



Projeto de estruturas de edifícios em betão armado apoiado em ferramentas BIM

MARCELO MOREIRA MAGALHÃES

Outubro de 2015

Projeto de estruturas de edifícios em betão armado apoiado em ferramentas BIM

RELATÓRIO DE ESTÁGIO

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Mestrado em Engenharia Civil

Ramo de Estruturas

Marcelo Moreira Magalhães

Orientador do ISEP: Prof. Doutor Diogo Rodrigo Ferreira Ribeiro

Orientador da Empresa: Eng.º Nuno Daniel Mota Pinheiro

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil — Ramo de Estruturas

OUTUBRO 2015

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador da empresa, Eng. Nuno Pinheiro, pelo apoio na realização deste trabalho e pela disponibilidade demonstrada ao longo do estágio.

Ao meu orientador do ISEP, Eng. Diogo Ribeiro pela disponibilidade e auxílio na realização deste trabalho.

À empresa FASE - Estudos e Projetos S.A. por conceder um lugar onde pudesse estar integrado numa equipa de projeto. Aos restantes engenheiros com quem tive possibilidade de trabalhar, estando sempre disponíveis para me ajudar em dúvidas que surgiram.

À Rute Dias, pelo apoio constante, principalmente nos momentos mais difíceis bem como a tradução de alguns documentos.

À minha família, um muito obrigado por me dar a oportunidade de frequentar um curso académico e pelo apoio dado ao longo destes anos.

A todos os meus amigos que me acompanharam neste percurso académico.

RESUMO

O presente trabalho refere-se a um relatório de estágio para a conclusão do Mestrado em Engenharia Civil - ramo de Estruturas no Instituto Superior de Engenharia do Porto. O estágio decorreu na empresa FASE - Estudos e Projectos S.A. durante um período de seis meses.

Este documento tem como principal objetivo apresentar o desenvolvimento dos conhecimentos das fases de um projeto de um edifício. Aborda-se a modelação e análise de um edifício alto em betão armado, situado em Moçambique, salientando o dimensionamento dos elementos estruturais.

Numa segunda fase, para aprofundar o conceito BIM, propôs-se a integração desta metodologia ao projeto já elaborado tendo em vista a ligação bidirecional dos programas de cálculo com os programas de desenho.

Um dos objetivos de elaborar um trabalho em ambiente empresarial é o desenvolvimento de competências socio-profissionais e transversais. Para isso, este trabalho passou também pelo acompanhamento de outros projetos sendo dois deles apresentados no último capítulo.

Palavras-Chave: Betão Armado, Robot, Revit, BIM, API

ABSTRACT

The present document refers to a internship report for conclusion of master degree in Civil Engineering - branch in Structures in Instituto Superior de Engenharia do Porto. The internship had a duration of six months and was developed in FASE - Estudos e Projetos S.A..

This document's targeted at obtaining knowledge about the diferent phases of a building project. It addresses the modeling and analysis of a tall reinforced concrete building, located in Mozambique, highlighting the design of the structural elements.

In a second phase, for going deeper in the BIM concept, it is proposed the integration of this methodology into the project already prepared considering the bidirectional connection of the calculation software with the drawing software.

One of the goals in participating in a project undertaken within a company is the development of socio-professional and transverse skills. Therefore, this project also targeted the following of other works, two of them presented in the last chapter.

Keywords: Reinforced concrete, Robot, Revit, BIM, API

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
1. Introdução.....	1
2. Projeto de Estruturas de Engenharia Civil.....	3
3. Integração de metodologias BIM no projeto de estruturas.....	17
4. Aplicação e desenvolvimento de folhas de cálculo automático de estruturas.....	31
5. Projeto de estruturas de um edifício alto em betão armado.....	41
6. Aplicação de ferramentas BIM ao projeto de um edifício em betão armado.....	75
7. Outros projetos	83
8. Conclusão.....	93
9. Bibliografia	95
Anexo	99

ÍNDICE DE TEXTO

1.	Introdução	1
2.	Projeto de estruturas de engenharia Civil	3
2.1.	Etapas da elaboração de um projeto de um edifício.....	3
2.1.1.	Estudo prévio.....	4
2.1.2.	Anteprojeto.....	5
2.1.3.	Projeto de execução	5
2.2.	Modelação e análise estrutural	6
2.3.	Dimensionamento estrutural aos Estados Limites	7
2.3.1.	Dimensionamento ao Estado Limite Último (ELU).....	9
2.3.2.	Dimensionamento ao Estado Limite de Serviço (ELS)	13
3.	Integração de metodologias BIM no projeto de estruturas.....	17
3.1.	Conceitos de base.....	18
3.1.1.	Modelação paramétrica	19
3.1.2.	Interoperabilidade.....	22
3.2.	Aplicação do BIM ao projeto de estruturas.....	24
3.3.	Plataformas e ferramentas BIM nas estruturas	26
3.3.1.	Revit.....	27
3.3.2.	Robot Structural Analysis.....	28
4.	Aplicação e desenvolvimento de folhas de cálculo automático de estruturas.....	31
4.1.	Programa 2D DESIGN	31
4.2.	Programa Concrete Beam.....	35
4.3.	Ferramenta PosProcR2D	36
4.4.	Código API.....	38
5.	Projeto de estruturas de um edifício alto em betão armado.....	41
5.1.	Descrição do edifício.....	41
5.2.	Modelação do edifício no programa Robot Structural Analysis	45

5.2.1.	Ações	46
5.2.2.	Combinações de ações	50
5.2.3.	Dimensionamento de pilares.....	50
5.2.4.	Dimensionamento da viga	58
5.2.5.	Dimensionamento das lajes	63
6.	Aplicação de ferramentas BIM ao projeto do edifício em betão armado	75
6.1.	Objetivos.....	75
6.2.	Modelação estrutural com recurso à plataforma BIM.....	75
6.2.1.	Parametrização dos elementos do modelo.....	78
6.2.2.	Modelo analítico.....	79
6.2.3.	Ligação <i>Revit-Robot</i>	80
7.	Outros projetos	83
7.1.	Reservatório de água.....	83
7.1.1.	Descrição estrutural	83
7.1.2.	Modelação numérica.....	84
7.1.3.	Ações e combinações de ações	85
7.1.4.	Resultados	89
7.2.	Edifício Black-Box	90
8.	Conclusões	93
9.	Bibliografia	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de elementos finitos de um edifício de habitação	7
Figura 2 - Fluxograma representativo do dimensionamento de secções de betão armado com base na interação de folhas de cálculo com programas de cálculo automático (adaptado: Pinheiro, 2012).....	8
Figura 3 - Diagrama parábola-retângulo para dimensionamento de secções de betão armado.	9
Figura 4 - Diagrama de cálculo tensão-extensão do aço das armaduras para betão armado .	11
Figura 5 - Modos de rotura: (a) rotura pelo betão; (b) rotura pelo aço (adaptado: Pinheiro, N.D. Mota [et al]-2012.)	12
Figura 6 - Representação gráfica dos limites de deformação de uma viga (flecha e contra-flecha).....	15
Figura 7 - Representação gráfica dos níveis de produtividade ao longo do tempo (adaptado: Portugal STEEL (2014)).....	18
Figura 8 - Cronograma representativo da interação de cada interveniente num projeto: (a) projeto elaborado da forma tradicional; (b) projeto com recurso à metodologia BIM	19
Figura 9 - Evolução cronológica do formato IFC (Fonte: <i>buildingSMART</i> , 2013)	23
Figura 10 - Terminal de cruzeiros do porto de Leixões: (a) corte da estrutura; (b) vista tridimensional; (Fonte: Lino,J.S. [et al.] (2012)).....	24
Figura 11 - Modelação do INESC II: (a) fundações do edifício; (b) visualização tridimensional do edifício; (Fonte: Lino,J.S. [et al.] (2012))	25
Figura 12 - Implementação da metodologia BIM no projeto da ETAR do Ave (Fonte: Lino,J.S. [et al.] (2012))	26
Figura 13 - <i>Layout</i> do <i>Revit</i> (Fonte: Autodesk).....	28
Figura 14 - Fluxograma com o algoritmo do programa 2D DESIGN (Fonte: Pinheiro, N.D.M. (2012))	32
Figura 15 - Caixas de diálogo para inserção de dados relativos às secções: (a) tipo de secções transversais, (b) caso da secção retangular; (c) caso da secção em T.....	33
Figura 16 - Caixa de diálogo para obter os diagramas de interação: (a) Diagrama N- M_{total} ; (b) Diagrama M_x - M_y ;	34
Figura 17 - Exemplo de um diagrama de interação N- M_{total} retirado do programa 2D DESIGN.....	34

Figura 18 - Layout do programa Concrete Beam	35
Figura 19 - Layout da folha para exportação de resultados do programa RSA	37
Figura 20 - Planta da cave do edifício	41
Figura 21 - Planta do piso tipo do edifício	42
Figura 22 - Corte da rampa e cobertura.....	43
Figura 23 - Desenhos de arquitetura do edifício: (a) corte A-A do edifício; (b) corte B-B do edifício; (c) planta do piso tipo do edifício;.....	44
Figura 24 - Modelo numérico tridimensional do edifício no programa <i>Robot</i>	45
Figura 25 - Espectros de resposta para o sismo tipo I e tipo II.....	49
Figura 26 - Identificação do pilar P11 no modelo estrutural.....	51
Figura 27 - (a) Secção do elemento com a armadura calculada; (b) diagrama de extensões para a combinação condicionante (corte representado pela linha amarela)	53
Figura 28 - Direção da armadura utilizada pelo 2D DESIGN.....	54
Figura 29 - Identificação do pilar P12 no modelo <i>Robot</i>	55
Figura 30 - (a) Secção do elemento com a armadura calculada; (b) diagrama de extensões para a combinação condicionante (corte representado pela linha amarela)	57
Figura 31 - Esquema estrutural da viga V4.0	58
Figura 32 - Envoltente de esforço transverso na viga em estudo: (a) diagramas provenientes da folha de cálculo; (b) diagramas provenientes do programa <i>Robot</i> ;.....	60
Figura 33 - (a) Duas hipóteses de armaduras; (b) representação gráfica da envolvente de esforço transverso e o valor limite resistente das hipóteses inseridas;.....	60
Figura 34 - Diagramas tensão-extensão	61
Figura 35 - Envoltente dos momentos flectores da viga em estudo: (a) diagramas provenientes da folha de cálculo; (b) diagramas provenientes do programa <i>Robot</i> ;.....	62
Figura 36 - (a) hipóteses de armaduras para resistir ao momento fletor na viga em estudo; (b) representação gráfica da envolvente e o valor limite resistente das hipóteses inseridas. ..	63
Figura 37 - Modelo da laje do piso tipo	64
Figura 38 - (a) Cálculo da altura equivalente da laje aligeirada; (b) criação desta laje no programa <i>Robot</i>	65
Figura 39 - Esforços para cálculo de armaduras inferiores na direção yy - zona aligeirada ...	66
Figura 40 - Esforços para cálculo de armaduras inferiores na direção xx - parte aligeirada...	66
Figura 41 - Esforços para cálculo de armaduras inferiores na direção yy - parte maciça.....	67

Figura 42 - Esforços para cálculo de armaduras inferiores na direção xx - parte maciça.....	67
Figura 43 - Esforços para cálculo de armaduras superiores na direção yy - parte maciça	68
Figura 44 - Esforços para cálculo de armaduras superiores na direção xx - parte maciça	68
Figura 45 - Representação da redistribuição dos valores de momento de pico sobre os pilares.	69
Figura 46 - Pilar considerado para o cálculo da armadura de punçoamento	70
Figura 47 - (a) Desenho em planta da armadura de punçoamento; (b) corte 1-1.....	71
Figura 48 - Deslocamentos verticais elásticos das lajes dos pisos elevados	72
Figura 49 - Layout da folha de cálculo para a verificação em serviço	72
Figura 50 - Modelo paramétrico do edifício em estudo: (a) representação global da estrutura; (b) cobertura metálica do edifício; (c) <i>render</i> de um piso tipo;.....	76
Figura 51 - Elementos estruturais disponíveis no <i>Revit Structural</i>	77
Figura 52 - Base de dados dos tipos de materiais do <i>Revit</i>	77
Figura 53 - Exemplo da criação de um elemento pilar modificando as características de um elemento existente.....	78
Figura 54 - Criação de uma nova família no <i>Revit</i>	79
Figura 55 - Modelo analítico em <i>Revit</i>	80
Figura 56 - Caixa de diálogo de atualização do modelo de <i>Revit</i> e envio para o <i>Robot</i> <i>Structural Analysis</i>	81
Figura 57 - ligação bidirecional entre o <i>Revit</i> e o <i>Robot</i>	82
Figura 58 - Planta estrutural do reservatório	83
Figura 59 - Modelos numéricos: (a) modelo da laje de fundo e paredes; (b) modelo da laje de cobertura e pilares interiores	84
Figura 60 - Ação do sismo nas paredes do reservatório (adaptado: Appleton.J (1999))	87
Figura 61 - Esforços para dimensionar a armadura inferior da laje de fundo	89
Figura 62 - Esforços para dimensionar a armadura superior da laje de fundo.....	89
Figura 63 - Vista isométrica do primeiro piso.....	90
Figura 64 - Alçado lateral	91
Figura 65 - Vista da parte frontal do edifício	91
Figura 66 - Vista isométrica da parte traseira do edifício	92
Figura 67 - Vista isométrica da parte frontal do edifício	92

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Relações da conceção e desenvolvimento do projeto (adaptado: Lebet.J.P (2009))	3
Tabela 2 - Fases de um projeto	4
Tabela 3 - Valores recomendados de $w_{máx}$ (mm) (EN 1992-1-1 (2004)).....	14
Tabela 4 - Classificação do nível de desenvolvimento (LOD) (adaptado: BIMForum, 2013)	20
Tabela 5 - Exemplos de plataformas e ferramentas BIM de análise de estruturas	27
Tabela 6 - Valores das restantes cargas permanentes e sobrecargas de utilização consideradas no edifício	47
Tabela 7 - Valores das cargas relativas à ação do vento por piso	48
Tabela 8 - Combinações de ações utilizadas no modelo	50
Tabela 9 - Explicação da nomenclatura de identificação adotada nas células da primeira coluna das tabelas 10 e 13.....	50
Tabela 10 - Esforços e rácios correspondentes a um troço do pilar P11 (barra 194)	52
Tabela 11 - Combinação condicionante para o troço do pilar P11 (barra 194)	53
Tabela 12 - Tabela resumo do dimensionamento de todos os troços do pilar P11.....	54
Tabela 13 - Esforços e rácios correspondentes a um troço do pilar P12 (barra 199)	56
Tabela 14 - Combinação mais condicionante para o troço do pilar P12 (barra 199)	57
Tabela 15 - Tabela resumo de dimensionamento de todos os troços do pilar P12.....	58
Tabela 16- Propriedades dos blocos de aligeiramento da laje fungiforme	64
Tabela 17 - Armaduras inferiores e superiores, respetivamente, consideradas nas zonas maciças	69
Tabela 18 - Armaduras consideradas nas zonas aligeiradas	69
Tabela 19 - Tabela do cálculo da armadura de punçoamento.....	71
Tabela 20 - Combinação de ações para as paredes e laje de fundo.....	88
Tabela 21 - Combinação de ações para a cobertura.....	88

1. INTRODUÇÃO

A técnica de construção de estruturas em betão armado aliada aos recursos tecnológicos de análise estrutural que dispomos atualmente, permitem construir estruturas de edifícios cada vez mais complexas, exigindo por sua vez uma melhor articulação entre os vários intervenientes que participam no seu desenvolvimento.

Sendo cada vez mais importante a partilha de informação entre as diferentes especialidades de um projeto de engenharia e, para uma mais fácil execução do mesmo, recorre-se muitas vezes a ferramentas BIM (*Building Information Modeling*). Estas ferramentas permitem uma gestão integrada e eficiente de um conjunto de informações geradas e mantidas durante todo o ciclo de vida de um edifício e que na maioria dos casos ultrapassam a própria vertente do projeto.

O presente trabalho enquadra-se no âmbito de um estágio académico em ambiente empresarial no domínio das estruturas de engenharia civil, e que tem como objetivo aprofundar e desenvolver conhecimentos nas diversas fases de projeto de um edifício desde a conceção estrutural passando pela análise e dimensionamento da estrutura e culminando na elaboração do projeto de execução incluindo peças desenhadas.

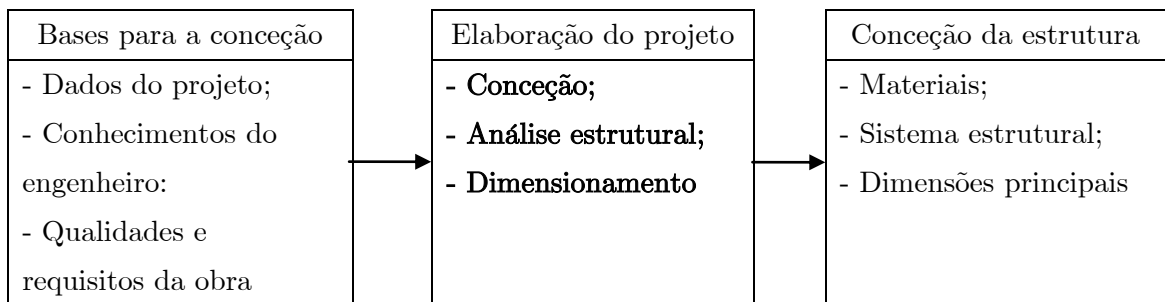
Complementarmente, é proposto o desenvolvimento, a integração e a aplicação de uma metodologia BIM ao projeto de estruturas de um edifício tendo em vista a interligação entre os programas de cálculo automático e os programas de desenho. Com esta ligação bidirecional pretende-se automatizar e tornar mais eficiente o processo de geração de peças desenhadas, de modo a ser mais robusto face a possíveis alterações do modelo de cálculo da estrutura.

O cumprimento destes objetivos passou pelo acompanhamento de um projeto real em ambiente empresarial. O edifício projetado corresponde a um hotel com dez pisos elevados e um piso enterrado localizado em Maputo, Moçambique. O trabalho foi realizado em colaboração com a empresa FASE - Estudos e Projectos S.A., que baseia a sua estratégia de atuação na área de serviços de engenharia e arquitetura abrangendo as diversas fases de elaboração de projetos.

2. PROJETO DE ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL

Na elaboração de um projeto de engenharia a concepção representa uma parte essencial dessa atividade. A concepção passa pela definição das características principais da estrutura, pré-dimensionamento, análise estrutural, dimensionamento dos elementos estruturais, elaboração de peças escritas, entre outras tarefas. A Tabela 1 representa esquematicamente as relações presentes na concepção e desenvolvimento do projeto.

Tabela 1 - Relações da concepção e desenvolvimento do projeto (adaptado: Lebet.J.P (2009))



No presente capítulo serão abordados as etapas para a elaboração de um projeto de um edifício, salientando-se a parte de modelação e análise estrutural e do dimensionamento de elementos em betão armado.

2.1. ETAPAS DA ELABORAÇÃO DE UM PROJETO DE UM EDIFÍCIO

A elaboração do projeto de estruturas de um edifício numa dada localização e para uma utilização definida, compreende diversas fases até à sua execução em obra. De seguida, apresenta-se um quadro resumo das várias fases de um projeto e o respetivo resultado.

Tabela 2 - Fases de um projeto

Fases de projeto	Tarefas	Executáveis
Estudo prévio	- Conceção geral de várias soluções estruturais	-Viabilização técnica e económica de um conjunto estrito de soluções
Anteprojecto	-Conceção, pré-dimensionamento das várias soluções	-Escolha de solução estrutural mais viável
Projecto de execução	- Avaliação e escolha de uma solução - Análise e dimensionamento estrutural	-Elaboração de peças desenhadas -Elaboração de peças escritas -Mapa de trabalhos e quantidades -Especificações técnicas

2.1.1. Estudo prévio

O objetivo do estudo preliminar, também designado por estudo prévio, é estudar e avaliar as diferentes soluções estruturais para a obra. Esta fase serve sobretudo para avaliar a viabilidade do projeto numa perspetiva global, e estimar os respetivos custos ainda antes de se avançar com mais detalhes do projeto.

Com base nos dados fornecidos pelo dono de obra ou pelo arquiteto, o engenheiro vai desenvolver várias soluções possíveis, que serão realizadas com um maior ou menor detalhamento, dependendo da complexidade do projeto.

O estudo preliminar constitui uma fase da conceção estrutural onde geralmente ainda não existem cálculos. O engenheiro projetista estabelece a geometria da estrutura, atribuindo uma dimensão aos elementos estruturais com base na sua experiência.

Esta fase é de grande importância para o projeto final, pois é aqui que se faz a avaliação de diferentes soluções estruturais, escolhendo uma ou mais soluções que serão desenvolvidas em fases posteriores.

2.1.2. Anteprojeto

O anteprojeto tem como objetivo selecionar a solução estrutural mais adequada e que servirá de base ao projeto de execução. Esta fase é baseada nas soluções selecionadas no estudo prévio. Para cada proposta selecionada são definidas com mais detalhe as dimensões dos elementos estruturais (lajes, vigas e pilares) com base em verificações de segurança em serviço e rotura.

Esta etapa pode ser considerada como a mais importante no processo de conceção estrutural de um edifício, uma vez que as principais decisões que condicionam todo o projeto são aqui tomadas, permitindo uma estimativa suficientemente rigorosa dos custos de obra.

A avaliação das diferentes soluções variantes deve ter em conta os seguintes aspetos:

- Respeitar as exigências de utilização;
- Facilidade de execução;
- Durabilidade e manutenção;
- Estética;
- Duração e custo dos trabalhos.

2.1.3. Projeto de execução

O projeto de execução consiste na preparação de todos os elementos necessários à construção da estrutura do edifício.

Esta atividade compreende não só a análise estrutural detalhada e o dimensionamento dos elementos estruturais, como também a elaboração das peças desenhadas e das peças escritas, onde se incluem a memória descritiva e justificativa, mapa de trabalhos e quantidades e especificações técnicas relativas a materiais e execução dos trabalhos

2.2. MODELAÇÃO E ANÁLISE ESTRUTURAL

O desenvolvimento tecnológico computacional ao longo dos tempos permitiu criar e aperfeiçoar ferramentas de cálculo automático e análise de estruturas cada vez mais sofisticadas. Estas ferramentas têm-se revelado bastante eficientes no que diz respeito à otimização do dimensionamento de estruturas e do tempo necessário à tarefa de conceção.

A modelação e análise estrutural é geralmente desenvolvida com base num programa de cálculo automático, recorrendo a modelos de cálculo tridimensionais baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF). Este método consiste num procedimento numérico de análise de estruturas que possibilita a estimativa dos valores das tensões, deformações entre outras grandezas nos vários elementos que descrevem a estrutura, e com base nos quais é realizado o dimensionamento estrutural. No caso de edifícios é corrente o recurso a elementos finitos de barra e elementos finitos de casca.

Na Figura 1 apresenta-se um exemplo de uma estrutura onde se podem observar os elementos de barra para modelar as vigas e pilares, e elementos de casca para modelar as lajes, neste caso com a geração da correspondente malha de elementos finitos.

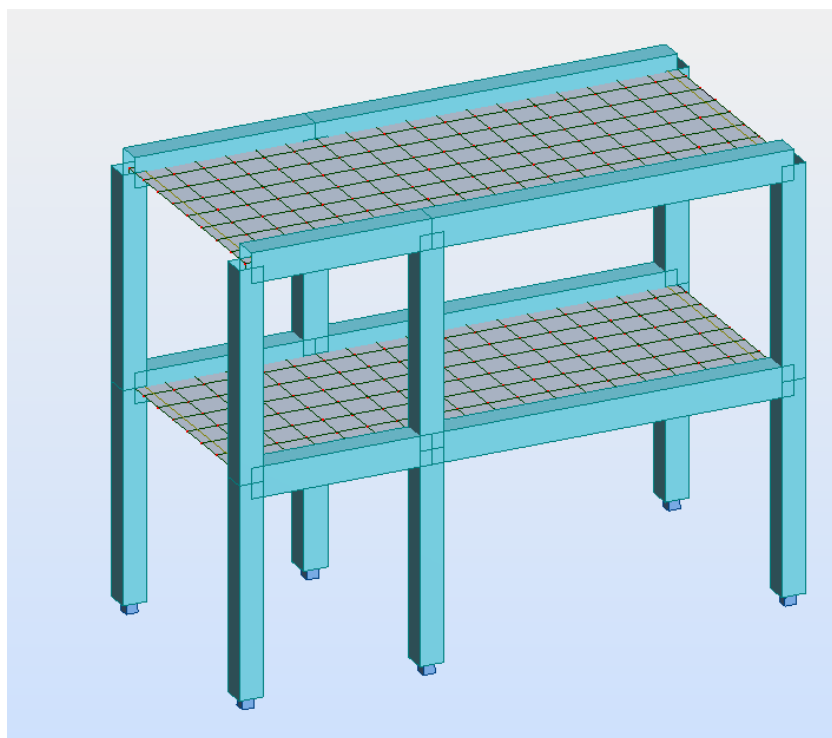


Figura 1 - Modelo de elementos finitos de um edifício de habitação

Para o dimensionamento dos elementos estruturais, recorre-se a folhas de cálculo automático, geralmente em ambiente Excel, que realizam o pós-processamento dos resultados obtidos dos programas de cálculo automático. A exportação automática de dados e resultados do modelo estrutural é facilitada com recurso ao *Application Programming Interface* (API). Os APIs permitem ao utilizador a interação entre os vários programas, geralmente entre o programa de cálculo de estruturas e programas do Office, através de uma linguagem de programação própria, para posteriormente serem utilizadas as ferramentas de dimensionamento e verificação de segurança de acordo com as normas e regulamentos pretendidos.

2.3. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL AOS ESTADOS LIMITES

Os estados limites são situações de referência que não devem ser atingidas. O Estado Limite Último (ELU) corresponde à situação em que a estrutura sofreu danos irreparáveis sendo que deve-se verificar a segurança à flexão, esforço transversal e encurvadura dos

elementos reticulados. O Estado Limite de Utilização (ELS) corresponde a situações em que os danos provocados são menos graves sendo que corresponde a limitar a deformação dos elementos e controlar os níveis de fendilhação.

Para o cálculo de elementos estruturais armado recorre-se a folhas de cálculo automático. Para secções de betão armado incorpora-se nas folhas o cálculo orgânico que consiste no equilíbrio de esforços a que a secção está sujeita. Uma vez que as equações de equilíbrio não são lineares recorre-se a um método iterativo com base em aproximações sucessivas, denominado por método de Newton-Rapshon (Pinheiro, N.D. Mota [et al] (2012)). Na Figura 2 está representado um fluxograma que ilustra o dimensionamento de secções de betão armado com apoio de um modelo de cálculo do qual são retirados os esforços de dimensionamento para a verificação de segurança aos Estados Limite (Últimos e de Utilização), geralmente através folhas de cálculo parametrizáveis.

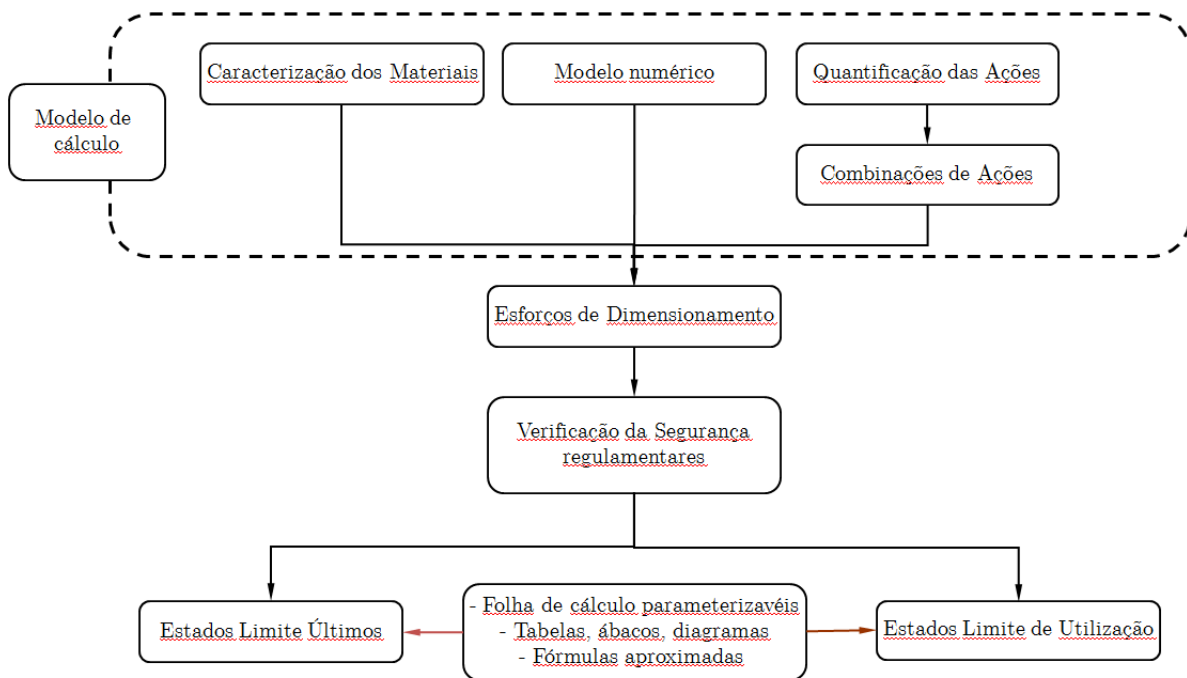


Figura 2 - Fluxograma representativo do dimensionamento de secções de betão armado com base na interação de folhas de cálculo com programas de cálculo automático (adaptado: Pinheiro, 2012).

2.3.1. Dimensionamento ao Estado Limite Último (ELU)

O cálculo de secções de betão armado em flexão desviada, constitui um problema não linear, uma vez que o equilíbrio dos esforços exteriores é realizado à custa de esforços internos determinados com base em leis não lineares. Traduzindo-se as condições de equilíbrio através de um sistema de equações não lineares, a solução do problema não se pode, em geral, exprimir de forma analítica em função da posição do eixo neutro. Nestes casos, o problema não admite, assim, uma solução teórica exata, pelo que é necessário recorrer a métodos iterativos de resolução de sistemas de equações não lineares. A solução do problema passa pela resolução das equações de equilíbrio conhecidas, a geometria da secção de betão, a posição das armaduras e os esforços exteriores de solicitação.

A - Diagrama tensão-extensão do betão

Assim, o comportamento dos materiais é modelado através de uma relação tensão-extensão não lineares (Pinheiro, N.D. Mota [et al] (2012)). No caso do betão, a EN 1992-1-1 de 2004, estabelece os diagramas parábola-retângulo para o dimensionamento de secções de betão armado. Este diagrama está representado na Figura 3 e é definido através de uma curva de 2º grau e um segmento reto até à extensão última definido com a tensão de cálculo resistente à compressão (f_{cd}).

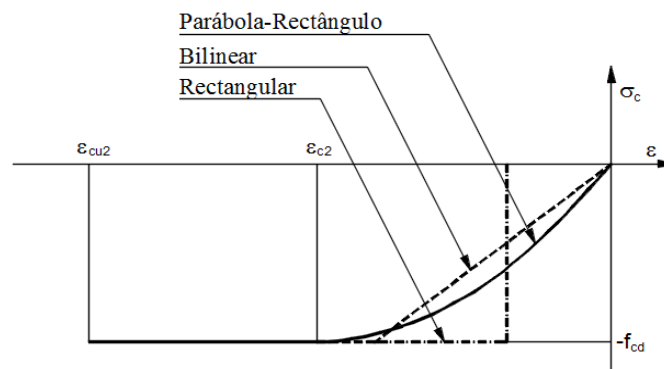


Figura 3 - Diagrama parábola-retângulo para dimensionamento de secções de betão armado

O valor de cálculo da tensão resistente à compressão do betão em função da deformação é obtido através de:

$$\sigma_c(y) = \begin{cases} f_{cd} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon(y)}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] & \text{se } 0 < \varepsilon(y) \leq \varepsilon_{c2} \\ f_{cd} & \text{se } \varepsilon_{c2} < \varepsilon(y) \leq \varepsilon_{cu2} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.2)$$

em que:

γ_c – coeficiente parcial de segurança relativo ao betão;

α_{cc} – coeficiente que tem em conta os efeitos de fluência do betão;

f_{ck} – valor característico da tensão de rotura do betão;

n – expoente definido no Quadro 3.1 da EN 1992-1-1 de 2004 ($n = 2$ para classes de resistência inferiores a C55);

ε_{c2} – extensão mínima para ser atingida a resistência máxima (quadro 3.1 do EN 1992-1-1 de 2004);

ε_{cu2} – extensão última (Quadro 3.1 do EN 1992-1-1 de 2004).

B - Diagrama tensão-extensão do aço das armaduras

No caso do aço, o EC2, estabelece uma relação tensão-extensão bilinear, representada na Figura 4.

