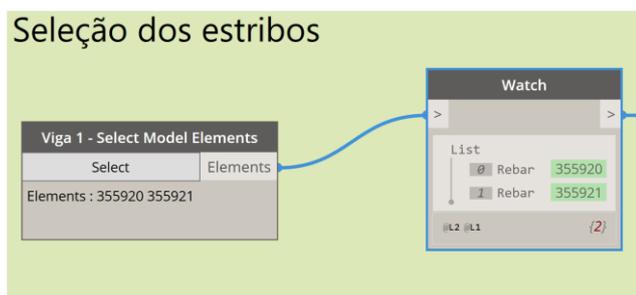


Figura 4.8: Input dos elementos a alterar.

Depois desta fase inicial, pensou-se em seguir um caminho cujo objetivo seria alterar as coordenadas geométricas do centro da *array* de estribos e sobrepor as mesmas com as coordenadas do centro da viga, alterando assim a localização dos estribos para o seu local correto. A designação *array* remete para um conjunto de dados do mesmo tipo, sendo neste caso o conjunto dos estribos da viga. Apesar de se ter conseguido criar parte deste código, não foi possível fazer a translação dos estribos devido a um erro encontrado que não permitiu mover um elemento do tipo *array* através de coordenadas. Esta primeira versão do código criado pode visualizar-se na Figura 4.9 na interface do Dynamo.

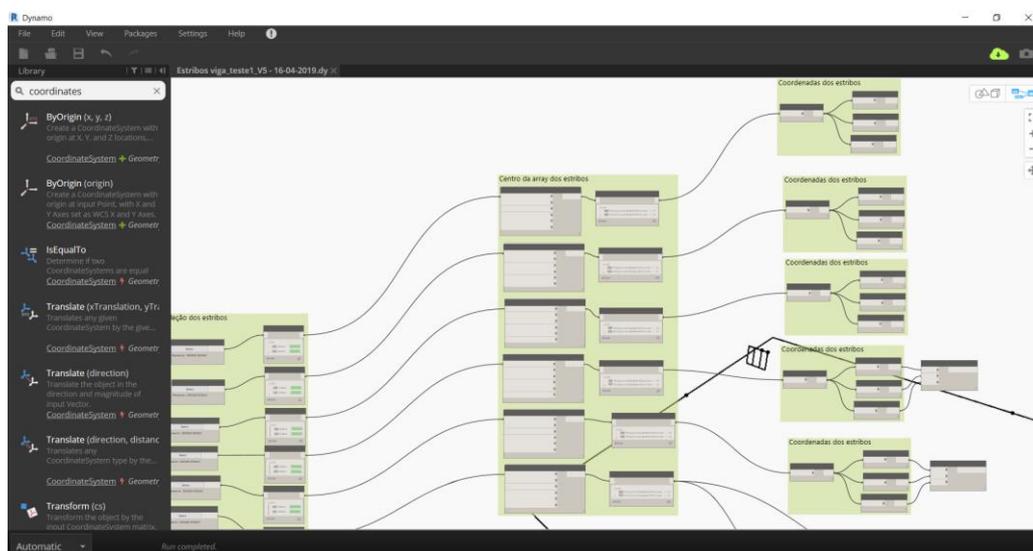


Figura 4.9: Código elaborado na interface do Dynamo.

De seguida, optou-se por alterar este código, evitando usar as coordenadas dos elementos, que permitisse ao utilizador alterar a posição dos mesmos através da introdução da distância pretendida pelo utilizador, ou através de um *slider*. Nesta segunda versão do código, foi encontrado um novo erro após correr o programa já numa fase final que, apesar de ter sido

possível fazer a translação dos estribos, o software não permitiu definir o seu local final devido ao facto de os estribos do elemento estrutural não serem assumidos pelo programa como uma “curva válida”. Na Figura 4.10 podemos visualizar a mensagem que aparece no Dynamo impossibilitando que se chegue ao resultado final pretendido.

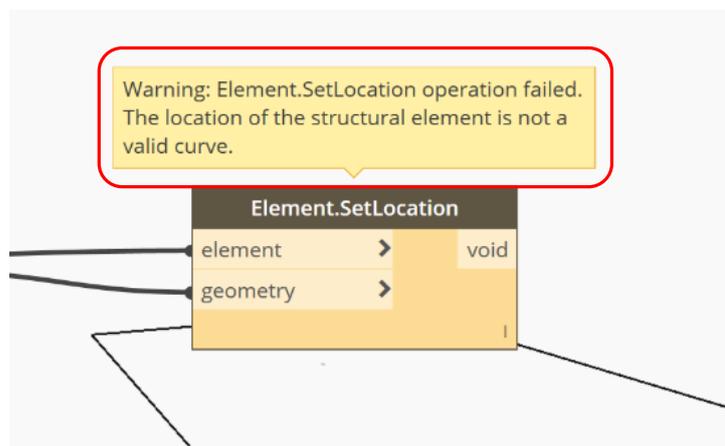


Figura 4.10: Erro ocorrido na fase final do código.

4.3.2. Plug-in 2

Após as dificuldades encontradas no primeiro *plug-in*, decidiu-se elaborar um novo código que, à semelhança do primeiro, permite ao utilizador introduzir a distância que o utilizador pretende deslocar os estribos do elemento estrutural ou o uso do *slider* apenas com o cursor do rato, que também permite realizar a translação da armadura horizontalmente ao longo da viga. O *slider* utilizado no desenvolvimento do código possibilita a alteração dos valores máximo e mínimo de acordo com o objetivo do utilizador, bem como o número de casas decimais da distância introduzida. Na Figura 4.11 apresenta-se um desses *input* para uma das vigas, que permite fazer uma translação, não só segundo a direção do eixo da viga, mas também segundo as outras duas direções cartesianas perpendiculares a esta.

Com um *slider* para cada uma das direções cartesianas (x,y,z), criou-se um vetor que irá permitir a translação dos estribos da viga, conseguindo desta forma dar continuidade ao desenvolvimento do código, e não havendo qualquer erro depois de testar o mesmo correndo o programa. Na Figura 4.11 também é possível visualizar um exemplo desses vetores para uma das vigas.

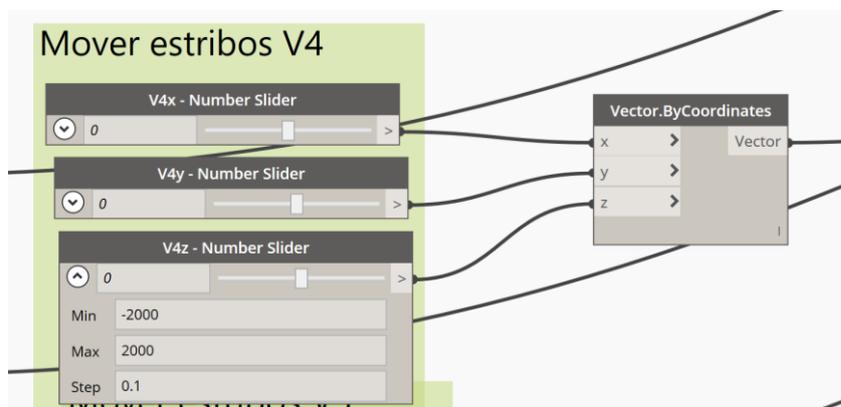


Figura 4.11: Criação do vetor através de sliders para cada direção.

