

# **O projeto de estruturas em ambiente BIM: avanços tecnológicos na transferência de informação**

**Paulo Manuel Ávila de Sequeira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

## **Engenharia Civil**

Orientadores

Professora Doutora Alcínia Zita de Almeida Sampaio

Professor Doutor Augusto Martins Gomes

### **Júri**

Presidente: Professor Doutor Mário Manuel Paisana dos Santos Lopes

Orientador: Professora Doutora Alcínia Zita de Almeida Sampaio

Vogal: Professor Doutor Luís Manuel Coelho Guerreiro

**Mai 2022**



## **Declaração**

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.



## **Agradecimentos**

Esta dissertação representa mais uma etapa concluída na minha vida pessoal e académica. Desta forma, gostaria de reconhecer todos os que me acompanharam neste percurso, agradecendo:

Aos meus orientadores, a Prof.<sup>a</sup> Dra. Zita Sampaio e o Prof. Dr. Augusto Gomes pelo apoio, rigor, disponibilidade e todo o seu conhecimento imprescindível à realização deste trabalho.

Aos meus pais por me apoiarem e motivarem em todos os momentos, estando presentes sempre que preciso.

Aos meus amigos do IST que tornaram todo o percurso académico mais fácil.

Às minhas irmãs, aos amigos de sempre e família por todas as palavras encorajadoras e compreensão.

À empresa Manuel José Sequeira, Gabinete De Engenharia, Lda, por todo o apoio e partilha de conhecimentos.

À Inês, pelo apoio, paciência e incentivo.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta etapa.

Muito obrigada a todos!



## Resumo

O *Building Information Modeling* (BIM) é uma metodologia focada na centralização e partilha de informação de um projeto entre todos os intervenientes, sobre a forma de um modelo digital tridimensional. Esta metodologia permite uma adequada coordenação e colaboração em equipa, evitando conflitos entre especialidades e omissões de dados. Atualmente, a indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) tem presenciado uma adoção crescente do BIM, consequência do constante aperfeiçoamento de *software*, e a confirmação dos seus benefícios em casos reais. No entanto, a sua implementação ainda revela alguns obstáculos, sobretudo ao nível da capacidade de interoperabilidade dos sistemas disponíveis.

No presente estudo foram analisados os benefícios dos avanços tecnológicos da metodologia BIM no âmbito do projeto de estruturas, avaliando aspetos fundamentais da partilha de informação, interoperabilidade e pormenorização de armaduras. Assim, foi desenvolvido um projeto de estruturas em ambiente BIM, utilizando o programa de modelação *Revit* e o programa de cálculo estrutural *Robot*. Ao longo do estudo, foram analisadas as limitações na comunicação com o gabinete de arquitetura, descritos os procedimentos da modelação geométrica e analítica do modelo BIM em *Revit* e foi efetuada a análise estrutural e o dimensionamento das armaduras no programa de cálculo. Finalmente, foi avaliada a troca bidirecional de informação entre os sistemas.

Como conclusão, e apesar das limitações encontradas, essencialmente, relacionadas com o *software*, a abordagem BIM apresenta vantagens significativas na conceção de projeto, suportada na visualização 3D, na sobreposição de modelos, na consulta da base de dados acessível, na coordenação agilizada e na colaboração potenciada.

## Palavras-chave

BIM, Interoperabilidade, Projeto de estruturas, Pormenorização de armaduras, Colaboração





## **Abstract**

Building Information Modeling (BIM) is a methodology focused on centralizing and sharing project information among all parties involved, in the form of a three-dimensional digital model. This methodology allows adequate coordination and team collaboration, avoiding conflicts between specialties and data omissions. Currently, the Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry has witnessed a growing adoption of BIM, a consequence of the constant improvement of software, and the confirmation of its benefits in real cases. However, its implementation still reveals some obstacles, especially in terms of the interoperability capacity of the available systems.

In the present study, the benefits of the technological advances of the BIM methodology in structural design were analyzed, assessing the fundamental aspects of information sharing, interoperability, and reinforcement detailing. Thus, a structural design in BIM environment was developed, using the Revit modelling and structural calculation software Robot. Throughout the study, the limitations in the communication with the architecture office were analyzed, the geometric and analytical modelling procedures of the BIM model in Revit were described, and the structural analysis and reinforcement design were performed in the calculation program. Finally, the bidirectional exchange of information between the systems was evaluated.

As a conclusion, and despite the limitations found, essentially related to the software, the BIM approach presents significant advantages in project design, supported by 3D visualization, model overlapping, accessible database consultation, streamlined coordination and enhanced collaboration.

## **Keywords**

BIM, Interoperability, Structural design, Reinforcement detailing, Collaboration



# Índice

<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos e metodologia .....	1
1.3. Estrutura da dissertação.....	2
<b>2. Building Information Modelling</b> .....	<b>3</b>
2.1. Conceito.....	3
2.2. Aplicabilidade.....	5
2.3. Implementação do BIM.....	7
2.3.1. Contexto internacional .....	7
2.3.2. Contexto nacional .....	9
2.4. Interoperabilidade .....	10
2.4.1. Padrão IFC.....	11
2.4.2. Transferência de modelos.....	12
<b>3. Caso de estudo</b> .....	<b>13</b>
3.1. Caracterização.....	13
3.2. Proposta de pré-dimensionamento.....	15
3.3. Estudo de soluções alternativas .....	16
3.3.1. Alteração 1 .....	17
3.3.2. Alteração 2 .....	17
3.3.3. Alteração 3 .....	18
3.3.4. Alteração 4 .....	18
3.3.5. Alterações com suporte BIM .....	19
<b>4. Modelação da estrutura</b> .....	<b>21</b>

<b>4.1.</b>	<b>Configuração inicial</b> .....	<b>21</b>
<b>4.2.</b>	<b>Inserção de elementos</b> .....	<b>23</b>
4.2.1.	Pilares .....	24
4.2.2.	Vigas .....	25
4.2.3.	Lajes.....	25
4.2.4.	Cobertura .....	26
4.2.5.	Escada .....	26
4.2.6.	Sapatas .....	27
<b>4.3.</b>	<b>Verificação do modelo analítico</b> .....	<b>27</b>
<b>5.</b>	<b>Análise e dimensionamento estrutural</b> .....	<b>31</b>
<b>5.1.</b>	<b>Transferência Revit/Robot</b> .....	<b>31</b>
<b>5.2.</b>	<b>Correção de inconsistências</b> .....	<b>32</b>
<b>5.3.</b>	<b>Definição de cargas</b> .....	<b>34</b>
5.3.1.	Cargas permanentes e sobrecargas.....	34
5.3.2.	Ação sísmica.....	35
5.3.3.	Combinações de ações.....	38
5.3.4.	Resultados da análise.....	38
<b>5.4.</b>	<b>Pormenorização de armaduras</b> .....	<b>39</b>
5.4.1.	Fundações .....	40
5.4.2.	Pilares .....	42
5.4.3.	Vigas .....	43
5.4.4.	Lajes.....	49
5.4.5.	Paredes.....	50
<b>6.</b>	<b>Transferência de resultados da análise</b> .....	<b>53</b>
<b>6.1.</b>	<b>Fundações</b> .....	<b>53</b>

6.2. Pilares e vigas .....	53
6.3. Transferência de resultados .....	56
6.4. Extração de peças desenhadas.....	58
7. <i>Conclusões</i> .....	59
7.1. Desenvolvimentos futuros .....	60
8. <i>Referências bibliográficas</i> .....	61



## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Modelos nD BIM.....	6
Figura 2.2 – Maturidade de implementação do BIM na indústria da construção [fonte: (Bew & Richards, 2008)]......	8
Figura 3.1 - Desenho CAD fornecido do Piso 1.....	13
Figura 3.2 - Desenhos CAD fornecidos do Piso 2 e Cobertura.....	14
Figura 3.3 - Perspetivas do modelo BIM de estruturas criado no sistema <i>Revit</i> .....	15
Figura 3.4 - Plantas estruturais dos pisos 0 e 1.....	15
Figura 3.5 - Planta estrutural do piso 2.....	16
Figura 3.6 - Solução inicial à esquerda e alterada à direita.....	17
Figura 3.7 - Solução estrutural antes e depois da Alteração 2.....	18
Figura 3.8 - Solução estrutural antes e depois da Alteração 3.....	18
Figura 3.9 - Solução estrutural antes e depois da Alteração 4.....	19
Figura 4.1 - Propriedades do Betão C30/37 e unidades de projeto.....	22
Figura 4.2 - Importação para o <i>Revit</i> da planta do piso 1 no formato <i>.dwg</i> .....	22
Figura 4.3 - Alinhamentos e níveis do projeto.....	23
Figura 4.4 - Geração do objeto paramétrico correspondente a uma viga de secção retangular.....	24
Figura 4.5 - Ajuste do modelo analítico de um pilar de canto.....	24
Figura 4.6 - Ajustes geométricos realizados na modelação de uma viga invertida.....	25
Figura 4.7 - Opção <i>Analytical Adjust</i> ; Laje antes e depois de ajustada.....	26
Figura 4.8 - Modelo físico da cobertura e nós desconectados no modelo analítico.....	26
Figura 4.9 - Apoio encastrado e simplesmente apoiado e opções de condições de apoio.....	27
Figura 4.10 - Perspetivas do modelo analítico no <i>Revit</i> .....	28
Figura 4.11 - Filtro de auxílio à deteção de nós desconectados.....	28
Figura 4.12 - Visualização do modelo analítico antes e depois da aplicação do filtro “Nós Analíticos Não Conectados”.....	29
Figura 4.13 - Modelo analítico das lajes.....	29
Figura 4.14 - Opções de visualização adotadas no modelo analítico das lajes.....	29
Figura 5.1 - Opções de transferência no <i>Revit</i> e no <i>Robot</i> .....	31
Figura 5.2 - Opções específicas de envio e atualização do modelo.....	32
Figura 5.3 - Lista de avisos, após a transferência <i>Revit/Robot</i> .....	32
Figura 5.4 - Nós isolados detetados no <i>Robot</i> .....	33
Figura 5.5 - Zona incoerente na malha de elementos finitos.....	33

Figura 5.6 - Aviso de incompatibilidade das condições de apoio em alguns nós.....	34
Figura 5.7 - Parâmetros adotados na análise modal no <i>Robot</i> .....	35
Figura 5.8 - Conversão das cargas atuantes em massas.....	36
Figura 5.9 - Normativa selecionada (A); Norma Portuguesa NP ENV 1998-1-1 de 2000 (B); Valores adotados para a análise sísmica (C).....	37
Figura 5.10 - Combinações lineares da ação sísmicas nas direções X e Y.....	37
Figura 5.11 - Combinações lineares criadas durante a definição da ação sísmica.....	37
Figura 5.12 – Definição dos parâmetros para as combinações automáticas de ações.....	38
Figura 5.13 - Combinações de ações geradas pelo <i>Robot</i> .....	38
Figura 5.14 - Diagrama de momentos $M_y$ (A), deformada da combinação SLS+ (envolvente superior) (B) e mapa de momentos $xx$ (envolvente inferior) (C).....	39
Figura 5.15 - Análise individual da viga do alinhamento A: momento $M_y$ e áreas de armadura necessária.....	39
Figura 5.16 - Opções de dimensionamento de armaduras.....	40
Figura 5.17 - Opções de cálculo do reforço das fundações.....	40
Figura 5.18 - Fundações selecionadas para dimensionamento e pormenorização de armaduras.....	41
Figura 5.19 - Percentagem dos momentos absorvidos para as vigas de fundação.....	41
Figura 5.20 - Parâmetros e dimensões adotadas para a sapata isolada sob o pilar de canto.....	42
Figura 5.21 - Sobreposição geométrica das sapatas (A); Solução adotada (B).....	42
Figura 5.22 - Opções de cálculo e pormenorização de pilares.....	43
Figura 5.23 - Pilar em análise e soluções com armadura longitudinal de $30\emptyset 10$ e $4\emptyset 20 + 10\emptyset 12$ .....	43
Figura 5.24 - Vigas selecionadas para dimensionamento e pormenorização de armaduras.....	44
Figura 5.25 - Solução de pormenorização proposta pelo <i>Robot</i> (A); Solução adotada (B).....	44
Figura 5.26 - Momentos resistente (vermelho) e atuante (amarelo) no apoio esquerdo da viga invertida e representação inicial.....	45
Figura 5.27 - Alterações efetuadas na viga invertida.....	45
Figura 5.28 – Representação final após as alterações.....	46
Figura 5.29 - Aplicação de um <i>Offset</i> à viga invertida.....	46
Figura 5.30 - Opções de pormenorização para armaduras de suspensão e definição de cargas suspensas numa análise isolada.....	47
Figura 5.31 - Representação antes e depois de corrigidos os nós considerados como apoios.....	47
Figura 5.32 - Representação inicial e erros apresentados.....	48
Figura 5.33 – Ancoragem alterada; Momentos no apoio antes e depois da alteração.....	48
Figura 5.34 - Erro relativo ao espaçamento entre estribos na cumeeira não estar de acordo com o Eurocódigo.....	48



Figura 5.35 - Alteração manual dos estribos do vão esquerdo e direito; Representação final dos estribos escolhidos. ....	49
Figura 5.36 - Erro relacionado com o recobrimento mínimo não ser cumprido. ....	49
Figura 5.37 - Desenho técnico gerado pelo Robot para a laje da <i>mezanine</i> . ....	50
Figura 5.38 - Aviso sobre o dimensionamento de paredes no <i>Robot</i> ainda não estar implementado. ....	50
Figura 5.39 - Tabelas de esforços na base das paredes estruturais e mapa do momento Mxx. ....	51
Figura 6.1 – Armaduras da sapata antes e depois de efetuada a sua correção. ....	53
Figura 6.2 - Modelo <i>Revit</i> é significativamente diferente do modelo <i>Robot</i> . ....	54
Figura 6.3 - Excentricidade do pilar incorreta. ....	54
Figura 6.4 - Excentricidade da viga incorreta. ....	55
Figura 6.5 - Antes e depois de ser efetuado o ajuste manual das armaduras. ....	55
Figura 6.6 – Falha no ajuste automática das armaduras longitudinais no apoio. ....	55
Figura 6.7 - Erros na transferência de armaduras. ....	56
Figura 6.8 - Área de armadura necessária na laje do piso 2. ....	56
Figura 6.9 - Transferência de resultados da análise estrutural para o <i>Revit</i> . ....	57
Figura 6.10 - Transferência de resultados por grupos de elementos. ....	57
Figura 6.11 – Exemplo de uma peça desenhada antes e depois da alteração da família das anotações. ....	58

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Valores das cargas a aplicar. ....	35
-----------------------------------------------	----



## **Lista de Acrónimos**

3D – três dimensões

AEC – Arquitetura, Engenharia e Construção

BIM – Building Information Modelling

BDS – Building Description System

CAD – Computer-Aided Design

EC – Eurocódigo

IFC – Industry Foundation Classes



# 1. Introdução

A constante evolução tecnológica e a exigência competitiva do mundo têm conduzido a impor uma necessidade de melhorar a produtividade na indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC). A indústria tem vindo a adotar tecnologias imergentes que têm incrementado, em cada época, a produtividade no setor, nomeadamente, na conceção de projetos. Numa primeira fase, o surgimento do sistema de desenho, *Computer-Aided Design* (CAD) permitiu a criação de desenhos digitais através do computador, introduzindo melhorias perante o desenho traçado sobre o estirador.

## 1.1. Enquadramento

Atualmente, os projetos apresentam volume, complexidade e integração multidisciplinar, que pelo método tradicional baseado no desenho, se torna difícil de gerir. A necessidade de automatizar e otimizar processos contribuiu para o surgimento da metodologia *Building Information Modelling* (BIM), um processo focado na centralização de toda a informação do projeto, num modelo virtual BIM. Os programas de base BIM disponíveis permitem a criação de uma representação tridimensional (3D) fidedigna do edifício, incluindo as várias especialidades que compõem um projeto e apoiando uma melhoria na coordenação e compatibilização de fases. Nas últimas décadas, tem havido um aumento significativo na adoção da metodologia BIM, das diferentes áreas da indústria AEC, devido, em parte, ao aperfeiçoamento dos programas, mas também à confirmação dos seus benefícios em casos reais.

No entanto, a adaptação dos métodos tradicionais de trabalho das empresas para a nova metodologia requer um investimento inicial elevado em formação e *software*. Tendo em conta que o BIM é relativamente recente, os programas ainda não estão totalmente preparados, apresentando algumas limitações. Nesse sentido, o presente trabalho pretende analisar os avanços tecnológicos que têm vindo a ser alcançados, identificando adequadas estratégias para a realização de distintas tarefas associadas à elaboração do projeto de estruturas.

## 1.2. Objetivos e metodologia

O estudo é dirigido ao projeto de estruturas, numa perspetiva de avaliar a interoperabilidade entre os *software Revit* e *Robot*, identificando as principais limitações e de demonstrar quais os principais benefícios na utilização de plataformas integráveis BIM, na elaboração do projeto. Por forma a atingir os objetivos estipulados, foi desenvolvido um projeto de estruturas, em ambiente BIM, de um caso real. A prossecução do estudo envolveu as seguintes etapas:

- Modelação geométrica e analítica da estrutura do edifício no *software* de modelação *Revit*;
- Transferência do modelo BIM do *Revit* para o programa de cálculo *Robot*;
- Análise e dimensionamento estrutural no *Robot*;
- Transferência das armaduras e resultados obtidos no *Robot* para o *Revit*;
- Análise dos benefícios e limitações encontrados no desenvolvimento do projeto de estruturas em ambiente BIM.

### 1.3. Estrutura da dissertação

Neste contexto, o trabalho foi elencada em 8 capítulos:

- O primeiro refere a introdução ao tema, incluindo o enquadramento geral da dissertação, objetivos e a metodologia de trabalho.
- O segundo diz respeito ao estado da arte, iniciando com o conceito BIM, a sua aplicabilidade e implementação, analisando as principais vantagens e barreiras à sua adoção e, por fim, é feita uma breve inserção aos programas *Revit* e *Robot* e aos problemas de interoperabilidade associados.
- De seguida, é feita a descrição do caso de estudo selecionado, justificadas as decisões do pré-dimensionamento estabelecido e estudadas as soluções estruturais alternativas, consequência de mudanças realizadas à arquitetura do edifício.
- Na quarta fase da investigação são descritos os procedimentos e etapas da modelação geométrica e analítica do modelo BIM.
- No quinto capítulo, o modelo é transferido para o programa de cálculo, para ser efetuada a análise estrutural e o dimensionamento das armaduras dos elementos.
- O sexto capítulo aborda a transferência do modelo no sentido inverso, testando a interoperabilidade entre os programas, analisando os erros e as falhas verificadas na transferência de informação.
- Por fim, o último capítulo lista as conclusões a reter do estudo, incluindo os principais benefícios e limitações, e são apresentadas algumas propostas e recomendações para investigação futura.

## **2. Building Information Modelling**

A construção é uma atividade que envolve o desenvolvimento de diversos projetos de especialidades (arquitetura, estruturas e serviços) e a realização de múltiplas tarefas apoiadas na informação dos projetos (planeamento da construção, orçamentação, manutenção e gestão) envolvendo profissionais de arquitetura e de distintas áreas de engenharia. Esta indústria enfrenta algumas limitações, essencialmente, relacionadas com a deficiente integração e colaboração entre especialidades, a incompleta informação incluída nos documentos de conceção dos projetos, a frequente ocorrência de atrasos na execução da construção causadas por inconsistências de projeto detetadas em obra, no conseqüente incremento de custos globais da construção e natural implicação na qualidade do produto final (Taxén & Lilliesköld, 2008).

As limitações apresentadas são causadas, principalmente, pela baixa produtividade das empresas do setor baseadas na execução e interpretação do desenho, como forma de trabalho. É necessário introduzir no sector formas de coordenação, de integração e de centralização da informação mais eficazes, durante a fase de conceção do projeto e, posteriormente, na elaboração de tarefas subsequentes. A metodologia *Building Information Modeling* (BIM) tem vindo a promover o incremento de eficiência, ao nível da integração de fases e de centralização de dados, contribuindo para agilizar a coordenação de projetos de múltiplas especialidades e de volume e complexidade elevadas (Shehzad *et al.*, 2019).

### **2.1. Conceito**

O conceito fundamental da metodologia BIM, referente a um sistema hierárquico de componentes construtivas na composição de um modelo digital, foi inicialmente mencionado por Eastman (1975) através da designação *Building Description System* (BDS). O autor descreve um sistema no qual era possível criar elementos aos quais estava associado uma forma, localização e lista de propriedades. Posteriormente, foi adotada a designação *Building Information Modeling* (BIM), como a denominação mais comum desta nova forma de abordar a representação do projeto (Succar, 2009).

O projeto, elaborado com base em software BIM, é apresentado na forma de um modelo paramétrico digital, contendo os detalhes geométricos necessários à sua visualização realista, mas incorpora também diverso tipo de propriedades mecânicas associadas, como o peso volúmico ou o módulo de elasticidade dos materiais aplicados. O modelo BIM criado, em cada projeto, apresenta uma base de dados completa, atualizada e acessível, permitindo a partilha de dados entre parceiros e fases, englobando todas as etapas do ciclo de vida de um empreendimento (Azhar, 2011). Sacks *et al.* (2018) definem BIM como uma tecnologia de modelação, associada a um conjunto de processos para produzir, comunicar e analisar modelos de construção. A utilização de ferramentas BIM possibilita a criação de um modelo digital 3D, contendo todos os detalhes do edifício, assegurando uma representação virtual rigorosa e com as propriedades adicionadas, permitindo uma fácil interação e compreensão do produto final a executar, previamente à sua efetiva construção (Autodesk, 2021).

A representação 3D do edifício, designado de modelo BIM, caracteriza, além da geometria e das relações espaciais entre elementos, também as propriedades mecânicas e, eventualmente, os custos associados ou o calendário temporal da obra, englobando, num único modelo virtual, os diversos aspetos relacionados com o acompanhamento do ciclo de vida de uma infraestrutura (Sacks *et al.*, 2018). Os profissionais do sector têm vindo a adotar a metodologia BIM e a reconhecer diversas vantagens, pois, a partir do modelo BIM e da base de dados associada, é possível obter, de uma forma rápida e automática, distintas tarefas, nomeadamente, a quantificação de materiais e a estimativa de custos (Azhar, 2011). A implementação do BIM constitui uma mais-valia na indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), contribuindo para reduzir o tempo consumido na realização de um projeto e no incremento da qualidade do produto final (Bryde, 2012).

Por comparação com a atividade de projeto baseada no recurso a sistemas CAD de traçado computacional, a utilização dos sistemas BIM diminui a possibilidade de ocorrência de erros e de omissões no projeto, que conduzem, frequentemente, a atrasos, a custos adicionais e mesmo, a eventuais processos jurídicos entre as várias partes de uma equipa de projeto. Um dos problemas mais comuns, associados à utilização de sistemas CAD, é o tempo e o custo necessários para gerar informação de avaliação crítica sobre uma proposta de projeto, incluindo estimativas de custos, análise do consumo energético ou detalhes estruturais.

Este tipo de estudo é realizado normalmente em fase de construção, já demasiado tarde para a introdução de alterações importantes ao projeto, com custos adicionais significativos na atualização do desenho e na modificação de parte da obra executada (Bazjanac 2004). O contributo BIM no estudo de propostas alternativas, corresponde a apoiar os membros da equipa de projeto, na fácil introdução de ajustes ao modelo em criação, com base numa discussão sustentada de visualização e consulta do modelo, em processo de criação. O projeto final, seguindo as especificações requeridas, mas refinado de acordo com as modificações avalizadas de um modo colaborativo e integrado, constitui um produto de elevada qualidade (Azhar, 2011). A capacidade melhorada, evidente no âmbito do trabalho em equipa, de coordenação e de colaboração, conduz a um melhor desempenho dos profissionais e à redução dos custos associados à conceção do projeto, proporcionando benefícios para todos os envolvidos (Shehzad, 2019).

A conceção de projetos é tradicionalmente um processo cooperativo, no qual os intervenientes trocam informações e recursos relevantes de apoio ao trabalho individual de cada um, com o objetivo de desenvolver o projeto nas diversas especialidades. Adicionalmente, a colaboração é um trabalho em conjunto, apoiada numa visão partilhada e central de informação (Mathews, 2015). Se a metodologia BIM for corretamente aplicada, permitindo uma colaboração e comunicação através de uma plataforma com elevada capacidade de interoperabilidade, conduzirá a uma redução de erros de incoerência, minimizando o conflito entre especialidades e a omissão de dados (Sampaio, 2022). Porém, uma troca de informações insuficiente e uma comunicação deficiente conduzirá a acontecimentos imprevistos, atrasos na entrega da obra e custos superiores aos estimados (Biblus, 2021). No presente estudo este assunto é abordado no capítulo 3, onde são apresentadas distintas opções de arquitetura e como a



solução estrutural é adaptada em conformidade, permitindo ilustrar como as plataformas BIM podem apoiar e agilizar o processo.

## 2.2. Aplicabilidade

A implementação BIM abrange uma multi-aplicabilidade no sector, sendo as distintas tarefas referidas como as nD dimensões do BIM (Charef *et al.* 2018). Em função da finalidade da utilização do modelo, assim é associado um tipo específico de informação. São acrescentados ao modelo 3D os dados relacionados com as diferentes fases do ciclo de vida do edifício (Sampaio, 2017):

- **Modelo 3D:** A dimensão 3D está associada à modelação paramétrica, na qual é criado um modelo que contém todos os elementos construtivos 3D e incorpora os aspetos da construção, incluindo geometria, relações espaciais e propriedades, permitindo visualizar, com um elevado detalhe geométrico, o edifício projetado (Santiago *et al.*, 2020). Sobre o modelo é possível obter a extração de desenhos, dos diversos projetos de especialidade, complementados com pormenores e vistas de perspetiva do modelo em corte, apoiando a compreensão do projeto no âmbito de uma equipa colaborativa. A produção de desenhos é efetuada sobre o modelo atualizado, reduzindo a ocorrência de erros de inconsistência entre desenhos, assim como o tempo despendido na sua retificação em situação de introdução de alterações ao projeto (Sacks *et al.*, 2018). Comparativamente à utilização dos métodos tradicionais, a visualização 3D de todo o projeto e a fácil colaboração entre diversas equipas, proporcionam um fluxo de trabalho mais fluido, permitindo detetar conflitos e problemas de construção numa fase preliminar (United Bim, 2020);
- **Modelo 4D:** O modelo 4D representa as etapas de construção, estabelecidas com base na rede de caminhos críticos estudados, que podem ser visualizadas através do faseamento temporal imposto à exibição dos componentes do modelo 3D (Sampaio, 2017). O diagrama de *Gantt*, definido num sistema de gestão da construção, como o *MS Project*, associa períodos de tempo a atividades e estabelece a organização sequencial e de sobreposição temporal. O diagrama estabelece o tempo necessário para cada atividade, assim como as sequências de construção ou de instalação, associado a uma adequada partilha de informação e de coordenação entre os intervenientes da obra. O modelo 4D apoia a monitorização da obra real evitando atrasos e custos acrescidos (Charef *et al.*, 2018).
- **Modelo 5D:** A dimensão 5D está relacionada com a quantificação de material por fases, zonas construtivas ou calendarização de tranches financeiras, base da atividade de estimativa de orçamentos (Santiago *et al.*, 2020). A utilização das capacidades dos sistemas BIM, pós modelação 3D, na obtenção da quantificação de material, referido como *Quantity-Take-off* (QTO), tem vindo a admitir um importante destaque, principalmente, nas empresas de construção, em que o controlo da gestão de custos dos projetos começa a evidenciar vantagens competitivas, com uma abordagem BIM (Smith, 2016). O modelo 5D envolve os aspetos relacionados com a estimativa orçamental das despesas, as medições de materiais, a necessidade de recursos humanos e a análise dos custos operacionais. Estes aspetos podem

ser obtidos automaticamente e atualizáveis após a introdução de modificações em fase de projeto, pois as tabelas criadas são dinâmicas, possibilitando a reavaliação efetuada sobre uma discussão sustentada em valores corretos (Mitchell, 2012). A atividade de orçamentação, apoiada no modelo 5D, é agilizada em relação ao dispêndio de tempo associado à realização da mesma tarefa sobre o desenho, contribuindo para minimizar as derrapagens orçamentais, apoiada na realização regular de relatórios de orçamentação e da atualização de custos unitários, parciais e globais (United BIM, 2020).

- **Modelo 6D:** Os parâmetros constituintes dos objetos, utilizados no processo de modelação 3D do projeto, contém propriedades referentes à condutividade térmica, ao coeficiente de reflexão das superfícies (refletância) ou, mesmo, ao consumo de CO<sub>2</sub> na fabricação de cada material, permitindo que os sistemas de simulação comportamentais apresentem relatórios de resultados. O sistema *Green Building Studio*, quando aplicado sobre o modelo 3D criado, permite obter valores de gastos energéticos que sustentam as opções de sistemas de iluminação ou de distribuição natural de luz solar (Santiago *et al.*, 2020). As tabelas dinâmicas, em que o parâmetro de CO<sub>2</sub> tenha sido selecionado, permitem contabilizar a emissão de CO<sub>2</sub> associado ao projeto (Asl *et al.*, 2015) (MTWO, 2021).
- **Modelo 7D:** As atividades de manutenção e de gestão, durante o período de utilização do edifício, são referidas no âmbito BIM, como a 7ª dimensão. Nesta fase, os objetos paramétricos que constituem o modelo 3D BIM, devem ser atualizados com a informação relativa a períodos de manutenção preventiva, a certificados, especificações técnicas e garantias de equipamentos ou, ainda, a relatórios de inspeções e de eventuais trabalhos de reparação realizados. O modelo 7D associado a dados relevantes de manutenção e gestão, deve acompanhar todo o ciclo de vida do edifício (Delgado *et al.*, 2015).
- **Modelo 8D:** O modelo relacionado com a segurança de pessoas em obra e durante a utilização do edifício, representa de uma forma realista todo o espaço de obra, a sua envolvente e as atividades a serem desenvolvidas, assim como o interior e exterior do edifício permitindo a análise de eventuais riscos para os trabalhadores ou habitantes. Esta informação permite identificar e analisar as escolhas mais adequadas relativas à segurança, apoiando a elaboração de planos de segurança detalhados, de modo a prevenir e reduzir o risco de acidentes (Kamardeen, 2010).



Figura 2.1 - Modelos nD BIM.

### **2.3. Implementação do BIM**

A transição de um processo tradicional, enraizado no desenho técnico, para a abordagem BIM, exige mudanças processuais e um investimento significativo em tecnologia e formação. No contexto da empresa, a implementação do BIM requer a reestruturação dos seus processos funcionais internos, como parte de uma estratégia para adaptar os métodos de trabalho tradicionais ao novo procedimento, bem como uma mudança na comunicação entre empresas (Sampaio & Diez, 2020).