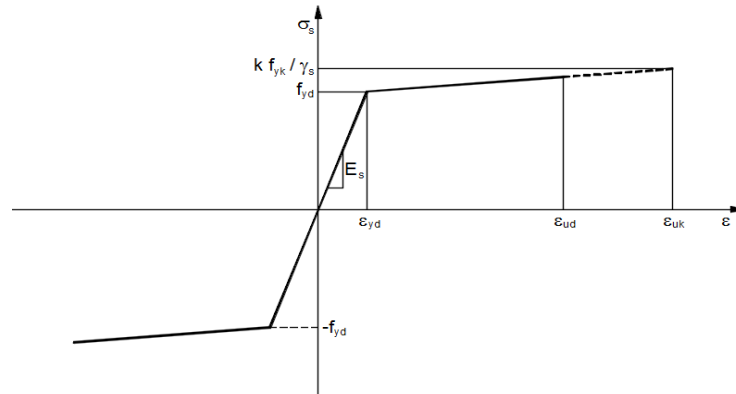


Figura 4 - Diagrama de cálculo tensão-extensão do aço das armaduras para betão armado

Sendo f_{yd} definido através da seguinte expressão:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (2.3)$$

Para a caracterização do diagrama de cálculo do aço são necessários os seguintes parâmetros:

γ_s - coeficiente parcial de segurança relativo ao aço;

f_{yk} - valor característico da tensão de cedência do aço;

E_s - módulo de elasticidade do aço;

k - coeficiente de endurecimento;

ϵ_{ud} - valor de cálculo da extensão correspondente à tensão máxima;

ϵ_{uk} - valor característico da extensão do aço da armadura para o betão armado na carga máxima.

C - Modos de Rotura

A análise das deformações da secção é feita diretamente a partir da lei de conservação das secções planas, admitindo-se uma aderência perfeita entre o betão e o aço até à rotura. O domínio de deformação que caracteriza o esgotamento da capacidade resistente da secção, compreende três modos de rotura, dois com ruína do betão (Figura 5 (a)) e um devido ao esgotamento do aço (Figura 5 (b)).

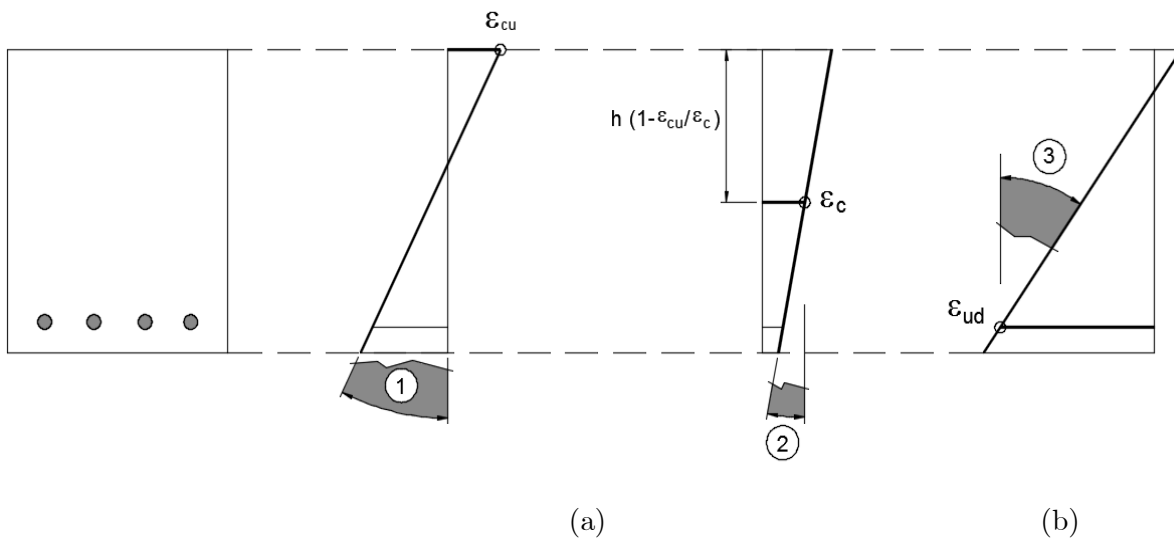


Figura 5 - Modos de rotura: (a) rotura pelo betão; (b) rotura pelo aço

(adaptado: Pinheiro, N.D.M. [et al]-2012.)

No caso da rotura pelo betão há que distinguir as situações:

- (1) limite para a extensão de compressão do betão (ϵ_{cu});
- (2) limite para a extensão de compressão simples do betão (ϵ_c), este modo distingue-se do modo (1) devido ao facto da secção estar toda à compressão;

em que:

ϵ_{cu} - extensão última do betão à compressão;

ϵ_c - extensão limite do betão à compressão.

No caso da rotura pelo aço há que distinguir a situação:

(3) limite para a extensão de tração do aço (ε_{ud});

em que:

ε_{ud} - extensão do aço da armadura para o betão armado sob tensão máxima.

2.3.2. Dimensionamento ao Estado Limite de Serviço (ELS)

Na EN 1992-1-1 (2004) considera os Estados Limite de Serviço associados a:

- limitação das tensões;
- controlo da fendilhação;
- controlo das deformações.

No caso da limitação das tensões a EN 1992-1-1 (2004) refere que a tensão de compressão do betão deve ser limitada de modo a evitar a formação de fendas longitudinais, a micro-fendilhação ou níveis de fluência elevados, nos casos em que estes fenómenos possam ter efeitos inaceitáveis para o funcionamento da estrutura.

Os valores da tensão de compressão no betão devem satisfazer os seguintes limites:

- $0,6.f_{ck}$ para a combinação característica de ações em estruturas pertencentes às classes de exposição XD, XF e XS (de acordo com a EN 206-1 (2007));
- $0,45.f_{ck}$ para a combinação quase-permanentes de ações.

As tensões de tração na armadura ordinária devem ser limitadas a fim de evitar as deformações não elásticas, assim como níveis de fendilhação ou de deformação não aceitáveis [EN 1992-1-1 (2004)]. Sendo assim deve-se limitar a tensão na armadura a $0,8 f_{yk}$ para a combinação característica de ações.

A fendilhação deve ser limitada de modo a não prejudicar o correto funcionamento da estrutura e a sua durabilidade [EN 1992-1-1 (2004)]. A largura de fendas (w_k) pode ser calculada através da expressão abaixo apresentada.

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (2.4)$$

em que:

$s_{r,max}$ - distância máxima entre fendas;

ε_{sm} - extensão média das armaduras, incluindo o efeito das deformações e considerando a contribuição do betão tracionado;

ε_{cm} - extensão média do betão entre fendas

O valor máximo da abertura de fendas ($w_{m\acute{a}x}$) é dado pela Tabela 3.

Tabela 3 - Valores recomendados de $w_{m\acute{a}x}$ (mm) (EN 1992-1-1 (2004))

<i>Classe de Exposição</i>	<i>Elementos de betão armado e elementos de betão pré-esforçado com armaduras não aderentes</i>	<i>Elementos de betão pré-esforçado com armaduras aderentes</i>
	<i>Combinação de acções quase-permanente</i>	<i>Combinação de acções frequente</i>
<i>X0, XC1</i>	<i>0,4¹</i>	<i>0,2</i>
<i>XC2, XC3, XC4</i>	<i>0,3</i>	<i>0,2²</i>
<i>XD1, XD2, XS1, XS2, XS3</i>		<i>Descompressão</i>
<i>NOTA 1: Para as classes de exposição X0 e XC1, a largura de fendas não tem influência sobre a durabilidade e este limite é estabelecido para dar em geral um aspecto aceitável. Na ausência de especificações no que respeita ao aspecto, este limite poderá ser reduzido.</i>		
<i>NOTA 2: Para estas classes de exposição deverá verificar-se, ainda, a descompressão para a combinação quase-permanente de acções.</i>		

A deformação deve ser controlada de modo a não comprometer o funcionamento e o aspeto da estrutura. A deformação dos elementos estruturais não deve pôr em causa a integridade dos elementos não estruturais, tais como envidraçados, paredes divisórias,

revestimentos, entre outros, para além de não dever condicionar o funcionamento de equipamentos, nem proporcionar a acumulação de águas ou outros.

Em edifícios correntes a flecha de uma viga em relação aos seus apoios, determinada para a combinação de ações quase-permanente não deve exceder $L/250$. Para diminuir a flecha pode ser utilizada uma contra-flecha, não podendo esta exceder $L/250$. Para não danificar os elementos não estruturais a deformação que ocorre depois da construção destes elementos deve ser limitada a $L/500$. Na Figura 6 está representado um esquema de uma viga onde se ilustra a flecha (f) e a contra-flecha (cf) em relação ao vão (L).

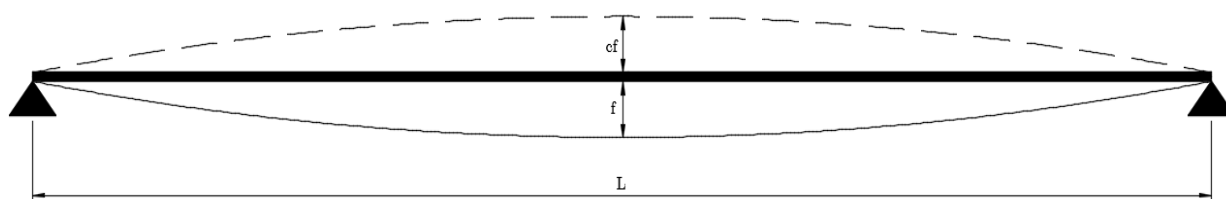


Figura 6 - Representação gráfica dos limites de deformação de uma viga (flecha e contra-flecha)

3. INTEGRAÇÃO DE METODOLOGIAS BIM NO PROJETO DE ESTRUTURAS

O BIM (*Building Information Modeling*) pode ser definido como um conjunto de processos interligados que facilitam a produção, a comunicação e a análise do projeto, possibilitando uma eficiente transmissão de informações entre os diferentes intervenientes. Atualmente o BIM é reconhecido como um importante desenvolvimento na indústria da arquitetura, engenharia e construção (AEC), sendo em alguns países, obrigatória a sua utilização nos projetos de edifícios. Em Portugal, existem alguns projetos com a aplicação desta metodologia mas devido a alguns entraves a sua adoção está a ser lenta. (Lino, J. S. [et al.] (2012)). Trata-se de um novo método de trabalho e não envolve apenas a implementação de um *software*, requerendo geralmente um modelo 3D que simula a realidade da obra e inclui todos os requisitos impostos pelo dono de obra, para além de dar uma perspetiva real da forma e tempo de construção, dos custos, das intervenções a realizar, entre outros. Sendo assim, estas metodologias permitem uma melhoria da qualidade da obra e uma gestão mais eficiente da mesma ao longo do seu ciclo de vida. Porém, o BIM ainda é pouco usado nas empresas devido sobretudo aos custos da sua implementação. Na Figura 7 ilustram-se os níveis de produtividade em função do tempo após a implementação de uma metodologia BIM. Trata-se de um investimento a longo prazo, existindo aquando do investimento inicial uma perda na produtividade devido à necessidade de aprendizagem, dos novos *softwares*, por parte dos utilizadores. Contudo, o investimento é ressarcido a longo prazo, devido à previsível eficiência e eficácia desta metodologia.

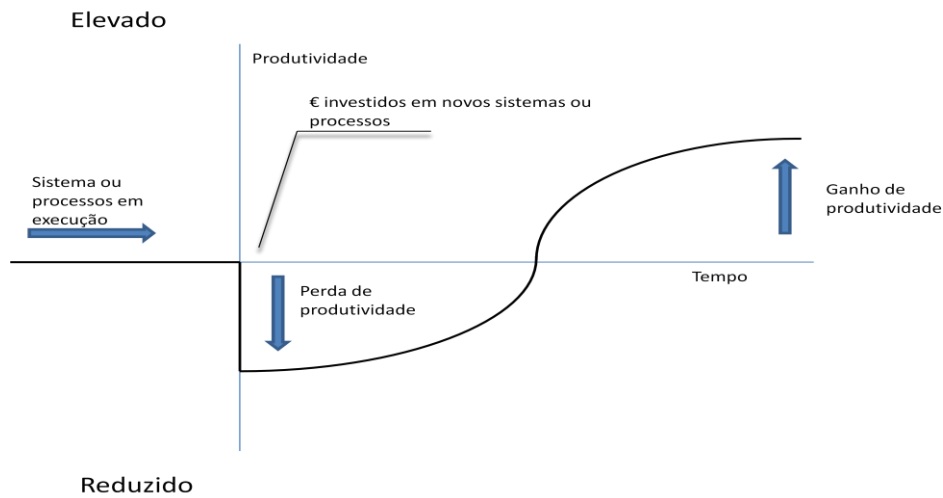


Figura 7 - Representação gráfica dos níveis de produtividade ao longo do tempo (adaptado: Portugal STEEL (2014))

3.1. CONCEITOS DE BASE

Atualmente, nos métodos de projeto tradicionais existem problemas devido à desorganização e falta de comunicação entre os vários intervenientes do projeto, originando assim atrasos na elaboração do mesmo. O BIM é uma metodologia de partilha de informação, que vem revolucionar os métodos de projeto tradicionais uma vez que é baseada num modelo tridimensional do edifício comum aos vários intervenientes, ajudando arquitetos, engenheiros e construtores num planeamento mais eficiente e otimizado do projeto do edifício.

Este modelo contém informação sobre as características dos elementos que o constituem quanto à sua geometria, propriedades dos materiais (BIM 3D), faseamento construtivo/controlo de tempos (BIM 4D) e controlo dos custos da obra (BIM 5D). Esta informação é acessível através de *software*. Mais recentemente existem já fluxos que incorporam o BIM 6D e o BIM 7D que correspondem à sustentabilidade e à gestão das instalações, respetivamente.

Nas Figura 8 (a) e (b) apresentam-se dois cronogramas, onde se pode comparar a interação entre os intervenientes num projeto elaborado da forma tradicional e num projeto

com recurso ao BIM, respetivamente. Comparando as duas, podemos observar que existe uma maior facilidade em termos de organização, comunicação e acesso a documentos no caso da Figura 8 (b).

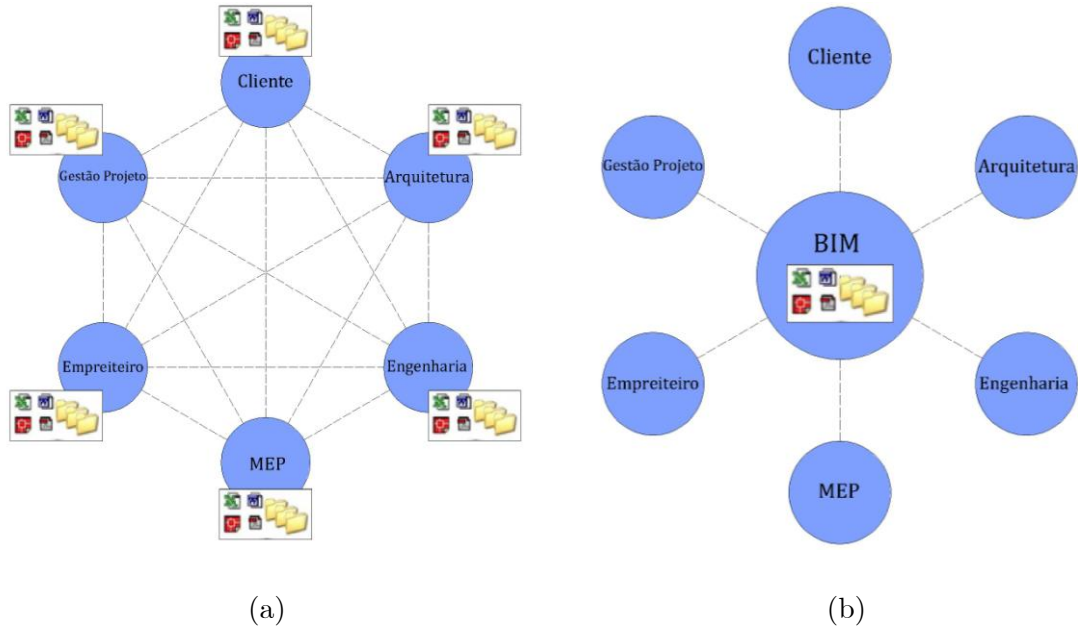


Figura 8 - Cronograma representativo da interação de cada interveniente num projeto: (a) projeto elaborado da forma tradicional; (b) projeto com recurso à metodologia BIM

3.1.1. Modelação paramétrica

Em contexto BIM, um objeto não é só uma representação geométrica. Para além da sua geometria parametrizada, o objeto pode conter outra informação nomeadamente as suas propriedades (tipo de material, massa, propriedades acústicas, etc.), informação sobre o seu posicionamento espacial, fabricante, custos, ou qualquer outro tipo de informação relevante para o projetista (Fernandes J. P. M. (2013)).

O conceito dos objetos paramétricos é fundamental para a compreensão do BIM e da sua diferenciação em relação aos tradicionais objetos 3D (Eastman C. et al., 2008). Numa modelação paramétrica o elemento é totalmente editável, mantendo sempre a relação com os

elementos adjacentes. A título de exemplo, se mudarmos a cota de uma viga os pilares que a suportam são automaticamente corrigidos.

O LOD (*Level Of Development*), como o nome indica, é o nível de desenvolvimento de um elemento modelado. O LOD encontra-se dividido em cinco níveis diferentes: 100, 200, 300, 400 e 500. Contudo, cada nível não tem um âmbito restrito.

É de salientar que esta especificação não substitui um plano de execução do projeto BIM, mas é utilizado para o complementar, proporcionando um meio de definir modelos para troca de informações específicas entre as entidades. Na Tabela 4 está descrito os diversos tipos de LOD de um exemplo em BIM e uma imagem representativa do mesmo.

Tabela 4 - Classificação do nível de desenvolvimento (LOD) (adaptado: BIMForum, 2013)

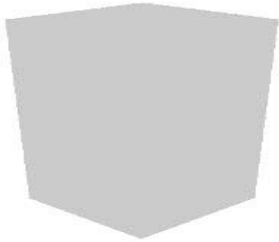
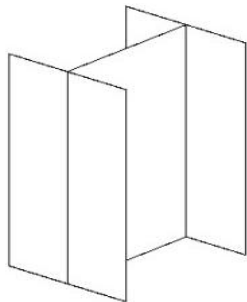
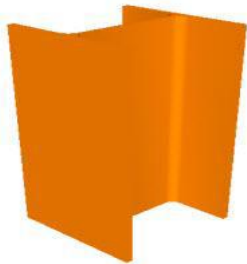
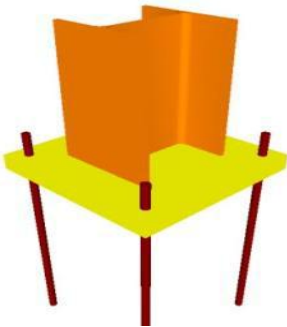
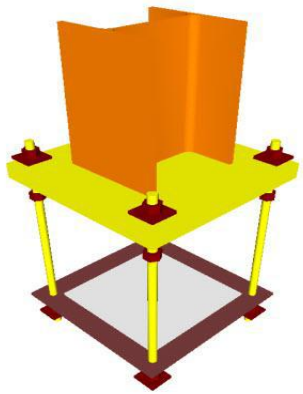

LOD	Descrição	Exemplo de aplicação	
100	Elemento representado no modelo através de um símbolo ou outra representação genérica.	Representação genérica do volume ocupado pelo elemento.	
200	Elemento representado no modelo como um sistema genérico , objeto ou um conjunto de informação aproximadas como tamanho, localização, forma e orientação.	Representação genérica do elemento, com aproximações à sua forma real.	

Tabela 4 (continuação) - Classificação do nível de desenvolvimento (LOD) (adaptado: BIMForum, 2013)

LOD	Descrição	Exemplo de aplicação	
300	Elemento representado no modelo como um sistema específico , objeto ou um conjunto de informação em relação ao tamanho, localização, forma e orientação.	A modelação do elemento inclui o tamanho específico da alma e banzos para definir com a orientação correta e a definição do material.	
350	O elemento é representado no modelo como um sistema específico, objeto ou um conjunto específico em termos de tamanho, forma, orientação e interfaces com outros elementos da obra..	A modelação do elemento inclui adicionalmente a localização exata dos conectores, elementos típicos de uma ligação, como chapa de aço e qualquer tipo de reforço estrutural.	
400	Elemento é representado no modelo como um sistema específico, objeto ou um conjunto específico em termos de tamanho, localização, forma, quantidade e orientação com detalhe elevado, fabricante, montagem.	A modelação do elemento inclui adicionalmente soldas, anilhas, porcas e todos os elementos de montagem.	
500	Reproduz o modelo final, tal e qual como foi construído.	A modelação representa o modelo final tal e qual foi construído (<i>as-build</i>). O modelo é armazenado numa base de dados para posterior integração em sistemas e operações de manutenção.	

O LOD, é por vezes interpretado como nível de detalhe e não como um nível de desenvolvimento, existindo diferenças importantes: o nível de detalhe diz respeito ao grau de pormenorização do elemento no modelo, enquanto o nível de desenvolvimento diz respeito à quantidade de informação contida no elemento.

3.1.2. Interoperabilidade

A interoperabilidade define-se como a aptidão de vários modelos/sistemas operarem em conjunto de forma a trocarem informações de forma eficiente.

Em relação à metodologia BIM, cujos principais objetivos são a colaboração, coordenação e comunicação entre as várias especialidades, é essencial que o processo de partilha de informação seja dependente no que toca à capacidade de se obter informação relevante sobre os modelos. Para tal, é necessária uma normalização dos formatos para a partilha de dados.

Para melhorar a interoperabilidade entre softwares foi criado o IFC (*Industry Foundation Classes*), desenvolvido pela *buildingSMART*, uma organização internacional que entre outros objetivos visa promover a troca de informação entre os diversos *softwares* usados na indústria AEC. O IFC é um formato de ficheiro aberto e estandardizado que permite a transferência de dados entre as ferramentas BIM.

Em 1997 foi lançada a primeira normalização IFC, tendo sido esta alvo de sucessivas atualizações e melhoramentos. Na Figura 9 são apresentados as evoluções recentes do formato IFC.

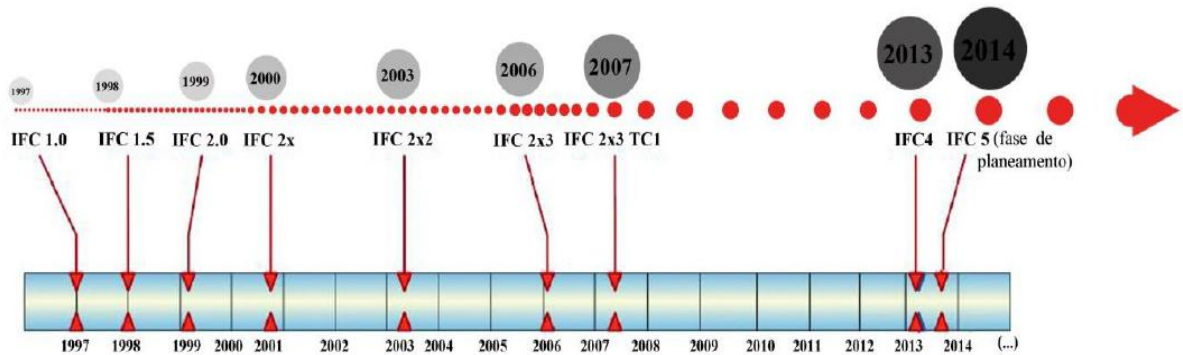


Figura 9 - Evolução cronológica do formato IFC (Fonte: *buildingSMART*, 2013)

Em relação ao IFC4, versão mais recente lançada pela *buildingSMART*, a mesma surgiu com os recursos mais desenvolvidos em comparação com os formatos anteriores, nomeadamente:

- melhor capacidade de especificação ao nível dos elementos de arquitetura e estruturais, designadamente com o alargamento das potencialidades paramétricas dos elementos;
- permite novos fluxos de trabalho BIM, designadamente a troca de modelos 4D e 5D, biblioteca de produtos, simulações térmicas e avaliações de sustentabilidade;
- aumenta a legibilidade e facilidade de acesso à documentação, com inúmeros conceitos de implementação e exemplos;
- correção de problemas técnicos encontrados no formato anterior, o IFC 2x3;
- permite a extensão do IFC para a especialidade das infraestruturas.

Atualmente está em fase de planeamento o formato IFC 5 onde se prevê o aumento das capacidades paramétricas e a extensão a novas especialidades dos projetos de engenharia civil.

3.2. APLICAÇÃO DO BIM AO PROJETO DE ESTRUTURAS

Nesta secção apresentam-se alguns exemplos de obras onde foram aplicadas metodologias BIM, em particular o Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões (Figura 10), o INESC II (Figura 10) e a ETAR do Ave (Figura 12).

Nestes projetos desde a primeira fase o BIM foi definido como a ferramenta preferencial de transmissão de informação entre os intervenientes. A aplicação desta metodologia facilitou a produção das peças documentais do processo, em particular a extração automática de plantas, cortes, alçados e pormenores.

No caso do Terminal de Cruzeiros, desde as primeiras fases conceptuais, o BIM foi adotado como ferramenta preferencial de transmissão de informação, quer entre os projetistas de estruturas e de arquitetura, quer com o dono de obra, para comunicação visual de soluções. Devido à elevada complexidade das formas da envolvente, foram identificadas dificuldades na sua importação direta pelo software BIM de modelação estrutural. (Lino, J.S. [et al.] (2012))

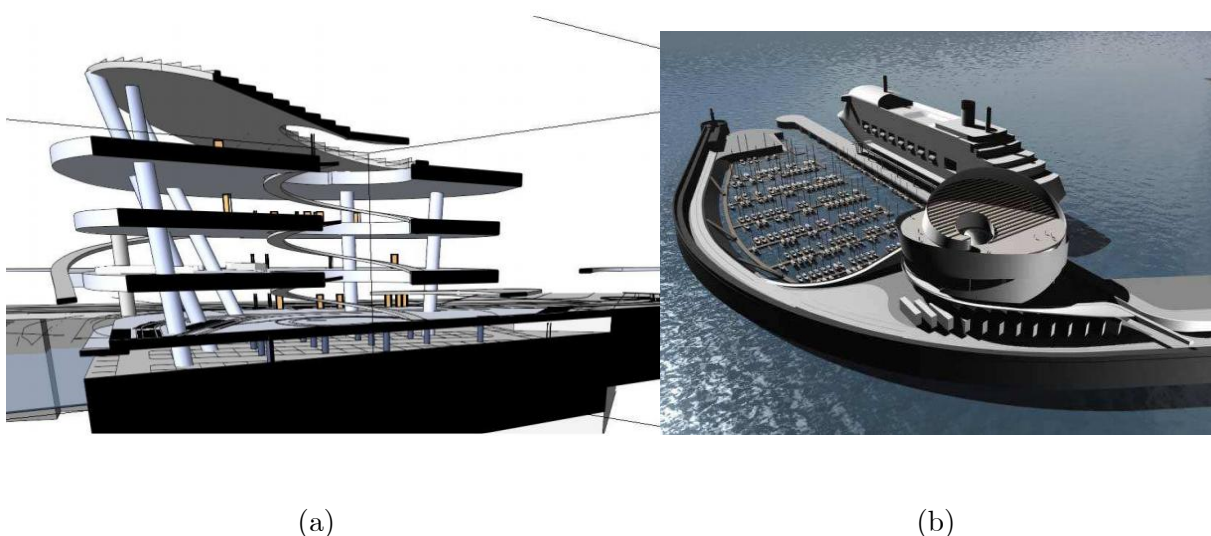


Figura 10 - Terminal de cruzeiros do porto de Leixões: (a) corte da estrutura; (b) vista tridimensional;
(Fonte: Lino, J.S. [et al.] (2012))

No projeto do INESC II a modelação com recurso à metodologia BIM facilitou a produção das peças desenhadas (extração automática de plantas, alçados, cortes e pormenores construtivos) assegurando assim o cumprimento dos prazos. De salientar, que apesar da extração automática das peças desenhadas, os projetistas recorreram também ao CAD 2D principalmente para o detalhe das peças em betão armado e pré-esforçado. (Lino, J.S. [et al.] (2012))

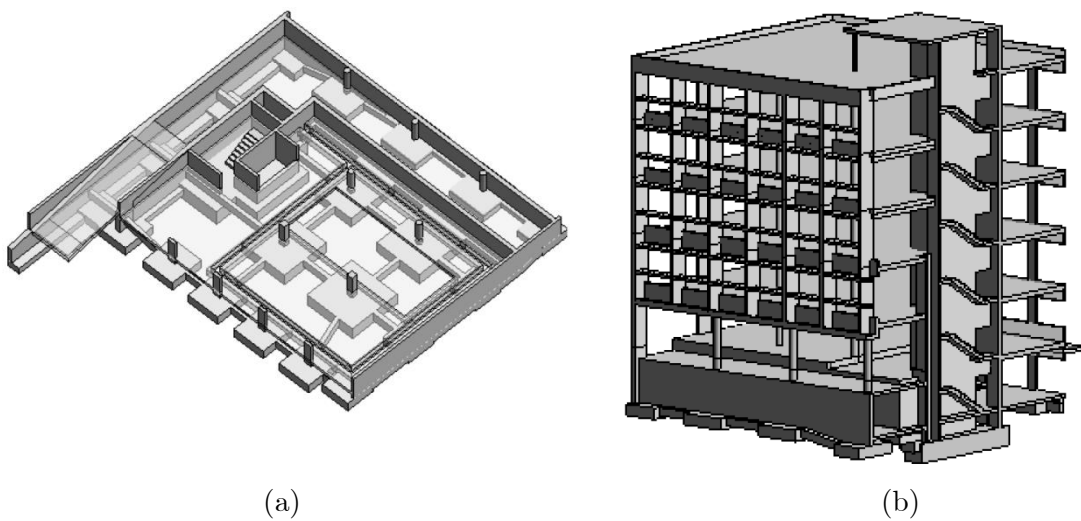


Figura 11 - Modelação do INESC II: (a) fundações do edifício; (b) visualização tridimensional do edifício
(Fonte: Lino, J.S. [et al.] (2012))

No projeto da ETAR do Ave foi aplicada a metodologia BIM para auxiliar o projeto de fundações e estruturas. A partilha do modelo optimizou as soluções recomendadas de modo a que fossem ao encontro das necessidades do projetista. Foi importante a eficácia da análise das implicações provocadas pela atualização de espessuras e soluções estruturais no projeto base, a qual permitiu otimizar as soluções de fixação de equipamentos e definir a sua implantação (Lino, J.S. [et al.] (2012)).



Figura 12 - Implementação da metodologia BIM no projeto da ETAR do Ave (Fonte: Lino, J.S. [et al.] (2012))

3.3. PLATAFORMAS E FERRAMENTAS BIM NAS ESTRUTURAS

“Quando se pensa em BIM, apenas se pensa no implementar de um software e não no implementar de uma nova metodologia de trabalho” (Maritan, 2013). Muitas vezes, pensa-se que o BIM é apenas a utilização de um *software* para a modelação de uma estrutura e não uma metodologia que define novas formas de trabalho. Contudo, persiste a ligação da metodologia BIM com os programas que simulam os processos de construção da obra. Assim, aparece a plataforma BIM, que é o núcleo, como apresentado na Figura 8, que permite armazenar, organizar e editar a informação. Estão incluídas nestas plataformas aplicações, designadas como ferramentas BIM, que têm como objetivo produzir um resultado específico, nomeadamente uma peça desenhada, relatórios de dados, entre outros. Na Tabela 5 apresenta-se alguns fabricantes de programas para as plataformas BIM e as respetivas ferramentas, neste caso específicas de cálculo estrutural.

Tabela 5 - Exemplos de plataformas e ferramentas BIM de análise de estruturas

Empresa	Plataforma BIM	Ferramenta BIM de análise estrutural
Autodesk	Revit	Robot Structural Analysis
Bentley Systems	Bentley	STAAD.pro Bentley RAM Structural System
Graphisoft	ArchiCAD	Interoperabilidade com outros programas.
Nemetschek	Allplan Architecture Allphan Engineering	Scia Engineer
Tekla Corporation	TEKLA Structures	Interoperabilidade com Robot Structural Analysis, SAP200, STAAD.pro.
Computers&Structures, Inc.	N/A	SAP2000

De seguida é apresentada uma pequena descrição das ferramentas BIM utilizadas no trabalho desenvolvido, nomeadamente, o *Revit* e o *Robot Structural Analysis* da Autodesk (Autodesk (2013)).

3.3.1. Revit

Esta plataforma BIM divide-se nas várias especialidades como a arquitetura (*Revit Architecture*), engenharia de estruturas (*Revit Structure*) e instalações mecânicas, elétricas e hidráulicas (*Revit MEP*). Contudo, hoje em dia, existe a plataforma *Revit Suite* que tem todas estas especialidades incorporadas. O *Revit* é um modelador paramétrico e contém bibliotecas de objetos (designadas por famílias) e materiais, sendo que o utilizador pode adicionar ou criar as suas próprias famílias. Com base nestas funcionalidades, é possível gerar desenhos 2D (cortes e pormenores construtivos) instantaneamente. Sendo um produto da *Autodesk*, o *Revit* tem uma ligação direta e bidirecional com os programas de cálculo comercializados pela mesma empresa, nomeadamente o *Robot Structural Analysis*. Porém, permite ainda a interoperabilidade com ficheiros do tipo *.ifc*. Na Figura 13 apresenta-se o *layout* do *Revit*.