Posteriormente encontrou-se uma função que, através do vetor criado consegue realizar a translação de qualquer elemento do Autodesk Revit Structures. Esta função, possibilitou, não só a translação das armaduras, mas também fixar o elemento na sua localização final, que foi o principal erro encontrado aquando do desenvolvimento do primeiro *plug-in*. Na Figura 4.12 podemos ver uma parte do código desenvolvido através do Dynamo, pois devido à extensão do mesmo não é possível visualizar o código completo (consultar anexo D), bem como na Figura 4.13 o programa final já na interface do Autodesk Revit Structures, pronto a receber os *inputs* e a ser corrido.

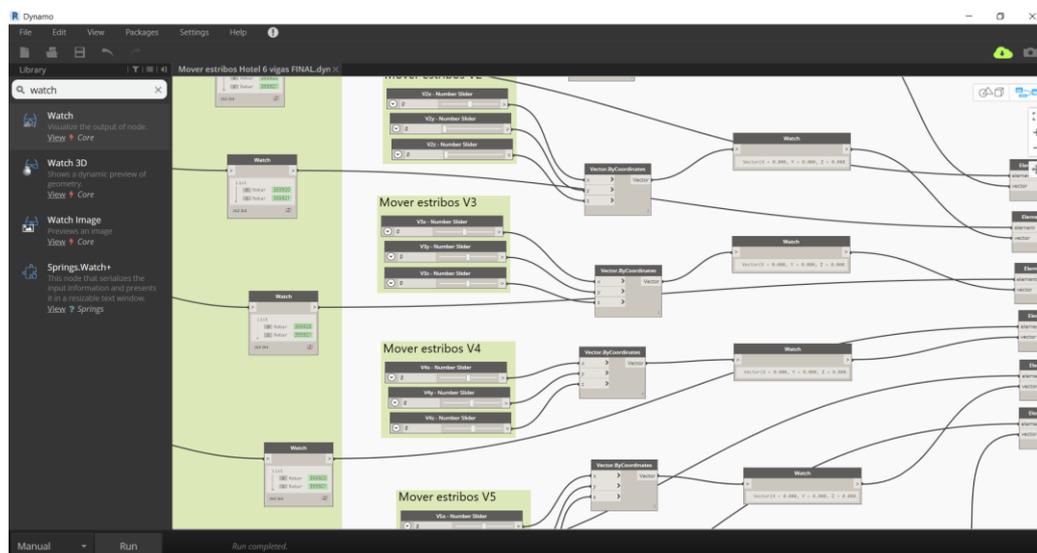


Figura 4.12: Código final utilizado na correção dos estribos.

No anexo D desta dissertação é possível visualizar os dois códigos criados, de modo um pouco mais perceptível, sendo que a sua extensão na interface do Dynamo não permite visualizar todos os detalhes com seria desejável.

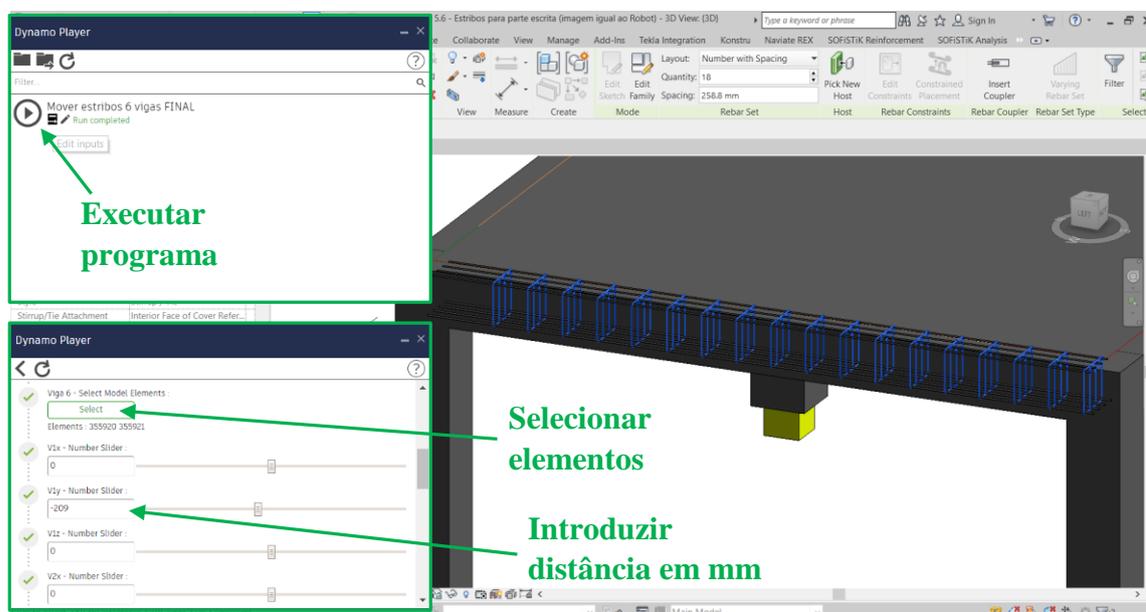


Figura 4.13: Dynamo Player pronto a receber os *inputs*.

Sem dúvida que o Dynamo é uma ferramenta bastante útil em qualquer tipo de situação. Embora o processo de desenvolvimento de uma aplicação através deste software seja bastante complexo, tornando-se por vezes bastante confuso quando temos códigos demasiado extensos, este permite resolver diversas situações que possam surgir na conceção do projeto, e com alguma prática regular começa a tornar-se bastante mais fácil e intuitivo trabalhar com ele.

Na Figura 4.13 podemos ver a exemplificação das fases de execução do programa criado no Dynamo para corrigir os estribos de uma das vigas.

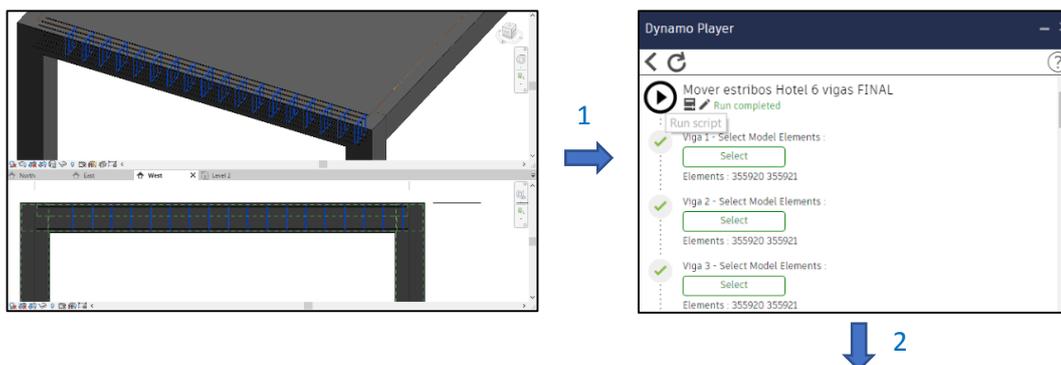




Figura 4.14: Exemplo de execução do programa criado para corrigir estribos.

