

**Análise da implementação do modelo BIM no projecto
de estruturas**

João Nuno Teixeira Duarte de Sousa Novais

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Orientadora: Professora Doutora Alcínia Zita de Almeida Sampaio

Júri

Presidente: Professor Doutor Luís Manuel Coelho Guerreiro

Orientadora: Professora Doutora Alcínia Zita de Almeida Sampaio

Vogal: Professor Doutor António Manuel Candeias de Sousa Gago

Novembro de 2015

(Página em branco)

*«É importante ter em mente que BIM
não é apenas uma mudança tecnológica,
mas também uma mudança de processos»*

Chuck Eastman

(Página em branco)

Agradecimentos

Esta dissertação surge como conclusão de mais uma etapa académica na minha vida. Pretendo pois agradecer a todos os que, de alguma forma, me ajudaram a chegar a esta fase, não só no desenvolvimento da tese mas também para a conclusão do curso.

Queria agradecer em especial à professora Zita Sampaio por me ter apoiado desde o primeiro dia. As discussões sobre a tese, as correcções e os esclarecimentos de dúvidas, foram essenciais para o presente trabalho e para o meu desenvolvimento. Agradeço também pela oportunidade concedida, no âmbito desta dissertação, de poder transmitir os meus conhecimentos aos alunos de primeiro ano da unidade curricular Desenho Assistido por Computador, tendo sido uma experiência profissional enriquecedora.

Agradeço aos meus amigos que me apoiaram durante esta fase, em especial à Inês Reis, João Alarcão, João Bispo e Leonor Mineiro por me terem acompanhado e nunca me terem deixado desistir.

Por último, mas não menos importante, deixo um profundo agradecimento aos meus pais, por terem estado sempre presentes, mesmo nas alturas mais difíceis, e por me terem proporcionado sempre o melhor. Quero agradecer também aos meus irmãos, cunhadas e meus sobrinhos, por todo o apoio dado. Obrigado por tudo!

(Página em branco)

Resumo

O *Building Information Modelling* (BIM) é uma metodologia em crescimento na indústria da Arquitectura, da Engenharia e da Construção. O BIM surge como uma nova forma de trabalho entre projectistas de diversas especialidades, mais colaborativa e com base num modelo tridimensional, contendo diverso tipo de informação de carácter geométrico, físico e económico dos materiais. O trabalho efectuado reporta a evolução da metodologia BIM e as vantagens da introdução deste processo de trabalho no desenvolvimento do projecto de estruturas.

Foi efectuada a geração do modelo de estruturas, recorrendo a uma ferramenta de base BIM, foram identificadas as limitações verificadas e propostos procedimentos que visam a obtenção de um modelo computacional correcto. Foi analisado o modelo computacional, gerado automaticamente em ambiente BIM, tendo-se introduzido alterações no modelo, nomeadamente, a informação necessária para se proceder ao cálculo estrutural. Foi ainda demonstrada a forma de introdução da armadura nos elementos de betão armado. Posteriormente, foi realizada a extracção de informação do modelo BIM, de forma a obter mapas de quantidades de volume de betão, tabelas de armaduras, áreas de cofragem e volume de terreno escavado, assim como a representação de peças desenhadas do projecto de estruturas.

Conclui-se que a metodologia BIM e a ferramenta utilizada podem introduzir vantagens no projecto de estruturas, apesar das dificuldades verificadas. Sendo uma metodologia em contínua evolução espera-se que futuramente o processo conduza a melhorias significativas no sector.

Palavras-chave: metodologia BIM, ferramentas de modelação, transposição do modelo, extracção de informação

(Página em branco)

Abstract

The Building Information Modeling (BIM) is a growing methodology in the Architecture, Engineering and Building industries. BIM appears as a new way of working between designers of various specialties. It is more cooperative and based on a three-dimensional model. It contains varied types of information of the materials – geometrical, physical and economical. The job hereunder refers to the evolution of the BIM methodology and the advantages of the introduction of this type of work in the development of the structural design.

The structures' model was made, using a basic BIM tool. Verified limits were identified and procedures which aim to achieve a correct analytical model, were suggested. The analytical model was examined, having been automatically generated in a BIM environment. Alterations referring to analytical aspects were introduced, namely the analytical information necessary for the structural calculation. The introduction of the reinforcement in the elements of reinforced concrete, was demonstrated. Later, the extraction of information of the BIM model was made, so as to obtain tables of quantities of the concrete volume, tables of reinforcement, areas of formwork and the volume of land excavation, as well as the representation of drawings of the structural design.

We concluded that the BIM methodology and the tool used can introduce advantages in the structural design, in spite of difficulties encountered. As it is a methodology in constant evolution, it is hoped that, in the future, the process will improve significantly in this sector.

Key-words: BIM methodology, modeling tools, transference of the model, information achievement

(Página em branco)

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento geral	1
1.2. Objectivos e metodologia	1
1.3. Estrutura geral da dissertação	2
2. Estado da Arte do BIM	3
2.1. Conceito	6
2.1.1. Interoperabilidade e padronização	6
2.1.2. Modelação paramétrica	8
2.1.3. As n-Dimensões do BIM.....	9
2.1.4. Conceito de níveis de Desenvolvimento e de Detalhe.....	10
2.1.5. Normas BIM.....	12
2.1.5. Vantagens BIM	12
2.2. BIM e o projecto de estruturas	12
2.3. O BIM em Portugal no projecto de estruturas.....	13
3. Geração do modelo BIM de estruturas	15
3.1. Caracterização da estrutura	16
3.2. Modelo SAP	17
3.3. Modelo Revit.....	18
3.3.1. Ambiente de trabalho Revit	18
3.3.2. Base de projecto.....	19
3.3.3. Definição da grelha e níveis	20
3.3.4. Definição de elementos verticais.....	21
3.3.5. Definição das vigas	25
3.3.6. Definição da laje	27
3.3.7. Definição das fundações	29
3.3.8. Escadas	31

3.3.9. Modelo geométrico completo	31
3.4. Validação do modelo tridimensional.....	32
4. Análise do modelo numérico	35
4.1.O modelo computacional no Revit	35
4.1.1. Adaptações ao modelo computacional	36
4.1.2. Definição de acções	38
4.2. Transferência do modelo: Revit para o Robot	40
4.3. Análise estrutural.....	41
4.3.1. Validação do modelo computacional.....	42
4.3.2. Alterações efectuadas em ambiente Robot	42
4.3.3. Análise modal e validação do modelo computacional	43
4.4. Actualização do modelo: Robot para o Revit.....	44
4.5. Definição de armaduras em Revit.....	47
4.5.1. Armadura da sapata.....	47
4.5.2. Armadura do pilar	50
4.5.4. Armadura de viga	53
4.5.1. Armadura de laje	56
5. Mapas de Quantidades e Peças Desenhadas.....	59
5.1. Mapas de quantidade da componente estrutural.....	59
5.1.1. Volume de Betão	60
5.1.2. Tabela de Armaduras.....	61
5.1.3. Área de Cofragem	61
5.1.4. Movimento de terras.....	64
5.2. Peças Desenhadas	66
6. Discussão de resultados	69
6.1. Considerações finais	69
6.2. Desenvolvimentos futuros	70
Referência bibliográficas	71
Anexos.....	76
Anexo I: Mapa de quantidades de betão.....	78
Anexo II: Mapa de quantidades de área de cofragem	80
Anexo III: Peças desenhadas.....	82

Índice de Figuras

Figura 1 - Método tradicional de troca de informação.....	3
Figura 2 - Organograma da metodologia BIM.....	4
Figura 3 - Fotografia (a) vs Render (b) (Johnson, N., 2015).....	4
Figura 4 - Diagrama de troca de informação BIM (AIA TAP BIM Awards, 2014).....	7
Figura 5 - BIM Immersion Room, Odeh Engineers, Boston (Odeh Engineers [W10]).....	8
Figura 6 - Estrutura conceptual de uma família de paredes: dimensões, composição da parede, características físicas (Eastman, C. et al, 2011).....	8
Figura 7 - Relação paramétrica entre objectos: (a) inicial e (b) alteração.....	9
Figura 8 - Informação presente nos 5 LOD (adaptado de McPhee, A., 2015).....	11
Figura 9 - Informação presente nos níveis de detalhe (adaptado de McPhee, A., 2015).....	11
Figura 10 - Modelo BIM acompanha o ciclo de vida de um edifício (Dispenza, K., 2010).....	13
Figura 11 - Terminal de Cruzeiros de Leixões: (a) visualização da estrutura sem as lâminas envolventes e (b) visualização tridimensional (Lino, J. et al, 2012).....	14
Figura 12 - ETAR do Ave: interacção colaborativa entre o projecto do processo de tratamento e o projecto de fundações e estruturas (Lino, J. et al, 2012).....	14
Figura 13 - Distribuição em planta dos elementos estruturais.....	16
Figura 14 - Evolução em altura da estrutura, corte AA.....	16
Figura 15 - Vista 3D do modelo SAP2000.....	17
Figura 16 - Ambiente de Trabalho do Revit.....	18
Figura 17 - Separador da especialidade Estruturas.....	19
Figura 18 - Gestão de materiais: características do Betão C30/37.....	19
Figura 19 - Unidades de projecto (a) comuns e (b) estruturais.....	20
Figura 20 - Painel Datum: Inserir (a) grelha e (b) nível.....	20
Figura 21 - Apresentação dos (a) níveis e da (b) grelha utilizados para modelação.....	21
Figura 22 – Inserção de pilares e suas propriedades.....	22
Figura 23 - Inserir paredes estruturais e suas propriedades.....	22
<i>Figura 24 - Visualização dos elementos estruturais verticais: (a) representação em planta e (b) projecção axonométrica.....</i>	<i>23</i>
Figura 25 - Modelo geométrico e modelo computacional.....	23
Figura 26 - Colocação dos pilares exteriores ao nível do piso 4.....	24
Figura 27 – Modelo computacional da descontinuidade de secção do pilar(a) resolução automática no modelo Revit e (b) idealização no modelo SAP.....	24
Figura 28 - Quadro de propriedades do modelo computacional.....	24

Figura 29 - Inserir vigas e suas propriedades	25
Figura 30 - Modelação das vigas (BIM Essential Guide - For C&S Consultants, 2013).....	25
Figura 31 - Interação entre (a) pilares e vigas e (b) paredes e vigas	26
Figura 32 - Apresentação de problema no modelo computacional	26
Figura 33 - Sobreposição entre o modelo geométrico e o modelo computacional.....	27
Figura 34 - Quadro de propriedades do elemento laje	28
Figura 35 - Projecção axonométrica do modelo 3D.....	28
Figura 36 - Interação entre elementos verticais, vigas e lajes	29
Figura 37 - Modelo computacional gerado.....	29
Figura 38 - Distribuição de sapatas: (a) planta de fundações e (b) vista tridimensional	29
Figura 39 - Separador Foundation	30
Figura 40 - Inserir e quadro de propriedades de sapatas	30
Figura 41 - Inserir e quadro de propriedades de ensoleiramentos	31
Figura 42 – Modelo geométrico e modelo computacional	32
Figura 43 - Modelo computacional da estrutura.....	36
Figura 44 - Alteração ao modelo computacional: elemento parede	36
Figura 45 - Pormenor do elemento parede: (a) modelo inicial e (b) após correcção do modelo.....	37
Figura 46 - Alteração das libertações nas extremidades das vigas: situação inicial (a) e após alteração (b)	37
Figura 47 - Inserir condições de apoio	38
Figura 48 - Quadro de propriedades das condições de apoio.....	38
Figura 49 - Modelação das condições de apoio	38
Figura 50 - Painel Loads, separador Analyse	39
Figura 51 - Janela de propriedades referente a casos de carga	39
Figura 52 - Janela de propriedades referente a combinações de acções	40
Figura 53 – Modelo computacional com cargas aplicadas	40
Figura 54 - Modelo computacional: (a) Revit e (b) Robot	41
Figura 55 - Modelo com escadas	43
Figura 56 - Modelo BIM actualizado com informação do Robot	45
Figura 57 - Casos de carga após actualização	45
Figura 58 - Informação referente à armadura necessária de um pilar.....	46
Figura 59 - Pilar após actualização, segundo processo	46
Figura 60 – Janelas de propriedades para definição de armaduras em sapatas isoladas.....	48
Figura 61 - Armadura inferior da sapata	49
Figura 62 - Armadura de uma fundação directa	49
Figura 63 - Pormenorização de uma fundação.....	49
Figura 64 - Janelas de propriedades para definição de armaduras em pilares.....	50
Figura 65 - Definição da armadura principal de um pilar	51
Figura 66 - Definição das cintas de um pilar	51
Figura 67 - Armaduras de um pilar.....	52
Figura 68 - Pormenorização da armadura	52

Figura 69 - Resultado da transferência para Autocad Structural Detailing	52
Figura 70 - Janela de propriedades geométricas de uma viga estrutural	53
Figura 71 - Janelas de propriedades para definição de armaduras em vigas	54
Figura 72 - Definição dos estribos de uma viga	55
Figura 73 - Definição da distribuição dos estribos por vão	55
Figura 74 - Definição da armadura principal da viga	55
Figura 75 - Projecção axonométrica de um troço de uma viga.....	56
Figura 76 – Viga em corte	56
Figura 77 - Secção da viga.....	56
Figura 78 - Possibilidades para inserir armaduras em lajes	56
Figura 79 - Janela de propriedades da armadura de área para lajes.....	57
Figura 80 - Pormenorização de uma laje estrutural	57
Figura 81 - Corte de um troço da laje.....	57
Figura 82 - Capacidade de extrair informação do modelo (CODEBIM).....	59
Figura 83 - Criar mapa de quantidades.....	60
Figura 84 - Criar mapas de quantidades.....	60
Figura 85 - Propriedades para o cálculo de área de cofragem.....	62
Figura 86 - Área de cofragem das sapatas: (a) janela de propriedades e (b) sapata analisada.....	62
Figura 87 - Área de cofragem de um pilar: (a) janela de propriedades e (b) pilar analisado	63
Figura 88 - Definição das fases.....	65
Figura 89 - Definição da fase criada e destruída	65
Figura 90 - Definição da superfície topográfica	65
Figura 91 - Comando Graded Region	66
Figura 92 - Projecção axonométrica: faseamento construtivo	66
Figura 93 - Inserir folhas.....	67
Figura 94 - Alteração de escala	67
Figura 95 - Criação de uma Drafting View	67

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Períodos e frequências para cada modo de vibração (SAP2000).....	18
Tabela 2 - Comparação de volume de betão	33
Tabela 3 - Casos de carga a considerar	39
Tabela 4 - Reacções verticais aos casos de carga: peso próprio e restantes cargas permanentes....	42
Tabela 5 - Reacção vertical devido ao peso próprio.....	42
Tabela 6 - Períodos e frequências para cada modo de vibração (Robot)	43
Tabela 7 - Comparação dos valores obtidos da análise modal	43
Tabela 8 - Comparação do valor do período para o primeiro modo de vibração	44
Tabela 9 - Tabela de armaduras	61
Tabela 10 - Comparação de áreas de cofragem	64
Tabela 11 - Volume de betão das fundações	78
Tabela 12 - Volume de betão dos pilares.....	78
Tabela 13 - Volume de betão das paredes estruturais	78
Tabela 14 - Volume de betão das vigas.....	79
Tabela 15 - Volume de betão das lajes	79
Tabela 16 - Área de cofragem das fundações	80
Tabela 17 - Área de cofragem dos pilares	80
Tabela 18 - Área de cofragem das paredes.....	80
Tabela 19 - Área de cofragem das vigas	81
Tabela 20 - Área de cofragem das lajes	81

Abreviações e Siglas

3D	Três dimensões espaciais + características físicas e mecânicas dos materiais
4D	3D + planeamento da construção
5D	4D + custo
6D	5D + gestão do ciclo de vida do empreendimento
AEC	Arquitectura, Engenharia e Construção
AIA	<i>The American Institute of Architects</i>
BIM	Building Information Modelling
GTBIM	Grupo de Trabalho BIM
IFC	<i>Industry Foundation Class</i>
PTPC	Plataforma Tecnológica Portuguesa de Construção

1. Introdução

1.1. Enquadramento geral

A indústria da Arquitectura, Engenharia e Construção (AEC) apresenta, actualmente, alguma falta de comunicação e de entendimento entre as diversas especialidades inerentes a um empreendimento. Esta situação implica, recorrentemente, uma incapacidade de cumprir prazos em obra e diversas derrapagens no orçamento. É assim importante, promover o desenvolvimento de mecanismos que possam conduzir a um pleno entendimento das diversas componentes. No contexto do projecto estrutural, englobando as fases de concepção, análise e pormenorização, é essencial estabelecer uma adequada coordenação com as restantes disciplinas, nomeadamente a arquitectura e as instalações prediais, de forma a evitar possíveis conflitos entre especialidades numa fase posterior.

A metodologia *Building Information Modelling* (BIM), aplicada à indústria AEC, surge como uma nova forma de trabalho entre projectistas, mais colaborativa, englobando as diversas especialidades. Este novo conceito tem vindo a ser aplicado no sector da construção de um modo lento, pois implica uma alteração do modo de trabalhar, em que o projectista não se apoia tanto nos desenhos mas mais no modelo tridimensional e na informação que lhe pode ser associada. A utilização desta metodologia permite conduzir a uma melhor coordenação e colaboração entre os intervenientes no projecto, e, ainda, a uma rápida detecção de conflitos entre componentes, e como consequência uma optimização de custos.

O presente trabalho pretende demonstrar que a metodologia BIM pode ser aplicada num projecto de estruturas, apresentando consideráveis benefícios, apesar de inúmeras limitações.

1.2. Objectivos e metodologia

O trabalho a desenvolver pretende contribuir para a divulgação do BIM no projecto de estruturas. Nesse sentido é efectuada uma aplicação prática que consiste no desenvolvimento de um modelo BIM estrutural: de um caso de estudo, é obtido o correspondente modelo computacional e são determinadas os mapas de quantidades referente aos elementos estruturais, com vista à preparação de uma orçamentação. A metodologia de trabalho adoptada é a seguinte:

- Desenvolvimento do modelo estrutural de um edifício de 8 pisos, com recurso a uma ferramenta BIM, evidenciando as vantagens quanto ao modo de criação do modelo da estrutura e sua manipulação, comparativamente ao procedimento com recurso sistemas gráficos de traçado de desenho;

- Análise da capacidade de transferência da informação entre a ferramenta BIM utilizada e um programa de cálculo estrutural;
- Extração de informação do modelo BIM para obtenção de mapas de quantidade de volume de betão, de área de cofragem e de armaduras, a utilizar na apresentação de orçamentos;
- Geração e apresentação de peças desenhadas.

1.3. Estrutura geral da dissertação

A presente dissertação está organizada em seis capítulos:

- O capítulo introdutório, referente ao enquadramento geral da dissertação e à apresentação dos objectivos e metodologia;
- O segundo capítulo sintetiza o resultado da pesquisa bibliográfica efectuada no contexto BIM, com uma maior incidência no tema da tese. É inicialmente apresentado o conceito BIM e algumas definições essenciais à contextualização do trabalho. São referenciados no âmbito nacional, alguns casos de sucesso aplicado no projecto de estruturas;
- No terceiro capítulo é descrita a geração do modelo BIM estrutural do edifício, do caso de estudo seleccionado, com o recurso a uma ferramenta de base BIM;
- No quarto capítulo é obtido o modelo de cálculo estrutural, a partir do modelo BIM da estrutura, são efectuadas as adaptações requeridas e, posteriormente, é transposto para o sistema de cálculo estrutural;
- O quinto capítulo aborda a manipulação de informação do modelo de estruturas BIM, com objectivo de obter mapas de quantidades, tabelas de armaduras e movimentos de terras a utilizar na apresentação de custos de obra;
- Finalizando, o sexto capítulo apresenta as principais conclusões a retirar do presente trabalho, sendo referidas as limitações e os benefícios mostrados ao longo do trabalho, assim como indicações de futuros desenvolvimentos.

2. Estado da Arte do BIM

A indústria da Arquitectura, Engenharia e Construção (AEC) requer, no desenvolvimento de um projecto, a participação de diversos intervenientes, com capacidades, conhecimentos técnicos e necessidades próprias. A realização de cada componente do projecto depende, contudo, da informação criada ou transformada, proveniente de outras áreas.

Usualmente o método de trabalho utilizado no desenvolvimento de cada especialidade é efectuado de um modo bastante individual e há, por vezes, neste processo, desconhecimento da totalidade da informação inerente às diversas componentes do projecto. Como consequência, podem ser originadas algumas incompatibilidades entre especialidades, apenas detectados em obra, implicando atrasos e um incremento de custo final da obra. A figura 1 ilustra a organização usual do fluxo de transferência de informação num projecto.

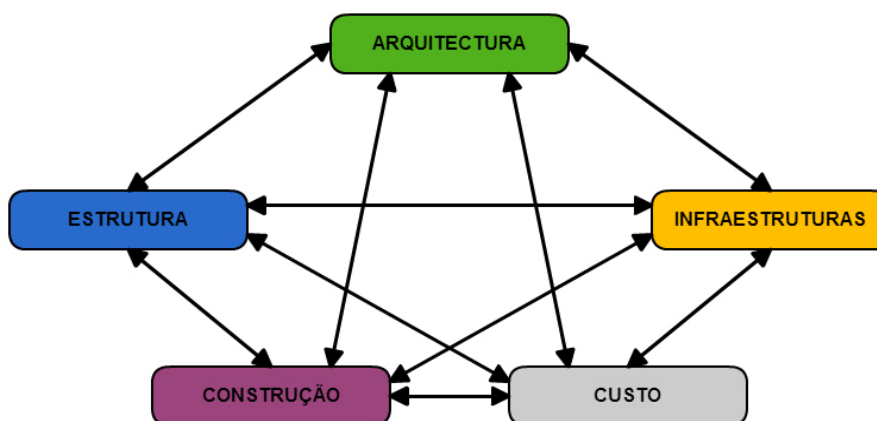


Figura 1 - Método tradicional de troca de informação

A metodologia designada de *Building Information Modelling* (BIM) impõe alterações ao nível de desenvolvimento e representação do projecto e ao nível da transferência de informação entre as diversas componentes do projecto. O conceito BIM baseia-se na centralização da informação de todas as disciplinas, num único modelo digital. A figura 2 ilustra a organização subjacente a esta nova metodologia.

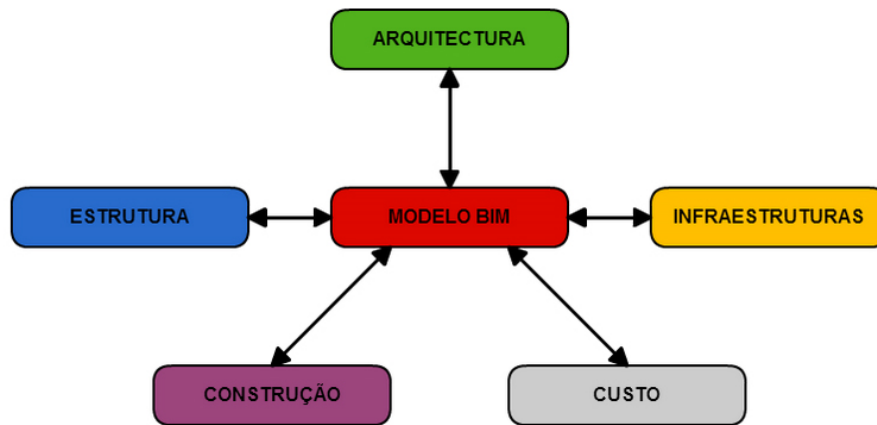


Figura 2 - Organograma da metodologia BIM

O BIM é actualmente considerado uma metodologia de interesse crescente na área AEC. Encontra-se em permanente desenvolvimento e é um processo que abrange as várias especialidades do projecto. Os arquitectos reconhecem no processo a facilidade de geração e adaptação da fase de concepção, assim como as avançadas capacidades de modelação e de visualização espacial (figura 3). O desenvolvimento de um projecto em BIM é, essencialmente, um processo colaborativo. Assim, a utilização de ferramentas BIM abrange actualmente as outras especialidades, nomeadamente infraestruturas, estruturas e planeamento e gestão da construção.

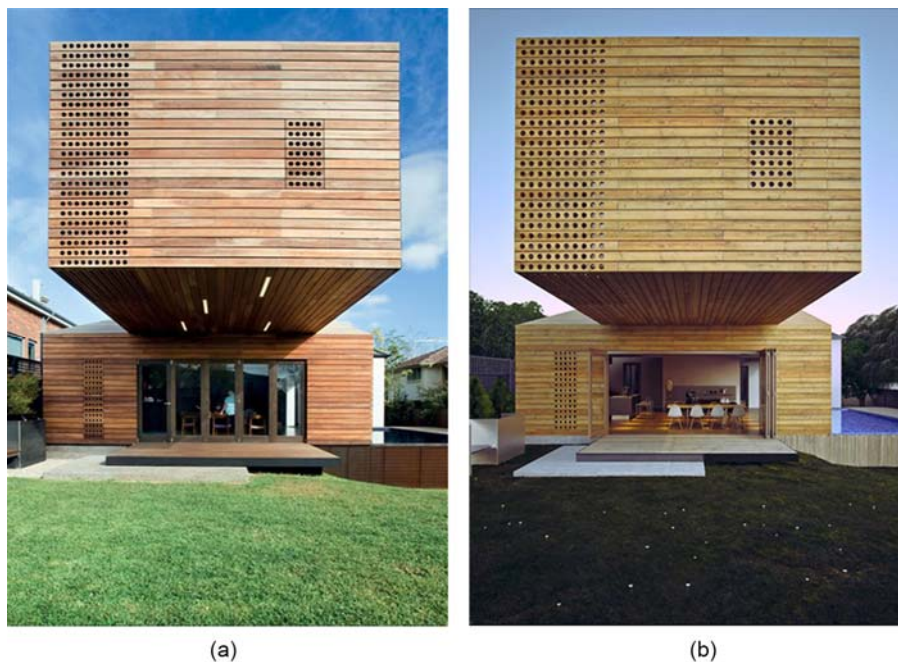


Figura 3 - Fotografia (a) vs Render (b) (Johnson, N., 2015)

Os casos de sucesso que se têm vindo a verificar em todo o mundo, assim como os avanços ao nível de tecnologia de suporte ao BIM, são relatados em bibliografia de especialidade. O maior impulsionador para a divulgação desta tecnologia é, no entanto, Chuck Eastman, autor do livro *“Bim Handbook: A Guide To Building Information Modelling For Owners, Managers, Designers, Engineers And Contractors”* (2011). A nível internacional existem várias entidades que têm apoiado o desenvolvimento da tecnologia e de implementação do BIM, tais como:

- *BuildingSMART*: organização internacional que envolve os Estados Unidos da América, o Reino Unido, a Austrália, o Canadá, a China, a Noruega, a Finlândia, entre outros [W1];
- *The American Institute of Architects, AIA* [W2];
- *The NBS*: entidade responsável por criar legislação BIM para o Reino Unido [W3];
- *Building Information Modelling (BIM) Task Group*: grupo de trabalho responsável por apoiar e ajudar a alcançar os objectivos da estratégia de construção recomendada pelo governo do Reino Unido e a exigência de fortalecer a capacidade do sector público na implementação BIM [W4].

Países como o Reino Unido e Estados Unidos da América, têm adoptado a obrigatoriedade da utilização do BIM em obras públicas, contribuindo fortemente para o seu desenvolvimento e difusão. Em Portugal, Plataforma Tecnológica Portuguesa de Construção [W5], PTPC, criou o Grupo de Trabalho BIM, GTBIM, com o objectivo de desenvolver a legislação para o uso do BIM a nível nacional, assim como para a sua divulgação e adopção da metodologia a nível nacional junto da indústria.

Em Portugal, existem mais duas entidades que têm apoiado a implementação e difusão do BIM: *BIM Management Institute* [W6], anteriormente designado por *BIM Fórum Portugal*, e o *BIM Club* [W7]. Estas organizações são de responsabilidade de engenheiros, arquitectos e docentes universitários de diversas universidades portuguesas. Assim, o *BIM Club*, numa área mais académica, apresenta um repositório de teses de Doutoramento e de Mestrado, em curso e concluídas. Salienta-se algumas destas teses de mestrado, concluídas recentemente, que se enquadram na área do projecto de estruturas:

- “*O BIM como ferramenta de apoio no projeto colaborativo entre o Engenheiro de Estruturas e o Arquitecto*”, Caires, B., 2013, Universidade do Minho;
- “*Medição de armaduras de betão armado e orçamentação em BIM*”, Sousa, H., 2013, Universidade do Minho;
- “*A metodologia Building Information Modelling aplicado ao projeto de estruturas*”, Fernandes, J., 2013, Universidade do Minho;
- “*Princípios Para O Desenvolvimento De Projetos Com Recurso A Ferramentas BIM - Avaliação de melhores práticas e proposta de regras de modelação para projetos de estruturas*”, Silva, J., 2013, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
- “*Aplicabilidade prática do conceito BIM em projeto de estruturas*”, Tarrafa, D., 2012, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra;
- “*Aplicação de Conceitos BIM à Instrumentação de Estruturas*”, Ferreira, B., 2011, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Adicionalmente no Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, do Instituto Superior Técnico, foram já apresentadas duas dissertações de mestrado com importância no tema abordado:

- “*Aplicação de tecnologia BIM no projecto de edifícios*”, Neves, P., 2012, Instituto Superior Técnico;

- “Análise do modelo BIM numa perspectiva do projecto de estruturas”, Azevedo, V., 2015, Instituto Superior Técnico.

2.1. Conceito

Chuck Eastman, em 1975, no artigo “*The Use of Computers Instead of Drawings In Building Design*”, publicado no *American International Architects Journal*, refere o conceito de “*Building Description System*”, contendo já algumas das noções que ainda hoje são a base do BIM. Na Europa, houve desenvolvimentos, no final da década de setenta e início da década de oitenta, em que apareceram conceitos, tais como “*Building Product Models*” e “*Product Information Models*”, em 1986, Rober Aish apresenta no 5º Simpósio Internacional da CIB o termo “*Building Modelling*”. Estas designações levaram a que mais tarde, aparecesse o termo “*Building Information Models*”, documentado pela primeira vez em 1992 por van Nederveen e Tolman, no relatório “*Modelling Multiple Views on Buildings*” [W8]. Posteriormente, é esta a designação largamente divulgada pelas empresas de software na indústria AEC (Eastman, C. *et al*, 2011).

Da análise da bibliografia consultada é frequente a dicotomia na definição de BIM: é a metodologia de trabalho onde se baseia o *Building Information Modelling*; é o próprio modelo digital rico em informação.

Azhar, S. *et al* (2008) refere que o “BIM representa o desenvolvimento e utilização de modelos, gerados por computador, n-dimensionais (n-D) para simular o planeamento, concepção, construção e operação de uma instalação”.

A implementação do BIM no sector da construção é, pois, considerada como um impulsionador de desenvolvimento. O BIM, como metodologia, baseia-se nos seguintes conceitos:

- Interoperabilidade e padronização;
- Modelação paramétrica.

2.1.1. Interoperabilidade e padronização

Actualmente, existem vários programas aos quais a indústria AEC recorre para realizar os seus projectos, de acordo com as suas necessidades. Sendo a óptica do arquitecto algo diferente da do projectista de estruturas, recorrem, no desenvolvimento das respectivas componentes, a ferramentas diferentes, que por vezes limitam a capacidade de troca de informação entre especialidades.

O conceito de interoperabilidade define-se como a capacidade de os sistemas computacionais permitirem a troca de informação de um modo eficaz. As várias ferramentas BIM desenvolveram, assim, uma grande capacidade de interoperabilidade. Apresenta-se, na figura 4, o diagrama de troca de informação BIM, utilizado no projecto *Enchanted Storybook Castle, Disney Shangai* [W9], actualmente em construção na cidade de Shanghai, na China. O empreendimento é de elevada complexidade e valor, envolvendo 142 disciplinas de projecto.