A reorganização interna das empresas e a mudança nas práticas de colaboração entre parceiros num projeto, apresenta algumas limitações devido, principalmente, à falta de assimilação e conhecimento das reais capacidades da sua aplicabilidade e eficiência. Os profissionais, em algumas das atividades, não reconhecem as vantagens e o potencial tecnológico da utilização de uma plataforma BIM integrada, no desenvolvimento da sua atividade. Nalgumas empresas, a introdução deste conceito é, ainda, percecionada como uma interferência no ambiente de trabalho estruturado e sequencial, nas rotinas estabelecidas da empresa, provocando resistência e desconfiança à mudança (Sacks *et al.*, 2018). Atualmente, a resistência tem admitido alguma redução, no sentido de uma maior aceitação por todos os profissionais, nas diversas áreas abrangidas pela indústria. As empresas têm vindo a reconhecer que esta transição é inevitável e a sua implementação, no trabalho prático, deve ser entendida como um requisito obrigatório (Wong, 2015).

Em todas as áreas da indústria da construção, proprietários, projetistas, construtores e gestores têm vindo a relatar os benefícios da adoção da metodologia BIM na sua atividade específica. Este aspeto positivo, tem contribuído para a aceitação rápida e crescente do BIM, levando as entidades governamentais a estabelecerem regulamentos e prazos de implementação obrigatória no domínio da construção pública. Além disso, as instituições de ensino superior têm tido a importante missão de habilitar os futuros engenheiros para estas novas metodologias, fornecendo os ensinamentos fundamentais sobre as questões mais inovadoras da construção e adaptando os seus programas curriculares. Estas instituições contribuem positivamente para a atualização dos conhecimentos dos profissionais desta área, organizando cursos de formação BIM, de acordo com o interesse e as necessidades dos departamentos de engenharia e entidades públicas (Sampaio, 2022).

No setor privado, a competitividade global do setor e as obrigações legais levaram a que os escritórios de construção investissem na tecnologia BIM e na formação dos seus colaboradores. Por estas razões, esta tecnologia tem vindo a ser implementada num número crescente de países.

#### **2.3.1. Contexto internacional**

No contexto Europeu, a Finlândia foi pioneira e apresenta os mais elevados níveis de implementação do BIM. Em 2007, o país já apresentava uma utilização de 93% nas empresas de arquitetura e 60% nas empresas de engenharia, indicando assim uma aceitação cultural da plataforma BIM como a principal prática de trabalho no setor. O país tem sido um dos grandes impulsionadores do BIM, sobretudo pela sua componente de investigação, desenvolvendo projetos-piloto, de modo a adquirir

competências tecnológicas, utilizando o *software* nacional *Tekla* e experiência na aplicação da metodologia (Sampaio, 2021). A Suécia, Noruega e Dinamarca acompanharam os avanços conceituais e tecnológicos do país vizinho alcançando também um elevado nível de adoção. Ainda em 2007, estes países tornaram obrigatória a adoção do BIM, em particular nos serviços públicos apoiados pelo Estado, nomeadamente a Administração Sueca de Transportes, a Administração Norueguesa de Estradas Públicas, a Administração Nacional Norueguesa de Caminhos-de-Ferro e o Serviço de Construção da Defesa Dinamarquesa (Wong, A. *et al.*, 2010).

O método de implementação da metodologia tem sido considerado com uma distinta estratégia em cada país, de obrigatoriedade na construção pública com data anunciada, ou através de uma progressiva adaptação (Sampaio, 2021):

- **Implementação obrigatória:** No **Reino Unido**, o gabinete administrativo do governo, publicou em 2011 o documento *Government Construction Strategy*, reconhecendo a implementação da metodologia BIM como necessária para alcançar o objetivo de reduzir os custos de construção no sector público e a emissão de CO<sub>2</sub> associada ao material utilizado. O documento determina ainda que, a partir de 2016, os projetos apresentados no contexto de concursos públicos devem ser definidos de acordo com os requisitos do nível 2 (Figura 2.2) de maturidade do BIM. Para proporcionar a continuidade governamental e em associação com a indústria, foi emitido um novo documento, *Construction 2025*, estabelecendo como limite, para alcançar o nível 3 de maturidade BIM, o ano 2025 (GOV, 2016).

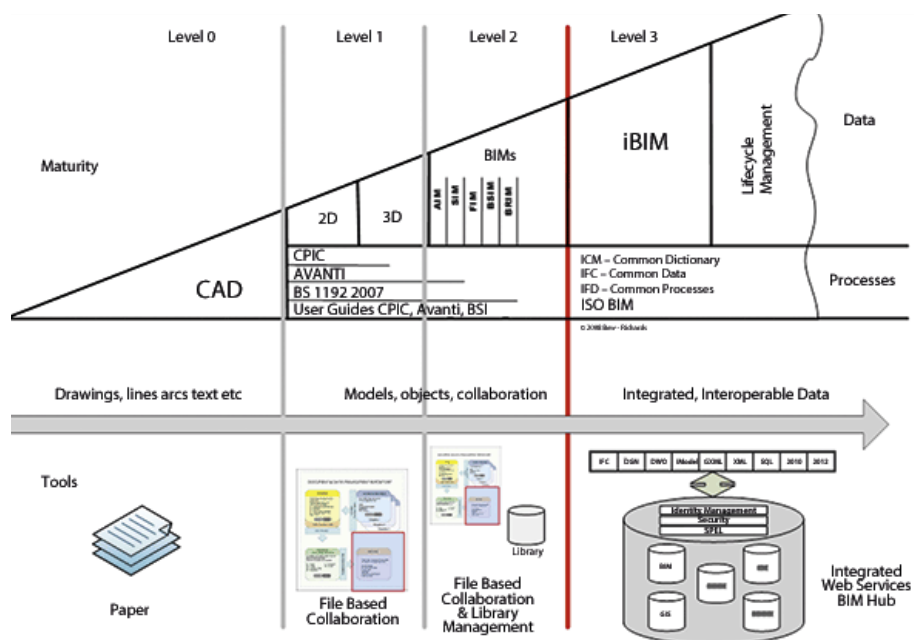


Figura 2.2 – Maturidade de implementação do BIM na indústria da construção [fonte: (Bew & Richards, 2008)].

Em 2015, com a missão de apoiar a implementação do BIM em **Espanha**, o Ministério do Desenvolvimento criou o grupo de trabalho multidisciplinar, *EsBIM*, composto por diversos profissionais de administração e engenharia. A administração espanhola, utilizando uma

estratégia gradual de obrigatoriedade, solicitou que todos os projetos relativos a edifícios públicos fossem elaborados em plataformas BIM até ao final de 2018. Nos **Países Baixos**, o governo tem exigido, desde 2011, a implementação do BIM em obras públicas. Em 2012, o Ministério do Interior exigiu a utilização da metodologia em atividades de manutenção de grandes projetos, através do estabelecimento de protocolos adaptados a contratos a longo prazo, com o objetivo de melhorar a eficiência da gestão e manutenção das construções públicas. A estratégia adotada por **Itália**, para uma implementação obrigatória progressiva do BIM, foi iniciada com a entrada em vigor da norma *UNI 11337*, em 2017, e seguidamente atualizada, em 2018, pelo Decreto Ministerial 560/2017 - Decreto Baratonno. Este fornece estratégias de coordenação e gestão do BIM e a definição de aspetos jurídicos contratuais. A administração italiana, desde 2019, exige a utilização do BIM para projetos de infraestruturas de grande escala e torna obrigatório, a partir de 2025, a utilização do BIM na maioria das obras públicas (BibLus, 2019).

- **Implementação Progressiva.** Em **França**, o governo adotou uma estratégia de apoio à transição digital na indústria da construção durante o período de 2015 a 2017. Teve como objetivo responder às expectativas da indústria da construção e alcançar, até 2022, a completa disseminação das estratégias BIM na conceção e gestão das obras públicas e grandes infraestruturas. No relatório técnico de 2014 – *Actions pour la relance de la construction de logement* – é referido que uma das prioridades é encorajar a inovação tecnológica baseada no BIM, e estabelece os requisitos da sua adoção progressiva em obras públicas a partir de 2017. Contudo, a utilização do BIM, em França, apresenta ainda níveis relativamente baixos de adoção, inferiores a 50%. O governo **alemão** promoveu, em 2015, o plano estratégico nacional para a gestão digital da construção, com o objetivo de introduzir inovação nesta indústria. A introdução do BIM foi planeada para durar até 2020, sendo executada em três fases. A primeira fase foi caracterizada pela preparação e prática através de projetos-piloto, normalização na educação e formações avançadas, clarificação de pareceres jurídicos, e desenvolvimento de normas BIM. De 2017 a 2020, a fase dois iniciou-se com projetos-piloto avançados, desenvolvidos na área das estradas e caminhos-de-ferro e na gestão e planeamento da construção de edifícios institucionais, a fim de testar os benefícios da plataforma BIM. A fase três visou implementar os requisitos mínimos, da norma reguladora, em todos os projetos públicos BIM com início em 2020 (Galić *et al.*, 2017).

### 2.3.2. Contexto nacional

Portugal continua a não apresentar um plano de transição evidente para o desenvolvimento de medidas de estímulo à adoção da metodologia BIM. Este relativo atraso, dificulta, em parte, a capacidade de exportação de serviços de empresas nacionais para os mercados internacionais, já atualizados em BIM, perdendo competitividade (RTP, 2020). Adicionalmente, a falta de apoios financeiros, torna a transformação digital incomportável para as pequenas e médias empresas (PME), que apresentam uma menor capacidade de adoção às novas tecnologias (COTEC, 2020).

No entanto, as universidades, centros de investigação e empresas de topo têm organizado diversas iniciativas de formação e de disseminação de implementação BIM no sector (BUILT CoLAB, 2021). Foi criada a Comissão Técnica de Normalização BIM, a CT 197, constituída pelo Instituto Superior Técnico, pelas empresas Brisa, Metro de Lisboa, Mota-Engil, Siemens, GS1 Portugal, Vortal e pelos organismos PROFORUM, DST Group, Ordem dos Engenheiros e IEFP. Tem como principal objetivo estudar a forma como o BIM irá afetar os diferentes postos de trabalho, assim como analisar a necessidade da criação de mais oferta formativa adequada às novas exigências tecnológicas (COTEC, 2020). O estudo preliminar, realizado pela comissão, aborda uma análise da atual metodologia de trabalho, a fim de identificar fatores críticos, tendo sido apontados (Sampaio, 2022): maturidade do cliente, competência e indústria, digitalização e inovação, informação, conhecimento e sustentabilidade.

Atualmente, os benefícios da implementação do BIM em diferentes etapas de projeto, construção e gestão são reconhecidos na maioria das empresas nacionais. Empresas como a Mota-Engil, a DST Group e a Teixeira Duarte, cientes do seu benefício, têm começado a introduzir a metodologia nos seus métodos de trabalho, relatando ganhos significativos, principalmente, ao nível da comunicação e da rapidez na tomada de decisões apoiando a coordenação do projeto, numa melhor compatibilização entre especialidades e na deteção atempada de inconsistência, na redução de tempo despendido na elaboração do projeto colaborativo e no controlo de custos na fase de projeto e na obra. Para a introdução do BIM, a digitalização de todos os serviços, deve ser uma aposta do governo e empresas, com vista ao aumento da produtividade e competitividade da indústria AEC nacional (COTEC, 2020). Para tal, as empresas devem investir em equipamentos e formação, e o governo deve apoiar com incentivos à adoção desta metodologia, bem como emitir legislação necessária para uma aplicação completa e regulamentada no setor.

## **2.4. Interoperabilidade**

A interoperabilidade pode ser definida como a capacidade de dois ou mais sistemas trocarem informação, comunicarem e cooperarem entre si, sem sofrerem alterações significativas da sua estrutura ou comportamento (Grilo & Gonçalves, 2010). Os problemas relacionados com interoperabilidade estão presentes em diversas áreas quando a colaboração, interação e intercâmbio de dados são necessários. O caso da indústria AEC não é exceção, onde a evolução das práticas e a adoção do BIM reforçaram a necessidade de colaboração entre os intervenientes num projeto (Arayici *et al.*, 2017).

Apesar dos reconhecidos benefícios relativos à implementação do BIM na indústria, a sua adoção nas empresas e gabinetes de projeto tem vindo a impor desafios organizacionais significativos relacionados com a adaptação cultural interna relativamente aos modos de trabalho, processos de transferência de dados e comunicação com parceiros (Sampaio & Gomes, 2021). Estes problemas resultaram num consenso geral sobre a necessidade da abordagem BIM ser sustentada pela interoperabilidade entre *software* (Ren *et al.*, 2018). A necessidade de inovação e padronização levou a indústria a realizar um esforço no desenvolvimento de normas para estabelecer uma eficaz interoperabilidade. Assim, para que um sistema seja compatível com outro sistema, permitindo a transferência de modelos entre eles,

com a garantia de correção dos dados transpostos, é essencial que ambos os sistemas consigam interpretar a informação, seja por recurso a formatos universais de intercâmbio de dados ou através do formato nativo comum a ambos os sistemas (Muller *et al.* 2019). Esta abordagem é ditada pelas exigências do mercado com a capacidade de desenvolver complementos específicos para a realização de tarefas, como a pormenorização de armaduras ou a simulação do consumo energético (Grilo & Gonçalves, 2010). Assim, a interoperabilidade entre *software* aponta para duas abordagens principais (Sampaio, 2017):

- O formato de dados aberto e padronizado, designado por *Industry Foundation Classes* (IFC), e criado pela organização internacional *BuildingSMART*;
- A transferência efetuada através do formato nativo, relacionada com a utilização de *extensions*, *add-in* e *plug-in*, disponibilizadas nos sistemas de modelação, que asseguram a leitura e a manipulação dos modelos transferidos para essas aplicações específicas.

Apesar do esforço constante em investigação, efetuada em meio académico e empresarial, a persistente limitação da interoperabilidade em algumas das tarefas que requeiram transferência de modelos, na prossecução do desenvolvimento de distintas etapas do projeto, o mercado tecnológico continua a não fornecer uma solução completamente eficaz, afetando negativamente a sua implementação (Aksenova *et al.*, 2018). Este facto torna a interoperabilidade a principal barreira prática a uma adoção bem-sucedida do BIM no setor (Shirowzhan *et al.*, 2020).

#### **2.4.1. Padrão IFC**

Com o objetivo de capacitar os sistemas BIM de um padrão universal de dados, foi criada, na década de 90 do século XX, o organismo Aliança Internacional para a Interoperabilidade (IAI), atual *BuildingSMART*, fornecendo uma base universal para melhorar os processos e a partilha de informação na indústria. Consequentemente, foi desenvolvido o formato padrão IFC, permitindo aos fornecedores de *software* implementar um formato que viabilizava a troca de informação entre os programas (Volk *et al.*, 2014) (Ren *et al.*, 2018).

Atualmente, o IFC é o formato aberto mais utilizado para representar a informação BIM e acelerar a troca de informação entre *software*, sendo, frequentemente, lançadas novas versões com uma crescente eficiência. A integração através do formato IFC é fundamental para proporcionar esta troca de informação, no entanto, esta integração carece de melhoria para assegurar uma correta troca, independentemente da ferramenta utilizada para produzir ou ler os dados (Arayici *et al.*, 2017). Os fabricantes de *software* têm um papel fundamental e devem ter o compromisso de proporcionar uma correta implementação do formato IFC, sendo responsáveis pela qualidade técnica dos dados quando transferidos, atuando como impulsionadores e fortalecendo o reconhecimento dos benefícios da adoção do BIM (Mosey *et al.*, 2016).

Apesar dos esforços desenvolvidos no estabelecimento do formato IFC, com capacidades crescentemente eficazes e abrangentes, as empresas de *software* têm, em paralelo, desenvolvido extensões específicas, incorporadas no *software*, permitindo um melhor controlo da correção dos dados

manipulados entre fases. Estas extensões proporcionam uma melhor compatibilidade ao realizar trocas de informação com determinado *software*. Estas permitem estender funcionalidades e conteúdos disponíveis pelo *software*, disponibilizando uma série de opções que não fazem parte do *software* base (Sacks *et al.*, 2018). De acordo com Grilo & Gonçalves (2010), a maioria das aplicações BIM de modelação e os seus *software* complementares apenas abordavam a interoperabilidade entre si e não em relação às aplicações de outros fornecedores. Atualmente, a perspetiva é idêntica, mas devido às exigências dos utilizadores, começam a existir mais e melhores extensões, utilizáveis entre *software* de empresas distintas, como é o caso do *plug-in CSiXRevit*, que permite a exportação de um modelo *Revit* para os sistemas de análise estrutural *SAP2000* e *ETABS* (Sampaio & Gomes, 2021).

#### **2.4.2. Transferência de modelos**

O presente trabalho aborda, como objetivo principal, a análise da capacidade de interoperabilidade entre os sistemas de modelação, *Revit*, e de análise estrutural, *Robot*, ambos do mesmo fabricante, *Autodesk*. Na transferência de modelo é utilizado o *plug-in Revit-Robot* (UNIFI, 2019).

A utilização do *plug-in Revit-Robot* assegura a troca bidirecional do fluxo de dados entre os dois programas. Isto permite transferir o modelo estrutural, criado no *Revit*, para o *Robot* e vice-versa atualizando o modelo inicial com o resultado do cálculo estrutural. Deste modo, o modelo de estruturas, gerado no *Revit*, é completado com os resultados da análise estrutural e de pormenorização de armaduras. No entanto, este processo requer um nível de interoperabilidade que não é ainda eficaz. O *plug-in* permite transferências parciais de informação, não sendo necessária efetuar sempre uma atualização total do modelo, funcionalidade com uma maior utilidade para projetos de grande dimensão. A transferência do modelo pode ser realizada através de uma integração direta entre os dois programas, quando estes estão simultaneamente abertos no mesmo computador, ou o modelo pode ser guardado no formato de ficheiro *.smxx*, compatível com os dois *software*, possibilitando o envio e a utilização noutra computador (*Autodesk*, 2020).

Os estudos atuais mostram que os processos de transferência *Revit/Robot* são dos mais eficientes no mercado, mas ainda apresentam algumas falhas, principalmente no processo de troca de dados após as análises estruturais, ou seja, quando o fluxo de dados decorre do *Robot* para o *Revit*. Nesta etapa, a transferência das armaduras para o modelo *Revit* é realizada com diversas inconsistências e omissões, como é no caso das vigas contínuas, onde as armaduras não são posicionadas corretamente, assim como as vigas apresentam os estribos em duplicado. Apesar desses erros, a armadura das vigas é reconhecida, contrariamente às lajes e fundações, onde a transferência simplesmente não é efetuada (Sampaio & Gomes, 2021).



### 3. Caso de estudo

O caso de estudo escolhido para desenvolver o projeto de estruturas, em ambiente BIM, é uma moradia unifamiliar. O processo de criação da arquitetura admitiu diversas opções de conceção, fornecendo, no âmbito do presente estudo, uma ilustração em como o modelo BIM constitui uma adequada base de trabalho e de entendimento de coordenação entre as atividades do arquiteto e do engenheiro. Assim, este capítulo descreve a modelação de uma primeira opção da solução estrutural e as modificações impostas ao modelo de forma a incorporar as condicionantes arquitetónicas de acordo com as alterações estudadas.

#### 3.1. Caracterização

A moradia, localizada no arquipélago dos Açores, na ilha do Faial, é de tipologia T2, com  $258.3\text{ m}^2$  de área bruta e de  $182.2\text{ m}^2$  de área de implantação. Em altura, é composta por dois pisos, acima da cota do solo, e por um piso em semi-cave, com apenas uma das paredes em contacto com o solo. Relativamente à organização dos espaços: o piso 0, semi-enterrado, é composto pela garagem e lavandaria; o piso 1 é formado pela sala, cozinha, escritório, três instalações sanitárias e dois quartos; O piso 2, formando uma *mezanine*, serve para arrumos. As peças desenhadas foram facultadas pelo gabinete de engenharia envolvido no projeto, tendo disponibilizado as plantas e cortes da arquitetura, assim como uma proposta de pré-dimensionamento da estrutura, num ficheiro em formato CAD (Figuras 3.1 e 3.2).

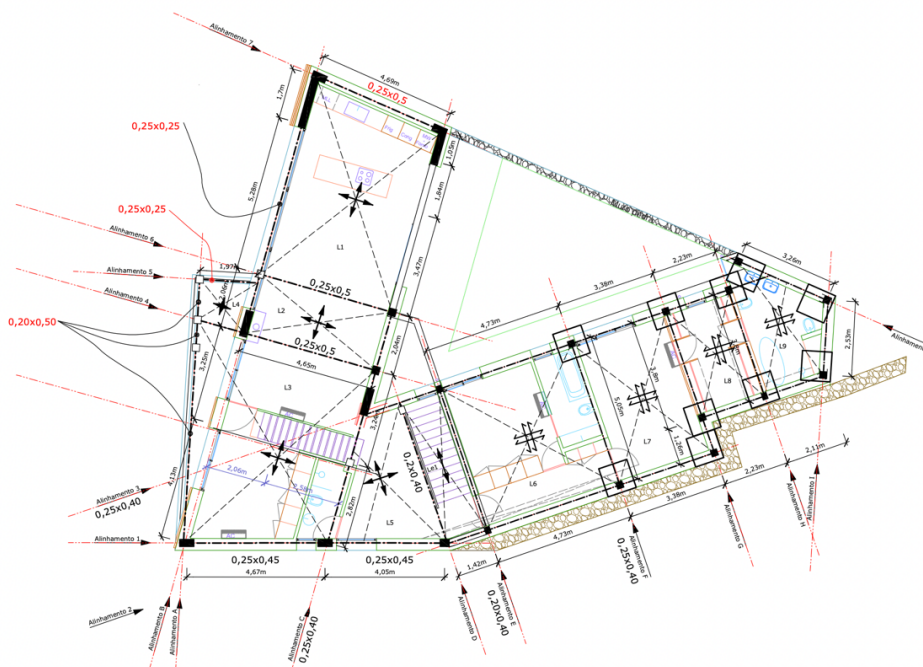


Figura 3.1 - Desenho CAD fornecido do Piso 1.

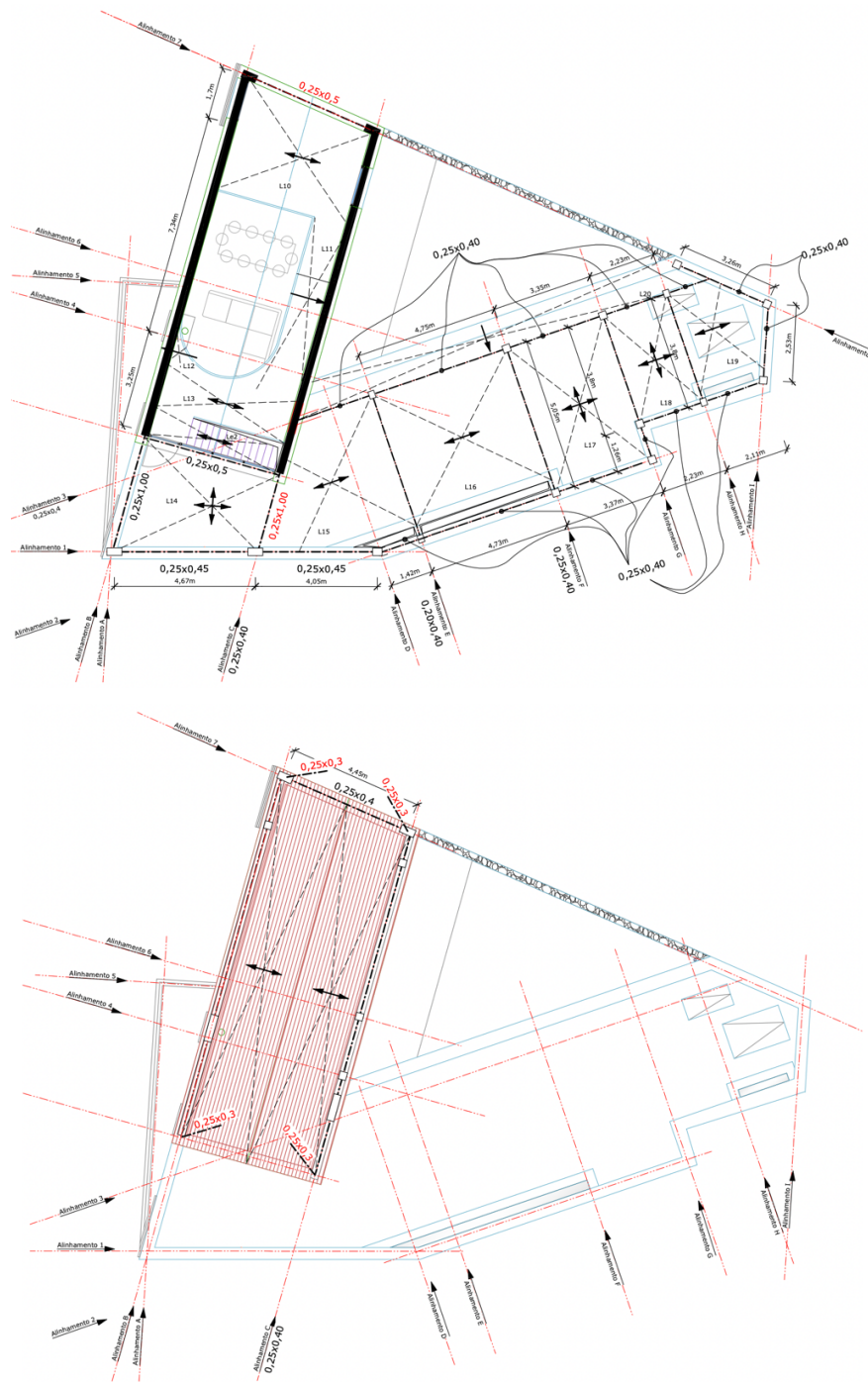


Figura 3.2 - Desenhos CAD fornecidos do Piso 2 e Cobertura.

O desenvolvimento do projeto de estabilidade, à data em que foram fornecidas as peças desenhadas, encontrava-se numa fase muito inicial, o que justifica a reduzida documentação então existente. Aproveitando o estado inicial do projeto, ao longo deste estudo, existiu uma colaboração entre a arquitetura e o gabinete de engenharia na conceção e desenvolvimento do projeto de estruturas.

### 3.2. Proposta de pré-dimensionamento

A solução estrutural proposta consiste, essencialmente, numa estrutura vigada em betão armado, formada por pilares, vigas, paredes e lajes, e num sistema estrutural em pórticos e paredes. Com base na informação fornecida foi elaborado um modelo BIM da estrutura, o qual se apresenta na Figura 3.3.

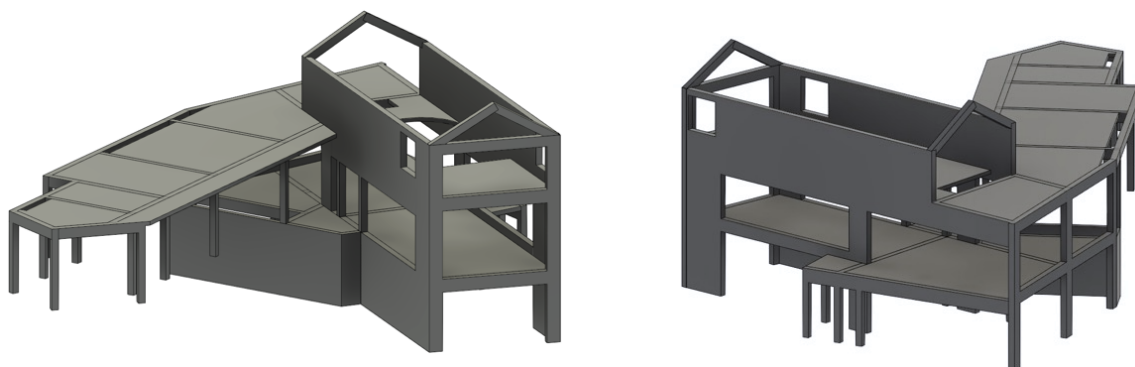


Figura 3.3 - Perspetivas do modelo BIM de estruturas criado no sistema *Revit*.

O modelo apresenta ao nível do piso 0, e constituindo a envolvente da construção em contacto com o solo, as paredes de contenção adotadas, com 0.20m e 0.25m de espessura. A modelação das fundações não é ainda visível pois, numa primeira fase de apoio ao estudo de arquitetura, apenas foi considerada a modelação da estrutura para efeitos de cálculo, ou seja, a representação das condições de apoio no modelo analítico. Como a informação relativa a sapatas não é reconhecida no sistema de dimensionamento, não foi relevante a sua modelação nesta fase. Esta opção é esclarecida com um maior detalhe na secção 4.2. A solução estrutural definida para as fundações é composta por sapatas isoladas (sob os pilares) e por sapatas contínuas (sob as paredes de contenção). A Figura 3.4 apresenta as plantas estruturais referentes aos pisos 0 e 1.

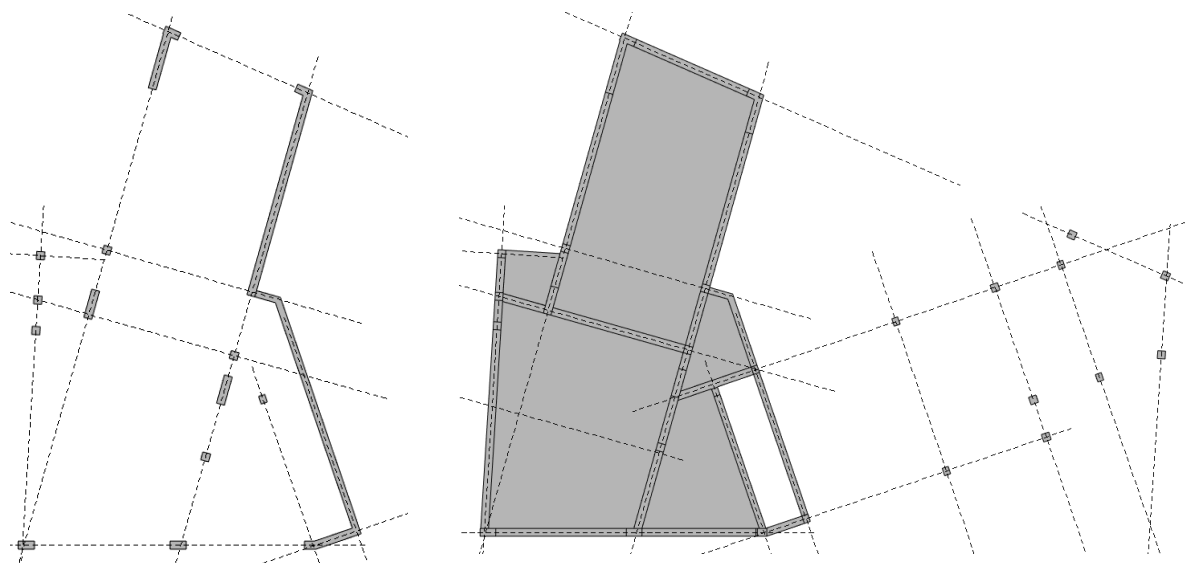


Figura 3.4 - Plantas estruturais dos pisos 0 e 1.