5 CONCLUSÕES

Nesta dissertação, o trabalho incidiu essencialmente na exploração da modelação de armaduras de betão armado utilizando a metodologia BIM, sendo esta uma área ainda com bastante falta de informação e softwares capazes de satisfazer as necessidades dos engenheiros de estruturas, tendo assim uma maior margem de progressão para no futuro ser possível adotar esta metodologia no mundo da construção.

Um dos objetivos iniciais desta dissertação focou-se na modelação de duas estruturas de betão armado, nomeadamente os casos de estudo 1 e 2, sendo o segundo de complexidade ligeiramente superior ao primeiro. Neste estudo verificou-se que o software de modelação 3D de armaduras (Autodesk Revit Structures) ainda apresenta algumas dificuldades neste campo, essencialmente na criação de armaduras em elementos do tipo laje, paredes estruturais ou nas ligações entre os elementos estruturais constituintes da estrutura, onde as armaduras se sobrepõem em diversas ocasiões.

Durante a fase de análise estrutural, surgiu a possibilidade de estudar um software que permite o cálculo estrutural dentro do Autodesk Revit Structures sob a forma de extensão. No caso de apresentar boas capacidades na análise estrutural, esta extensão pode vir a ser bastante útil na medida em que deixa de haver necessidade de transferir o modelo para outro software, evitando assim algumas incompatibilidades que podem ocorrer na partilha de informação entre os softwares de análise estrutural e de modelação 3D. A extensão estudada (*Sofistik Analysis*) foi desenvolvida pela Sofistik, empresa que possui um software de análise estrutural e modelação que tem vindo a aumentar a sua popularidade, podendo vir a ser e um concorrente aos softwares desenvolvidos pela Autodesk com a mesma finalidade, nomeadamente o Autodesk Robot Structural Analysis. Através deste software, realizou-se a análise estrutural aos dois casos de estudo utilizando as mesmas combinações de cargas e compararam-se os resultados com os da análise executada através do Autodesk Robot Structural Analysis. Com esta nova análise estrutural concluiu-se que, apesar dos resultados para os elementos estruturais dos tipos viga e pilar serem semelhantes, o resultado obtido para as lajes de ambas as estruturas acabaram por apresentar diferenças bastante significativas, o que nos leva a concluir que possa haver alguma falha neste recente software, ou até no modelo analítico criado pela Autodesk Revit Structures que, de alguma forma, pode apresentar diferenças quando comparado com o modelo do Autodesk Robot Structural Analysis que não são possíveis detetar pelo utilizador.

O Autodesk Robot Structural Analysis, software utilizado na análise estrutural das duas estruturas, permite ao utilizador realizar uma análise estrutural, bem como o dimensionamento e pormenorização das armaduras, criando um modelo 3D das mesmas. Tal como o Autodesk Revit Structures, este software pertence à Autodesk, havendo deste modo uma melhor interoperabilidade entre eles, e permitindo assim a exportação dos modelos de um software para outro mais facilmente. Assim sendo, o Autodesk Robot Structural Analysis permite exportar o modelo gerado de armaduras de alguns elementos estruturais como vigas e pilares para o Autodesk Revit Structures, contornando assim a necessidade de modelar toda a armadura da estrutura neste último e tornando este processo de modelação de armaduras menos moroso.

Após a exportação do modelo de armaduras das vigas e pilares gerado pelo software de cálculo, verificou-se que no caso específico das vigas, a armadura de esforço transversal, e por vezes a longitudinal, não é exportada corretamente havendo um deslocamento dos varões para uma das extremidades da viga. Com este resultado, realizou-se alguma pesquisa na tentativa de encontrar a razão desta incompatibilidade, não se chegando a uma conclusão concreta da origem do problema, podendo o mesmo ter mais do que uma origem.

Após várias tentativas na exportação das armaduras e com a persistência do problema, optou-se por encontrar uma solução para o mesmo recorrendo à programação através do Dynamo, software de programação visual incluído num dos separadores no Autodesk Revit Structures.

Recorrendo ao Dynamo, o grande objetivo desta dissertação focou-se na elaboração de um *plugin* que permitisse corrigir o problema encontrado após a exportação das armaduras para o Autodesk Revit Structures. Nesse sentido, e depois de dedicar algum tempo à aprendizagem deste software de programação visual, conseguiu-se criar um código que permite corrigir o problema através da introdução por parte do utilizador de dois *inputs*. No primeiro, o utilizador necessita de selecionar a armadura que pretende alterar, enquanto que no segundo é pedida a distância em qualquer uma das direções cartesianas (x,y,z) que o utilizador pretende deslocar a armadura selecionada. Após a introdução destes *inputs* executa-se o programa e visualiza-se a correção das armaduras no modelo 3D do Autodesk Revit Structures.

5.1. Trabalhos futuros

A metodologia BIM tem vindo a crescer com a evolução dos softwares utilizados nas diferentes especialidades da engenharia, tendo como grande objetivo implementar esta metodologia no mundo da construção, que será definitivamente bastante mais vantajosa do que a metodologia atual.

Esta dissertação focou-se na incorporação das armaduras no projeto de estruturas em BIM, sendo que, após uma análise dos resultados obtidos, é perceptível que ainda há muitos aspetos

onde são necessárias melhorias de forma a ser possível implementar esta metodologia no mercado.

Assim sendo, esta lista apresenta algumas possibilidades de trabalhos futuros a estudar, de forma a contribuir para este objetivo:

- Estudar o software principal da Sofistik, que apresenta capacidades bastante promissoras na análise estrutural e modelação 3D, e vindo a ser continuamente melhorado, na medida em que será uma alternativa aos existentes;
- Focando-se na extensão *Sofistik Analysis* para o Autodesk Revit Structures, estudar os problemas encontrados na análise estrutural desta dissertação e perceber as causas da obtenção destes resultados nos mapas de esforços em lajes;
- Estudo da automatização da possibilidade de exportação das armaduras de elementos do tipo laje, parede estrutural e sapatas do Autodesk Robot Structural Analysis para o Autodesk Revit Structures;
- Através do modelo de armaduras, estudar a possibilidade de realizar a produção do mesmo através de máquinas de corte CNC;
- Realizar um estudo que aborde as potencialidades de vários softwares que permitam a modelação de armaduras, de forma a encontrar um que apresente maiores vantagens e que permita produzir um modelo o mais próximo possível do real;

Grande parte destas propostas, remetem essencialmente para a modelação de armaduras de betão armado, sendo este o campo onde são necessárias melhorias mais significativas e, por esta razão, a área com maior margem de progressão para o futuro do BIM aplicado ao projeto de estruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Eastman, C., Telcholz, P., Sacks, R., Liston, K., (2011). “BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors”. Wiley, New Jersey

Ferreira, B., Lima, J., Rio, J., Martins, J. P. (2012) “Integração da Tecnologia BIM no Projeto de Estruturas de Betão”, Encontro Nacional de Betão Estrutural - BE2012, pp. 24-26.