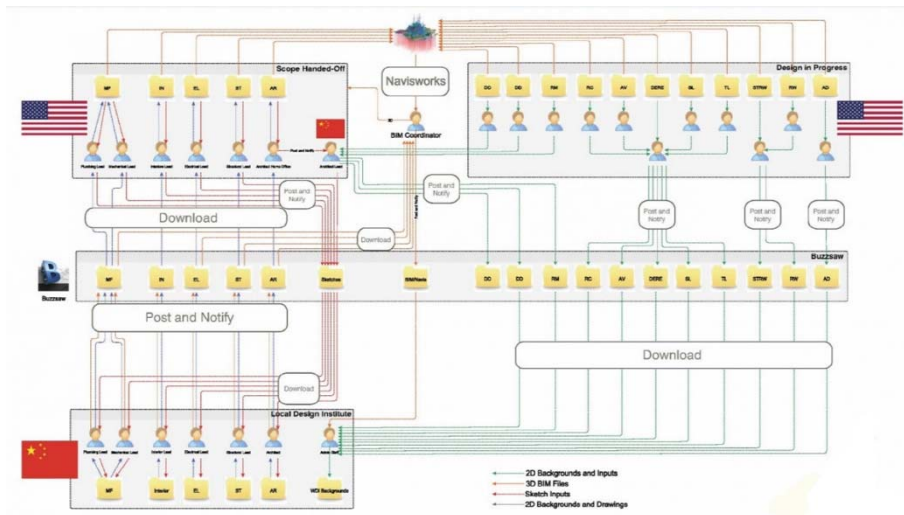


Figura 4 - Diagrama de troca de informação BIM (AIA TAP BIM Awards, 2014)

O potencial sucesso desta metodologia assenta na capacidade de se poder retirar, utilizar e introduzir informação relevante num modelo BIM digital, que possa ser acedido por ferramentas de diversas especialidades inerentes ao projecto. Aparece assim a necessidade de padronizar o formato dos ficheiros de partilha, surgindo pois o formato *Industry Foundation Classes* (IFC).

Chuck Eastman, no referido livro, apresenta o formato IFC como “um esquema desenvolvido para definir um conjunto extensível de representações de dados consistentes de informação de um edifício, que possa proporcionar a troca de informação nos diversos sectores da indústria AEC”. É um padrão de formato de dados que possibilita a transferência de dados entre sistemas.

Segundo a *buildingSmart*, existem aproximadamente cento e sessenta ferramentas que têm a possibilidade de realizar transferência de informação através de ficheiros IFC. Ou seja, os programas têm a capacidade de arquivar e interpretar modelos BIM neste formato.

A capacidade de interoperabilidade entre sistemas influencia o modo de os projectistas colaborarem; neste contexto, o BIM veio trazer a necessidade de criar espaços físicos ou plataformas tecnológicas, onde as várias especialidades possam analisar, verificar e melhorar os seus projectos de um modo colaborativo. A figura 5 ilustra a sala de conferências, *BIM Immersion Room*, do gabinete *Odeh Engineers*, Boston [W10], onde o cliente e os diversos projectistas podem estudar cada contribuição, tendo como base o modelo BIM. Segundo a empresa, este modo de trabalhar com recurso a tecnologia subjacente, tem fornecido uma base muito valiosa para a concepção, planeamento da construção e para coordenação geral do trabalho.



Figura 5 - BIM Immersion Room, Odeh Engineers, Boston (Odeh Engineers [W10])

2.1.2. Modelação paramétrica

No contexto da metodologia BIM, a representação de um objecto, como por exemplo, um pilar ou uma sapata, não é apenas um modelo geométrico tridimensional (3D). Numa modelação BIM, o utilizador associa diverso tipo de informação ao objecto: características físicas, económicas, ou aspectos relacionados com a manutenção. Toda a informação é relevante para capacitar o modelo com a informação que, posteriormente, possa ser requerida e mapas de quantidades e orçamentos, ou para permitir a análise de estudos acústicos, energéticos, entre outros.

Contudo, as características definidas inicialmente dos objectos podem ser posteriormente alteradas e acrescentadas, em qualquer fase do projecto. Assim, o utilizador não necessita de conhecer toda a informação numa fase inicial da modelação. O processo de modelação paramétrico do BIM permite ao utilizador acrescentar as características que achar essenciais para um determinado objecto, para que possa ser consultado e manipulado posteriormente. O modelo pode ser actualizado e enriquecido em qualquer fase do projecto (figura 6).

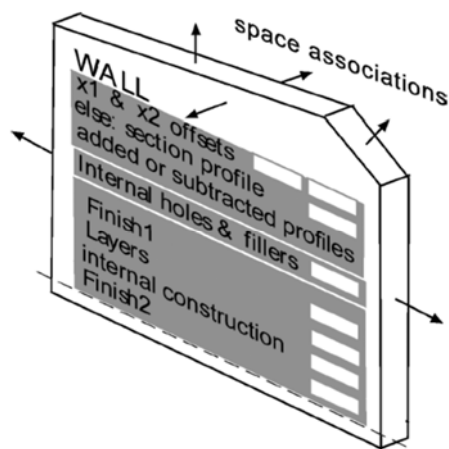


Figura 6 - Estrutura conceptual de uma família de paredes: dimensões, composição da parede, características físicas (Eastman, C. et al, 2011)

Um modelo com estas características é, então, um modelo paramétrico. Não é um modelo simplesmente geométrico, passando a ser um modelo que engloba diversos parâmetros. Adicionalmente, respeita as interacções entre os vários objectos, isto é, mantém uma relação consistente entre elementos adjacentes. Por exemplo, se num modelo de arquitectura se pretender alterar uma parede, todos os elementos que interagem com essa parede são automaticamente adaptados às modificações impostas, mantendo uma relação consistente, seja de dimensão da parede adjacentes, seja de elementos incorporados na parede alterada como janelas e portas. A figura 7 ilustra uma situação em que o arquitecto pretende alterar a posição de uma parede (parede sombreado a encarnado); quando é imposta uma translação à parede, observa-se que a porta acompanha a parede onde se encontra instalada, e a parede perpendicular aumenta o seu comprimento, obtendo-se um modelo consistente.

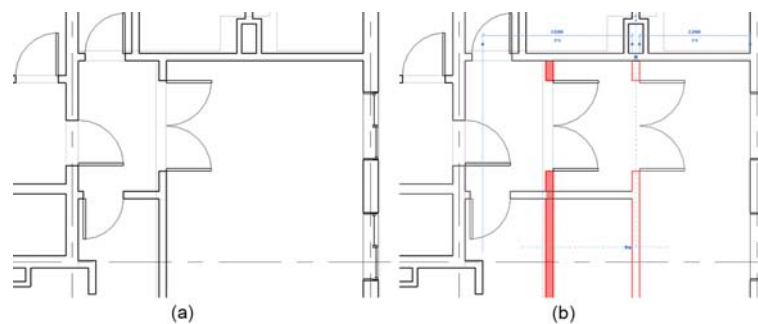


Figura 7 - Relação paramétrica entre objectos: (a) inicial e (b) alteração

2.1.3. As n-Dimensões do BIM

Para indicar o nível de amadurecimento da metodologia BIM, são referidos os conceitos de modelos 3D, 4D, 5D e 6D, usados para indicar a capacidade do modelo BIM, que são, actualmente, bastante complexos:

- 3D: associado às três dimensões espaciais e às características físicas dos seus materiais e relação entre objectos;
- 4D: incorpora o parâmetro tempo utilizado no planeamento da construção;
- 5D: introduz o factor custo, sendo aplicado para efeitos de orçamentação e análise financeira;
- 6D: aspecto relacionado com a gestão de ciclo de vida do empreendimento.

No âmbito desta dissertação é explorada a modelação em ambiente tridimensional (3D) do projecto de estruturas, incluindo a geração do modelo computacional e posterior cálculo estrutural. Adicionalmente, é introduzida a quarta dimensão, num exemplo específico de faseamento construtivo, e, ainda, a quinta dimensão, através da obtenção de mapas de quantidades, nomeadamente de áreas de cofragem, de volume de betão e de armaduras.

2.1.4. Conceito de níveis de Desenvolvimento e de Detalhe

As diferentes fases do projecto, de construção e de uso de um edifício, exigem diversos níveis de desenvolvimento, “*level of development*” (LOD), do modelo BIM. Por exemplo, a fase de projecto não requer elevado nível de desenvolvimento e volume de informação a considerar, do modelo. No entanto é exigido um nível superior de informação nas fases de gestão e de manutenção do edifício. Assim, a organização *American Institute of Architects* propõe cinco níveis; os três primeiros estão associados a projecto; o quarto à construção; o quinto à fase de operação e manutenção do edifício.



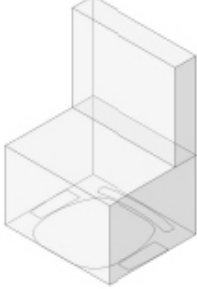


Em 2011, são enquadrados os cinco níveis LOD (figura 8), definidos pelo AIA, pelo *Structural Engineering Institute – Council of American Structural Engineers* (Odeh, D., et al, 2011 e Rauch, A., et al, 2011):

- **LOD 100:** modelo básico considerado ao nível do projecto esquemático que fornece, essencialmente, quantidades de massa e volume;
- **LOD 200:** modelo mais desenvolvido contendo cerca de 35% de informação para dimensionamento. Geralmente contém a informação necessária para a realização de uma análise estrutural básica;
- **LOD 300:** neste nível a informação do modelo é suficiente para a preparação dos documentos normalmente requeridos no projecto de execução;
- **LOD 400:** o modelo BIM inclui detalhes adicionais e todas as estruturas primárias e secundárias de suporte. Contém, ainda, a informação completa sobre a fabricação, a montagem e diversos dados de detalhe;
- **LOD 500:** todos os elementos e sistemas estão correctamente modelados de acordo com a construção e com a totalidade de detalhes. O modelo pode ser usado para manutenção e adicionado à documentação do edifício.

No âmbito do projecto de estruturas, o nível de desenvolvimento a considerar corresponde ao LOD 300. Isto é, o modelo BIM deve conter a informação necessária para se efectuar o cálculo estrutural e permitir apresentar as telas finais do projecto.

Associado ao nível de desenvolvimento, existe um outro conceito, o nível de detalhe, que, frequentemente é confundido e referido como sendo o mesmo indicador. Entende-se como nível de detalhe a medida da quantidade de informação que pode ser fornecida pelo modelo BIM. Referindo-se apenas à quantidade de informação e não ao tipo, admite-se que o modelo contém toda a informação relevante para o projecto (figura 9). Assim, pode-se definir os níveis de detalhe como:

- **G0:** representação esquemática do elemento, podendo não estar à escala ou conter qualquer valor dimensional;
- **G1:** nível em que apresentar o mínimo de informação para se identificar o elemento. O elemento é já criado com um material consistente;
- **G2:** o elemento contém já toda a informação relevante e encontra-se suficientemente modelado para ser identificado o tipo e materiais utilizados;
- **G3:** semelhante ao G2, diferindo somente na representação tridimensional.

LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 400	LOD 500
				
<i>Conceito (apresentação)</i>	<i>Desenvolvimento do conceito</i>	<i>Documentação</i>	<i>Construção</i>	<i>Gestão de edifícios</i>
DESCRIÇÃO: Cadeira de escritório	DESCRIÇÃO: Cadeira de escritório	DESCRIÇÃO: Cadeira de escritório Braços, Rodas	DESCRIÇÃO: Cadeira de escritório Braços, Rodas	DESCRIÇÃO: Cadeira de escritório Braços, Rodas
LARGURA: 100	LARGURA: 700	LARGURA: 700	LARGURA: 685	LARGURA: 685
PROFUNDIDADE: 100	PROFUNDIDADE: 450	PROFUNDIDADE: 450	PROFUNDIDADE: 430	PROFUNDIDADE: 430
ALTURA: 100	ALTURA: 1100	ALTURA: 1100	ALTURA: 1085	ALTURA: 1085
FABRICANTE: Herman Miller, Inc.	FABRICANTE: Herman Miller, Inc.	FABRICANTE: Herman Miller, Inc.	FABRICANTE: Herman Miller, Inc.	FABRICANTE: Herman Miller, Inc.
MODELO: Mirra	MODELO: Mirra	MODELO: Mirra	MODELO: Mirra	MODELO: Mirra
LOD: 100	LOD: 200	LOD: 300	LOD: 400	DATA DE COMPRA: 01/02/2013

(Apenas é utilizável a informação a encarnado)

Figura 8 - Informação presente nos 5 LOD (adaptado de McPhee, A., 2015)

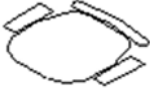
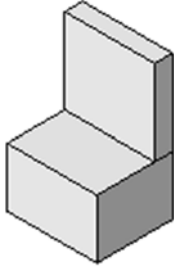


G0	G1	G2	G3
			
<i>Esquemático</i>	<i>Conceito</i>	<i>Definição</i>	<i>Render/ Apresentação</i>
DESCRIÇÃO: Cadeira de escritório	DESCRIÇÃO: Cadeira de escritório	DESCRIÇÃO: Cadeira de escritório Braços, Rodas	DESCRIÇÃO: Cadeira de escritório Braços, Rodas
LARGURA: 100	LARGURA: 700	LARGURA: 700	LARGURA: 685
PROFUNDIDADE: 100	PROFUNDIDADE: 450	PROFUNDIDADE: 450	PROFUNDIDADE: 430
ALTURA: 100	ALTURA: 1100	ALTURA: 1100	ALTURA: 1085
FABRICANTE: 100	FABRICANTE: 100	FABRICANTE: Herman Miller, Inc.	FABRICANTE: Herman Miller, Inc.
MODELO: 100	MODELO: 100	MODELO: Mirra	MODELO: Mirra

Figura 9 - Informação presente nos níveis de detalhe (adaptado de McPhee, A., 2015)

Comparando as figuras 8 e 9, entende-se que o nível de desenvolvimento e o nível de detalhe estão profundamente relacionados, pois não se pode ter um nível de desenvolvimento se o nível de detalhe não existir. Por exemplo, para ser possível obter um modelo com um nível de desenvolvimento LOD 500, é necessário que o objecto tenha um nível de detalhe G3.

2.1.5. Normas BIM

Com o desenvolvimento da tecnologia BIM e o aumento da sua utilização nas variadas fases de projecto, houve necessidade da criação de normas BIM, que pudessem regulamentar o processo de modelação em cada país, numa tentativa de minimizar os erros que poderiam advir da utilização de diversas ferramentas.

A organização *buildingSmart*, publicou em Janeiro de 2014, uma lista com as normas BIM aplicadas [W11]. Países como a Austrália, a Dinamarca, os Estados Unidos da América, a Noruega, o Reino Unido e Singapura apresentam regras de utilização do BIM para obras públicas.

No caso em estudo serão consideradas duas regulamentações: a normalização adoptada no Reino Unido, *AEC (UK) BIM Protocol*; e as normas adoptadas em Singapura, *Singapore BIM Guide*, pois são as duas normas consideradas mais completas a nível mundial. Em particular, a norma utilizada no Reino Unido, por ser um país exigente com as empresas da indústria AEC na implementação da metodologia BIM, verifica-se que muitas das empresas encontram-se numa fase bastante avançada de implementação (Khemlani, L., 2012).

2.1.5. Vantagens BIM

Podem ser sintetizadas algumas das vantagens enunciadas na bibliografia, com a utilização da metodologia BIM:

- A fácil comunicação entre as várias especialidades, quando o modelo é desenvolvido com o mesmo programa ou com programas em que a transferência de informação ocorra de modo eficiente;
- A concepção do projecto e a adição de especialidades com base na modelação 3D torna mais clara a percepção da forma e relacionamento das distintas componentes de cada projecto;
- A rápida obtenção de mapas de quantidades como, por exemplo, o volume de betão, a quantidade de armadura ou volume de escavação, entre muitos outros, por ser directa a partir dos elementos modelados;
- O modelo é a base de informação fiável, para o cliente, pois contém toda a informação relativa a cada componente de projecto.

2.2. BIM e o projecto de estruturas

Pretende-se com esta nova metodologia, que o modelo BIM acompanhe o ciclo de vida de um edifício, desde a sua concepção à sua demolição (figura 10). Assim, sendo o projecto de estruturas uma parte integrante da concepção do edifício, importa entender que vertentes do projecto sofrem alterações com a introdução desta nova metodologia, que é um dos objectivos da presente dissertação.

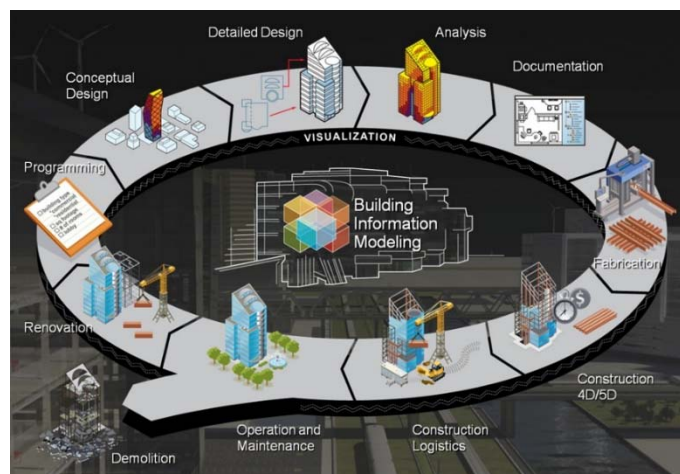


Figura 10 - Modelo BIM acompanha o ciclo de vida de um edifício (Dispenza, K., 2010)

Como referido, o nível da produção de projecto encontra-se relacionado com a capacidade de troca de informação permitida entre as várias especialidades. Isto é, os vários intervenientes trabalham sobre o mesmo modelo ou recorrem a ferramentas comerciais de base BIM. Assim, um dos objectivos do trabalho a desenvolver é entender como ocorre a troca de informação entre o programa de modelação e o programa de cálculo estrutural. Esta transferência é referida como não estando, ainda, isenta de falhas, principalmente para modelos de estrutura mais complexos.

Outra inovação do BIM é a capacidade de modelação e a subsequente obtenção automática de desenhos sempre actualizados e sem erros de inconsistência, como plantas, alçados e cortes. Esta exactidão nos desenhos acontece, porque o modelador, arquitecto ou engenheiro, trabalha sempre sobre um mesmo modelo tridimensional e qualquer alteração efectuada no projecto é realizada directamente no modelo 3D, a partir do qual são obtidos os desenhos.

No âmbito desta dissertação é utilizado o programa *Revit 2015* da *Autodesk* [W12], denominado Revit, visto ser considerado actualmente como um programa bastante completo, ao nível das várias especialidades, e é uma ferramenta que começa a ser divulgada nos gabinetes de projecto. No cálculo estrutural é utilizado o *Robot Structural Analysis Professional 2015*, designado Robot, um programa de cálculo frequentemente utilizado nos projectos de estruturas.

Estas ferramentas suportam a metodologia BIM. Neste estudo, o processo de modelação e os resultados obtidos são comparados com o processo de análise da estrutura com recurso ao programa de cálculo SAP2000 da *Computers & Structures, Inc* [W13].

2.3. O BIM em Portugal no projecto de estruturas

Embora a metodologia BIM ainda não seja correntemente utilizada ao nível de projecto de estruturas, foram já desenvolvidos em Portugal, alguns projectos com o recurso a ferramentas comerciais de base BIM. Apresentam-se, de seguida, dois projectos do gabinete “NEWTON Consultores de Engenharia, LDA.”, em que se recorreu a este tipo de ferramenta (Lino, J. et al, 2012).

No projecto do Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, actualmente em construção, foi utilizado o modelo BIM desde a sua concepção, figura 11. Foi utilizada a metodologia BIM na modelação das componentes de arquitectura e estruturas no apoio ao desenvolvimento dos respectivos projectos. Constituindo, ainda, o meio de troca de informação, entre os projectistas e o dono de obra. O projecto, com uma configuração complexa, necessitou de uma forte colaboração entre os projectistas de arquitectura e de estruturas. O modelo BIM serviu de base ao desenvolvimento do projecto, permitindo efectuar, com sucesso, a troca de informação requerida entre as duas especialidades e contribuiu, ainda, para uma adequada comunicação com o dono de obra.

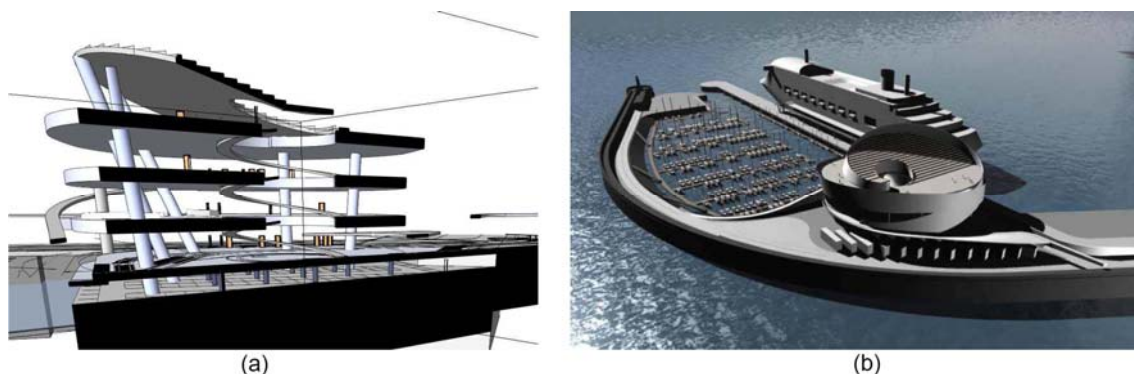


Figura 11 - Terminal de Cruzeiros de Leixões: (a) visualização da estrutura sem as lâminas envolventes e (b) visualização tridimensional (Lino, J. et al, 2012)

Segundo a empresa, no projecto ETAR do Ave (figura 12), foi aplicada com sucesso a metodologia BIM, nomeadamente, no aspecto da colaboração entre os projectos de processo de tratamento e de fundações de estruturas. Uma das grandes vantagens foi a fácil e dinâmica detecção de problemas e interferências entre as duas especialidades, as quais foram realizadas sobre o modelo. A consultora definiu, ainda, o modelo 4D correspondente ao faseamento construtivo da obra.

A metodologia BIM permitiu que o empreiteiro tivesse uma percepção bastante realista da evolução da obra, contribuindo para melhorar o controlo na quantidade de betão encomendada. A dinâmica da partilha de informação, a partir do modelo BIM, permitiu a redução do tempo despendido na elaboração das peças desenhadas do projecto, para além de rentabilizar o tempo consumido na realização do projecto, beneficiando, assim, todas as partes envolvidas.



Figura 12 - ETAR do Ave: interacção colaborativa entre o projecto do processo de tratamento e o projecto de fundações e estruturas (Lino, J. et al, 2012)

3. Geração do modelo BIM de estruturas

O processo de modelação de uma estrutura com recurso a ferramenta de base BIM, requer que o projectista conheça as capacidades do sistema BIM disponíveis para a geração do modelo de estruturas, de forma a estabelecer a solução estrutural pretendida. O modelo criado deve conter a informação necessária à obtenção, de um modo automático, dos desenhos de projecto. Mas, neste percurso, é necessário que o engenheiro, de forma a poder ser crítico em relação à modelação da estrutura analítica obtida, conheça, em detalhe, o processo de modelação e as suas limitações. É requerido, ainda, que o projectista entenda qual o modo de comunicação entre os sistemas computacionais de modelação e de cálculo. Deve analisar, com cuidado, o processo de transferência de informação entre os sistemas e como é efectuada a discretização da estrutura.

Para a validação da metodologia BIM, no contexto do projecto de estruturas, é realizada a modelação da estrutura de um caso de estudo, um edifício de oito pisos. A estrutura foi estudada e modelada, através do sistema de cálculo SAP2000, no âmbito da unidade curricular Dinâmica Estrutural e Engenharia Sísmica, do Mestrado Integrado de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

O presente estudo propõe analisar as aproximações realizadas sobre o modelo de estruturas no Revit, e de quais as suas implicações no modelo computacional. Este processo é comparado com as simplificações e opções realizadas no modelo SAP2000. Assim, os modelos de estruturas a comparar são:

- O modelo de estruturas, criado directamente no sistema SAP2000, que foi realizado em meio académico, tendo sido acompanhado pelo docente da unidade curricular; o modelo é considerado correcto e as aproximações realizadas as adequadas;
- O modelo desenvolvido em ambiente Revit é analisado quanto ao processo de modelação estrutural e a transposição para o modelo de cálculo estrutural e, posteriormente, é utilizado na extracção de informação.

Para a validação do modelo Revit são verificadas duas condições:

- Ao nível do modelo tridimensional, é comparado o volume de betão de um piso obtido manualmente com o volume obtido recorrendo a ferramentas do Revit (Capítulo 3);
- Ao nível do modelo computacional, é realizada uma verificação referente à determinação do somatório das cargas verticais, para o peso próprio e restantes cargas permanentes, e, ainda,

uma análise em que se compara a frequência e o período do modelo Revit com o obtido através do SAP2000 (Capítulo 4).

3.1. Caracterização da estrutura

A informação disponibilizada relativa à estrutura em análise, que decorre de um trabalho académico, corresponde à distribuição em planta dos elementos verticais (figura 13), e ao desenho esquemático em corte vertical da estrutura (figura 14).

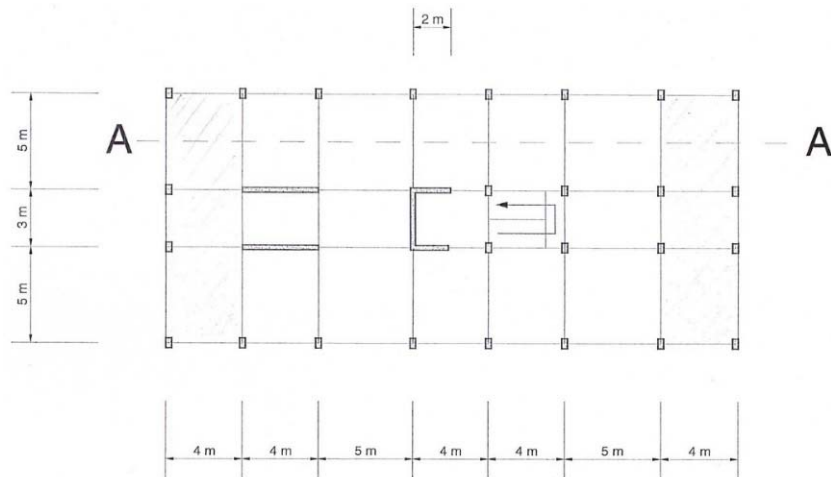


Figura 13 - Distribuição em planta dos elementos estruturais

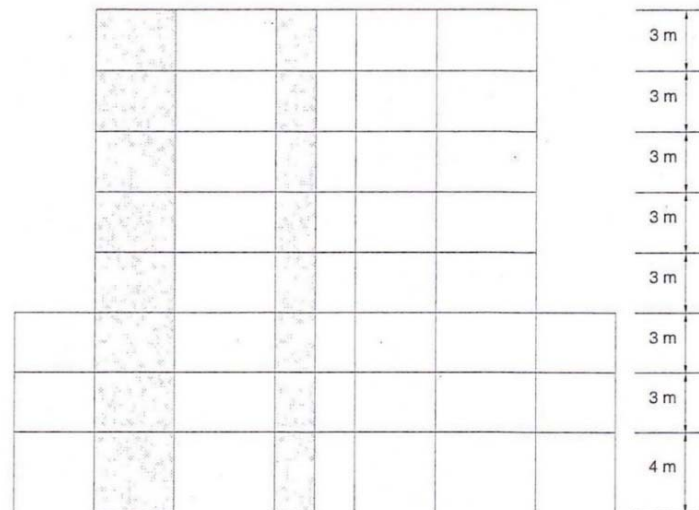


Figura 14 - Evolução em altura da estrutura, corte AA

A informação referente à estrutura é complementada com os seguintes dados:

- Características geométricas
 - Pilares – secção de 30x55 cm² até ao piso 4 e de 30x45 cm² nos pisos superiores
 - Vigas – secção de 30x45 cm²
 - Paredes – 30 cm de espessura
 - Lajes de escada – 15 cm de espessura

- Outras características
 - Edifício localizado em Lisboa
 - Estrutura em betão armado ($\xi=5\%$) da Classe C30/37
 - Estrutura de classe de ductilidade média
 - Terreno de fundação com velocidade de ondas $v_{s,30}=400$ m/s
- Acções
 - Permanentes – $q_G=7,0$ kN/m² (todos os pisos)
 - Sobrecarga de utilização
 - Piso corrente – $q_Q=3,0$ kN/m² ($\Psi_2=0,4$)
 - Terraço – $q_Q=2,0$ kN/m² ($\Psi_2=0,2$)

Em relação às lajes, o seu peso foi considerado como uma acção permanente, pelo que, no trabalho académico, para a sua modelação foi admitida uma *Constraint* ao nível de cada piso. Na planta da figura 13, as vigas estão representadas através de traços contínuos, entre pilares e paredes.

3.2. Modelo SAP

A figura 15 apresenta a estrutura modelada em ambiente SAP2000. No processo de modelação foram seguidas as indicações dos docentes responsáveis pela Unidade Curricular, tendo-se obtido como resultados relativos à frequência e período do edifício, valores considerados espectáveis.

Na execução da análise modal da estrutura, foram obtidos os resultados, apresentados na tabela 1, referentes às frequências e períodos para os seis primeiros modos de vibração. Estes valores servem de base comparativa relativamente a resultados a obter, do mesmo tipo de análise, a partir do modelo BIM.

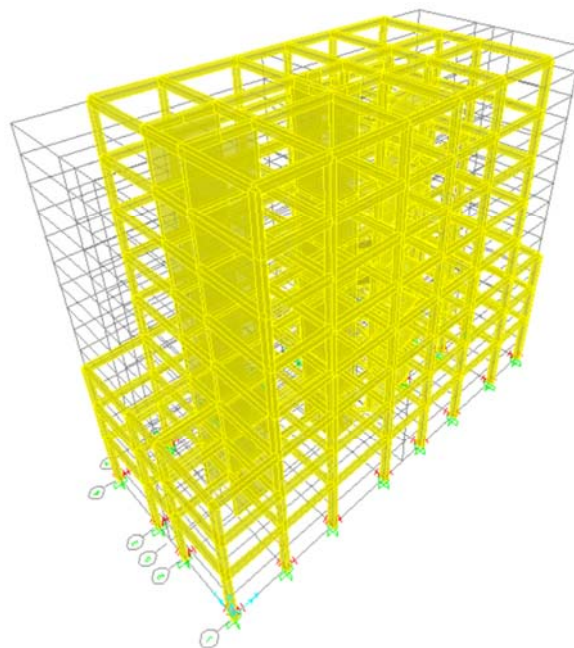


Figura 15 - Vista 3D do modelo SAP2000

Tabela 1 - Períodos e frequências para cada modo de vibração (SAP2000)

Modo	Período [s]	Frequência [Hz]
Modo 1	1,075	0,931
Modo 2	1,036	0,965
Modo 3	0,858	1,165
Modo 4	0,400	2,500
Modo 5	0,301	3,323
Modo 6	0,230	4,357

3.3. Modelo Revit

O modelo BIM de estruturas foi criado através do programa Revit. É uma ferramenta BIM, de crescente utilização a nível internacional. O modelo foi criado na versão 2015 do programa, que incorpora, num único programa, as capacidades de modelação das especialidades arquitectura, estrutura e elementos mecânicos, eléctricos e de canalização. Descrevem-se, de seguida, os passos essenciais à criação do modelo de estruturas.

3.3.1. Ambiente de trabalho Revit

A figura 16 ilustra a interface do programa Revit. A barra de comandos superior, denominada *Ribbon*, apresenta diversos separadores, entre os quais os separadores associados a cada uma das especialidades (arquitectura, estrutura e elementos mecânicos, eléctricos e de canalização). O modelo de estruturas é definido através do correspondente separador, ilustrado na figura 17. A barra contém os vários tipos de elementos estruturais.