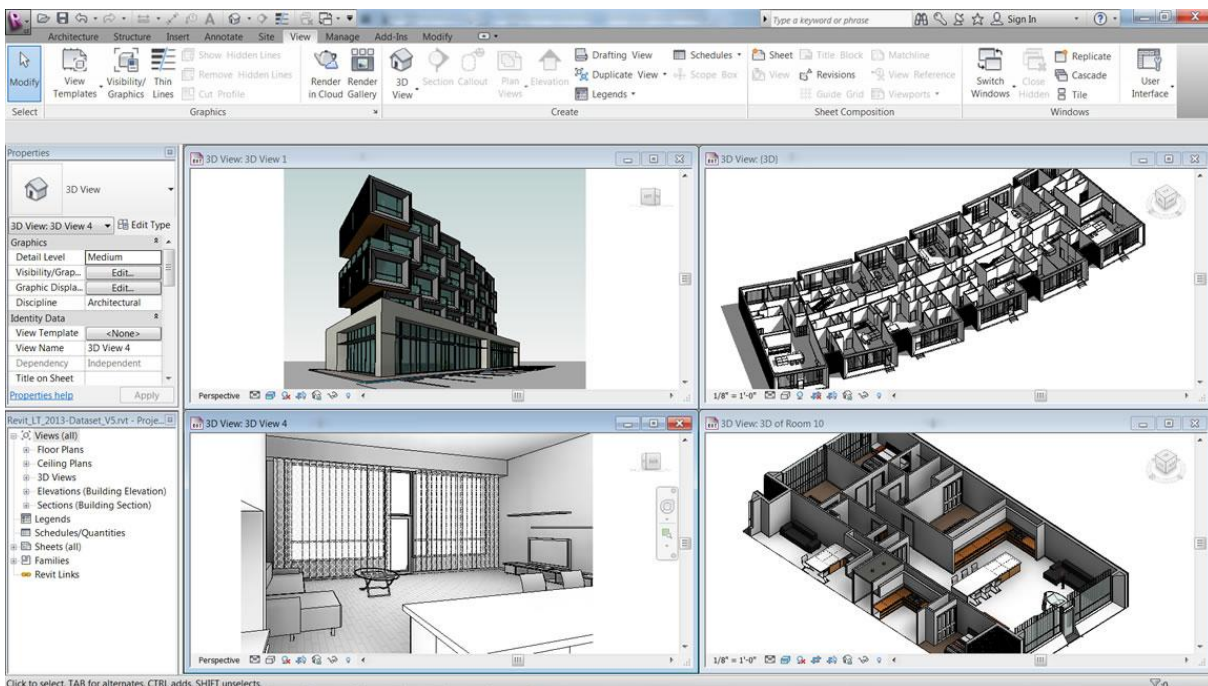


Figura 13 - *Layout do Revit* (Fonte: Autodesk)

3.3.2. Robot Structural Analysis

Esta ferramenta tem como função a análise estrutural, permitindo ao utilizador análises avançadas (análises estáticas, lineares, não lineares e dinâmicas) de diversos tipos de estruturas. O *Robot Structural Analysis*, doravante designado apenas por *Robot*, dispõe também de módulos avançados de dimensionamento de estruturas metálicas, de betão armado e de madeira. Como referido anteriormente o *software*, disponibiliza uma ligação direta com a plataforma *Revit*, facilitando a implementação de uma metodologia BIM. O programa *Robot* disponibiliza ainda a linguagem API que torna possível ao utilizador criar as suas próprias aplicações através de uma linguagem de programação C++, C#, Visual Basic ou qualquer outro programa que suporte a tecnologia COM (*Component Object Model*). O API é usado principalmente para automatizar tarefas repetitivas no *Robot*, criar aplicações que facilitam a modelação de estruturas repetitivas (modelação paramétrica), analisar

projetos, criar relatórios e impressões, importar dados externos para o *Robot*, integração de outros programas com o *Robot* e interpretação dos resultados e criação de documentos.

A linguagem do API é fornecida na forma COM (*Component Object Model*). Para ser possível aceder a estas componentes, o utilizador deverá adicionar a biblioteca RobotOM.tlb à sua aplicação. No caso do VBA do Excel este passo é feito adicionando a referência "*Robot Object Model ver. 14.0*".

4. APLICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE FOLHAS DE CÁLCULO AUTOMÁTICO DE ESTRUTURAS

Geralmente o projetista recorre a folhas de cálculo pré-programadas para o cálculo mais rápido e eficaz dos elementos estruturais. As verificações de segurança necessárias são realizadas a partir dos resultados obtidos dos programas de análise estrutural. O tratamento dos resultados envolve frequentemente tarefas de pós-processamento que consistem na introdução manual ou automática dos resultados nas folhas de cálculo.

4.1. PROGRAMA 2D DESIGN

No âmbito do presente trabalho recorreu-se a uma folha de cálculo de secções genéricas de betão armado com o nome de 2D DESIGN (Pinheiro, N.D.M. (2012)). Este programa foi desenvolvido pelo Eng. Nuno Pinheiro, utilizando o Excel como interface de entrada de dados e saída de resultados, e o *Visual Basic for Applications* (VBA) como linguagem de programação.

No 2D DESIGN conhecidos os esforços (axial, de corte e de flexão) para as ações atuantes e combinações de ações, os materiais e a geometria da secção, é realizado o cálculo orgânico dos elementos estruturais à rotura de duas formas:

- Verificação - determinar os esforços resistentes de uma secção onde a armadura é conhecida;
- Dimensionamento - determina a área de armaduras a colocar na secção, predefinindo a sua posição na secção.

No formato da verificação, o programa calcula a capacidade resistente da secção considerando as excentricidades dos esforços atuantes. O quociente entre o esforço axial e o esforço axial resistente exprime a reserva de segurança da secção, sendo a unidade o limite da verificação de segurança. Em relação ao formato de dimensionamento, o programa calcula a área de aço necessária para garantir a segurança, tendo em conta uma disposição e distribuição das armaduras na secção pré-definida. Sendo assim, o utilizador pode pré-definir uma maior concentração de armaduras em determinada zona da secção. Na Figura 14 apresenta-se um fluxograma com a explicação do funcionamento do programa 2D DESIGN.

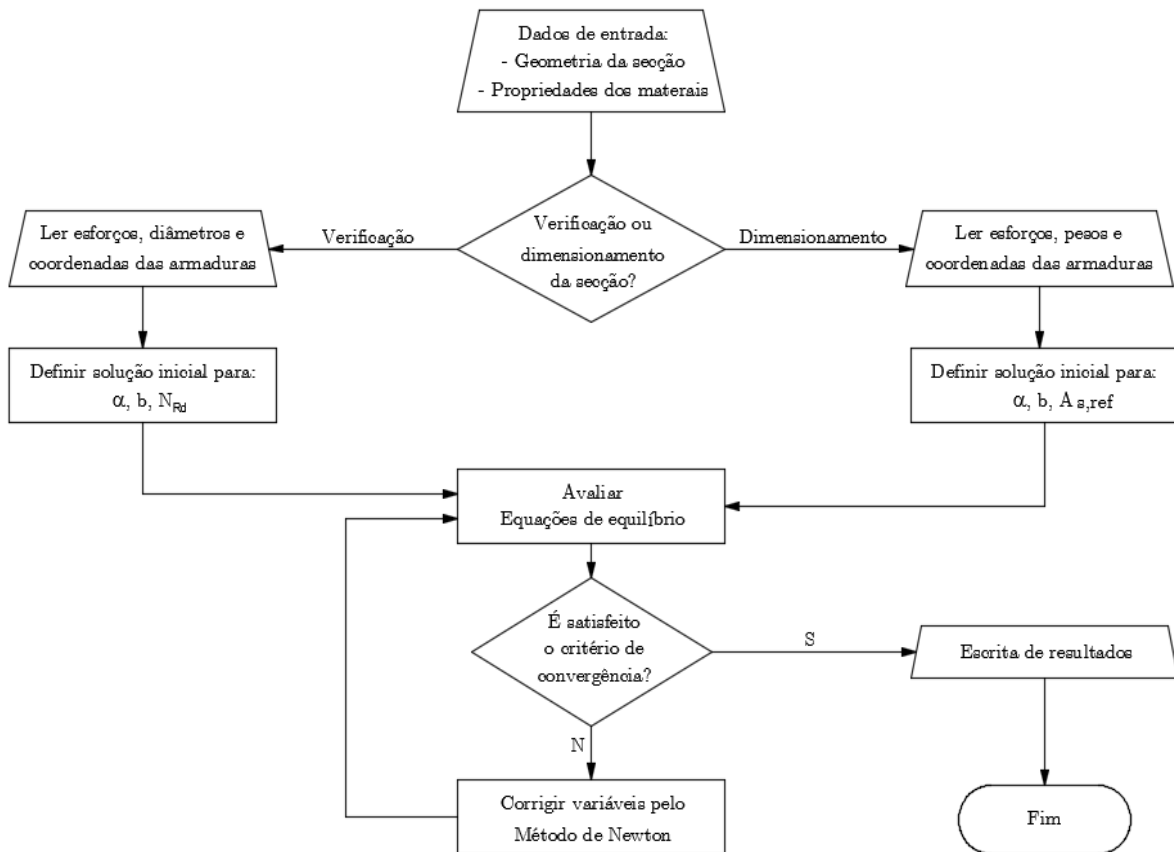


Figura 14 - Fluxograma com o algoritmo do programa 2D DESIGN (Fonte: Pinheiro, N.D.M. (2012))

A interatividade das caixas de diálogo, permite a visualização e inserção de dados relativos às características da secção de forma simples, como se pode observar na Figura 15.

É ainda permitida a inserção de secções com formas complexas a partir de um ficheiro externo.

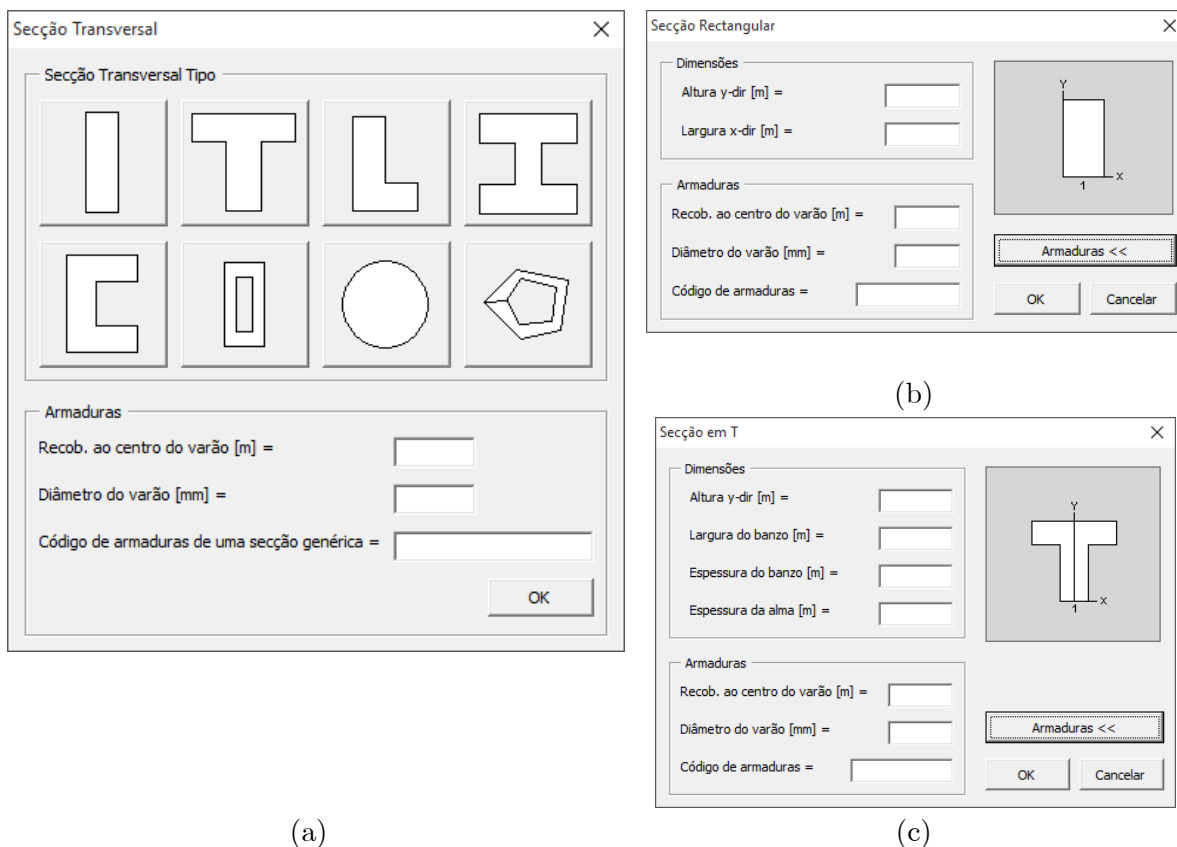


Figura 15 - Caixas de diálogo para inserção de dados relativos às secções: (a) tipo de secções transversais; (b) caso da secção retangular; (c) caso da secção em T

Após a definição da secção, são calculadas automaticamente as suas propriedades geométricas tais como a área, a inércia, o produto de inércia, a orientação dos eixos principais, entre outras.

Através do programa 2D DESIGN é também possível fazer a geração de dois tipos de diagramas de interação para um dado conjunto de esforços, nomeadamente:

- diagrama $N-M_{total}$ para um dado quociente M_x/M_y em flexão desviada e onde também está incluído o caso da flexão composta $N-M_{total}$ (Figura 16 (a));
- diagrama M_x-M_y para um dado esforço axial N (Figura 16 (b)).

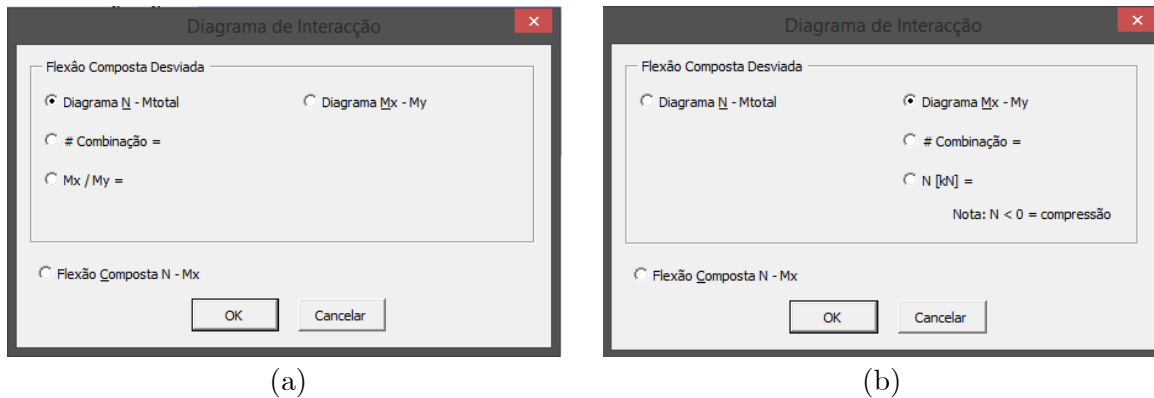


Figura 16 - Caixa de diálogo para obter os diagramas de interação: (a) Diagrama $N-M_{total}$; (b) Diagrama M_x-M_y ;

Ao sobrepor-se, no gráfico do diagrama de interação, os pontos relativos aos esforços atuantes de cada combinação, consegue-se avaliar a segurança das secções sujeitas à flexão composta desviada para a globalidade das combinações, de uma forma imediata (Figura 17). Deste modo, os diagramas de interação são muito vantajosos pois possibilitam, de uma forma simples, a identificação gráfica dos níveis de segurança para um grande número de combinações.

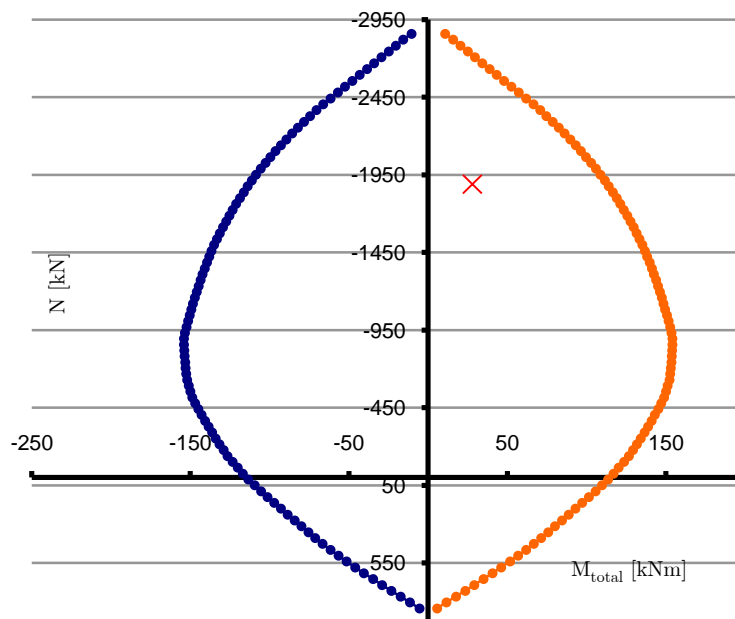


Figura 17 - Exemplo de um diagrama de interação $N-M_{total}$ retirado do programa 2D DESIGN

4.2. PROGRAMA CONCRETE BEAM

Para o cálculo das vigas, utilizou-se um programa feito em Excel com recurso a VBA, o Concrete Beam. Este programa faz o pós-processamento do ficheiro de resultados exportado do programa de cálculo. O utilizador tem de retirar os esforços do programa de cálculo e colocar no mesmo diretório do programa do programa Concrete Beam. Na Figura 18 está representado o *layout* do Concrete Beam onde são visíveis os dados de entrada (células com preenchimento cinza), onde:

Dimensionamento de armaduras em vigas de betão armado - ELU

Betão

fck	30 MPa
fcid	20.0 MPa
fctm	2.90 MPa

Aço

fyk	500 MPa
fyd	435 MPa
Es	200 GPa

Nota: secção rectangular b=bw e hf=0

Sequência da numeração das barras no modelo de cálculo do RSA

Ficheiro: **Teste Beam**

Barra	Nr. da barra no modelo
1	26
2	27
3	42
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	

Botões: **Calcular**, **Gráfico**

Geometria da viga

h	0.6 m	Altura total
b	0.25 m	Largura do banzo
bw	0.25 m	Largura da alma
hf	0 m	Altura do banzo
d'	0.05 m	
d	0.55 m	
ycg	0.300 m	CG da secção relativamente à fibra superior
L	8.28 m	Comprimento total da viga

Nr. de combinações: 6
Nr. de secções na viga: 30

θ (°): 30 θ - ângulo entre a escora de betão e o eixo da viga
 $1 \leq \cot \theta \leq 2.5; 25 \leq \theta \leq 45$

Figura 18 - Layout do programa Concrete Beam

- (1) - Dados relativos aos materiais constituintes da viga;
- (2) - Dados relativos à geometria da viga (o programa suporta vigas retangulares ou em T);
- (3) - Representação gráfica da geometria da viga;
- (4) - Números representativos das barras que modelam a viga no programa de cálculo e botões de ação para correr o programa.

O programa calcula a armadura necessária para os Estados Limite Últimos – Flexão e Esforço Transverso. Com os esforços, obtidos do programa de cálculo, o Concrete Beam faz a envolvente dos esforços atuantes (esforço transverso e momento fletor). Quando o utilizador define uma armadura o programa representa graficamente o esforço resistente dessa solução tendo este de ser superior ao esforço atuante. Sendo assim é um programa semi-automático, mas bastante eficiente uma vez que rapidamente representa diferentes soluções, podendo o utilizador decidir qual a mais adequada.

4.3. FERRAMENTA POSPROCR2D

No âmbito deste trabalho, foram desenvolvidas folhas de cálculo Excel auxiliares que fazem o pós-processamento dos resultados obtidos a partir do programa *Robot*, assentes em ferramentas do tipo API. As folhas de cálculo elaboradas (denominadas de PosProcR2D) incluem a exportação automática dos esforços, dos acréscimos de esforços de segunda ordem (segundo o REBAP) e a elaboração de um quadro resumo com as combinações críticas em termos de dimensionamento.

Na Figura 19 apresenta-se a folha de Excel de extração de dados elaborada com o recurso ao API. Esta folha de cálculo tem como objetivo extrair os resultados dos esforços dos elementos do *Robot* e importar diretamente para o 2D DESIGN, facilitando assim a ligação entre os dois programas

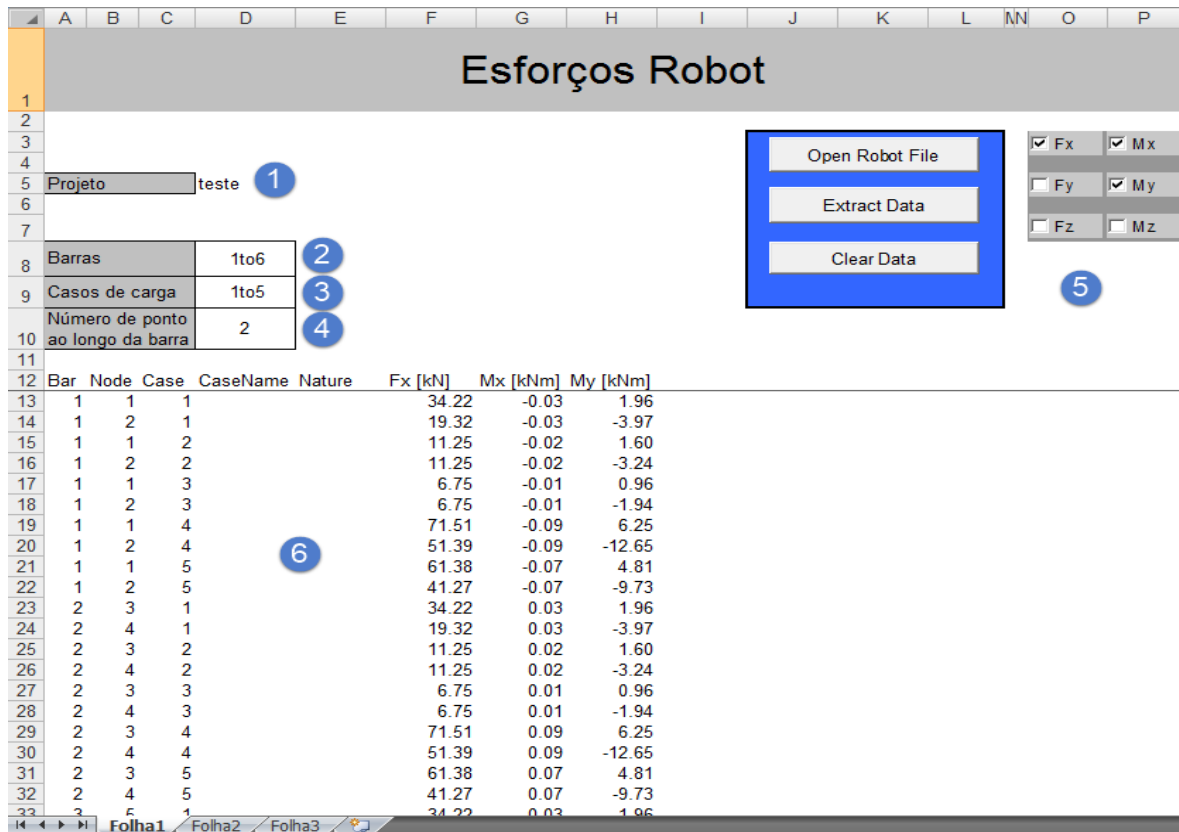


Figura 19 - *Layout* da folha para exportação de resultados do programa *Robot*

Em que:

- (1) - Nome do ficheiro do *Robot* do qual se retiraram os resultados (esforços);
- (2) - Número das barras (de acordo com a numeração do *Robot*);
- (3) - Número dos casos de carga (de acordo com a numeração do *Robot*);
- (4) - Número de pontos ao longo da barra (o mínimo são dois pontos que se referem ao início e ao fim da barra)
- (5) - Tipos de esforços a extrair F_x (esforço axial), F_y e F_z (esforços transversos nas direções y e z), M_x (momento torsor) e M_y e M_z (momentos fletores em torno dos eixos y e z);
- (6) - Dados importados, de acordo com as definições anteriores.

4.4. CÓDIGO API

De seguida é apresentado um excerto do código da aplicação de exportação de resultados dos esforços incluindo comentários.

```

Set RobApp = New RobotApplication

If Not RobApp.Visible Then
Set RobApp = Nothing
MsgBox "Abrir o modelo do Robot", vbOKOnly,
"ERROR"
Exit Sub
End if

Dim RSelection As RobotSelection
Set RSelection =
RobApp.Project.Structure.Selections.Create(I_OT_BAR)
Dim BarCol As RobotBarCollection

If (Cells(8, 4) <> "") Then
RSelection.FromText Cells(8, 4)

Set BarCol =
RobApp.Project.Structure.Bars.GetMany(RSelection)
Else
If (MsgBox("Sem barras selecionas. Deseja selecionar
todas as barras?", vbYesNo, "Warning") = vbYes) Then
RSelection.FromText "all"
RSelection.AddText "tous"
Set BarCol =
RobApp.Project.Structure.Bars.GetMany(RSelection)
Else
Set BarCol = Nothing
Exit Sub
End If
End If

```

Definição da variável "RobApp" correspondendo esta ao projeto de Robot aberto. Caso não exista um projeto aberto aparece a mensagem de erro.

Variável para seleccionar elementos, neste caso do tipo barra.

Seleciona as barras na célula indicada, caso não esteja preenchida aparece uma mensagem questionando se o utilizador deseja seleccionar todas as barras.

```

Set RSelection =
RobApp.Project.Structure.Selections.Create(I_OT_CASE)
Dim CaseCol As RobotCaseCollection

If (Cells(9, 4) <> "") Then
    RSelection.FromText Cells(9, 4)
    Set CaseCol =
RobApp.Project.Structure.Cases.GetMany(RSelection)
Else

    If (MsgBox("Nenhum caso de carga na célula D9.
Deseja importar todos os casos de carga?", vbYesNo,
"Warning") = vbYes) Then
        RSelection.FromText "all"
        RSelection.AddText "tous"
        Set CaseCol =
RobApp.Project.Structure.Cases.GetMany(RSelection)
    Else
        Set CaseCol = Nothing
        Exit Sub
    End If
End If

NumberOfPoints = Int(Cells(10, 4).Value)
If (NumberOfPoints < 2) Then
MsgBox "Número de pontos ao longo da barra deve ser
maior ou igual a 2", vbOKOnly, "Error"
End If

If (RobApp.Project.Structure.Results.Available = False)
Then
If (MsgBox("Resultados não disponível. Deseja começar os
cálculos? ", vbYesNo, "Error") = vbYes) Then
RobApp.Project.CalcEngine.Calculate
End If
End If
    
```

Seleciona o caso de carga na célula indicada, caso não esteja preenchida aparece uma mensagem perguntando se o utilizador deseja selecionar todos os casos de carga.

Código para definir o número de pontos para retirar os esforços ao longo da barra (mínimo 2 pontos).

Caso o modelo do RSA não esteja atualizado em relação aos cálculos, aparecerá uma mensagem a questionar o utilizador se deseja calcular o mesmo.

```

Dim BFD As RobotBarForceData
Dim Icomp As Integer
For Icomp = 1 To CCount
CompStr = "/" + Str(Icomp)
Row = Row + 1
Set BFD = BarForceServer.ValueEx(BarNumber, UNC,
Icomp, Point)
If CheckBox1.Value = True Then
Cells(Row, 5 + cont) = BFD.Fx / -1000
End If
If CheckBox2.Value = True Then
Cells(Row, 5 + cont) = BFD.Fy / 1000
End If
If CheckBox3.Value = True Then
Cells(Row, 5 + cont) = BFD.Fz / 1000
End If
If CheckBox4.Value = True Then
Cells(Row, 5 + cont) = BFD.MX / 1000
End If
If CheckBox5.Value = True Then
Cells(Row, 5 + cont) = BFD.MY / 1000
End If
If CheckBox6.Value = True Then
Cells(Row, 5 + cont) = BFD.MZ / 1000
End If
Next Icomp

```

Código necessário para retirar os esforços das barras selecionadas. O utilizador decide que esforços pretende exportar através da sua seleção na "check box".

Código para extrair os dados do *Robot* em que:

F_x esforço axial;

F_y e F_z esforços transversos;

M_x momento torsor.

5. PROJETO DE ESTRUTURAS DE UM EDIFÍCIO ALTO EM BETÃO ARMADO

5.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

O projeto a desenvolver é do Hotel de Apartamentos *Living Better Maputo* que a empresa Técnica Industrial Moçambique, Lda. pretende realizar na cidade de Maputo em Moçambique. O edifício é constituído por um único corpo, com dez pisos elevados e uma cave, tendo uma altura total de 35 m. Em planta as dimensões em planta da cave são de 39,3x15,2 m² (Figura 20), os pisos elevados possuem uma forma trapezoidal, em que o lado maior e o lado menor têm um comprimento de 26 m e 23,60 m respetivamente (Figura 21). Relativamente ao pé-direito, para a cave é de 3,07 m e dos pisos elevados é de 2,80 m.

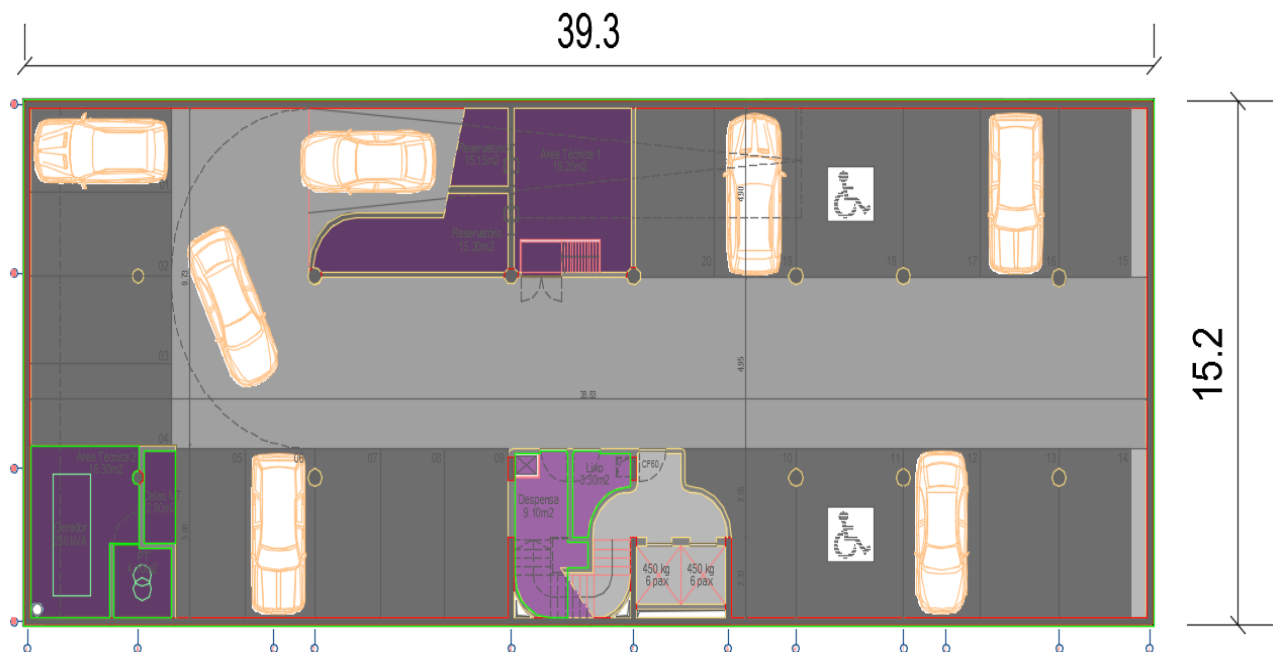


Figura 20 - Planta da cave do edifício

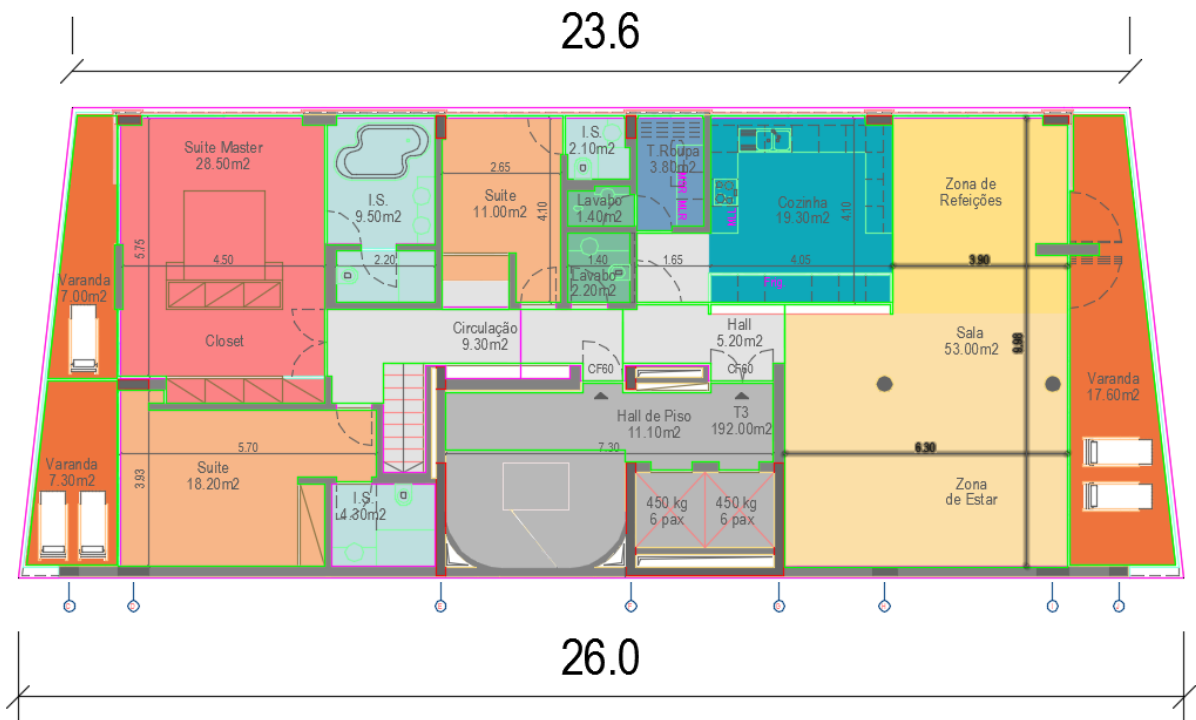


Figura 21 - Planta do piso tipo do edifício

As soluções estruturais adotadas pretendem dar cumprimento ao projeto de Arquitetura, partindo de uma perspetiva de otimização do funcionamento de um edifício com estas características.