Lino, J. C., Azenha, M., Lourenço, P. (2012) “Integração da Metodologia BIM na Engenharia de Estruturas”, Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2012, pp. 24-26.

NP EN 1990 2009, “Eurocódigo 0 – Bases para o projeto de estruturas”. Portugal: IPQ

NP EN 1991-1-1 2009, “Eurocódigo 1 – Ações em estruturas: Parte 1-1: Ações gerais, pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios”. Portugal: IPQ

NP EN 1992-1-1 2010, “Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão: Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Portugal: IPQ

Patacas, J., Cachadinha, N. (2012) - “Metodologia para suporte da colaboração na indústria AEC baseada em BIM e em interoperabilidade”, Congresso Construção 2012 - 4º Congresso Nacional, pp. 18-20.

Pires, H. (2017), “Automatização da modelação BIM de armaduras no projeto de estruturas”. Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em engenharia civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Schenck, D. A., Wilson, P. R. (1994). “Information Modeling the EXPRESS way”. New York, Oxford University Press

Altoqi@ (2017). <http://maisengenharia.altoqi.com.br/bim/lod-trabalhando-bim-em-alto-nivel/>, acesso em 7/04/2019

Autodesk@ (2018). <https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/Autodesk-Revit-Structures-products/getting-started/caas/simplecontent/content/conhe-C3-A7a-ferramenta-dynamo-da-autodesk-e-saiba-como-funciona.html>, acesso em 24/04/2019

-
- AutodeskBuildingSolutions@ (2014). <https://www.youtube.com/watch?v=2yQvsSS0uHE&t=563s>, acesso em 20/04/2019
- BibLus@ (2017). <http://biblus.accasoftware.com/ptb/ifc-o-que-e-e-para-que-serve-qual-e-a-ligacao-com-o-bim/>, acesso em 7/04/2019
- BuildingSmart@ (2017). <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-releases>, acesso em 5/04/2019
- BuildingSmart@ (2019). <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/>, acesso em 20/06/2019
- Cadenas@ (2015). <https://www.cadenas.de/fr/actualites/communiqués/reader/items/cadenas-supports-ifc-exchange-format-for-bim>, acesso em 5/04/2019
- Coordenar@ (2016). <https://www.coordenar.com.br/o-ifc-e-muito-mais-que-um-simples-formato-de-arquivo/>, acesso em 5/04/2019
- Naviate@ (2019). <https://www.naviate.com/>, acesso em 4/06/2019
- Newton@ (2012). <http://port.newton.pt/pt/software-empresas/calculo-estruturas.html>, acesso em 15/03/2019
- Sofistik@ (2019). <https://www.sofistik.com/company/about-us/>, acesso em 3/06/2019
- SOFiSTiKAG@ (2019). <https://www.youtube.com/watch?v=OUqE9LlK0>, acesso em 30/04/2019
- Srinsofttech@ (2019). <https://www.srinsofttech.com/bim-level-of-development-lod-300-400-500.html>, acesso em 7/04/2019
- Structuralwiki@ 2009. <http://www.structuralwiki.org/en/Sofistik>, acesso em 15/04/2019

ANEXO A – MOMENTOS FLETORES ROBOT VS SOFISTIK

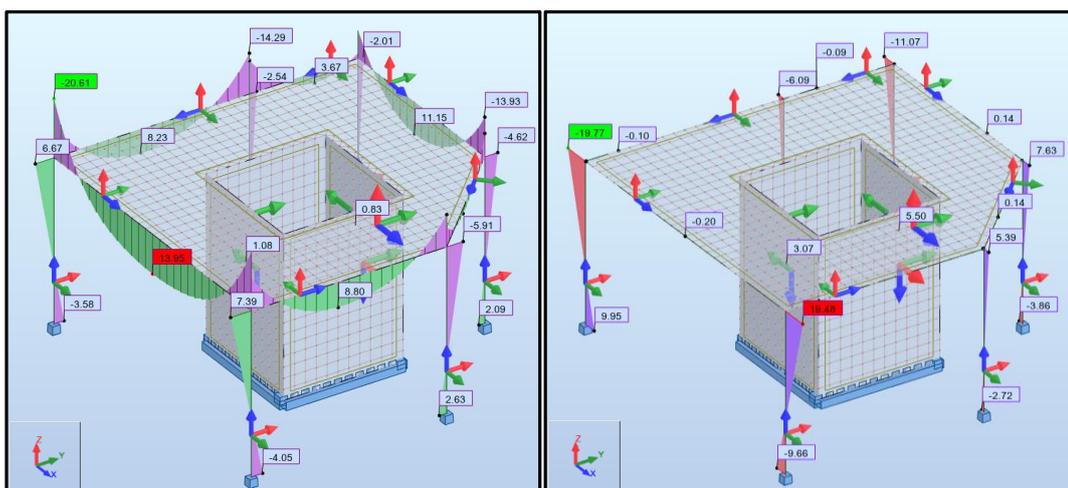


Figura A.1: Momentos fletores (ULS) nas vigas e pilares do caso de estudo 2 segundo as direções y (esquerda) e z (direita) no Autodesk Robot Structural Analysis.

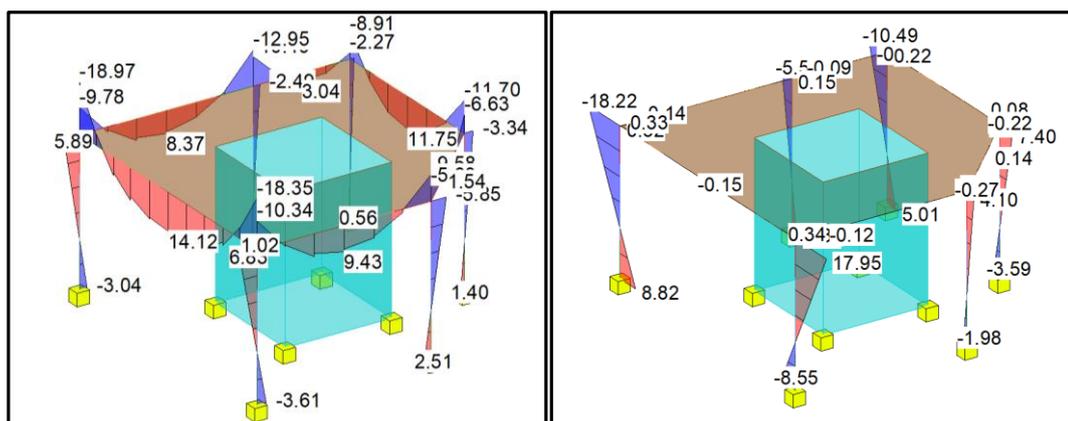


Figura A.2: Momentos fletores (ULS) nas vigas e pilares do caso de estudo 2 segundo as direções y (esquerda) e z (direita) no Autodesk Revit Structures.