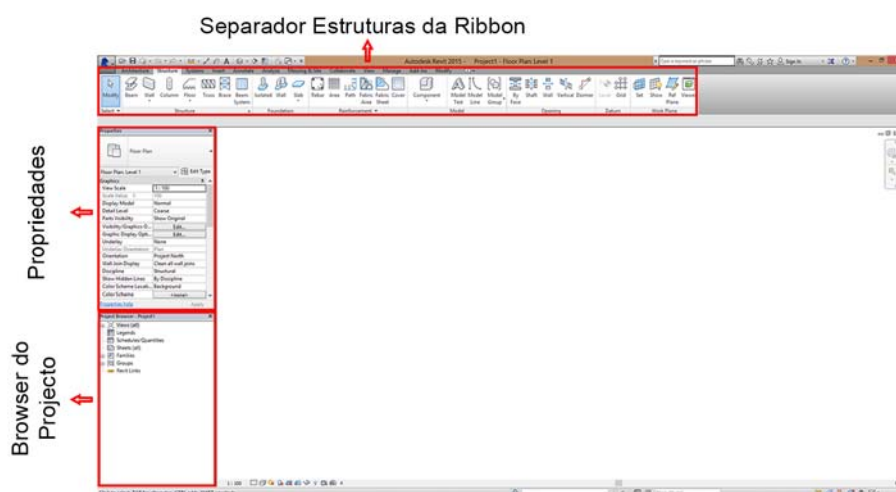


Figura 16 - Ambiente de Trabalho do Revit

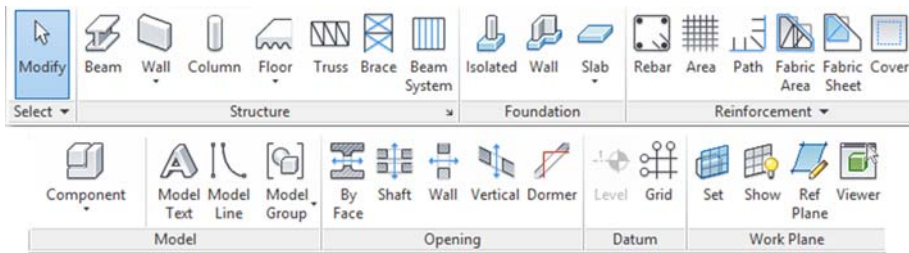


Figura 17 - Separador da especialidade Estruturas

3.3.2. Base de projecto

Foi realizada uma modelação utilizando um *template* estrutural adaptado, a partir do *template* fornecido pela Autodesk com a instalação do programa. O *template* desenvolvido, para efeitos do presente trabalho, engloba a definição de alguns tipos de material (betão, aço e outros), as unidades de projecto e tipos de elementos estruturais.

O menu de materiais, *Materials*, é acedido no separador *Manage* da *Ribbon*, no painel *Settings*. Neste gestor, é possível criar novos tipos de materiais, definir o respectivo aspecto gráfico assim como as suas propriedades físicas ou térmicas. A figura 18 apresenta as características físicas do material estrutural betão C30/37.

O gestor de unidades de projecto é acedido através da selecção do comando *Project Units*, no painel *Settings* do separador *Manage* da *Ribbon*. A figura 19 apresenta algumas das pré-definições consideradas em relação às unidades.

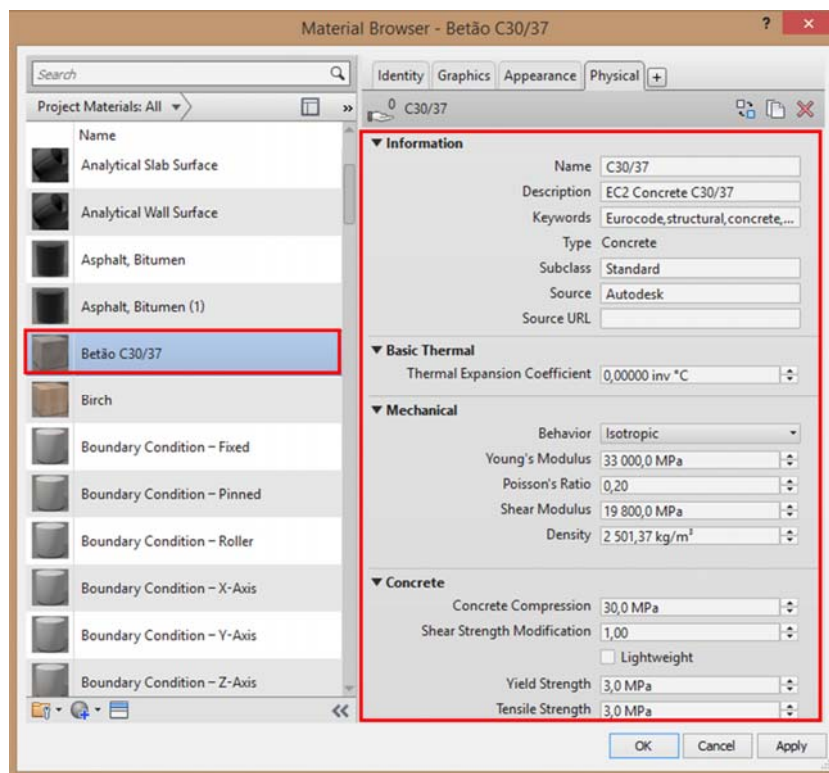


Figura 18 - Gestão de materiais: características do Betão C30/37

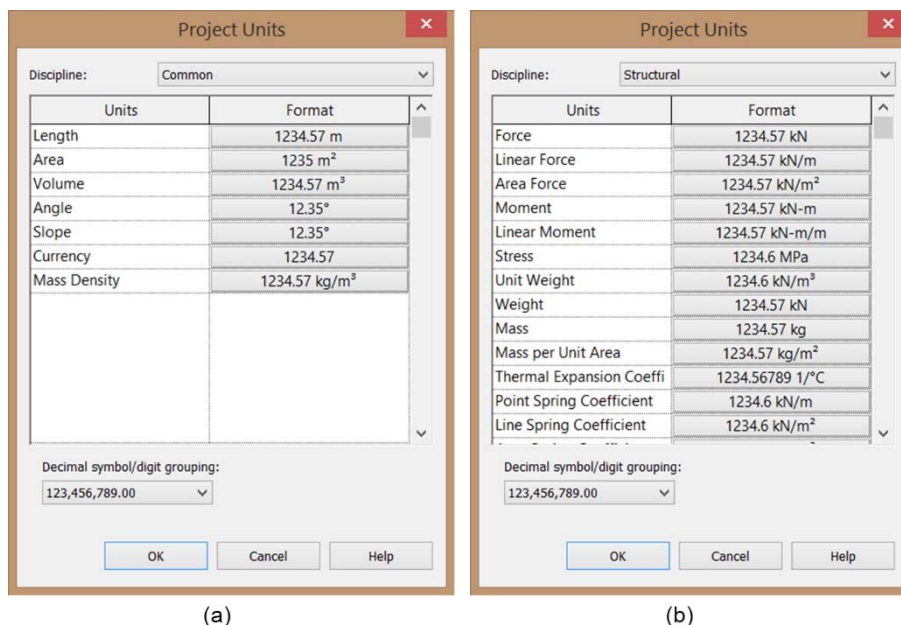


Figura 19 - Unidades de projecto (a) comuns e (b) estruturais

Importa referir que o processo de modelação, apresentado de seguida, não é único. A geração do modelo de estruturas pode ser realizado de forma diferente do apresentado, podendo o resultado não ser idêntico, nomeadamente ao nível do modelo computacional.

3.3.3. Definição da grelha e níveis

Como auxílio à concepção da solução estrutural é requerida a definição de uma grelha, ao nível do piso, e do valor da cota de cada um dos pisos a considerar. A inserção dos modelos representativos da estrutura é apoiada nestas coordenadas.

A grelha estrutural tem como finalidade simplificar a modelação da estrutura do edifício pois assenta, normalmente, num traçado regular. Esta base é particularmente vantajosa na distribuição e na modelação de pilares e vigas. A grelha estrutural é criada numa planta, seleccionando *Grid*, no painel *Datum* do separador *Structure* da *Ribbon* (figura 20 (a)).

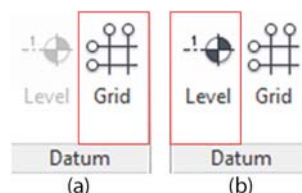


Figura 20 - Painel Datum: Inserir (a) grelha e (b) nível

Os níveis correspondem a planos horizontais de referência do posicionamento dos elementos que compõem a estrutura (lajes, pilares, paredes e vigas). Estes elementos são criados, normalmente, num dos alçados a partir do comando *Levels*, no painel *Datum* anteriormente referido (figura 20 (b)). A figura 21 apresenta os elementos auxiliares da modelação da estrutura em análise.

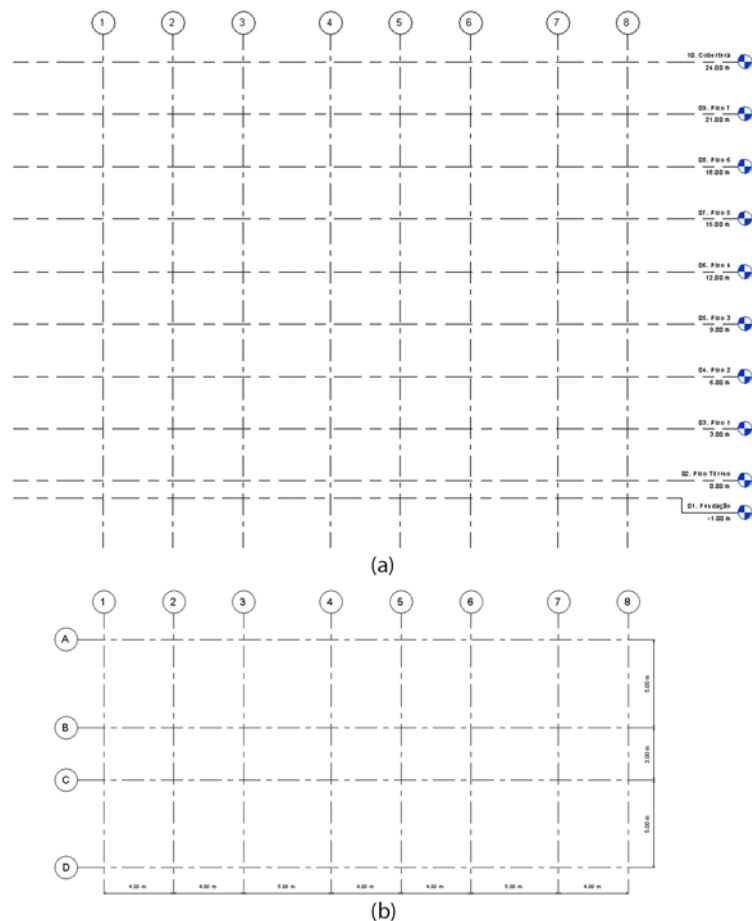


Figura 21 - Apresentação dos (a) níveis e da (b) grelha utilizados para modelação

De referir, que se opta por considerar que o nível da fundação se encontra à cota -1,0 metros e que à cota zero deveria ser modelado, posteriormente, uma laje não estrutural. Assim, foi criado o nível “Piso Térreo”. Esta opção inicial serve, como se descreve no capítulo 5, para demonstrar como a ferramenta BIM tem a capacidade de obter o cálculo de volume de escavação e de aterro. Não tem, no entanto, interferência com cálculos estruturais a realizar.

3.3.4. Definição de elementos verticais

O passo seguinte consiste na representação dos elementos estruturais verticais. A inserção de pilares e paredes estruturais é efectuada, preferentemente, sobre a planta. Podem também ser definidas sobre uma perspectiva axonométrica. Como referido, a estrutura é composta por pilares de betão, com secções rectangulares de dimensões 30x55 cm² e 30x45 cm².

O *Guia Essencial do BIM*, documento presente na *Singapore BIM Guide* [W14], é adoptado como o guia BIM para projectistas de estruturas e construção. Este documento indica que os pilares devem ser modelados por cada nível, de modo a satisfazer o critério de rácio de esbelteza no modelo computacional.

Assim, para a modelação dos pilares, é seleccionada a opção o *Column*, no painel *Structure* do separador *Structure* da *Ribbon*, é indicado o tipo de pilar pretendido, e, ainda, o nível correspondente

à sua base. É indicado ainda a direcção de modelação, ou seja, se o pilar é desenvolvido, em relação à base, no sentido ascendente ou descendente. A figura 22 apresenta o quadro das propriedades do pilar 30x55 cm².

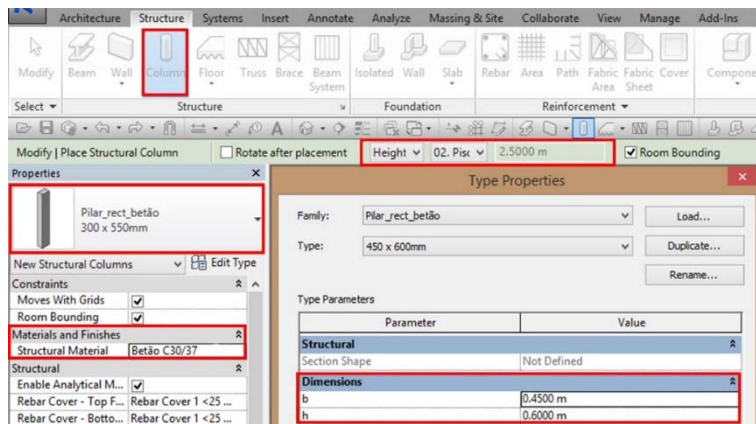


Figura 22 – Inserção de pilares e suas propriedades

De igual forma, são modeladas as paredes estruturais, consideradas com uma espessura igual a 30 cm. A componente *Wall* é seleccionada no painel *Structure*, do separador *Structure* da *Ribbon*. É seleccionada a opção relativa ao sentido de modelação, é indicada a altura da parede (confinada a nível dos pisos referidos) e qual a localização do alinhamento do traçado. A figura 23 apresenta as propriedades das paredes.

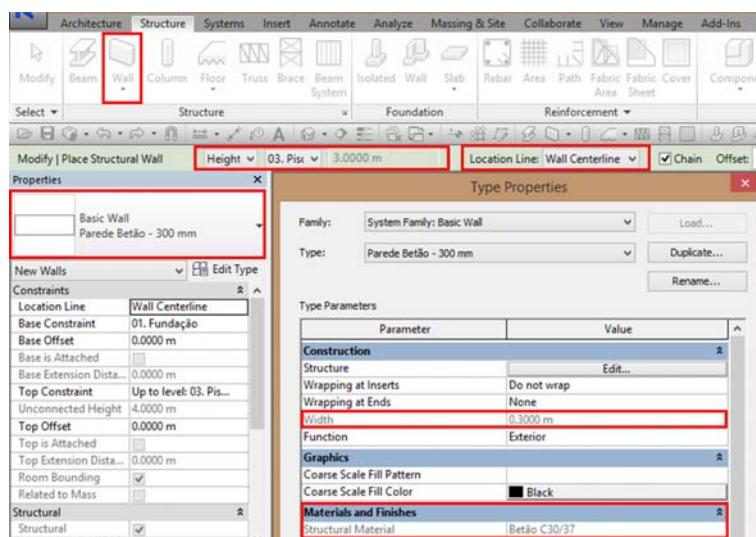


Figura 23 - Inserir paredes estruturais e suas propriedades

O modelo de pilares, como são objectos paramétricos, contém a informação inerente ao material “Betão C30/37”. Posteriormente, quando um utilizador selecciona o pilar, no modelo de estruturas são apresentadas as suas características físicas. Todos elementos modelados apresentam associado ao elemento, o respectivo material estrutural e suas características físicas, necessárias ao cálculo estrutural.

A figura 24 apresenta o resultado da distribuição de todos os elementos verticais existentes no piso 0, representado sobre a grelha de alinhamentos estabelecido. A solução estrutural é representada em planta (a) e em perspectiva (b).

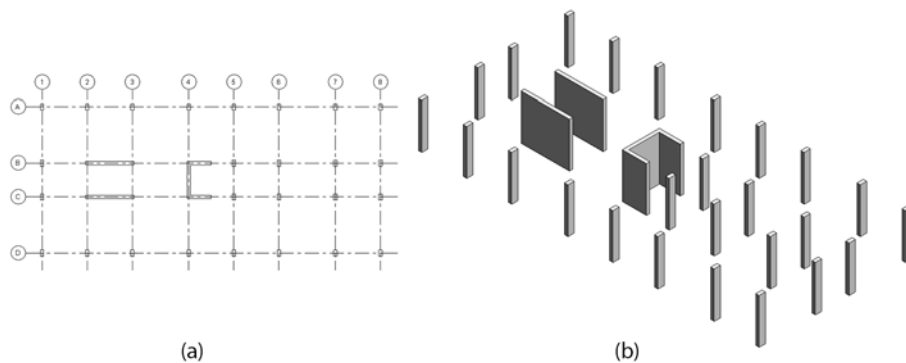


Figura 24 - Visualização dos elementos estruturais verticais:
(a) representação em planta e (b) projecção axonométrica

O Revit associa aos elementos estruturais modelados um elemento finito. Associa elementos barra aos pilares e vigas, e elementos tipo *shell* a paredes e lajes. O programa executa aproximações automáticas, como se ilustrará posteriormente, assim como há aproximações que devem ser executadas manualmente no Revit, para que possa posteriormente ser utilizado para realização do cálculo estrutural.

A figura 25 apresenta o modelo geométrico (a), o modelo geométrico sobreposto com o modelo computacional (b) e o modelo computacional (c). O processo de geração deste modelo numérico é automático a partir dos elementos estruturais. O projectista deverá analisar este modelo, examinando as correcções e simplificações adoptadas pelo Revit. Esta análise é efectua e detalhada no capítulo 4.

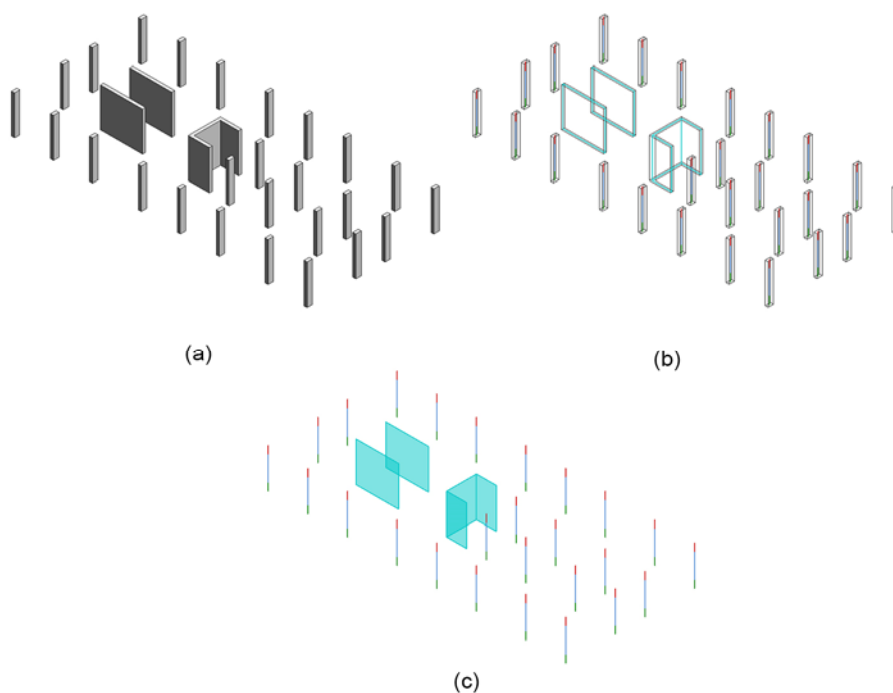


Figura 25 - Modelo geométrico e modelo computacional

O desenvolvimento em altura dos pilares admite uma descontinuidade, na maior dimensão da sua secção, passando de 55 cm para 45 cm. Deste modo, o eixo dos pilares localizados no bordo do edifício, fica descentrado em 5 cm, como se ilustra na figura 26. Contudo, na modelação computacional é corrente realizar-se a aproximação de alinhar os pilares segundo o mesmo eixo, como é assumido no modelo SAP. Na figura 27 pode observar-se como o próprio programa Revit realiza esta aproximação, descentrando o eixo do elemento finito superior.

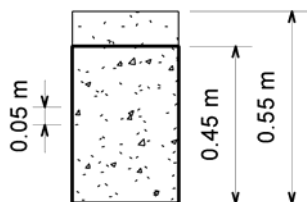


Figura 26 - Colocação dos pilares exteriores ao nível do piso 4

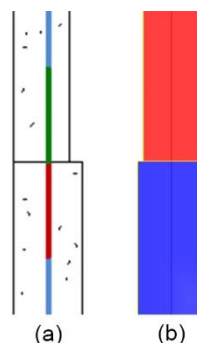


Figura 27 – Modelo computacional da descontinuidade de secção do pilar(a) resolução automática no modelo Revit e (b) idealização no modelo SAP

Esta aproximação automática do Revit, acontece sempre que o pilar superior se encontre distanciado do pilar inferior num valor igual ou inferior a distância definida como tolerância no Revit. A figura 28 apresenta o quadro de propriedades referente ao modelo computacional, onde, entre outras coisas, se pode definir as tolerâncias pretendidas para o modelo realizar aproximações. Para se aceder a este quadro de propriedades selecciona-se *Structural Settings*, no painel *Settings* do separador *Manage*.

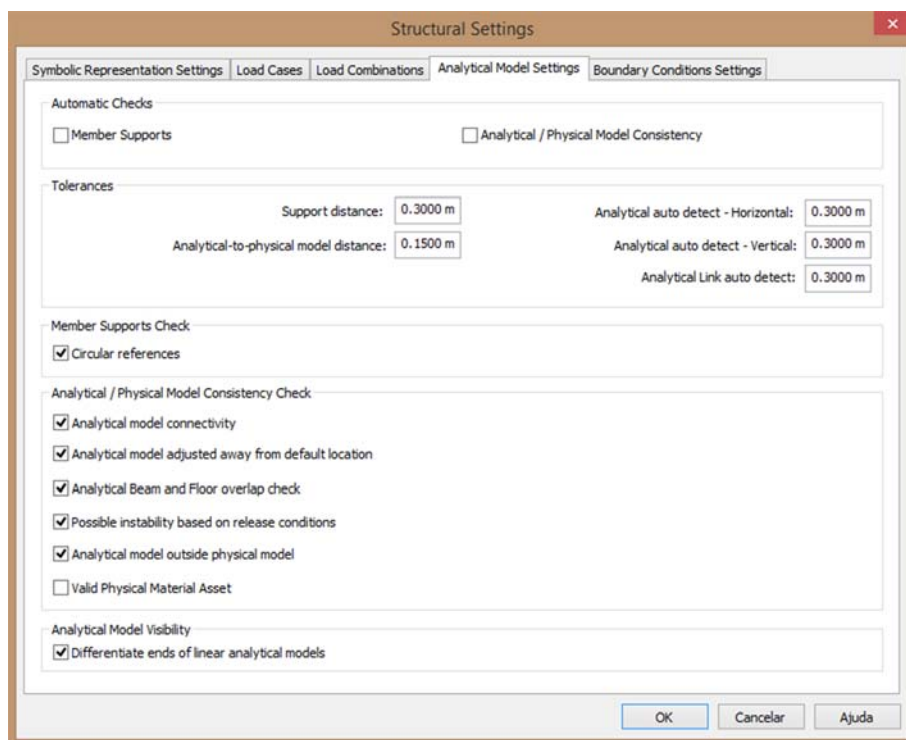


Figura 28 - Quadro de propriedades do modelo computacional

3.3.5. Definição das vigas

A modelação das vigas, quanto à definição das dimensões e do material constituinte, é muito semelhante à modelação dos pilares. A modelação destes elementos é efectuada sobre a planta, nível correspondente à face superior da viga. É seleccionada a opção *Beam* no painel *Structure*, no separador *Structure* da *Ribbon*, seguida, do tipo de elemento, uma viga de betão de secção rectangular de 30x45 cm². A figura 29 apresenta as propriedades das vigas.

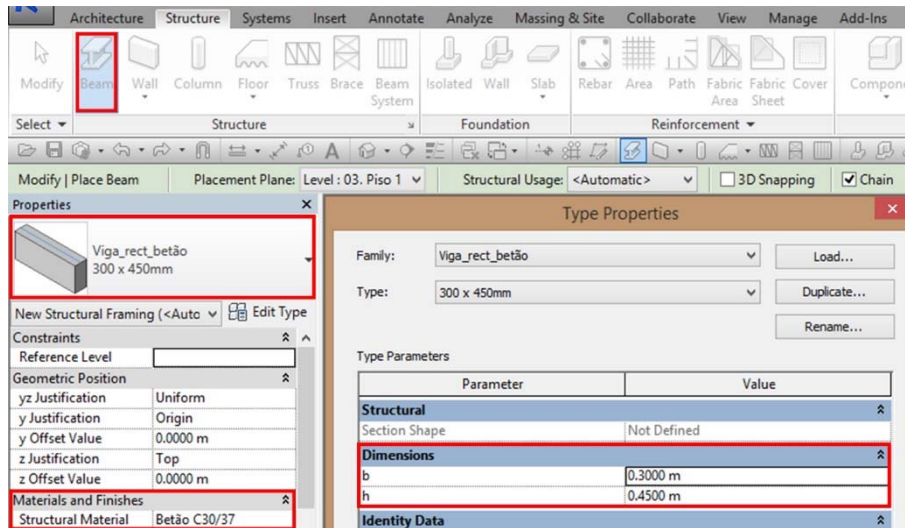


Figura 29 - Inserir vigas e suas propriedades

O referido guia BIM indica que as vigas devem ser modeladas de vão a vão, ou de eixo a eixo, de forma a satisfazer o critério de comprimento de encurvadura dos elementos finitos; a figura 30 ilustra a forma como é realizada a modelação deste tipo de elementos. Não refere, contudo, como deverá ser realizada a ligação entre uma viga e uma parede. No Revit, o elemento parede é modelado como elemento finito *shell*. Opta-se assim, por realizar as vigas como indicado no guia, e na situação de intersecção de vigas e paredes, tem que se observar o modelo computacional para garantir que a ligação entre elementos se encontra realizada correctamente, isto é, se a extremidade da viga coincide com a extremidade da parede.

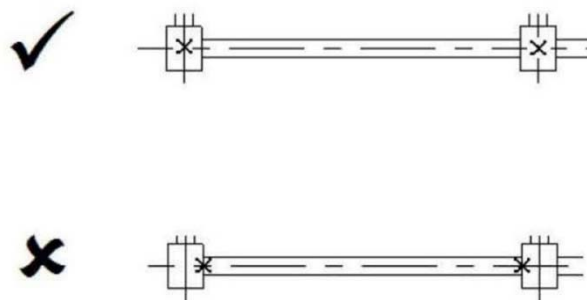


Figura 30 - Modelação das vigas (BIM Essential Guide - For C&S Consultants, 2013)

Nesta fase do processo de modelação deve ser analisada a relação de sobreposição entre os elementos verticais e as vigas. Assim, e para posterior obtenção do mapa de quantidades relativa ao volume de betão da estrutura, importa conhecer como o programa em uso entende os elementos pilar e viga na zona dos nós de intersecção. Idêntica análise é efectuada relativamente à sobreposição dos

elementos estruturais pilar, viga e laje. Apresenta-se na figura 31 a diferenciação entre vigas e pilares, assim como entre vigas (representadas a encarnado) e paredes estruturais.

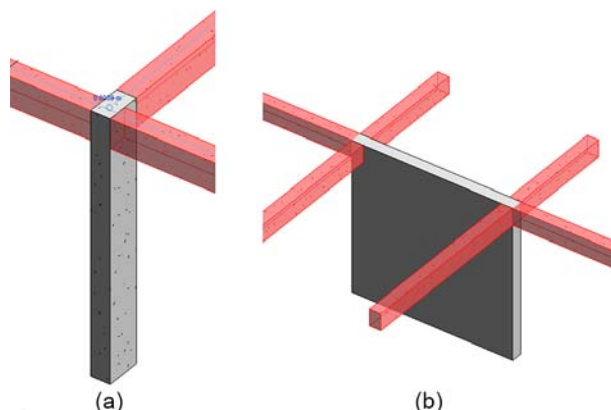


Figura 31 - Interação entre (a) pilares e vigas e (b) paredes e vigas

Tendo em consideração o modo de execução da betonagem destes elementos em obra, em que numa primeira fase é realizada a betonagem do elemento vertical até à face inferior da viga e na segunda fase a betonagem das vigas (e lajes), seria de esperar uma diferente conceptualização dos elementos estruturais por parte do programa Revit. Apesar do volume total de betão ser correcto, há uma discrepância entre o valor do volume de betão obtido pelo programa com o valor necessário em obra, para cada uma das fases. Isto é, o programa fornece um volume de betão do pilar superior ao que é necessário na primeira fase e um volume de betão inferior ao necessário para betonagem das vigas.

Enquanto projectista de estruturas, interessa a obtenção do volume total de betão para apresentação de orçamento e não o seu faseamento construtivo. O Revit permite alterar a ordem de desenho, obtendo uma compatibilização entre o volume obtido no programa com o faseamento construtivo; para tal seria necessário, após modelação dos elementos, utilizar o comando *Switch Join Order*, no painel *Geometry*, separador *Modify*. Como referido, no âmbito desta dissertação não será realizada esta alteração ao modelo, uma vez que apenas é pretendido a obtenção do volume total de betão.

Verifica-se que o elemento finito representativo de parede, elemento *shell*, que deveria terminar no plano vertical do eixo das vigas perpendiculares à parede, excede esse limite como se pode observar na figura 32. Este problema é justificado e resolvido posteriormente, no capítulo 4.

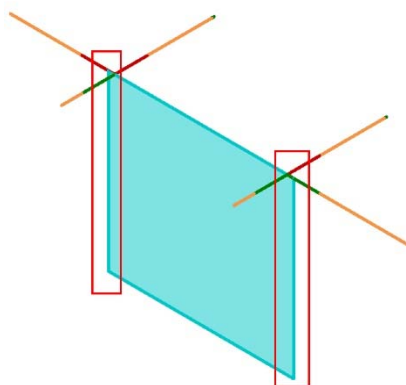


Figura 32 - Apresentação de problema no modelo computacional

Adicionalmente, ao seleccionar as propriedades do elemento finito representativo das vigas, verifica-se que o Revit, ao gerar estes elementos, modela o elemento com libertações de esforços associadas aos seus extremos. Numa extremidade, os esforços libertados são os momentos M_y e M_z , em torno dos eixos y e z respectivamente, sendo que na outra extremidade são libertados os momentos em torno dos três eixos principais (M_x , M_y e M_z). No entanto, para efeitos de cálculo, as vigas não devem adoptar este tipo de libertação de esforços. No capítulo 4 é analisada esta situação e impostas as alterações adequadas de forma a considerar as vigas encastradas.

Apresenta-se na figura 33 a sobreposição entre os modelos geométrico e o computacional, resultante da modelação efectuada até ao presente item.

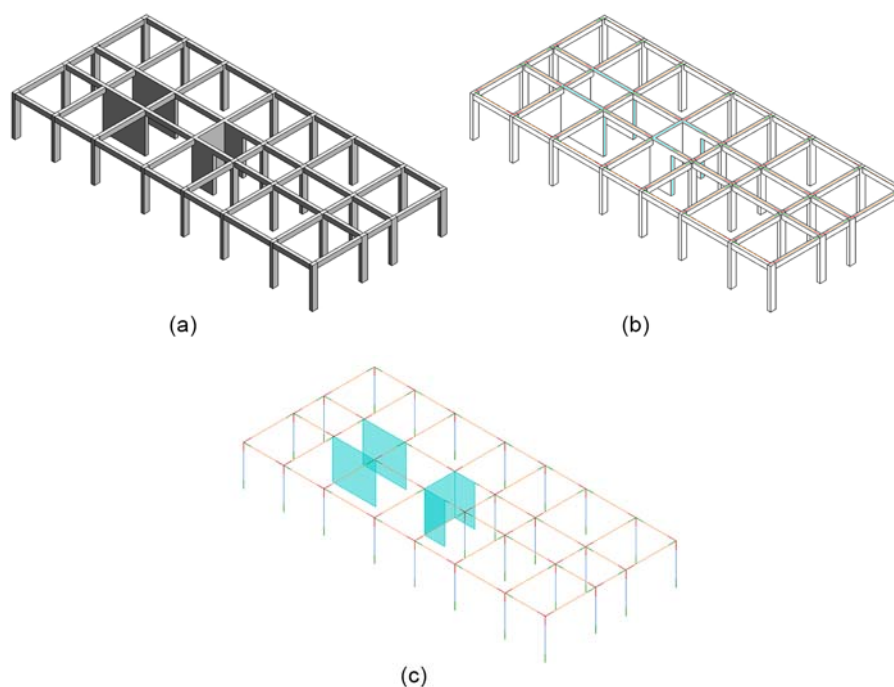


Figura 33 - Sobreposição entre o modelo geométrico e o modelo computacional

3.3.6. Definição da laje

No trabalho académico não foi referida a espessura das lajes. No enunciado didáctico é indicado apenas que o seu peso é considerado nas acções permanentes e que, ao nível de cada piso, deve ser admitida uma *constraint* do tipo *diaphragm*. Mas o processo de modelação no Revit requer a atribuição de uma espessura ao elemento laje. Optou-se, na presente dissertação, por assumir uma espessura da laje de acordo com a seguinte regra de pré-dimensionamento para uma laje vigada:

$$h = \frac{L}{25 \text{ a } 30} = \frac{5}{25 \text{ a } 30} = 16,7 \text{ a } 20 \text{ cm}$$

Considera-se uma laje com espessura de vinte centímetros, o que equivale a retirar às acções permanentes o valor correspondente à espessura da laje, 5 kN/m^2 (o valor indicado no trabalho académico encontra-se indicado em 3.1), passando assim a admitir-se o valor $q_G=2,0 \text{ kN/m}^2$.