Na generalidade a estrutura a adotar será em betão armado constituída por pisos em lajes fungiformes com uma espessura constante de 0,27 m, aligeiradas por intermédio de blocos em betão leve, suportadas por uma malha de pilares e paredes estruturais que garantem ainda o contraventamento da estrutura e a resistência às ações horizontais, nomeadamente o vento e o sismo. A malha de elementos verticais apresenta em geral modulações variáveis entre os 4,40x3,80 m e os 6,90x5.40 m.

As lajes de rampa e respetiva cobertura (Figura 22), bem como piso técnico do solário serão maciças com 0,20 m e 0,15 m de espessura, respetivamente, vencendo um vão máximo de 3,20 m e apoiando-se sobre pilares.

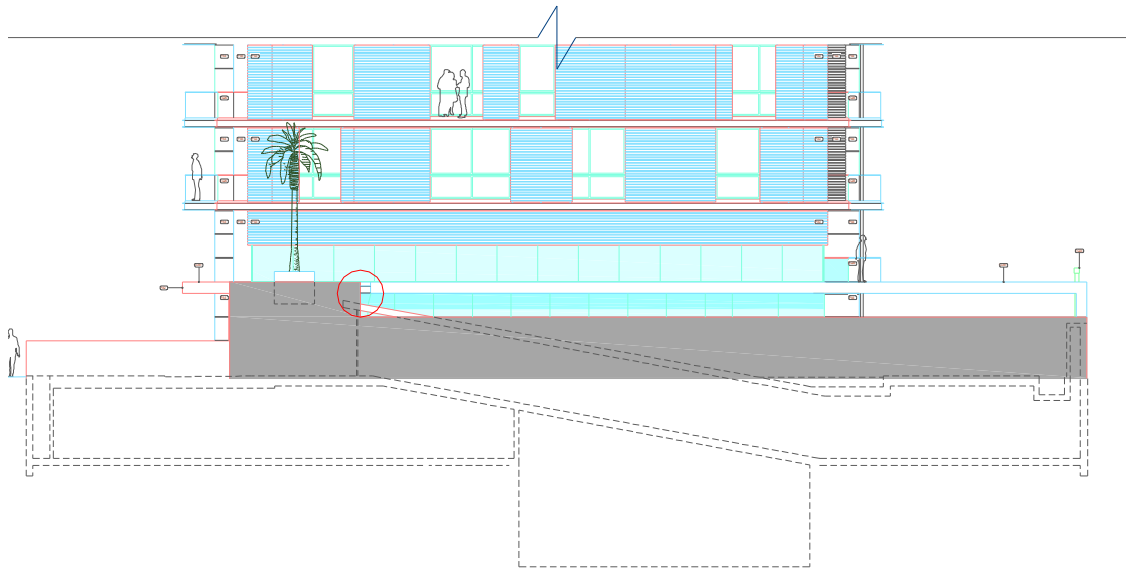


Figura 22 - Corte da rampa e cobertura

Igualmente, a piscina no piso do solário será também em laje maciça, em betão armado, com 0,27 m de espessura, com continuidade para a laje fungiforme à mesma cota.

A cobertura do último piso, onde se localiza o solário e piscina será realizada em estrutura metálica, sendo a cobertura suportada por um sistema em grelha constituído por vigas principais, em perfis do tipo HEA, e madres secundárias, em perfis do tipo IPE, que se apoiam em pilares circulares tubulares materializados por perfis do tipo CHS.

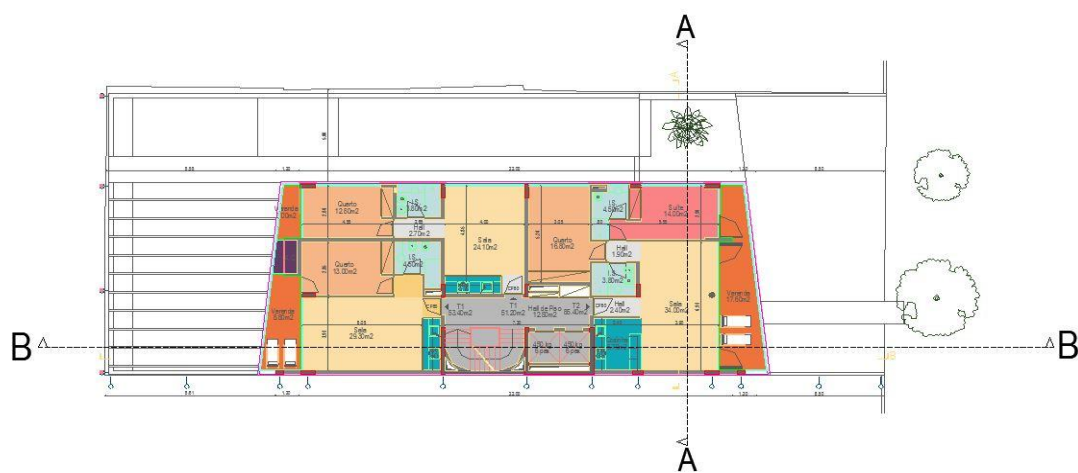
Ao nível da cave, as zonas enterradas serão delimitadas por paredes de betão armado com 0,20 m de espessura para contenção de terras. A espessura da laje do piso 0 é aumentada dos 0,27 m de referência para 0,35 m entre os alinhamentos I e L (ver Figura 20) de forma a evitar a introdução de pilares nesta área que de outro modo dificultariam a circulação automóvel.

Pode-se observar na Figura 23 a) o corte lateral do edifício, na Figura 23 b) o corte frontal do edifício e na Figura 23 c) uma planta do piso tipo.



(a)

(b)



(c)

Figura 23 - Desenhos de arquitetura do edifício: (a) corte A-A do edifício; (b) corte B-B do edifício; (c) planta do piso tipo do edifício;

5.2. MODELAÇÃO DO EDIFÍCIO NO PROGRAMA ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS

A estrutura foi modelada no programa *Robot Structural Analysis* com recurso ao método dos elementos finitos, admitindo comportamento elástico e linear dos materiais. O modelo estrutural adotado é tridimensional e tem o aspeto que se apresenta na Figura 24 e recorreu-se a elementos finitos de barra e elementos finitos de casca. Os elementos laminares, lajes e paredes, foram discretizados com elementos finitos de casca e os elementos lineares, pilares e vigas, através de elementos de barra. O modelo global foi ainda complementado com outros modelos parciais para o dimensionamento de elementos estruturais mais localizados e a partir deste modelo foram obtidos os esforços para o dimensionamento dos elementos estruturais.

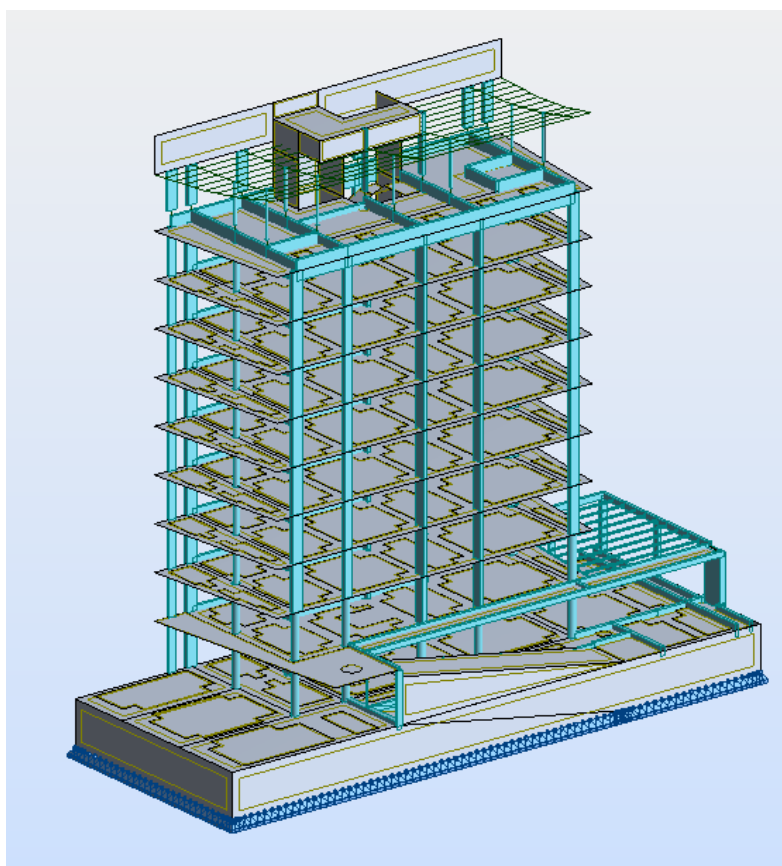


Figura 24 - Modelo numérico tridimensional do edifício no programa *Robot*

5.2.1. Ações

As ações consideradas no projeto do edifício são o peso próprio (PP) da estrutura, as restantes cargas permanentes (RCP), sobrecargas, ação do vento, a ação sísmica e eventualmente as ações acidentais. Para além das ações regulamentares foram consideradas ações específicas devidas a equipamentos em zonas técnicas.

Como não existe um regulamento próprio em Moçambique, a regulamentação base utilizada para a verificação dos critérios de segurança foi a regulamentação portuguesa, em particular:

- Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP (1983))
- Regulamentos de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA (1983)).

A regulamentação portuguesa é complementada com a regulamentação europeia, nomeadamente:

- Eurocódigo 1 - Ações em Estruturas EN 1991 ^[3];
- Eurocódigo 2 - Projeto de Estruturas de Betão EN 1992 ^[4];
- Eurocódigo 3 – Projeto de Estruturas de Aço EN 1993 ^[5];
- Eurocódigo 8 - Projeto de Estruturas para Resistência aos Sismos EN 1998 ^[6].

A verificação da estabilidade da estrutura é realizada em relação aos Estados Limite Últimos e aos Estados Limite de Utilização. Em relação aos Estados Limite de Utilização consideraram-se o de fendilhamento e de deformação.

5.2.1.1. Ações verticais

As ações devidas ao peso próprio foram quantificadas automaticamente pelo programa de cálculo, neste caso o *Robot Structural Analysis*. As ações variáveis foram quantificadas de acordo com o RSA (RSA (1983)). Na Tabela 6 são apresentados os valores utilizados para as restantes cargas permanentes (RCP) e as sobrecargas de utilização (Sob) nos vários pisos do edifício.

Tabela 6 - Valores das restantes cargas permanentes e sobrecargas de utilização consideradas no edifício

	Zona	Ação		Art. RSA (RSA (2005))	Descrição
Piso 0	Esplanada	RCP	1.5		
		SOB	4	35.1.1° c)	Recintos de utilização coletiva de média concentração
	Estacionamento	RCP	2		
		SOB	5	35.1.2° d)	Estacionamento público para automóveis ligeiros
	Interior	RCP	3.5	15°	Inclui enchimentos de 10 cm e paredes divisórias
		SOB	3	35.1.1° b)	Receção/sala de estar
Floreira	RCP	8			
Piso tipo	Interior	RCP	3	15°	Inclui enchimentos de 10 cm e paredes divisórias
		SOB	2	35.1.1° a)	
	Varanda	RCP	0.5		Adicionalmente considera-se uma carga = 0.5 kN/m no bordo da varanda, devido à guarda - artigo° 39
		SOB	2	36.1.°	Adicionalmente considera-se sobrecarga localizada de 5 kN/m ² junto à guarda
Piso 9	Interior	RCP	12		Zona da Piscina
			1.5		Zona SPA
		SOB	2	35.1.1° a)	
	Zona Ext.	RCP	4		zona ajardinada - considerou-se 20 cm de terra
			21		zona floreira - considerou-se 1 m de terra
		SOB	2	36.1.°	considera-se sobrecarga localizada de 5 kN/m ² junto à guarda
Escadas	Interior	RCP	2		
		SOB	3	37.1°	Sobrecarga em acessos em locais privados
Cobertura	-	RCP	3		
		SOB	0.3	34.2° a)	Cobertura ordinária
Rampa Estacionamento	-	RCP	1		
		SOB	5	37.1°	Local público
Cobertura Rampa	-	RCP	1		
		SOB	1	34.2° b)	Terraço não acessível

5.2.1.2. Ações horizontais

As ações horizontais consideradas no projeto deste edifício foram as ações do vento e as ações sísmicas sendo estas definidas nos próximos tópicos.

A - Ação do vento

A ação do vento foi quantificada de acordo com o RSA para edifícios localizados na zona B e rugosidade do tipo II. Esta ação foi simulada aplicando ao modelo cargas distribuídas horizontalmente ao nível dos pisos elevados. Na Tabela 7 estão apresentados os valores da cargas do vento por piso. De salientar, que multiplicou-se o w_k pela área de influência entre cada piso obtendo-se uma carga por metro linear.

Tabela 7 - Valores das cargas relativas à ação do vento por piso

	Cota (m)	w_k (kN/m ²)	v (m/s)
Piso 1	3,47	0,86	34,23
Piso 2	6,53	1,00	36,96
Piso 3	9,59	1,11	38,79
Piso 4	12,65	1,19	40,20
Piso 5	15,71	1,26	41,36
Piso 6	18,77	1,32	42,36
Piso 7	21,83	1,37	43,22
Piso 8	24,89	1,42	44,00
Piso 9	27,95	1,47	44,71
Cobertura	33,92	1,55	45,92

B - Ação Sísmica

Visto a inexistência de regulamentação em Moçambique, optou-se por quantificar a ação sísmica de acordo com a EN 1998-1 (2010) para edifícios no concelho do Porto, com tipo de terreno D, com classe de importância III. O coeficiente de amortecimento considerado foi

de 5%. Os efeitos desta ação foram determinados através de uma análise modal baseada em espectros de resposta, tendo sido considerada a atuação de duas componentes da ação sísmica (E_x e E_y) segundo duas direções ortogonais (0° e 90°), sendo os efeitos devidos a cada modo de vibração combinados por intermédio de uma Combinação Quadrática Completa (CQC). Na determinação das massas dos pisos consideraram-se os valores quase permanentes das cargas verticais, obtidos a partir dos valores adotados para o peso próprio dos elementos, restantes cargas permanentes e sobrecargas.

Os valores dos esforços obtidos através da análise espectral linear foram corrigidos, para ter em conta o comportamento não linear, dividindo-os por um coeficiente de comportamento igual a 2.0. Na Figura 25 estão representados os espectros de resposta das ações sísmicas do tipo I e tipo II.

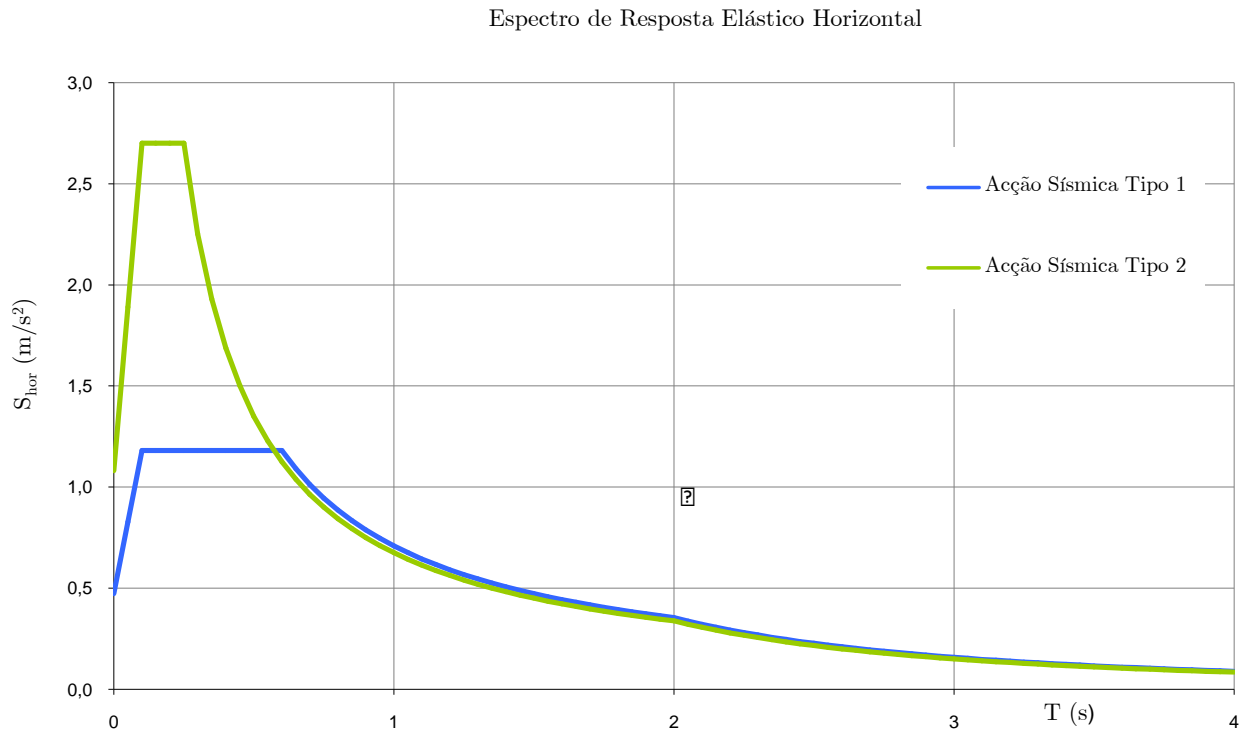


Figura 25 - Espectros de resposta para o sismo tipo I e tipo II

5.2.2. Combinações de ações

Na Tabela 8 são apresentadas as combinações de ações realizadas manualmente no programa *Robot*.

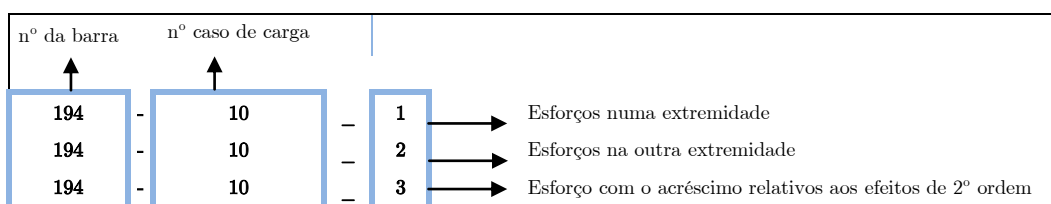
Tabela 8 - Combinações de ações utilizadas no modelo

	Combinação	PP	RCP	SOB	Ek1 1x+0.3y	Ek1 1x-0.3y	Ek1 0.3x-1y	Ek1 0.3x+1y	Ek2 1x+0.3y	Ek2 1x-0.3y	Ek2 0.3x-1y	Ek2 0.3x+1y	Vento	
													X	Y
ELU	ELU_1	1,35	1,5	1,5									0,9	
	ELU_2	1,35	1,5	1,5										0,9
	ELU_3	1,35	1,5	0,6									1,5	
	ELU_4	1,35	1,5	0,6										1,5
	ELU_5	1,35	1,5	0,4	1,5									
	ELU_6	1,35	1,5	0,4		1,5								
	ELU_7	1,35	1,5	0,4			1,5							
	ELU_8	1,35	1,5	0,4				1,5						
	ELU_9	1,35	1,5	0,4					1,5					
	ELU_10	1,35	1,5	0,4						1,5				
	ELU_11	1,35	1,5	0,4							1,5			
	ELU_12	1,35	1,5	0,4								1,5		
ELS	ELS_CR	1	1	1										
	ELS_CF	1	1	0,3										
	ELS_CQP	1	1	0,2										

5.2.3. Dimensionamento de pilares

Nesta secção apresenta-se o cálculo de dois pilares do edifício em estudo com secção diferente. O cálculo foi elaborado com recurso à folha de cálculo 2D DESIGN conforme explicado no Capítulo 4. O programa 2D DESIGN calcula o acréscimo dos esforços devido aos efeitos de 2ª ordem. Na Tabela 9 apresenta-se o significado da nomenclatura de identificação adotada nas células da primeira coluna das tabelas 10 e 13.

Tabela 9 - Explicação da nomenclatura de identificação adotada nas células da primeira coluna das tabelas 10 e 13.



5.2.3.1. Pilar P11

O pilar P11 tem uma secção retangular de $0,25 \times 0,7 \text{ m}^2$ e desenvolve-se entre os pisos 2 e 8. O pilar encontra-se assinalado a vermelho na Figura 26 onde se apresenta também a numeração utilizada pelo programa *Robot* na identificação dos seus diferentes troços.

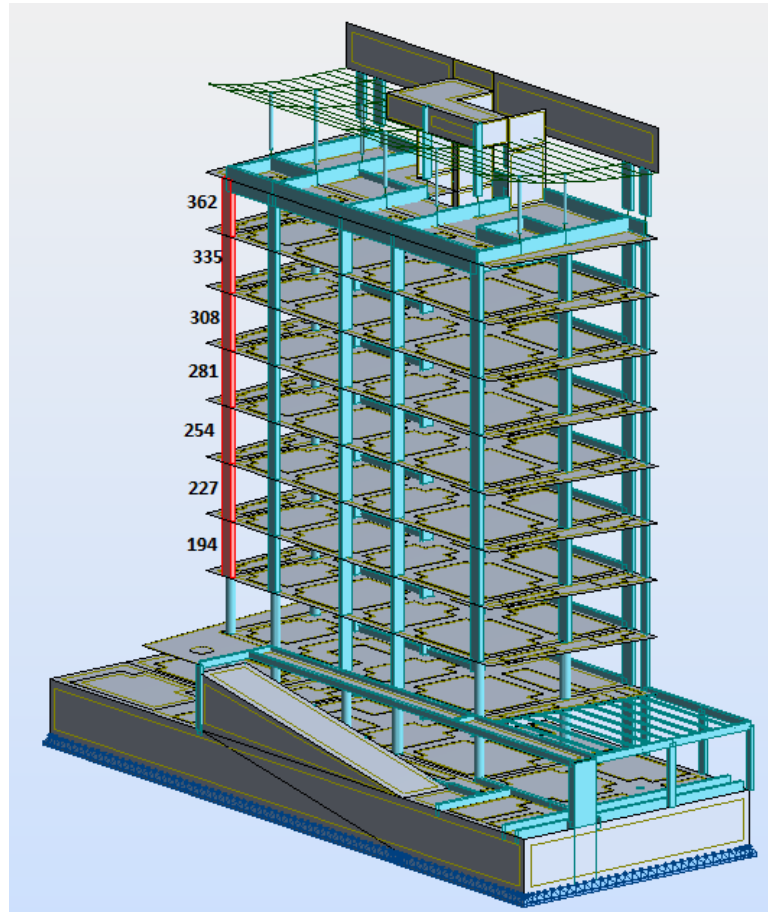


Figura 26 - Identificação do pilar P11 no modelo estrutural

Para afeitos do presente relatório apenas é apresentado o dimensionamento de um troço do pilar em causa, neste compreendido entre os pisos 2 e 3 (barra 194), de forma a não tornar o trabalho exaustivo e repetitivo. Contudo, no final é apresentada uma tabela resumo de dimensionamento de todos os troços do pilar em estudo. Na Tabela 10 estão representados os esforços para as várias combinações de ações e os admissíveis para uma solução de 12 varões com um diâmetro de 16 mm, que corresponde à solução final de armaduras adotadas.

Tabela 10 - Esforços e rácios correspondentes a um troço do pilar P11 (barra 194)

Barra-caso de carga	Esforços atuantes					Esforços admissíveis			Rácio
	Nzd [kN]	Mxd [kNm]	Myd [kNm]	ex [m]	ey [m]	Nz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	
194-10_1	-1626.7 (C)	-4.7	6.7	0.004	0.003	-3775.0 (C)	-11.0	15.5	43.1%
194-10_2	-1609.0 (C)	-0.8	17.8	0.011	0.001	-3508.7 (C)	-1.8	38.9	45.9%
194-10_3	-1609.0 (C)	-50.9	51.5	0.032	0.032	-2760.9 (C)	-87.3	88.4	58.3%
194-11_1	-1637.1 (C)	20.7	-8.0	-0.005	-0.013	-3668.1 (C)	46.3	-17.9	44.6%
194-11_2	-1619.4 (C)	-16.7	33.7	0.021	0.010	-3179.6 (C)	-32.7	66.1	50.9%
194-11_3	-1619.4 (C)	57.4	55.4	0.034	-0.035	-2679.2 (C)	95.0	91.6	60.4%
194-12_1	-1388.0 (C)	-41.6	13.2	0.009	0.030	-3403.1 (C)	-101.9	32.3	40.8%
194-12_2	-1370.3 (C)	23.7	7.0	0.005	-0.017	-3617.7 (C)	62.7	18.4	37.9%
194-12_3	-1370.3 (C)	-59.3	44.0	0.032	0.043	-2683.5 (C)	-116.1	86.1	51.1%
194-13_1	-1405.4 (C)	0.7	-11.3	-0.008	-0.001	-3624.5 (C)	1.9	-29.1	38.8%
194-13_2	-1387.6 (C)	-2.6	33.3	0.024	0.002	-3094.7 (C)	-5.9	74.3	44.8%
194-13_3	-1387.6 (C)	-45.4	49.2	0.035	0.033	-2663.4 (C)	-87.2	94.4	52.1%
194-14_1	-889.9 (C)	-52.2	13.8	0.016	0.059	-2974.3 (C)	-174.4	46.2	29.9%
194-14_2	-876.7 (C)	31.6	-1.4	-0.002	-0.036	-3433.4 (C)	123.9	-5.6	25.5%
194-14_3	-876.7 (C)	-46.7	29.0	0.033	0.053	-2588.7 (C)	-137.9	85.6	33.9%
194-15_1	-907.2 (C)	-9.9	-10.6	-0.012	0.011	-3469.6 (C)	-37.7	-40.6	26.1%
194-15_2	-894.1 (C)	5.3	24.9	0.028	-0.006	-2977.5 (C)	17.5	83.0	30.0%
194-15_3	-894.1 (C)	-32.4	32.4	0.036	0.036	-2620.4 (C)	-95.0	95.0	34.1%
194-16_1	-1117.2 (C)	17.6	-2.7	-0.002	-0.016	-3688.5 (C)	58.1	-8.8	30.3%
194-16_2	-1104.0 (C)	-13.5	19.9	0.018	0.012	-3263.1 (C)	-40.0	58.8	33.8%
194-16_3	-1104.0 (C)	42.4	37.7	0.034	-0.038	-2662.4 (C)	102.1	90.9	41.5%
194-17_1	-891.1 (C)	7.7	-0.6	-0.001	-0.009	-3805.9 (C)	33.0	-2.7	23.4%
194-17_2	-878.0 (C)	-6.0	13.9	0.016	0.007	-3338.0 (C)	-22.8	53.0	26.3%
194-17_3	-878.0 (C)	31.2	29.4	0.034	-0.036	-2696.7 (C)	95.8	90.4	32.6%
194-18_1	-860.8 (C)	6.1	-0.5	-0.001	-0.007	-3830.0 (C)	27.0	-2.4	22.5%
194-18_2	-847.7 (C)	-4.8	13.3	0.016	0.006	-3343.9 (C)	-18.8	52.6	25.4%
194-18_3	-847.7 (C)	29.5	28.4	0.033	-0.035	-2702.3 (C)	94.2	90.5	31.4%
194-19_1	-35.9 (C)	-19.8	6.9	0.193	0.551	-408.6 (C)	-225.2	78.7	8.8%
194-19_2	-35.9 (C)	-12.8	6.8	0.190	0.357	-516.0 (C)	-184.0	98.2	6.9%
194-19_3	-35.9 (C)	-9.1	7.7	0.216	0.252	-530.3 (C)	-133.9	114.6	6.8%
194-20_1	-20.8 (C)	-17.6	3.9	0.189	0.849	-309.5 (C)	-262.8	58.5	6.7%
194-20_2	-20.8 (C)	-11.5	3.5	0.168	0.552	-438.0 (C)	-241.7	73.8	4.7%
194-20_3	-20.8 (C)	-7.7	4.3	0.205	0.372	-480.6 (C)	-178.6	98.6	4.3%
194-21_1	-33.6 (C)	-9.2	6.6	0.196	0.272	-560.6 (C)	-152.6	110.0	6.0%
194-21_2	-33.6 (C)	-5.8	7.1	0.211	0.174	-592.5 (C)	-102.9	124.9	5.7%
194-21_3	-33.6 (C)	-4.7	7.7	0.229	0.141	-560.5 (C)	-79.0	128.5	6.0%
194-22_1	16.6 (T)	-2.1	-3.3	0.201	-0.124	328.1 (T)	-40.8	-66.0	5.1%
194-22_2	16.6 (T)	-1.4	-4.0	0.240	-0.086	290.0 (T)	-25.1	-69.6	5.7%
194-22_3	16.6 (T)	-0.8	-1.6	0.096	-0.050	526.6 (T)	-26.2	-50.5	3.2%
194-23_1	-60.6 (C)	-34.4	12.0	0.198	0.569	-395.3 (C)	-224.9	78.3	15.3%
194-23_2	-60.6 (C)	-19.2	11.7	0.193	0.318	-535.9 (C)	-170.3	103.5	11.3%
194-23_3	-60.6 (C)	-15.7	13.3	0.220	0.259	-516.9 (C)	-134.1	113.9	11.7%
194-24_1	-34.8 (C)	-30.9	6.9	0.198	0.886	-294.6 (C)	-261.2	58.3	11.8%
194-24_2	-34.8 (C)	-17.3	6.0	0.174	0.497	-460.0 (C)	-228.6	79.8	7.6%
194-24_3	-34.8 (C)	-13.5	7.4	0.212	0.387	-460.9 (C)	-178.2	97.9	7.6%

Para uma mais rápida avaliação da solução, o programa 2D DESIGN faculta uma folha resumo onde identifica a combinação de ações mais condicionante, assim como o diagrama de extensões e o modo de rotura. Para o pilar em estudo, como se pode observar na Tabela 11, obteve-se um rácio ($N_{zd}/N_{zd,adm}$) de 60,4%, o que significa que o pilar tem ainda uma margem de segurança. O valor do rácio deve ser inferior ou igual a 100% de modo a garantir que $N_{zd} < N_{zd,adm}$.

Tabela 11 - Combinação condicionante para o troço do pilar P11 (barra 194)

Combinação condicionante	Nzd [kN]	Mxd [kNm]	Myd [kNm]	Nzadm [kN]	Ratio
194-11_3	-1619.4	57.4	55.4	-2679.2	60.4%

Na Figura 27 (a), encontra-se representada a secção do elemento com a armadura calculada e localização do eixo neutro (a cinzento) para a combinação mais condicionante e na Figura 27 (b) está representado o correspondente diagrama de extensões.

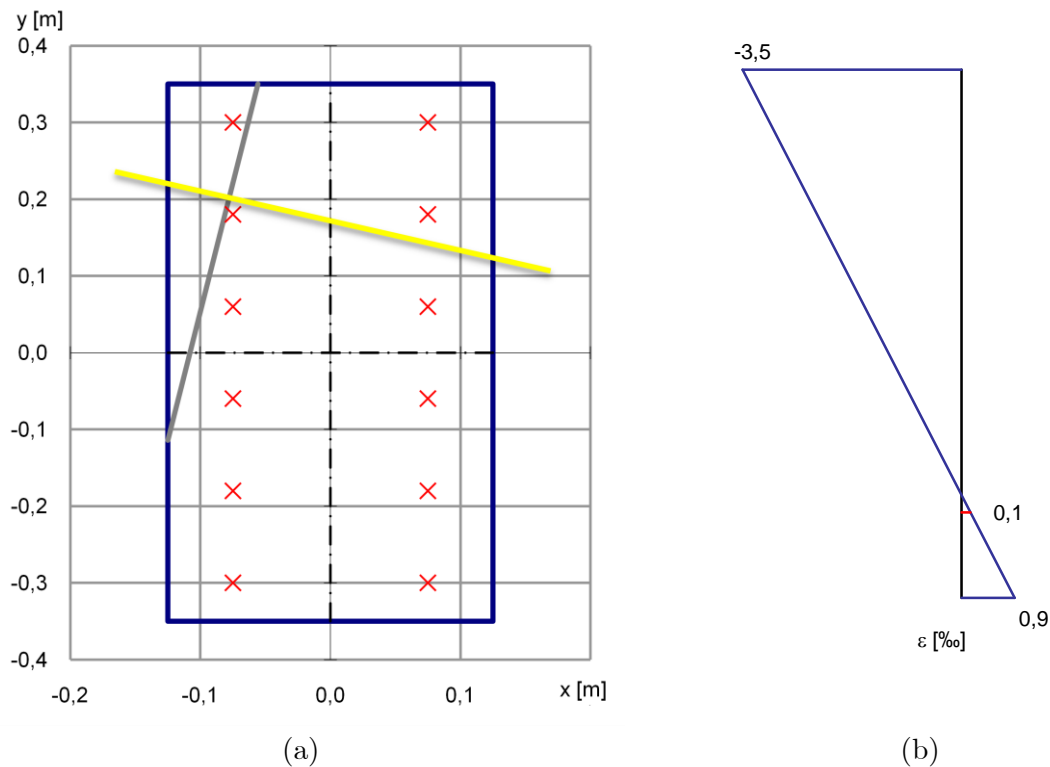


Figura 27 - (a) Secção do elemento com a armadura calculada; (b) diagrama de extensões para a combinação condicionante (corte representado pela linha amarela)

Na Tabela 12 apresenta-se um resumo do dimensionamento de todos os troços do pilar P11 onde constam as dimensões do pilar, a armadura nas dimensões x e y (ver direção representada na Figura 28), a relação da área de betão e área de aço, a combinação condicionante e os respetivos esforços, assim como o rácio entre o esforço atuante e o esforço admissível.