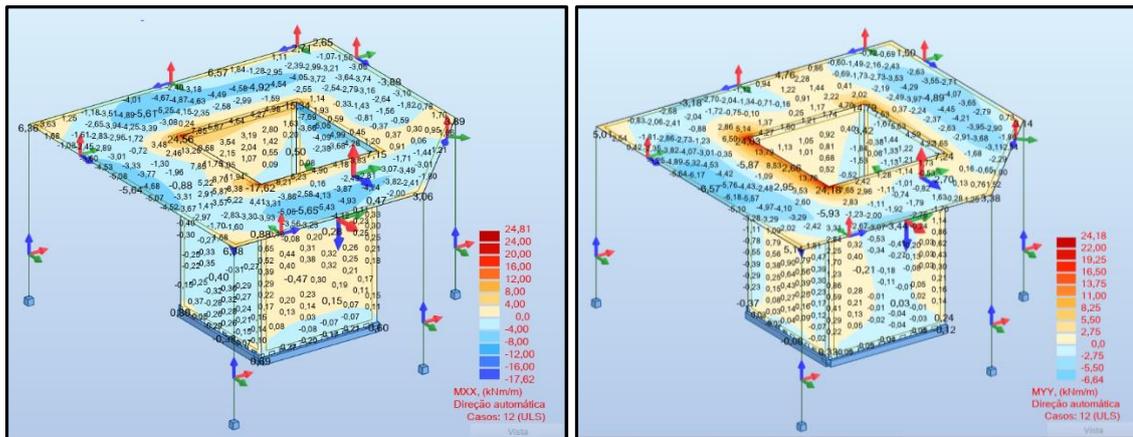


Figura A.3: Momentos fletores (ULS) na laje do caso de estudo 2 segundo as direções x (esquerda) e y (direita) no Autodesk Robot Structural Analysis.

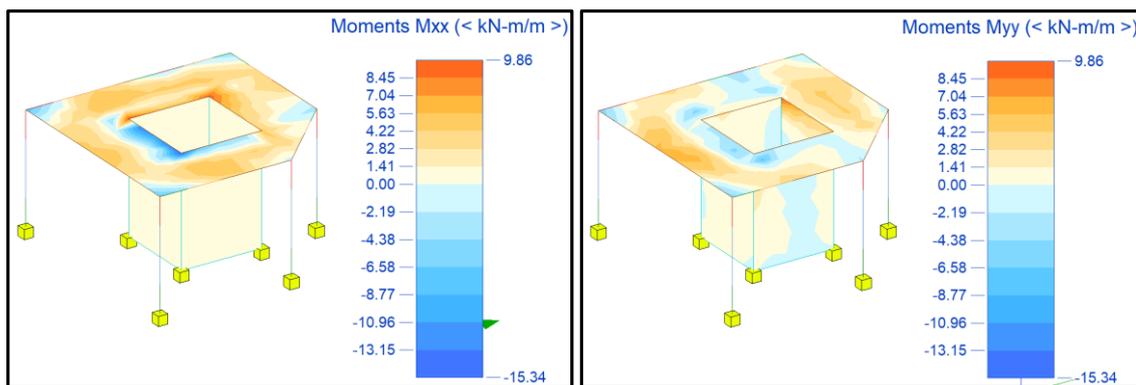


Figura A.4: Momentos fletores (ULS) na laje do caso de estudo 2 segundo as direções x (esquerda) e y (direita) no Autodesk Revit Structures.

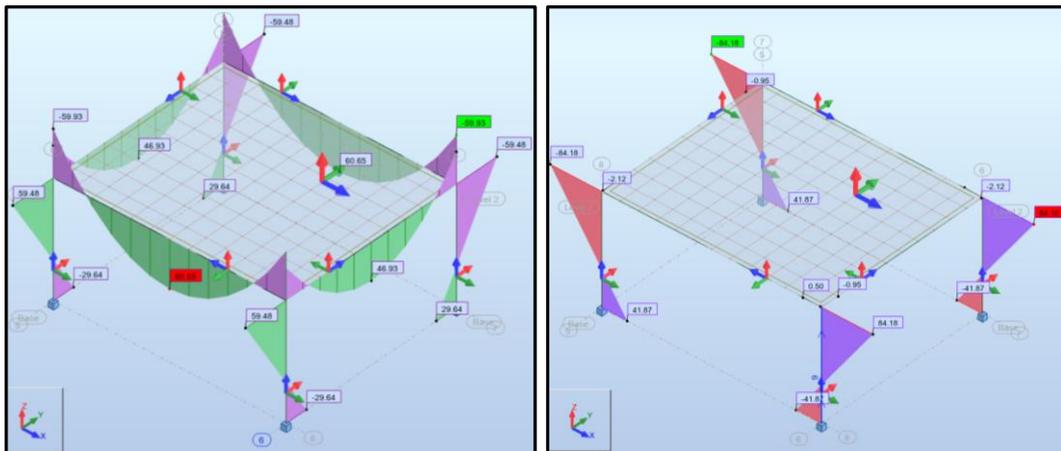


Figura A.5: Momentos fletores (ULS) nas vigas e pilares do caso de estudo 1 segundo as direções y (esquerda) e z (direita) no Autodesk Robot Structural Analysis.

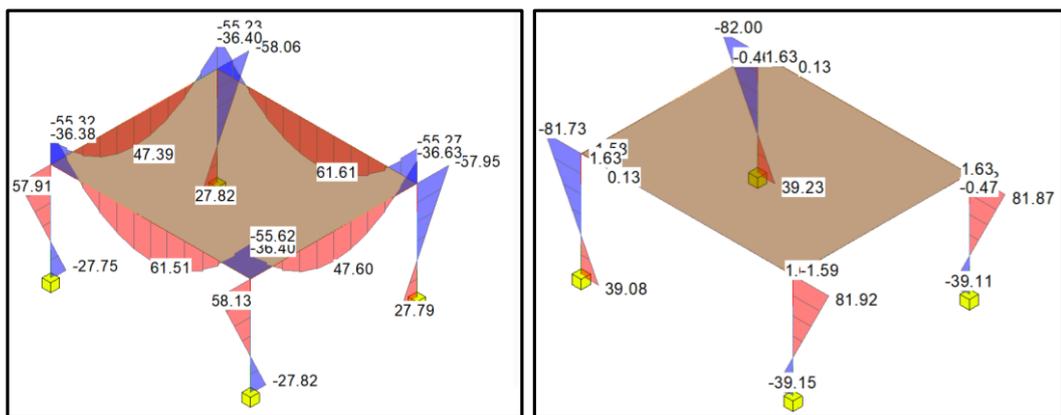


Figura A.6: Momentos fletores (ULS) nas vigas e pilares do caso de estudo 1 segundo as direções y (esquerda) e z (direita) no Autodesk Revit Structures.