Na modelação da laje, é seleccionado o tipo de pavimento que se pretende, no separador *Structure*, painel *Structure* seleccionar *Floor*. A laje de betão tem uma espessura de 20 cm e é limitada pelo perímetro exterior da estrutura e pelo perímetro das aberturas. A figura 34 apresenta a janela de propriedades da laje de betão considerada e a figura 35 ilustra uma perspectiva do modelo criado. Na projecção isométrica do modelo 3D, a laje está representada a encarnado com efeitos de transparência, podendo observar-se a distribuição das vigas.

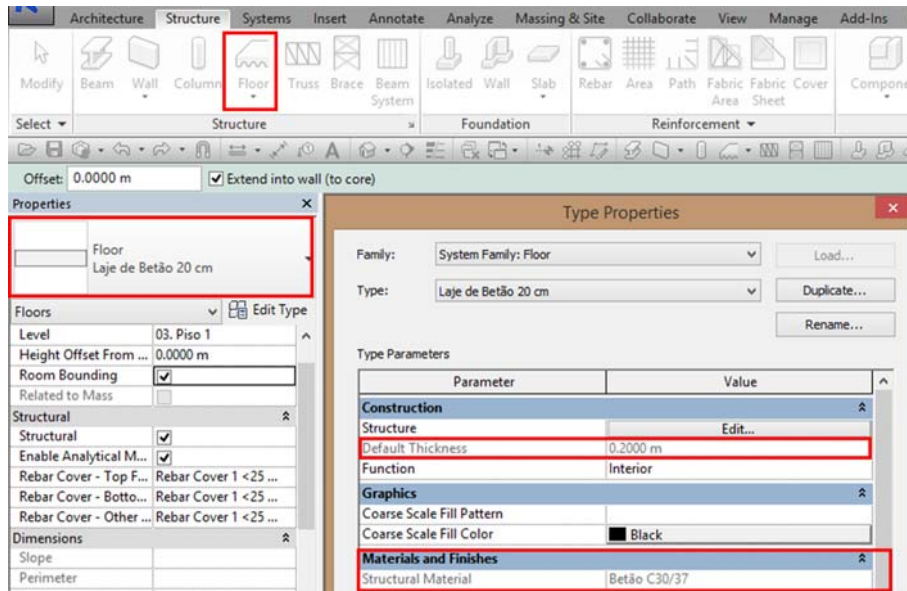


Figura 34 - Quadro de propriedades do elemento laje

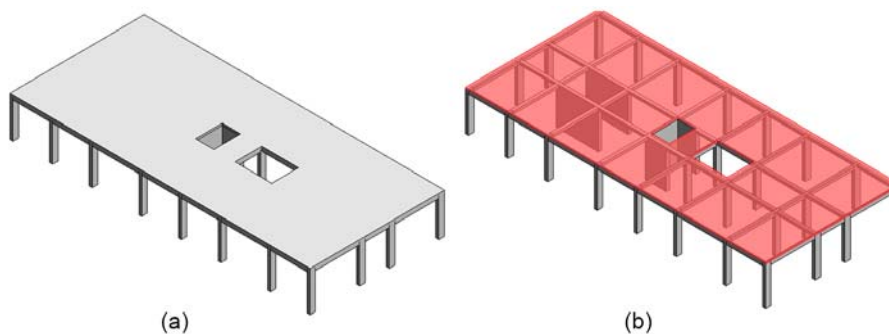


Figura 35 - Projecção axonométrica do modelo 3D

O guia BIM indica que as lajes devem ser modeladas por painel delimitado por vigas, para que ocorra uma transferência de cargas adequada na realização do cálculo estrutural. Indica, contudo, que se a laje for modelada como um elemento único, como se adoptou neste estudo, o modelo deve ser analisado para que se garanta que as cargas são encaminhadas adequadamente.

De forma idêntica à análise anterior, importa averiguar qual o modo de relacionamento, para efeitos de cálculo volumétrico, entre os elementos estruturais já modelados. A figura 36 apresenta a interacção referida, identificando-se a encarnado o elemento vertical (a), as vigas (b) e a laje (c).

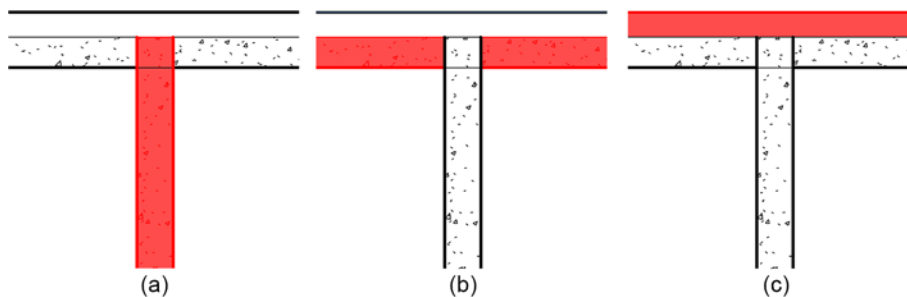


Figura 36 - Interação entre elementos verticais, vigas e lajes

Esta forma de modelação vai implicar que o volume de betão não esteja de acordo com o faseamento construtivo. A área de cofragem lateral, ao nível de cada piso, é dividida nos elementos viga e laje, quando normalmente se considera que a laje apenas tem cofragem inferior. Não sendo o planeamento de construção do edifício alvo de análise deste estudo, apenas são apresentados resultados totais. Assim, optou-se por não realizar qualquer alteração ao modelo. A figura 37 apresenta o modelo computacional criado de acordo com a modelação acima descrita.

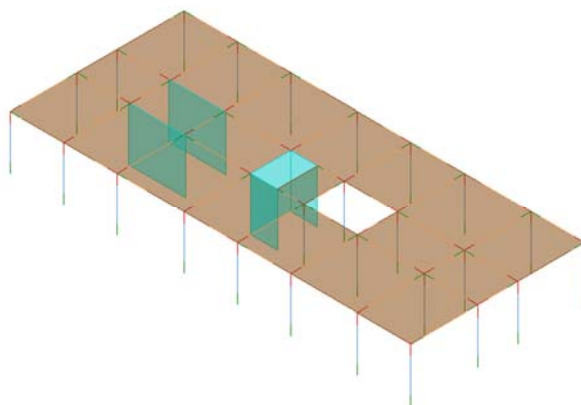


Figura 37 - Modelo computacional gerado

3.3.7. Definição das fundações

As fundações directas foram pré-dimensionadas no trabalho académico. Foram estabelecidas dois tipos de sapatas, de dimensões $1,5 \times 1,5 \times 0,5 \text{ m}^3$ e $6,0 \times 5,0 \times 0,5 \text{ m}^3$. A figura 38 ilustra a distribuição de sapatas considerada.

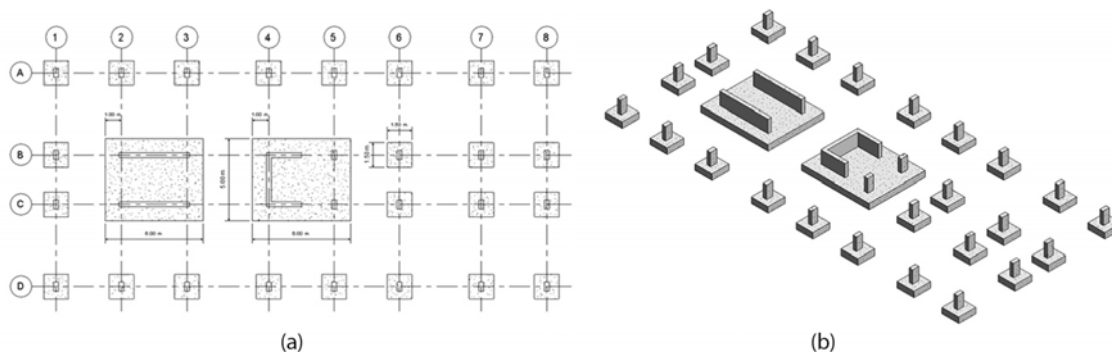


Figura 38 - Distribuição de sapatas: (a) planta de fundações e (b) vista tridimensional

Para se proceder à modelação dos elementos de fundação, optou-se por seleccionar dois tipos de elemento para modelar sapatas: elemento isolado suportando apenas um elemento vertical; elemento ligado a dois ou mais elementos verticais.

Para as primeiras sapatas, selecciona-se o comando *Isolated*, incluído no painel *Foundation* do separador *Structure* (figura 39), escolhe-se o tipo de sapata que se pretende e indica-se o seu posicionamento. Se a modelação para as sapatas rectangulares fosse realizada do mesmo modo, o ponto de inserção do elemento, que corresponde ao ponto médio da sapata, não ficaria relacionado com nenhum elemento vertical. Ficaria assim criado um ponto solto no modelo computacional, que teria de ser eliminado o posteriormente. Optou-se por seleccionar um outro tipo de fundação, neste caso, um ensoleiramento local. É seleccionado o comando *Slab Foundation*, no separador anterior (figura 39) e são definidas as dimensões da sapata 6,0x5,0x0x5 m³.

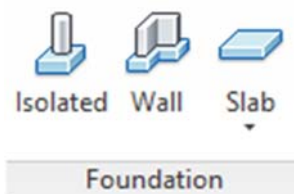


Figura 39 - Separador Foundation

De referir que o elemento sapata isolada não é considerado no modelo computacional de estruturas para a análise estrutural, não acrescentando expressamente condições de apoio ao modelo, mas que no caso de omissão das condições de apoio, quando se realizar a transferência para Robot, será considerado o encastramento dos pilares ligados às sapatas. Por outro lado, o ensoleiramento tem uma expressão analítica do tipo *shell*; como posteriormente irá ser considerado o encastramento total da estrutura, opta-se por desligar na janela de propriedades deste elemento o elemento finito. No capítulo 4, ainda em ambiente Revit, o modelo computacional associado ao modelo BIM, é manipulado de forma a ser acrescentada informação essencial para a realização do cálculo estrutural, como por exemplo, as condições de apoio.

A figura 40 apresenta o quadro relativo às propriedades de uma sapata isolada e a figura 41 apresenta as propriedades referentes ao ensoleiramento localizado.

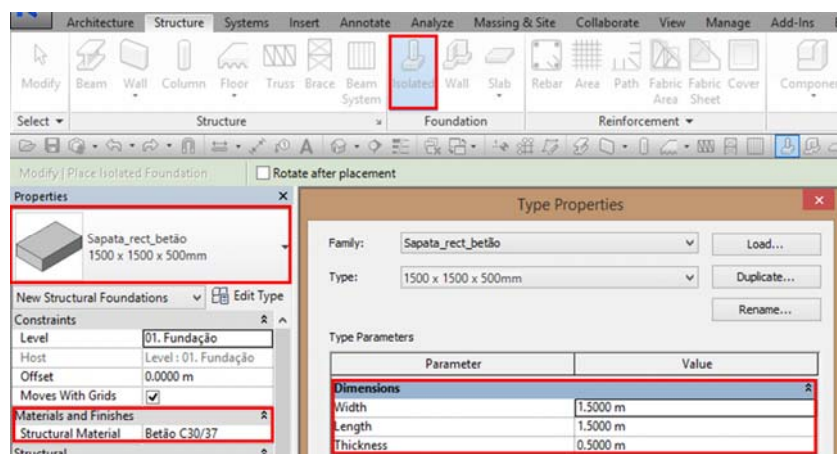


Figura 40 - Inserir e quadro de propriedades de sapatas

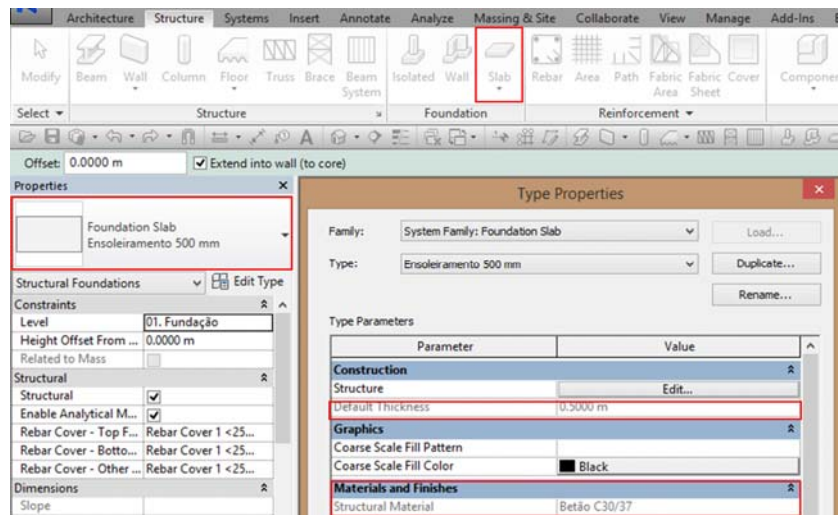


Figura 41 - Inserir e quadro de propriedades de ensoleiramentos

3.3.8. Escadas

Actualmente o programa Revit ainda não disponibiliza o elemento estrutural escadas, podendo-se recorrer ao elemento escadas do separador arquitectura, sem corresponder a um elemento finito. Não se considerou necessária a modelação das escadas nesta fase, visualizando, assim, no modelo de estruturas BIM a correspondente abertura na laje. Frequentemente, a colocação deste tipo de elementos, no modelo computacional, serve apenas para analisar o efeito das escadas nos pilares e/ou paredes em que se apoiam. Assim, o seu dimensionamento é realizado de forma manual inserindo o resultado posteriormente no modelo. Em termos de análise global, será realizada a modelação das escadas como elementos *shell* em ambiente Robot, que servirá para se obter a percepção do efeito das escadas na estrutura.

3.3.9. Modelo geométrico completo

Os restantes níveis do modelo estrutural, de edifícios de 8 pisos, foram criados de um modo idêntico ao descrito nos itens anteriores. A figura 42 ilustra o modelo geométrico final através de perspectiva projecção axonométrica (a), corte vertical (b) e projecção de corte vertical (c). A configuração geométrica do modelo da estrutura está completo, podendo, de seguida, ser manipulado para efeitos de análise estrutural. Esta manipulação será realizada sobre o modelo computacional, resultado da modelação realizada, figura 42 (d).

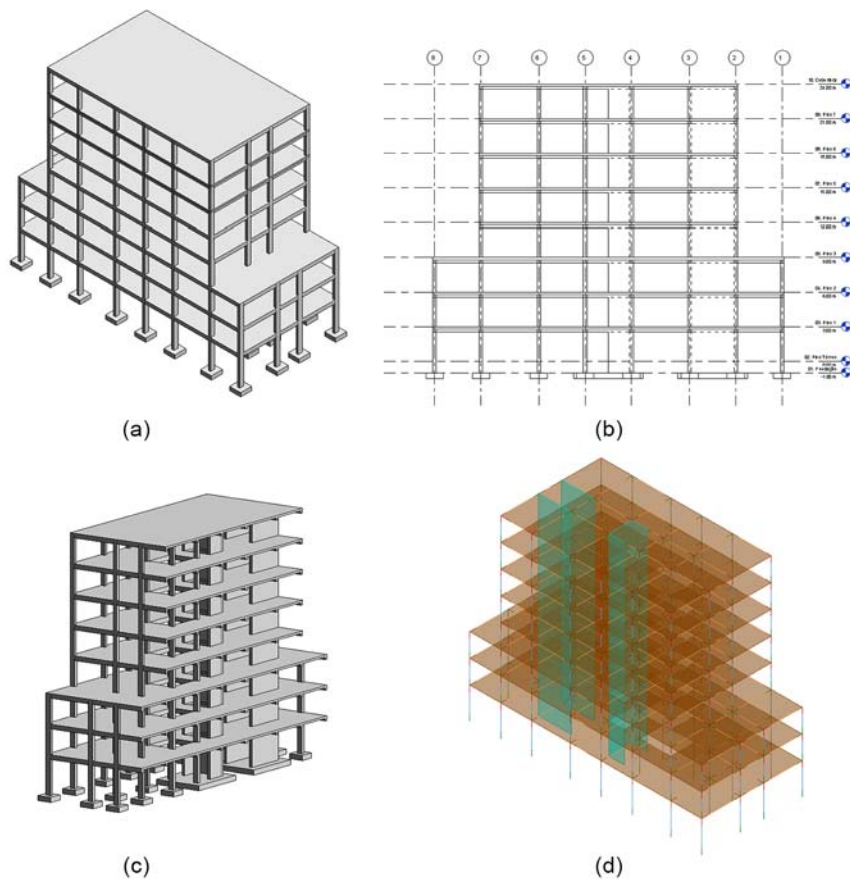


Figura 42 – Modelo geométrico e modelo computacional

3.4. Validação do modelo tridimensional

Para comparação de volume de betão, apresentam-se os cálculos necessários para a obtenção do volume de betão considerando apenas as fundações e os elementos até ao nível do primeiro piso. Admitiu-se o seguinte:

- Os elementos verticais terminam na face inferior das vigas;
- O cálculo do volume da laje considera que a laje é definida pelo perímetro exterior da estrutura;
- Em consequência do ponto anterior, ao volume da viga é retirado a zona de sobreposição com a laje.

$$V_{sapatas} = 24 \times (1,50 \times 1,50 \times 0,50) + 2 \times (6,00 \times 5,00 \times 0,50) = 57,00 \text{ m}^3$$

$$V_{pilares} = 26 \times (0,55 \times 0,30 \times 3,55) + 2 \times (4,30 \times 0,30 \times 3,55) + (2 \times 2,15 \times 0,30 + 2,70 \times 0,30) \times 3,55 = 31,84 \text{ m}^3$$

$$V_{vigas} = 4 \times (0,30 \times 0,25 \times 30,30) + 8 \times (0,30 \times 0,25 \times 12,36) = 16,51 \text{ m}^3$$

$$V_{laje} = 30,30 \times 13,55 \times 0,20 - (2,70 \times 1,85 + 3,70 \times 2,70) \times 0,20 = 79,12 \text{ m}^3$$

$$V_{Total \text{ de Betão}} = 57,00 + 31,84 + 16,51 + 79,12 = 184,47 \text{ m}^3$$

Apresenta-se na tabela 2 uma comparação entre o volume de betão calculado e o volume de betão extraído do modelo Revit. A forma de extrair o volume de betão do modelo Revit é descrito no capítulo 5, no processo de obtenção de mapas de quantidades.

Tabela 2 - Comparação de volume de betão

	Manual	Modelo Revit*
$V_{\text{sapatas}} \text{ [m}^3\text{]}$	57,00	57,00
$V_{\text{elementos verticais}} \text{ [m}^3\text{]}$	31,84	34,08
$V_{\text{vigas}} \text{ [m}^3\text{]}$	16,51	14,26
$V_{\text{laje}} \text{ [m}^3\text{]}$	79,12	79,12
Total [m³]	184,47	184,46

* o método para se obter estes valores será indicado no capítulo 5

A diferença no volume total de betão deve-se a cálculos com valores arredondados, sendo um erro inferior a 0,01%. Se se comparar elemento a elemento, a diferença reside no volume de elementos verticais e de vigas; esta diferença justifica-se com a forma como o programa considera cada um destes elementos, como se ilustrou na figura 26.

(Página em branco)

4. Análise do modelo numérico

A análise estrutural de um edifício é realizada com o recurso a programas computacionais, apoiando o estabelecimento de soluções e o seu pré-dimensionamento e cálculo. Nos gabinetes de projecto são preferentemente utilizados os programas SAP2000 da *Computers & Structures, Inc* e Robot da *Autodesk*.

Para a execução do cálculo estrutural do caso de estudo foi seleccionado o Robot, pois é da mesma empresa de programas que o Revit, e, portanto, é espectável que o fluxo de informação permitida entre as duas ferramentas se desenvolva sem problemas.

O presente capítulo aborda, numa primeira fase, o estudo em detalhe da constituição do modelo computacional, que se obtém automaticamente do modelo estrutural criado como descrito no capítulo anterior. Posteriormente, é efectuada a transferência do modelo do Revit para o programa de cálculo estrutural Robot.

Numa segunda fase, a informação transposta referente ao modelo computacional, é complementada de forma a poder ser efectuada uma análise modal no Robot. É definida uma pormenorização de armaduras para os elementos estruturais e é analisado o processo de transposição desta componente para o modelo BIM.

4.1.O modelo computacional no Revit

A componente de estruturas do sistema Revit permite obter o modelo discretizado do modelo de estruturas criado. A figura 43 ilustra o modelo computacional da estrutura em estudo. O modelo não apresenta erros significativos de carácter geométrico, à excepção das incorrecções referidas no item 3.3.5., os quais são agora alvo de correcção. Verifica-se contudo que o modelo não contém a informação completa e necessária para realizar o cálculo estrutural, assim como as condições de apoio, as cargas e as combinações de acções.

As adaptações e a inserção de dados para o cálculo são efectuadas sobre a representação computacional do modelo, pois não se pretende alterar a sua modelação geométrica, mas apenas as características requeridas no cálculo estrutural. Assim, a inserção de cargas e as condições de apoio são realizadas sob o modelo computacional, no Revit.

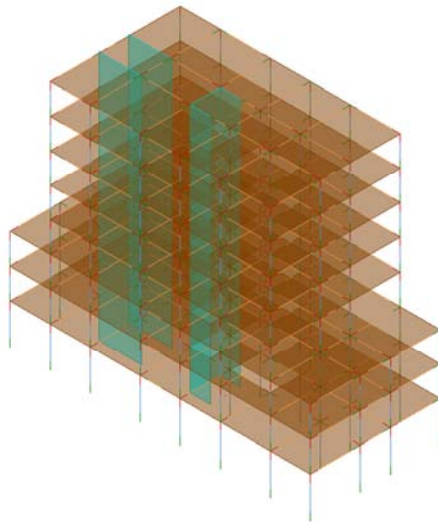


Figura 43 - Modelo computacional da estrutura

4.1.1. Adaptações ao modelo computacional

O elemento finito representativo de uma parede, quando modelado directamente em ambiente Robot ou SAP2000, admite um comprimento que termina no plano vertical do eixo das vigas perpendiculares à parede, sendo uma aproximação corrente no projecto de estruturas. Como demonstrado no item 3.3.5. o Revit não realiza esta mesma aproximação, considerando o comprimento total da parede. O programa Revit permite o ajuste dos elementos *shell* representativos das paredes, realizando esta aproximação, sem alteração do modelo geométrico inicial. Para tal, é seleccionado o comando *Analytical Adjust*, no painel *Analytical Model Tools*, do separador *Analyze*, escolhendo, de seguida, o tipo de acerto a realizar, que neste caso é *Wall Adjustment* (figura 44). A figura 45 apresenta a diferença entre o modelo computacional, gerado através da modelação do capítulo 3, e o modelo após utilização do comando *Wall Adjustment*.

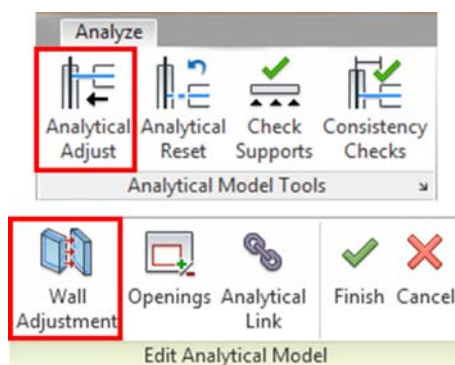


Figura 44 - Alteração ao modelo computacional: elemento parede

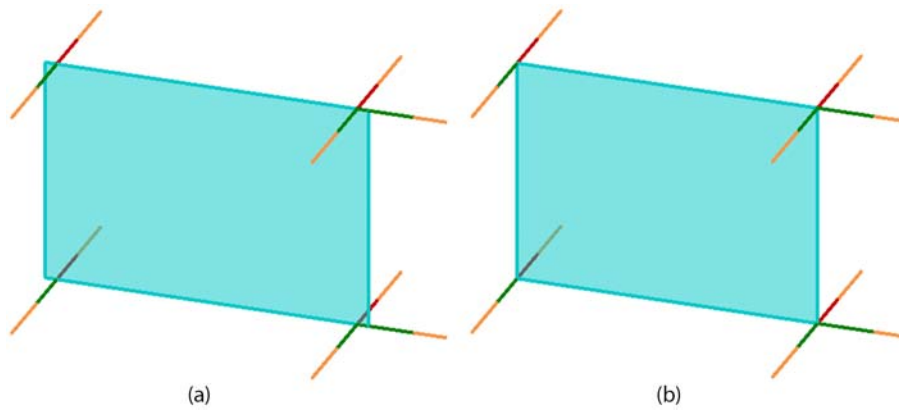


Figura 45 - Pormenor do elemento parede: (a) modelo inicial e (b) após correcção do modelo

Para efeitos de cálculo, o programa admite automaticamente graus de liberdade nas extremidades do elemento linear representativo de uma viga. Não corresponde, portanto, ao usualmente exigido no cálculo de estruturas de betão armado. O modelo computacional é, então, corrigido de forma a serem retiradas as libertações. Para tal, são seleccionadas as vigas do modelo, e através da janela de propriedades, é efectuada a alteração do tipo de libertação nas extremidades para uma situação de encastramento, “fixed”, figura 46.

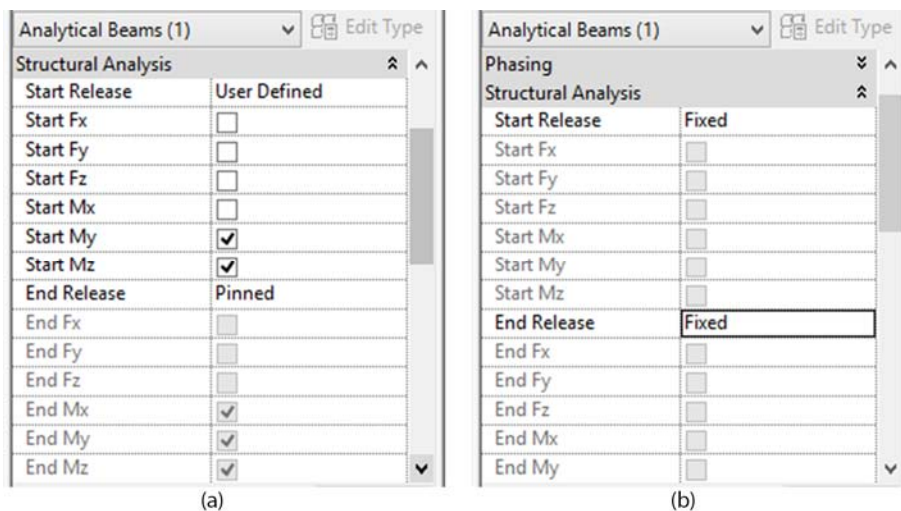


Figura 46 - Alteração das libertações nas extremidades das vigas: situação inicial (a) e após alteração (b)

A modelação das condições de apoio a impor no Revit é adoptada ao praticado no modelo SAP2000, sendo considerada uma situação de encastramento total da estrutura. Como indicado no item 3.3.7., se não fosse definida nenhuma condição de apoio, a transferência de informação do Revit para o Robot iria considerar, por omissão, uma situação de encastramento total para os pilares ligados a sapatas isoladas. Opta-se, porém, por definir explicitamente estas condições de apoio à estrutura, ficando visíveis no modelo computacional. Para tal selecciona-se a opção *Boundary Conditions*, incluída no painel *Boundary Conditions* do separador *Analyze* (figura 47 (a)), e é escolhida o tipo de apoio pretendido (figura 47 (b)). As opções disponíveis, para condições de apoio, são o apoio simples, o apoio com recurso a molas e o encastramento. A figura 48 apresenta o quadro de propriedades relativamente à condição de apoio seleccionada.

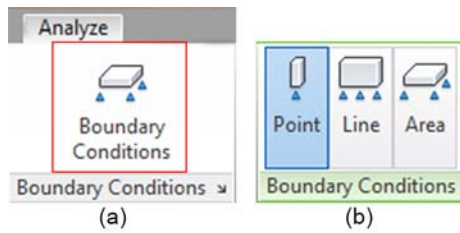


Figura 47 - Inserir condições de apoio

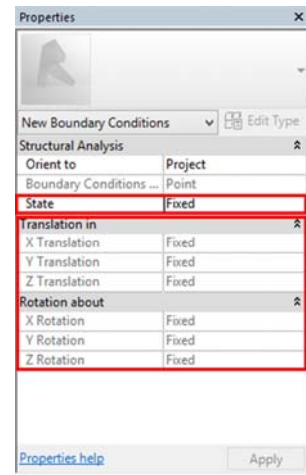


Figura 48 - Quadro de propriedades das condições de apoio

A figura 49 ilustra a diferença no modelo computacional após a introdução das alterações propostas. Este modelo apresenta, ao nível das fundações pontos amarelos, representativos da condição de apoio de encastramento.

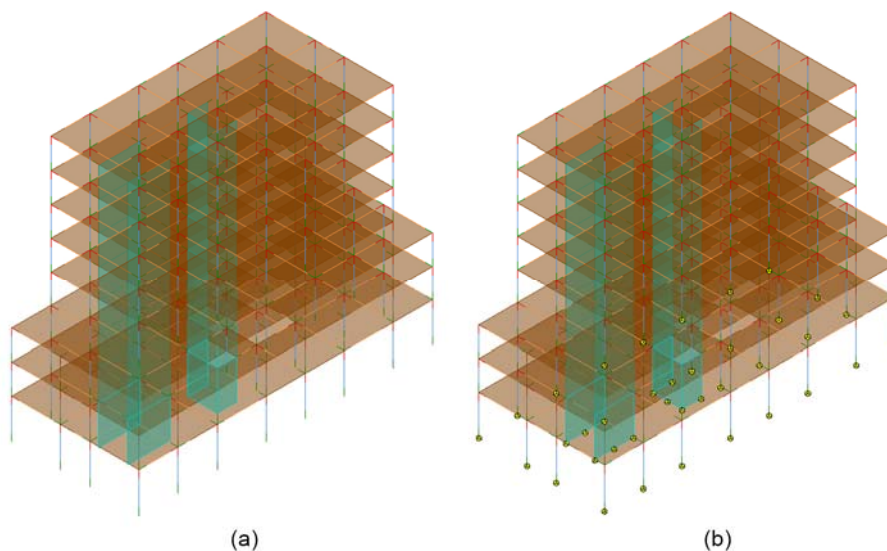


Figura 49 - Modelação das condições de apoio

4.1.2. Definição de acções

As acções a aplicar sobre a estrutura corresponde às acções permanentes e variáveis. É considerado que o peso próprio é obtido automaticamente dos objectos paramétricos com base na sua geometria e peso volúmico do tipo de material. É aplicada uma carga $q_0=2,0 \text{ kN/m}^2$, referido no item 3.3.5. sobre a definição da laje, correspondente exclusivamente às restantes cargas permanentes. As acções variáveis no piso corrente são de $q_0=3,0 \text{ kN/m}^2$, e no terraço, de $q_0=2,0 \text{ kN/m}^2$, de acordo com o referido no ponto 3.1. sobre a caracterização da estrutura.

A figura 50 apresenta o painel *Loads*, do separador *Analyse*, onde se encontram os comandos *Loads*, que permite a selecção do tipo de distribuição de carga (pontual, linear ou superfície); *Load Cases*,

relacionado com a definição de tipo de acções a considerar (acções *dead*, acções *live*, acções sísmicas, entre outras); e o *Load Combinations*, que possibilita a definição das combinações de acções a aplicar na análise estrutural.