Tabela 12 - Tabela resumo do dimensionamento de todos os troços do pilar P11

Pilar	bx (m)	by (m)	Asx	Asy	As (cm2)	(%)	Frame-Comb.	Nzd (kN)	Mxd (kNm)	Myd (kNm)	Rácio (%)
P11_2	0.25	0.7	0 f16	6 f16	24	1.38	194-11_3	-1619	57	55	60%
P11_3	0.25	0.7	0 f16	6 f16	24	1.38	227-11_1	-1441	14	-57	54%
P11_4	0.25	0.7	0 f16	6 f16	24	1.38	254-11_3	-1223	46	51	49%
P11_5	0.25	0.7	0 f16	6 f16	24	1.38	281-11_1	-1039	16	-53	44%
P11_6	0.25	0.7	0 f16	6 f16	24	1.38	308-11_1	-837	16	-53	40%
P11_7	0.25	0.7	0 f16	6 f16	24	1.38	335-11_2	-616	-28	52	36%
P11_8	0.25	0.7	0 f16	6 f116	24	1.38	362-13_2	-398	53	65	32%

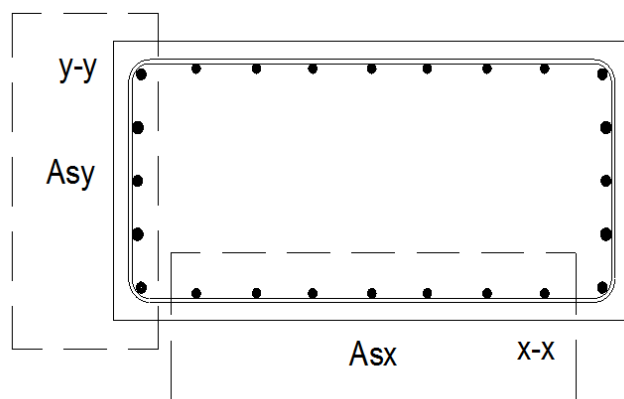


Figura 28 - Direção da armadura utilizada pelo 2D DESIGN

5.2.3.2. Pilar P12

O pilar P12 tem uma secção circular com um diâmetro de 0,4 m e desenvolve-se entre os pisos 2 e 8. Na Figura 29 está representado a vermelho o pilar P12 e com as numerações dos seus diferentes troços.

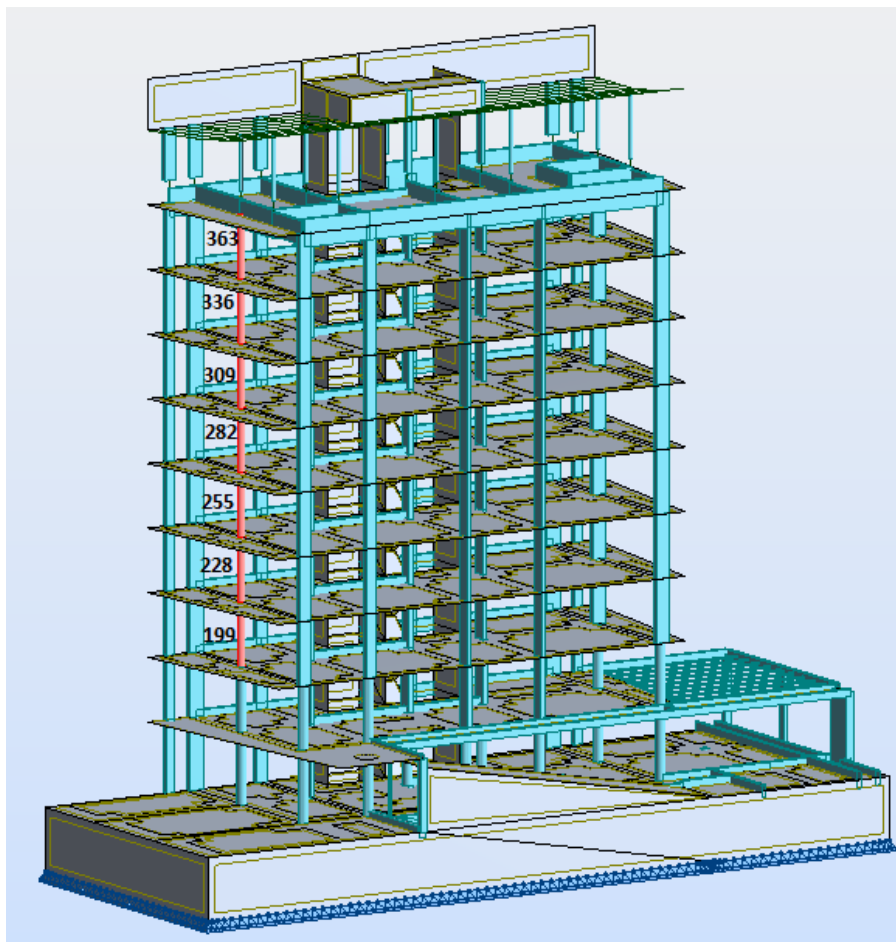


Figura 29 - Identificação do pilar P12 no modelo *Robot*

Em seguida será apenas apresentado o dimensionamento de um troço do pilar, nomeadamente o situado entre o pisos 2 e 3 (barra 199).

Na Tabela 13 estão representados os esforços para as várias combinações de ações e os admissíveis para uma solução de 10 varões com um diâmetro de 16 mm, que corresponde à solução de armaduras adotadas.

Tabela 13 - Esforços e raios correspondentes a um troço do pilar P12 (barra 199)

Combinação	Esforços atuantes					Esforços admissíveis			Rácio
	Nzd [kN]	Mxd [kNm]	Myd [kNm]	ex [m]	ey [m]	Nz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	
199-10_1	-2677.4 (C)	7.3	20.3	0.008	-0.003	-2768.0 (C)	7.5	21.0	96.7%
199-10_2	-2664.7 (C)	-8.9	-24.4	-0.009	0.003	-2731.7 (C)	-9.2	-25.0	97.5%
199-10_3	-2664.7 (C)	11.2	-28.7	-0.011	-0.004	-2694.4 (C)	11.3	-29.0	98.9%
199-11_1	-2680.5 (C)	16.2	-7.2	-0.003	-0.006	-2797.7 (C)	16.9	-7.5	95.8%
199-11_2	-2667.8 (C)	-18.7	5.2	0.002	0.007	-2783.1 (C)	-19.5	5.4	95.9%
199-11_3	-2667.8 (C)	-9.4	-25.1	-0.009	0.004	-2725.6 (C)	-9.6	-25.6	97.9%
199-12_1	-2277.2 (C)	-7.4	28.9	0.013	0.003	-2663.6 (C)	-8.6	33.8	85.5%
199-12_2	-2264.5 (C)	7.2	-32.8	-0.014	-0.003	-2629.8 (C)	8.4	-38.1	86.1%
199-12_3	-2264.5 (C)	8.3	-65.2	-0.029	-0.004	-2384.4 (C)	8.7	-68.6	95.0%
199-13_1	-2282.3 (C)	7.5	-16.9	-0.007	-0.003	-2767.2 (C)	9.0	-20.5	82.5%
199-13_2	-2269.6 (C)	-9.0	16.5	0.007	0.004	-2762.4 (C)	-11.0	20.1	82.2%
199-13_3	-2269.6 (C)	-14.8	-60.7	-0.027	0.007	-2406.4 (C)	-15.7	-64.4	94.3%
199-14_1	-1445.7 (C)	-13.5	27.2	0.019	0.009	-2517.5 (C)	-23.6	47.3	57.4%
199-14_2	-1436.3 (C)	14.2	-30.0	-0.021	-0.010	-2480.2 (C)	24.6	-51.8	57.9%
199-14_3	-1436.3 (C)	46.2	-47.6	-0.033	-0.032	-2098.0 (C)	67.5	-69.6	68.5%
199-15_1	-1450.8 (C)	1.3	-18.7	-0.013	-0.001	-2669.6 (C)	2.4	-34.3	54.3%
199-15_2	-1441.4 (C)	-2.0	19.3	0.013	0.001	-2658.6 (C)	-3.7	35.7	54.2%
199-15_3	-1441.4 (C)	-41.3	48.3	0.034	0.029	-2130.7 (C)	-61.0	71.4	67.6%
199-16_1	-1864.8 (C)	11.6	0.9	0.000	-0.006	-2807.1 (C)	17.5	1.3	66.4%
199-16_2	-1855.3 (C)	-13.4	-2.9	-0.002	0.007	-2781.3 (C)	-20.0	-4.3	66.7%
199-16_3	-1855.3 (C)	-52.2	-50.0	-0.027	0.028	-2214.5 (C)	-62.4	-59.7	83.8%
199-17_1	-1533.1 (C)	5.6	2.5	0.002	-0.004	-2854.9 (C)	10.3	4.7	53.7%
199-17_2	-1523.7 (C)	-6.5	-4.2	-0.003	0.004	-2832.3 (C)	-12.1	-7.8	53.8%
199-17_3	-1523.7 (C)	-43.9	-43.8	-0.029	0.029	-2187.0 (C)	-63.0	-62.8	69.7%
199-18_1	-1486.8 (C)	4.7	2.3	0.002	-0.003	-2863.8 (C)	9.0	4.5	51.9%
199-18_2	-1477.4 (C)	-5.5	-4.0	-0.003	0.004	-2842.0 (C)	-10.6	-7.6	52.0%
199-18_3	-1477.4 (C)	-42.8	-42.8	-0.029	0.029	-2183.3 (C)	-63.2	-63.2	67.7%
199-19_1	-32.3 (C)	-5.7	12.5	0.386	0.176	-327.1 (C)	-57.4	126.2	9.9%
199-19_2	-32.3 (C)	-6.1	13.0	0.404	0.188	-308.9 (C)	-58.0	124.8	10.5%
199-19_3	-32.3 (C)	-3.4	13.8	0.428	0.107	-311.8 (C)	-33.3	133.6	10.4%
199-20_1	-23.8 (C)	-4.9	6.8	0.285	0.208	-406.7 (C)	-84.6	116.0	5.8%
199-20_2	-23.8 (C)	-5.3	7.0	0.293	0.222	-388.6 (C)	-86.3	113.8	6.1%
199-20_3	-23.8 (C)	-2.9	7.6	0.322	0.121	-418.8 (C)	-50.5	134.7	5.7%
199-21_1	-22.6 (C)	-2.8	12.4	0.546	0.124	-237.8 (C)	-29.5	129.8	9.5%
199-21_2	-22.6 (C)	-3.0	13.1	0.581	0.133	-221.7 (C)	-29.5	128.8	10.2%
199-21_3	-22.6 (C)	-1.9	13.5	0.599	0.085	-219.1 (C)	-18.6	131.2	10.3%
199-22_1	5.8 (T)	-0.4	-6.6	1.133	-0.065	92.4 (T)	-6.0	-104.7	6.3%
199-22_2	5.8 (T)	-0.4	-7.1	1.228	-0.068	85.7 (T)	-5.8	-105.3	6.8%
199-22_3	5.8 (T)	-0.2	-2.9	0.491	-0.027	193.3 (T)	-5.2	-94.9	3.0%
199-23_1	-39.4 (C)	-9.3	21.6	0.548	0.237	-221.3 (C)	-52.5	121.2	17.8%
199-23_2	-39.4 (C)	-9.8	22.4	0.570	0.250	-211.2 (C)	-52.8	120.4	18.6%
199-23_3	-39.4 (C)	-5.2	23.3	0.593	0.132	-217.1 (C)	-28.6	128.7	18.1%
199-24_1	-25.0 (C)	-8.1	11.8	0.475	0.325	-231.2 (C)	-75.1	109.7	10.8%
199-24_2	-25.0 (C)	-8.5	12.1	0.484	0.341	-223.6 (C)	-76.2	108.2	11.2%
199-24_3	-25.0 (C)	-4.2	12.8	0.512	0.168	-247.9 (C)	-41.7	126.9	10.1%

Na Tabela 14 são indicados os esforços e o valor do rácio para a combinação condicionante. Pode-se observar que o esforço axial atuante é quase igual ao esforço axial admissível, obtendo-se um rácio de cerca de 99%. Neste caso poder-se-ia optar por aumentar a armadura para obter um rácio menor, mas decidiu-se manter a solução para facilitar a execução em termos construtivos.

Tabela 14 - Combinação mais condicionante para o troço do pilar P12 (barra 199)

Combinação condicionante	Nzd [kN]	Mxd [kNm]	Myd [kNm]	Nzadm [kN]	Rácio
199-10_3	-2664.7	11.2	-28.7	-2694.4	98.9%

Na Figura 30 (a) pode observar-se a secção com a armadura, estando a peça inteiramente à compressão (o eixo neutro localiza-se fora da secção). Na Figura 30 (b) encontra-se representado o diagrama de extensões sendo que o modo de rotura é devido ao esgotamento da resistência do betão.

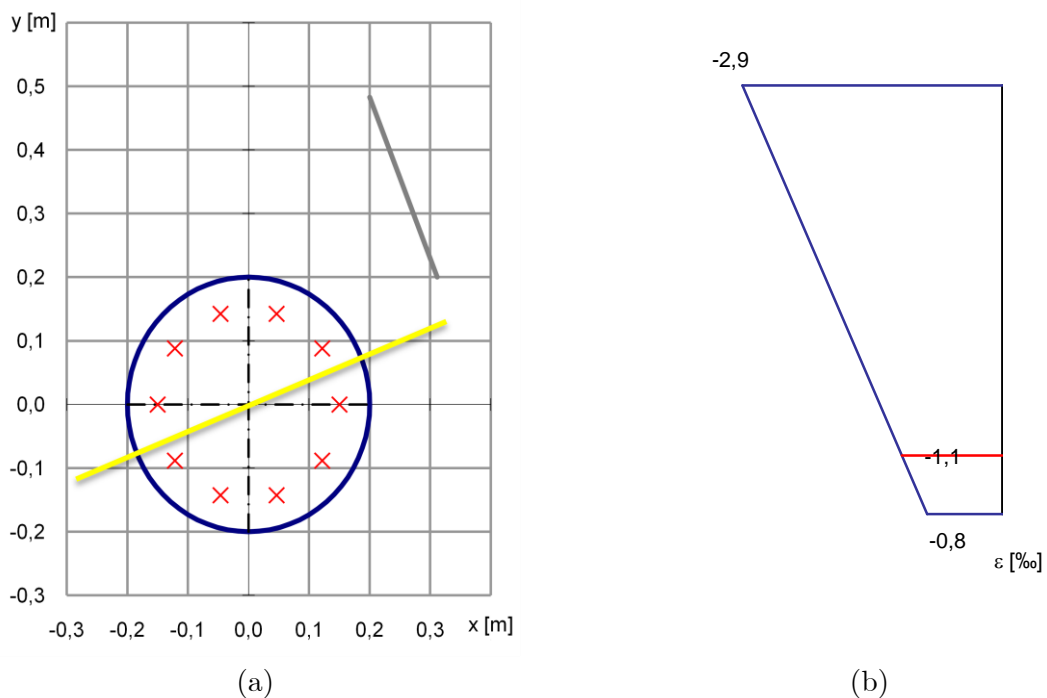


Figura 30 - (a) Secção do elemento com a armadura calculada; (b) diagrama de extensões para a combinação condicionante (corte representado pela linha amarela)

Na Tabela 15 apresenta-se um resumo do dimensionamento de todos os troços do pilar P12 onde constam as dimensões do pilar, a armadura da solução adotada (como o pilar é circular os varões estão todos equidistantes), a relação das áreas de betão e de aço, a combinação condicionante e os respetivos esforços, assim como o rácio entre o esforço atuante e o esforço admissível.

Tabela 15 - Tabela resumo de dimensionamento de todos os troços do pilar P12

Pilar	ϕ (m)	As	As (cm2)	(%)	Frame-Comb.	Nzd (kN)	Mxd (kNm)	Myd (kNm)	Ratio (%)
P12_2	D 0.4	10 f16	20	1.60	199- 10 _1	-2665	11	-29	99%
P12_3	D 0.4	10 f16	20	1.60	228- 12 _3	-2078	56	69	94%
P12_4	D 0.4	10 f16	20	1.60	255- 10 _3	-2048	57	-59	87%
P12_5	D 0.4	10 f16	20	1.60	282- 11 _3	-1671	54	47	71%
P12_6	D 0.4	10 f16	20	1.60	309- 11 _3	-1289	46	39	56%
P12_7	D 0.4	10 f16	20	1.60	336- 10 _3	-899	-32	-34	38%
P12_8	D 0.4	10 f16	20	1.60	363- 13 _3	-557	22	29	27%

5.2.4. Dimensionamento da viga

A viga em estudo (V4.0) tem cerca de 8,30 m de comprimento e uma secção retangular de $0,25 \times 0,60 \text{ m}^2$, cujo esquema está apresentado na Figura 31.

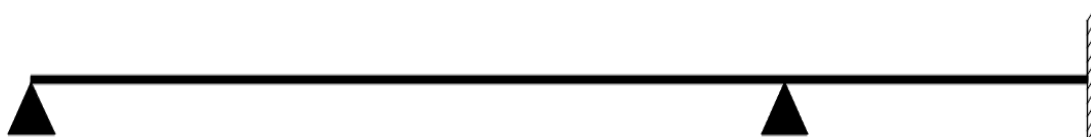


Figura 31 - Esquema estrutural da viga V4.0

A - Armadura de esforço transverso

Relativamente ao esforço transverso, o EC2 diz que no caso de elementos com armadura de esforço transverso constituída por estribos verticais, o valor de cálculo do esforço transverso resistente (V_{rd}), é o menor valor das expressões a seguir apresentadas.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad (5.5)$$

$$V_{Rd,máx} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta) \quad (5.6)$$

em que:

A_{sw} - área da secção transversal das armaduras de esforço transverso;

s - espaçamentos dos estribos;

f_{ywd} - valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transverso;

v_1 - coeficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transverso;

α_{cw} - coeficiente que tem em conta o estado de tensão no banzo comprimido (tem o valor de 1 para estruturas não pré-esforçadas);

Na Figura 32 (a) pode observar-se a envolvente do esforço transverso proveniente da folha de cálculo. Quando comparado com o diagrama de esforço transverso do programa de cálculo *Robot* (Figura 32 (b)), conclui-se que a estimada pela folha de cálculo tem uma representação igual ao diagrama estimado pelo *software* de cálculo estrutural.

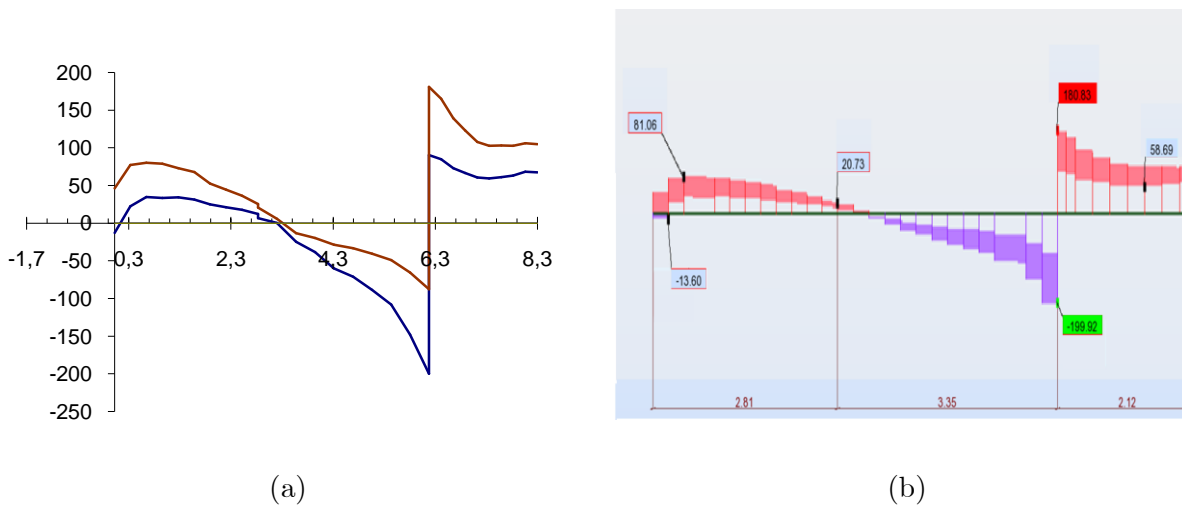


Figura 32 - Envoltura de esforço transverso na viga em estudo: (a) diagramas provenientes da folha de cálculo; (b) diagramas provenientes do programa *Robot*

Posto isto, o utilizador define uma armadura de esforço transverso (Figura 33 (a)) e graficamente verifica se a solução é viável (Figura 33 (b)). De salientar que o utilizador apenas necessita de preencher os campos a cor cinzenta. Como se pode verificar na tabela, na zona do apoio, onde o esforço transverso é maior, optou-se por uma armadura de $157\text{mm}^2//200$ ($\phi 10//20$) e na zona a meio vão optou-se por uma armadura de $101\text{mm}^2//200$ ($\phi 8//20$).

Hipóteses de armaduras		
Armadura transversal		
hipótese	1	2
α (°)	90	90
Asw (mm ²)	157	101
s (mm)	200	200
ρ_w	0.0031	0.002
VRd,s (kN)	292.6	188.2
sl,max (mm)	413	413
st,max (mm)	413	413
sl,max - afastamento longitudinal máximo		
st,max - afastamento transversal máximo de ramos consecutivos		

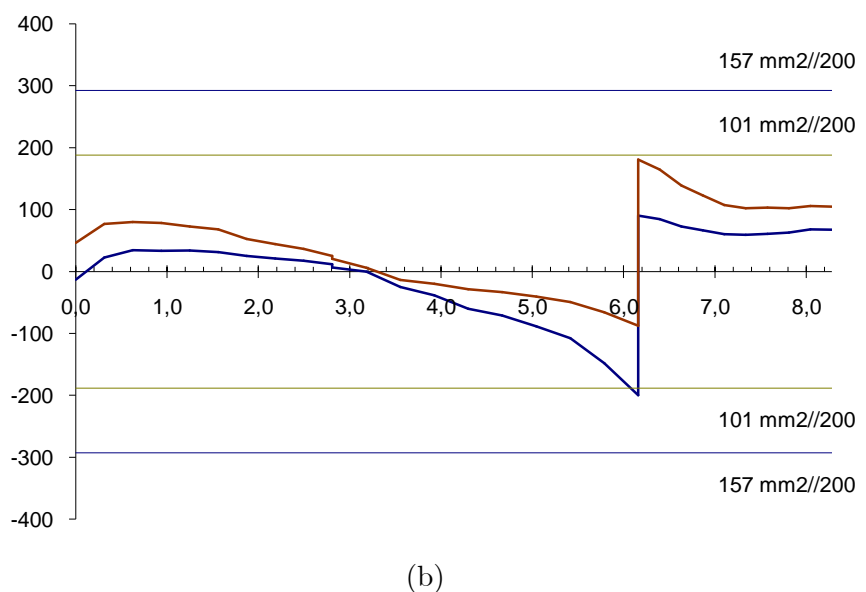


Figura 33 - (a) Duas hipóteses de armaduras; (b) representação gráfica da envoltura de esforço transverso e o valor limite resistente das hipóteses inseridas;

C - Armaduras de momentos fletores

Segundo o EC2, a determinação da resistência à flexão última de um elemento em betão armado baseia-se nas seguintes hipóteses:

- as secções mantêm-se planas;
- a extensão nas armaduras aderentes, em tração ou em compressão, é a mesma da do betão que as envolve;
- a resistência do betão à tração é ignorada;
- as tensões no betão comprimido são obtidas com base no diagrama de cálculo tensões-extensões, indicado na Figura 34;
- as tensões nas armaduras são obtidas através dos diagramas de cálculo, apresentados na Figura 4 (secção 2.3).

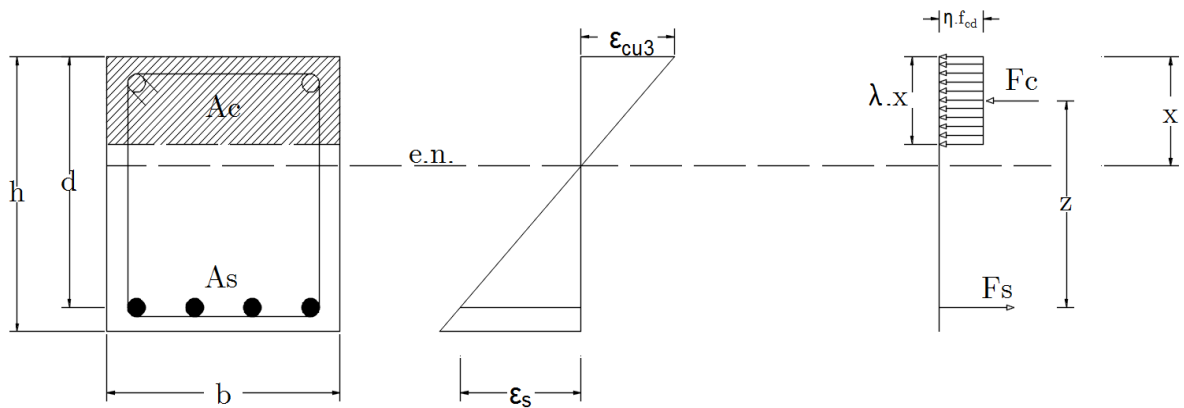


Figura 34 - Diagramas tensão-extensão

Através do cálculo orgânico é possível determinar a armadura necessária para um determinado momento fletor. Com base no equilíbrio das forças internas resulta:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_c - F_s = 0 \end{array} \right. \quad (5.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{rd} = F_c \times z \end{array} \right. \quad (5.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z = d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \end{array} \right. \quad (5.9)$$

em que:

$$F_c = \lambda \times x \times b \times \eta \times f_{cd} \quad (5.10)$$

$$F_s = f_{yd} \times A_s \quad (5.11)$$

$$\lambda = 0.8 \quad \text{para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (5.12)$$

$$\lambda = 0.8 - \frac{f_{ck} - 50}{400} \quad \text{para } 50 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (5.13)$$

$$\eta = 1.0 \quad \text{para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (5.14)$$

$$\eta = 0.8 - \frac{f_{ck} - 50}{200} \quad \text{para } 50 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (5.15)$$

d – altura útil da secção

Na Figura 35 pode observar-se a envolvente dos momentos fletores. Assim como no caso do esforço transversal, o diagrama dos momentos fletores da folha de cálculo (Figura 35 (a)) tem um traçado idêntico ao obtido através do programa de cálculo *Robot* (Figura 35 (b)).

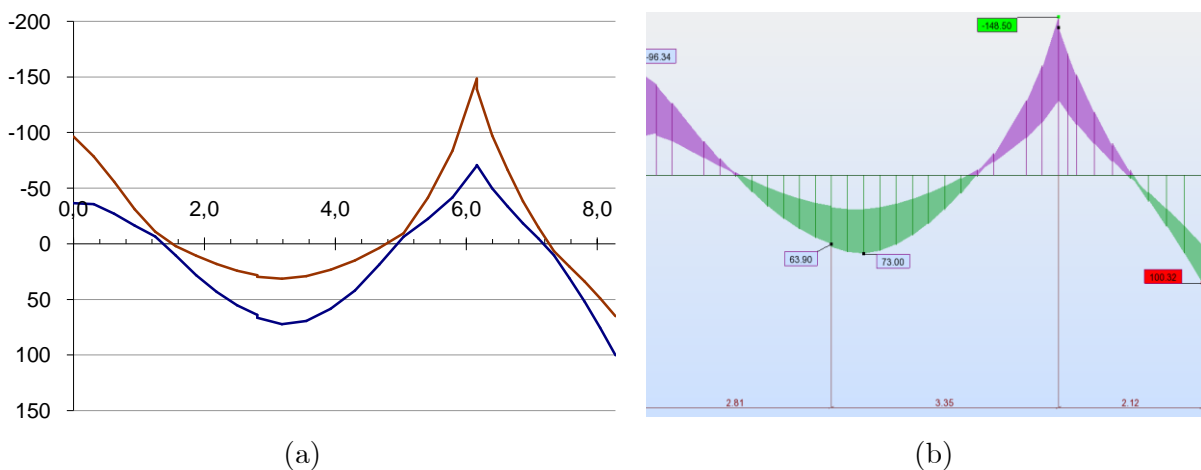
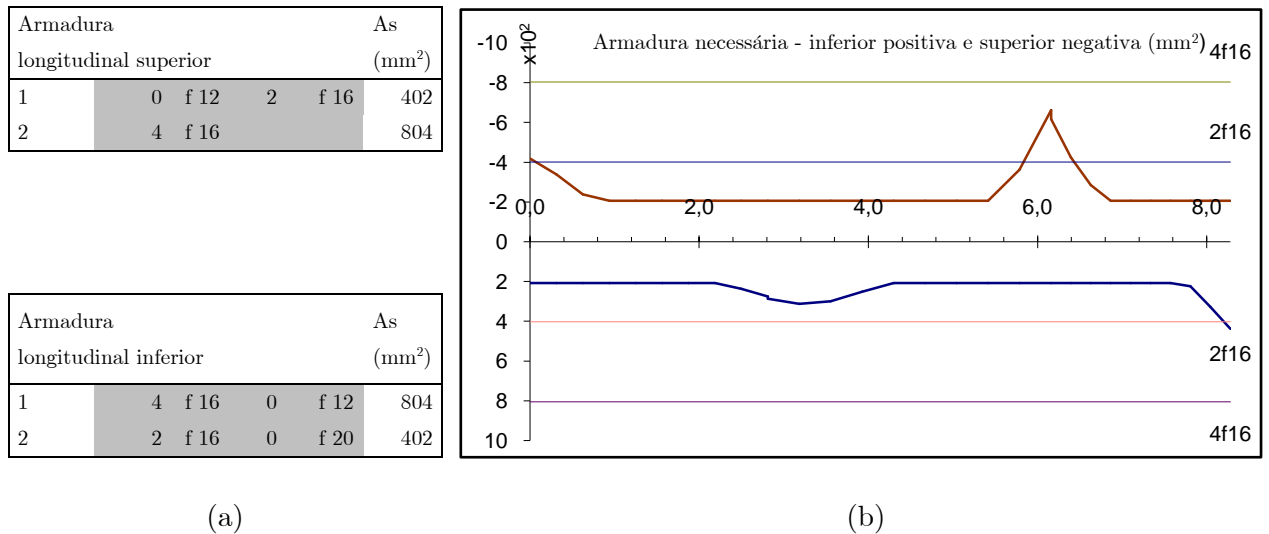


Figura 35 - Envolvente dos momentos fletores da viga em estudo; (a) diagramas provenientes da folha de cálculo; (b) diagramas provenientes do programa Robot;

Posto isto, o utilizador define uma armadura para resistir ao momento fletor (Figura 36 (a)) e graficamente verifica as soluções viáveis (Figura 36 (b)). Como se pode verificar optou-se para a armadura inferior $4\phi 16$ (com um $A_{s,eff}$ de $8,03 \text{ cm}^2$). Para a armadura superior optou-se por $2\phi 16$ ($A_{s,eff}$ de $4,02 \text{ cm}^2$) com um reforço na zona do apoio central de mais $2\phi 16$, ou seja um total de $4\phi 16$.



(a) Hipóteses de armaduras para resistir ao momento fletor na viga em estudo; (b) representação gráfica da envolvente e o valor limite resistente das hipóteses inseridas.

5.2.5. Dimensionamento das lajes

O dimensionamento das lajes foi realizado a partir de um modelo local de um piso tipo em laje fungiforme. Foram tidos em consideração alguns aspetos particulares: a inclusão dos negativos para instalações mecânicas e hidráulicas, definição rigorosa de zonas maciças e aligeiradas e aplicação da ação distribuída da sobrecarga de modo alternado nos vãos da laje. De forma a mobilizar a rigidez dos elementos verticais, pilares e paredes, consideram-se no modelo da laje estes elementos adjacentes à laje entre os pisos inferior e superior, atribuindo apoios rotulados nas extremidades opostas à laje. Na Figura 37 está ilustrada a modelação da

laje do piso tipo conforme referido anteriormente, em que a cor vermelha está representado as partes aligeiradas e a cinzento as zonas maciças da laje.