No corpo principal do edifício, nos pisos 1 e 2, as lajes maciças apresentam uma espessura de  $0.17m$ , apoiadas num sistema vigado. (Figuras 3.4 e 3.5)

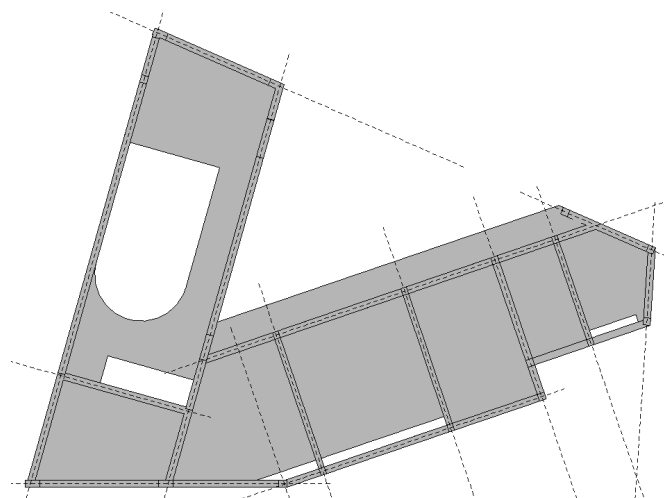


Figura 3.5 - Planta estrutural do piso 2.

As paredes estruturais adotadas para o piso 2, como se ilustra na Figura 3.3, foram definidas, de forma a fazer face às condicionantes arquitetónicas. No entanto, em termos sísmicos estes elementos não são aconselhados por, não tendo continuidade até à fundação, introduzirem uma maior massa no piso superior e, conseqüentemente, incrementando as forças horizontais atuantes. O edifício apresenta, ainda, uma cobertura inclinada, em laje de betão armado, sobre o corpo principal, e uma cobertura em terraço acessível, sobre o corpo secundário. Ambas as lajes são de  $0,15m$  de espessura.

A solução estrutural apresentada foi o resultado de uma série de adaptações, realizadas à proposta de pré-dimensionamento inicial, que ocorreram na sequência de alterações efetuadas na arquitetura. Estas modificações são descritas em detalhe nos parágrafos seguintes.

### 3.3. Estudo de soluções alternativas

No desenvolvimento de projeto, é frequente receber alterações não só em fase de conceção, mas muitas vezes em fases mais avançadas, e mesmo durante a construção, sendo neste caso necessário efetuar demolições parciais. A utilização de plataformas BIM, como o *software Revit*, apresenta vantagens significativas comparativamente ao tradicional CAD quando é necessário efetuar alterações ao projeto. Com a utilização de sistemas de modelação BIM, facilmente se altera uma secção ou o posicionamento de um elemento, com a total confiança de que todas as vistas e cortes serão automaticamente atualizadas em conformidade, reduzindo o tempo despendido na correção das peças desenhadas e na verificação da sua consistência.

O projeto em análise sofreu alterações na arquitetura, enquanto o modelo estrutural estava a ser desenvolvido, obrigando a uma série de adaptações da sua estrutura. As alterações mais relevantes ao projeto foram analisadas de forma a ajustar o modelo BIM de estruturas em função das modificações impostas.

### 3.3.1. Alteração 1

A alteração 1 considerada no modelo de estruturas, foi solicitada pelo gabinete responsável pela arquitetura, por ter reformulado a dimensão da garagem. Foi necessário proceder à remoção de uma viga no piso 1, por esta condicionar a instalação da porta da garagem:

- A solução estrutural encontrada para a resolução desta alteração considera a criação de um único painel de laje, prolongando a laje até à extremidade da varanda e aumentando a sua espessura de 0.15m para 0.17m;
- O pilar identificado na Figura 3.6 foi, inevitavelmente, removido por descarregar na viga retirada;
- A altura da secção da viga do piso superior aumentou de 0.45m para 1m, visto ter passado de um vão de 3.87m para 7.15m (Figura 3.6). Este acentuado aumento da altura da viga, para além do valor que seria necessário (sensivelmente 0.65m), resultou da necessidade de colocar a face inferior da viga à cota superior da caixilharia do vão, dispensando a necessidade da execução de uma verga.

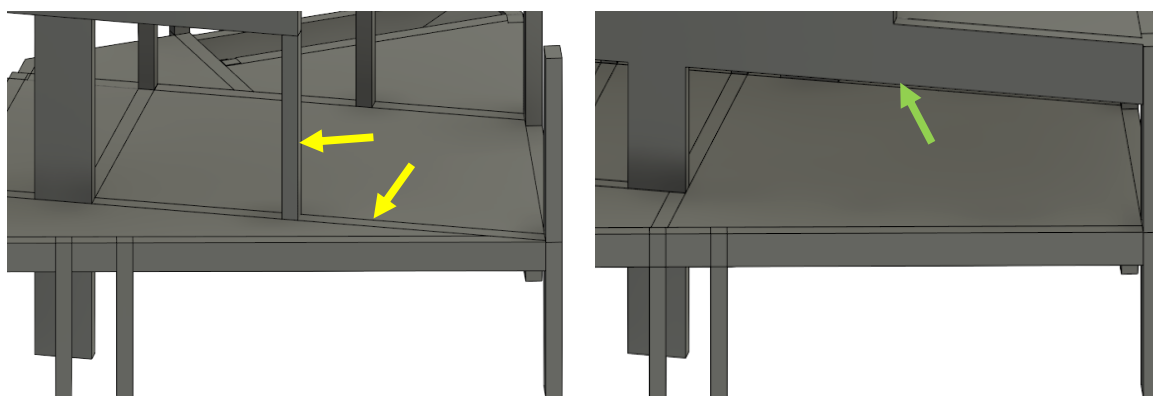


Figura 3.6 - Solução inicial à esquerda e alterada à direita.

### 3.3.2. Alteração 2

A segunda alteração está relacionada com a adição de uma janela, no piso 2, na fachada norte da moradia (Figura 3.7). Inicialmente, estava previsto um sistema simples de pilares e vigas para essa fachada, mas devido à localização da janela essa solução teve que ser repensada. A posição da janela apenas permitia a colocação de uma viga com uma altura aproximada de 0.20m, valor insuficiente para a altura necessária:

- A solução adotada considerou uma parede estrutural com 0.25m de espessura, idêntica à parede da fachada sul;

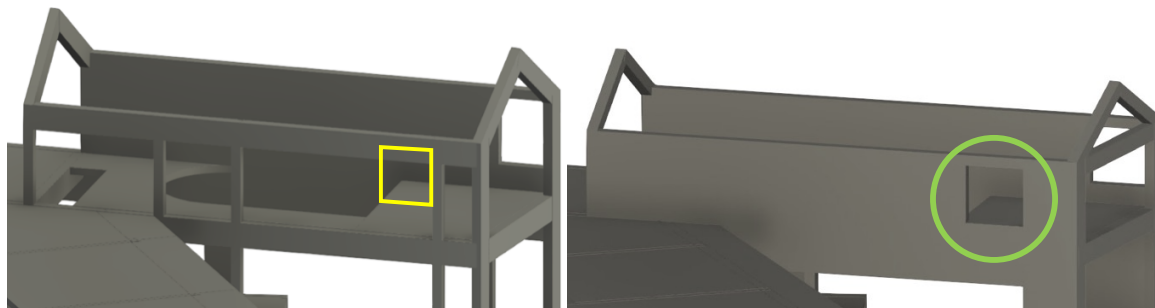


Figura 3.7 - Solução estrutural antes e depois da Alteração 2.

### 3.3.3. Alteração 3

A terceira alteração requerida pelo gabinete de arquitetura, consistiu na remoção de 2 pilares no piso 0, criando um vão contíguo em quase toda a frente do corpo principal do edifício. Por razões de ordem arquitetónica, foi requisitado que a face inferior da viga ficasse coincidente com a face inferior da laje (Figura 3.8):

- Assim, foi necessário substituir a viga que os unia por uma viga com uma maior dimensão e de posicionamento invertido;
- A adaptação realizada considerou um incremento da altura da viga de 0.25m para 0.50m e foi efetuada a alteração da sua posição geométrica, permitindo a correta representação da viga invertida.

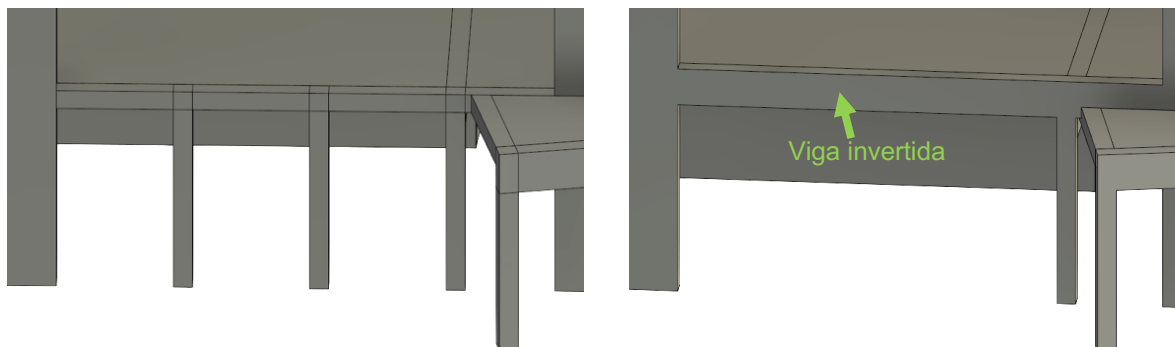


Figura 3.8 - Solução estrutural antes e depois da Alteração 3.

### 3.3.4. Alteração 4

Finalmente, foram apresentadas outras modificações ao projeto de arquitetura. As últimas alterações efetuadas à estrutura tiveram como causa principal a falha de comunicação entre os gabinetes. Apesar do gabinete de engenharia ter enviado as peças desenhadas para o arquiteto, alguns elementos estruturais não foram representados no projeto de arquitetura. Nas alterações posteriormente realizadas ao projeto de arquitetura, o projetista não considerou esses elementos estruturais, pelo que não detetou as incompatibilidades com a estrutura anteriormente enviada. Assim as últimas modificações efetuadas à estrutura foram (Figura 3.9):

- Aumentar a espessura de todas as lajes à exceção das lajes da cobertura dos quartos de 0.15m para 0.17m;
- Remover a viga 1, numerada na imagem;
- Alterar a viga 2 para um posicionamento invertido.

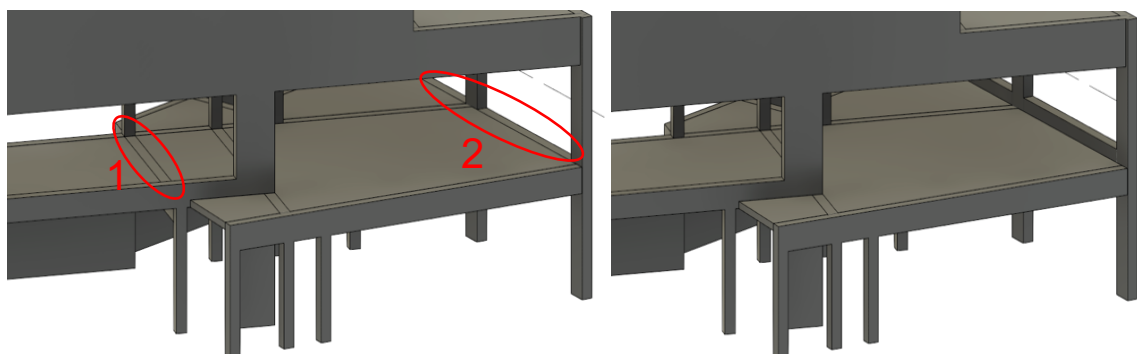


Figura 3.9 - Solução estrutural antes e depois da Alteração 4.

### 3.3.5. Alterações com suporte BIM

O arquiteto propôs algumas alterações ao projeto, que em diversas situações conduziram a problemas de difícil resolução por parte do gabinete de engenharia. Estas dificuldades, muitas vezes não eram visualmente entendidas pelo gabinete de arquitetura, o que levou a um acréscimo no custo da estrutura, que poderia ter sido minorado com pequenos ajustes no desenho de arquitetura.

A utilização do modelo BIM, no auxílio à visualização tridimensional do projeto, veio melhorar a comunicação entre os gabinetes, apesar do gabinete de arquitetura não utilizar *software* BIM. Na tentativa de minimizar a incompatibilidade de programas, o modelo *Revit* era exportado e enviado para o arquiteto em formato CAD (ficheiro *dwg.*), para que este o conseguisse visualizar. As alterações ao projeto aconteceram, em alguns casos, quando o modelo estrutural já tinha sido transferido para o *software* de cálculo *Robot*. Nesses casos, se a alteração envolvesse uma grande mudança na geometria, o modelo era editado no *software Revit* e transferido para o *Robot*, caso contrário, a alteração era feita diretamente no *Robot*.

O gabinete de engenharia beneficiou bastante com a utilização do BIM neste projeto, visto ser fácil e rápido efetuar alterações na estrutura e realizar a respetiva análise estrutural em qualquer fase da conceção. Se o projeto de arquitetura tivesse sido elaborado também em BIM, mais facilmente a comunicação era estabelecida, conduzindo naturalmente a uma melhor compreensão, de parte a parte, relativamente às condicionantes, exigências e possibilidades de resolução em modo colaborativo.





## 4. Modelação da estrutura

Este capítulo descreve o processo de modelação da estrutura, utilizando o *software Revit* (2022), tendo como objetivo apresentar as etapas da modelação geométrica e analítica das componentes estruturais. O modelo geométrico corresponde a uma representação da estrutura física da solução estabelecida, obtido através da utilização de objetos paramétricos, seleccionados a partir da biblioteca de elementos estruturais, em betão armado, disponíveis na biblioteca de famílias do sistema *Revit*.

O modelo analítico é uma representação do modelo físico estrutural e é gerado automaticamente pelo *software*, após a criação do modelo geométrico. A automatização do processo de obtenção do modelo analítico requer, contudo, uma verificação cuidada relativamente a inconsistências geométricas, sendo necessário proceder a ajustes manuais do modelo. Após esta fase, o modelo analítico é transferido para o *software* de análise estrutural.

### 4.1. Configuração inicial

A primeira fase no processo de modelação é a configuração dos parâmetros de base do modelo de estruturas a criar. Inicialmente, é seleccionado o *template* da disciplina pretendida e são estabelecidas as unidades de trabalho e os materiais a aplicar:

- O *template* de estruturas incorpora uma série de configurações predefinidas, que incluem tipos de vistas, famílias de elementos, escalas de visualização, entre outras;
- A unidade do sistema internacional considerada é o *metro (m)*, devendo ser seleccionada no início da modelação, de forma a permitir posicionar corretamente, os níveis dos pisos e os alinhamentos em planta;
- Os materiais seleccionados são o betão C30/37 (utilizado na modelação em *Revit*) e o aço A500 (considerado no *software* de cálculo). Ambos os materiais foram seleccionados a partir da biblioteca de materiais do *Revit*, mas foi conveniente ajustar as suas propriedades mecânicas (Figura 4.1).

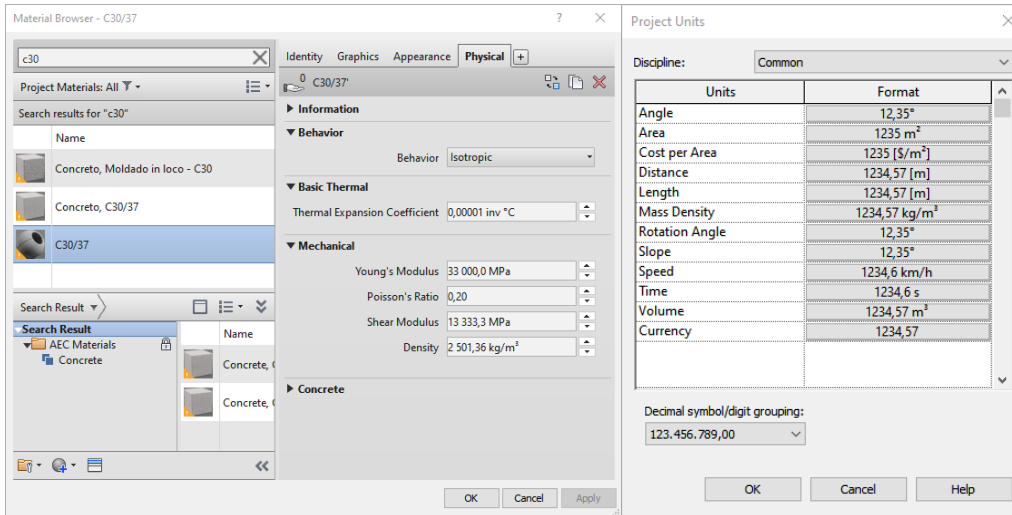


Figura 4.1 - Propriedades do Betão C30/37 e unidades de projeto.

Relativamente às propriedades dos materiais, foi considerada uma boa prática a verificação das respetivas propriedades mecânicas no *software* de cálculo, pois a sua base de dados apresenta uma maior gama de materiais. Contudo, uma vez indicados para os novos materiais criados, os valores corretos, a biblioteca de materiais do *Revit* fica enriquecida com mais estes materiais, podendo ser utilizados noutros projetos. Este aspeto é relevante no gabinete de estruturas.

Previamente à modelação, é efetuada a importação das peças desenhadas do projeto de estruturas inicial. A sua importação foi realizada através da ferramenta *Import CAD*, que permite importar ficheiros no formato *.dwg*, *.dxf*, entre outros. Depois de importadas, as peças desenhadas ficam visíveis na vista pretendida, facilitando o posicionamento dos elementos estruturais (Figura 4.2).

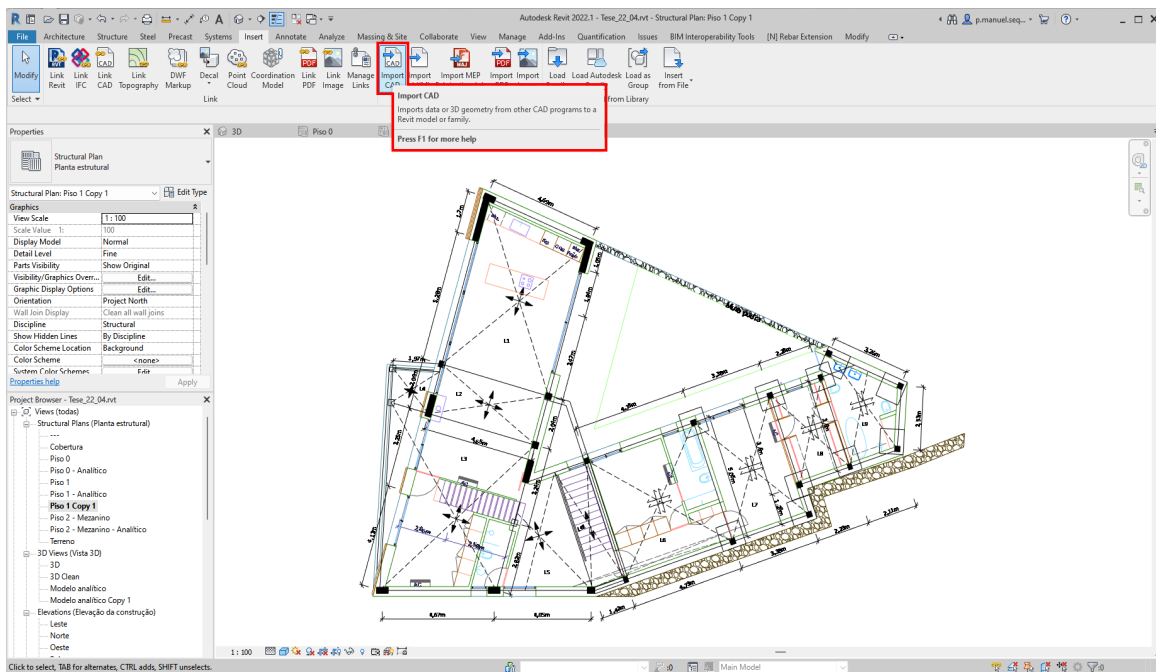


Figura 4.2 - Importação para o *Revit* da planta do piso 1 no formato *.dwg*.

A modelação é iniciada com a definição dos alinhamentos e níveis do projeto, que servem de base à colocação dos elementos estruturais. Os eixos foram criados através dos alinhamentos presentes nas peças desenhadas, e os níveis foram definidos consultando as cotas indicadas nos alçados e cortes do projeto de arquitetura (Figura 4.3). Por uma questão de conveniência as nomenclaturas adotadas foram consideradas as mesmas dos desenhos importados.

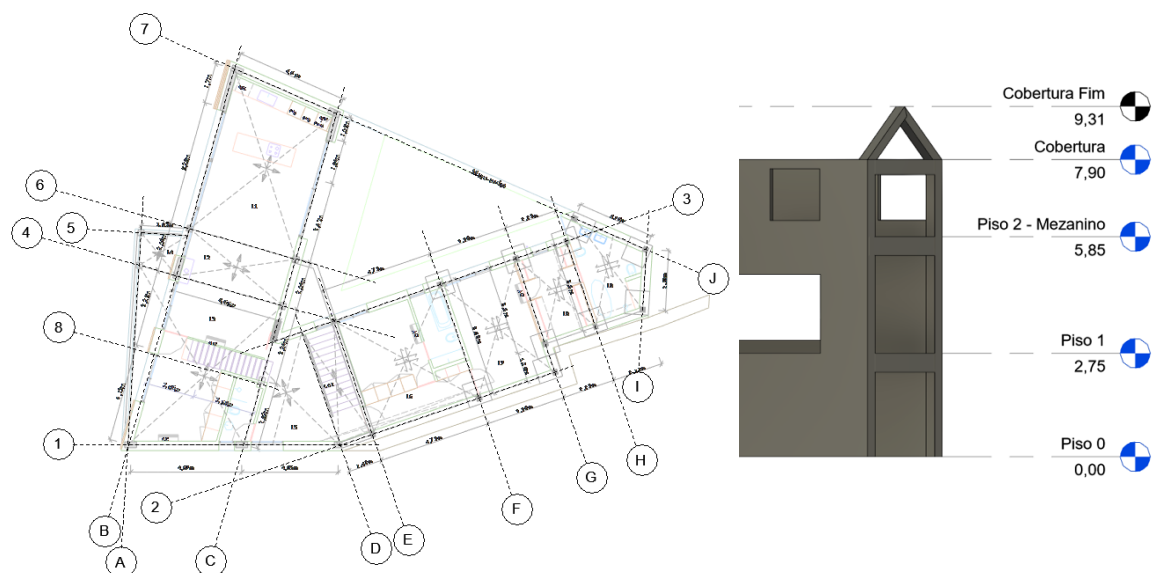


Figura 4.3 - Alinhamentos e níveis do projeto.

## 4.2. Inserção de elementos

Após a rede de alinhamentos estar definida, os primeiros elementos a serem modelados, são os pilares, e, sequencialmente, as vigas, as paredes e as lajes. As sapatas foram modeladas após a definição dos pilares e paredes de contenção. A modelação é bastante intuitiva apoiada nas interfaces interativas das distintas famílias dos elementos a utilizar. O utilizador seleciona um elemento da família pretendida e ajusta as dimensões da sua secção transversal ou espessura como projetado (Figura 4.4).

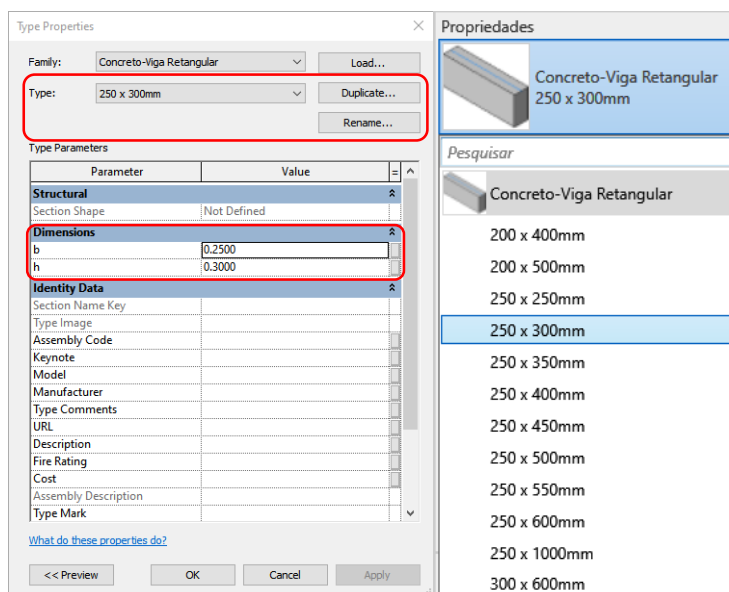


Figura 4.4 - Geração do objeto paramétrico correspondente a uma viga de secção retangular.

#### 4.2.1. Pilares

O centro geométrico dos pilares pode não ser coincidente com o seu centro analítico, como no caso dos pilares de canto, devendo esta situação ser resolvida quando da inserção destes elementos. A resolução desta divergência é efetuada por alteração do posicionamento inicial do pilar analítico, de deteção automática (*Auto-Detect*) para a posição pretendida. Esta alteração permite, no caso apresentado na Figura 4.5, fixar o pilar analítico na interseção dos eixos C e 7, ficando este corretamente posicionado em relação ao centro analítico das vigas que se intersectam sobre ele. O ajuste analítico pode também ser realizado por translação manual do elemento, mas este método é menos recomendado, por apresentar um menor grau de precisão.

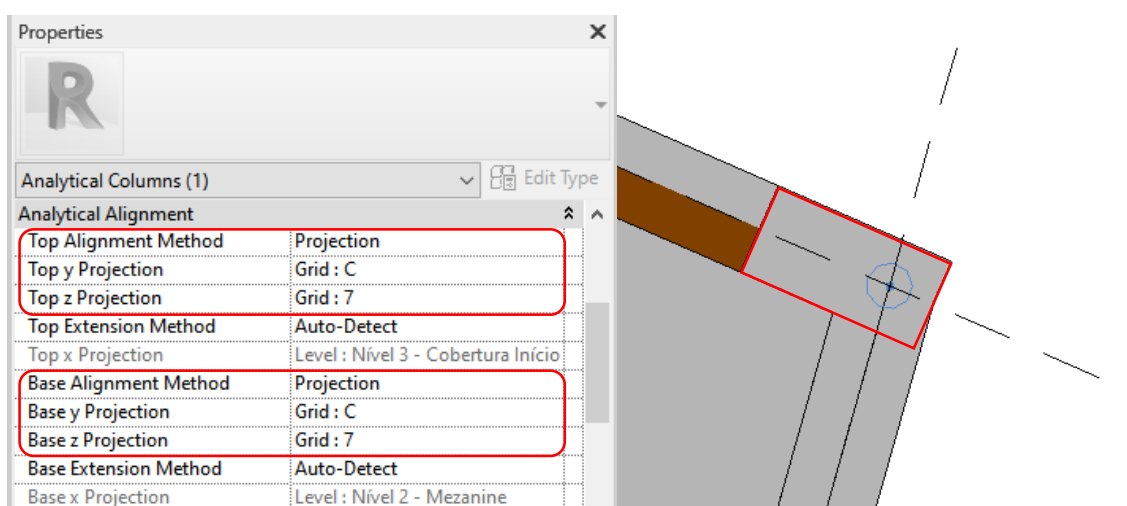


Figura 4.5 - Ajuste do modelo analítico de um pilar de canto.

#### 4.2.2. Vigas

Na modelação de uma viga invertida, existem dois procedimentos a considerar, para que o seu posicionamento seja correto no modelo (Figura 4.6):

- O primeiro procedimento consiste na alteração, na funcionalidade *z Justification*, de *Origin* para *Bottom*. Esta opção define a localização geométrica da viga em relação à direção *z*. Efetuada a alteração, a base da viga fica alinhada com a face superior da laje;
- O segundo procedimento consiste em acertar o alinhamento da base da viga com a face inferior da laje. Assim, é aplicado um deslocamento em *z* (*z Offset Value*) negativo com o valor igual à espessura da laje.

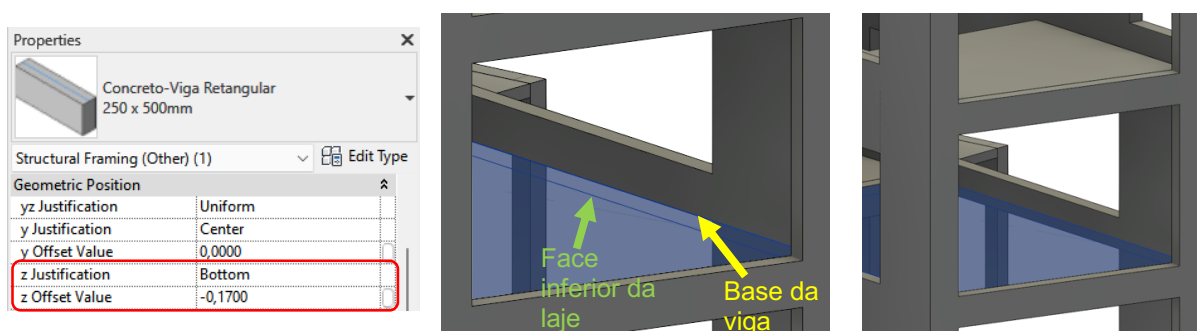


Figura 4.6 - Ajustes geométricos realizados na modelação de uma viga invertida.

Este ajuste é meramente para efeitos visuais, pois o comportamento de viga invertida não é transferido para o *software* de cálculo. Este aspeto será ilustrado posteriormente no capítulo 5.

#### 4.2.3. Lajes

A modelação das lajes, deve ser efetuada após todos os pilares, vigas, e paredes estarem totalmente modelados, e os respetivos nós analíticos devidamente conectados. Nesta fase da modelação é especialmente importante ter atenção ao modelo analítico das lajes. Frequentemente, estes elementos apresentam falhas analíticas ao serem gerados automaticamente pelo *software*, provocando desconexões analíticas e/ou conexões incorretas.

A forma como é modelada a componente geométrica das lajes, é um dos fatores frequentes de origem de falhas. Na modelação geométrica os limites das lajes são definidos até à face lateral interior das vigas, para que não haja sobreposição de elementos. Nalguns casos o *Revit* identifica bem os limites analíticos e prolonga corretamente o modelo analítico até ao centro analítico das vigas. Quando tal situação não acontece o cenário é o apresentado na Figura 4.7, onde os limites analíticos de duas lajes não são coincidentes. Por conseguinte, é necessário proceder a ajustes manuais, *Analytical Adjust*, do modelo analítico, corrigindo a posição dos nós analíticos.