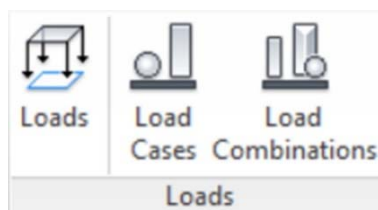


Figura 50 - Painel Loads, separador Analyse

No caso de estudo vão ser aplicados, através do ambiente Revit, quatro casos de carga apresentados na tabela 3 e as duas combinações de acções abaixo listadas.

Tabela 3 - Casos de carga a considerar

Nome	Nº Caso	Natureza	Categoria	qi [kN/m²]
PP	1	Dead	Dead Loads	*
RCP	2	Dead	Dead Loads	2,00
SC_Corrente	3	Live	Live Loads	3,00
SC_Terraço	4	Live	Live Loads	2,00

*O Revit considera automaticamente o peso associado aos elementos estruturais

$$\text{Combinação ELU:SC: } 1,35 \times (PP + RCP) + 1,5 \times (SC_Corrente) + (SC_Terraço)$$

$$\text{Combinação CQP: } PP + RCP + \Psi_{2,Corrente} \times SC_Corrente + \Psi_{2,Terraço} \times SC_Terraço$$

Cria-se o caso de carga referente ao peso próprio, PP, para se poder distinguir, após a análise, os esforços devidos a esta acção. Poderia ter-se definido uma caso de carga referente às cargas permanentes, CP, onde o programa associaria o peso próprio e a restantes cargas permanentes, mas tornaria impossível a distinção entre os dois casos de carga, PP e RCP. As cargas a considerar são: restantes cargas permanentes (RCP); sobrecarga do piso corrente (SC_Corrente); sobrecarga nos terraços (SC_Terraços). As combinações de acções são: combinação de estado limite último (ELU:SC), referente à sobrecarga; combinação quase permanente (CQC). As figuras 51 e 52 apresentam a janela de casos de carga e das combinações efectuadas, respectivamente.

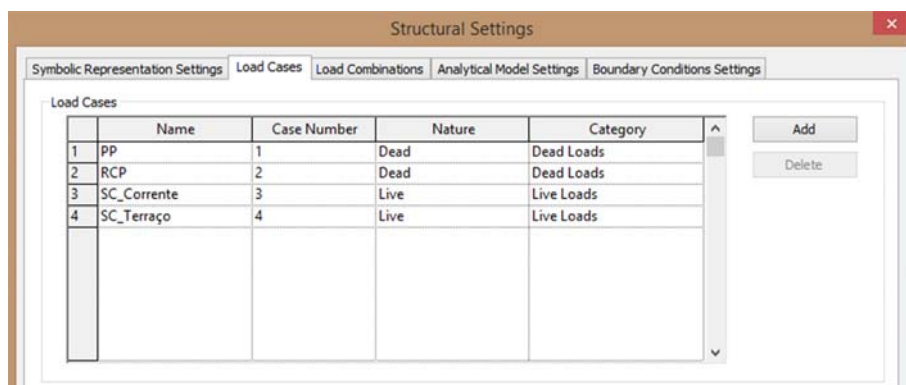


Figura 51 - Janela de propriedades referente a casos de carga

O Revit permite a definição de outros tipos de acções, tais como: acção sísmica, acção do vento, temperatura, entre outras. No caso em estudo, em que se realiza uma análise sísmica, não se define o caso de carga referente à acção sísmica, visto que o programa não permite a definição espectral do sismo de acordo com o Eurocódigo 8. Ficando, assim, um caso de carga por definir no Robot.

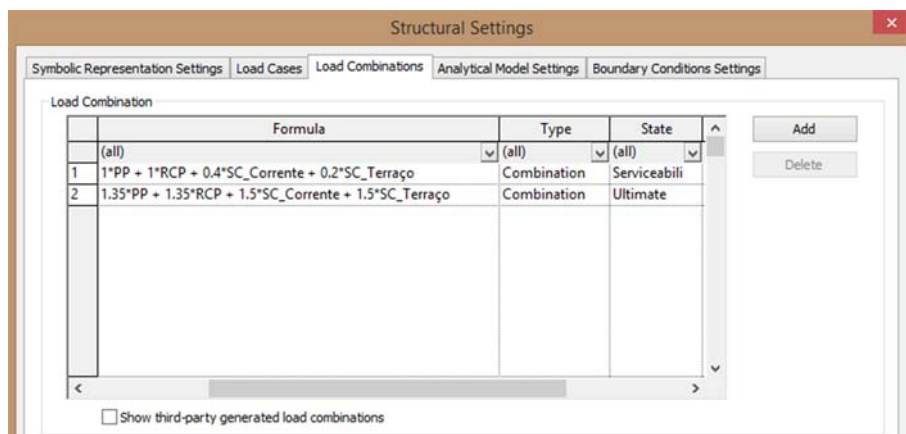


Figura 52 - Janela de propriedades referente a combinações de acções

A aplicação dos valores e tipo de carga e as combinações indicadas são definidas através do comando ilustrado na figura 50. A figura 53 apresenta o modelo computacional resultante onde é visível a representação das cargas introduzidas.

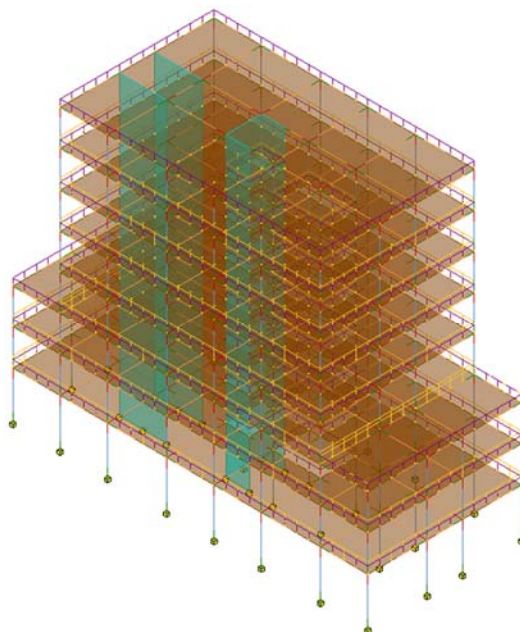


Figura 53 – Modelo computacional com cargas aplicadas

4.2. Transferência do modelo: Revit para o Robot

Após as alterações efectuadas no modelo de cálculo e a aplicação das cargas, considera-se que a estrutura se encontra correctamente modelada, não havendo mais informação passível de ser acrescentada ao modelo no ambiente Revit. De seguida, realiza-se a transferência do modelo computacional para o Robot.

A transposição do modelo para o programa de cálculo é efectuada por recurso a uma aplicação disponibilizada pela Autodesk, *Structural Analysis Toolkit 2015*. No processo de transferência é necessário indicar o caso de carga ao qual se deve associar o peso própria, que neste caso será o caso de carga PP, como indicado anteriormente. O tipo de estrutura em estudo é uma estrutura regular e sem grandes discontinuidades, pelo que a transferência ocorre sem problemas. Assim toda a informação que compõe o modelo computacional é transferida, de um modo correcto, para o modelo Robot:

- Características dos materiais;
- Geometria dos elementos;
- Acções e combinações de acções;
- Condições de apoio.

A figura 54 apresenta os modelos computacionais Revit (a) e Robot (b). Por comparação das imagens é possível verificar que o modo de representação é algo distinto, mas os elementos, cargas e apoios são os mesmos.

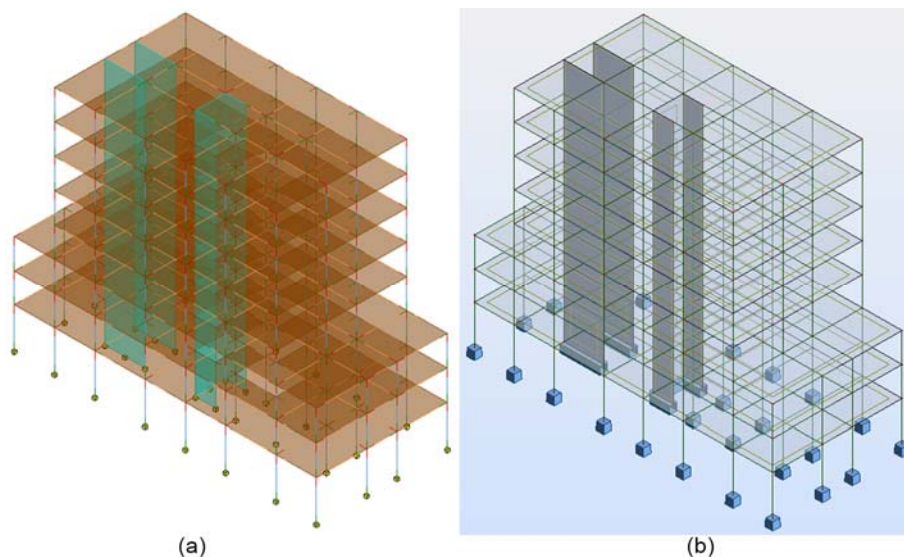


Figura 54 - Modelo computacional: (a) Revit e (b) Robot

4.3. Análise estrutural

Sendo o objectivo principal da presente dissertação a análise da aplicação da metodologia BIM ao projecto de estruturas, e não o seu dimensionamento, opta-se por analisar apenas alguns aspectos referentes à fase de cálculo estrutural:

- Identificar as eventuais incorrecções verificadas no processo de transferência de informação do Revit para o Robot;
- A realização de uma análise modal e a comparação com o caso de estudo didático;
- A transferência de informação entre Robot e Revit, nomeadamente, referente à pormenorização em alguns dos elementos estruturais;

- Pormenorização de elementos estruturais em ambiente Revit.

4.3.1. Validação do modelo computacional

Realizando uma verificação inicial sobre o modelo, a ferramenta de cálculo estrutural apresenta avisos de erro, associados à existência de elementos barra com comprimento nulo e de pontos isolados no modelo. Procedem-se à eliminação directa desses elementos. A verificação final indica que o modelo não apresenta erros nem situações de possíveis incompatibilidades.

Realizou-se de seguida uma validação ao modelo, através da verificação das reacções verticais, para as situações referentes às cargas permanentes, peso próprio e restantes cargas permanentes. A tabela 4 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4 - Reacções verticais aos casos de carga: peso próprio e restantes cargas permanentes

Caso de Carga	$\sum F_{\text{VERTICAIS}} \text{ [kN]}$		Erro
	Revit	Robot	
Peso Próprio	19824,11	21436,33	-8,13%
Restantes cargas permanentes	4948,00	4948,00	0,00%

Analisando a tabela 4, a discrepância de valores relativamente ao peso próprio, deve-se, essencialmente, ao facto de o programa Robot não considerar a sobreposição do volume dos elementos, conduzindo a um volume superior ao real e portanto a um maior peso próprio da estrutura. O valor determinado no Revit para o peso próprio, foi calculado considerando o volume total de betão, à excepção do volume das fundações, referido no capítulo 5. Se for realizado um cálculo manual com base no modelo computacional Robot, chega-se a diferenças muito inferiores devido a questões de arredondamentos, tabela 5.

Tabela 5 - Reacção vertical devido ao peso próprio

Caso de Carga	$\sum F_{\text{VERTICAIS}} \text{ [kN]}$		Erro
	Robot	Manual	
Peso Próprio	21436,33	21466,47	-0,14%

Esta forma de calcular o peso próprio é semelhante ao praticado usualmente pelos projectistas, considerando assim o peso próprio em excesso. Não se considera portanto que haja um erro no modelo, mas uma aproximação. Se for pretendido o valor exacto de volume de betão, deve ser sempre considerado o valor obtido no modelo BIM, visto corresponder ao valor exacto de volume de betão.

4.3.2. Alterações efectuadas em ambiente Robot

Foram realizadas ainda mais duas alterações ao modelo Robot. Foi efectuada a modelação do elemento escadas, de modo a ser considerado o seu efeito sobre os pilares adjacentes às escadas. Foi aplicada uma redução A segunda alteração foi a redução do momento de inércia em 50% segundo os eixos y e x, de forma a considerar a fendilhação do betão, de acordo com Eurocódigo 8, 7.1.2 (2). Considera-se, ainda, que o efeito de torção nos elementos viga e coluna são desprezáveis e, portanto,

o momento segundo o eixo z é reduzido para um valor próximo de zero. A figura 55 apresenta o modelo com as escadas modeladas.

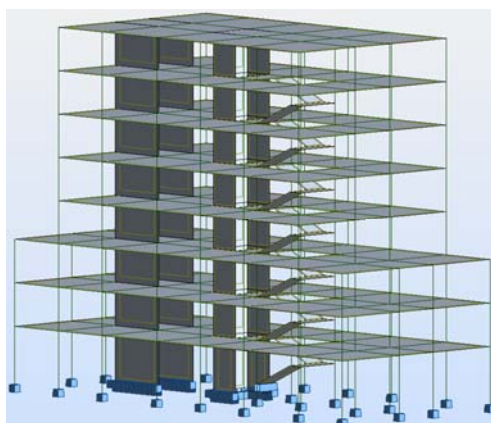


Figura 55 - Modelo com escadas

4.3.3. Análise modal e validação do modelo computacional

A análise modal efectuada no Robot sobre o modelo computacional acima validado, permite obter resultados comparáveis com os valores determinados no trabalho académico, executado no SAP2000. A tabela 6 apresenta os valores de período e de frequência da estrutura obtidos para os seis primeiros modos de vibração.

Tabela 6 - Períodos e frequências para cada modo de vibração (Robot)

Modo	Período [s]	Frequência [Hz]
Modo 1	0,987	1,013
Modo 2	0,833	1,201
Modo 3	0,746	1,340
Modo 4	0,416	2,403
Modo 5	0,322	3,106
Modo 6	0,268	3,729

A tabela 7 lista os valores obtidos para os seis primeiros modos na análise modal, efectuada nos dois sistemas. Observa-se que os valores do período, para os modos de vibração apresentados, são inferiores no Robot.

Tabela 7 - Comparação dos valores obtidos da análise modal

Modo	Período [s]		
	Robot	SAP2000	Δ
Modo 1	0,987	1,075	-0,088
Modo 2	0,833	1,036	-0,203
Modo 3	0,746	0,858	-0,112
Modo 4	0,416	0,400	0,016
Modo 5	0,322	0,301	0,021
Modo 6	0,268	0,230	0,038

Isto acontece devido à forma de modelação dos elementos representativos de parede estrutural. No trabalho académico o elemento parede foi modelado como elemento barra, e na presente dissertação, o mesmo elemento, foi modelado enquanto elemento *Shell*, conferindo assim uma maior rigidez à estrutura. De modo a comprovar esta situação, foi realizada uma análise comparativa entre os dois programas, Robot e SAP2000 realizando uma modelação de uma parede de secção de 4,00 metros de largura e 0,30 metros de espessura e uma altura de 10,00 metros. No SAP2000 foi realizada a modelação recorrendo a elementos barra e no Robot foi realizada recorrendo a elementos *shell* e barra. Importa referir que os parâmetros da análise modal utilizados no trabalho académico foram os pré-definidos pelo programa, que serão diferentes dos parâmetros no Robot, obtendo assim resultados diferentes. Serão efectuadas duas análises no programa Robot, em que se altera os parâmetros da análise modal, sendo que a análise utilizada para a obtenção dos resultados da tabela 6 foi a análise 1.

A tabela 8 apresenta os períodos para a análise efectuada comprovando que os parâmetros da análise modal influenciam os resultados obtidos e que para alguns tipos de análise a utilização do elemento *shell* para modelação, introduz uma maior rigidez na estrutura, levando assim a uma menor diminuição do período.

Tabela 8 - Comparação do valor do período para o primeiro modo de vibração

Programa	Análise	Tipo de Elemento	Período [s]
Robot	1	Shell	0,55
Robot	1	Barra	0,55
Robot	2	Shell	0,78
Robot	2	Barra	1,13
SAP2000	-	Barra	0,81

A análise modal demonstra também que os modos não apresentam uma participação da massa superior a 90%, como é exigido no Eurocódigo 8, no ponto 4.3.3.3.1 (3). No âmbito do presente trabalho dirigido à análise da metodologia BIM no projecto de estruturas e não ao realizar um dimensionamento detalhado da estrutura, não se considera relevante que a participação da massa não seja superior a 90%.

Considera-se que o modelo computacional encontra-se preparado para realizar análise a outras situações de carga, isto se se pretendesse efectuar um projecto de estabilidade.

4.4. Actualização do modelo: Robot para o Revit

Simulando uma acção sísmica no modelo, seria possível a obtenção de esforços e de armaduras para os elementos estruturais. Não se considera necessário, no âmbito da presente dissertação, realizar uma análise exaustiva a esta situação. Simulou-se uma acção sísmica para obtenção de esforços e de armaduras em ambiente Robot, e de seguida analisar o fluxo de informação entre Robot e Revit.

O comando utilizado para transferir a informação de Revit para Robot, é novamente accionado para a execução de transferência no sentido inverso. Neste processo, as alterações efectuadas sobre o

modelo Robot são transferidas para o Revit. A figura 56 ilustra uma projecção do resultado da actualização do modelo.

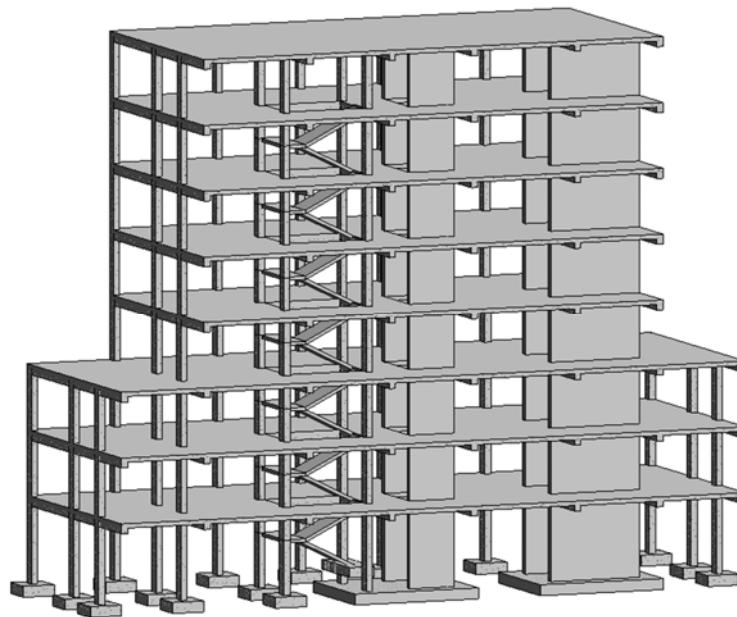
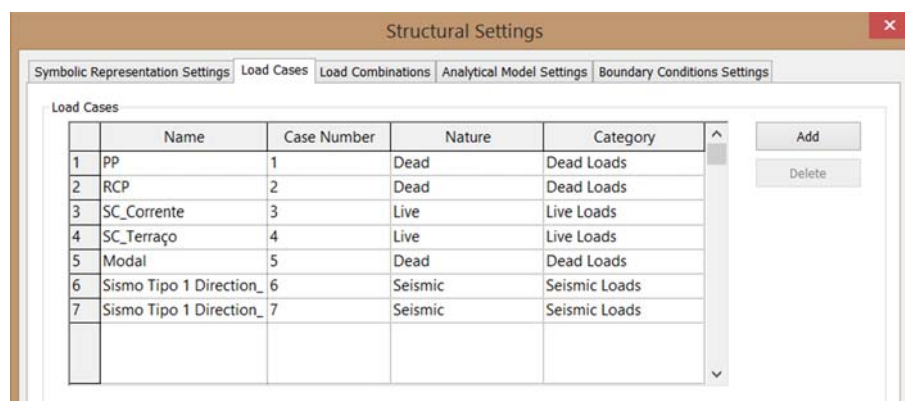


Figura 56 - Modelo BIM actualizado com informação do Robot

Como resultado da modelação das escadas em ambiente Robot, com a actualização, o programa cria estes elementos como elementos laje, tal como modelado no Robot, o que não corresponde à forma geométrica deste tipo de elementos. Os pilares adjacentes ao patim das escadas encontram-se agora divididos em dois, porque no modelo Robot dividiu-se para haver uma ligação entre o patim e os mesmos. Também se observa a criação de uma sapata ao nível inferior da escada, porque foi considerado que aquele elemento se encontrava encastrado, no nível inferior.

Também ocorreu uma actualização ao nível dos casos de carga (figura 57) em que houve a inserção dos casos de carga referentes à análise modal e sísmica nas duas direcções. Por outro lado, não ocorreu nenhuma alteração ao nível das combinações de acções.



	Name	Case Number	Nature	Category		Add	Delete
1	PP	1	Dead	Dead Loads	^		
2	RCP	2	Dead	Dead Loads			
3	SC_Corrente	3	Live	Live Loads			
4	SC_Terraço	4	Live	Live Loads			
5	Modal	5	Dead	Dead Loads			
6	Sismo Tipo 1 Direction_	6	Seismic	Seismic Loads			
7	Sismo Tipo 1 Direction_	7	Seismic	Seismic Loads	v		

Figura 57 - Casos de carga após actualização

Como indicado no ponto anterior, foram definidas as armaduras no Robot. A informação referente às armaduras é transferida para o modelo Revit. Mas, neste processo, apenas as armaduras dos elementos viga e pilar são transpostos com sucesso. Verifica-se que os restantes elementos, ou não

ocorre a transposição de informação ou esta acontece com erros. A figura 58 apresenta o resultado da actualização do modelo, após realização do primeiro processo de definição da armadura em Robot, em que o pilar contém a informação referente à armadura que necessita; por outro lado, a figura 59 apresenta o resultado do segundo processo, em que o programa reconhece a armadura definida no Robot, de referir que a solução de armaduras apresentada nesta figura provêm de um processo automático.

Position	Required reinforcement along b edge	Required reinforcement along h edge	Parametric reinforcement along b edge	Parametric reinforcement along h edge
1	0.31 cm ²	1.34 cm ²	0.57 cm ²	0.57 cm ²
2	0.31 cm ²	1.34 cm ²	0.57 cm ²	0.57 cm ²

Figura 58 - Informação referente à armadura necessária de um pilar

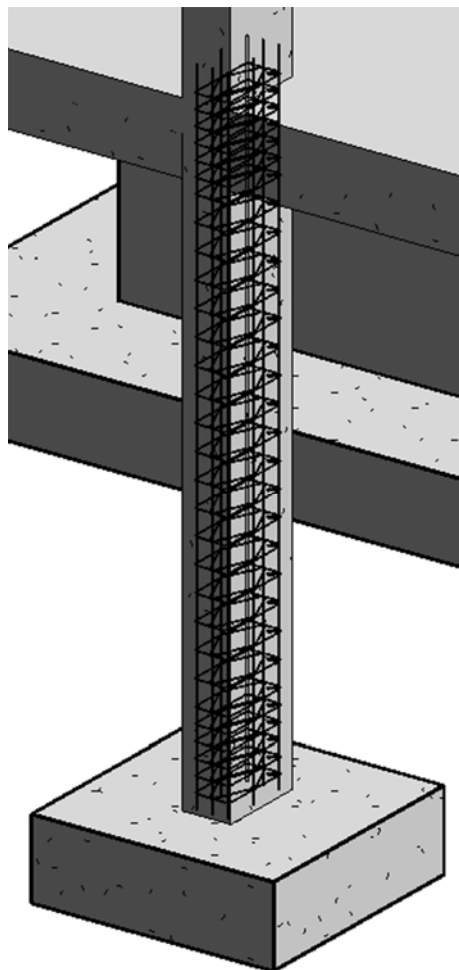


Figura 59 - Pilar após actualização, segundo processo

Optou-se por não se realizar a actualização do modelo Revit, mas definir a armadura manualmente directamente no Revit. São evitados, assim, possíveis erros provenientes da actualização a partir do modelo Robot, como por exemplo as escadas, e permite um maior controlo sobre a pormenorização de armaduras.

4.5. Definição de armaduras em Revit

A definição das armaduras, recorrendo à instalação do programa Revit original, não é intuitiva e requer bastante trabalho, mas a *Autodesk* disponibiliza aos utilizadores, subscritores e estudantes, um conjunto de extensões que inclui uma ferramenta de utilização fácil para a colocação das armaduras nos elementos estruturais. Recorre-se assim a esta extensão, *Revit Extensions*, para a demonstração de algumas capacidades da ferramenta, na definição e pormenorização de armadura, para a consequente obtenção de tabela de quantidade e peças desenhadas.

No âmbito da presente dissertação foi testado o grau de pormenorização que é possível efectuar em ambiente Revit. A *Autodesk* dispõe, actualmente, de duas ferramentas, com ligação ao Revit, indicadas para pormenorização de armaduras: o *AutoCAD Structural Detailing (ASD)* é um programa que foi recentemente descontinuado, mas com utilização ainda corrente em vários gabinetes de engenharia; e o *Advance Concrete* que é referido como o mais adequado ao trabalho BIM e tem vindo a ter uma crescente aceitação.

No exemplo que a seguir se apresenta, importa referir que as armaduras a pormenorizar na estrutura não resultam de um cálculo estrutural. Assume-se assim, a título de ilustração da metodologia de pormenorização, uma definição de armadura genérica para cada elemento estrutural. Não se realiza a definição da armadura para todos os elementos estruturais, visto este ser um processo que incrementa exponencialmente a quantidade de informação, levando o modelo a ficar muito lento. Apresentam-se, de seguida, as soluções estruturais admitidas para cada um dos elementos a analisar:

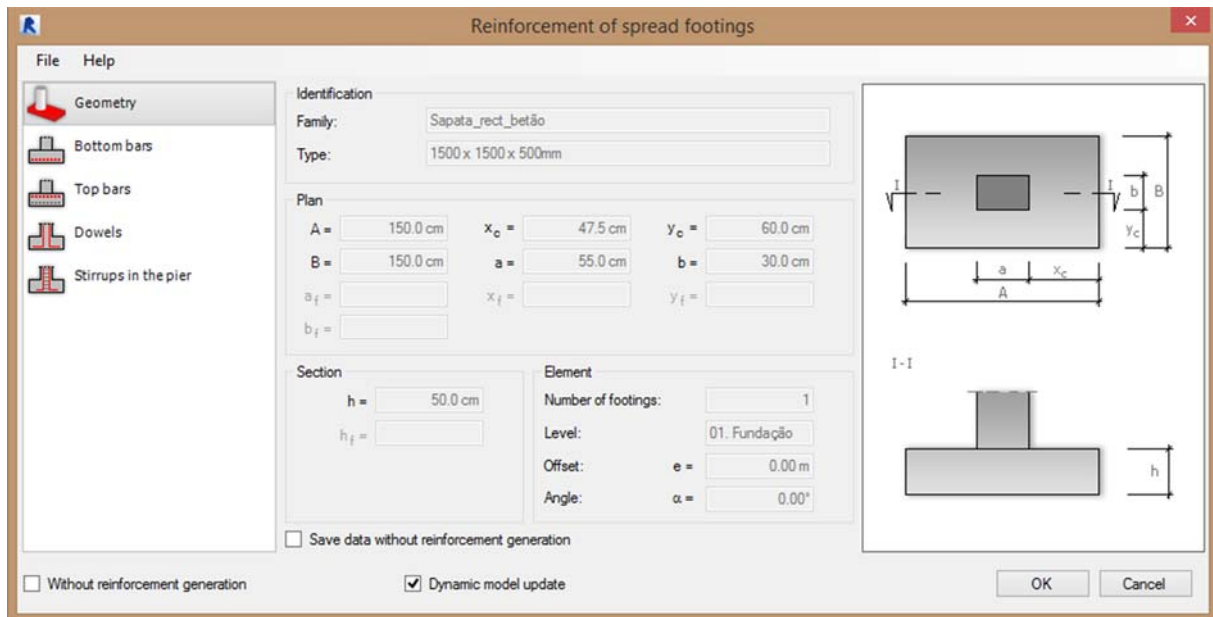
- Sapatas: malha $\Phi 16//0,15$ na face inferior da sapata e uma malha $\Phi 10//0,15$ na face superior;
- Pilar: armadura principal de $6\Phi 16$ e cintas $\Phi 8//0,25$;
- Viga: armadura inferior de $4\Phi 20$, armadura superior de $2\Phi 20$ e estribos $\Phi 8//0,15$;
- Laje: malha $\Phi 12//0,20$ nas duas faces

A definição de armaduras adoptada para os elementos estruturais considerados, utilizando a aplicação *Revit Extensions*, é realizada elemento a elemento. É possível definir a armadura para mais do que um elemento, na situação em que os elementos pertençam à mesma família (sapatas, pilares, vigas) e se a dimensão da sua secção for idêntica.

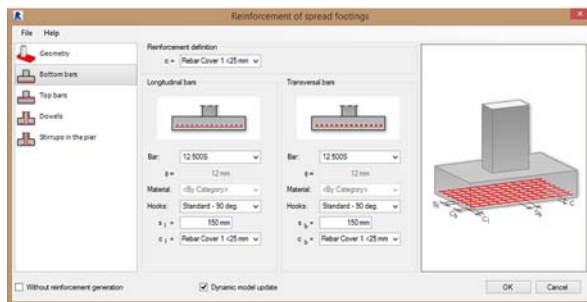
4.5.1. Armadura da sapata

Para a colocação de armadura, selecciona-se uma sapata do modelo, neste caso a sapata presente no alinhamento D-5, e utiliza-se o comando *Reinforcement* presente no separador *Revit Extensions*. A

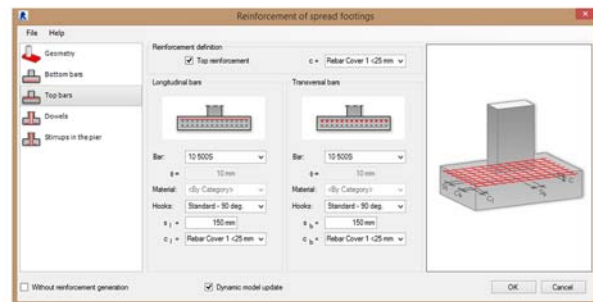
figura 60 ilustra as várias janelas de propriedades deste comando para a definição de armaduras para sapatas isoladas.



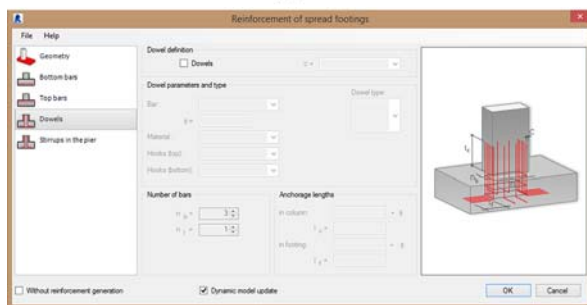
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 60 – Janelas de propriedades para definição de armaduras em sapatas isoladas

A primeira janela (a) apresenta as propriedades geométricas do elemento estrutural, não admitindo qualquer alteração. A segunda e terceira janelas, (b) e (c), referem-se à inserção das armaduras inferiores e superiores, respectivamente. Neste caso é possível definir varões de diâmetros diferentes para cada uma das direcções, espaçamento entre varões, recobrimentos e definição do método de amarração de armaduras, neste caso prolongamento curvo (gancho), sendo o comprimento do prolongamento definido automaticamente, através da multiplicação do diâmetro dos varões por um coeficiente definido pelo utilizador. As duas últimas janelas referem-se à armadura de espera para o

pilar, isto é, à armadura de continuidade. Neste caso, esta armadura não é aplicada pois, usualmente, em Portugal a armadura de espera é considerada como sendo a armadura principal do pilar.

A figura 61 ilustra as opções assumidas para definição da armadura; idênticas considerações foram admitidas para a definição da armadura superior.

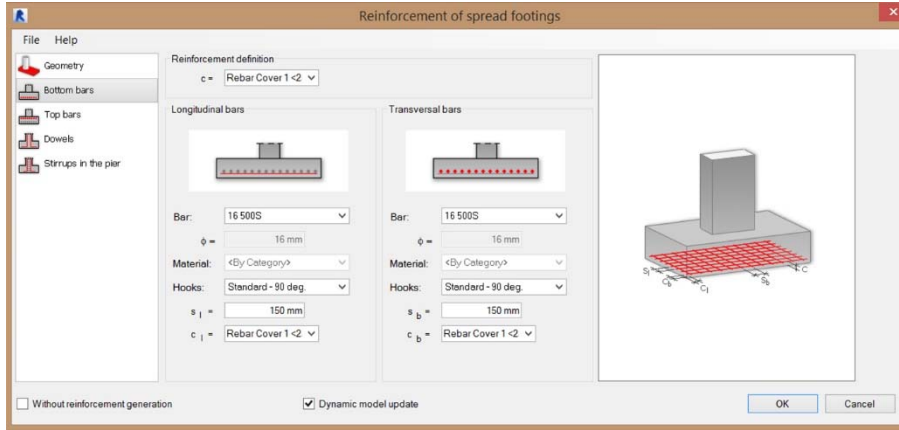


Figura 61 - Armadura inferior da sapata

A figura 62 ilustra uma projecção axonométrica do resultado das opções tomadas relativamente à definição de armadura. A figura 63 apresenta um detalhe da pormenorização.