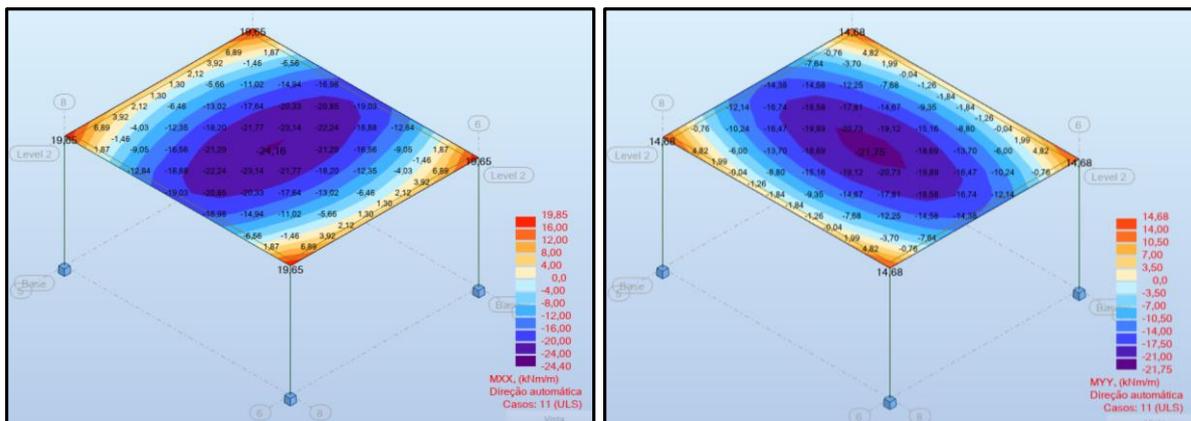


Figura A.7: Momentos fletores (ULS) na laje do caso de estudo 1 segundo as direções x (esquerda) e y (direita) no Autodesk Robot Structural Analysis.

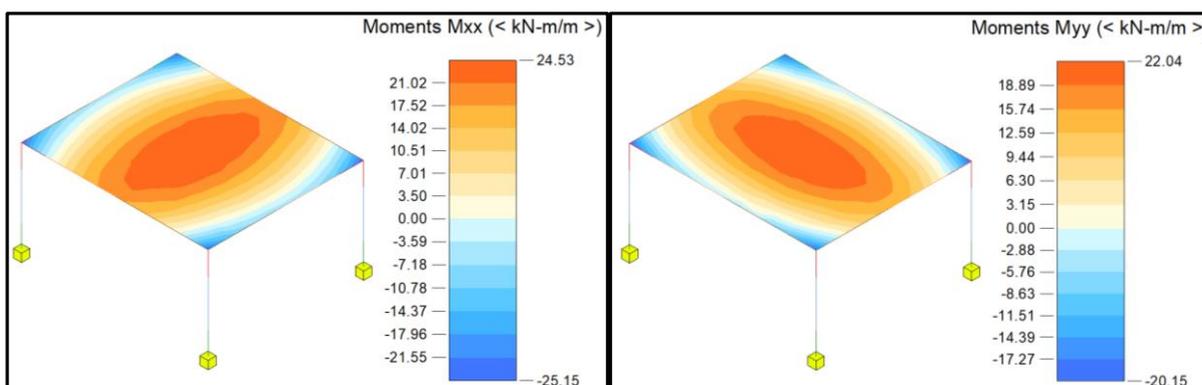


Figura A.8: Momentos fletores (ULS) na laje do caso de estudo 1 segundo as direções x (esquerda) e y (direita) no Autodesk Revit Structures.

ANEXO B – ESFORÇOS TRANSVERSO E AXIAL NO AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS

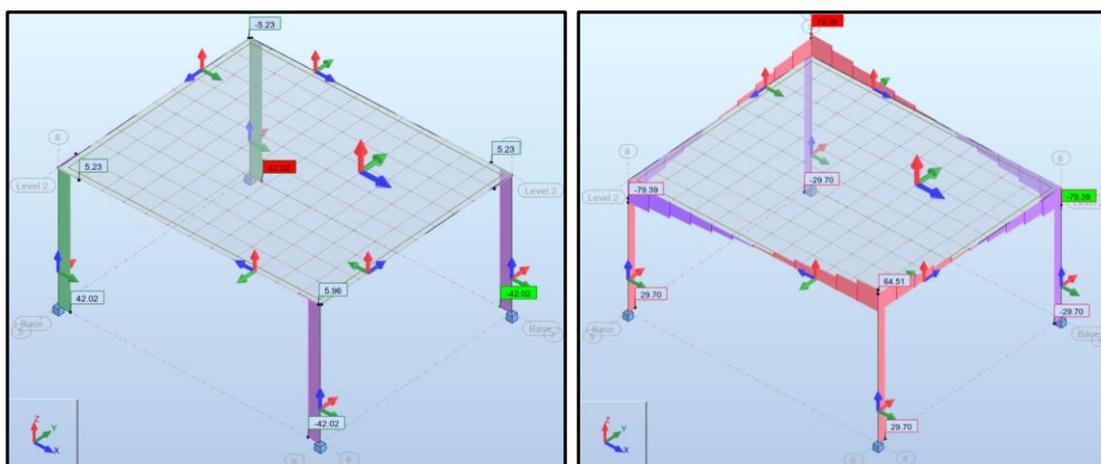


Figura B.1: Esforço transverso (ULS) para vigas e pilares do caso de estudo 1 nas direções y (esquerda) e z (direita).

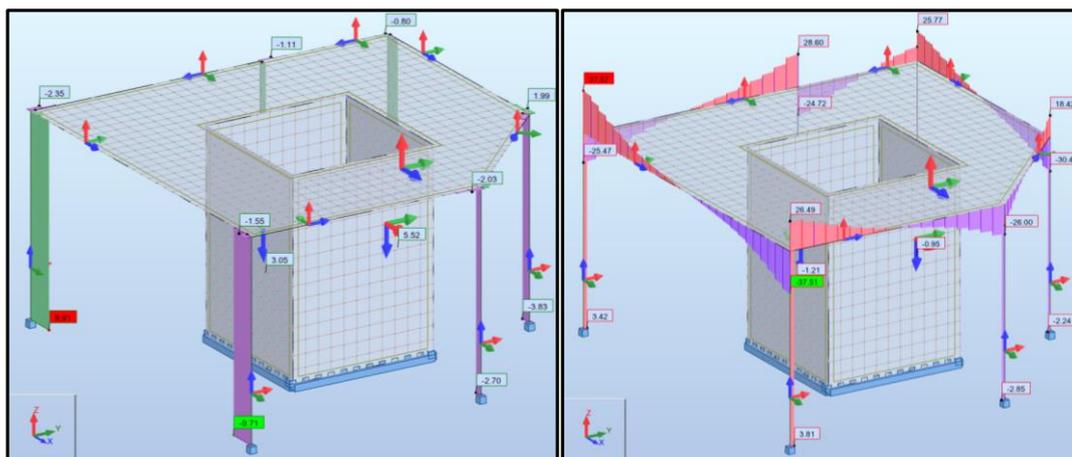


Figura B.2: Esforço transverso (ULS) para vigas e pilares do caso de estudo 2 nas direções y (esquerda) e z (direita).