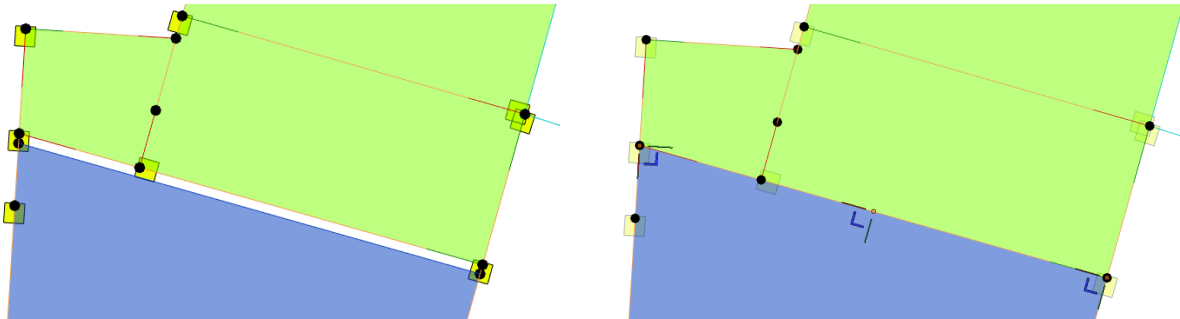
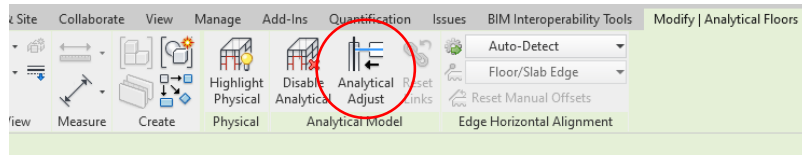


Figura 4.7 - Opção *Analytical Adjust*; Laje antes e depois de ajustada.

#### 4.2.4. Cobertura

O software *Revit* disponibiliza diversas opções para a modelação de coberturas com um carácter arquitetónico e não estrutural, pois a modelação de lajes inclinadas ainda apresenta limitações. O principal problema relativamente à modelação da laje de cobertura está relacionado com o modelo analítico. Apesar de se conseguir uma representação geométrica aceitável, é extremamente difícil que o modelo analítico seja ligado corretamente (Figura 4.8).

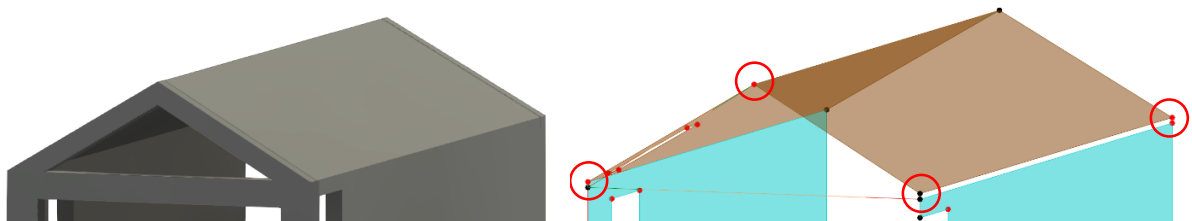


Figura 4.8 - Modelo físico da cobertura e nós desconectados no modelo analítico.

As opções de ajuste analítico de lajes, fornecidas pelo *Revit*, não são suficientes, uma vez que só permitem ajustes no plano geométrico da laje. Esta limitação impossibilita a modelação correta. Considerando as dificuldades verificadas, a laje de cobertura não foi modelada no *Revit*, como elemento estrutural. Foi, no entanto, modelada, posteriormente, no programa de cálculo *Robot*. Esta decisão teve por objetivo minimizar a possibilidade da ocorrência de erros na transferência *Revit/Robot*, deixando o modelo analítico o mais simples e consistente possível.

#### 4.2.5. Escada

No software *Revit*, a modelação da escada é apenas representada como uma componente arquitetónica. Ou seja, as escadas não são consideradas como elementos estruturais e a sua modelação não gera um elemento analítico. No presente estudo, foi efetuada uma análise estrutural

independente das escadas. No programa de cálculo, o resultado das reações de apoio, como cargas lineares, foi considerada no modelo analítico global.

O modelo analítico das escadas podia também ser considerado através da modelação de lajes inclinadas. Esta opção não foi aplicada para evitar que estes elementos absorvessem forças horizontais resultantes da ação sísmica. Comportamento que não era desejado para as lajes de escada.

#### 4.2.6. Sapatas

Como referido no capítulo 3, as sapatas não tinham sido ainda modeladas. No *Revit*, foram consideradas como apoios. Posteriormente, devem assumir dimensões para que se possa proceder à respetiva pormenorização de armaduras, de acordo com o resultado de cálculo, a efetuar no Robot. A colocação de uma sapata geométrica não dispensa a colocação de uma sapata analítica associada às condições de apoio pretendidas.

As condições de apoio devem ser estabelecidas no modelo analítico, através de restrições dos movimentos de translação e rotação. O *software* dispõe de alguns apoios *standard*, mas o utilizador pode criar outros tipos, alterando as restrições de movimento, assim como adicionar molas elásticas nas diferentes direções (Figura 4.9). Inicialmente, foram colocadas sapatas com condições de apoio do tipo encastrado, que serviram na análise dos momentos resultantes nas sapatas. Posteriormente, com a informação obtida, procedeu-se ao dimensionamento das vigas de fundação e os encastramentos foram alterados por apoios simplesmente apoiados.

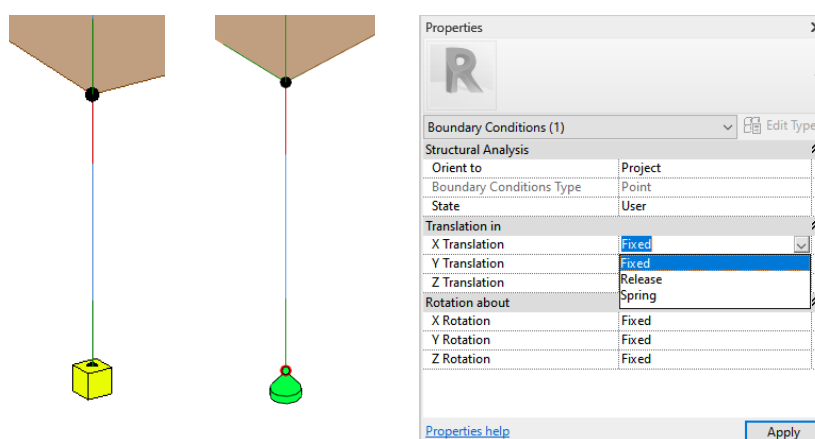


Figura 4.9 - Apoio encastrado e simplesmente apoiado e opções de condições de apoio.

### 4.3. Verificação do modelo analítico

A modelação geométrica deve ser sempre acompanhada pelo modelo analítico, que vai sendo gerado automaticamente pelo *software*, de forma a poderem ser detetados erros durante a sua definição. Estes erros podem ocorrer quando, por exemplo, os limites geométricos dos elementos não coincidem com os limites analíticos ou por falhas no programa onde deve ser feita a ligação analítica do elemento.

É conveniente verificar a consistência do modelo analítico antes do modelo ser transferido do *Revit* para o *Robot*, de forma a minimizar futuros problemas no *software* de cálculo. O modelo analítico pode ser visualizado individualmente através das vistas exclusivas deste, ou por sobreposição com o modelo geométrico (Figuras 4.10).

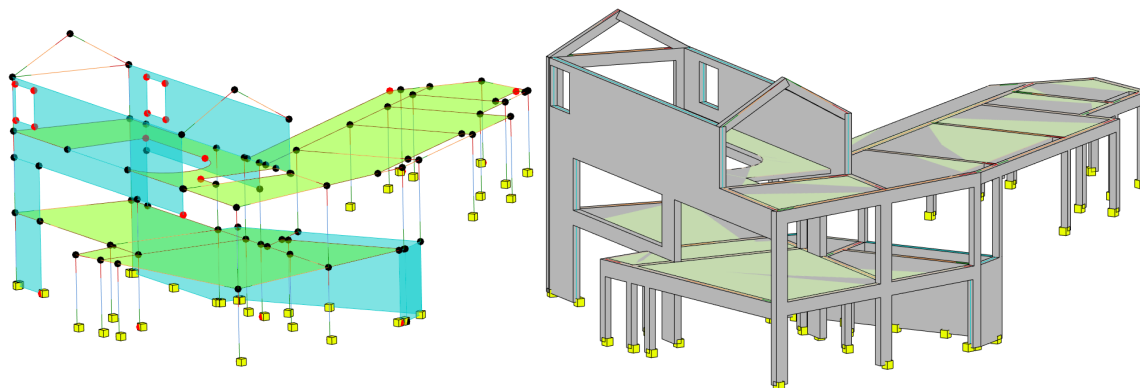


Figura 4.10 - Perspetivas do modelo analítico no *Revit*.

Existem algumas ferramentas que facilitam a deteção de problemas no modelo analítico. Uma das funcionalidades utilizadas, consistiu na aplicação de um filtro visual, para a deteção de nós analíticos não ligados (Figura 4.11). O filtro permite, entre várias opções, realçar os nós desconectados mudando a sua cor para uma distinta, permitindo visualmente a sua identificação.

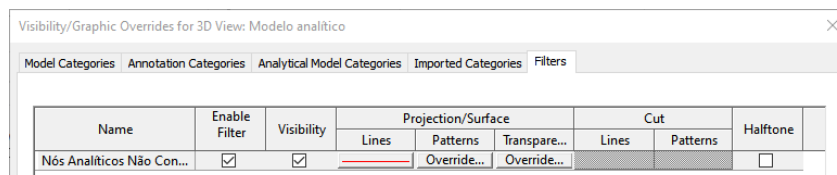


Figura 4.11 - Filtro de auxílio à deteção de nós não ligados.

Na Figura 4.12 é perceptível a vantagem da utilização deste filtro. No modelo analítico sem o filtro ligado, à esquerda na figura, e com o filtro aplicado, à direita, onde são visualizados os nós não ligados representados por uma cor vermelha.



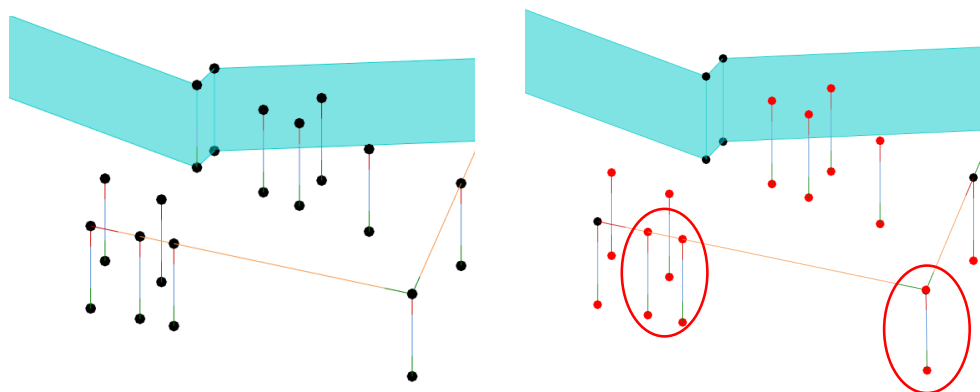


Figura 4.12 - Visualização do modelo analítico antes e depois da aplicação do filtro “Nós Analíticos Não Ligados”.

As lajes analíticas, são elementos que dificultam a percepção visual dos outros elementos. Estas apresentam uma cor acastanhada opaca, que frequentemente se sobrepõe à representação analítica dos outros elementos (Figura 4.13). De forma a reduzir esse inconveniente, a sua representação foi alterada, nas configurações visuais do modelo (Figura 4.14), facilitando a detecção visual de erros no modelo analítico.

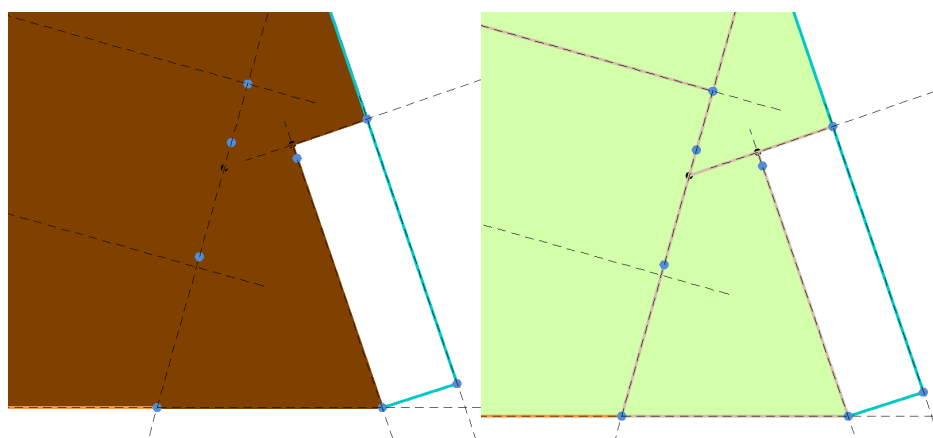


Figura 4.13 - Modelo analítico das lajes.

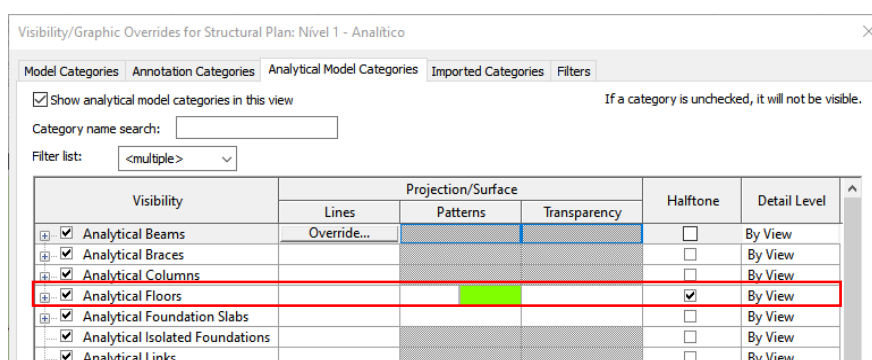


Figura 4.14 - Opções de visualização adotadas no modelo analítico das lajes.



## 5. Análise e dimensionamento estrutural

Neste capítulo, é analisada a transferência do modelo estrutural, do *software Revit* para o programa de cálculo *Robot*. Efetuada a transferência, são executados alguns procedimentos para verificar se o modelo foi corretamente transferido, identificando erros e omissões de informação. Após o modelo estrutural estar devidamente ajustado no *Robot*, e estarem definidas as ações atuantes, é realizada uma análise estrutural com a finalidade de obter os esforços resultantes e as deformadas da estrutura. É também avaliada a necessidade de verificar o pré-dimensionamento para as secções transversais ou espessuras dos elementos estruturais. Por fim, é efetuado o dimensionamento das armaduras e representada a sua pormenorização em alguns dos elementos, ainda no *Robot*.

### 5.1. Transferência *Revit/Robot*

A transferência do modelo BIM de estruturas, entre os dois sistemas de base BIM, foi efetuada por recurso ao *plug-in Revit/Robot*, através da opção de integração direta, *Direct integration* (Figura 5.1). Esta opção, possibilita a rápida transferência bidirecional de informação, quando os programas estão simultaneamente abertos. As opções de envio e atualização do modelo são idênticas em ambos os sistemas (Figura 5.1):

- No *Revit*, é possível enviar o modelo através da opção *Send model*, ou atualizar o modelo, inicialmente criado no *Revit*, através de *Update model*, assim como também transferir os resultados obtidos na análise estrutural, *Update model and results*;
- No *Robot*, o modelo, após análise estrutural, os resultados podem ser enviados para o *Revit* através de *Send model* e *Send model and results*, ou o modelo *Robot* pode ser também atualizado *Update model*.

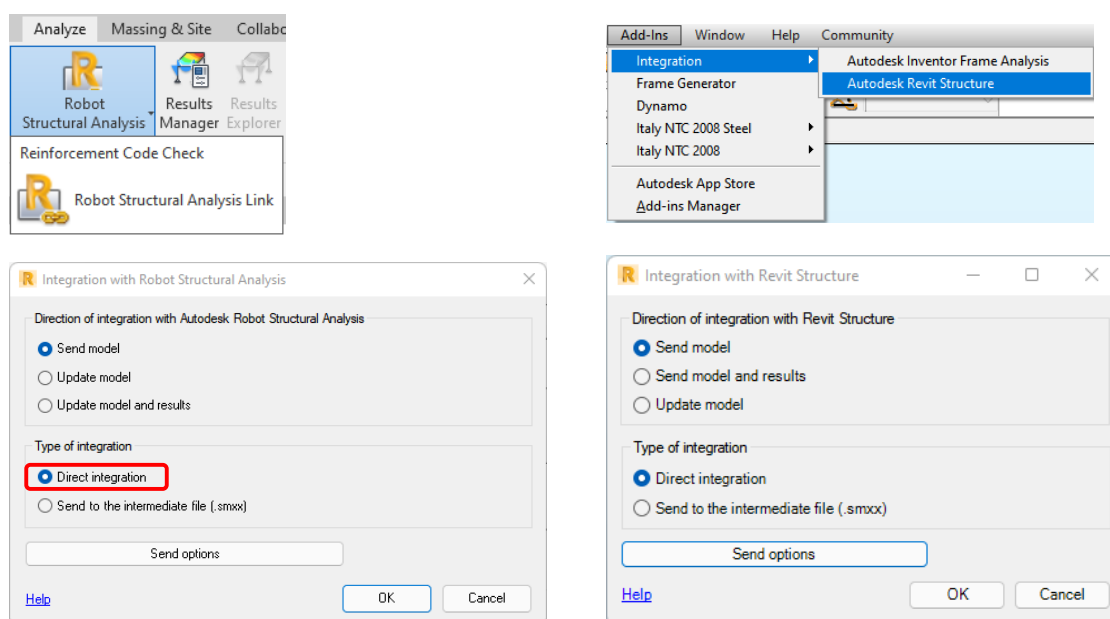


Figura 5.1 - Opções de transferência no *Revit* e no *Robot*.

As transferências de modelos e as atualizações podem ser totais ou parciais (Figura 5.2), mas é aconselhado que as atualizações ao modelo sejam efetuadas de uma forma parcial, por seleção do grupo de elementos que se pretende manipular. Deste modo, pode ser aplicado um maior controlo na transferência e, consequentemente, facilitar a deteção de erros que possam surgir.

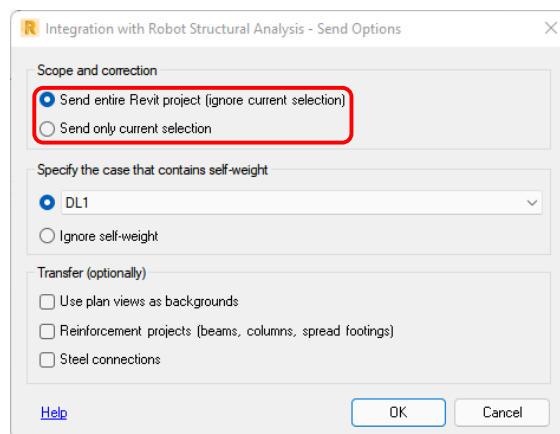


Figura 5.2 - Opções específicas de envio e atualização do modelo.

Efetuada a transferência do caso de estudo do *Revit* para o *Robot*, não foi detetada nenhuma irregularidade no relatório da transferência apresentado pelo programa, através da lista de avisos do *Revit*, *Warning List* (Figura 5.3). Contudo, existem alguns aspetos negativos a considerar:

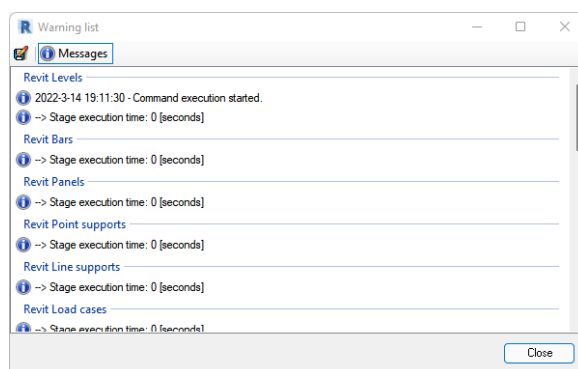


Figura 5.3 - Lista de avisos, após a transferência *Revit/Robot*.

- Foi verificado que o posicionamento e as dimensões das secções dos elementos analíticos estão de acordo com a modelação *Revit*, mas a informação relativa à excentricidade geométrica não é transferida;
- Os alinhamentos do modelo estão também em falta, apesar dos níveis serem transferidos corretamente.

## 5.2. Correção de inconsistências

Como referido, algumas das falhas existentes no modelo analítico não são inicialmente detetadas no relatório da transferência, pois, o relatório simplesmente informa o utilizador se, por exemplo, os

elementos e os materiais foram transferidos corretamente. De forma a confirmar se o modelo não apresenta erros de consistência, foram realizadas posteriormente algumas verificações:

- Após a transferência, e ainda sem que tenha sido realizado qualquer tipo de ação no *software* de cálculo, foi aplicada sobre o modelo transposto, a opção de *Structure verification*. Nesta verificação o *software* detetou alguns nós isolados, *Isolated Nodes* (Figura 5.4). Em consequência, foi efetuada a remoção dos nós identificados, de forma a eliminar alguma influência indesejada no processo de análise;

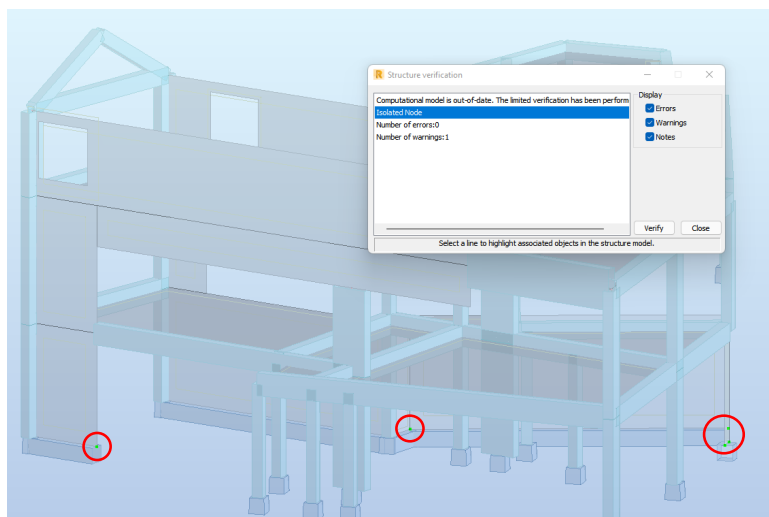


Figura 5.4 - Nós isolados detetados no *Robot*.

- Com o objetivo de perceber se o modelo de cálculo se comporta como esperado, foi efetuado um primeiro cálculo da estrutura, considerando apenas o seu peso próprio. A ausência das restantes cargas não influencia a criação das malhas de elementos finitos pelo *software*. Após o cálculo foram identificadas algumas inconsistências identificadas como *Rigid Links*, ou seja, o *software* criou ligações rígidas entre nós que não se intersestavam corretamente e nas zonas onde as malhas de elementos finitos não eram coerentes (Figura 5.5).

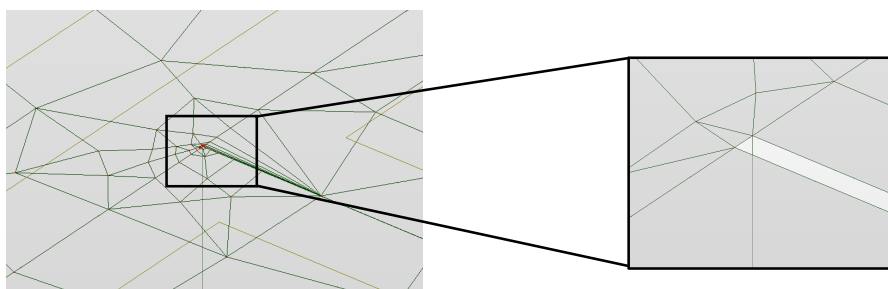


Figura 5.5 - Zona incoerente na malha de elementos finitos.

Nesta fase, antes de se prosseguir com a análise estrutural completa no *Robot*, foi efetuado sobre o modelo inicial, novamente no *Revit*, a correção do modelo. Assim, foi alterado o modelo no *Revit*, considerando que ainda não tinham sido efetuadas alterações relevantes no *Robot*, minimizando eventuais problemas de interoperabilidade numa fase inicial. O modelo analítico no *Revit* foi ajustado

nas zonas onde tinham sido identificados esses problemas. O modelo analítico corrigido foi novamente transferido para o *Robot*:

- Seguidamente, voltando a correr o programa de cálculo, este apenas exibiu um aviso sobre as condições de apoio referindo que alguns nós não são compatíveis (Figura 5.6). Face a este aviso, foram retirados e aplicados novos apoios nos nós identificados, resolvendo assim o problema.

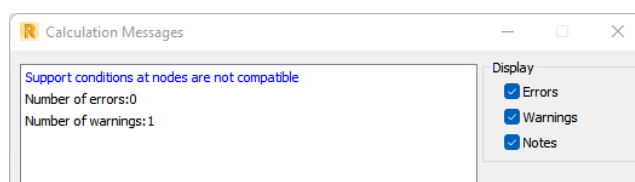


Figura 5.6 - Aviso de incompatibilidade das condições de apoio em alguns nós.

### 5.3. Definição de cargas

No *software Robot*, após a verificação da consistência do modelo foram aplicadas as ações regulamentares e efetuada a análise estrutural.

#### 5.3.1. Cargas permanentes e sobrecargas

As cargas atuantes a considerar são as de carácter permanente e, em função da utilização do edifício, é selecionado o tipo de sobrecargas a aplicar (Tabela 1):

- Para as cargas permanentes (CP) foi considerado o peso próprio (PP), que é automaticamente definido e aplicado pelo programa de cálculo, mais as restantes cargas permanentes (RCP), como, por exemplo, as paredes divisórias e os revestimentos do pavimento;
- As sobrecargas (SC) consideradas foram definidas de acordo com o EC 1, NP EN 1991-1-1 enquadrando o caso de estudo na categoria A com o tipo de utilização “Atividades domésticas e residenciais”;
- A cobertura inclinada, não sendo acessível, pode ser incluída na categoria H, e o terraço foi considerado de categoria I, adotando um valor de sobrecarga igual ao dos pisos;
- Para as restantes cargas permanentes, foi aplicado um valor conservativo, igual a  $1,25 \text{ kN/m}^2$ , nos pisos, na varanda e no terraço, de forma a contabilizar o peso dos revestimentos. Foi adicionado um valor de  $2 \text{ kN/m}^2$  nos pisos, para considerar o peso das paredes divisórias, e um valor de  $0,5 \text{ kN/m}^2$  na cobertura não acessível. No terraço também se aplicou uma carga permanente de  $2 \text{ kN/m}^2$ , uma vez que está previsto no projeto a colocação de uma camada de solo com  $0,10 \text{ m}$  de espessura;
- No caso da sobrecarga da varanda, foi aplicada a regra na qual se deve adotar um valor mínimo de  $5 \text{ kN/m}^2$  numa faixa de  $1 \text{ m}$  de largura adjacente ao parapeito, mas como a varanda não apresenta uma largura muito superior a  $1 \text{ m}$ , foi aplicada a sobrecarga em toda a sua área;

- Nas paredes de contenção do solo, no piso inferior, foi adotado uma carga triangular com um valor máximo conservativo de  $20 \text{ kN/m}$ , correspondendo a um solo com um peso volúmico de  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$  e um ângulo de atrito de  $\phi = 30^\circ$ .

Tabela 1 - Valores das cargas a aplicar

	Cargas Permanentes	Sobrecargas
Pisos	PP + $1,25 \text{ kN/m}^2$ + $2 \text{ kN/m}^2$	$2 \text{ kN/m}^2$
Varanda	PP + $1,25 \text{ kN/m}^2$	$5 \text{ kN/m}^2$
Terraço	PP + $1,25 \text{ kN/m}^2$ + $2 \text{ kN/m}^2$	$2 \text{ kN/m}^2$
Cobertura não acessível	PP + $0,5 \text{ kN/m}^2$	$0,4 \text{ kN/m}^2$
Paredes de contenção	$20 \text{ kN/m}$ (Carga triangular)	-----

### 5.3.2. Ação sísmica

A ação sísmica, pode ser considerada no *Robot*, através de distintos tipos de análise. No caso de estudo, considerando que o edifício apresenta uma geometria irregular e por se localizar numa zona de elevada sismicidade, foi considerada uma análise modal por espectro de resposta. Em alternativa, poderia ter sido considerada a análise pelo método das forças laterais equivalentes. Previamente à análise modal ao edifício e de forma a satisfazer exigências requeridas no cálculo, foram ajustados os valores de dois parâmetros (Figura 5.7):

- No parâmetro *Analysis mode*, foi alterada o valor *Modal* para *Seismic*, permitindo que, durante a análise modal da estrutura, fossem selecionados os modos de vibração mais relevantes para a análise sísmica, ou seja os que apresentaram uma maior percentagem de participação de massa;
- No parâmetro *Limits*, o valor *Inactive* foi alterado para *Percent of mass participation* com o valor de 90%, de forma a obrigar a análise a obter o número necessário de modos de vibração para alcançar uma percentagem de participação de massa superior a 90%.

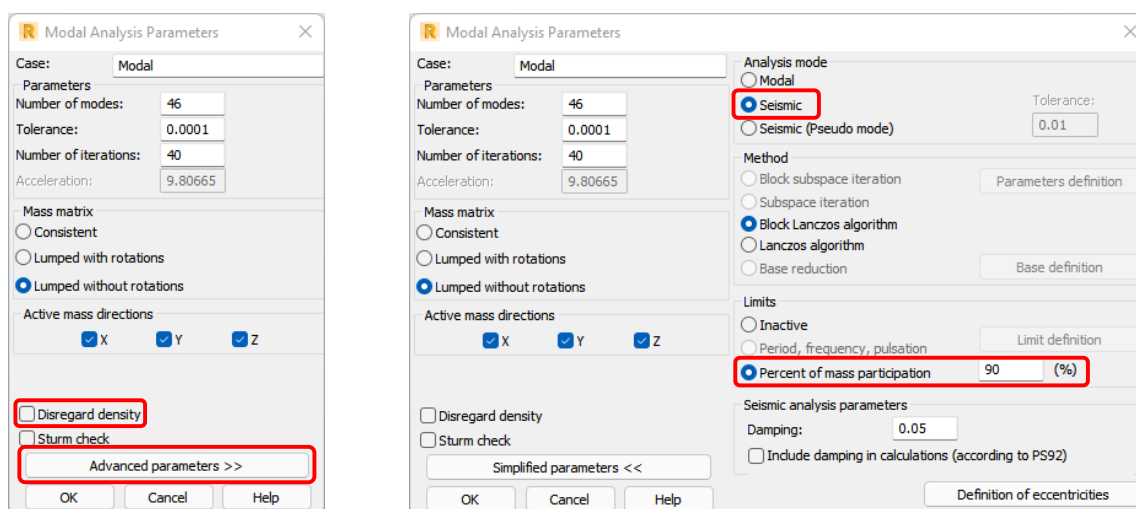


Figura 5.7 - Parâmetros adotados na análise modal no *Robot*.