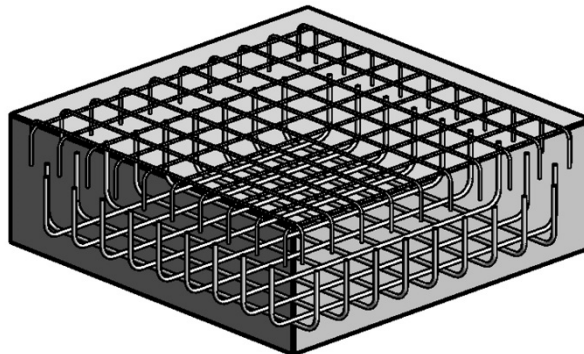


Figura 62 - Armadura de uma fundação directa

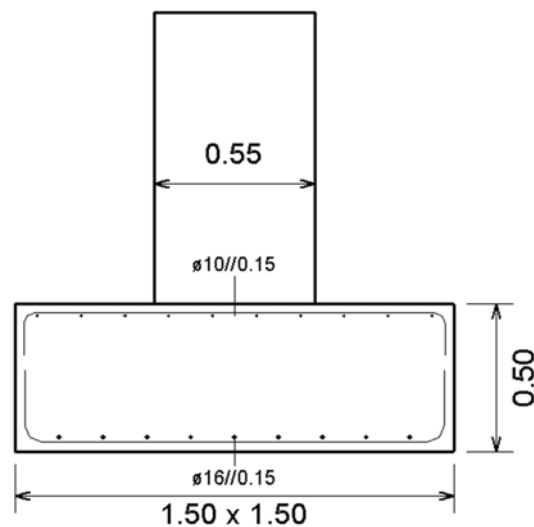
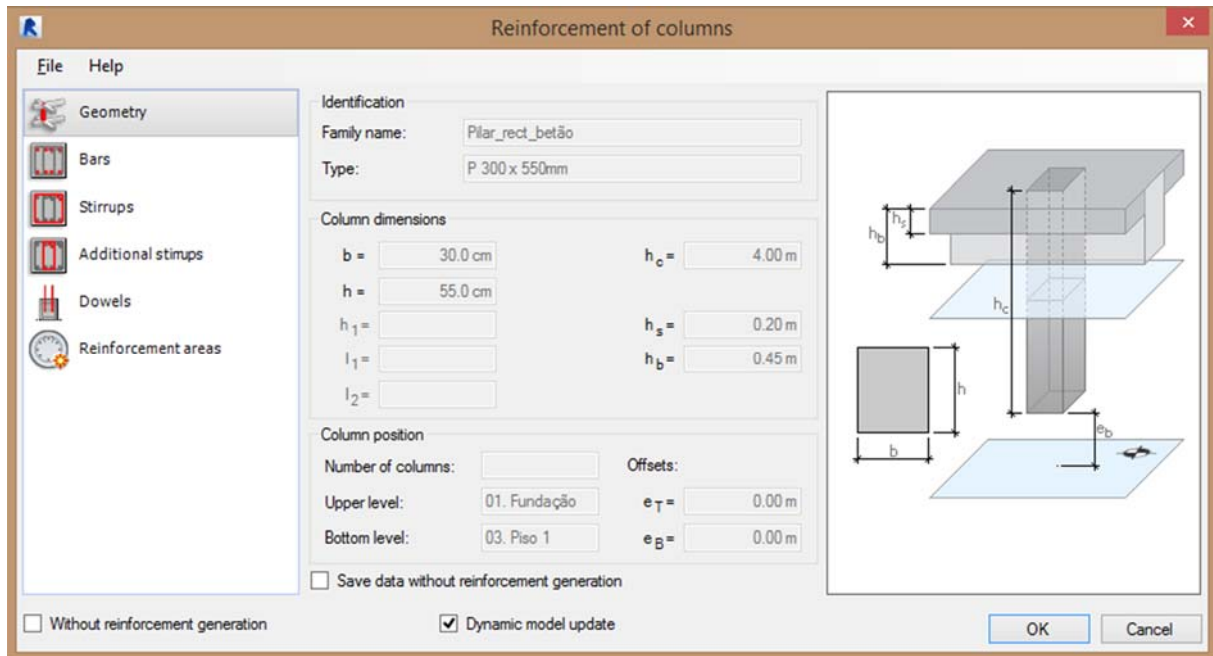


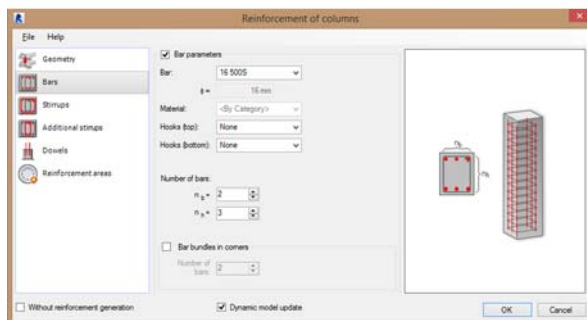
Figura 63 - Pormenorização de uma fundação

4.5.2. Armadura do pilar

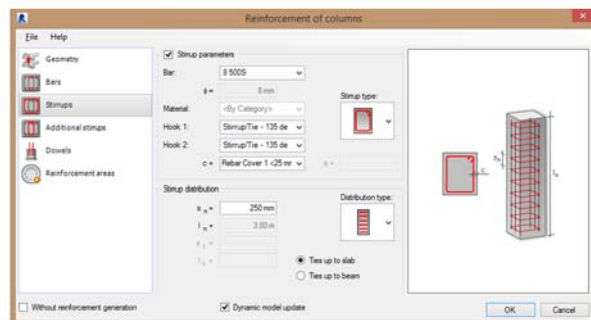
Seleccionando um pilar do modelo, neste caso do alinhamento D-5, no qual se pretende inserir a armadura, é seleccionado novamente o comando *Reinforcement*. Ilustra-se na figura 64 o processo de colocação de armaduras.



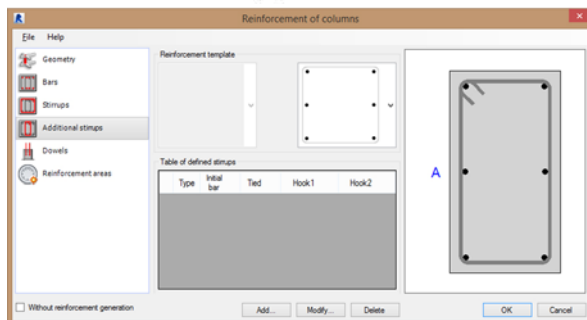
(a)



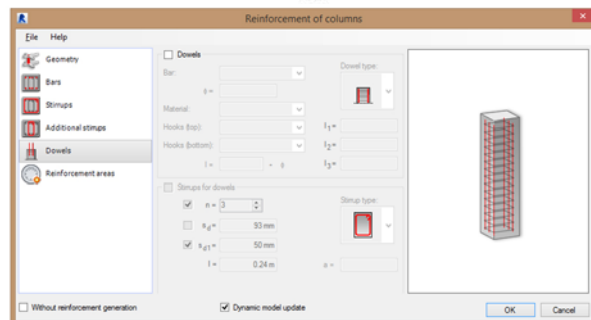
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 64 - Janelas de propriedades para definição de armaduras em pilares

A primeira janela apresenta as características do pilar, figura 64 (a). A figura 64 (b) ilustra a colocação da armadura principal, começando por se definir o tipo de varão que se pretende inserir, através do seu diâmetro e material. Permite, ainda, seleccionar a forma como os varões devem terminar no topo e na base do pilar, qual a distribuição de varões na secção e qual o número máximo de varões a agrupar.

Esta aplicação, não permite, contudo, colocar varões de diâmetros diferentes, devendo se necessário, estes varões serem colocados posteriormente de um modo manual. Esta metodologia apresenta uma limitação referente à incapacidade de se poder definir onde os varões começam, isto é, qual a cota de início. O programa assume sempre que os varões começam na face inferior do pilar.

De seguida é definida a armadura transversal, como se ilustra na figura 64 (c) e (d). O utilizador indica o diâmetro das cintas, o tipo de cinta e sua distribuição ao longo do pilar (espaçamento e tipo de distribuição), assim como o ponto onde terminam as cintas, se na fase inferior da viga ou da laje (surge de novo a questão do entendimento do programa em relação aos elementos estruturais, já analisado no capítulo 3). A figura 64 (e) propõe ao utilizador a inserção de armadura de espera, correspondendo ao prolongamento da armadura principal, num comprimento igual ao produto entre o diâmetro dos varões e um coeficiente definido pelo utilizador. No entanto, o que acontece normalmente é que a interrupção dos varões é efectuada a meia altura dos pilares, não estando assim de acordo com o que é permitido pelo programa. Assim, optou-se por não se considerar a armadura de espera para pilares.

As figuras 65 e 66 ilustram as janelas referentes à definição de armaduras indicadas anteriormente para um pilar.

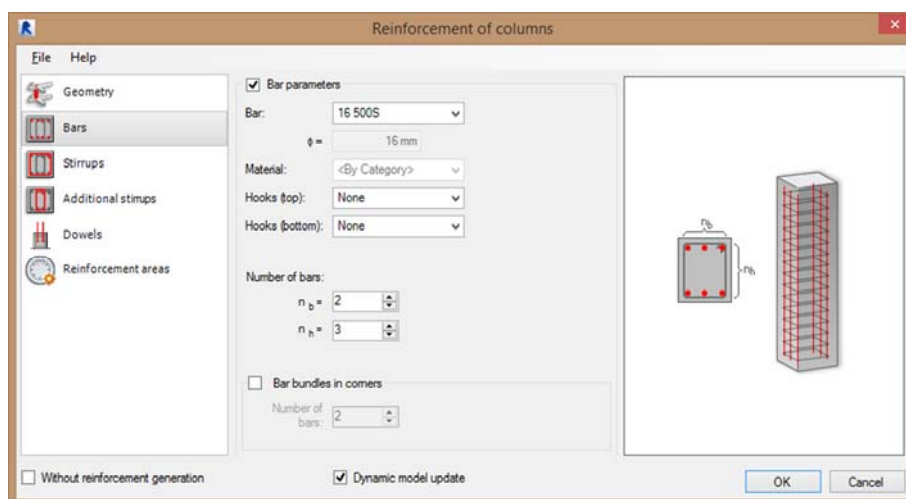


Figura 65 - Definição da armadura principal de um pilar

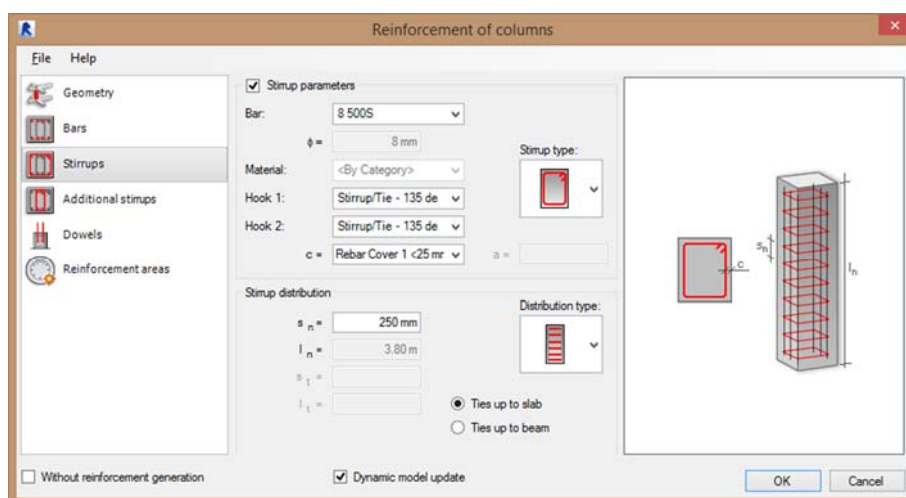


Figura 66 - Definição das cintas de um pilar

Apresenta-se na figura 67 uma projecção do modelo tridimensional do resultado das opções aplicadas à definição de armaduras. A figura 68 ilustra um corte efectuado sobre o mesmo pilar. A etiquetagem do desenho é efectuada automaticamente, mas observa-se que a colocação de legendas referentes à armadura principal é deficiente, pois apenas 1 varão é identificado. Verifica-se ainda que não existe continuidade entre os varões do pilar inferior e os varões do pilar superior. A continuidade que poderia ser estabelecida com a armadura de espera referida, mas deste modo haveria duplicação da armadura. O aspecto dos desenhos e seu detalhe pode ainda ser mais controlado de forma a melhorar a sua apresentação, mais próximo do que normalmente é executado num projecto.

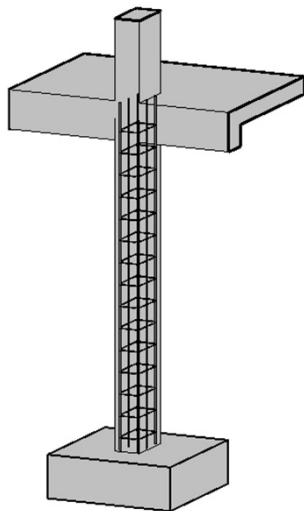


Figura 67 - Armaduras de um pilar

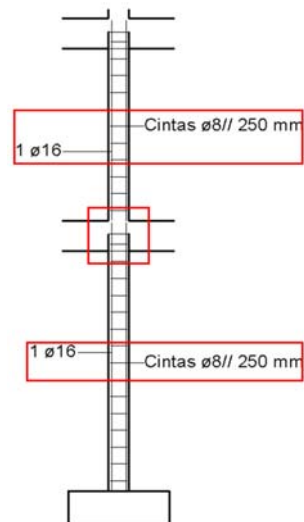


Figura 68 - Pormenorização da armadura

Como indicado no início do presente subcapítulo, a Autodesk dispõe de outro tipo de ferramentas capazes de realizar a pormenorização de elementos estruturais. É assim possível realizar a transferência de informação, elemento a elemento, entre o Revit e o Autocad Structural Detailing, possibilitando assim uma total manipulação dos pormenores, possibilitando ao projectista a obtenção de desenhos de acordo com o pretendido. Esta transferência elemento a elemento, impossibilita a capacidade de pormenorizar, por exemplo, os pilares na sua altura total, obviamente, sendo um ficheiro Autocad que é possível, posteriormente, a união entre todos os ficheiros. A figura 69 apresenta o resultado da transferência de informação entre o Revit e o Autocad Structural Detailing, em que é gerado automaticamente cortes e cotagem do elemento.

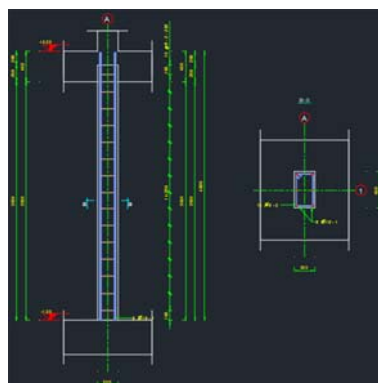


Figura 69 - Resultado da transferência para Autocad Structural Detailing

4.5.4. Armadura de viga

A pormenorização de uma viga estrutural requer ainda, uma maior atenção. Na definição de armaduras, considerar-se, usualmente, uma viga contínua com n vãos. Contudo, de acordo com a modelação efectuada no caso de estudo (como descrito no item 3.3.5.) e o modo de operação do programa *Revit Extensions*, apenas é permitida a colocação de armadura viga a viga. Apresenta-se na figura 70 a janela de propriedades geométricas da viga.

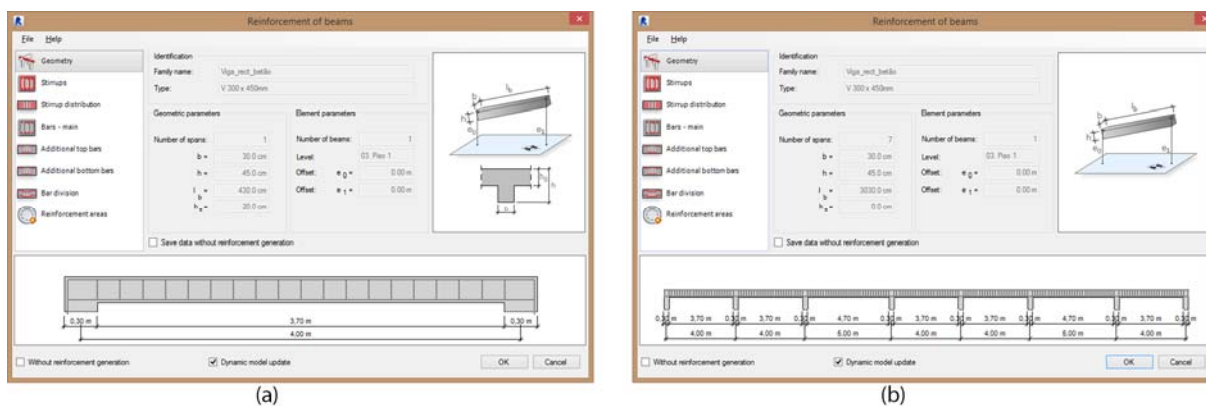
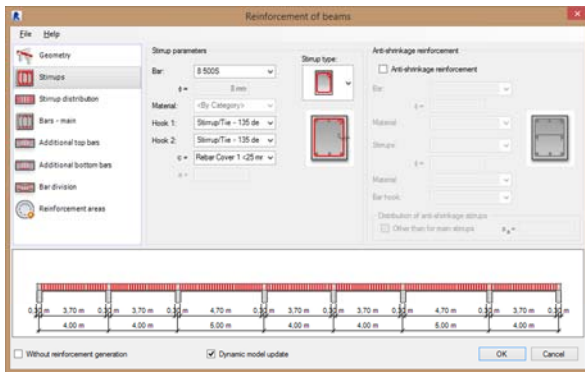


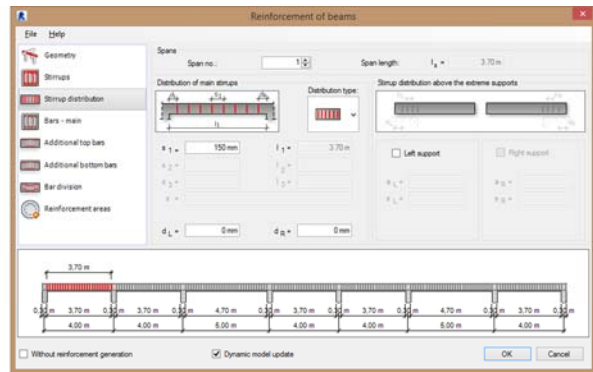
Figura 70 - Janela de propriedades geométricas de uma viga estrutural

A figura 70 (a) ilustra a janela de propriedades obtida com a modelação aplicada, em que se observa que o programa considera as vigas como elementos simplesmente apoiados. Na figura 70 (b), a janela de propriedades apresenta uma viga contínua com n vãos, como se pretende para efeitos de definição de armaduras. Contudo, para se obter directamente esta solução, teria que se alterar o modo de efectuar a modelação das vigas proposto. Ou seja, em vez de se modelar cada elemento entre pilares, deveria modelar-se uma viga contínua. No entanto, este outro procedimento conduziria à necessidade de um maior cuidado na fase de análise ao modelo computacional, nomeadamente ao nível do comprimento de encurvadura. Propõe-se, como modo de ultrapassar este problema, considerar a viga com um comprimento total, sendo posteriormente divididos os elementos barra no programa *Robot* por cada vão.

Para a definição de armaduras nas vigas, admite-se uma situação do tipo da figura 70 (b). Apresentam-se na figura 71 as restantes janelas de propriedades referentes a elemento viga. As janelas de propriedades apresentadas nas figuras 71 (a) e (b) destinam-se à definição dos estribos, com a indicação do diâmetro e tipo dos estribos, do recobrimento e da distribuição dos elementos em cada vão da viga. As restantes janelas apresentadas na figura 71 referem-se à definição de armadura principal. A figura 71 (c) identifica a armadura principal, junto às superfícies superior e inferior e dispostas ao longo do teu comprimento total. A figura 71 (d) e (e) ilustram o reforço das armaduras superior e inferior, respectivamente, em cada vão. Por último, através da interface da figura 71 (f) é possibilitado o estabelecimento do comprimento máximo de cada varão e os comprimentos de emenda.



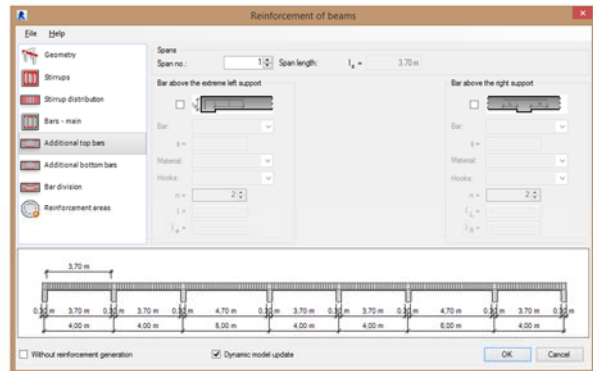
(a)



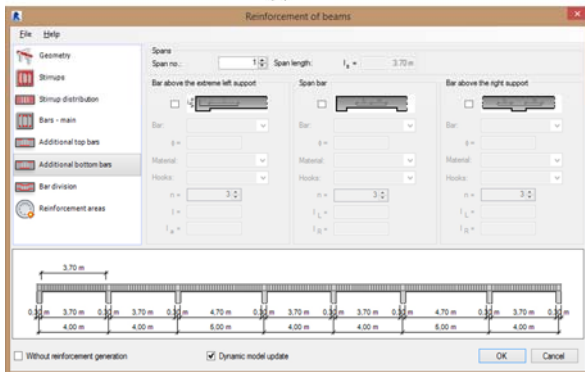
(b)



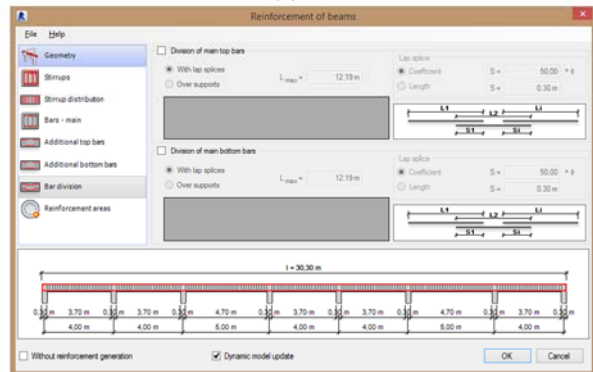
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 71 - Janelas de propriedades para definição de armaduras em vigas

Ilustra-se na figura 72 e seguintes as opções assumidas para a definição de armaduras referente à solução estrutural da viga analisada.

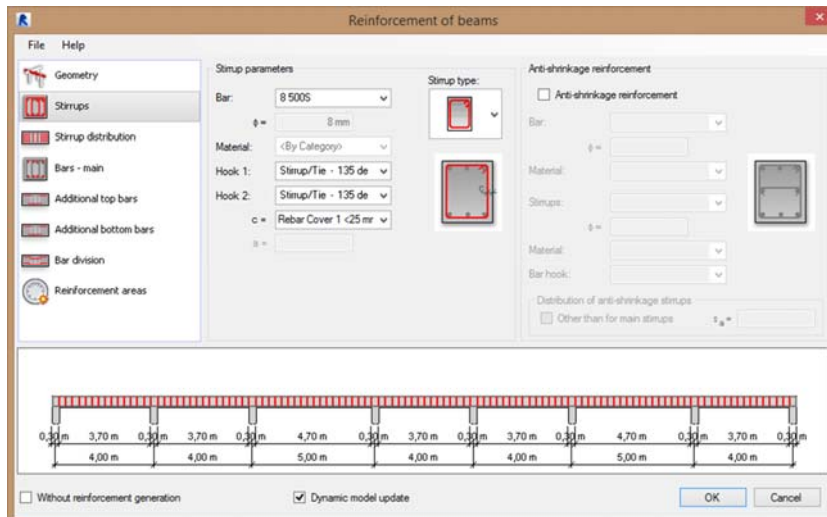


Figura 72 - Definição dos estribos de uma viga



Figura 73 - Definição da distribuição dos estribos por vão

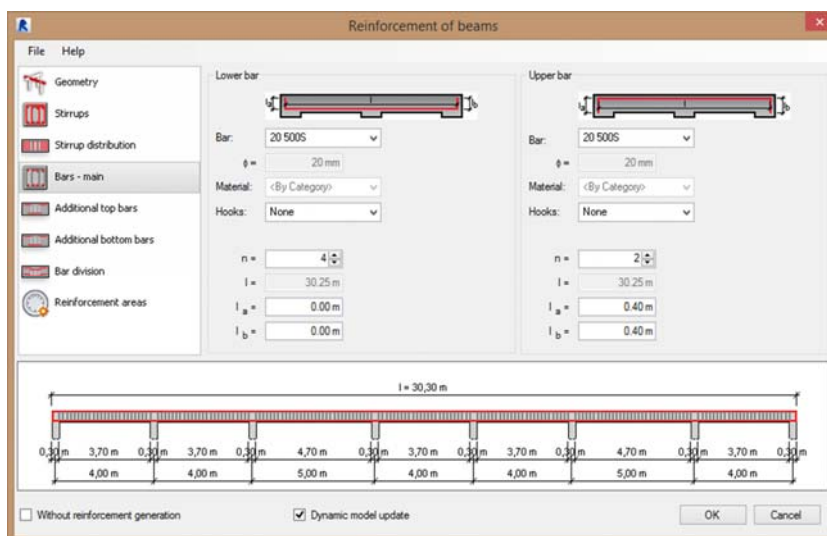
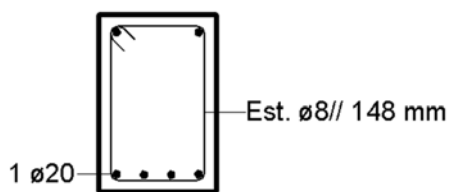
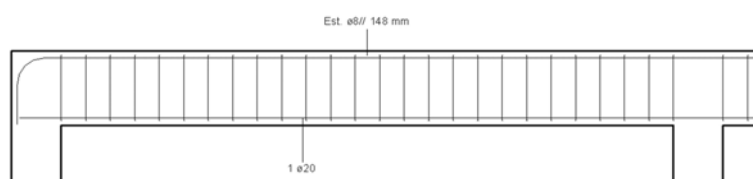
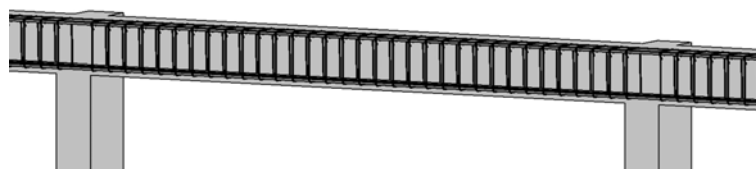


Figura 74 - Definição da armadura principal da viga

A figura 75 apresenta o resultado através de uma projecção axonométrica. A figura 76 apresenta a viga em corte longitudinal e uma secção transversal. Observa-se, novamente, que a automatização de

legendas é de difícil utilização e não traduz a usual apresentação deste tipo de desenhos incluídos nas peças desenhadas do projecto de estruturas. Como referido pode, contudo, ser realizada a manipulação deste tipo de pormenores utilizando outro tipo de ferramentas, com ligação ao *Revit*.



4.5.1. Armadura de laje

Finalmente, é analisado o modo de pormenorizar armaduras de lajes. Neste caso o *Revit Extensions* apenas possibilita a inserção de armaduras de canto e junto a aberturas efectuadas em lajes, como acção complementar. O *Revit* executa de forma intuitiva a inserção de uma malha de armadura na laje, assim como o seu reforço. Neste exemplo, é analisada a forma de inserir a malha de armadura, desprezando as zonas de reforço. Para se proceder à inserção da malha, é seleccionada uma laje do modelo de estruturas, seguido do comando *Area*, do separador *Reinforcement*, figura 78.

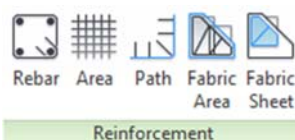


Figura 78 - Possibilidades para inserir armaduras em lajes

O utilizador deve definir o diâmetro do varão e o espaçamento, figura 79, para cada uma das faces, superior e inferior, definindo posteriormente a área onde se pretende inserir a armadura, neste caso,

optou-se por demonstrar colocando armadura na totalidade da área da laje, apresentando a sua pormenorização nas figuras 80.

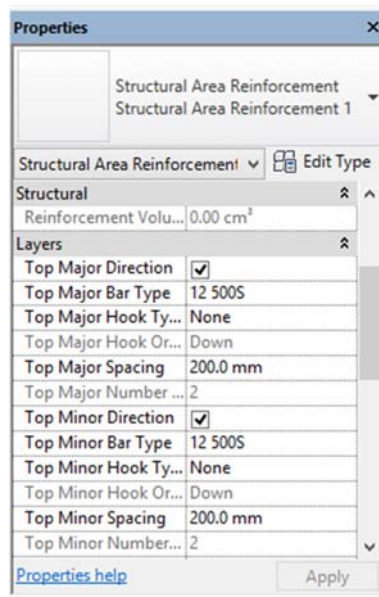


Figura 79 - Janela de propriedades da armadura de área para lajes

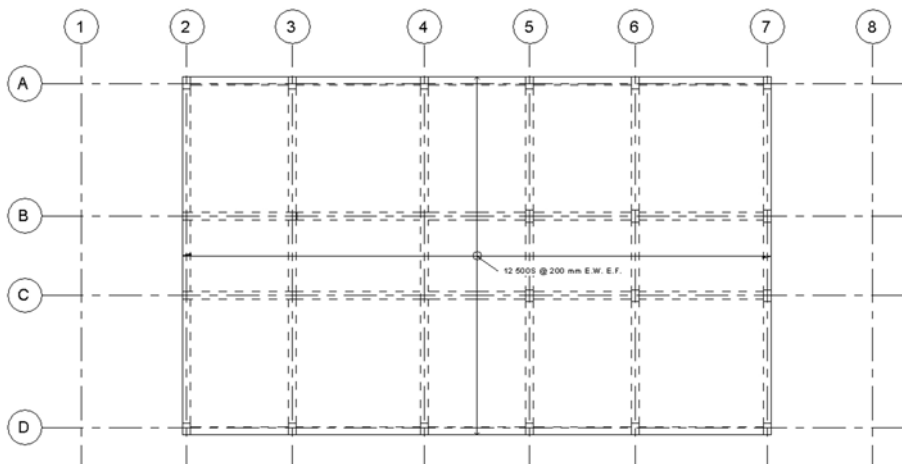


Figura 80 - Pormenorização de uma laje estrutural

Como se observa na figura 81, o Revit apresenta uma adequada capacidade para a definição de detalhes de armaduras em lajes. O valor a indicar na janela de propriedades deve corresponder ao afastamento máximo, aqui considerado igual a 200 mm. O programa ajusta a colocação de armaduras de forma a obter uma solução próxima do limite imposto pelo utilizador.

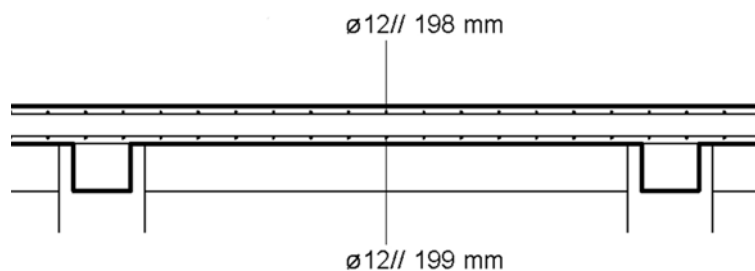


Figura 81 - Corte de um troço da laje

(Página em branco)

5. Mapas de Quantidades e Peças Desenhadas

Uma das vantagens da metodologia BIM é a capacidade de se poder extrair diverso tipo de informação do modelo. A figura 82 ilustra algum tipo de documentação, nomeadamente, mapas de quantidades e desenhos.