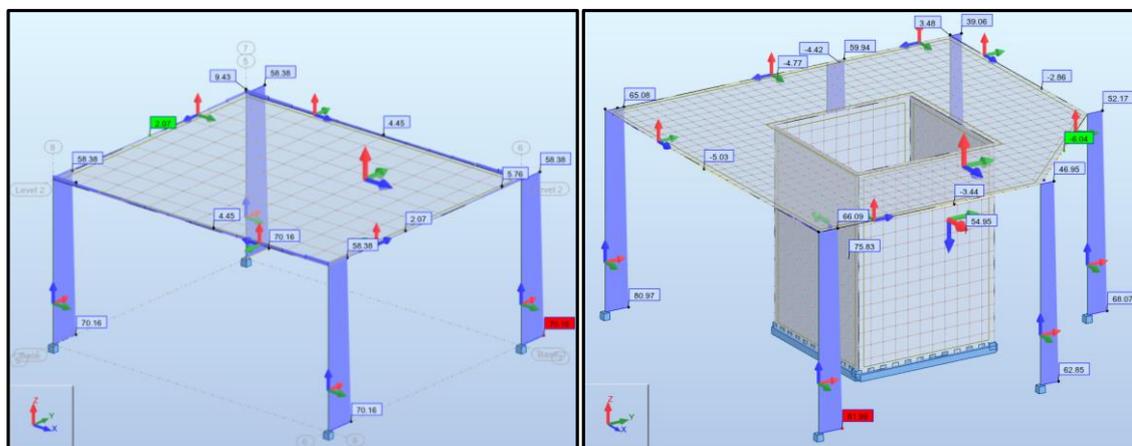


Figura B.3: Esforço axial (ULS) para vigas e pilares dos casos de estudo 1 (esquerda) e 2 (direita).

ANEXO C - MODELOS 3D DE ARMADURAS

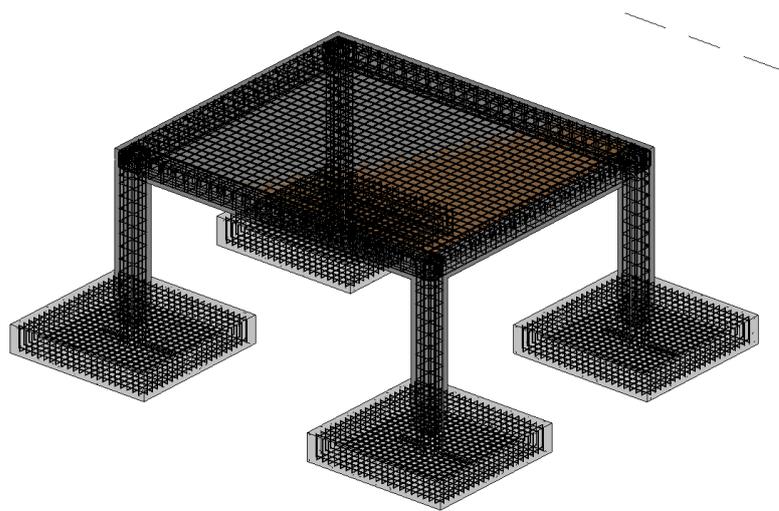


Figura C.1: Modelo de armaduras do Autodesk Revit Structures para o caso de estudo 1.

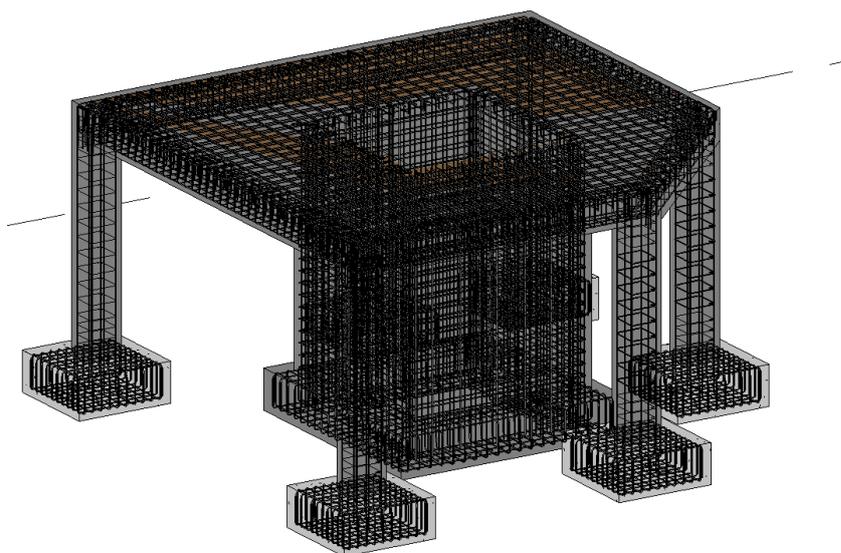


Figura C.2: Modelo de armaduras do Autodesk Revit Structures para o caso de estudo 2.

ANEXO D – CÓDIGOS EM DYNAMO PARA CORREÇÃO DAS ARMADURAS

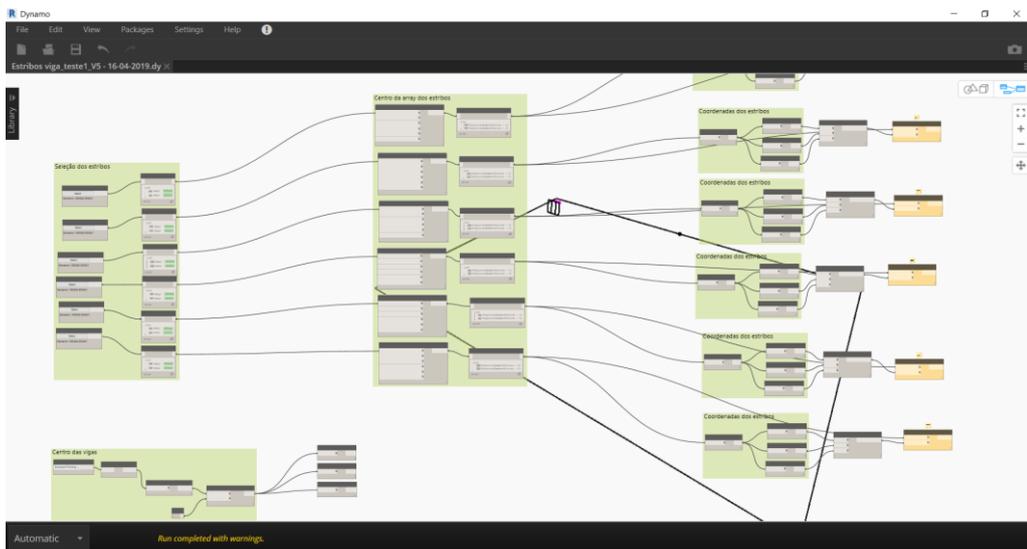


Figura D.1: *Plug-in 1* desenvolvido em Dynamo com os erros obtidos na parte final.