No *software Robot*, foi então efetuada a análise modal ao edifício, seguindo o procedimento *Analysis > Analysis Types > New > Modal*. No processo foram necessários obter 46 modos de vibração, para se atingir uma percentagem superior a 90%. A etapa seguinte, foi determinar as massas associadas às cargas permanentes e à parcela da sobrecarga (Figura 5.8):

- No caso do peso próprio (PP), se a opção “*Disregard density*”, apresentada na Figura 5.7, for desativada, e se o PP for considerado num caso de carga separado das restantes cargas, o programa automaticamente considera a massa.
- Em relação às restantes cargas permanentes (RCP) e às sobrecargas (SC), seguindo as indicações presentes no ponto 4.2.4, do Eurocódigo 8 - Parte 1, ao efetuar a conversão das cargas para massas foram aplicados os respetivos coeficientes, sendo para RCP, o coeficiente é 1.00, e para SC, é 0.30 (Figura 5.8).

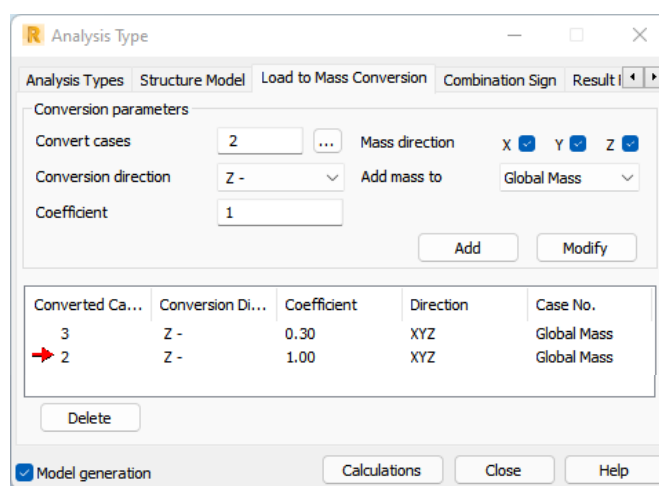


Figura 5.8 - Conversão das cargas atuantes em massas.

Finalizadas as etapas de preparação, é aplicada a análise sísmica através da opção *Seismic* e indicada a norma de cálculo pretendida. Foi selecionada a normativa europeia *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, em alternativa à Norma Portuguesa NP ENV 1998-1-1 de 2000, disponível no *software*, visto que esta já não está em vigor (Figura 5.9). A norma selecionada é mais generalista, ainda assim os parâmetros predefinidos, como o tipo de solo, seguem a Norma Portuguesa atual:

- O valor da aceleração do solo ( $a_g$ ) de  $2.5 \text{ m/s}^2$ , para o tipo de sismo predominante nos Açores (sismo tipo 2), foi obtido pela Norma Portuguesa NP EN 1998-1 de 2010.



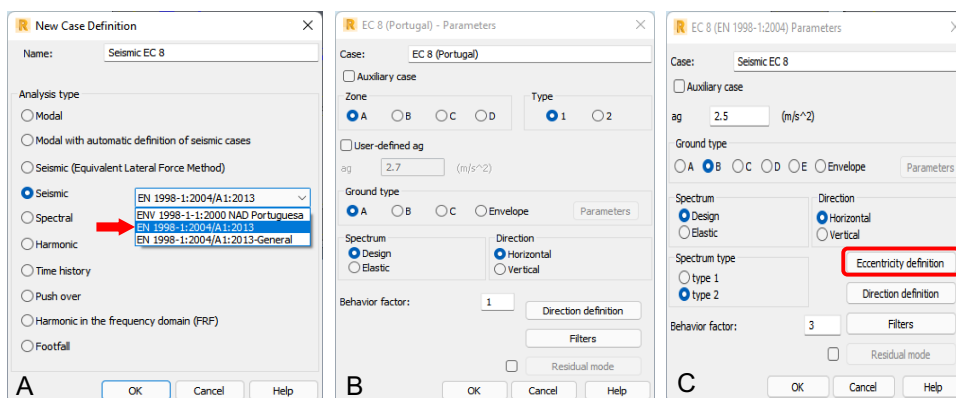


Figura 5.9 - Normativa selecionada (A); Norma Portuguesa NP ENV 1998-1-1 de 2000 (B); Valores adotados para a análise sísmica (C).

Os efeitos da ação sísmica foram calculados considerando combinações lineares, do tipo:

$$\begin{aligned}
 &E_x \text{ "+" } 0,3 E_y \text{ "+" } 0,3 E_z \\
 &0,3 E_x \text{ "+" } E_y \text{ "+" } 0,3 E_z \\
 &0,3 E_x \text{ "+" } 0,3 E_y \text{ "+" } E_z
 \end{aligned}$$

Estas combinações são selecionadas no momento da definição da ação sísmica em *Direction definition* (Figuras 5.9 e 5.10). Os efeitos da componente vertical foram desprezados, de acordo o ponto 4.3.3.5.2 Componente vertical da ação sísmica, do Eurocódigo 8 - Parte 1, sendo apenas relevantes os termos  $E_x$  e  $E_y$  (Figura 5.10).

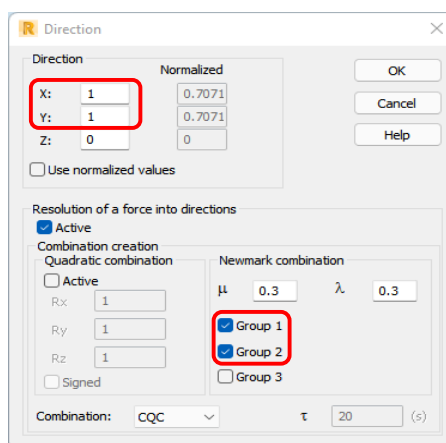


Figura 5.10 - Combinações lineares da ação sísmicas nas direções X e Y

Nesta fase, são apenas consideradas metade das combinações quadráticas definidas inicialmente (Figura 5.11), a outra parte é gerada durante a criação automática das combinações de código, ou podem ser criadas manualmente pelo utilizador.

7	$1 * X \ 0.3 * Y$	Linear Combination
8	$1 * X \ -0.3 * Y$	Linear Combination
9	$0.3 * X \ 1 * Y$	Linear Combination
10	$0.3 * X \ -1 * Y$	Linear Combination

Figura 5.11 - Combinações lineares criadas durante a definição da ação sísmica

### 5.3.3. Combinações de ações

O programa de cálculo permite gerar automaticamente todas as combinações de ações necessárias (Figura 5.12), a partir das ações e cargas definidas, de acordo com a norma de cálculo escolhida:

- As combinações relativas à ação sísmica devem ser efetuadas entre as combinações lineares apresentadas (Figura 5.11), e não entre as componentes isoladas X e Y. Estas componentes devem ser removidas dos casos ativos para as combinações de código (Figura 5.12).
- Efetuadas as alterações necessárias, o programa cria combinações para o Estado Limite Último (ULS), para o Estado Limite de Serviço (SLS) e para o Estado Limite de Acidente (ACC) apenas se considerou a ação sísmica (SEI) (Figura 5.13).

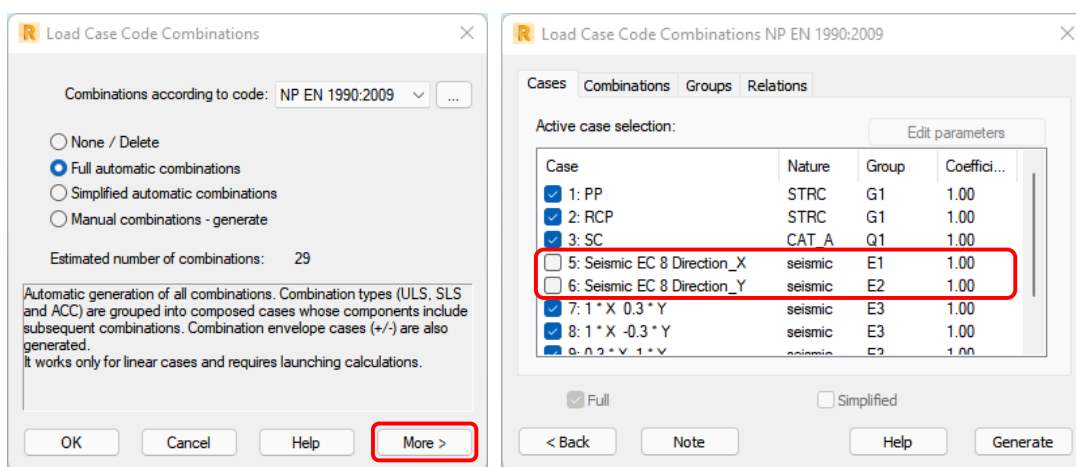


Figura 5.12 – Definição dos parâmetros para as combinações automáticas de ações

Combinations/Comb.	Definition	ACC:SEI/ 3	RCP*1.00 + SC*0.30 + PP*1.00 + SEL_X5*0.30 + SEL_Y6*1.00
ACC:SEI/ 4		RCP*1.00 + SC*0.30 + PP*1.00 + SEL_X5*0.30 + SEL_Y6*1.00	
ACC:SEI/ 5		RCP*1.00 + PP*1.00	
ACC:SEI/ 6		RCP*1.00 + PP*1.00 + SEL_X5*1.00 + SEL_Y6*0.30	
ACC:SEI/ 7		RCP*1.00 + PP*1.00 + SEL_X5*1.00 + SEL_Y6*0.30	
ACC:SEI/ 8		RCP*1.00 + PP*1.00 + SEL_X5*0.30 + SEL_Y6*1.00	
ACC:SEI/ 9		RCP*1.00 + PP*1.00 + SEL_X5*0.30 + SEL_Y6*1.00	
ACC:SEI/ 10		RCP*1.00 + SC*0.30 + PP*1.00 + SEL_X5*1.00 + SEL_Y6*0.30	
ACC:SEI/ 11		RCP*1.00 + SC*0.30 + PP*1.00 + SEL_X5*1.00 + SEL_Y6*0.30	
ACC:SEI/ 12		RCP*1.00 + SC*0.30 + PP*1.00 + SEL_X5*0.30 + SEL_Y6*1.00	
ACC:SEI/ 13		RCP*1.00 + SC*0.30 + PP*1.00 + SEL_X5*0.30 + SEL_Y6*1.00	
ACC:SEI/ 14		RCP*1.00 + PP*1.00 + SEL_X5*1.00 + SEL_Y6*0.30	
ACC:SEI/ 15		RCP*1.00 + PP*1.00 + SEL_X5*1.00 + SEL_Y6*0.30	
ACC:SEI/ 16		RCP*1.00 + PP*1.00 + SEL_X5*0.30 + SEL_Y6*1.00	
ACC:SEI/ 17		RCP*1.00 + PP*1.00 + SEL_X5*0.30 + SEL_Y6*1.00	
ACC:SEISHEAR / 18		RCP*1.00 + SC*0.30 + PP*1.00	
ACC:SEISHEAR / 19		RCP*1.00 + PP*1.00	

Figura 5.13 - Combinações de ações geradas pelo Robot

### 5.3.4. Resultados da análise

O Robot permite efetuar uma análise estrutural completa da estrutura do edifício, disponibilizando diagramas de esforços, reações, deformadas, mapas de esforços, entre outras opções. A informação pode ser apresentada graficamente ou através de tabelas. A visualização dos resultados pode ser global (Figura 5.14), ou mais detalhada, permitindo analisar os elementos individualmente, *Detailed Analysis* (Figura 5.15). É possível também apresentar os resultados de cada caso de carga

separadamente, ou exibir as envolventes dos esforços segundo as combinações definidas, facilitando a identificação dos pontos críticos. Estes elementos podem ser transferidos para o *Revit*, e permitir a sua consulta.

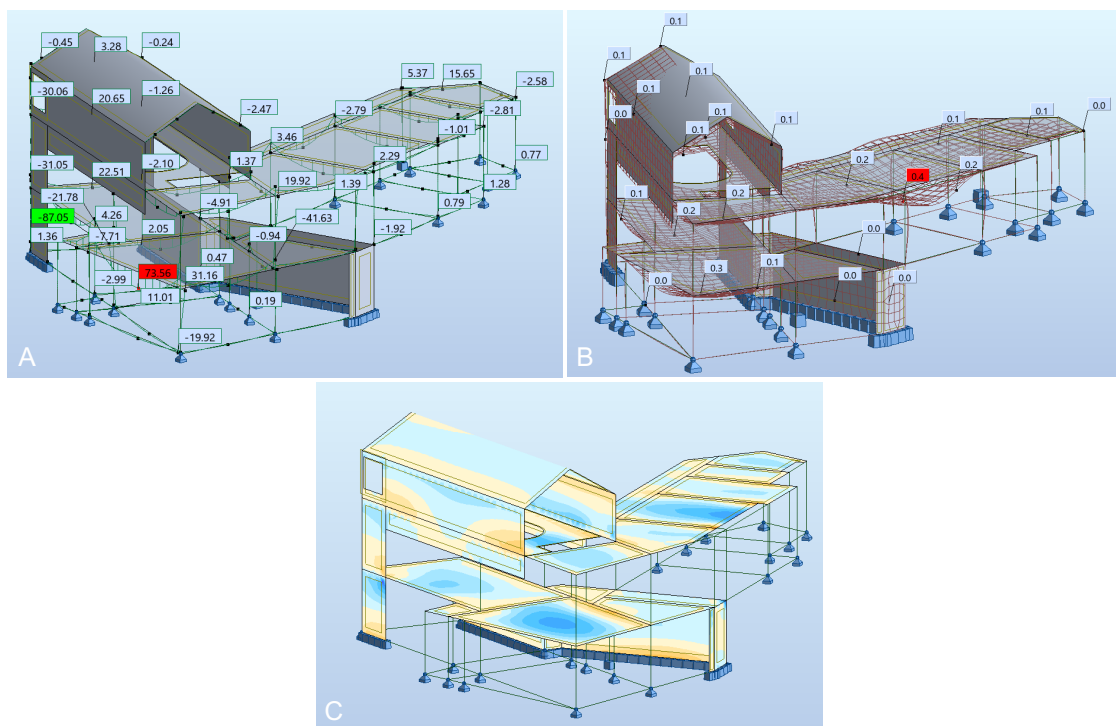


Figura 5.14 - Diagrama de momentos  $M_y$  (A), deformada da combinação SLS+ (envolvente superior) (B) e mapa de momentos  $M_{xx}$  (envolvente inferior) (C).

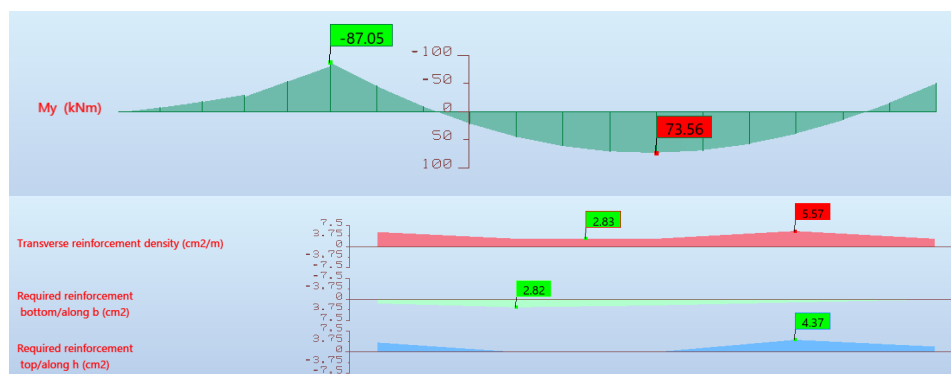


Figura 5.15 - Análise individual da viga do alinhamento A: momento  $M_y$  e áreas de armadura necessária.

#### 5.4. Pormenorização de armaduras

Efetuada a análise estrutural, foram calculadas as armaduras para cada componente estrutural. O *software Robot*, com base nos resultados de esforços e comportamento da estrutura, calcula automaticamente a armadura necessária, satisfazendo os requisitos estabelecidos no Eurocódigo. Posteriormente, permite a obtenção dos correspondentes desenhos técnicos de pormenorização de

armaduras. A determinação das armaduras dos elementos, à exceção das armaduras das lajes e paredes, é efetuada através do separador *Provided Reinforcement of RC Elements* (Figura 5.16).

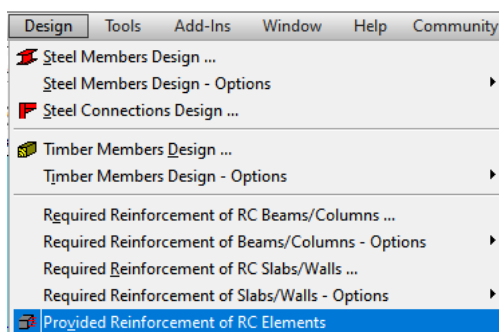


Figura 5.16 - Opções de dimensionamento de armaduras.

No dimensionamento das armaduras, alguns parâmetros devem ser definidos *à priori*, de forma a restringir as opções de armaduras que o programa pode utilizar. Estas definições permitem automatizar de um modo controlado, sujeito a parâmetros condicionantes, a seleção de diâmetros dos varões das armaduras e a sua distribuição, de acordo com as preferências do utilizador. Os procedimentos a seguir relativos à pormenorização de cada tipo de elemento, apresenta algumas diferenças.

#### 5.4.1. Fundações

O betão utilizado nas fundações é da classe C25/30. Os diâmetros dos varões, foram restringidos a diâmetros com uma utilização corrente em Portugal (Figura 5.17), e foram definidos alguns aspetos como o tipo de distribuição e os ângulos de amarração.

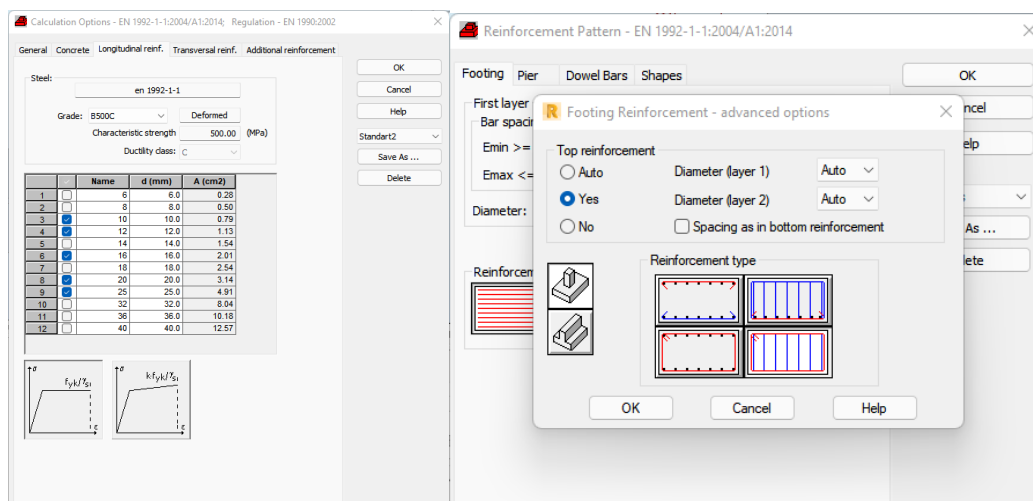


Figura 5.17 - Opções de cálculo do reforço das fundações.

No dimensionamento das fundações foi necessário definir a tensão resistente do solo, tendo sido atribuído o valor de  $0.25 \text{ MPa}$ . Para o correto dimensionamento e validação da pormenorização das armaduras foram consideradas, como exemplos, duas fundações distintas (Figura 5.18):

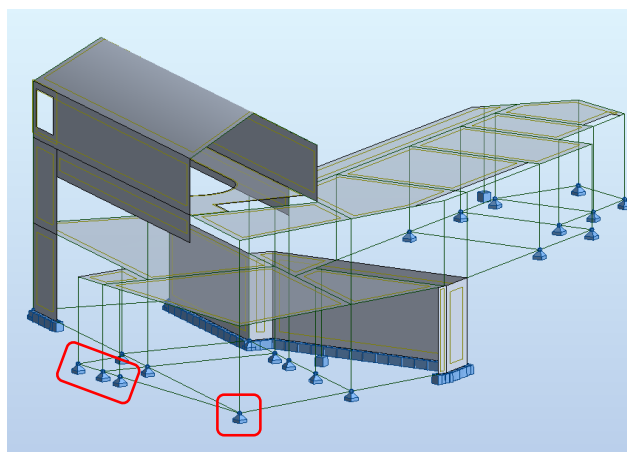


Figura 5.18 - Fundações selecionadas para dimensionamento e pormenorização de armaduras.

- A **sapata** isolada sob o pilar de canto localizado na interseção dos alinhamentos B-1, no limite do terreno, deve apresentar uma excentricidade em relação ao pilar que suporta. Inicialmente, o cálculo foi executado sem considerar qualquer excentricidade, de forma a obter uma estimativa dos valores da sua dimensão. De seguida, foram fixados valores considerados suficientes para a geometria da sapata e refeitos os cálculos. Contudo, com a geometria e a excentricidade definidas, o *software* alerta que não estava garantida a segurança para os momentos que atuam na sapata. Para reduzir a sua influência na sapata, os momentos foram transferidos para as vigas de fundação, alterando a percentagem que era absorvida em cada direção por estas (Figura 5.19). Distribuindo 90% dos momentos para as vigas de fundação, a sapata com as dimensões apresentadas na Figura 5.20, passou em todas as verificações de dimensionamento realizadas pelo *software*. A armadura principal calculada corresponde a varões de diâmetro  $\varnothing 10$  espaçados de 10 *cm*.

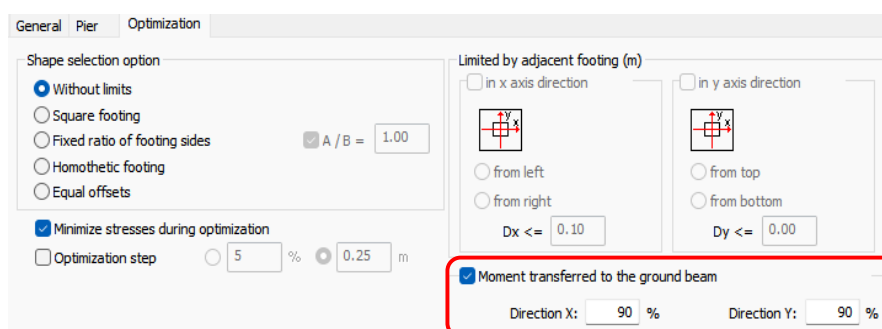


Figura 5.19 - Percentagem dos momentos absorvidos para as vigas de fundação.

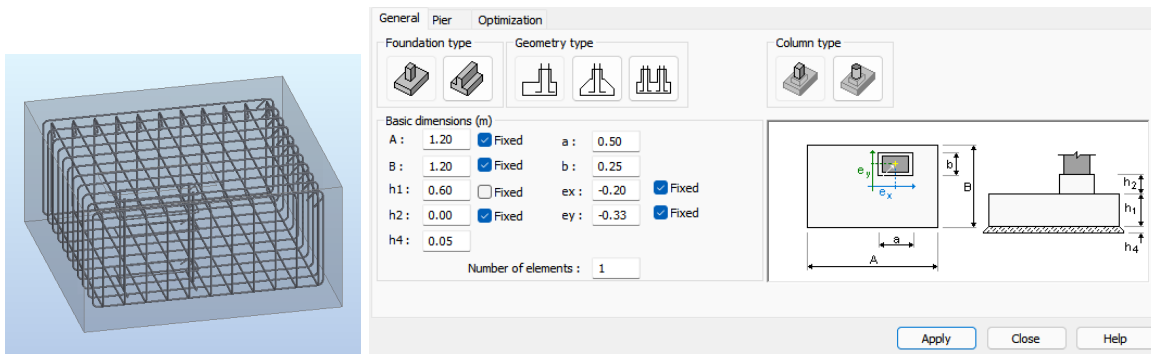


Figura 5.20 - Parâmetros e dimensões adotadas para a sapata isolada sob o pilar de canto.

- Para o **conjunto de sapatas isoladas**, apresentadas na Figura 5.18, pertencente ao alinhamento A, tinha sido considerada na análise uma única sapata suportando os três pilares, mas o *software* Robot limita a criação deste tipo de sapatas a conjuntos de apenas dois pilares. Ao selecionar os três apoios para serem dimensionados, o programa simplesmente dimensiona uma sapata igual para cada um, que satisfaça todos os requisitos. Esta automatização não tem em consideração a posição das fundações entre si, levando à sobreposição apresentada na Figura 5.21 (A). Tendo em conta as limitações, foram então dimensionadas duas sapatas distintas, uma contendo os dois pilares mais próximos, e outra com o terceiro pilar (Figura 5.21 (B)). No entanto, em termos de desenho de pormenorização final e de execução em obra os três pilares devem assentar numa única sapata. Esta manipulação no *software* de cálculo teve apenas como objetivo, calcular a geometria e armadura necessárias. Posteriormente, a união das duas sapatas terá de ser executada no *software* de modelação, *Revit*.

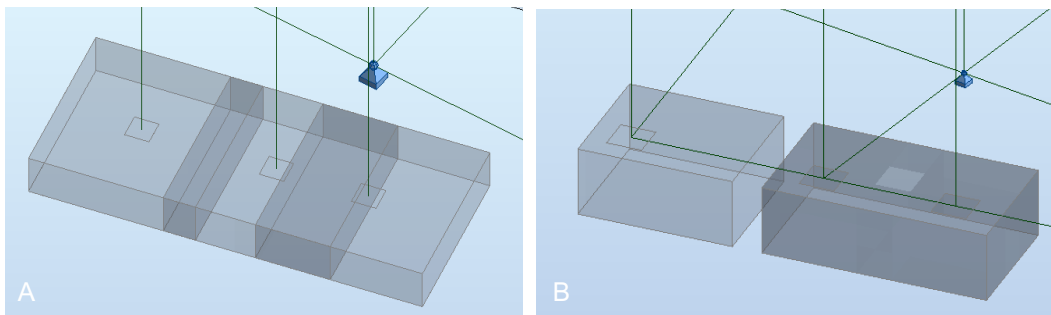


Figura 5.21 - Sobreposição geométrica das sapatas (A); Solução adotada (B).

#### 5.4.2. Pilares

Os pilares são elementos de fácil dimensionamento e que não apresentam grandes condicionantes por parte do *software* de cálculo. Foram definidos alguns parâmetros de controlo previamente ao cálculo das armaduras. Assim, foram selecionadas as armaduras a utilizar, métodos de cálculo, espaçamentos máximos e mínimos e aspetos relacionados com a disposição sísmica de armadura de acordo com o Eurocódigo 8, entre outros (Figura 5.22).

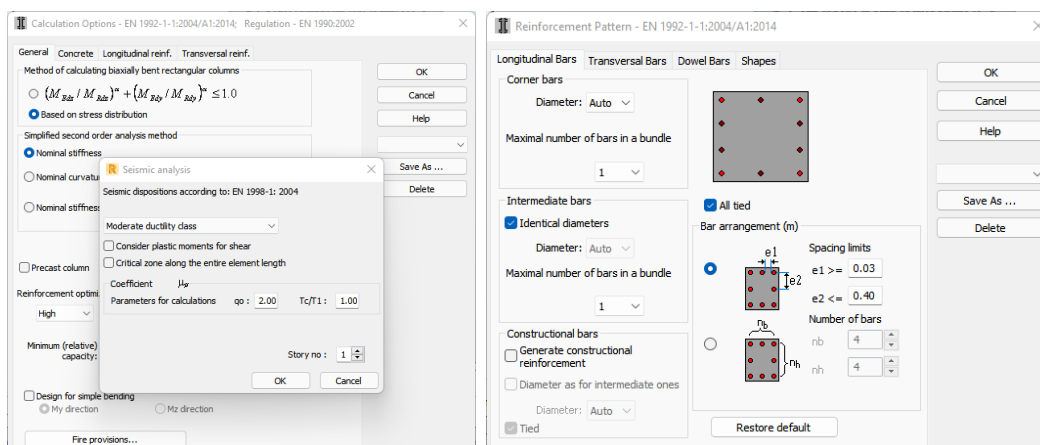


Figura 5.22 - Opções de cálculo e pormenorização de pilares.

- Como exemplo de determinação de armaduras de um pilar foi considerado o elemento identificado na Figura 5.23. A escolha de armaduras feita pelo *Robot* não foi a mais adequada, pois indicou um elevado número de varões e espaçamentos reduzidos. De forma a simplificar a escolha das armaduras, foram indicados varões de Ø20 para os cantos da secção e Ø12 para os varões intermédios. O tipo de disposição dos estribos foi também alterado, permitindo uma melhor organização e simplicidade da secção (Figura 5.23).

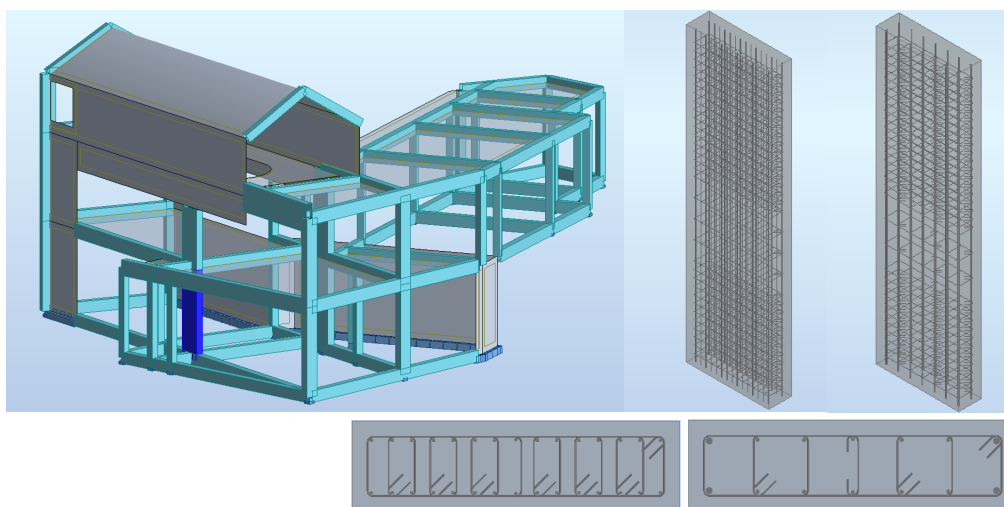


Figura 5.23 - Pilar em análise e soluções com armadura longitudinal de 30Ø10 e 4Ø20 + 10Ø12.