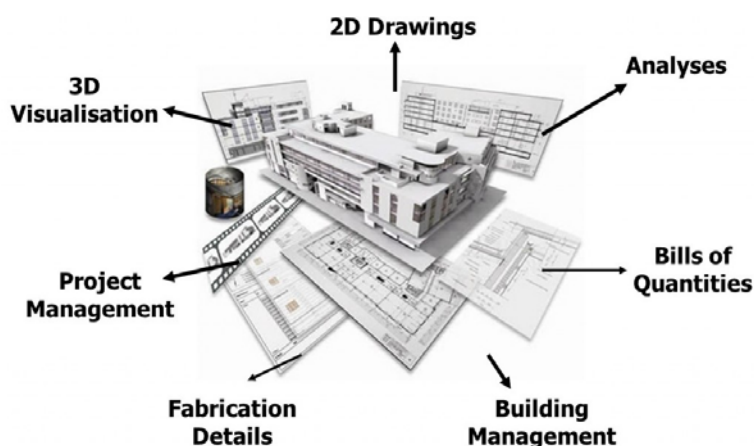


Figura 82 - Capacidade de extrair informação do modelo (CODEBIM)

Um das componentes importantes de um projecto é o caderno de encargos. É, assim, fundamental que o projectista possa apresentar os mapas de quantidades de um modo fácil e correcto, assim como as peças desenhadas, que devem ser de fácil actualização após as eventuais alterações e ajustes do projecto.

Em relação ao caso de estudo, são obtidos os mapas de quantidade do volume de betão, da quantidade de armadura e de área de cofragem. Além disso é realizado um estudo de movimento de terras a partir do modelo Revit. A documentação gráfica do projecto é ainda definida em relação a alguns elementos estruturais. É também analisada a capacidade de extracção de dados do modelo BIM, para efeitos de apresentação de documentação normalmente associado ao projecto de estruturas.

5.1. Mapas de quantidade da componente estrutural

Os mapas de quantidades a executar no âmbito deste trabalho, correspondem à medição do volume de betão, à área de cofragem, ao peso de armaduras, por diâmetro de varão, e ainda ao volume de movimentação de terras.

Embora o Revit permita a geração de tabelas dinâmicas, isto é, em que as alterações efectuadas no modelo têm repercussão imediata nas tabelas, não permite ainda uma edição eficaz em termos de

apresentação de resultados finais. No entanto, como o modelo é um repositório de informação, é possível retirar os dados necessários aos mapas e desenhos representativos. É, contudo, necessário recorrer à transferência de informação entre Revit e outras ferramentas, tais como o Excel, para a obtenção adequada da documentação requerida na componente estruturas.

5.1.1. Volume de Betão

Para a obtenção do mapa de quantidades do volume de betão deve ser seleccionado no Revit, o comando *Schedules* no painel *Create*, separador *View*, figura 83. De seguida, deve ser indicado qual o tipo de elemento a considerar no mapa de quantidades a criar. Foram seleccionados os seguintes: *Structural Foundation*, *Structural Columns*, *Walls*, *Structural Framing* e *Floors*.

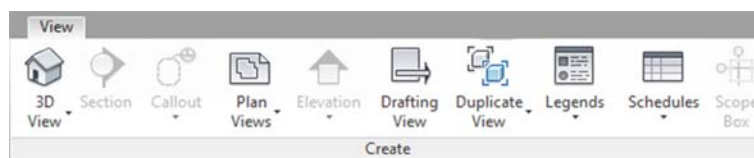


Figura 83 - Criar mapa de quantidades

A organização do mapa de quantidades é estabelecida através da selecção dos campos relativos a valores ou designações, que se pretendem incluir. Para o mapa relativo ao betão foram definidos os seguintes campos (figura 84):

- *Family and Type*: lista o tipo de objecto;
- *Structural Material*: indica qual o tipo de material estrutural utilizado;
- *Level*: localiza o nível do elemento na estrutura;
- *Volume*: apresenta o valor numérico do volume do elemento.

O programa permite realizar diverso tipo de formatação e de selecção de itens a serem visualizados através de filtros e agrupamentos. Optou-se, neste caso, por agrupar os elementos por pisos.

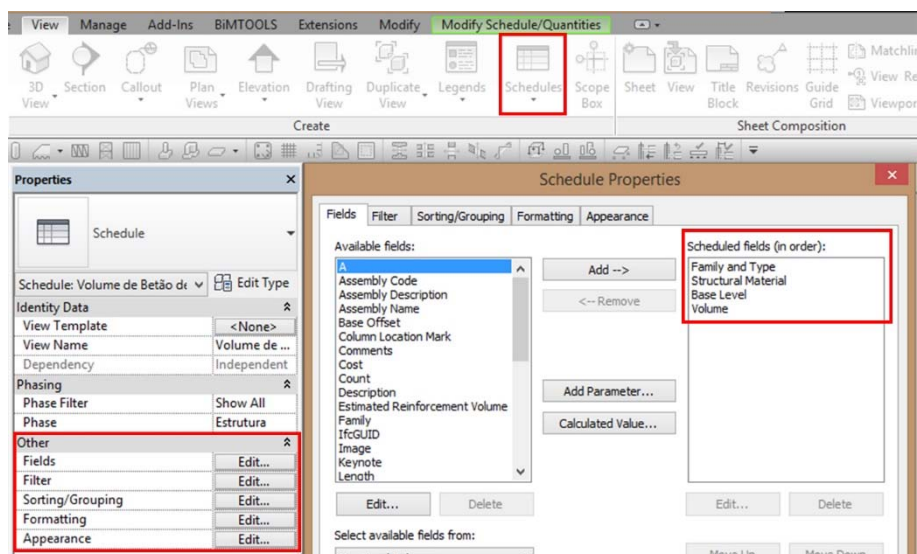


Figura 84 - Criar mapas de quantidades

A informação retirada do modelo BIM, referente ao volume de betão, encontra-se sistematizada no Anexo I, onde se apresenta tabelas, por tipo de elemento estrutural. Assim, obtém-se um volume total da estrutura igual a 864,88 m³.

5.1.2. Tabela de Armaduras

Tal como realizado com o volume de betão, é possível obter um mapa de armaduras, em que se pode, entre outras coisas, a obtenção de tabelas em que se apresenta o comprimento total de varões por diâmetro. A tabela de armaduras é obtida através do comando *Schedules*, utilizado anteriormente, indicando que se pretende criar uma tabela relacionando com armaduras, *Structural Rebar*. Para esta tabela os campos seleccionados foram os seguintes:

- *Type*: indica o diâmetro do varão;
- *Total Bar Length*: indica o comprimento total dos varões utilizados.

Apresenta-se na tabela seguinte uma quantidade de armadura, gerado da forma descrita anteriormente, para os elementos dimensionados no capítulo 4. Os valores foram confirmados recorrendo à ferramenta *Autocad*.

Tabela 9 - Tabela de armaduras

Diâmetro [mm]	Comprimento [m]	Massa [kg]
8	311,56	124,62
10	34,02	21,09
12	6155,17	5478,10
16	41,70	65,89
20	182,62	451,07
Total	6725,07	6140,78

5.1.3. Área de Cofragem

Actualmente, o *Revit* ainda não efectua de uma forma expedita a determinação da área de cofragem dos elementos estruturais. Existe, no entanto, um *plugin*, *SOFiSTiK BiMTOOLS 2015*, disponível na *Autodesk Exchange Apps*, que permite contabilizar a área de cofragem, considerando duas componentes: área lateral e área inferior. A figura 85 mostra a configuração para o cálculo destas áreas.

De forma a avaliar a correcção dos valores determinados, pelo referido *plugin*, relativamente às áreas de cofragem, foi efectuado um pequeno exercício de cálculo. Assim, seleccionaram-se alguns elementos estruturais e procedeu-se ao cálculo comparativo. Para o efeito, seleccionaram-se uma sapata e um pilar.

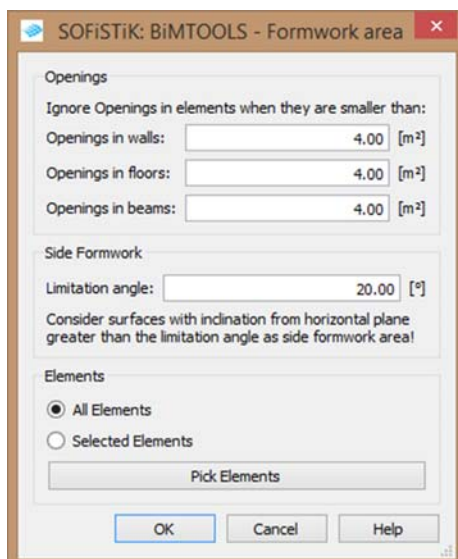
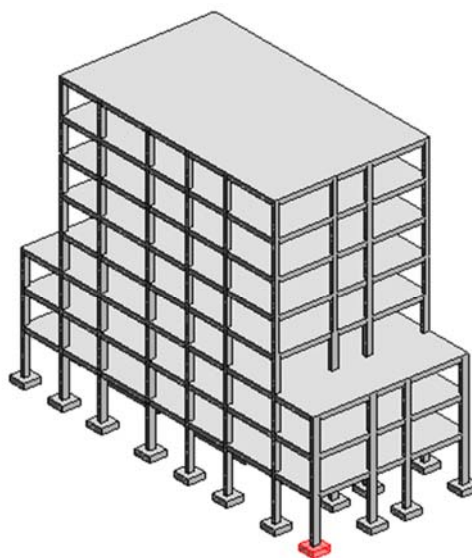
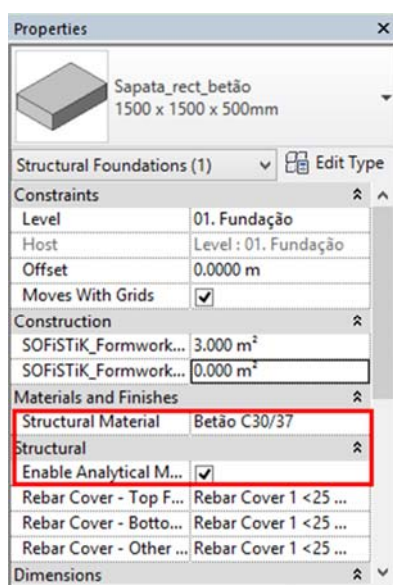


Figura 85 - Propriedades para o cálculo de área de cofragem

A betonagem de uma sapata é realizada directamente sob o terreno, necessitando apenas de cofragem lateral. A figura 86 destaca, a encarnado, uma sapata do modelo analisada, de dimensões 1,5x1,5x0x5 m³. A correspondente janela de propriedades indica os valores referente à área de cofragem, gerados pela aplicação utilizada.



(a)

(b)

Figura 86 - Área de cofragem das sapatas: (a) janela de propriedades e (b) sapata analisada

Assim, o valor da área de cofragem da sapata, obtida com o recurso à aplicação, é de 3,00 m². Este valor é igual ao calculado manualmente:

$$A_{cofragem\ lateral} = P_{Sapata} \times h_{sapata} = (4 \times 1,5) \times 0,5 = \mathbf{3,00\ m^2}$$

em que:

- $A_{cofragem\ lateral}$: é a área de cofragem lateral da sapata;
- P_{Sapata} : é o perímetro da sapata;

- h_{sapata} : é a altura da sapata.

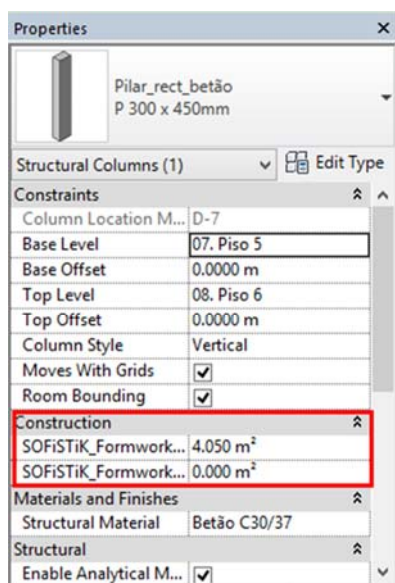
Foi realizada uma análise semelhante para o pilar identificado, pilar de canto com apenas duas vigas adjacentes, a encarnado; na figura 87 o pilar analisado a encarnado e a sua janela de propriedades. A aplicação indica que, em relação à área de cofragem deste elemento, não é considerada a cofragem inferior, visto que o pilar é betonado sobre a laje, e que a área de cofragem lateral é igual a 4,050 m², como se observa na janela de propriedades. Novamente, este valor corresponde ao calculado da seguinte forma:

$$A_{cofragem\ lateral} = P_{pilar} \times h_{pilar} - A_{Interface\ viga-pilar}$$

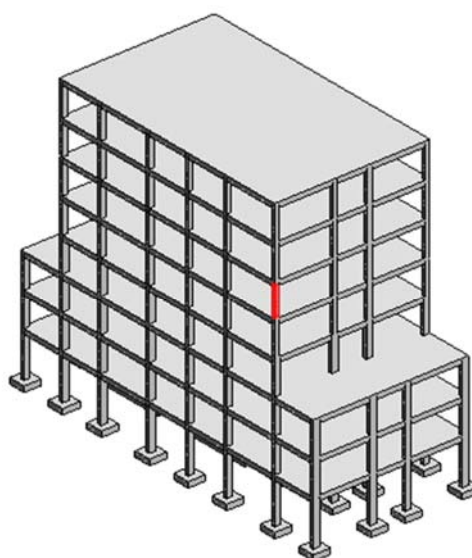
em que:

- $A_{cofragem\ lateral}$: é a área de cofragem do pilar;
- P_{pilar} : é o perímetro do pilar;
- h_{pilar} : altura do pilar;
- $A_{Interface\ viga-pilar}$: é a área da interface das vigas com o pilar.

$$A_{cofragem} = 2 \times (0,30 + 0,45) \times 2,80 - 2 \times (0,25 \times 0,30) = 4,050\ m^2$$



(a)



(b)

Figura 87 - Área de cofragem de um pilar: (a) janela de propriedades e (b) pilar analisado

De igual forma, foi realizada uma análise semelhante para os elementos, viga e laje. A tabela 10 apresenta a comparação entre os valores obtidos recorrendo ao Revit e os valores calculados manualmente.

Como se observa na tabela, os valores obtidos através da aplicação instalada e os valores calculados são iguais, à excepção do valor referente à área de cofragem inferior da laje. Este erro, de cerca de 0,08%, é desprezável, e deve-se a erros de arredondamento nas dimensões utilizadas para a área calculada.

Depreende-se assim, que esta aplicação calcula correctamente a área de cofragem dos elementos estruturais. Importa porém referir, que devido à forma de modelação assumida no presente trabalho, a laje apresenta cofragem inferior e lateral, isto deve-se ao facto de como o programa entende o que é uma viga e uma laje. Esta questão poderá ser resolvida recorrendo ao comando *Switch Join Order*, como explicado anteriormente. Entende-se como única necessidade do projectista de estruturas a obtenção de uma área total de cofragem, não estando interessado no faseamento. Apresenta-se de seguida o mapa de quantidades referente à área de cofragem.

Tabela 10 - Comparação de áreas de cofragem

Elemento Estrutural	Área cofragem Revit [m ²]		Área cofragem calculada [m ²]	
	Lateral	Inferior	Lateral	Inferior
Sapata	3,00	0,00	3,00	0,00
Pilar	4,05	0,00	4,05	0,00
Viga	2,35	1,41	2,35	1,47
Laje	14,34	253,18	14,34	253,38

No Anexo II é possível observar os mapas de quantidade de área de cofragem para os diversos elementos, apresentando uma área de cofragem total igual a 4965,05 m².

5.1.4. Movimento de terras

No projecto de estruturas é necessário considerar ainda o processo construtivo da componente de estruturas e o seu faseamento. Apesar de o *Revit* não ser a ferramenta mais adequada à gestão de obra, permite fasear a construção. Neste contexto, é efectuado a demonstração da aplicação de *Revit* no cálculo de movimento de terras de forma a determinar uma estimativa de custo para a escavação.

Para a obtenção do volume de escavação e de aterro é necessário definir três fases:

- Terreno Existente: fase em que se apresenta o existente, neste caso o terreno;
- Movimento de Terras: fase associada à escavação do terreno, pode observar-se o terreno escavado;
- Estrutura: fase que representa a estrutura final sob o terreno escavado.

Para a definição de fases de um projecto é necessário seleccionar no *Revit*, o comando *Phases* incluído no painel *Phasing*, do separador *Manage*, como se ilustra na figura 88.

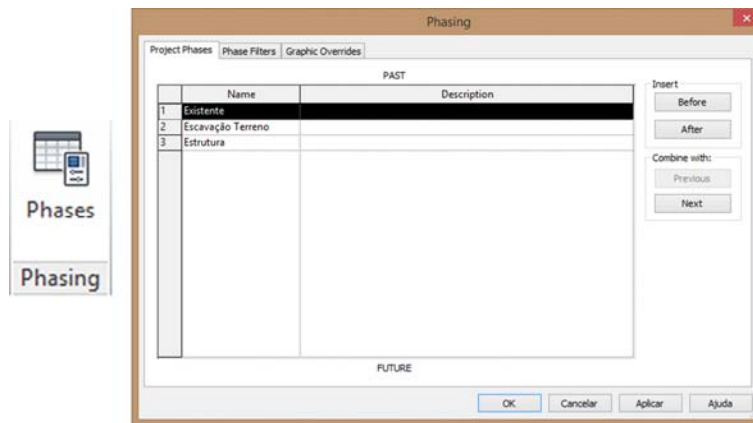


Figura 88 - Definição das fases

Em relação a todos os objectos existentes no modelo, é possível definir na janela de propriedades, a fase em que é criado, assim como a fase em que é demolido. A figura 89 ilustra a correspondente interface referente ao terreno existente.

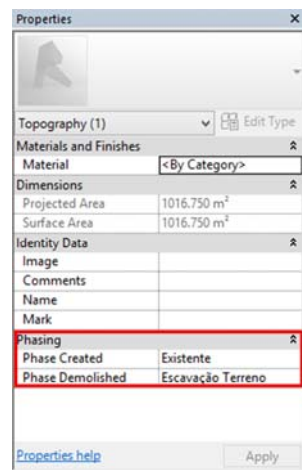


Figura 89 - Definição da fase criada e destruída

Para a análise do processo de movimentação de terras, é necessário representar o terreno inicial. Como por exemplo admita-se a existência de um terreno plano à cota zero. No Revit, este elemento é criado na fase Existente e demolido na fase Escavação Terreno. Para a definição do terreno é seleccionado o comando *Toposurface*, no painel *Model Site* do separador *Massing & Site*, figura 90.

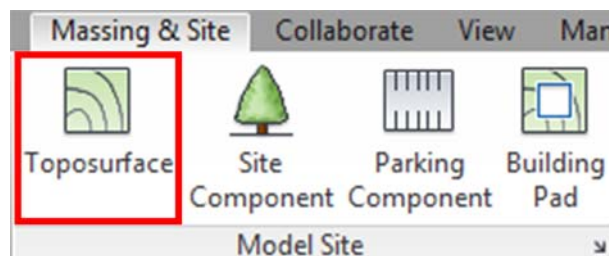


Figura 90 - Definição da superfície topográfica

Utilizando o comando *Graded Region*, do painel *Modify Site*, do separador *Massing & Site* (figura 91), define-se um novo tipo de terreno com base no perímetro da superfície topográfica anterior, onde se indicam pontos situados a distintas cotas. Neste caso, define-se nos cantos das sapatas a cota negativa

de 1,5 metros e os pontos, à cota zero, a partir dos quais se deve iniciar a escavação. O processo é de seguida automático, gerando um novo terreno associado a outra fase construtiva.

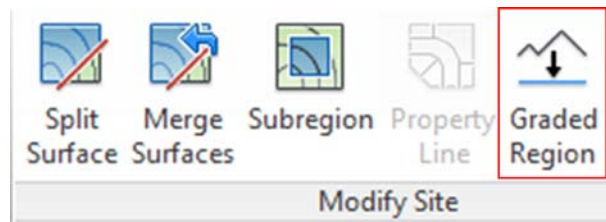


Figura 91 - Comando Graded Region

A figura 92 apresenta uma projecção axonométrica das três fases de construção: existente (a), escavação do terreno (b), escavação do terreno e estrutura (c) e uma projecção tridimensional em corte (d), onde se percepção a escavação efectuada.

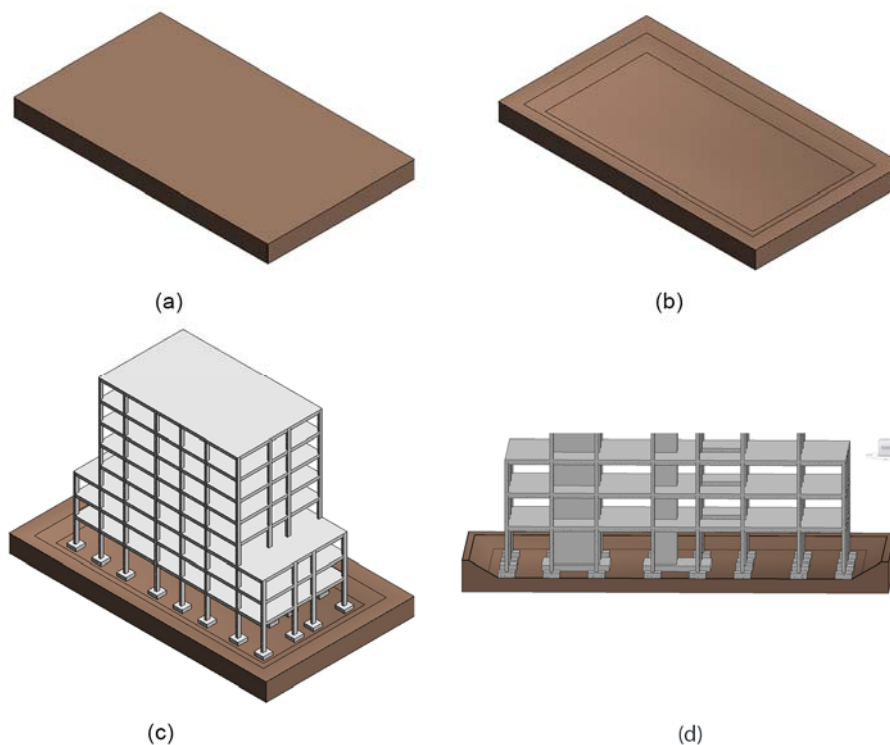


Figura 92 - Projecção axonométrica: faseamento construtivo

Na janela de propriedades da segunda superfície topográfica criada, superfície que representa a escavação efectuada, é possível obter o volume de escavação, observa-se assim que, para efectuar esta escavação necessária, é preciso escavar 878,02 m³ de terreno.

5.2. Peças Desenhadas

Num projecto de estruturas, as peças desenhadas constituem elementos fundamentais; estes desenhos são organizados em folhas. Para se criar uma folha no projecto, selecciona-se *Sheet*, no painel *Sheet Composition*, separador *View*, figura 93. De seguida, é seleccionado o tipo de folha pretendido, sendo que estes tipos, devem ser previamente gerados, de acordo com o utilizador,

devendo indicar, nomeadamente, o formato e decidir a inclusão de legenda, e o seu tipo, entre outras coisas.

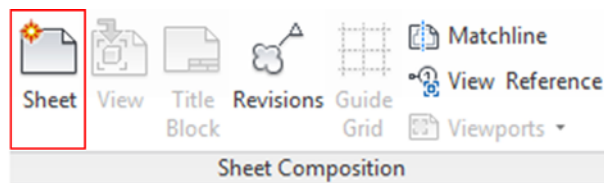


Figura 93 - Inserir folhas

Note-se que até esta fase não foi referida qualquer escala. A modelação apenas requer a indicação da unidade de trabalho, a escala interna, para associar unidades de modelar à sua representação, a qual só tem interesse de definição de desenhar em folhas formatadas de desenho. No Revit a escala de representação é associada a cada vista, encontrando-se definida no canto inferior esquerdo do programa, podendo também ser alterada, figura 95.

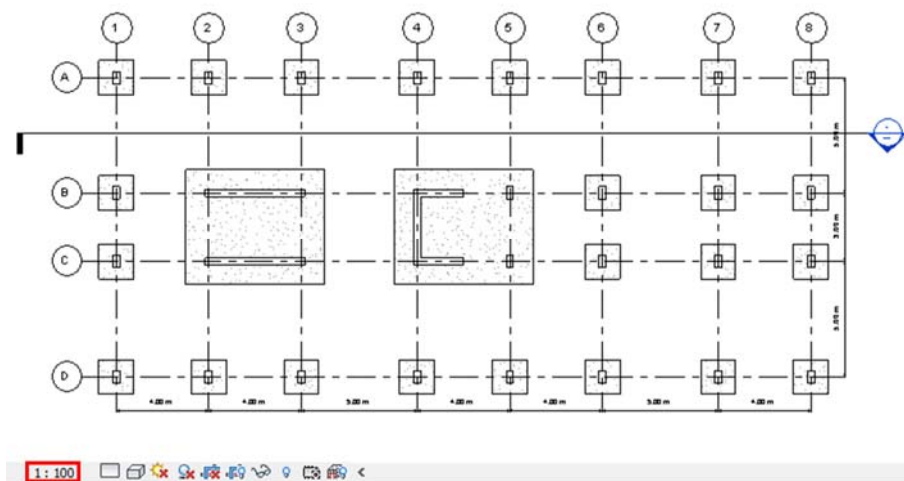


Figura 94 - Alteração de escala

Assim, para se compor as peças desenhadas, apenas é necessário ter a folha activa e seleccionar as vistas que se pretendem desenhar para o plano de trabalho, ficando os desenhos com a escala definida na vista. Supondo que se pretende introduzir elementos que se encontrem em formato *dwg* nas folhas, o processo terá de ter um passo intermédio que passa por importar o *dwg* para uma *Drafting view*, figura 96, no painel *Create* do separador *View*. No Anexo III é possível observar algumas peças desenhadas.

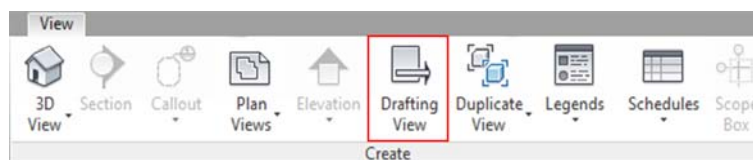


Figura 95 - Criação de uma Drafting View

A título exemplificativo apresenta-se em anexo cinco desenhos referentes à planta de fundações, planta do piso 1 e piso 4, corte A e pormenorização da armadura resultante da modelação anterior. Refira-se que não foram executadas todas as cotagens necessárias ao projecto de estruturas, e a pormenorização de armaduras que se apresenta é necessário ser corrigida.

(Página em branco)

6. Discussão de resultados

6.1. Considerações finais

A indústria da Arquitectura, Engenharia e Construção é uma indústria que abrange diversos sectores que se encontram em contínua adaptação e desenvolvimento. Edifícios com alturas arrojadas e com uma geometria mais complexa; prazos impostos pelos donos de obra mais apertados ou um controlo de custos exigente, são alguns dos motivos que incentivam a que haja uma maior colaboração no desenvolvimento de processos de trabalho, entre as várias especialidades e o recurso às mais recentes inovações tecnológicas.

É nesta vertente que tem surgido nas últimas décadas uma nova metodologia de trabalho, denominada *Building Information Modelling*. Idealmente esta nova metodologia visa facultar aos intervenientes a capacidade de interoperabilidade, ou seja, arquitectos e engenheiros passam a trabalhar em conjunto sobre um modelo tridimensional. Modelo do qual se espera que seja rico em informação das várias componentes de estruturas; por exemplo, é esperado que um modelo de uma estrutura de betão tenha informação sobre características físicas do betão.

Esta metodologia tem uma particular aceitação junto à comunidade de arquitectura, pois beneficiam das suas capacidades para fornecer ao cliente diferentes opções de formas e de materiais com capacidades avançadas de visualização realista, além da obtenção de mapas de quantidades exactos. Contudo, verifica-se que tem havido uma maior dificuldade na difusão da metodologia junto aos gabinetes de engenharia.

É neste contexto que se enquadra a presente dissertação. Existe a necessidade de demonstrar que esta metodologia é válida, que a utilização de ferramentas BIM traz vantagens, mesmo quando direccionada para o projecto de estruturas. O principal objectivo proposto para a dissertação, seria analisar a aplicabilidade da metodologia num projecto de estruturas, apoiado no desenvolvimento de três fases distintas:

- Geração do modelo estrutural;
- Preparação do modelo computacional para o cálculo estrutural e inserção de armaduras no modelo;
- Obtenção de mapas de quantidades e peças desenhadas.

O caso de estudo seleccionado corresponde a uma estrutura de betão armado, apresentando uma distribuição de elementos estruturais regular em altura. O exemplo analisado representa uma grande generalidade do tipo de construção existente, e as situações estudadas são as que reflectem as mais

frequentes. No entanto, outro tipo de problemas pode surgir em casos menos lineares que não foram focados.

Em relação à primeira fase o objectivo foi cumprido, no sentido em que foi possível obter de uma forma expedita o modelo computacional, que serve de base para o cálculo estrutural. Havendo ainda situações por melhorar, nomeadamente, em relação às capacidades de representação do programa sobre cada elemento estrutural e a relação entre elementos.

Na segunda fase surgem limitações que necessitam de uma maior atenção e desenvolvimento, de forma a permitir um uso total das potencialidades deste tipo de ferramentas. A actualização do modelo BIM após o cálculo estrutural ainda não é aconselhável, pois em vez de acrescentar informação ao modelo pode ainda alterá-lo de forma indesejada, como ficou demonstrado no capítulo 4. A inserção e a pormenorização de armaduras, apesar de facilitada com o *Revit Extensions*, ainda apresenta erros e imprecisões relativamente ao desenho típico de estruturas de betão.

A terceira fase demonstra com sucesso uma das grandes capacidades da metodologia BIM, que é a capacidade de retirar informação exacta do modelo, apresentando assim mapas de quantidade exactas possibilitando a obtenção de orçamento bastante correcto.

Conclui-se, desta forma, apesar de existirem dificuldades, que a metodologia BIM é uma metodologia válida hoje, devendo a sua utilização em gabinetes de engenharia ser incrementado e incentivada. Nesse sentido, a formação de novos engenheiros deve incluir esta componente, seja através de uma formação ou de trabalhos de investigação como a presente dissertação.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Na sequência do trabalho desenvolvido sugerem-se os seguintes tópicos para desenvolvimentos futuros:

- Dado ter sido utilizada uma estrutura de edifício regular no presente trabalho, seria útil analisar o comportamento das ferramentas BIM com estruturas mais complexas;
- Deverá ser realizada também uma análise do comportamento a outros tipos de estruturas, tais como: muros de suporte, paredes estruturais ou estacas;
- Realizar uma análise semelhante à efectuada na presente dissertação mas utilizando estruturas metálicas e estruturas mistas;
- Analisar e sugerir melhorias na definição e pormenorização de armaduras;
- Realizar um estudo que implique as várias especialidades para se comprovar a interoperabilidade entre as diversas especialidades.

Referência bibliográficas

AIA TAP BIM Awards 2014. Disponível em: <<http://network.aia.org/technologyinarchitecturalpractice/home/buildinginformationmodelingawardsprogram/2014recipients>>. Acesso em 27/04/2015.

Autodesk®, “*Parametric Building Modeling: BIM’s Foundation*”

Azevedo, V. (2015) “*Análise do modelo BIM numa perspectiva do projecto de estruturas*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Instituto Superior Técnico

Azhar, S.; Nadeem, A.; Mok, J.; Leung, B. (2008), “*Building Information Modeling (BIM): A New Paradigm for Visual Interactive Modeling and Simulation for Construction Projects*”, First International Conference on Construction in Developing Countries.

Caires, B. (2013) “*O BIM como ferramenta de apoio no projeto colaborativo entre o Engenheiro de Estruturas e o Arquiteto*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade do Minho.

Costa, A., “*O Paradigma BIM e a normalização como fator de competitividade*”. Disponível em <<http://www1.ipq.pt/PT/Site/Destaques/Pages/Paradigma-BIM-e-a-normalizacao-como-fator-de-competitividade.aspx>>. Acesso em 27/04/2015.