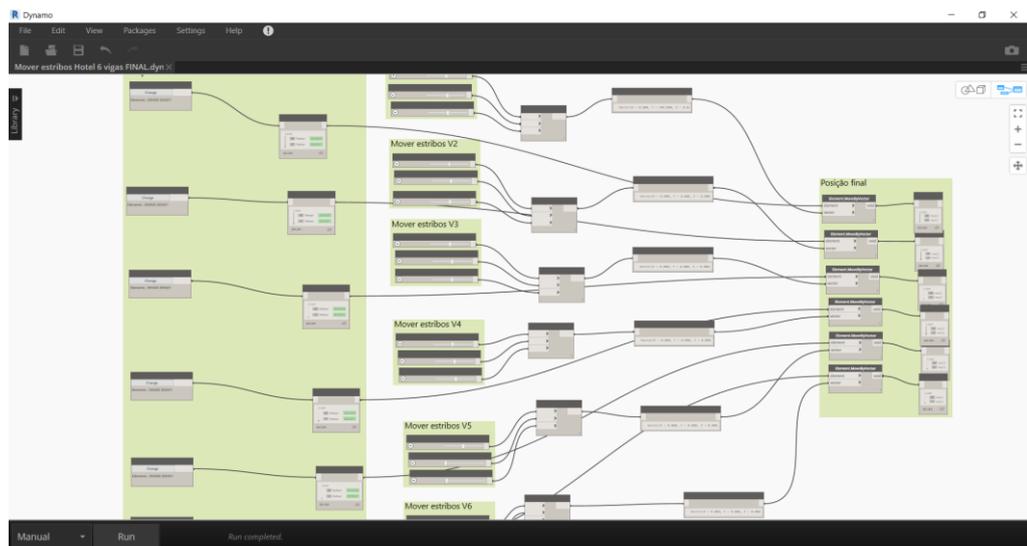


Figura D.2: *Plug-in 2* desenvolvido em Dynamo para resolver o problema encontrado.

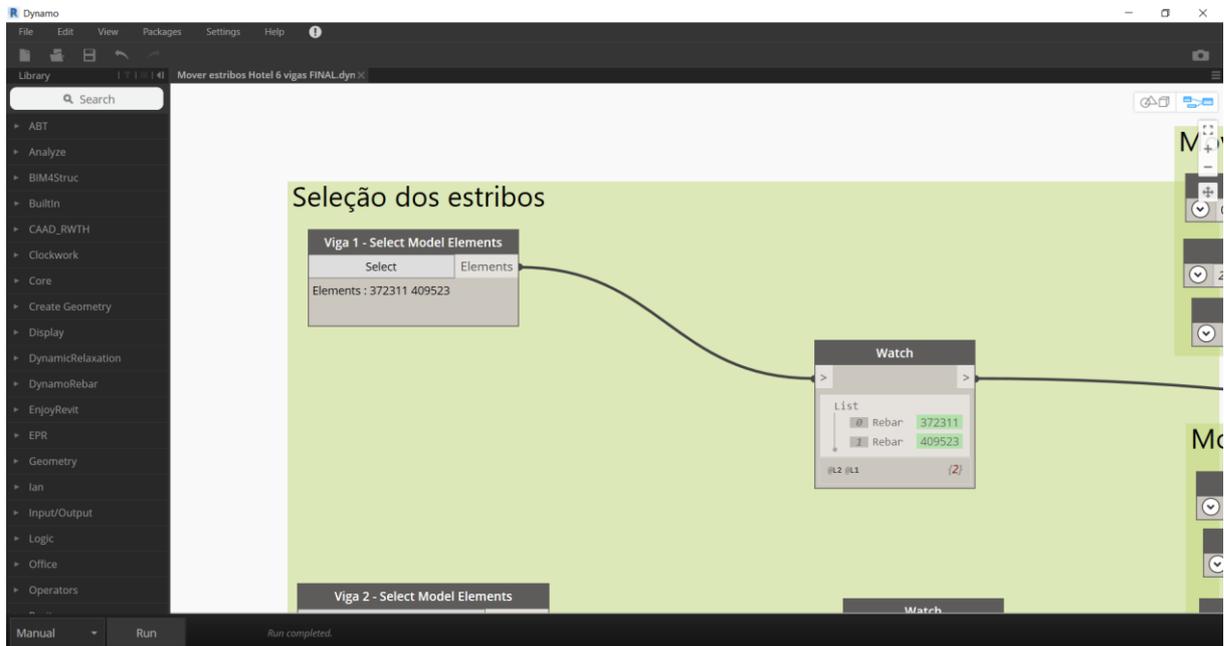


Figura D.3: Detalhe do primeiro input do código (Seleção da armadura).

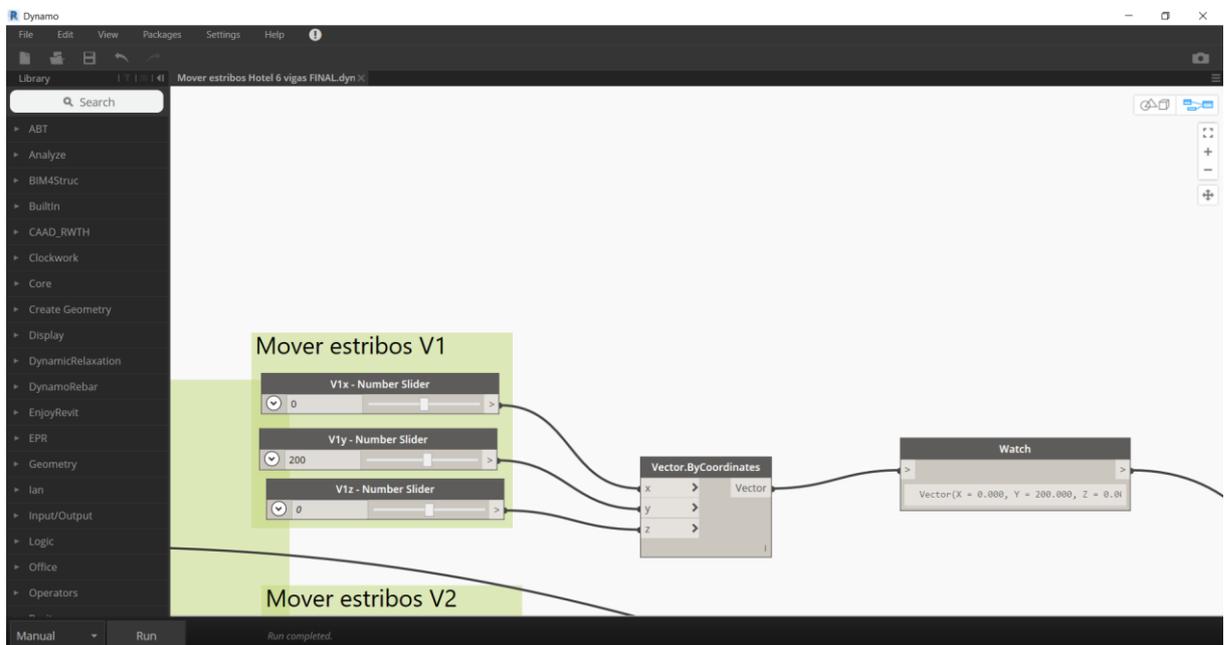


Figura D.4: Detalhe da criação do vetor através da introdução da distância em cada direção cartesiana.