### 5.4.3. Vigas

O dimensionamento das vigas no *Robot*, é idêntico ao dimensionamento dos pilares. Os parâmetros a definir e a forma como o procedimento é realizado é semelhante, mudando apenas algumas opções exclusivas das vigas, como por exemplo, deformada admissível e comprimentos de ancoragem. Como ilustração foram seleccionadas três vigas, identificadas na Figura 5.24.

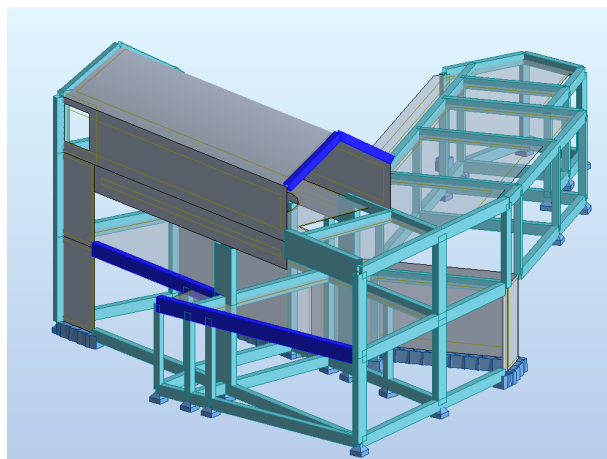


Figura 5.24 - Vigas selecionadas para dimensionamento e pormenorização de armaduras.

- Em relação à **viga contínua**, composta por um vão extenso e dois curtos, foram indicados os parâmetros pretendidos e uma primeira solução é apresentada automaticamente. Para as armaduras longitudinais principais, superior e inferior, foram atribuídos 3 varões de  $\varnothing 12$ , com um reforço de um varão de  $\varnothing 12$ , nas zonas a meio vão e sobre os apoios. Os estribos escolhidos foram do tipo duplo,  $\varnothing 6//0.20$  (Figura 5.25). Por simplificação, as armaduras foram alteradas, para 4 varões de  $\varnothing 12$  para a armadura longitudinal superior e inferior, e os estribos para  $\varnothing 6//0.15$ , nos dois vãos curtos, e para  $\varnothing 6//0.125$  no maior vão, onde o esforço transversal é superior.

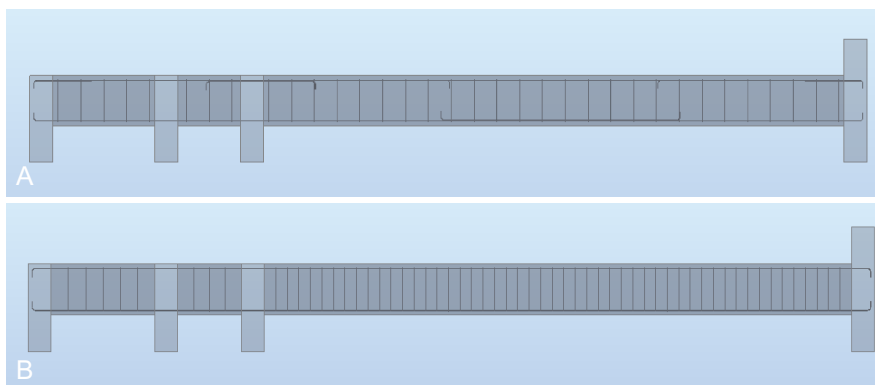


Figura 5.25 - Solução de pormenorização proposta pelo Robot (A); Solução adotada (B).

- No dimensionamento da **viga invertida**, o programa inicialmente não detetou a parede do lado esquerdo como apoio, apesar dos esforços calculados não serem zero nesse extremo (Figura 5.26). Contudo, o programa não apresentou nenhum aviso de alerta, referente ao facto da relação entre o momento resistente e o momento atuante, no apoio em falta, ser inferior a zero. Consequentemente, as armaduras não são prolongadas (Figura 5.26).



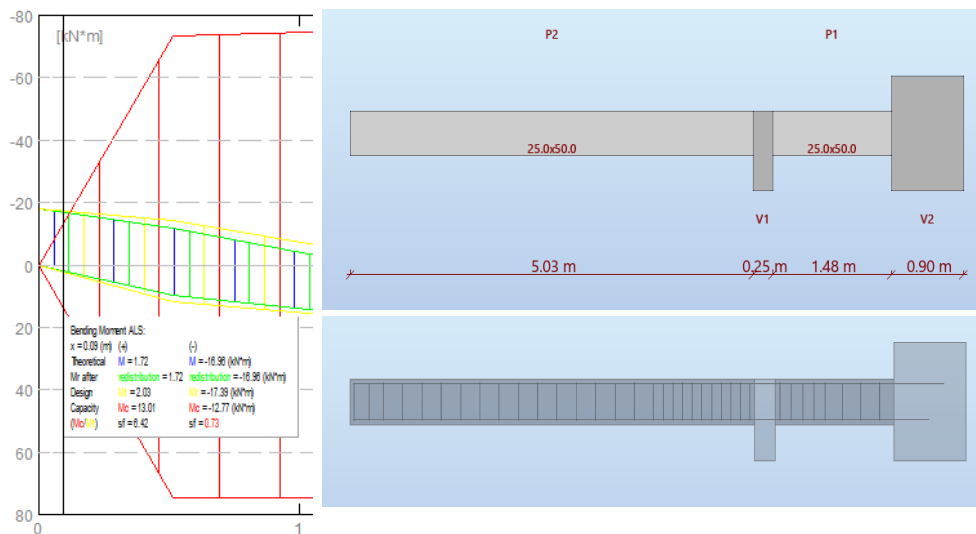


Figura 5.26 - Momentos resistente (vermelho) e atuante (amarelo) no apoio esquerdo da viga invertida e representação inicial.

De forma a contornar o inconveniente, ao ser efetuado o envio da viga para o separador de dimensionamento, na opção *Supports*, o nó 49 foi selecionado como apoio (Figura 5.27). Este nó corresponde à interseção do painel da parede com o painel da laje, mas está identificado como pertencente à laje. Considerando que, para a pormenorização das armaduras no *Robot*, é mais importante a dimensão e a posição do apoio, esta opção não acarretou nenhum problema. De seguida, para tornar o apoio mais próximo do real, o comprimento deste foi alterado para 1 m. Efetuada esta alteração, foi necessário mudar o comprimento do vão livre, por este ter diminuído de tamanho, devido ao aumento do comprimento do apoio (Figura 5.27). Após esta alteração a armadura calculada é prolongada para o apoio (Figura 5.28), e o momento resistente no apoio, já apresenta um valor correto.

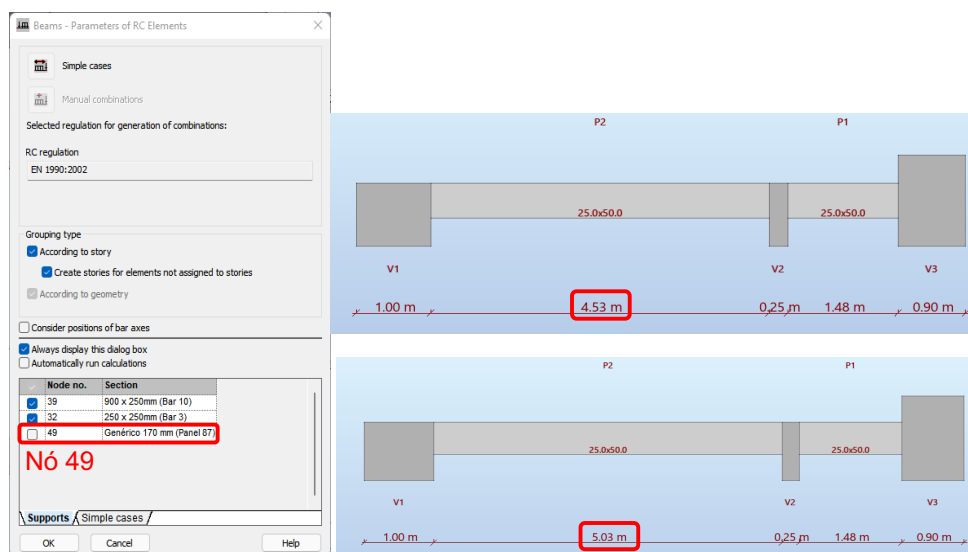


Figura 5.27 - Alterações efetuadas na viga invertida.

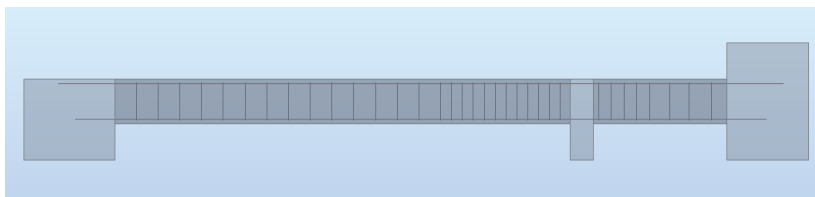


Figura 5.28 – Representação final após as alterações.

O principal objetivo deste segundo caso de pormenorização de armaduras é analisar as capacidades do programa para calcular as armaduras de suspensão para a viga invertida. Como mencionado no item 5.1., a excentricidade não é transferida do *Revit* para o *Robot*. Na tentativa de comunicar ao programa que se trata de uma viga invertida, foi aplicado um *Offset*, para posicionar a face inferior da viga alinhada com o analítico da laje. Este procedimento é efetuado através de *Geometry > Additional Attributes > Offsets* (Figura 5.29).

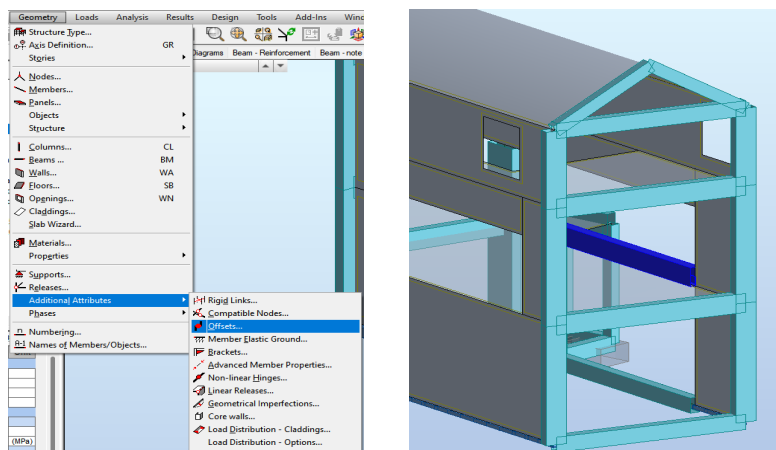


Figura 5.29 - Aplicação de um *Offset* à viga invertida.

Efetuada a operação de *Offset* e refeitos os cálculos, as armaduras geradas pelo programa, com ou sem a excentricidade, são exatamente iguais. Como conclusão, apesar do programa admitir definições relacionadas com armaduras de suspensão (Figura 5.30), o seu dimensionamento não funciona para elementos provenientes do modelo global, funcionando apenas para elementos criados diretamente no separador de dimensionamento, onde é possível definir as cargas aplicadas como suspensas (Figura 5.30), ao ser efetuada uma análise isolada.

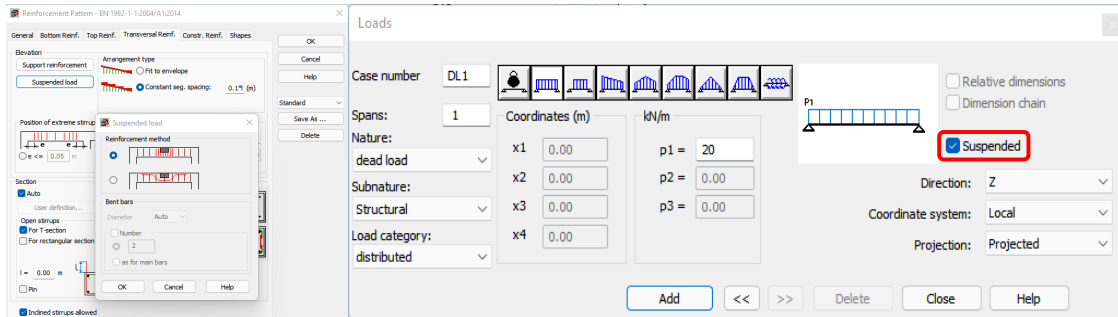


Figura 5.30 - Opções de pormenorização para armaduras de suspensão e definição de cargas suspensas numa análise isolada.

- Em relação às **vigas inclinadas** da cobertura, o *software* atribuiu as armaduras necessárias, mas apresenta alguma incorreção ao nível da pormenorização, originando erros nas verificações do Eurocódigo. Inicialmente, foram corrigidos os nós apresentados como apoios, pois, o programa identificou automaticamente como apoios vários nós da malha de elementos finitos da laje de cobertura, levando a uma representação incoerente (Figura 5.31). Ao serem selecionados apenas os apoios corretos, obteve-se a representação desejada (Figura 5.31).

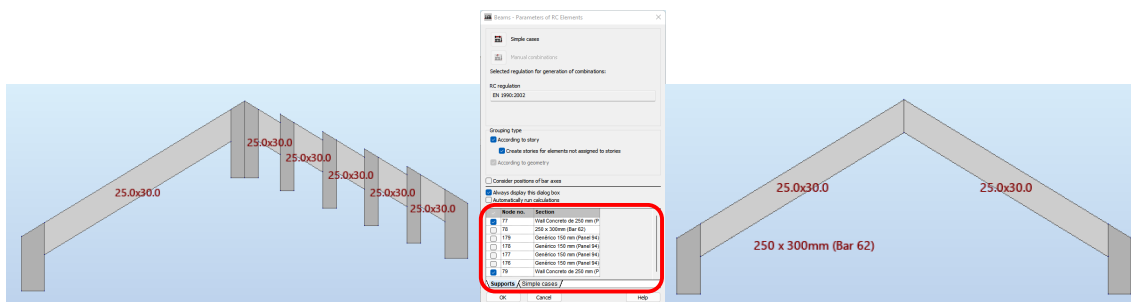


Figura 5.31 - Representação antes e depois de corrigidos os nós considerados como apoios.

Efetuada os cálculos das armaduras, os resultados atribuem, para a armadura superior e inferior,  $3\text{Ø}12$ , e para os estribos,  $\text{Ø}6//0.15$  (Figura 5.32). Apesar da escolha das armaduras não aparentar visualmente numa falha, vários erros foram indicados pelo programa (Figura 5.32). Os erros alertam para a inexistência de armadura inferior nos apoios, para resistir a momentos provenientes da ação sísmica. Avaliando os diagramas de momento é de fácil visualização a redução que é feita ao momento resistente junto aos apoios. A causa encontrada para este problema foi a ancoragem utilizada para as armaduras inferior. Alterada esta ancoragem com as armaduras para o interior da parede de betão, já permitiu ao programa contabilizar a armadura inferior no apoio (Figura 5.33).

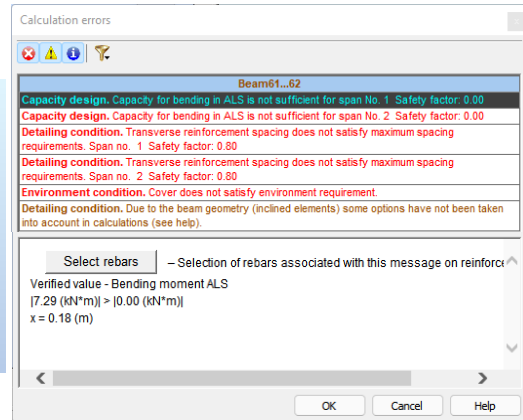
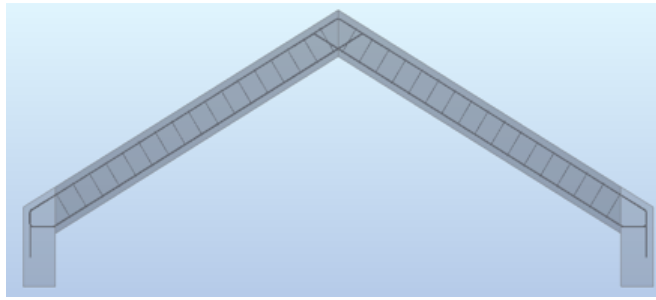


Figura 5.32 - Representação inicial e erros apresentados.

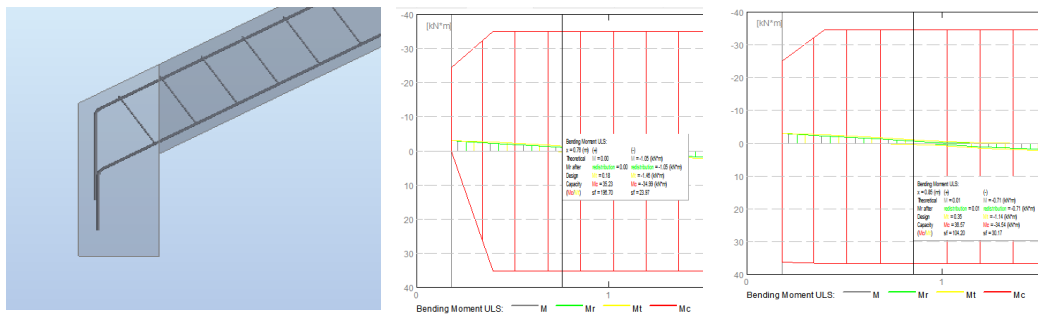
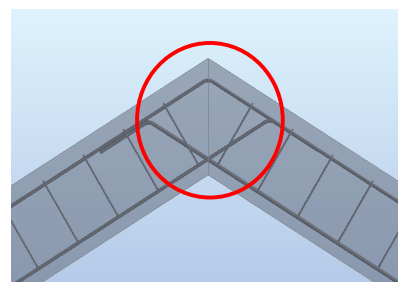
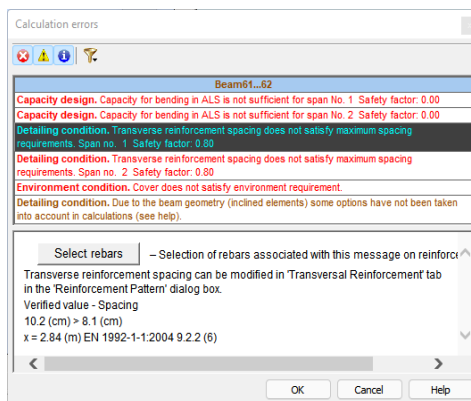


Figura 5.33 – Ancoragem alterada; Momentos no apoio antes e depois da alteração.

Outros erros correspondem à verificação de que na cumeeira o espaçamento entre estribos ultrapassa o valor máximo admitido pelo Eurocódigo 2 EN 1992-1-1:2004 9.2.2 (6) (Figura 5.34). Em relação a estes erros, a solução consistiu na alteração manualmente dos estribos nas tabelas, reforçando a zona da cumeeira. As armaduras transversais adotadas para cada vão correspondem a 14 estribos de Ø6/0.15, e mais 7 estribos de Ø6/0.10 (Figura 5.35)



	Diameter (mm)	Number	Spacing (m)
1	6	18	1*0.01 + 17*0.15
2	6	18	1*0.01 + 17*0.15
*			

Figura 5.34 - Erro relativo ao espaçamento entre estribos na cumeeira não estar de acordo com o Eurocódigo

Apesar do *software Robot* apresentar algumas limitações em termos de modelação manual das armaduras, a alteração efetuada foi relativamente simples, sendo apenas importante ter atenção à orientação na qual foi apresentada a distribuição dos estribos. Como se pode

observar na Figura 5.35, foi mais fácil editar os estribos do vão da esquerda, a partir da descrição da esquerda para a direita e contrariamente para os estribos do vão da direita. Observando a imagem, referente à descrição da esquerda para a direita, os estribos  $1*0.01 + 13*0.15 + 7*0.10$  do vão da esquerda, devem ser lidos da seguinte forma: 1 estribo afastado de 1cm em relação ao eixo do apoio, seguido de 13 estribos espaçados de 15cm, mais 7 estribos espaçados de 10cm.

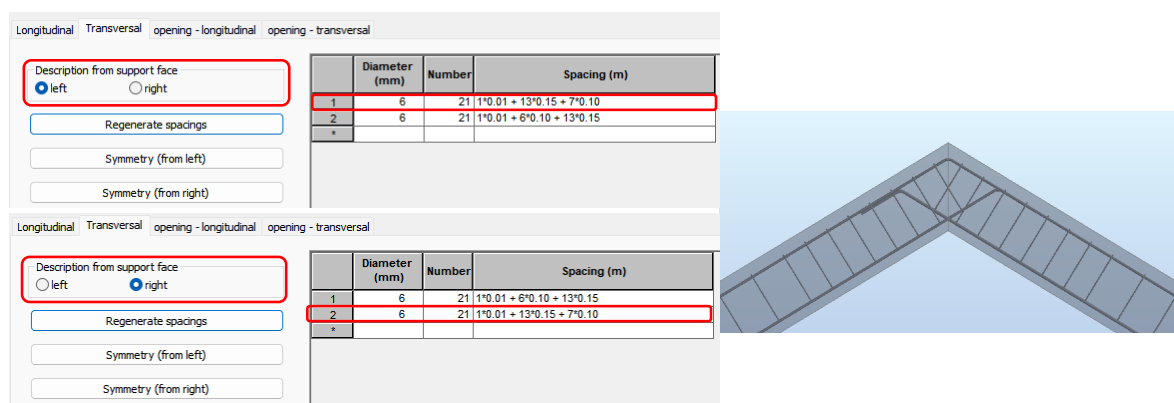


Figura 5.35 - Alteração manual dos estribos do vão esquerdo e direito; Representação final dos estribos escolhidos.

Em relação a um último erro verificado, o sistema informou que o recobrimento, para a Classe de Exposição XC3 e para a Classe Estrutural S4, não garante o valor mínimo estipulado pelo Eurocódigo 2 EN 1992-1-1 4.4.1.2 (5) (Figura 5.36). O erro confirma a existência de uma zona onde o recobrimento é de apenas 5 mm. Ao analisar a estrutura não é perceptível a sua localização, pelo que não foi possível a resolução do problema.

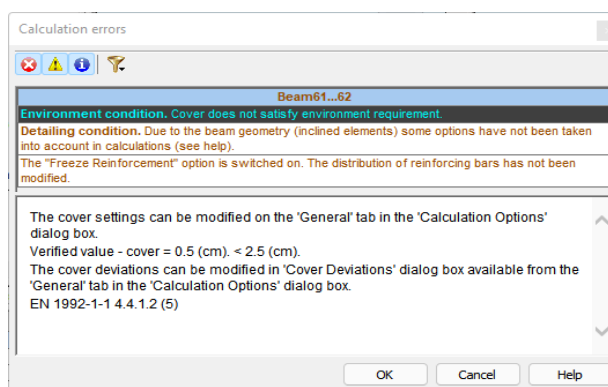


Figura 5.36 - Erro relacionado com o recobrimento mínimo não ser cumprido.

#### 5.4.4. Lajes

Atualmente, entre os sistemas utilizados, *Revit* e *Robot*, não é possível a transferência das armaduras das lajes. No entanto, o *Robot* tem capacidades para calcular estas armaduras, assim como criar automaticamente desenhos técnicos de pormenorização. As armaduras calculadas podem posteriormente ser manualmente modeladas no *Revit*, pois o nível de interoperabilidade entre os

programas é, em relação a estes elementos, nulo. Porém, atualmente a melhor prática para a modelação das armaduras das lajes no *Revit*, é utilizar os mapas da área de armadura necessária (abordados no item 6.3.), para a escolha das distribuições de armaduras. Os desenhos técnicos fornecidos pelo *Robot*, podem ser importados no formato de ficheiro .dwg, para servir de base na pormenorização das armaduras no *Revit*. No entanto, principalmente nas lajes com uma geometria em planta irregular, a representação das armaduras contém demasiada informação (Figura 5.37).

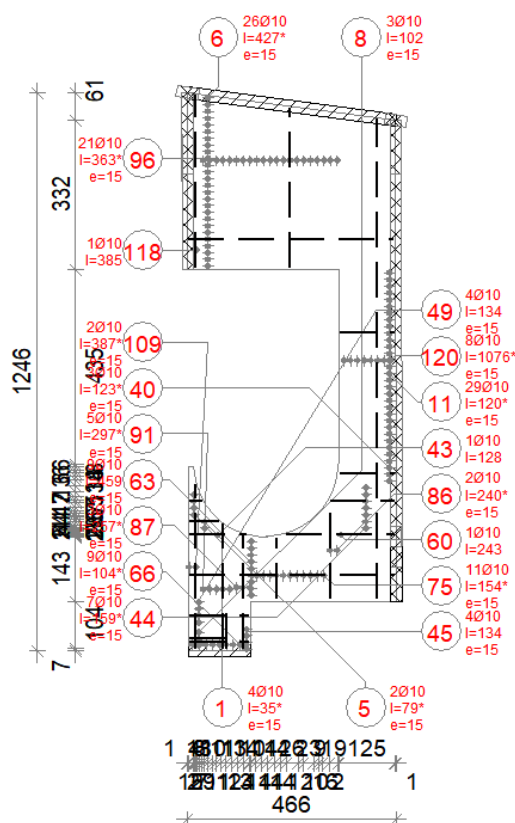


Figura 5.37 - Desenho técnico gerado pelo Robot para a laje da mezanine.

#### 5.4.5. Paredes

Em relação às paredes estruturais, o seu dimensionamento ainda não foi considerado no Robot, de forma a seguir o Eurocódigo (Figura 5.38). No entanto, é possível retirar todos os valores necessários para serem dimensionadas através de tabelas e mapas de esforços (Figura 5.39).

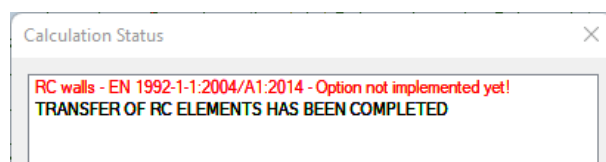


Figura 5.38 - Aviso sobre o dimensionamento de paredes no Robot ainda não estar implementado.

Panel/Cut/Case/Mode	NRx (kN)	MRz (kNm)	TRy (kN)	sRo (MPa)	sRe (MPa)	tR (MPa)	TRz (kN)	MRy (kNm)
67/ 2420-2407/ ACC:SEL-/	-569.04	-197.39	-121.59	-3.11	-2.54	-0.29	-34.27	-1.01
68/ 2409-2422/ 1/	-374.73	-78.55	8.47	-0.19	-0.28	0.01	11.77	-10.24
68/ 2409-2422/ 2/	-138.80	245.52	50.54	-0.23	0.06	0.03	-193.21	114.01
68/ 2409-2422/ 3/	-53.42	16.67	-2.00	-0.04	-0.02	-0.00	5.89	-5.12
68/ 2409-2422/ 5/ CQC	58.18	596.40	82.39	-0.32	0.39	0.05	20.11	38.30
68/ 2409-2422/ 6/ CQC	35.89	567.00	221.52	-0.31	0.36	0.14	21.27	30.12
68/ 2409-2422/ 7 (C) (CQC)/	68.95	766.50	148.84	-0.41	0.50	0.10	26.50	47.34
68/ 2409-2422/ 8 (C) (CQC)/	47.41	426.30	15.93	-0.22	0.28	0.01	13.73	29.27
68/ 2409-2422/ 9 (C) (CQC)/	53.35	745.92	246.23	-0.41	0.48	0.16	27.31	41.61
68/ 2409-2422/ 10 (C) (CQC)/	-18.44	-388.08	-196.80	0.22	-0.24	-0.13	-15.24	-18.63
68/ 2409-2422/ ULS+/-	-513.53	250.41	79.66	-0.42	-0.22	0.05	-172.60	140.10
68/ 2409-2422/ ULS-/	-773.40	166.97	56.02	-0.64	-0.34	0.04	-244.95	96.10
68/ 2409-2422/ SLS+/-	-513.53	183.64	59.01	-0.42	-0.22	0.04	-175.55	103.78
68/ 2409-2422/ SLS-/	-566.95	166.97	57.02	-0.47	-0.25	0.04	-181.44	98.66
68/ 2409-2422/ SLS:CHR+/-	-513.53	183.64	59.01	-0.42	-0.22	0.04	-175.55	103.78
68/ 2409-2422/ SLS:CHR-/	-566.95	166.97	57.02	-0.47	-0.25	0.04	-181.44	98.66
68/ 2409-2422/ SLS:FRE+/-	-513.53	175.30	59.01	-0.42	-0.22	0.04	-178.50	103.78
68/ 2409-2422/ SLS:FRE-/	-540.24	166.97	58.01	-0.44	-0.24	0.04	-181.44	101.22
68/ 2409-2422/ SLS:OPR+/-	-513.53	171.97	59.01	-0.42	-0.22	0.04	-179.68	103.78
68/ 2409-2422/ SLS:OPR-/	-529.56	166.97	58.41	-0.44	-0.23	0.04	-181.44	102.24
68/ 2409-2422/ ACC+/-	-444.58	938.47	305.25	-0.01	0.27	0.20	-152.37	151.12
68/ 2409-2422/ ACC-/	-598.51	-599.53	-187.82	-0.85	-0.73	-0.12	-208.75	54.90
68/ 2409-2422/ ACC:SEL+/-	-444.58	938.47	305.25	-0.01	0.27	0.20	-152.37	151.12
68/ 2409-2422/ ACC:SEL-/	-598.51	-599.53	-187.82	-0.85	-0.73	-0.12	-208.75	54.90

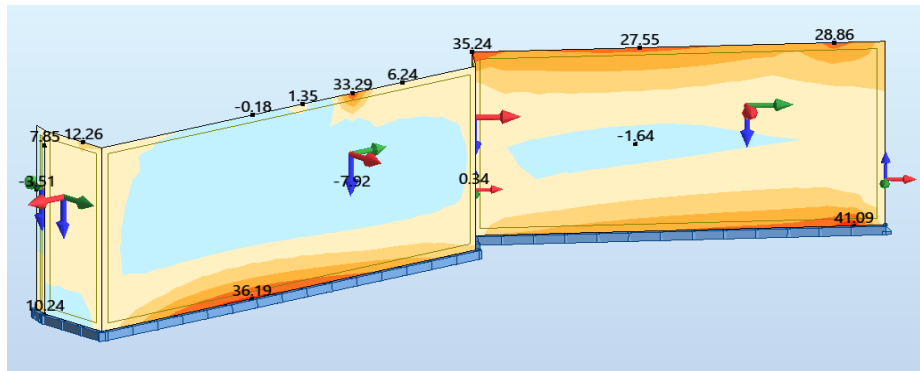


Figura 5.39 - Tabelas de esforços na base das paredes estruturais e mapa do momento Mxx.