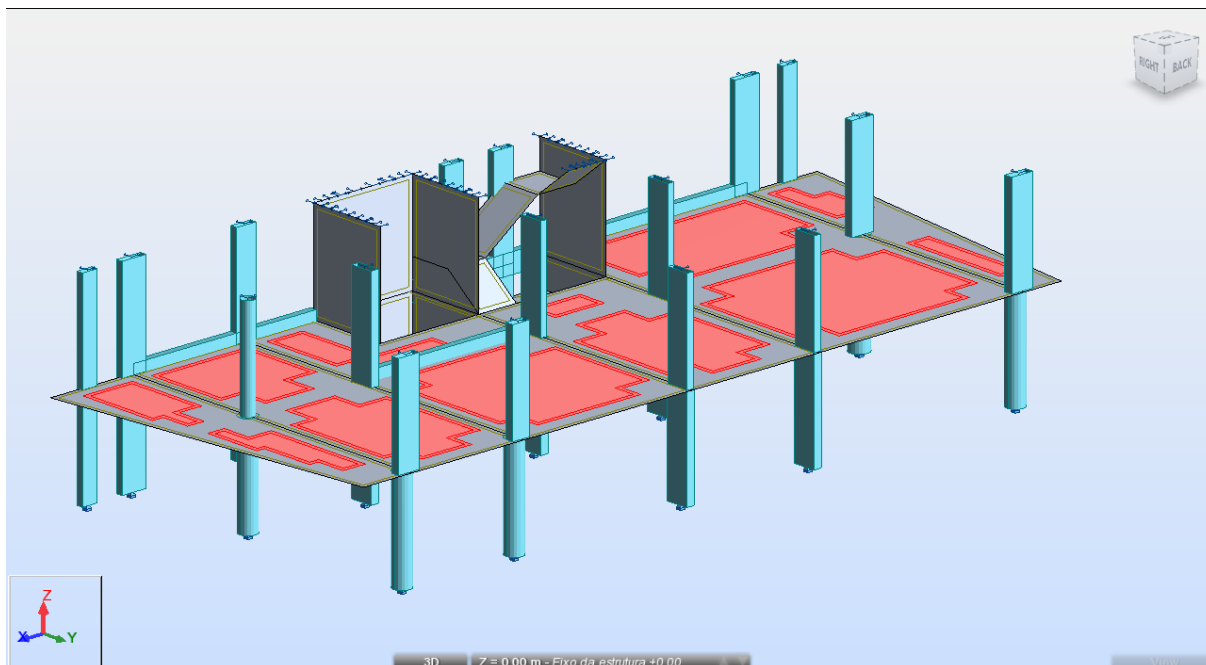


Figura 37 - Modelo da laje do piso tipo

No projeto considerou-se que o aligeiramento das lajes é realizado através de blocos de aligeiramento não recuperáveis. As propriedades dos blocos de aligeiramento encontram-se resumidas na tabela seguinte:

Tabela 16 - Propriedades dos blocos de aligeiramento da laje fungiforme

Altura Total Ht (cm)	Altura do Bloco hb (cm)	Esp. Lam. Comp. h0 (cm)	Largura da nervura (cm)	Volume do bloco (m ³)	Volume de betão (m ³ /m ²)	Peso próprio da laje (kN/m ²)	Inércia da Laje I _x -I _y (cm ⁴)
27	20	7	15	0.109	0.116	3.6	42370

Para efeitos de modelação, na zona aligeirada, é utilizada uma laje com uma altura constante equivalente mantendo a inércia da laje aligeirada. Adicionalmente foi retirado um coeficiente de redução do peso e massa da laje, de modo a simular corretamente uma laje aligeirada no modelo de cálculo (Figura 38 (a)).

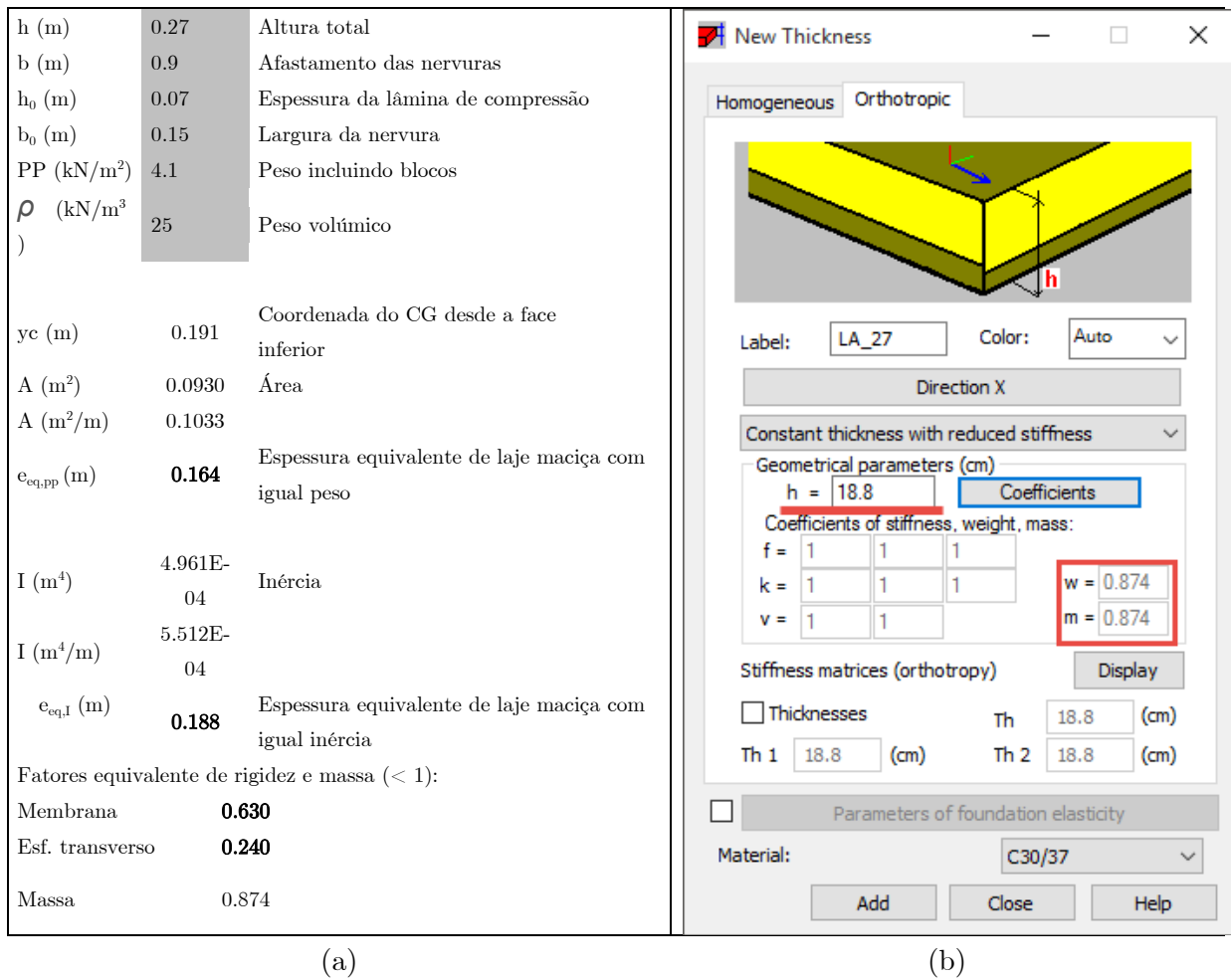


Figura 38 - (a) Cálculo da altura equivalente da laje aligeirada; (b) criação desta laje no programa *Robot*

A - Armadura para momentos fletores

Das Figura 39 à Figura 44 apresentam-se os diagramas de esforços relativos aos momentos fletores na laje tipo dos pisos superiores para a envolvente das combinações de ações em estado limite último.

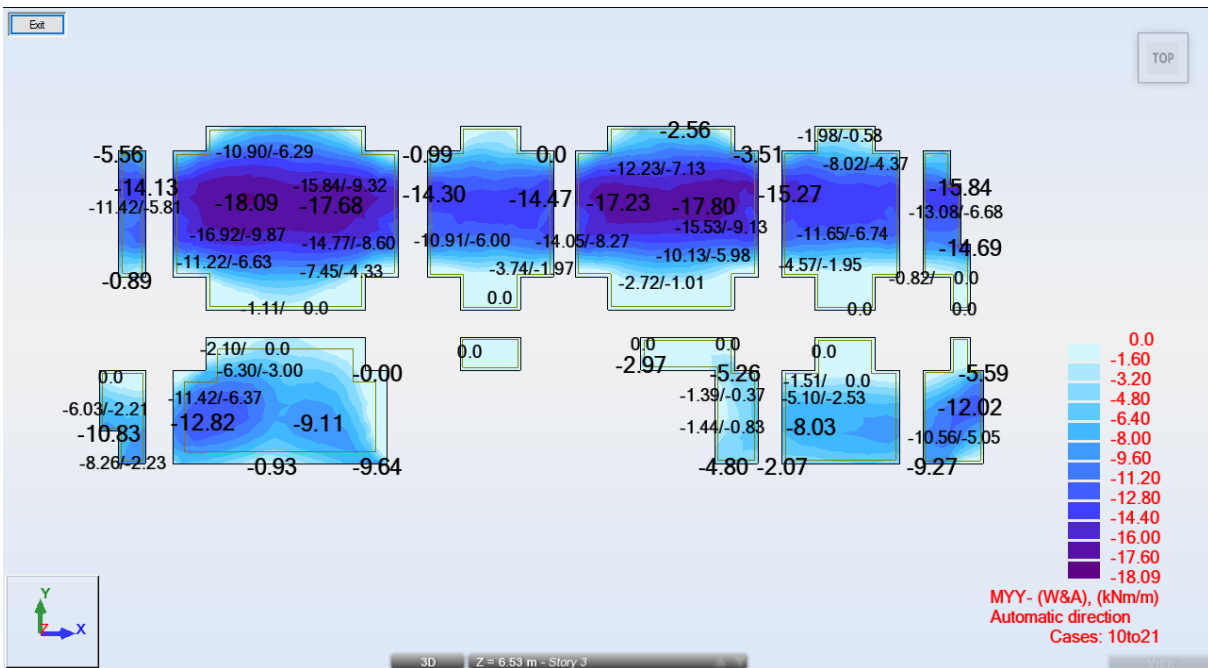


Figura 39 - Esforços para cálculo de armaduras inferiores na direção yy - zona aligeirada

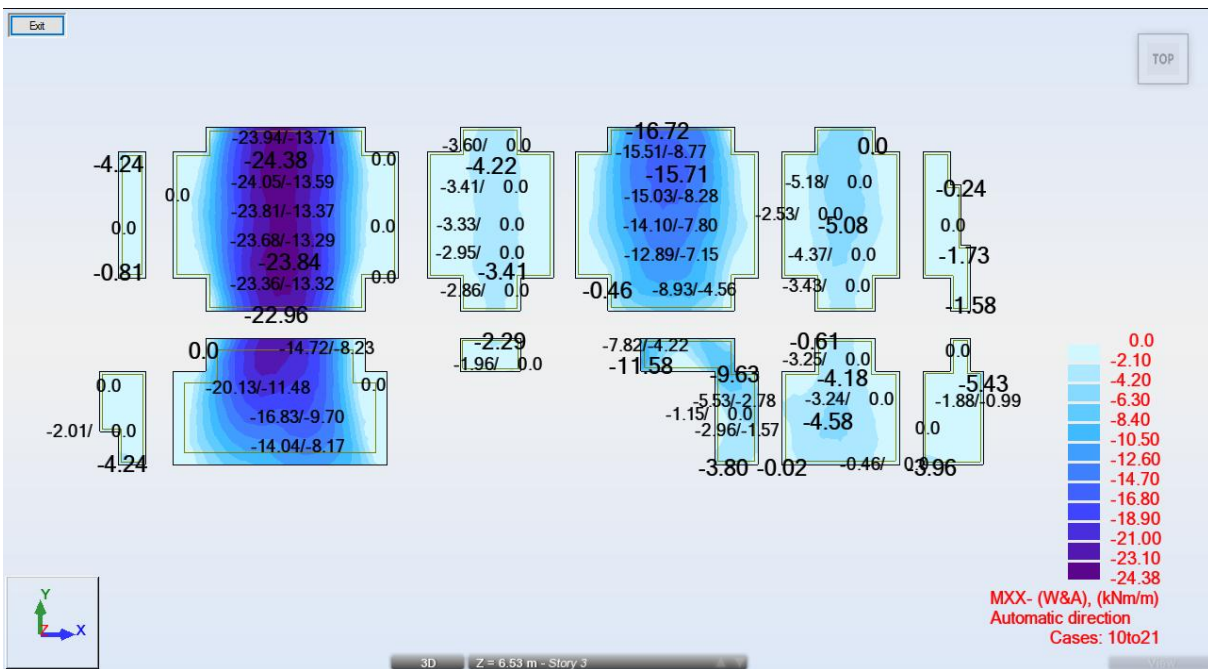


Figura 40 - Esforços para cálculo de armaduras inferiores na direção xx - parte aligeirada

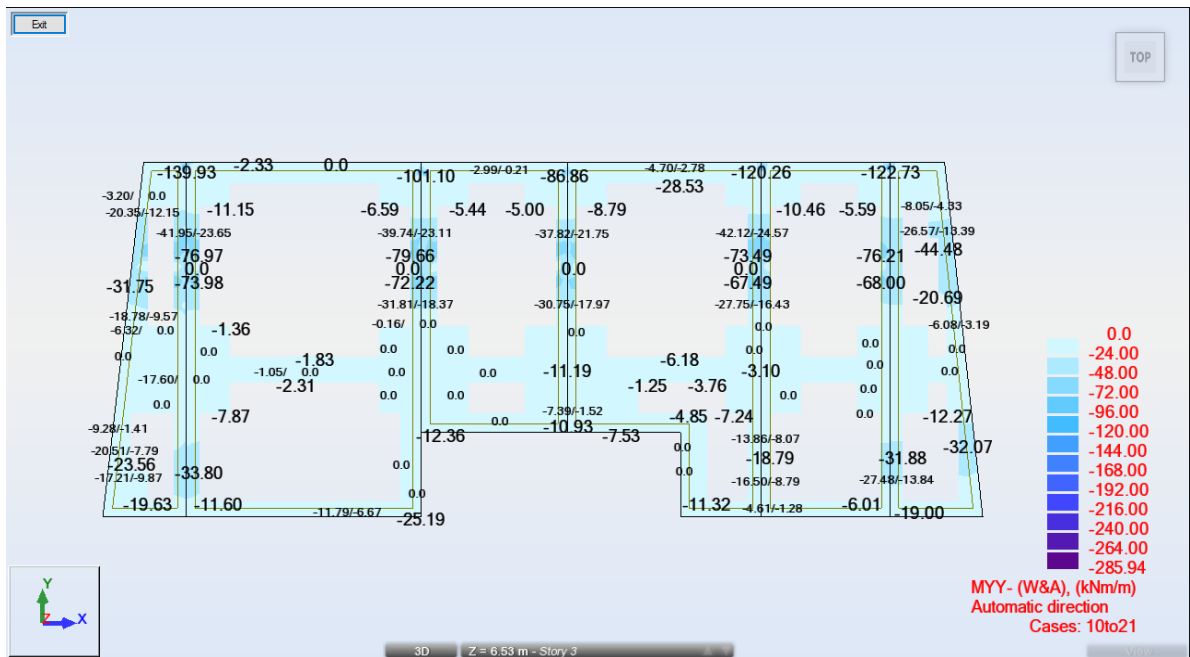


Figura 41 - Esforços para cálculo de armaduras inferiores na direção yy - parte maciça

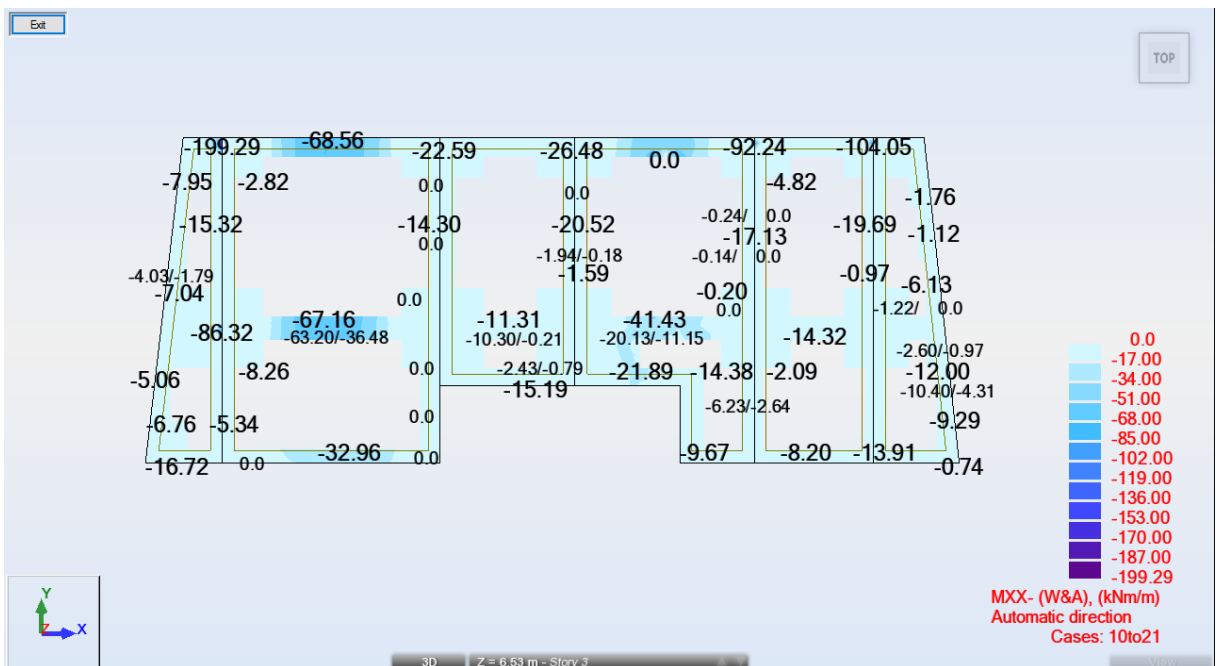


Figura 42 - Esforços para cálculo de armaduras inferiores na direção xx - parte maciça

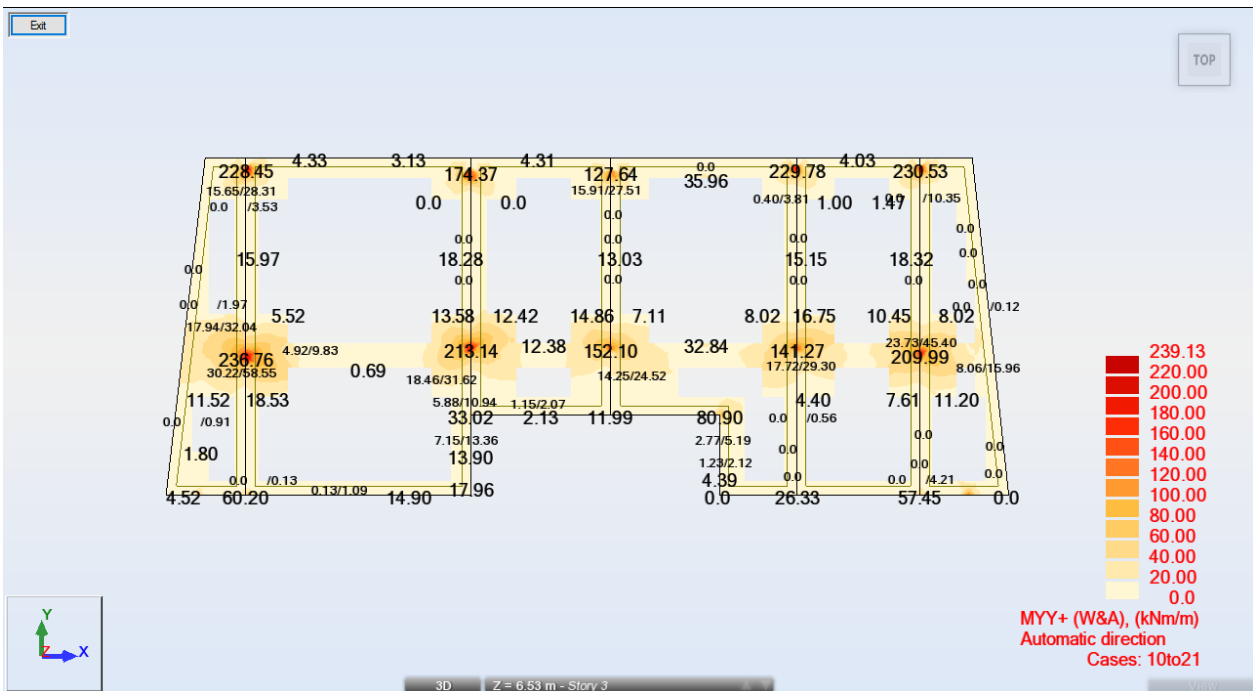


Figura 43 - Esforços para cálculo de armaduras superiores na direção yy - parte maciça

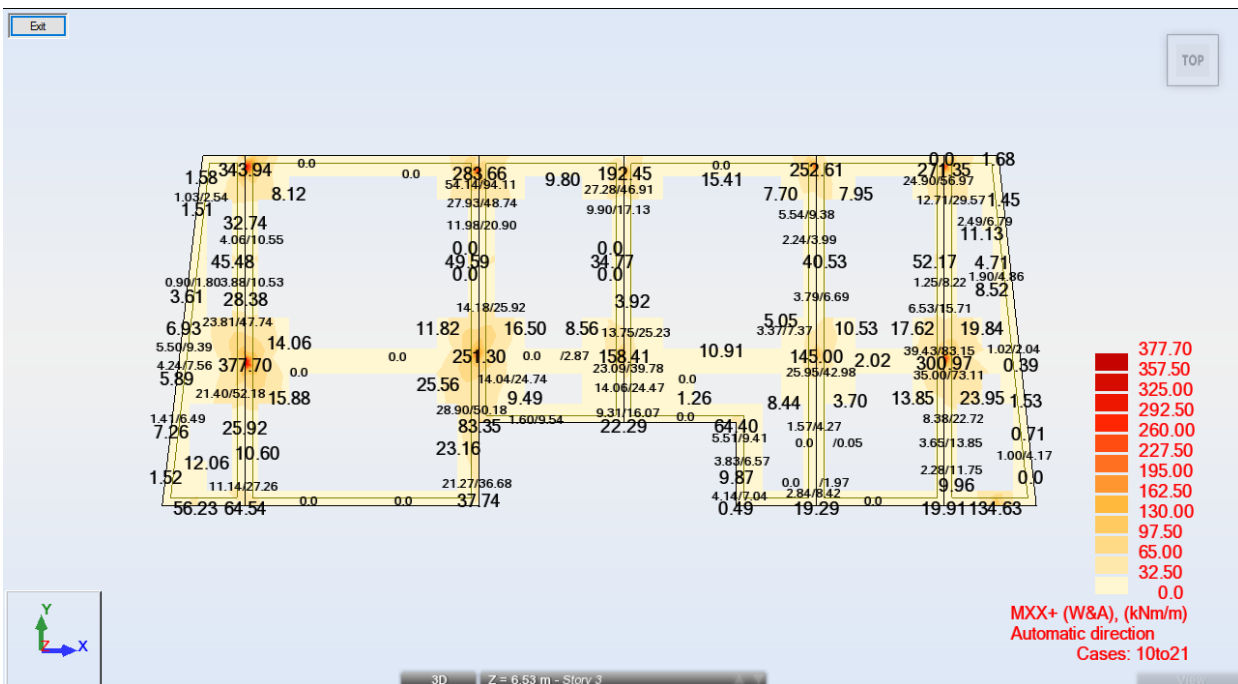


Figura 44 - Esforços para cálculo de armaduras superiores na direção xx - parte maciça

Os diagramas de momentos negativos revelam valores de pico sobre os pilares. A estratégia de dimensionamento das armaduras teve em conta uma redistribuição destes valores atendendo à largura dos pilares e à capacidade de redistribuição da laje, garantindo o

equilíbrio do momento global na largura de influência do pilar (Figura 45). Embora o programa *Robot* disponibilize a opção "*Reduction of forces above columns and walls*" que redistribui os valores de pico a mesma não foi utilizada.

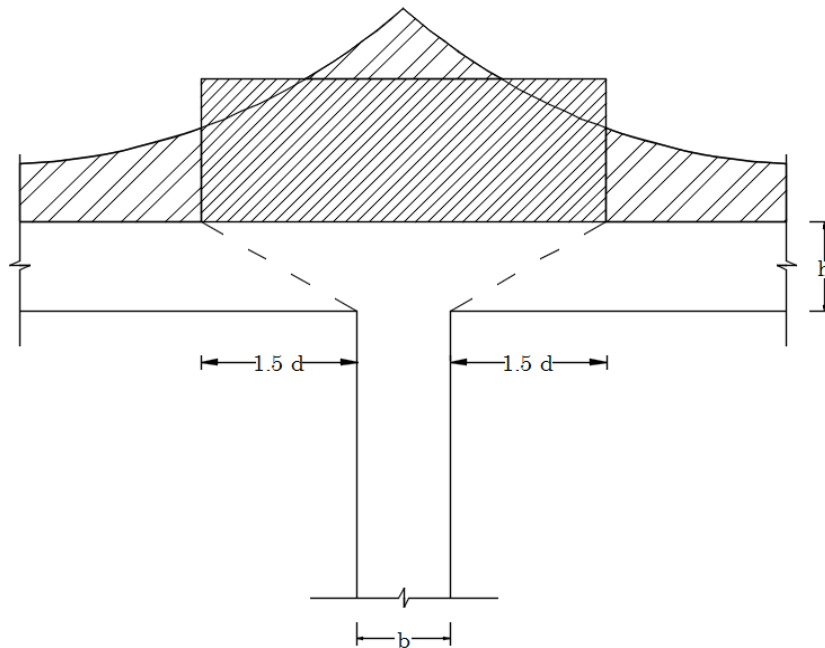


Figura 45 - Representação da redistribuição dos valores de momento de pico sobre os pilares.

Apresentam-se de seguida as tabelas de momentos fletores resistentes considerando as armaduras definidas em projeto. Os valores dos momentos fletores resistentes são calculados de acordo com o REBAP considerando secções retangulares submetidas à flexão simples.

Tabela 17 - Armaduras inferiores e superiores, respetivamente, consideradas nas zonas maciças

As/m	d (m)	b (m)	As (m ²)	f _{cd} (MPa)	f _{yd} (MPa)	M _{Rd} (kNm/m)	μ	ρ (%)
f12//0.125	0.24	1	9.05E-04	20.0	434.8	86	0.08	0.39
f16//0.125	0.24	1	1.61E-03	20.0	434.8	145	0.13	0.68

Tabela 18 - Armaduras consideradas nas zonas aligeiradas

As/nervura	d (m)	b (m)	As (m ²)	f _{cd} (MPa)	f _{yd} (MPa)	M _{Rd} (kNm/m)	μ	ρ (%)
2f12	0.235	0.9	2.262E-04	20	435	25	0.02	0.11
2f16	0.235	0.9	4.021E-04	20	435	44	0.04	0.19

B - Armadura para punçoamento/esforço transverso

Para o cálculo da armadura de punçoamento/esforço transverso foi considerado um pilar de bordo com dimensões de $70 \times 25 \text{ cm}^2$ (pilar com a cor vermelha na Figura 46) de modo a não tornar demasiado exaustivo os cálculos apresentados neste trabalho. Neste pilar o esforço axial do pilar sob a laje é igual a 251,20 kN.

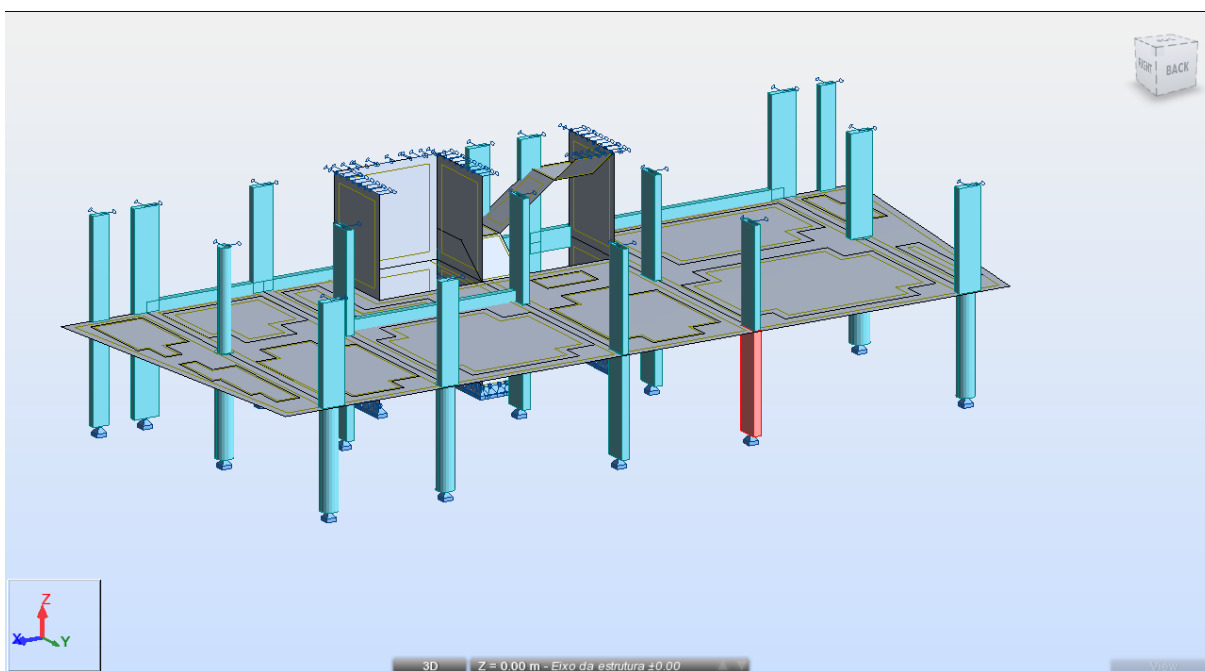


Figura 46 - Pilar considerado para o cálculo da armadura de punçoamento

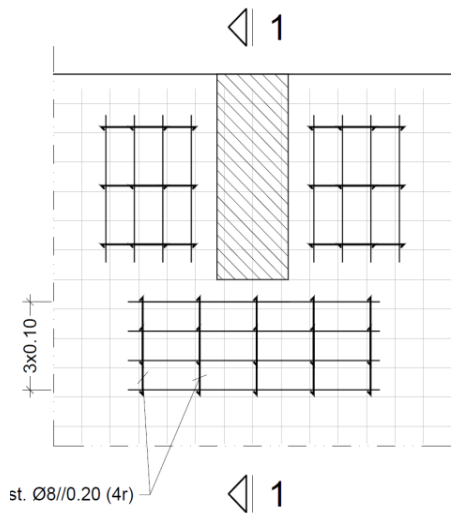
Na Tabela 19 apresenta-se uma folha de cálculo para o punçoamento, através da qual se chegou a uma solução final de 4 ramos com diâmetro de 8 mm espaçados a 20 cm. Para esta solução, à face do pilar, obteve-se um rácio de 24%. Contudo, no contorno crítico, tem-se um rácio de 65% sendo este já considerável, tendo-se optado assim por esta solução. Na Figura 47 é possível visualizar a solução de armaduras de punçoamento adotada para este pilar.

Tabela 19 - Tabela do cálculo da armadura de punçoamento.

Resistência ao punçoamento				
	MPa	kN/m	kN	
$v_{Rd,c}$	0.51	120.1	375.5	Sem armaduras
$v_{Rd,cs}$	0.61	142.6	445.7	Com armaduras
$v_{Rd,max}$	5.28	1240.8	1185.0	Máxima resistência

Verificações					
v_{Ed0}	1.29	302.3	288.7	Face do pilar	24%
v_{Ed1}	0.39	92.3	288.7	Contorno crítico	65%

Planta



Corte 1-1

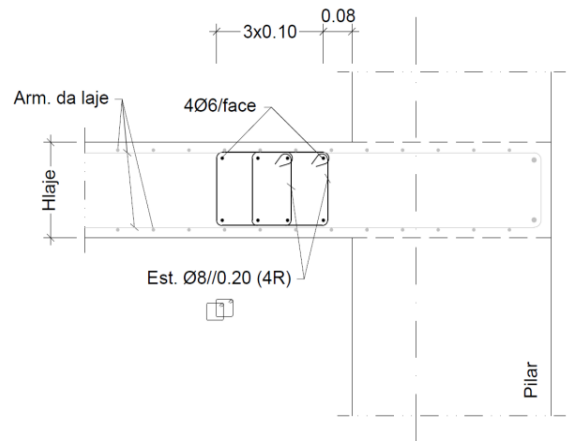


Figura 47 - (a) Desenho em planta da armadura de punçoamento; (b) corte 1-1.

C - Verificação da deformação em serviço

A flecha a longo prazo da laje é calculada com base no valor do deslocamento elástico a curto prazo. Na Figura 48 ilustra-se o mapa de deslocamentos verticais da laje, em mm, para os estados limite de serviço.

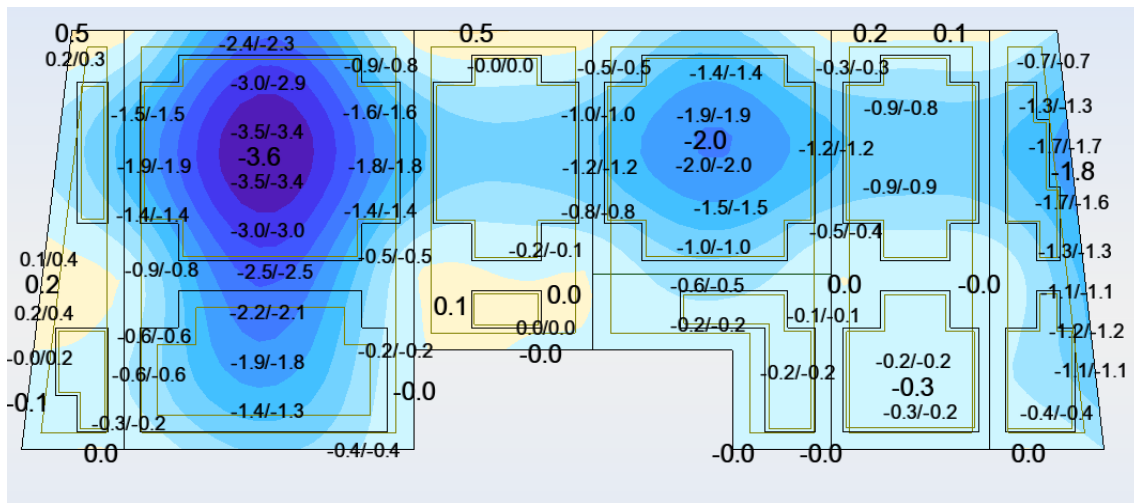


Figura 48 - Deslocamentos verticais elásticos das lajes dos pisos elevados

O valor elástico dos deslocamentos deve ser amplificado para ter em conta o efeito da fluência e da fendilhação do betão. Esta amplificação é calculada de acordo com o método bilinear (Figueiras, J.A (1997)) apresentado na Figura 49.