## 6. Transferência de resultados da análise

A análise da capacidade de interoperabilidade entre os programas *Revit* e *Robot* (versões de 2022), no que se refere ao processo de transferência inverso, *Robot/Revit*, onde se verifica normalmente uma maior limitação, é avaliada neste capítulo. Sobre cada tipo de elemento estrutural foram analisadas as inconsistências identificadas e apresentada uma possível estratégia de resolução, de forma a ultrapassar as dificuldades encontradas.

### 6.1. Fundações

A transferência dos elementos de fundação, do programa de cálculo para o *Revit*, continua a apresentar uma forte limitação e inconveniente à produtividade. Como mencionado, no caso de estudo não foi efetuado nenhum pré-dimensionamento à geometria das fundações antes da modelação em *Revit*, deixado o seu cálculo exclusivamente para o *Robot*. Ao ser efetuada a transferência *Robot/Revit*, seria espectável que a geometria das sapatas, assim como as armaduras, fossem transferidas em conjunto para o *Revit*. Contudo, tal situação não aconteceu. A forma de contornar este problema, é definir no *Revit* a geometria das fundações antes de ser efetuado o envio das armaduras. Desta forma, as armaduras são corretamente transferidas para o programa de modelação. Adicionalmente, foi verificada que a transferência das armaduras para algumas sapatas, modeladas no *Revit*, apresentam uma orientação enviesada em relação às sapatas (Figura 6.1). Este tipo de erros, embora de fácil ajuste, obrigam o utilizador a despende algum tempo, para a correta representação da pormenorização de armaduras nos elementos de fundação.

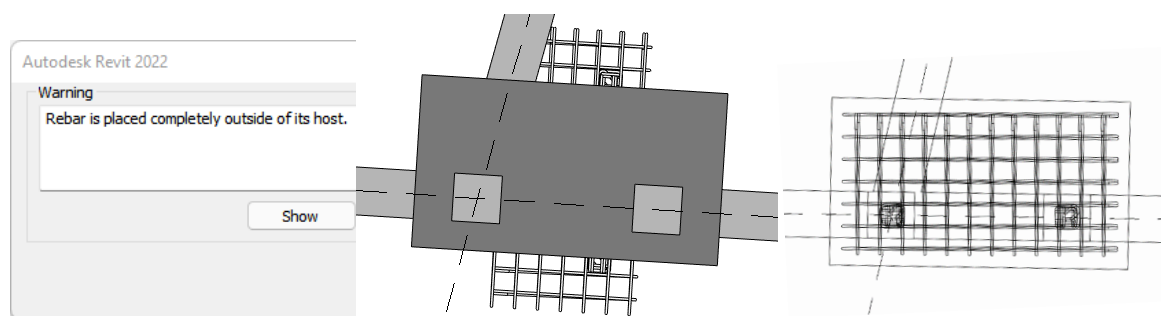


Figura 6.1 – Armaduras da sapata antes e depois de efetuada a sua correção.

### 6.2. Pilares e vigas

Na transferência *Robot/Revit* das armaduras dos pilares e das vigas, surgiu constantemente um obstáculo, que impossibilitou a rápida transferência de informação. Na tentativa de atualizar estes elementos, através da opção *Update model* no *Revit*, o *software* informa que o modelo *Revit* é significativamente diferente do modelo *Robot* (Figura 6.2). Ao prosseguir com a atualização, os elementos eram simplesmente eliminados do modelo. Tendo em conta o cenário apresentado, foi excluída a capacidade de atualização dos elementos, e em alternativa as armaduras foram enviadas do *Robot* para o *Revit*, através da opção *Send model* no *Robot*. Consequentemente, ao ser efetuado o

envio dos elementos e não a sua atualização, são perdidas as excentricidades anteriormente definidas, pelo facto de estas não serem consideradas na transferência *Revit/Robot* analisada no capítulo 5 (Figura 6.3).

Não foi possível identificar qual a causa para o problema apresentado, uma vez que no *Robot* o modelo não sofreu nenhuma alteração geométrica, tendo sido apenas definidas as ações atuantes, as combinações de ações, e efetuado o dimensionamento estrutural. Apesar do inconveniente mencionado, as armaduras dos pilares são transferidas exatamente como foram dimensionadas no *Robot*.

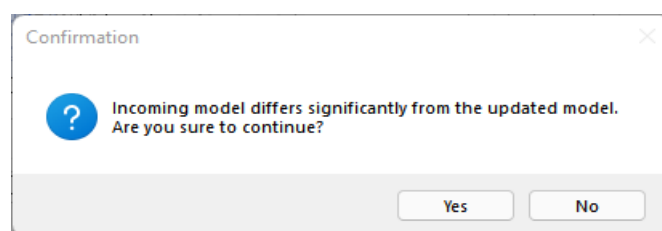


Figura 6.2 - Modelo *Revit* é significativamente diferente do modelo *Robot*.

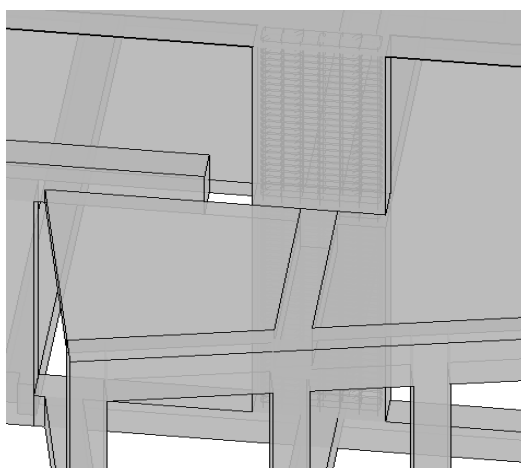


Figura 6.3 - Excentricidade do pilar incorreta.

No entanto, no caso das armaduras das vigas, a sua transferência apresenta diversas falhas. Além da excentricidade incorreta (Figura 6.4), as armaduras apresentam uma rotação sobre o eixo z. Como se pode ver na figura 6.5, os espaços identificados onde há interrupção dos estribos, referentes às zonas dos pilares, estão no lado oposto da viga. Para corrigir esta limitação, a viga foi rodada e foi efetuada um pequeno ajuste manual, de forma a posicionar corretamente os estribos em relação aos pilares (Figura 6.5).

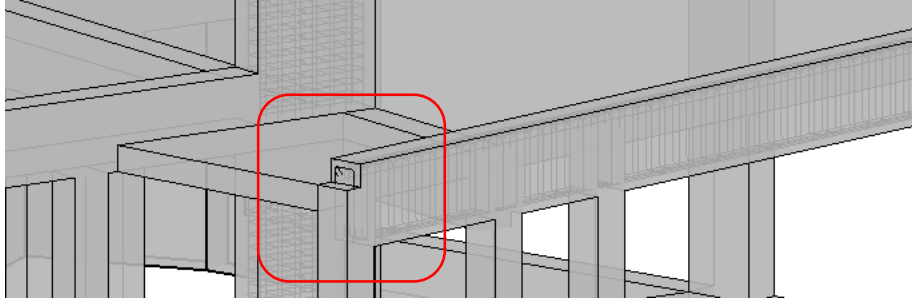


Figura 6.4 - Excentricidade da viga incorreta.



Figura 6.5 - Antes e depois de ser efetuado o ajuste manual das armaduras.

Relativamente às armaduras longitudinais, ao ser corrigida a excentricidade da viga, o seu comprimento foi automaticamente atualizado no apoio do lado esquerdo. Porém, o mesmo não aconteceu no apoio da direita, onde foi necessário ajustar manualmente (Figura 6.6).

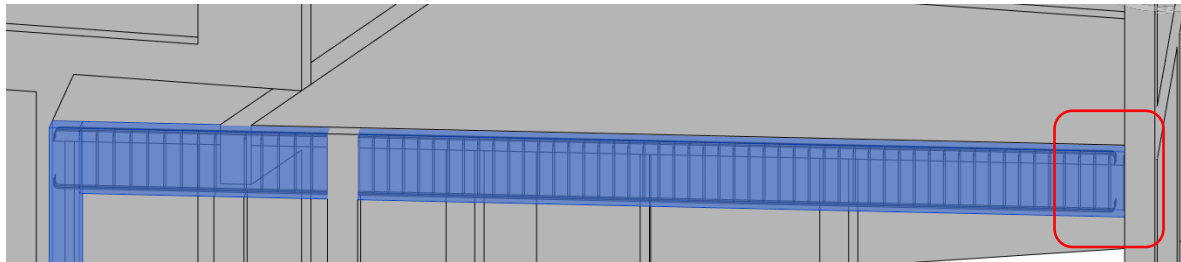


Figura 6.6 – Falha no ajuste automática das armaduras longitudinais no apoio.

Em relação às vigas inclinadas da cobertura, embora no capítulo anterior a pormenorização das armaduras tenha funcionado corretamente, a sua transferência para o modelo *Revit* não foi possível.

A falta de interoperabilidade demonstrada entre os programas, conduziu à opção de refazer alguns procedimentos, com o objetivo de voltar a “unir” os dois modelos. Foi então realizado um *update* geral no modelo *Revit*, onde foi preciso ajustar alguns elementos, para depois ser efetuada a transferência *Revit/Robot*, para o cálculo estrutural. Posteriormente, foi realizada novamente a operação de *update* do modelo *Revit*, e, no processo de transferência já não ocorreu qualquer aviso referente a modelos significativamente diferentes.

Apesar do procedimento apresentado não ser o mais desejado, tendo em conta que obriga a serem refeitas algumas tarefas, deste retrocesso foram identificados resultados positivos. A transferência de armaduras melhorou nas capacidades de localizar a posição excêntrica dos elementos no *Revit*, no entanto, alguns elementos não foram transferidos corretamente. Na situação mencionada referente a

estribos da viga, representada na Figura 6.5, que estavam colocados segundo uma orientação errada, voltou a acontecer. Foi novamente aplicado um ajuste manual das armaduras, mas realizado com uma maior rapidez, pois a transferência não apresentou tantos problemas como anteriormente.

Analisando a transferência das armaduras de uma das vigas invertidas, salienta-se o facto de esta estar corretamente alinhada com o alinhamento e a sua excentricidade estar bem definida. No entanto, as armaduras estão completamente fora dos limites da viga, e com a orientação errada (Figura 6.7). Adicionalmente, após o ajuste das armaduras, foi verificado que havia mais estribos do que aqueles que eram necessários para o comprimento dos vãos. Isto aconteceu, porque o eixo geométrico do pilar assinalado na Figura 6.7 é excêntrico em relação ao seu analítico, levando o *Robot* a definir um vão maior do que o real por falta de informação relativa às excentricidades.

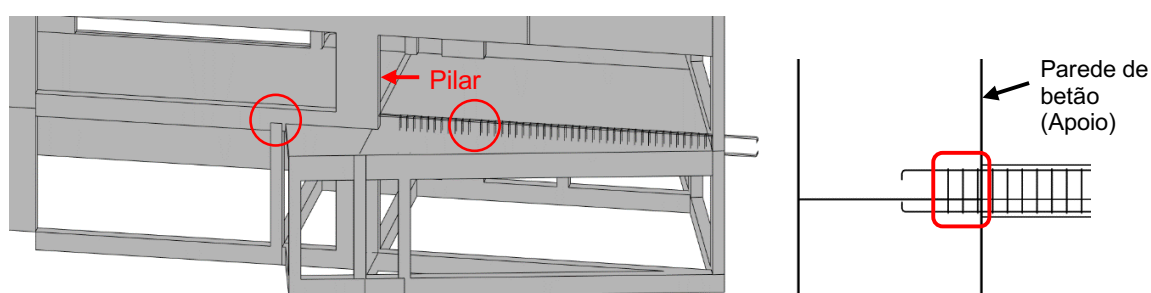


Figura 6.7 - Erros na transferência de armaduras.

### 6.3. Transferência de resultados

A integração direta entre os programas *Revit* e *Robot*, permite a transferência dos resultados da análise estrutural para o modelo *Revit*. Esta capacidade é especialmente útil na escolha e modelação em *Revit* das armaduras das lajes, onde rapidamente se retira a área da armadura necessária em cada painel (Figura 6.8). Adicionalmente, é possível transferir os esforços, deslocamentos e tensões resultantes, nos pilares e nas vigas, para cada combinação de ações (Figura 6.9).

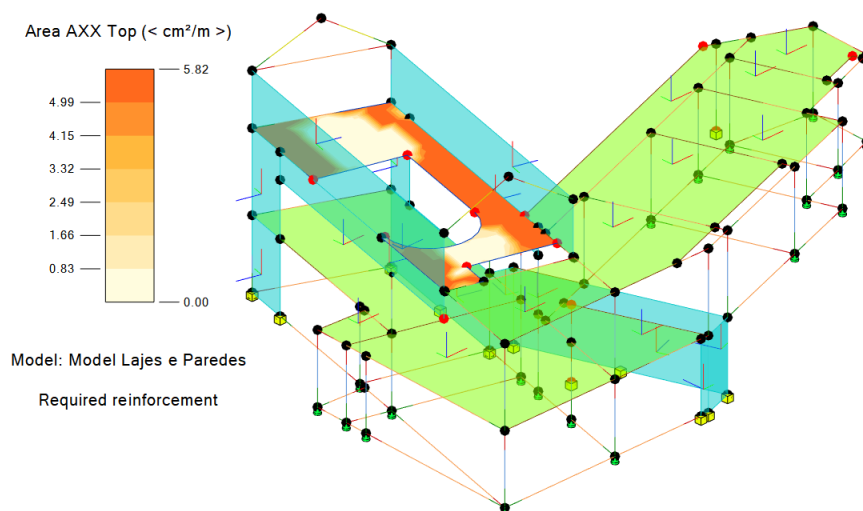


Figura 6.8 - Área de armadura necessária na laje do piso 2.

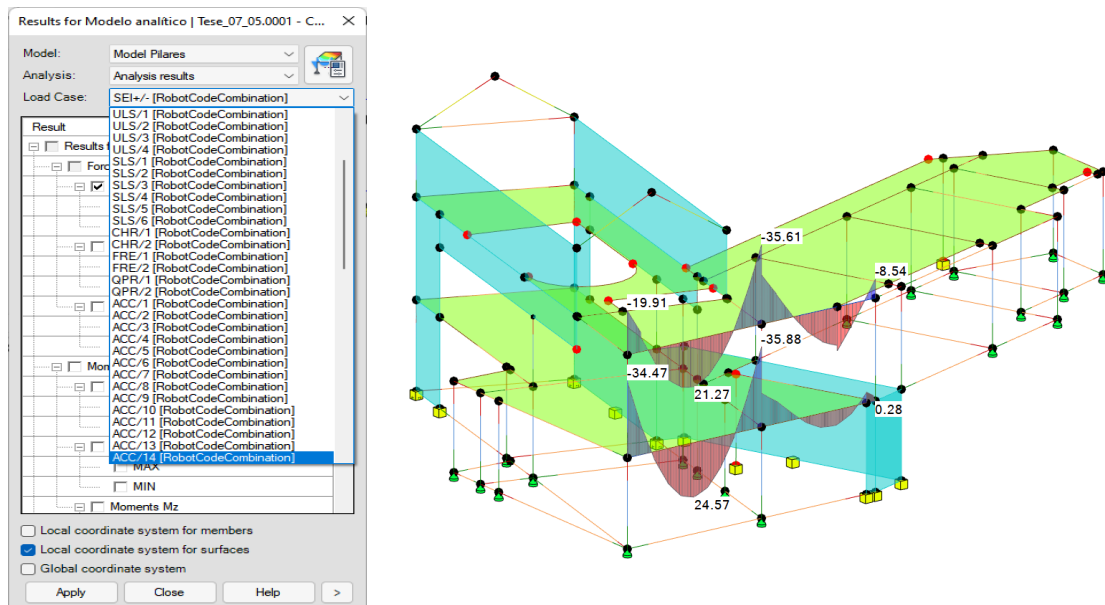


Figura 6.9 - Transferência de resultados da análise estrutural para o Revit.

Apesar desta integração, demonstrando a capacidade de transferência de resultados da análise para o *Revit*, para uma posterior consulta pela equipa envolvida, contribuindo para a centralização de informação num único modelo, este processo apresenta ainda diversas falhas. Ao proceder à atualização global do modelo e dos seus resultados, através de *Update model and results*, foram enviados apenas os dados relativos às áreas das armaduras necessárias, *Required reinforcement*, não importando os esforços, deslocamentos e tensões. Após várias tentativas, foi realizada a operação de *update*, dirigido de um modo seletivo sobre o modelo a transpor, por elementos, vigas e pilares e por grupos de elementos, como lajes e paredes (Figura 6.10). Este procedimento conduziu a melhores resultados na transferência.

Results packages :		
Model	Analysis	Type
Model Lajes e Paredes	Required reinforcement	Required reinforcement
Model Vigas	Required reinforcement	Required reinforcement
Model Vigas	Analysis results	Static
Model Pilares	Required reinforcement	Required reinforcement
Model Pilares	Analysis results	Static

Figura 6.10 - Transferência de resultados por grupos de elementos

No entanto, analisando os resultados, no caso das áreas de armadura necessária nas lajes, vigas e pilares, não houve discordância, uma vez que os valores estavam todos de acordo com os valores do *Robot*. Porém, no caso dos esforços nos pilares e nas vigas, alguns casos de carga, *Load Cases*, não foram transferidos, levando o *Revit* a apresentar valores máximos inferiores aos do programa de cálculo.

#### 6.4. Extração de peças desenhadas

Com o objetivo de analisar a automatização do *Revit* no auxílio à criação de peças desenhadas, foram criados alguns desenhos técnicos utilizando apenas as anotações pré-definidas pelo *software*. Seguidamente, modificando a família das anotações, *Tags*, foi obtida uma representação mais próxima da desejada (Figura 6.11). No entanto, a figura ainda apresenta incorreção associada aos varões longitudinais,  $\varnothing 12$ , em que a etiqueta a colocar deveria ser  $4\varnothing 12$ . Os desenhos elaborados no âmbito do trabalho podem ser visualizados no Anexo 1.

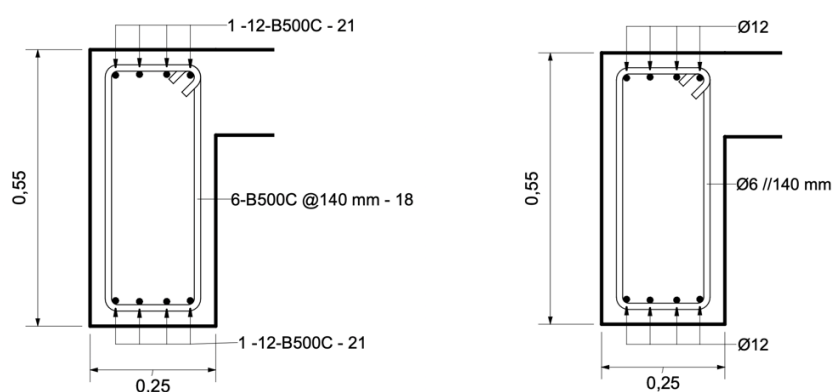


Figura 6.11 – Exemplo de uma peça desenhada antes e depois da alteração da família das anotações

O *Revit* fornece diversas opções para programar a forma como a informação é apresentada, através da alteração ou criação de famílias, permitindo ajustar os aspetos relacionados com o texto, a cor, a espessura, etc. Permite, ainda, utilizar capacidades mais avançadas, através de programação em *Dynamo*, uma plataforma de programação gráfica de acesso direto através do *Revit*. No entanto, estas funcionalidades requerem uma elevada experiência por parte do utilizador.

Analisando o estado atual do *software* *Revit*, é de salientar a facilidade na criação de plantas, alçados e cortes, comparativamente aos métodos tradicionais, porém, no detalhe das peças desenhadas, para que as nomenclaturas estejam de acordo com as desejadas pelo utilizador é necessário um gasto de tempo elevado. Contudo, no âmbito de um gabinete de projeto, este trabalho deve ser desenvolvido, pois as rotinas e os programas de automatização de apoio à representação gráfica, são reutilizáveis e adaptáveis a cada projeto.

## 7. Conclusões

A produtividade na indústria AEC é atualmente um tema muito debatido. As empresas deste setor estão constantemente a adaptar o seu fluxo de trabalho, de forma a reduzir tempos e custos no desenvolvimento da sua atividade. Os avanços tecnológicos associados à metodologia BIM, têm vindo a apresentar benefícios na produtividade e qualidade da construção. O presente estudo teve por objetivo analisar os benefícios da utilização da metodologia BIM na execução de um projeto de estruturas, assim como as limitações relacionadas com a interoperabilidade entre os *software Revit* e *Robot* (versões de 2022), e as limitações individuais de cada programa.

Os benefícios centram-se essencialmente em aspetos relacionados com o correto funcionamento, rapidez e simplicidade na execução de alguns processos:

- A capacidade de transferir informação bidireccionalmente entre *software*, permite efetuar alterações ao projeto apenas num dos programas, evitando a realização da mesma tarefa duas vezes;
- A transferência do modelo BIM do *Revit* para o *Robot* é bastante fiável;
- No *Robot*, o cálculo automático e a pormenorização das armaduras de acordo com os Eurocódigos demonstraram resultados bastante satisfatórios;
- A modelação em 3D/BIM, comparativamente aos métodos tradicionais, possibilita que qualquer alteração ao projeto seja aplicada automaticamente a todas as plantas, cortes e vistas das peças desenhadas;
- Facilidade e rapidez na organização de peças desenhadas;
- Possibilidade de guardar todas as definições, famílias de elementos e de anotações, para serem reutilizadas em projetos futuros, preservando elementos comuns entre projetos.

Apesar dos múltiplos benefícios e avanços tecnológicos, foram encontradas ainda algumas limitações:

- A manipulação dos *software*, usufruindo das ferramentas avançadas disponíveis por estes, requer um elevado nível de experiência;
- No *Revit*, o modelo analítico é muito dependente do modelo geométrico, o que limita a modelação de alguns elementos com uma maior complexidade geométrica, por não se conseguir compatibilizar os dois modelos;
- O modelo analítico é muito sensível a alterações, levando frequentemente a desajustes nos elementos estruturais, principalmente em estruturas mais complexas;
- A transferência de informação no sentido *Robot/Revit* ainda apresenta diversas falhas;
- A transferência parcial de informação não foi, nalguns casos, conseguida com sucesso;
- No *Robot* podem ser definidos diversos tipos de cargas, que não suportados pelo *Revit*, como as cargas triangulares que atuam nas paredes de contenção;
- A falta de informação relativa às excentricidades na transferência *Revit/Robot*, tem influência no cálculo e pormenorização das armaduras no *Robot*. Esta limitação leva a uma redução na

produtividade, por ser necessário ajustar manualmente os elementos, de modo a garantir o seu correto posicionamento de acordo com o modelo físico;

- A transferência das armaduras para o modelo *Revit* é pouco satisfatória, acabando por ser mais produtivo, para as armaduras que não são corretamente transferidas, efetuar a sua modelação utilizando extensões como *Naviate Rebar Extension*;
- O *Robot* ainda não permite, de acordo com os Eurocódigos, calcular as armaduras dos elementos parede;
- Não é possível transferir as armaduras das lajes do *Robot* para o *Revit*;
- A transferência para o *software* de modelação das armaduras das sapatas isoladas, só é efetuada se previamente a sua geometria estiver definida no *Revit*;
- A transferência das armaduras das sapatas contínuas do *Robot* para o *Revit* não é possível;
- A personalização das anotações automáticas do *Revit*, requer alguma experiência e tempo, não sendo intuitiva a sua edição.

Relativamente às limitações do estudo, a inexperiência do autor na manipulação dos *software* pode ter limitado a utilização de ferramentas avançadas, com todas as suas potencialidades, que permitissem um melhor aproveitamento de todas as capacidades dos programas. Outro aspeto a salientar, foi o lançamento de novas versões dos *software* próximo da data da conclusão do estudo, impossibilitando a sua realização nas versões mais recentes.

## 7.1. Desenvolvimentos futuros

O presente estudo procurou contribuir para o aumento do conhecimento sobre os avanços tecnológicos da metodologia BIM no âmbito do projeto de estruturas, com especial ênfase na interoperabilidade entre os *software Revit* e *Robot*. Apesar de terem sido analisados diversos procedimentos para a execução de um projeto de estruturas em ambiente BIM, a evolução tecnológica não abranda, e continuamente os programas são aperfeiçoados, de modo a satisfazer os requisitos do setor. Assim, é relevante que sejam frequentemente realizados estudos para analisar as melhorias e avanços dos *software* BIM. Os desenvolvimentos futuros propostos são, portanto:

- Explorar as versões futuras dos *software* abordados neste estudo, comparando as suas melhorias;
- Efetuar uma análise da capacidade de transferência de informação entre programas de empresas distintas pelo formato padrão IFC e com recurso a *plug-ins*;
- Realizar um estudo aprofundado sobre documentação gráfica, de modo a auxiliar na execução de peças desenhadas com nomenclaturas habitualmente utilizadas em Portugal;
- Efetuar um estudo envolvendo a elaboração de um projeto que integre diferentes especialidades, com o objetivo de analisar a colaboração e centralização da informação.



## 8. Referências bibliográficas

- Aksenova, G., Kiviniemi, A., Kocaturk, T. & Lejeune, A. (2018). From Finnish AEC knowledge ecosystem to business ecosystem: lessons learned from the national deployment of BIM. *Construction Management and Economics*. doi:<https://doi.org/10.1080/01446193.2018.1481985>
- Asl, M. R., Zarrinmehr, S., Bergin, M., & Yan, W. (2015). BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization. *Energy and Buildings*, 108, 401-412. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.011>
- Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM): trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and management in Engineering*, 11 (3), 241-252. doi:[10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
- Arayici, Y., Fernando, T., Munoz, V., & Bassanino, M. (2017). Interoperability specification development for integrated BIM use in performance based design. *Automation in Construction* 85, 167-181. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.018>
- Bazjanac, V. (2004). Virtual building environments (VBE) – applying information modeling to buildings. *Lawrence Berkeley National Laboratory*. Disponível em [Link](#)
- Bew, M., & Richards, M. (2008). BIM Maturity Model. Paper presented at the Construct IT Autumn 2008 Members' Meeting. Brighton, UK.
- Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The Project benefits of building information modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31, 971-980. doi:<https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2012.12.001>
- Charef, R., Alaka, H., & Emmitt, S. (2018). Beyond the third dimension of BIM: a systematic review of literature and assessment of professional views. *Journal of Building Engineering*, 19, 1-34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.028>
- Chen, L., & Luo, H. (2014). A BIM-based construction quality management model and its applications. *Automation in Construction*, 46, 64-73. doi:<https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2014.05.009>
- Eastman, C. M. (1975). The use of computers instead of drawings in building design. *AIA Journal*, 63, 46-50. Disponível em [Link](#)
- Galić, M., Venkrbec, V., Chmelik, F., Feine, I., Pučko, Z., & Klanšek, U., (2017). Survey of accomplishments in BIM implementation in Croatia, the Czech Republic, Germany, and Slovenia. *Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek*, 8, 23-35. doi:[10.13167/2017.15.3](https://doi.org/10.13167/2017.15.3)

- Grilo, A., & Gonçalves, R. J. (2010). Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. *Automation in Constructions*, 19, 522-530. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.003>
- Kamardeen, I. (2010). 8D BIM modelling tool for accident prevention through design. Disponível em [Link](#)
- Mathews, M. (2015) BIM; Postgraduate Multidisciplinary Collaborative Education. Paper presented at Wessex Institute / University of the West of England BIM 2015 International Conference. Disponível em [Link](#)
- Mitchell, D. (2012). *5D BIM: Creating Cost Certainty and Better Buildings*. Disponível em [Link](#)
- Mosey, D., Bahram, D., Dartnell, R., Hallam, C., Howard, C., Maqbool, A., Murray, K., Rawlinson, S., & Winfield, M. (2016). Enabling BIM Through Procurement and Contracts. *A Research Report by the Centre of Construction Law and Dispute Resolution, King's College London*. Disponível em [Link](#)
- Muller, M. F., Esmanioto, F., Huber, N., Loures, E. R., & Junior, O. C. (2019). A systematic literature review of interoperability in the green Building Information Modeling lifecycle. *Journal of Cleaner Production*, 223, 397-412. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.114>
- Ren, R., Zhang, J., & Dib, H. N. (2018). BIM Interoperability for Structure Analysis. *ASCE Construction Research Congress*, 470-479. Disponível em [Link](#)
- Sacks, R., Eastman, C. M., Lee, G., & Teicholz, P. M. (2018). *BIM Handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers* (3<sup>rd</sup> ed.). Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Sampaio, A. Z. (2017). BIM as a computer-aided design methodology in civil engineering. *Journal of Software Engineering and Applications*, 10, 194-210. doi:<https://doi.org/10.4236/jsea.2017.102012>
- Sampaio, Z., Gondar, J. & Pinto, A. (2018). Study of BIM applied to geotechnical project: a 5D/ BIM approach. *Instituto Superior Técnico*. Disponível em [Link](#)
- Sampaio, A. Z. (2021). Maturity of BIM Implementation in Construction Industry: Governmental Policies. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 69, 7, 92-100. doi:[10.14445/22315381/IJETT-V69I7P214](https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I7P214)
- Sampaio, A. Z. (2022). Project management in office: BIM implementation. *Procedia Computer Science*, 196, 840-847. doi:<https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2021.12.083>
- Sampaio, A. Z. & Diez, R. V. L. (2020). BIM short course oriented to professionals of the construction industry, *ABE - Advances in Building Education, Innovación Educativa en Edificación*, ISSN:

2530-7940, Cod. 0089, Septiembre - Diciembre 2020, Vol. 4, No 3, pp. 23-34.  
doi:[10.20868/abe.2020.3.4508](https://doi.org/10.20868/abe.2020.3.4508)

Sampaio, A. Z., & Gomes, A. (2021). *BIM Interoperability Analyses in Structure Design*, *CivilEng*, 2, pp 174–192. doi:<https://doi.org/10.3390/civileng2010010>

Santiago, F. J. M., Orzáez, M. J. H., & Cepeda, J. T., (2020). Sustainability and energy efficiency: BIM 6D. Study of the BIM methodology applied to hospital buildings. Value of interior lighting and daylight in energy simulation. *Sustainability*, 12, 1-29. doi:<https://doi.org/10.3390/su12145731>

Shirowzhan, S., Sepasgozar, S. M. E., Edwards, D. J., Li, H., & Wang, C. (2020). BIM compatibility and its differentiation with interoperability challenges as an innovation factor. *Automation in Constructions*, 112. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103086>

Shehzad, H. M. F., Ibrahim, R. B., Yusof, A. F., & Khaidzir, K. A. M. (2019). Building information modeling: factors affecting the adoption in the AEC industry. *2019 6th International Conference on Research and Innovation in Information Systems (ICRIIS)*, 1-6, doi: [10.1109/ICRIIS48246.2019.9073581](https://doi.org/10.1109/ICRIIS48246.2019.9073581)

Smith, P. (2016). Project cost management with 5D BIM. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 226, 193-200. doi:<https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2016.06.179>

Succar, B. (2008). Building information modelling framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18, 357-375. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>

Taxén, L., & Lilliesköld, J. (2008). Images as action instruments in complex projects. *International Journal of Project Management*, 26, 527-536. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2008.05.009>

Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. *Automation in Construction* 38, 109-127. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>

Wong, A. K. D., Wong, F. K. W., & Nadeem, A. (2010). Attributes of Building Information Modelling Implementations in Various Countries. *Architect Eng. Des. Manag*, 6. 288-302. doi: <https://doi.org/10.3763/aedm.2010.IDDS6>

Wong, J. K. W., & Zhou, J. (2015). Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. *Automation in Construction*, 57, 156-165. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.003>

## Legislação

Decreto Legislativo nº 50, de 18 de abril de 2016. Il Ministro delle Infrastrutture e dei Transporti. Codice dei contratti pubblici. Roma. Decreto do Ministro.