Esforços		Materiais		Dados da Secção				Coeficientes	
Md (kNm)	12.42	φ	2.00	h (mm)	270	h_0 (mm)	70	Método Bilinear:	
Mr (kNm)	8.53	χ	0.80	b (mm)	900	b_0 (mm)	150		
		$\chi\varphi$	1.60			A (mm ²)	402	para t=0	k1
		Eb (GPa)	32			a (mm)	40	para t=t	0.40
		fct (KPa)	2896			ρ (%)	0.165	β_1	β_2
		Ea (GPa)	200			$\alpha\rho$	0.0103	1.00	1.00
								1.00	0.50

Flecha Elástica		Método Bilinear	
ac (mm)	3.60	Ks1	0.898
		K φ 1	0.786
		Ks2	4.480
		K φ 2	0.083
		a_{t=0} (mm)	7.27
		a_{t=t} (mm)	15.21
		Multiplicador	4.2
		Comb. Frequente	
		L/400 (mm)	17.3
		Par. Div. (mm)	15

Legenda:

- k1=0.4 varões de alta aderência
- k1=0.8 varões de aderência normal
- $\beta_2=1.0$ carregamento inicial
- carregamento de longa duração
- $\beta_2=0.5$ ou ciclos de carregamento

A: área de aço
a: recobrimento da armadura
h: altura
b: largura
ac: flecha elástica
at=t: flecha a longo prazo

Figura 49 - Layout da folha de cálculo para a verificação em serviço

Deste modo obteve-se o valor da flecha a longo prazo é de 15,21 mm que é inferior ao valor admissível de 17,3 mm, correspondente a $L/400$ de acordo com o REBAP.

6. APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS BIM AO PROJETO DO EDIFÍCIO EM BETÃO ARMADO

6.1. OBJETIVO

A ferramenta BIM é utilizada em projeto desde a fase inicial facilitando a coordenação entre os projetos das diversas especialidades e a arquitetura através da visualização gráfica em ambiente tridimensional do edifício.

O resultado da utilização destas ferramentas é a criação e desenvolvimento de um modelo virtual do edifício incorporando a informação das diversas especialidades: arquitetura, estruturas, instalações hidráulicas, instalações mecânicas de ventilação e ar-condicionado, instalações de segurança, vias de comunicação, entre outros. Salienta-se a importância do desenvolvimento do modelo desde a fase de estudo prévio.

O desenvolvimento do modelo virtual decorre ao longo das várias etapas do projeto. Com o decorrer das etapas a troca de informação entre as diversas equipas de projeto torna-se mais expedita diminuindo simultaneamente o tempo gasto na execução do projeto.

6.2. MODELAÇÃO ESTRUTURAL COM RECURSO À PLATAFORMA BIM

A plataforma utilizada no desenvolvimento deste trabalho consistiu no programa *Revit* desenvolvido pela empresa *Autodesk*.

A construção da parte estrutural do modelo é realizada através de uma modelação paramétrica. Com base num modelo paramétrico existe uma melhor perceção da estrutura, bem como a identificação de eventuais anomalias na conceção da mesma. Nas figuras seguintes é possível observar o modelo paramétrico de edifício em estudo. Na Figura 50(a) representa-se uma vista global da estrutura. Na Figura 50 (b) apresenta-se a cobertura

metálica da estrutura e na Figura 50 (c) ilustra-se o *render* do interior de um piso onde é possível observar com um nível mais realístico a estrutura.

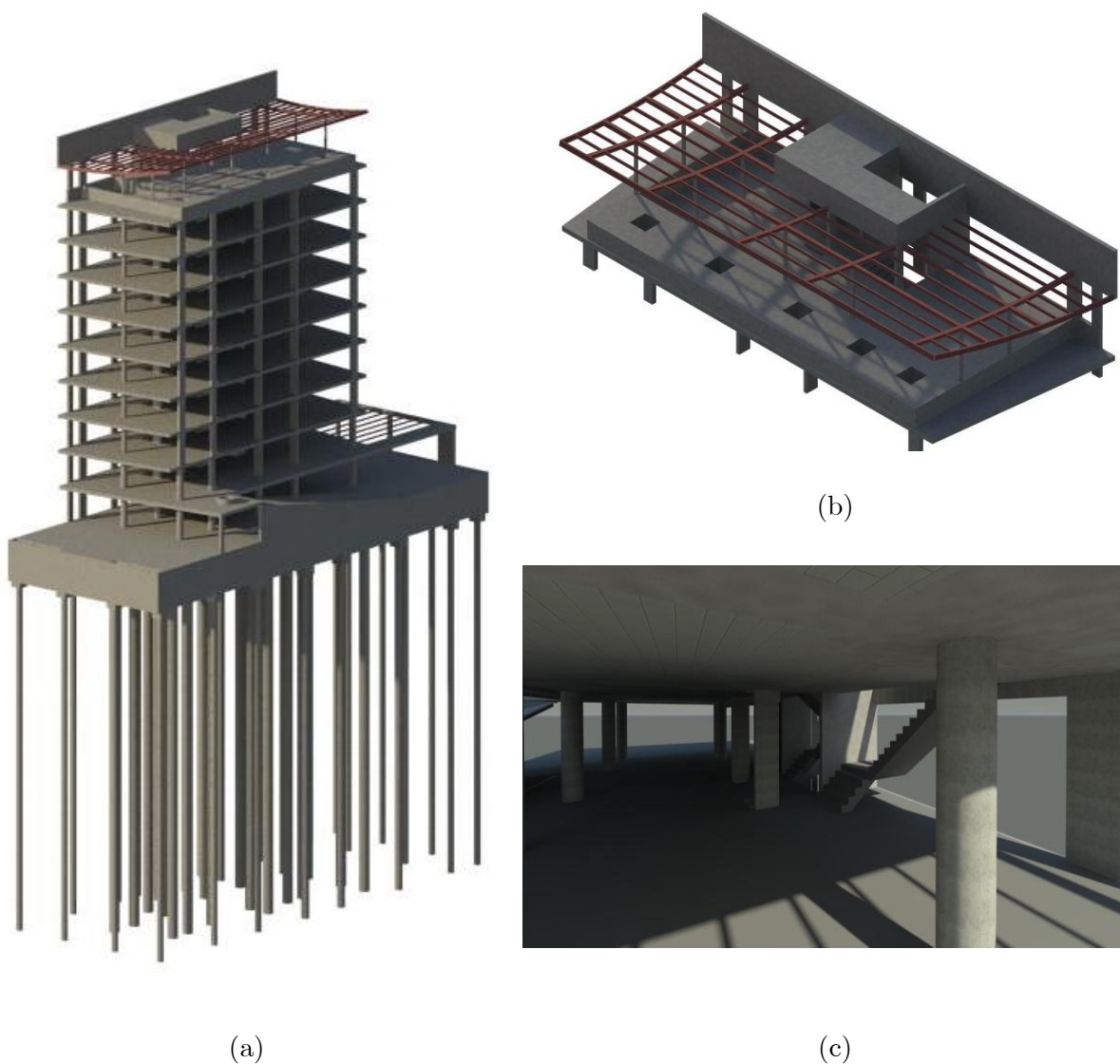


Figura 50 - Modelo paramétrico do edifício em estudo: (a) representação global da estrutura; (b) cobertura metálica do edifício; (c) *render* de um piso tipo

Os elementos estruturais disponíveis no *Revit* são os pilares, vigas, lajes maciças, paredes, fundações e treliças (Figura 51). De salientar, que para a modelação das lajes aligeiradas fungiformes existem algumas famílias em bibliotecas. Porém o modelo ficaria muito pesado não sendo viável a sua utilização.

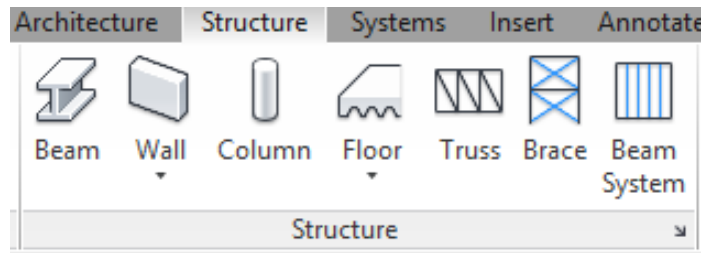


Figura 51 - Elementos estruturais disponíveis no *Revit*

A modelação em BIM é feita por objetos que possuem características não só geométricas como também físicas, pois a estes objetos são associados tipos de materiais e outros atributos. Para além de uma lista de materiais já pré-existente no *Revit*, é possível a adição e personalização de novos materiais e respetivas características, podendo estes ser arquivados para futura utilização em qualquer outro projeto *Revit* (Tarrafa, D.G.P. (2012)). Na Figura 52 apresenta-se a janela do *Revit* onde é possível seleccionar o material da base de dados.

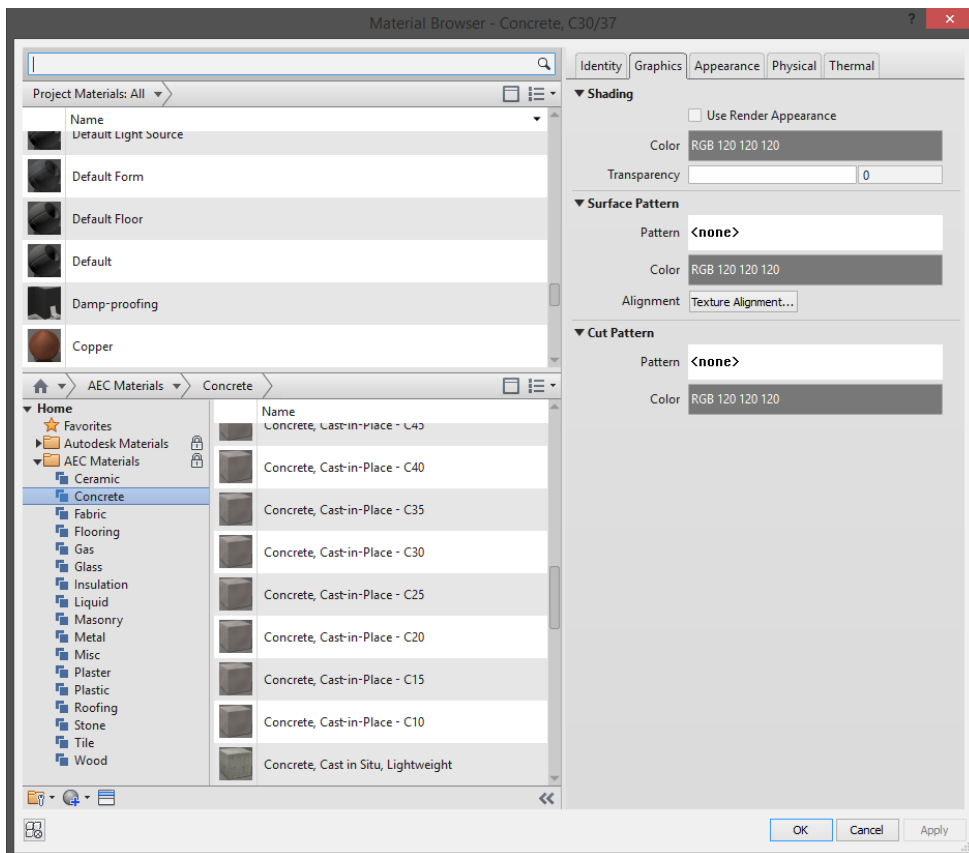


Figura 52 - Base de dados dos tipos de materiais do *Revit*

6.2.1. Parametrização dos elementos do modelo

Para a criação de um modelo com o conceito BIM é necessária a existência de objetos capazes de traduzir os diversos elementos necessários para a construção do mesmo. Para isso, existem "Famílias" de objetos paramétricos que permitem ao utilizador criar novos objetos com base na modificação de objetos existentes (Figura 53).

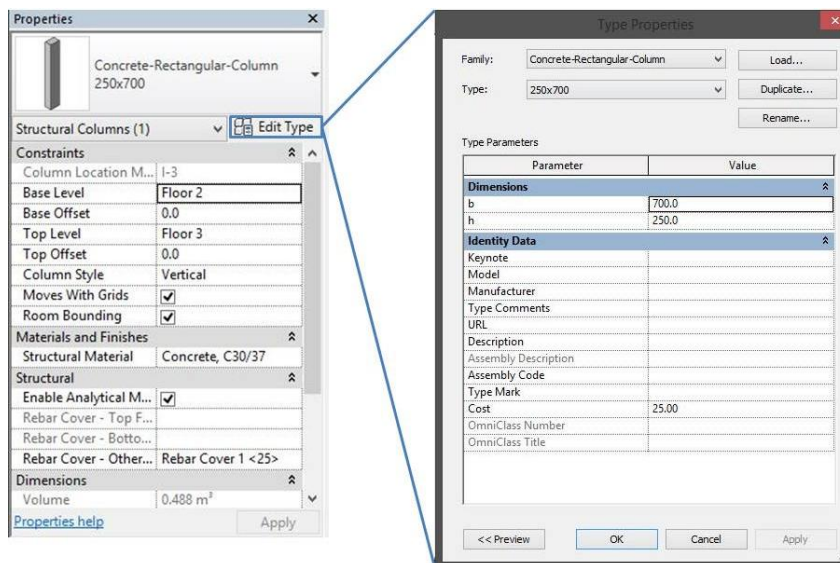


Figura 53 - Exemplo da criação de um elemento pilar modificando as características de um elemento existente

Inicialmente, caso uma família não esteja disponível no projeto *Revit*, o utilizador consegue criá-la de raiz e importar para o projeto. Na Figura 54 apresenta-se um exemplo da criação de uma família especificamente para o projeto, neste caso representando uma estaca de fundação, em que:

1. Vista 3D do objeto;
2. Vista em planta do objeto;
3. Vista em alçado do objeto;

4. Propriedades do objeto, podendo estas também ser editadas posteriormente;
5. Importação do objeto para o projeto *Revit*.

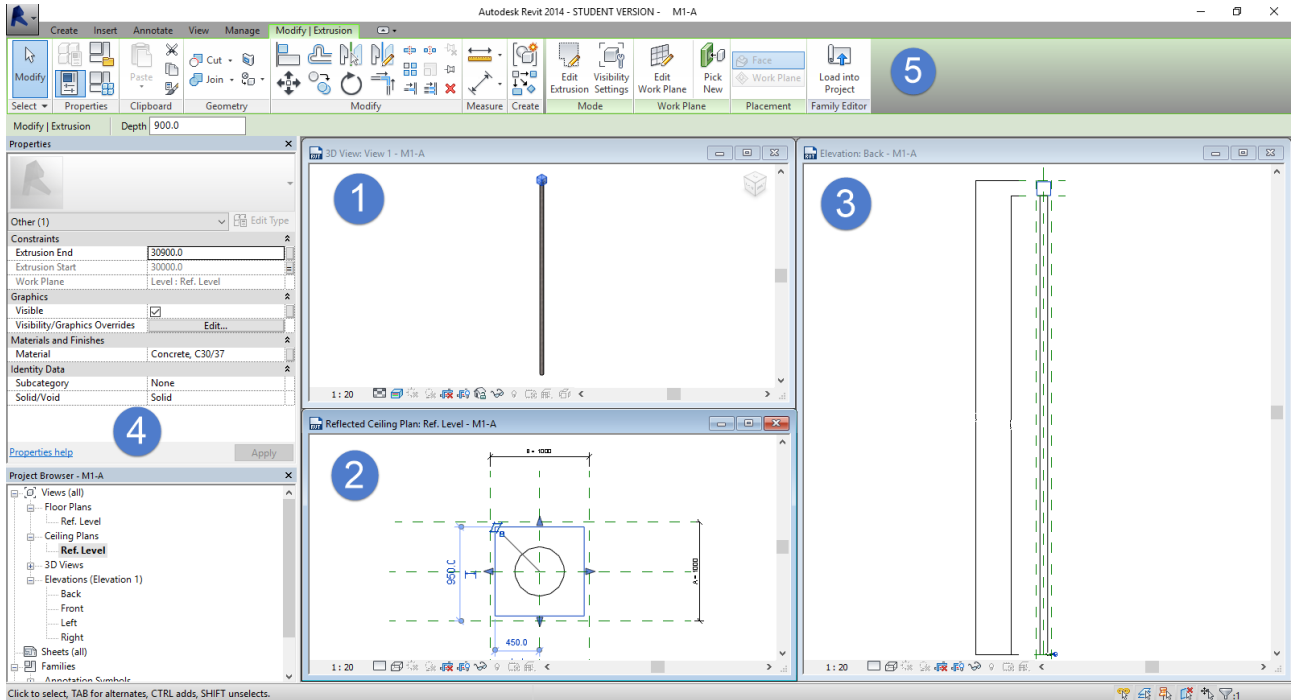


Figura 54 - Criação de uma nova família no *Revit*

6.2.2. Modelo analítico

No *Revit Structure* todos os objetos modelados são assumidos como estruturais. A separação dos objetos estruturais dos restantes é importante uma vez que permite a obtenção de mapas de quantidades, orçamentos e outras informações relevantes relativas apenas à parte estrutural da obra.

Ao longo da modelação deve ter-se em conta a possível ligação e transferência de informação entre o *Revit* e o *Robot Structural Analysis* de forma a prevenir a ocorrência de erros no modelo analítico do *Robot Structural Analysis*. Desta forma, o *Revit* proporciona uma projeção do modelo analítico sendo esta essencial para obter um modelo no *Robot*

isento de erros. Na Figura 55 apresenta-se a projeção do modelo analítico, sendo cada tipo de elemento estrutural representado por uma cor diferente.

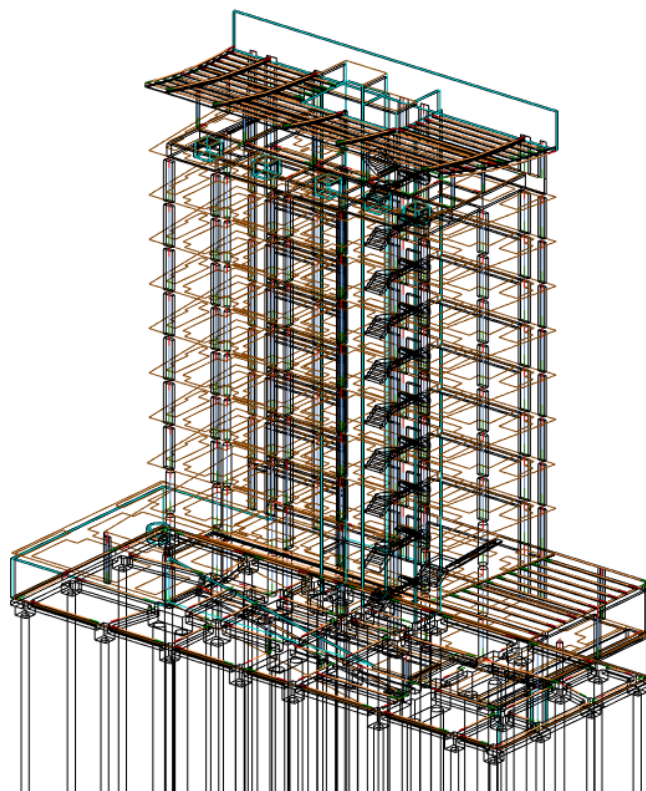


Figura 55 - Modelo analítico em *Revit structure*

6.2.3. Ligação *Revit-Robot*

A interoperabilidade entre o *Revit* e o *Robot* é feita através de uma extensão do *Revit* (Figura 56) onde se possibilita ao utilizador o envio do modelo diretamente para o *Robot* ou proceder à atualização do modelo de *Revit* a partir de um modelo de *Robot*. Deste modo podem ser transferidos dados para um ficheiro do *Robot Structural Analysis* (ficheiro .RTD) possibilitando ao projetista de continuar a trabalhar no ficheiro *Revit Structure*, enquanto outro técnico trabalha no modelo *Robot*.

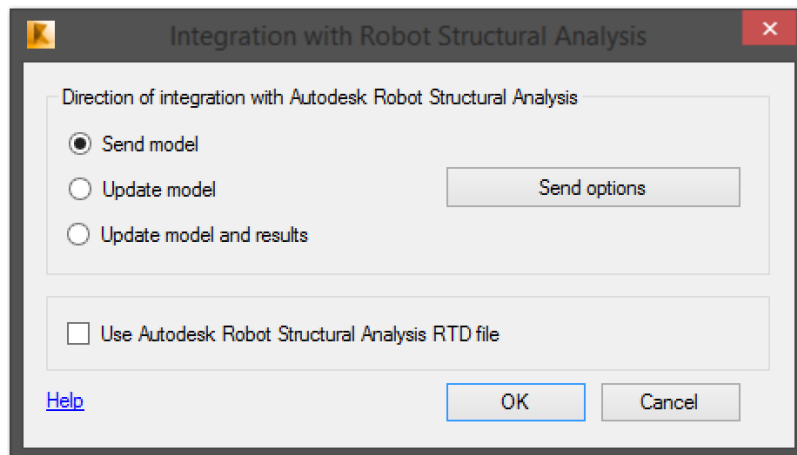


Figura 56 - Caixa de diálogo de atualização do modelo de *Revit* e envio para o *Robot Structural Analysis*

O intercâmbio entre *Revit* e *Robot* é bidirecional permitindo o modelo em BIM reconhecer as alterações ao projeto de estruturas efetuadas no processo de dimensionamento do *Robot*. Estas alterações podem envolver modificações da secção dos elementos, adição/remoção de elementos, entre outras. Existem algumas limitações, nomeadamente o modelo BIM não reconhece alguns elementos modelados em *Robot*, designadamente as fundações e aberturas. Na Figura 57 representa-se um esquema da ligação bidirecional do modelo elaborado, em que:

- 1) Modelação BIM (*Revit*) e posterior envio automático para o *Robot*;
- 2) Análise do modelo numérico e dimensionamento dos elementos estruturais do mesmo;
- 3) Envio para o modelo BIM inicial, atualizando toda a informação da estrutura que tenha sido modificada.

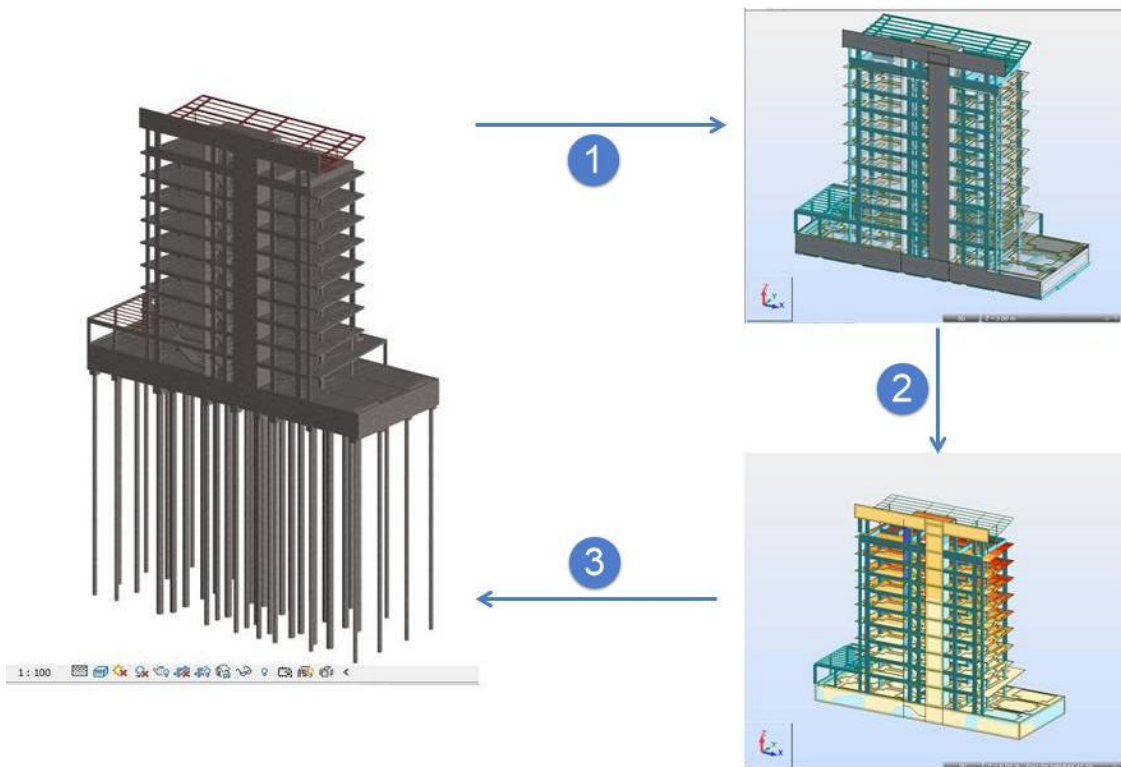


Figura 57 - Ligação bidirecional entre o *Revit* e o *Robot*

7. OUTROS PROJETOS

Durante o estágio, para além de desenvolver o trabalho anteriormente apresentado, foi proposto o acompanhamento de outros projetos dos quais se destacam a modelação e análise de um reservatório de água em Vila Nova de Milfontes e a modelação com recurso ao *Revit* de um edifício *Black-Box* situada em Macau, China.

7.1. RESERVATÓRIO DE ÁGUA

7.1.1. Descrição estrutural

O reservatório localiza-se em Vila Nova de Milfontes e consiste numa célula com um diâmetro interior de 23 m e uma altura de 4,85 m entre a cota da soleira e a cobertura. A altura máxima de água dentro do reservatório será de 4,00 m. Na Figura 58 pode visualizar-se a planta estrutural do reservatório

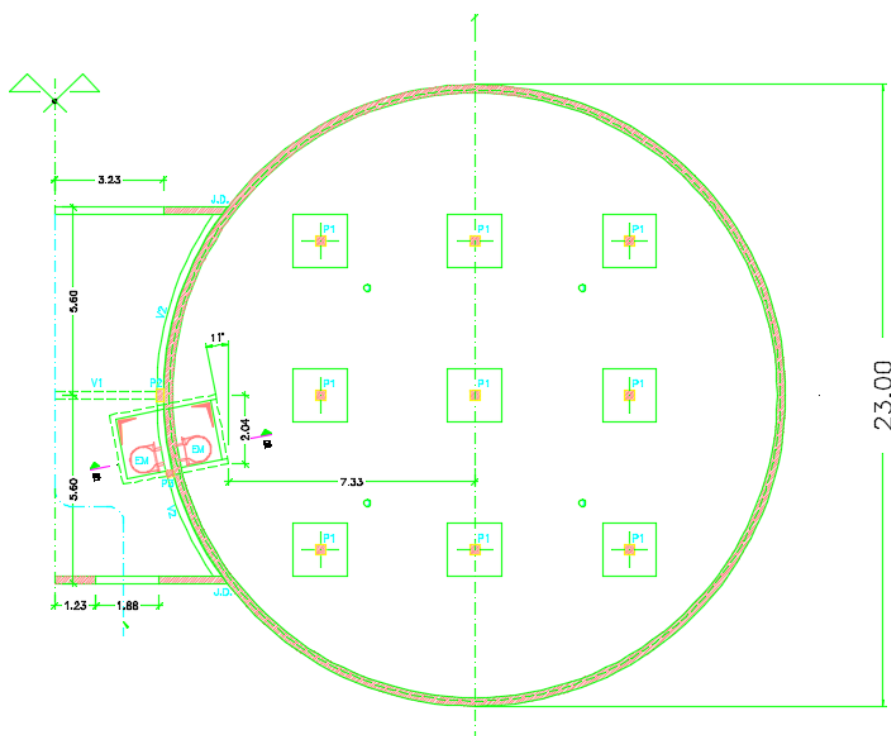


Figura 58 - Planta estrutural do reservatório

A parede periférica tem uma espessura de 0,25 m rigidamente ligada à laje de fundo. Na ligação das paredes à laje de fundo será executado um esquadro com 0,30 m de lado.

A laje de fundo tem uma espessura de 0,30m na zona corrente, com um sobreespessamento de 0,40 m de altura total, numa coroa circular periférica com cerca de 1,45 m de largura, a executar sob as paredes. Na zona dos pilares existem capitéis com dimensões de 2,0×2,0 m² em planta e 0,40 m de espessura.

A laje de cobertura da célula é maciça encontrando-se simplesmente apoiada na parede periférica e em nove pilares interiores com secção de 0,40×0,40 m². A laje possui uma espessura de 0.18 m em geral, reforçada na zona dos pilares com capitéis com dimensões de 2.5x2.5 m² em planta e 0.35 m de espessura.

7.1.2. Modelação numérica

A análise da estrutura do reservatório foi realizada a partir de dois modelos numéricos: um modelo para análise da laje de fundo e parede periférica (Figura 59 (a)) e o outro para análise da cobertura e pilares interiores (Figura 59 (b)). No modelo da laje de fundo e parede periférica introduziram-se as cargas correspondentes às reações verticais provenientes do modelo da cobertura.

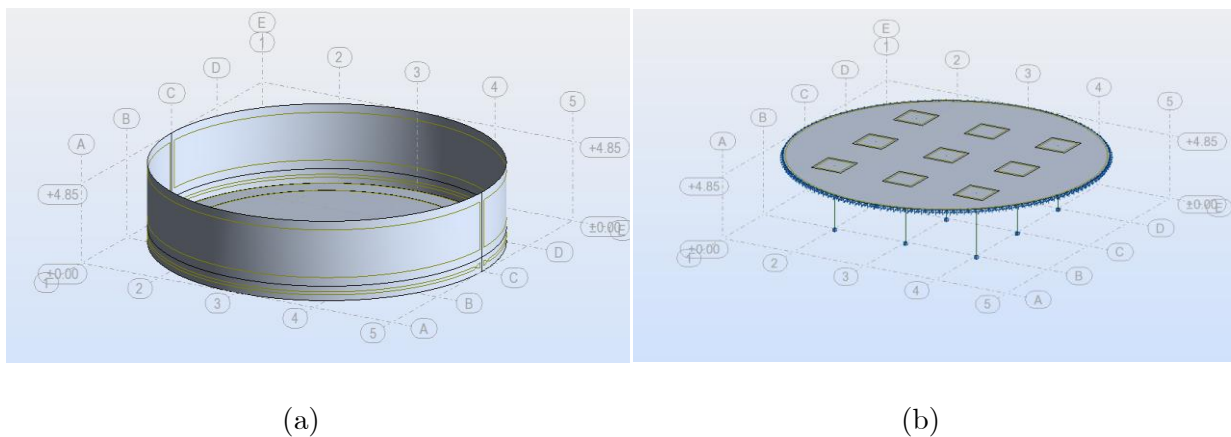


Figura 59 - Modelos numéricos: (a) modelo da laje de fundo e paredes; (b) modelo da laje de cobertura e pilares interiores

7.1.3. Ações e combinações de ações

A quantificação e combinação de ações foi feita de acordo com o Regulamento de Segurança e ações em Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA), e nos casos omissos, recorreu-se à bibliografia e regulamentação aplicáveis.

Para a determinação dos pesos próprios dos elementos estruturais adotaram-se os pesos específicos dos materiais definidos no RSA.

A - Ações Permanentes

Além do peso próprio dos elementos estruturais, considera-se:

- Revestimentos

- Laje de Cobertura = 2,0 kN/m²

- Impulso Hidrostático (IH)

- Impulso nas paredes e laje de fundo definido pelo diagrama de pressões:

$$\text{IH (h)} = \gamma_w \times h, \quad \text{com } \gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$$

- Retração

- Foi considerada a retração das paredes traduzida por uma variação lenta e gradual de temperatura de -15°C.

B - Ações Variáveis

- Sobrecarga
 - Laje de cobertura = 1,00 kN/m²
- Variação de temperatura uniforme
 - Traduzida por uma variação de temperatura nas paredes, lenta e uniforme, de valor igual a 15 °C.
- Variação de temperatura diferencial
 - Caracterizada por um gradiente de temperatura nas paredes de 15.0°C.
 - Variação diferencial de +10°C na laje de cobertura da célula.

A retração e as variações uniformes de temperatura, tratando-se de variações de temperatura, que se processam lentamente, podem ser estudadas com o valor do módulo de elasticidade reduzido para metade. De modo a facilitar a análise, manteve-se o módulo de elasticidade e reduziu-se o valor da variação de temperatura para metade, obtendo-se os esforços reais enquanto os deslocamentos reais são o dobro dos valores obtidos.