## Páginas Web

Autodesk. (2021). BIM Benefits: What are the benefits of BIM?, 2021 <https://www.autodesk.com/solutions/bim/benefits-of-bim>, consultado em julho de 2021.

Autodesk, Revit - Robot Integration, 2020 <https://knowledge.autodesk.com/support/revit/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2020/ENU/Revit-Analyze/files/GUID-B850E0C3-2314-4FEC-B5D1-A7C0CBDF290F-htm.html> consultado em Outubro 2021.

BibLus, BIM na Europa: disseminação e adoção em cada País, 2019 <https://biblus.accasoftware.com/ptb/bim-na-europa-disseminacao-e-adocao-em-cada-pais-parte-2/> consultado em Fevereiro de 2021.

BibLus, BIM collaboration: how BIM helps a project from concept to operations, 2021 <https://biblus.accasoftware.com/en/bim-collaboration-how-bim-helps-a-project-from-concept-to-operations/> consultado em Maio de 2022

BUILD CoLAB, O futuro da construção é digital: casas com menos custos, mais eficientes e adaptáveis aos novos usos, 2021 <https://www.idealista.pt/news/imobiliario/habitacao/2021/04/20/47001-o-futuro-da-construcao-e-digital-casas-com-menos-custos-mais-eficientes-e-adaptaveis> consultado em Novembro de 2021.

BuildingSMART, Industry Foundation Classes (IFC) - An Introduction, 2021 <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/>, consultado em Outubro de 2021.

COTEC, BIM: Building Information Modelling, 2020 <https://cotecportugal.pt/pt/projects/bim-building-information-modelling/> consultado em Novembro 2021.

GOV, Government Construction Strategy: 2016-2020, 2016 <https://www.gov.uk/government/publications/government-construction-strategy-2016-2020>, consultado em Fevereiro de 2022

MTWO, 6D BIM: powering sustainability of the construction industry, 2021 <https://www.mtwocloud.com/post/6d-bim-powering-sustainability-in-the-construction-industry>, consultado em Outubro de 2021.

RTP, Portugal atrasado na implementação da metodologia que baixa custo da construção civil, 2020 [https://www.rtp.pt/noticias/economia/portugal-atrasado-na-implementacao-de-metodologia-que-baixa-custo-da-construcao-civil\\_n1207764](https://www.rtp.pt/noticias/economia/portugal-atrasado-na-implementacao-de-metodologia-que-baixa-custo-da-construcao-civil_n1207764) consultado em Outubro de 2021.

UNIFI, BIM Software: Which is the Most Popular?, 2019 <https://unifilabs.com/BIM-software>, consultado em Dezembro de 2021.

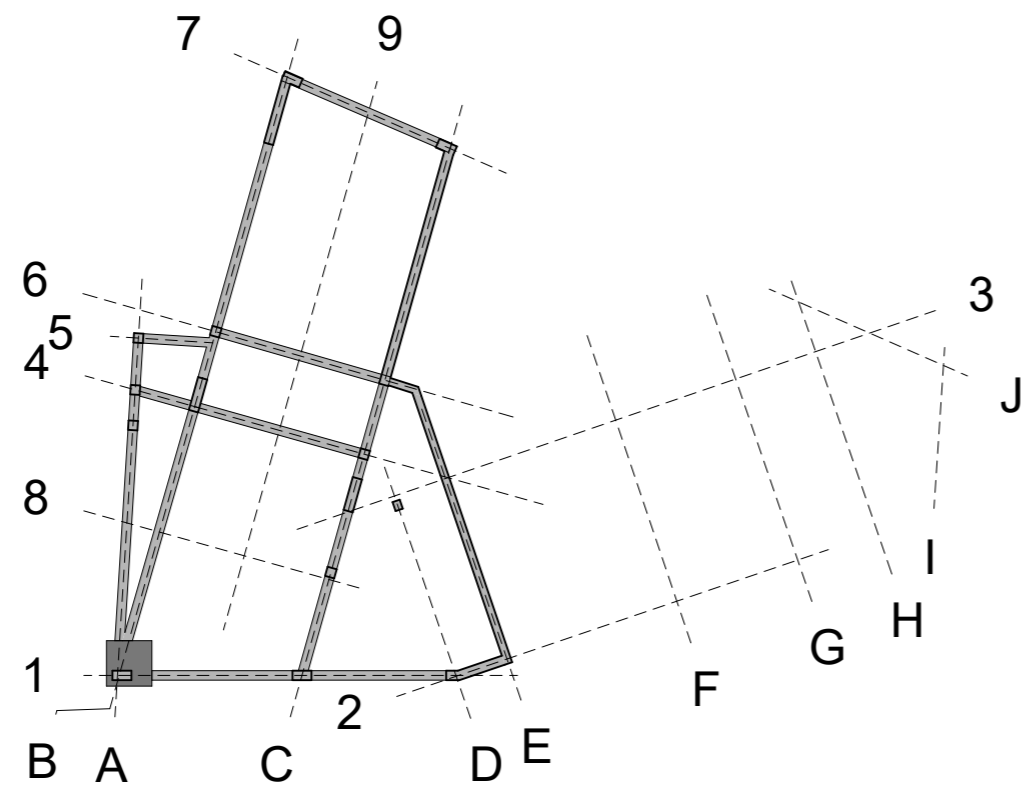
United BIM, What are BIM dimensions – 3D, 4D, 5D, 6D, and 7D BIM explained, 2020 <https://www.united-bim.com/what-are-bim-dimensions-3d-4d-5d-6d-7d-bim-explained-definition-benefits/>, consultado em Setembro de 2021.



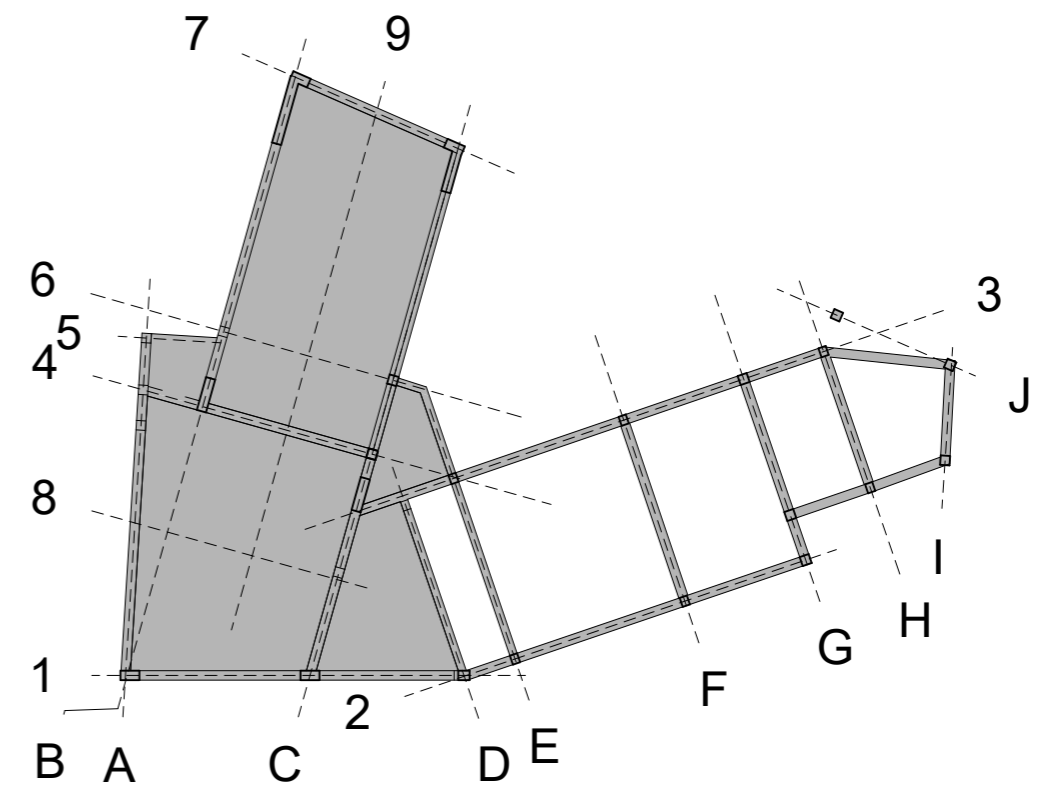
# **ANEXO 1**



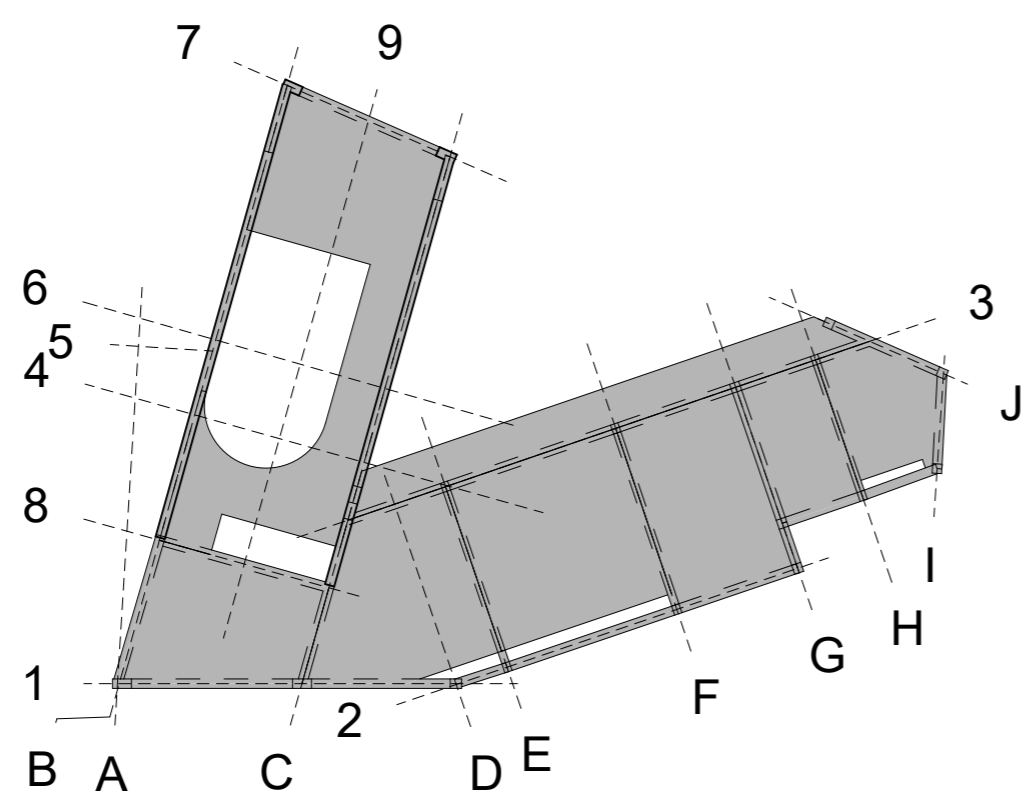




1 **Piso 0**  
1 : 200



2 **Piso 1**  
1 : 200



3 **Piso 2 - Mezanino**  
1 : 200

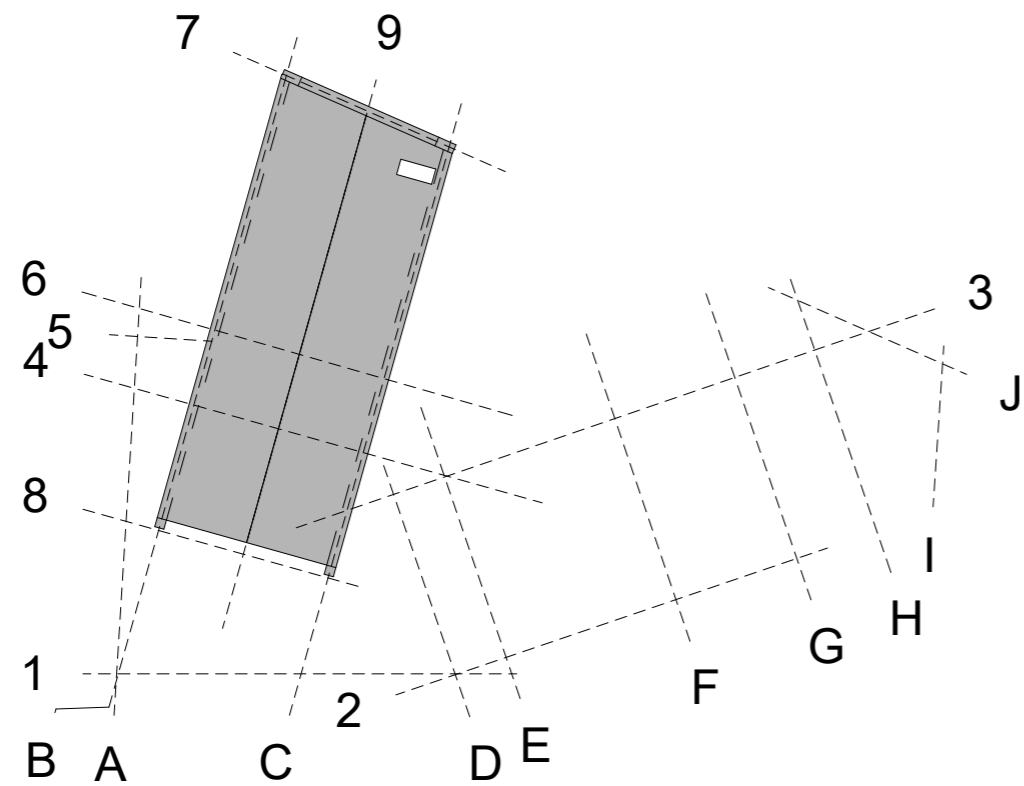


**Aluno:**  
Paulo Sequeira  
nº83949

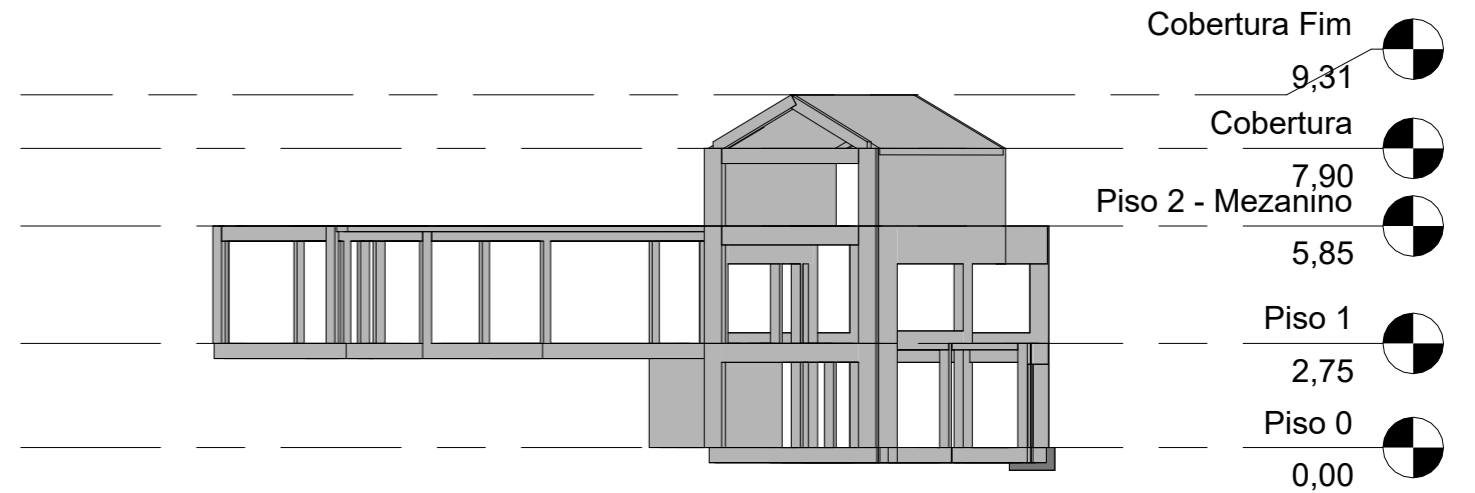
Estabilidade

Plantas e Alçados 1

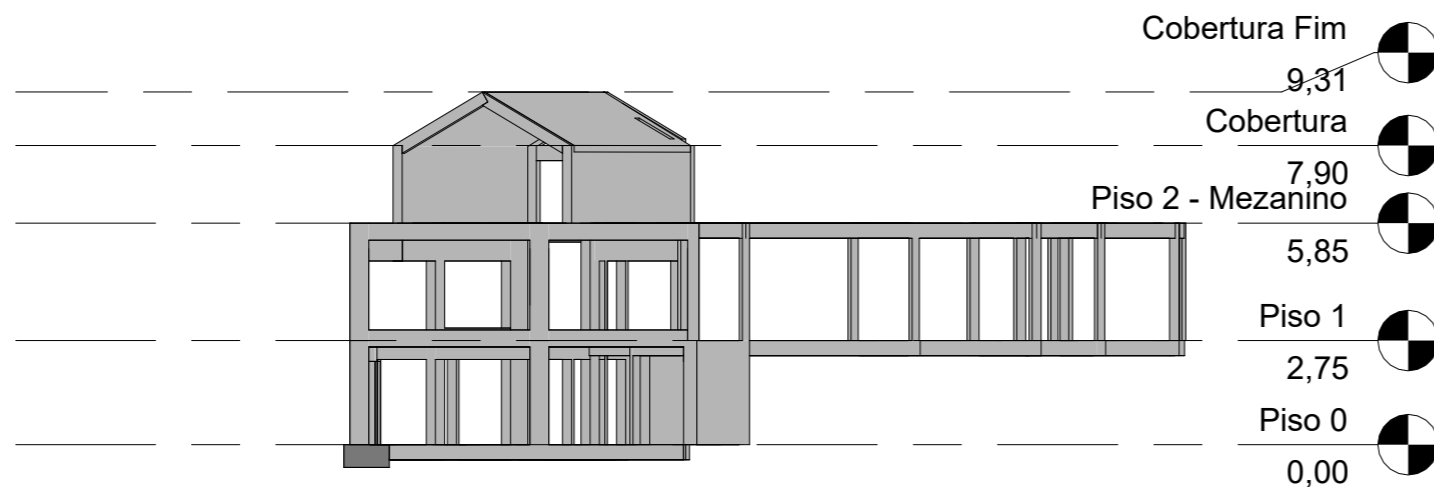
Ano Letivo 2021/2022



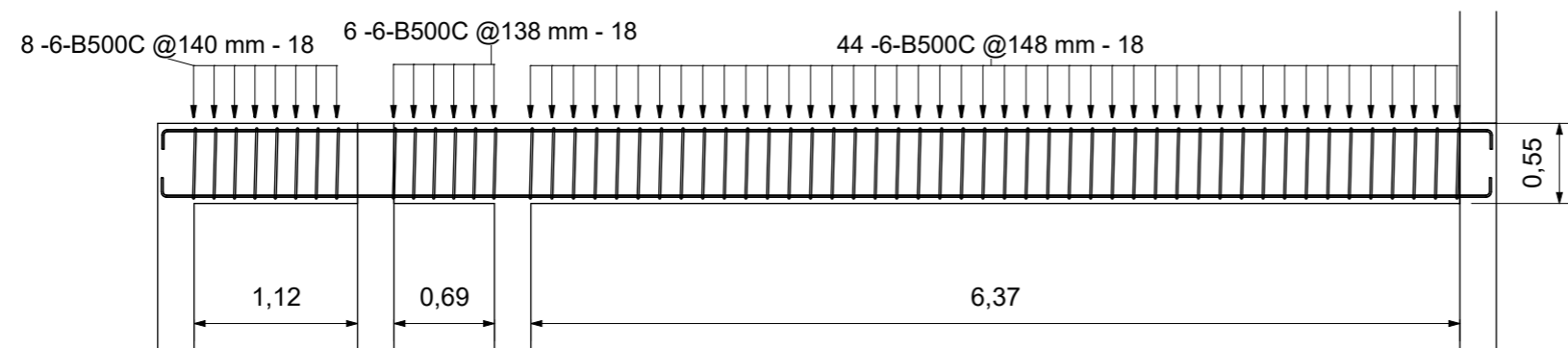
1 Cobertura  
1 : 200



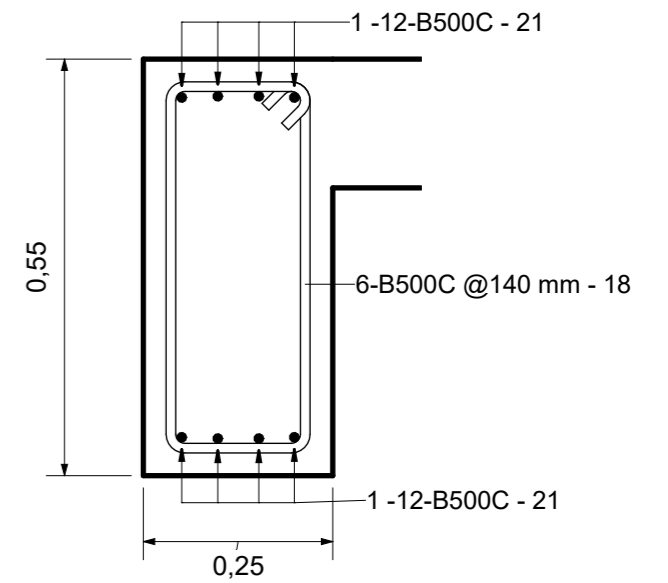
2 Norte  
1 : 200



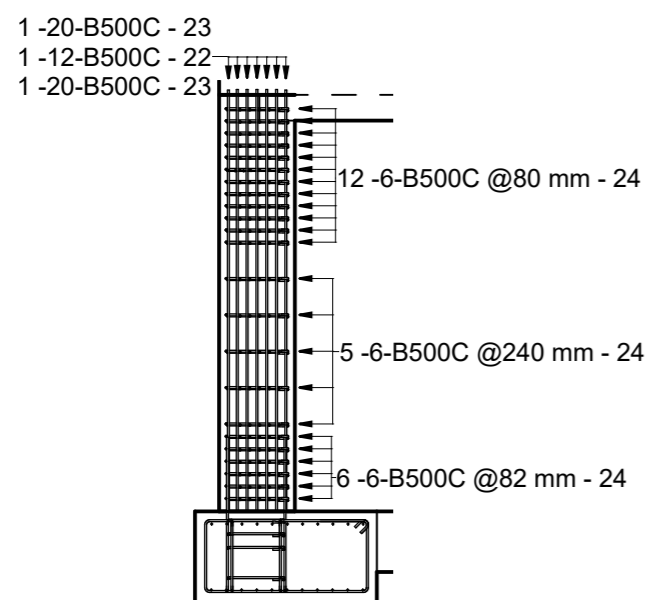
3 Sul  
1 : 200



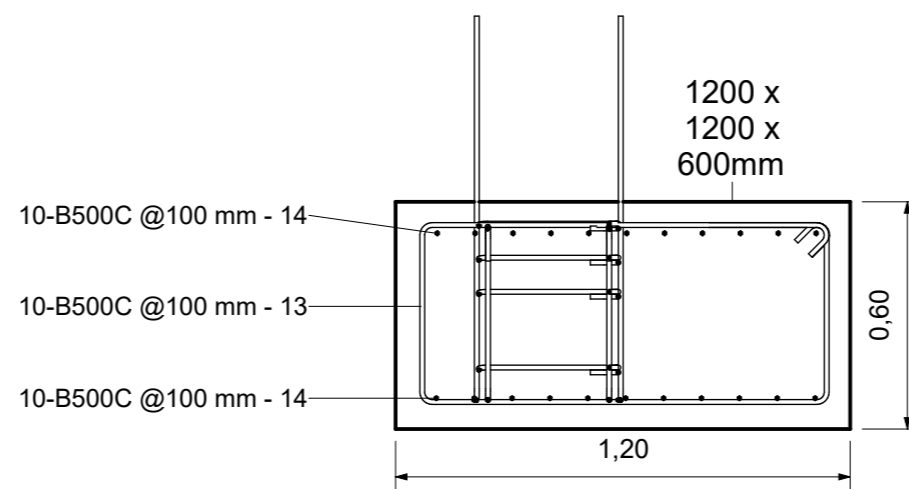
1 **Viga A**  
1 : 50



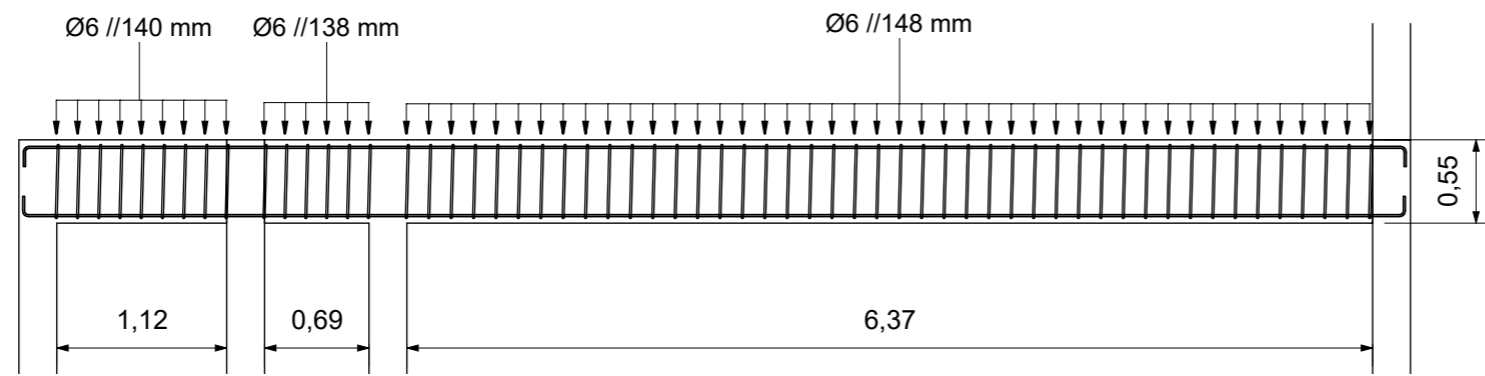
2 **Secção Viga A**  
1 : 10



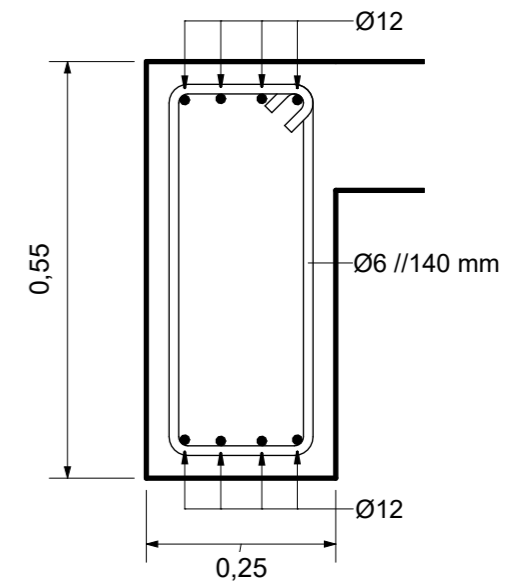
3 **Pilar A-1**  
1 : 50



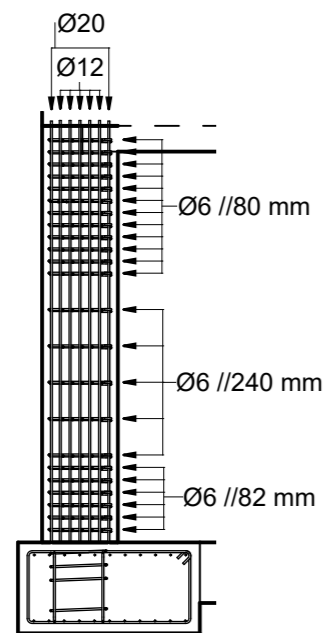
4 **Pormenor Sapata**  
1 : 20



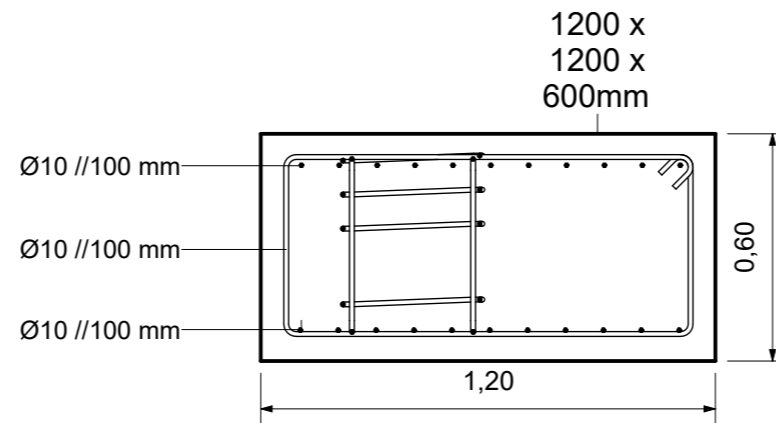
1 **Viga A**  
1 : 50



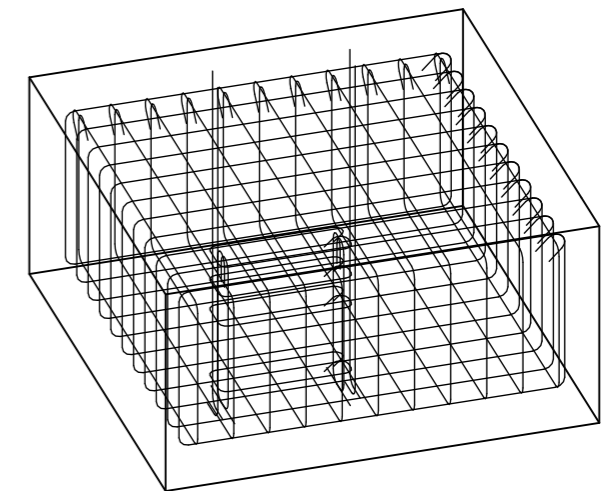
2 **Secção Viga A**  
1 : 10



3 **Pilar A-1**  
1 : 50



4 **Pormenor Sapata A-1**  
1 : 20



5 **3D Sapata A-1**