C - Ação Sísmica

- A ação do sismo nas células (Silva, J.M (1989)) é traduzida por um acréscimo do impulso nas paredes (Figura 60), dada pela seguinte expressão (fórmula de Westergaard):

$$p_i = \rho \cdot a_m \cdot H \cdot \sqrt{3} \cdot \left[\frac{z}{H} - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right] \cdot (\cos \alpha) \cdot \left[\tanh \left(\sqrt{3} \cdot \frac{R}{H} \right) \right] \quad (7.16)$$

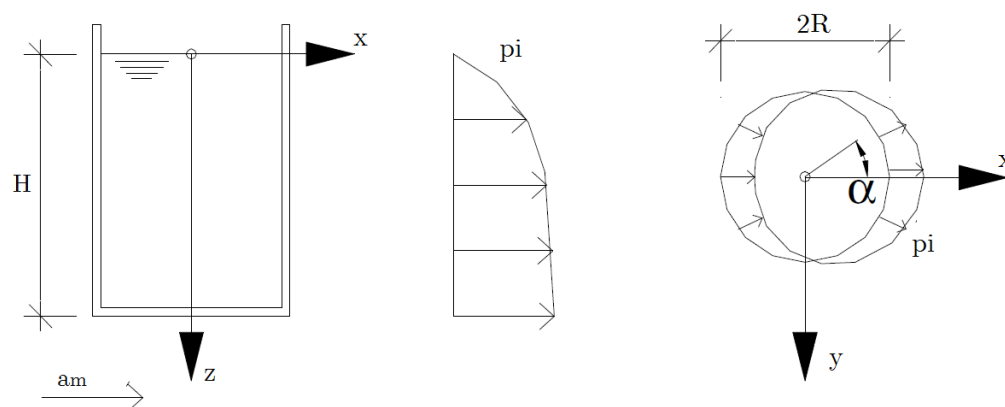


Figura 60 - Ação do sismo nas paredes do reservatório (adaptado: Appleton.J (1999))

em que:

a_m - aceleração máxima do terreno;

ρ - massa específica do líquido;

H - altura de água;'

R - raio do reservatório

O estudo da cobertura envolveu uma análise dinâmica modal por meio de espectros de resposta definidos na NP EN 1998-1 (EC8), considerando a localização no concelho de Odemira, classe de importância II e terreno tipo B. Adotou-se um coeficiente de comportamento de 3,0 e um coeficiente de amortecimento de 5%.

D - Combinações de Ações

As combinações consideradas para verificação dos Estado Limite Último de Resistência e Estado Limite de Utilização, para o modelo da laje de fundo e paredes e para o modelo da cobertura e pilares, estão representadas nas Tabela 20 e Tabela 21, respetivamente.

Tabela 20 - Combinação de ações para as paredes e laje de fundo

	Combinação	Permanentes	Impulso Hidrostático	Temperatura Uniforme	Temperatura Diferencial	Retração	Sismo
E.L. Últimos	1	1,35	1,5				
	2	1,0	1,5				
	3	1,35		-1,5	-0,9	1,5	
	4	1,35		-0,9	-1,5	1,5	
	5	1,0		-1,5	-0,9	1,5	
	6	1,0		-0,9	-1,5	1,5	
	7	1,35	1,5	1,5	0,9		
	8	1,35	1,5	0,9	1,5		
	9	1,35		1,5	0,9		
	10	1,35		0,9	1,5		
	11	1,0	1,5	1,5	0,9		
	12	1,0	1,5	0,9	1,5		
	13	1,0		1,5	0,9		
	14	1,0		0,9	1,5		
	15	1,0		0,3	0,3		1,0
	16	1,0					1,0
E.L. Serviço	17	1,0	1,0				
	18	1,0		-0,5	-0,5	1,0	
	19	1,0	1,0	0,5	0,5		
	20	1,0		0,5	0,5		

Tabela 21 - Combinação de ações para a cobertura

	Combinação	Permanentes	Sobrecarga	Temperatura Uniforme	Temperatura Diferencial	Sismo
E.L. Último	1	1,35	1,5	0,9	0,9	
	2	1,35	1,5	1,5	1,5	
	3	1,0		1,5	1,5	
	4	1,0		0,3		1,0
	5	1,0				1,0
E.L. Serviço	5	1,0		0,5	0,5	

7.1.4. Resultados

Nas Figura 61 e Figura 62, estão representados os esforços obtidos da laje de fundo, para dimensionar a armadura inferior e superior, respetivamente.

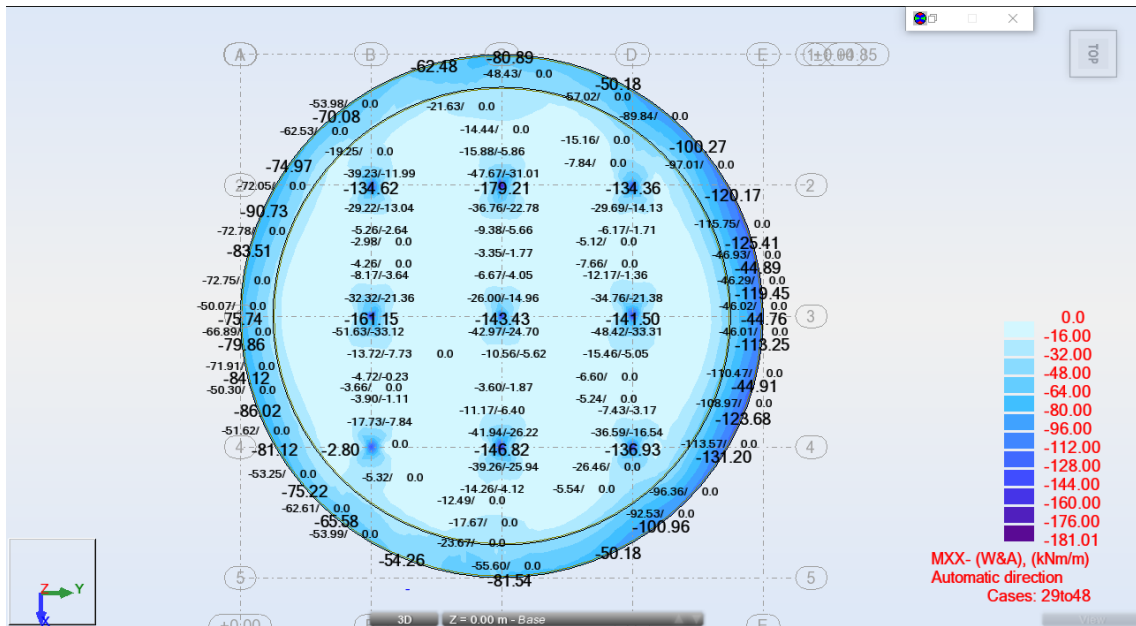


Figura 61 - Esforços para dimensionar a armadura inferior da laje de fundo

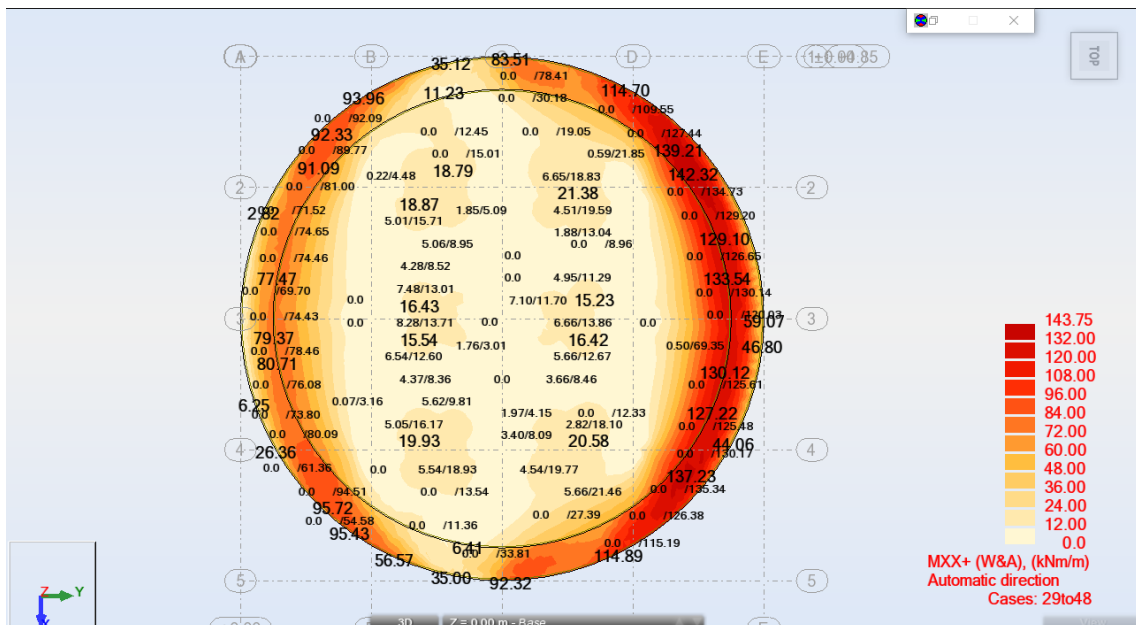


Figura 62 - Esforços para dimensionar a armadura superior da laje de fundo

7.2. EDIFÍCIO BLACK-BOX

O edifício do *Black Box* localiza-se em Macau e ainda encontra-se em fase de ante-projeto. A estrutura deste edifício, com dimensões em planta de aproximadamente $70 \times 25 \text{ m}^2$, é realizada em betão armado, possui uma cobertura em estrutura metálica e a laje do edifício principal é mista aço-betão. Devido à sua geometria complexa, decidiu-se modelar a estrutura proposta em *Revit*. Este modelo permitiu uma melhor perceção da sua geometria, a geração de peças desenhadas de modo automático, troca de informação expedita com a equipa de projeto de arquitetura, bem como verificar a compatibilidade entre as diversas especialidades (instalações mecânicas e hidráulicas). Apresenta-se de seguida algumas imagens *renderizadas* do modelo *Revit* realizado (Figura 63 à Figura 67).

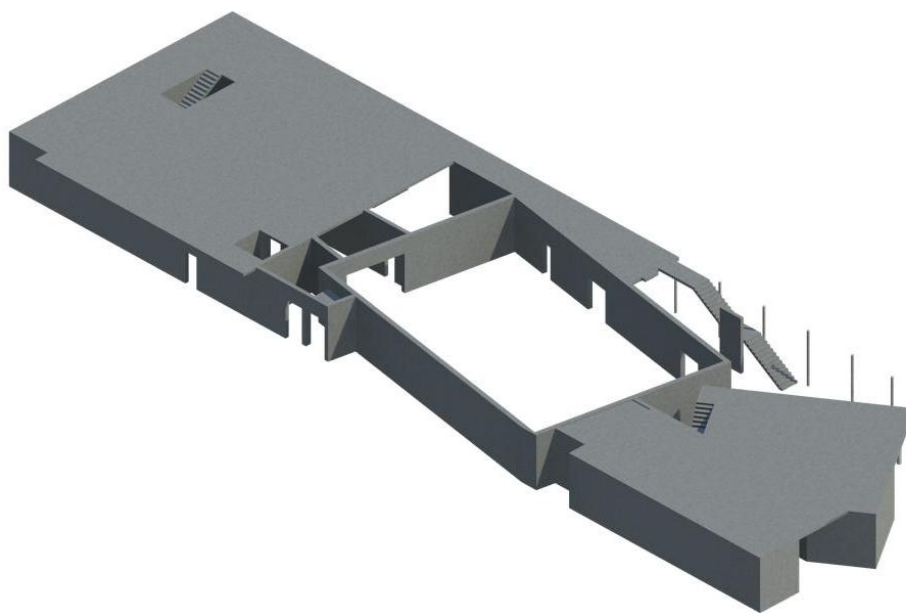


Figura 63 - Vista isométrica do primeiro piso

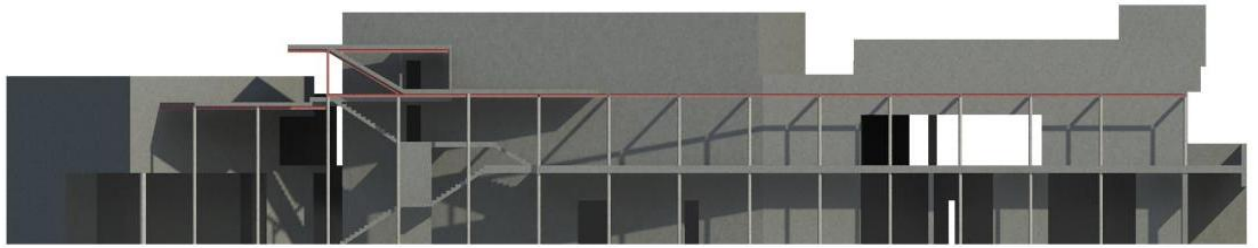


Figura 64 - Alçado lateral

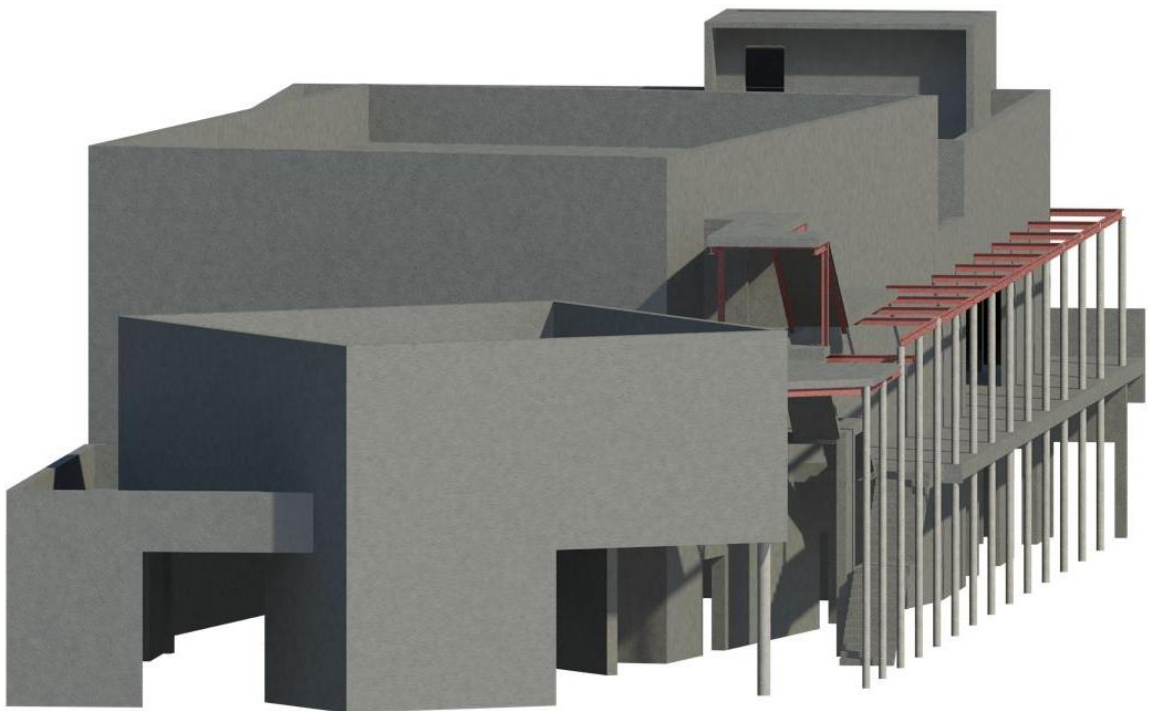


Figura 65 - Vista da parte frontal do edifício

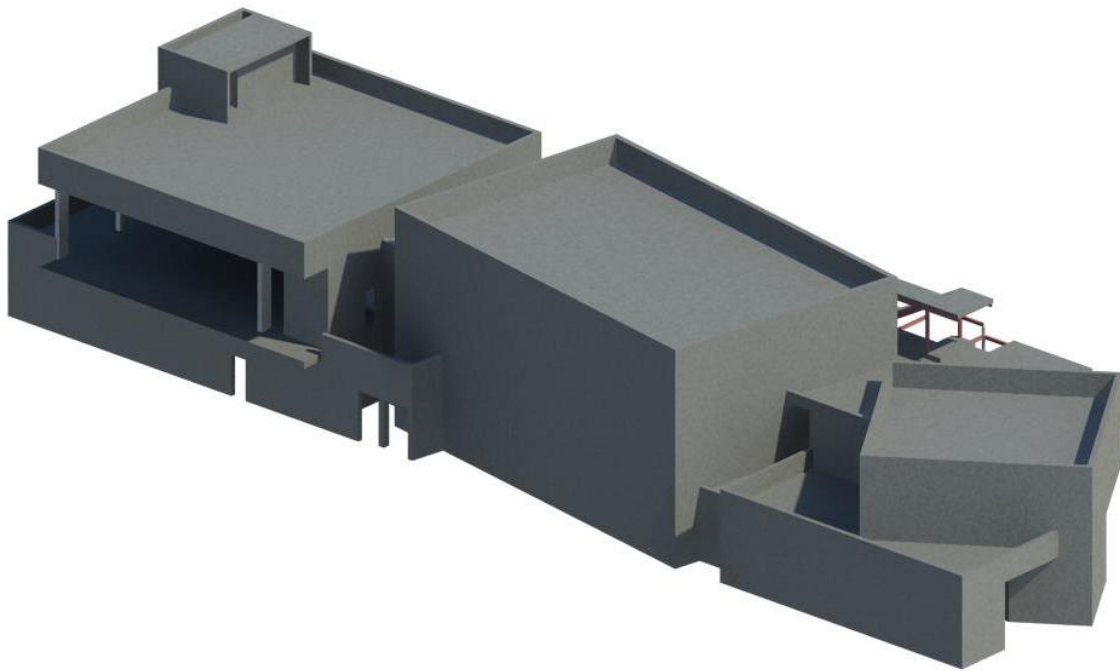


Figura 66 - Vista isométrica da parte traseira do edifício

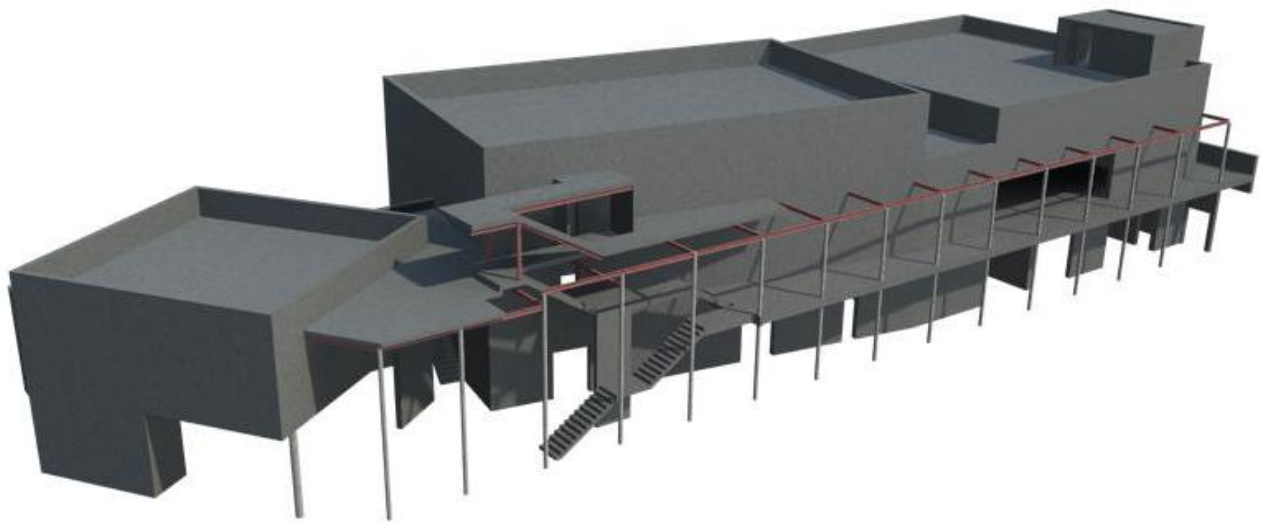


Figura 67 - Vista isométrica da parte frontal do edifício

8. CONCLUSÕES

A primeira fase do trabalho teve como principal objetivo aprofundar o conhecimento nas diversas fases de projeto de um edifício em betão armado, nomeadamente a modelação e análise estrutural e posterior dimensionamento dos elementos estruturais.

Na parte de análise e modelação recorreu-se ao *Robot Structural Analysis* onde nas tarefas realizadas não se encontrou grandes entraves. Para o dimensionamento recorreu-se a folhas de cálculo automático sendo necessário a ligação do programa de cálculo a estas folhas. Para isso, realizou-se as folhas de pós-processamento de resultados através do API que tem a mais valia de ligar automaticamente o *Robot Structural Analysis* e as folhas estas folhas de cálculo. Um aspeto negativo é que existe pouca documentação dos APIs, porém com o recurso ao fórum da Autodesk e a alguns exemplos práticos foi possível desenvolver um bom conhecimento desta matéria. Para o dimensionamento da estrutura utilizou-se as folhas de cálculo já desenvolvidas pela empresa não havendo nenhuma consequência negativa.

Numa segunda fase, foi proposto o desenvolvimento e integração de uma metodologia BIM ao projeto com o âmbito de desenvolver o conhecimento desta nova metodologia de trabalho. O programa usado para a modelação foi *Revit 2014* que contém um módulo das várias especialidades (Arquitetura, Estruturas e MEP) com uma grande biblioteca de objetos já integrado. No módulo de estruturas tem como grande vantagem a ligação direta com o programa de análise estrutural, o *Robot Structural Analysis*, evitando assim a perda de informação na exportação de modelos. Um dos aspetos negativos é o peso dos ficheiros quando modelada, por exemplo, o cocos da laje aligeirada fazendo com que o computador ficasse muito lento e por vezes o programa deixava de funcionar.

O último capítulo aborda dois projetos desenvolvidos durante o estágio com o objetivo de desenvolver competências socioprofissionais e transversais. No primeiro, foi elaborada a modelação e análise de um reservatório em betão armado sendo a parte de dimensionamento feita por outro engenheiro. Não sendo um modelo muito complexo não houveram muitas complicações na elaboração do mesmo. O segundo trabalho, passou pela modelação de uma *Black-Box* em *Revit* para uma ter uma melhor visualização da estrutura concebida. Neste projeto houve alguma dificuldade a nível de modelar o edifício devido à sua complexidade arquitetónica. De salientar que com o modelo tridimensional foi possível detetar alguns erros na estrutura, nomeadamente uma parede estrutural do primeiro piso necessitar de um maior cumprimento e a necessidade de mudar a cota de uma viga.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] REBAP; “*Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado*”; Decreto-Lei n°349-c/83, de 30 Julho e Decreto-Lei n° 128-99, de 21 Abril, Porto Editora, 2004.
- [2] RSA; “*Regulamento de Segurança e Acções para estruturas de Edifícios e Pontes*”; Decreto-Lei n°235/83, de 31 Maio, Porto Editora, 2005.
- [3] NP EN 1991: 2009; “*Eurocódigo-1: Acções em estruturas*”, CT 115 (LNEC),2009.
- [4] NP EN 1992-1-1: 2004; “*Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1-1 Regras gerais e regras para edifícios*”, CT 115 (LNEC), 2010.
- [5] NP EN 1993: 2010; “*Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço*”, CT115 (LNEC), 2010.
- [6] NP EN 1998-1: 2010; “*Eurocódigo 8 – Projecto de estruturas para resistência aos sismos – Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios*, CT 115 (LNEC), 2010.
- [7] Uriel Pereira. Arq e Tec – Arquitetura e Tecnologia [Internet]. 23 de Janeiro de 2010. Disponível em: <http://www.arq-e-tec.com/2010/01/bim-archicad-vs-revit-vs-vectorworks/>.
- [8] Pinheiro, N.D.M. [et al] (2012) - *Dimensionamento à flexão composta desviada de secções genéricas de betão armado - programa 2D DESIGN*, 2012.
- [9] Pinheiro, N., Pouca, N. V. - *Dimensionamento de Secções de Betão Armado pelo EC2 – A Importância do Dimensionamento em Serviço*. Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012 FEUP, 24-26 de outubro de 2012.
- [10] Laakso, M. (Maio de 2012). *The IFC Standart - A review of history, development and standardization. UK*.

- [11] Lino, J.S. [et al.] (2012), *Integração da Metodologia BIM na Engenharia de Estruturas*, Encontro Nacional Betão Estrutural, 24-26 de Outubro de 2012.
- [12] Portugal STEEL (2014), *Seminário técnico*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [13] Maritan, F. (9 de Março de 2013). *bimrevit*. Disponível em: <http://www.bimrevit.com/>
- [14] Eastman, C. et al., 2008. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling*, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.
- [15] buildingSMART, M. (2008), buildingSMART, de [buildingsmart.org](http://www.buildingsmart.org): <http://www.buildingsmart.org/certification>.
- [16] BIMForum, 2013, *Level of Development Specification*, 22 Agosto 2013.
- [17] Figueiras, J.A. (1997), *Verificação aos estados limites de utilização*, Estruturas de betão 2, Faculdade de Engenharia da U.P., Junho 1997.
- [18] Silva, J.M. (1989), *Análise Sísmica de Reservatórios de Água Assentes no Terreno*, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE)(1989) N°29.
- [19] Appleton, J. (1999), *Efeitos Sísmicos nas construções Pré-Fabricadas-Caso Particular de Depósitos*, A2P Consult, Lda; Consultores da Civibral para depósitos pré-esforçados.
- [20] Fernandes, J.P.M. (2013), *A metodologia Building Information Modeling aplicada ao projeto de estruturas*, Universidade do Minho Escola de Engenharia, 14 de Novembro de 2013.

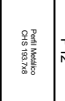
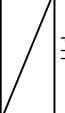
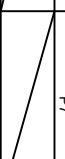
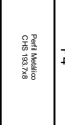
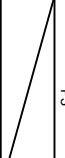
- [21] Autodesk (2013), *Integrating Autodesk Revit, Revit Structure, and Robot Structural Analysis Professional*, www.autodesk.com/revit , www.autodesk.com/robot, 2013.
- [22] Autodesk API (2013), *Getting Started Guide Robot API*, <https://forums.autodesk.com/>, 2013.
- [23] Tarrafa, D.G.P. (2012), *Aplicabilidade prática do conceito BIM em projeto de estruturas*, Faculdade de Ciências e Tecnologias Universidade de Coimbra, Outubro 2012
- [24] Lebet, J.P (2009), *Ponts en acier (TGC Volume 12), Conception et dimensionnement des ponts métalliques et mixtes acier-béton*, 16 de Junho 2009

Anexo

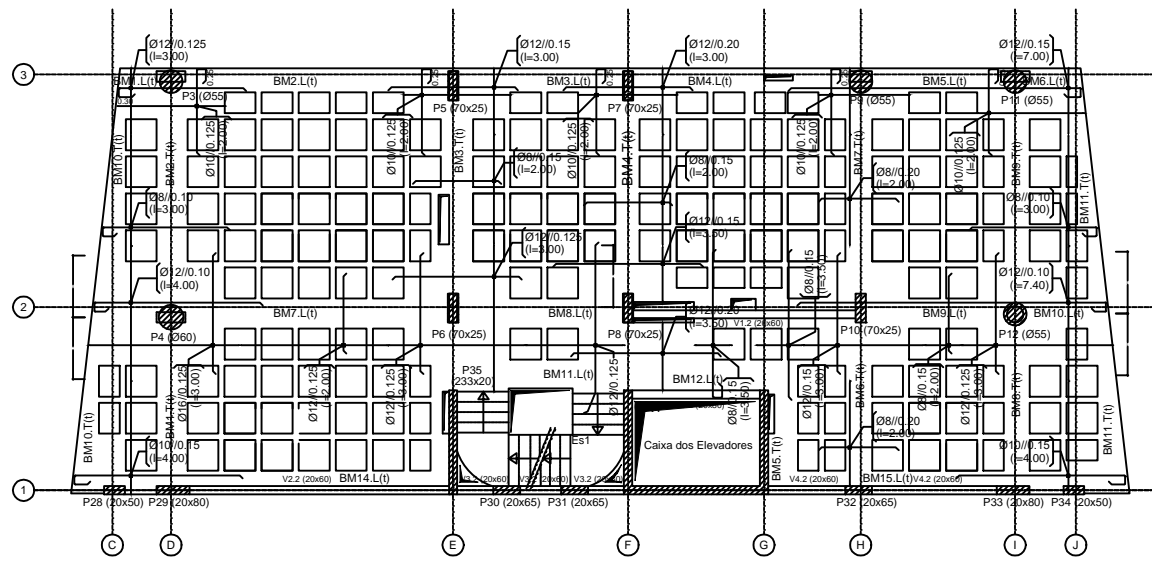
Desenhos estruturais (armadura dos pilares, laje tipo e vigas)

QUADRO DE PILARES

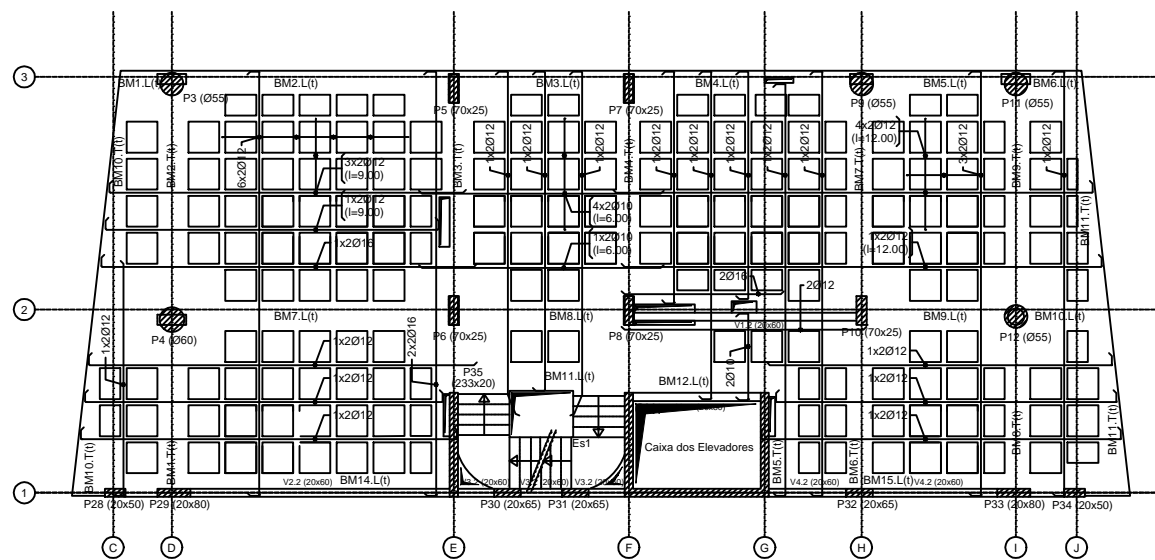
	P1	P2	P3	P4	P5	P7	P6, P8	P9	P10	P11	P12
Cobertura											
Piso 9 Elevado											
Piso 9				Perfil Metálico CNA 100/200					Perfil Metálico CNA 100/200		Perfil Metálico CNA 100/200
Piso 8				Dispositivo de Ajuste Plástico					Viga V9		Viga V9
Piso 7											
Piso 6											
Piso 5											
Piso 4											
Piso 3											
Piso 2											
Piso 1											
Piso 0											



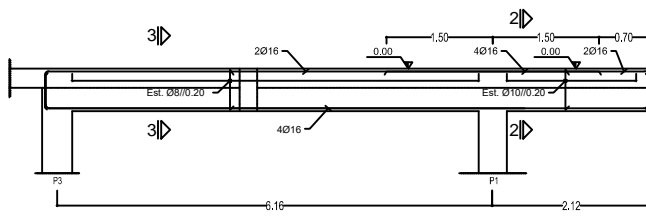
PLANTA ESTRUTURAL DO PISO TIPO (Armaduras Superiores)



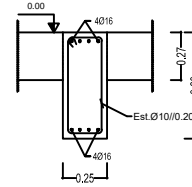
PLANTA ESTRUTURAL DO PISO TIPO (Armaduras Inferiores)



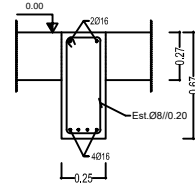
Viga V4.0



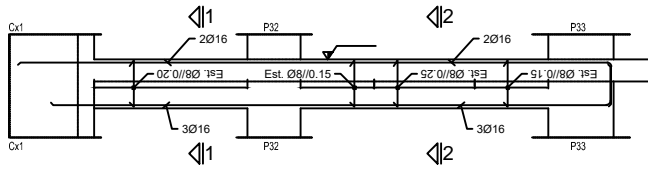
Corte 2-2



Corte 3-3

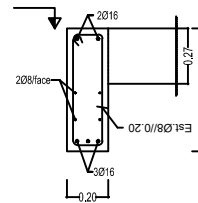


Viga V4.2/ Viga V4.3/ Viga V4.4/ Viga V4.5/ Viga V4.6/ Viga V4.7/ Viga V4.8



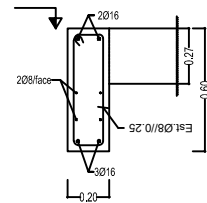
Corte 1-1

Esc. 1:20

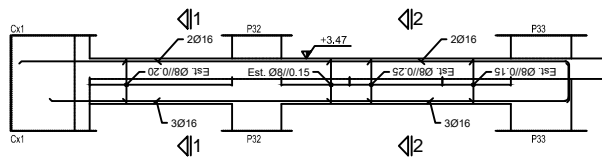


Corte 2-2

Esc. 1:20

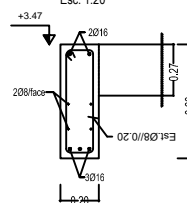


Viga V10.1



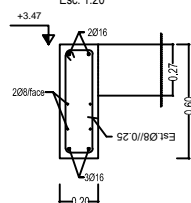
Corte 1-1

Esc. 1:20

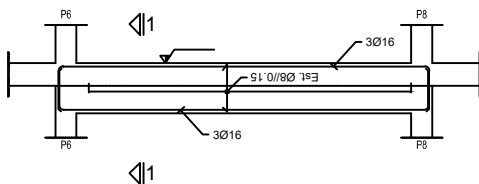


Corte 2-2

Esc. 1:20



Viga V5.0/ Viga V5.1



Corte 1-1

Esc. 1:20