Dispenza, K. (2010), “*The Daily Life of Building Information Modeling (BIM)*”, Disponível em: <<http://buildipedia.com/aec-pros/design-news/the-daily-life-of-building-information-modeling-bim>>. Acesso em 20/02/2015.

Eastman, C. (1975), “*The Use of Computers Instead of Drawings In Building Design*”, American International Architects Journal. Disponível em: <http://codebim.com/wp-content/uploads/2013/06/Eastman_1975.pdf>. Acesso em: 21/04/2015.

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

Fernandes, J. (2013) “*A metodologia Building Information Modelling aplicado ao projeto de estruturas*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade do Minho.

Ferreira, B. (2011) “*Aplicação de Conceitos BIM à Instrumentação de Estruturas*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

“*History of Building Information Modelling*”. Disponível em <<http://codebim.com/resources/history-of-building-information-modelling/>>. Acesso em 01/06/15.

Johnson, N. (2015), *“Renders versus reality: five 3D models that look almost like the real thing”*, Architecture & Design. Disponível em: <<http://www.architectureanddesign.com.au/news/renders-versus-reality-5-renders-that-look-almost>>. Acesso em 21/04/15.

Khemplani, L., 2012, *“Around the World with BIM”*, AECbytes. Disponível em <www.aecbytes.com/feature/2012/Global-BIM.html>. Acesso em 01/06/15.

Lino, J.; Azenha, M.; Lourenço, P. (2012), *“Integração da Metodologia BIM na Engenharia de Estruturas”*, Encontro Nacional Betão Estrutural – BE2012

McPhee, A. (2013), *“What is this thing called LOD”*. Disponível em: <<http://practicalbim.blogspot.pt/2013/03/what-is-this-thing-called-lod.html>>. Acesso em 20/02/2015

Neves, P. (2012) *“Aplicação de tecnologia BIM no projecto de edifícios”*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Instituto Superior Técnico

Odeh, D.; Ales Jr., J.; Kneer, E.; Mykins, D.; Ouzoonian, A.; Rauch, A.; Wittry, D. (2011), *“Building Information Modeling for the Engineer of Record”*, Structural Engineering Institute – Council of American Structural Engineers White Paper.

Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção, *“2º Fórum PTPC – Tecnologias da Construção na resposta a novos desafios”*, 2013. Disponível em <<http://www.ptpc.pt/>>

Pulket, T., *“The Radical Dimensions in BIM: A discussion on Various Applications of BIM in its 4th - 5th - 6th dimensions”*. Disponível em: <<http://image.izacholsm.com/focussend/cust/DTGO0730/pdf/EnNews01.pdf>>. Acesso em 27/04/2015.

Rauch, A. (2011), *“Defining BIM models for the Structural Engineer of Record”*. Disponível em: <http://cenews.com/article/8451/defining_bim_models_for_the_structural_engineer_of_record>. Acesso em 18/02/2015.

Silva, J. (2013) *“Princípios Para O Desenvolvimento De Projetos Com Recurso A Ferramentas BIM - Avaliação de melhores práticas e proposta de regras de modelação para projetos de estruturas”*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Sousa, Hugo (2013) *“Medição de armaduras de betão armado e orçamentação em BIM”*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade do Minho.

Tarrafa, D. (2012) *“Aplicabilidade prática do conceito BIM em projeto de estruturas”*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

The American Institute of Architects KnowledgeNet, *“BIM, Standards & Interoperability”*. Disponível em: <<http://network.aia.org/technologyinarchitecturalpractice/home/bimstandards>>. Acesso em 21/04/2015.

Watson, A., *“BIM – a driver for change”*, Nottingham University Press

Páginas de Internet Referência

[W1] *buildingSmart* - disponível em: <www.buildingsmart-tech.org>

[W2] The American Institute of Architects - disponível em: <www.aia.org>

[W3] The NBS - disponível em: <www.thenbs.com>

[W4] BIM Task Group - disponível em: <www.bimtaskgroup.org>

[W5] Plataforma Tecnológica Portuguesa de Construção – disponível em: <www.ptpc.pt>

[W6] BIM Management Institute – disponível em: <bimmi.innovationcast.net>

[W7] BIM Club – disponível em: <bimclub.pt>

[W8] CODEBIM - disponível em <codebim.com>. Acesso em 13/06/15.

[W9] “*Enchanted Storybook Castle*”, AIA TAP BIM AWARDS 2014 - disponível em <network.aia.org/technologyinarchitecturalpractice/home/buildinginformationmodelingawardsprogram/2014recipients>. Acesso em 01/06/15.

[W10] Odeh Engineers – disponível em <www.odehengineers.com>. Acesso em 25/05/15.

[W11] BIM Guides Projecto - disponível em <bimguides.vtreem.com>. Acesso em 01/06/15.

[W12] *Autodesk* – disponível em <www.autodesk.pt>

[W13] *Computers & Structures Inc.* – disponível em <www.csiportugal.com>

[W14] *BIM Essential Guides* – disponível em <www.corenet.gov.sg>. Acesso em 14/05/15.

(Página em branco)

Anexos

(Página em branco)

Anexo I: Mapa de quantidades de betão

Tabela 11 - Volume de betão das fundações

Família e Tipo	Material Estrutural	Nível associado	Volume [m ³]
Sapata_rect_betão: 1500 x 1500 x 500mm	Betão C30/37	01. Fundação	27,00
Ensoleiramento: 500mm	Betão C30/37	01. Fundação	30,00
Total			57,00

Tabela 12 - Volume de betão dos pilares

Família e Tipo	Material estrutural	Nível da Base	Volume [m ³]
Pilar_rect_betão: 300 x 550mm	Betão C30/37	01. Fundação	16,30
Pilar_rect_betão: 300 x 550mm	Betão C30/37	03. Piso 1	12,01
Pilar_rect_betão: 300 x 550mm	Betão C30/37	04. Piso 2	12,01
Pilar_rect_betão: 300 x 550mm	Betão C30/37	05. Piso 3	8,32
Pilar_rect_betão: 300 x 450mm	Betão C30/37	06. Piso 4	6,80
Pilar_rect_betão: 300 x 450mm	Betão C30/37	07. Piso 5	6,80
Pilar_rect_betão: 300 x 450mm	Betão C30/37	08. Piso 6	6,80
Pilar_rect_betão: 300 x 450mm	Betão C30/37	09. Piso 7	6,80
Total			75,86

Tabela 13 - Volume de betão das paredes estruturais

Família e Tipo	Material estrutural	Nível da Base	Volume [m ³]
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	Betão C30/37	01. Fundação	17,78
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	Betão C30/37	03. Piso 1	13,10
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	Betão C30/37	04. Piso 2	13,10
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	Betão C30/37	05. Piso 3	13,10
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	Betão C30/37	06. Piso 4	13,10
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	Betão C30/37	07. Piso 5	13,10
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	Betão C30/37	08. Piso 6	13,10
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	Betão C30/37	09. Piso 7	13,10
Total			109,51

Tabela 14 - Volume de betão das vigas

Família e Tipo	Material estrutural	Nível associado	Volume [m ³]
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	Betão C30/37	03. Piso 1	14,26
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	Betão C30/37	04. Piso 2	14,26
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	Betão C30/37	05. Piso 3	14,26
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	Betão C30/37	06. Piso 4	10,34
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	Betão C30/37	07. Piso 5	10,47
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	Betão C30/37	08. Piso 6	10,47
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	Betão C30/37	09. Piso 7	10,47
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	Betão C30/37	10. Cobertura	10,47
Total			94,98

Tabela 15 - Volume de betão das lajes

Família e Tipo	Material estrutural	Nível associado	Volume [m ³]
Floor: Laje de Betão 20 cm	Betão C30/37	03. Piso 1	79,12
Floor: Laje de Betão 20 cm	Betão C30/37	04. Piso 2	79,12
Floor: Laje de Betão 20 cm	Betão C30/37	05. Piso 3	79,12
Floor: Laje de Betão 20 cm	Betão C30/37	06. Piso 4	57,44
Floor: Laje de Betão 20 cm	Betão C30/37	07. Piso 5	57,44
Floor: Laje de Betão 20 cm	Betão C30/37	08. Piso 6	57,44
Floor: Laje de Betão 20 cm	Betão C30/37	09. Piso 7	57,44
Floor: Laje de Betão 20 cm	Betão C30/37	10. Cobertura	60,43
Total			527,53

$$\text{Volume total de betão} = 57,00 + 75,86 + 109,51 + 94,98 + 527,53 = \mathbf{864,88 \text{ m}^3}$$

Anexo II: Mapa de quantidades de área de cofragem

Tabela 16 - Área de cofragem das fundações

Família e Tipo	Quantidade	Nível associado	Inferior [m ²]	Lateral [m ²]
Sapata_rect_betão: 1500 x 1500 x 500mm	24	01. Fundação	0	72
Ensoleiramento: 500mm	2	01. Fundação	0	22
Total			0	94

Tabela 17 - Área de cofragem dos pilares

Família e Tipo	Quantidade	Nível da Base	Inferior [m ²]	Lateral [m ²]
Pilar_rect_betão: 300 x 550mm	26	01. Fundação	0	161,96
Pilar_rect_betão: 300 x 550mm	26	03. Piso 1	0	117,76
Pilar_rect_betão: 300 x 550mm	26	04. Piso 2	0	117,76
Pilar_rect_betão: 300 x 550mm	18	05. Piso 3	0	81,63
Pilar_rect_betão: 300 x 450mm	18	06. Piso 4	0	71,55
Pilar_rect_betão: 300 x 450mm	18	07. Piso 5	0	71,55
Pilar_rect_betão: 300 x 450mm	18	08. Piso 6	0	71,55
Pilar_rect_betão: 300 x 450mm	18	09. Piso 7	0	71,55
Total			0	765,31

Tabela 18 - Área de cofragem das paredes

Família e Tipo	Quantidade	Nível da Base	Inferior [m ²]	Lateral [m ²]
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	5	01. Fundação	0	124,05
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	5	03. Piso 1	0	91,05
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	5	04. Piso 2	0	91,05
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	5	05. Piso 3	0	91,2
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	5	06. Piso 4	0	91,2
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	5	07. Piso 5	0	91,28
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	5	08. Piso 6	0	91,28
Basic Wall: Parede Betão - 300 mm	5	09. Piso 7	0	91,28
Total			0	762,37

Tabela 19 - Área de cofragem das vigas

Família e Tipo	Quantidade	Nível associado	Inferior [m ²]	Lateral [m ²]
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	50	03. Piso 1	57,03	92,61
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	50	04. Piso 2	57,03	92,61
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	50	05. Piso 3	57,03	92,61
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	36	06. Piso 4	41,34	66,46
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	35	07. Piso 5	41,88	67,31
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	35	08. Piso 6	41,88	67,38
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	35	09. Piso 7	41,88	67,38
Viga_rect_betão: 300 x 450mm	35	10. Cobertura	41,88	67,38
Total			379,94	613,76

Tabela 20 - Área de cofragem das lajes

Família e Tipo	Quantidade	Nível associado	Inferior [m ²]	Lateral [m ²]
Floor: Laje de Betão 20 cm	1	03. Piso 1	329,58	21,92
Floor: Laje de Betão 20 cm	1	04. Piso 2	329,58	21,92
Floor: Laje de Betão 20 cm	1	05. Piso 3	329,58	21,92
Floor: Laje de Betão 20 cm	1	06. Piso 4	238,19	18,72
Floor: Laje de Betão 20 cm	1	07. Piso 5	238,19	18,72
Floor: Laje de Betão 20 cm	1	08. Piso 6	238,19	18,72
Floor: Laje de Betão 20 cm	1	09. Piso 7	238,19	18,72
Floor: Laje de Betão 20 cm	1	10. Cobertura	253,18	14,34
Total			2194,69	154,98

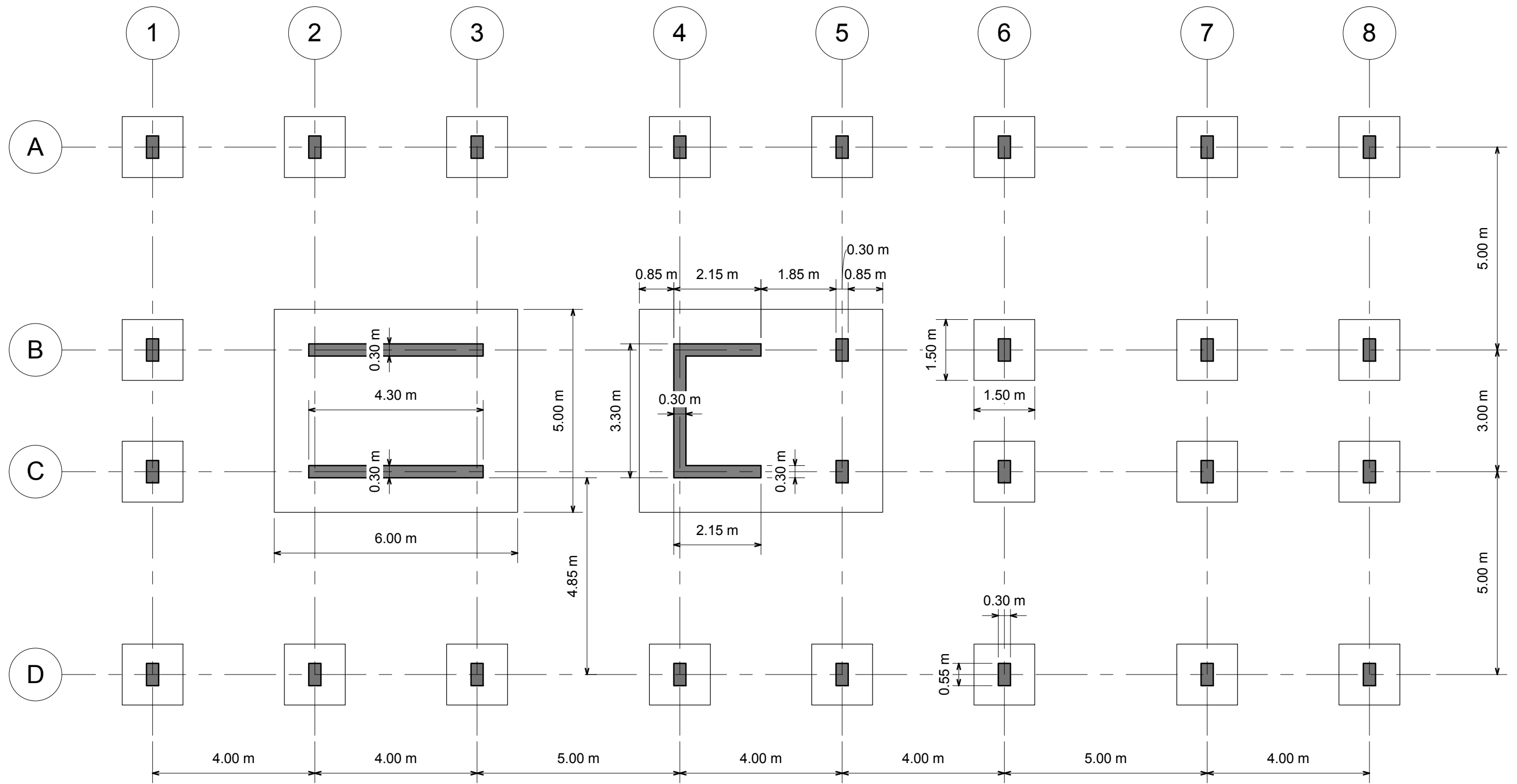
Área total de cofragem

$$= (0 + 94,00) + (0 + 756,31) + (0 + 762,37) + (379,94 + 613,76) + (2194,69 + 154,98) = \mathbf{4965,05 \text{ m}^2}$$

Anexo III: Peças desenhadas

Lista das peças desenhadas

- Planta de fundações
- Planta do piso 1
- Planta do piso 2
- Corte A
- Pormenorização de armaduras



01. Fundação

1 : 100



MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL
ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO BIM NO PROJECTO DE ESTRUTURAS

Especialidade / Fase

PROJECTO DE ESTRUTURAS
PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Designação

PLANTA DE FUNDAÇÕES

Elaborado por:

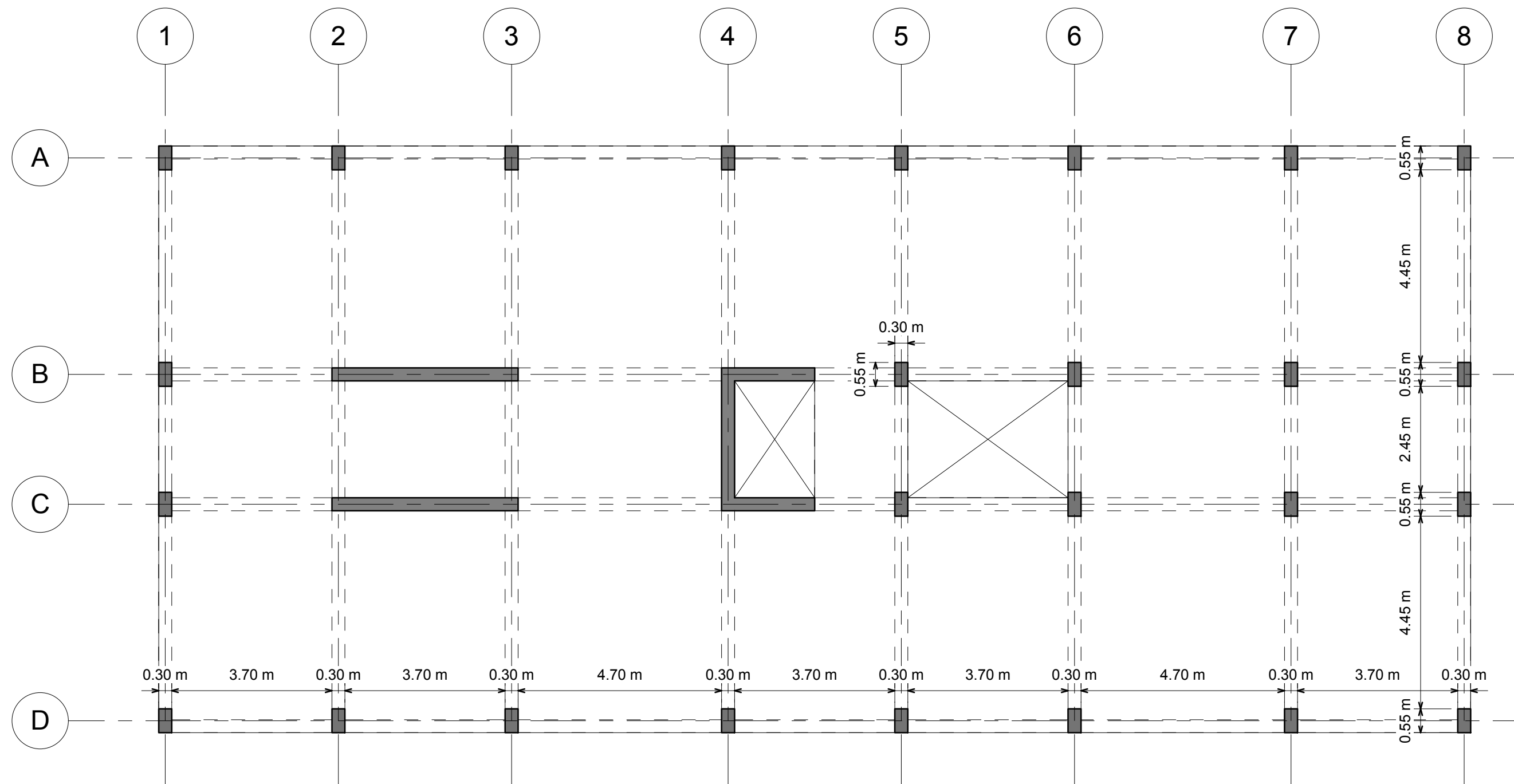
JOÃO NOVAIS, Nº 58699

Data

13/10/15

Número

001



03. Piso 1

1 : 100



MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL
ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO BIM NO PROJECTO DE ESTRUTURAS

Especialidade / Fase

PROJECTO DE ESTRUTURAS
PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Designação

PLANTA DO PISO 1

Elaborado por:

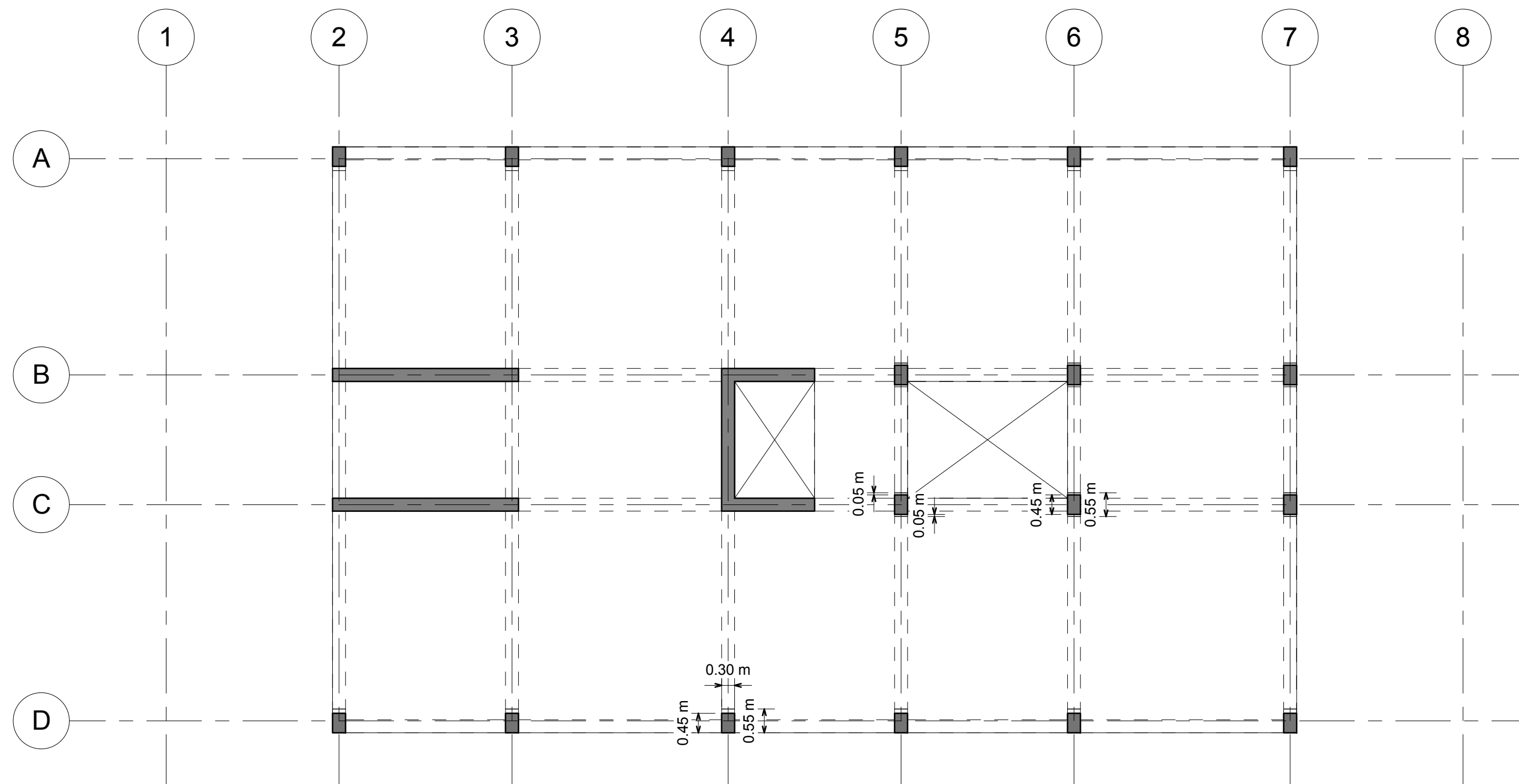
JOÃO NOVAIS, Nº 58699

Data

13/10/15

Número

002



06. Piso 4

1 : 100



MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL
ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO BIM NO PROJECTO DE ESTRUTURAS

Especialidade / Fase

PROJECTO DE ESTRUTURAS
PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Designação

PLANTA DO PISO 4

Elaborado por:

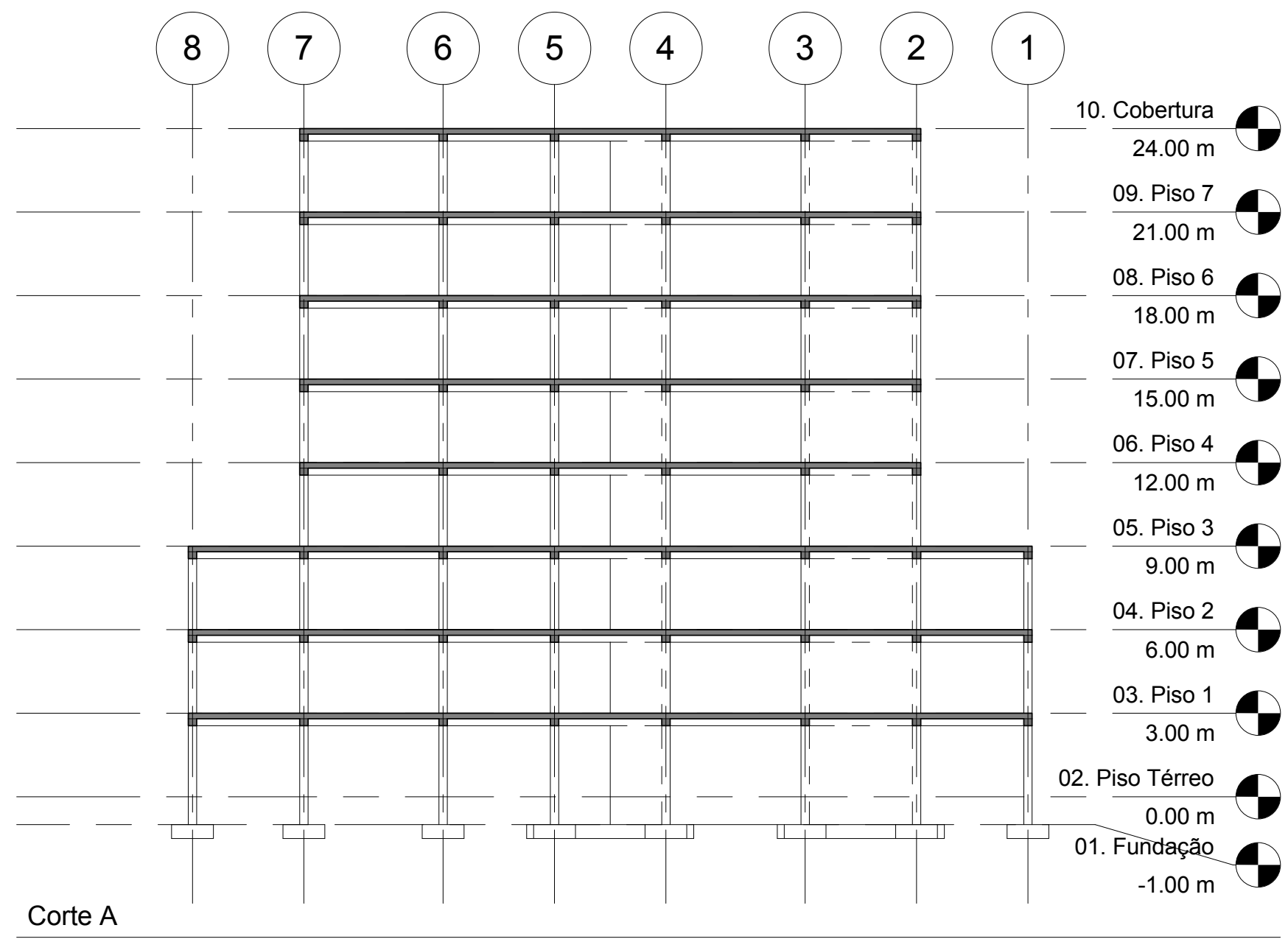
JOÃO NOVAIS, Nº 58699

Data

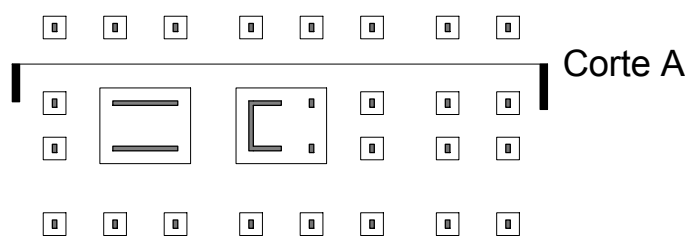
13/10/15

Número

003

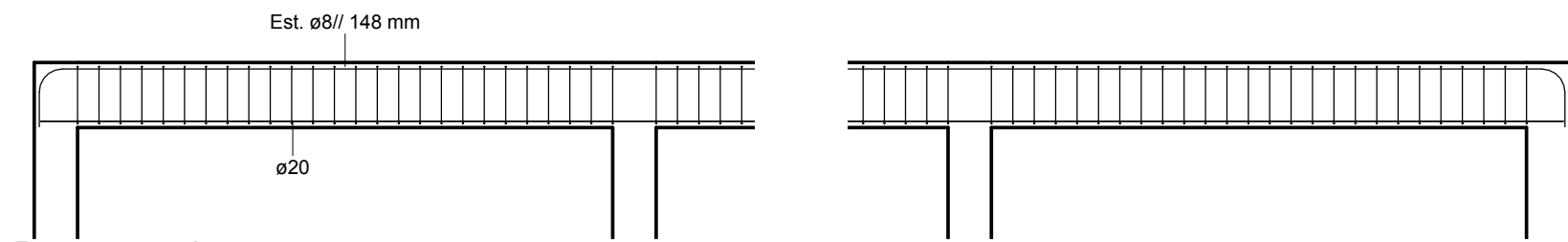


Corte A
1 : 200



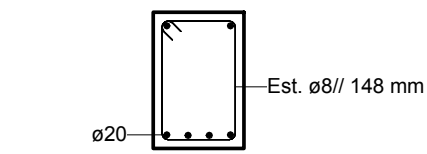
MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL
ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO BIM NO PROJECTO DE ESTRUTURAS

Especialidade / Fase PROJECTO DE ESTRUTURAS PRÉ-DIMENSIONAMENTO	Designação CORTE A
Elaborado por: JOÃO NOVAIS, Nº 58699	Data 13/10/15
	Número 004



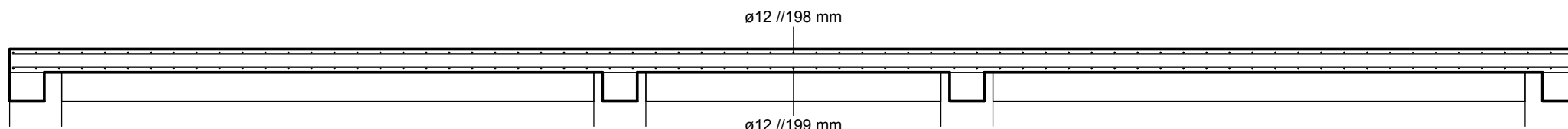
Pormenor viga

1 : 50



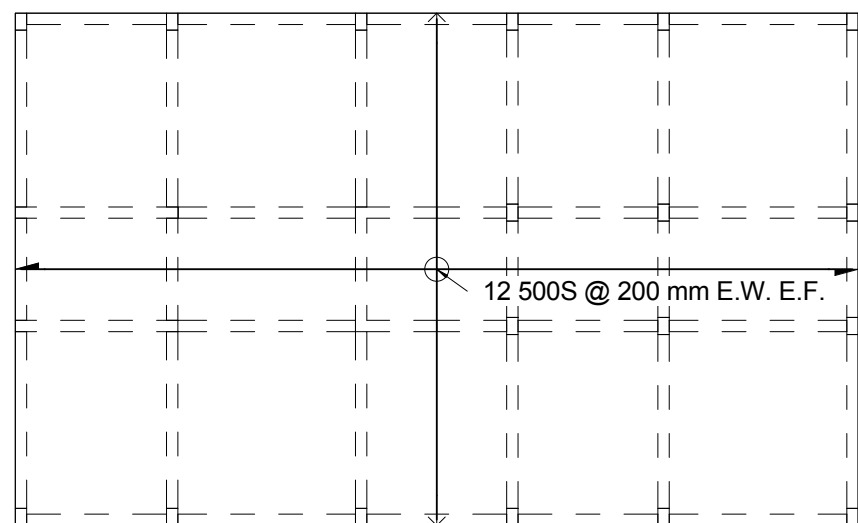
Secção viga

1 : 25



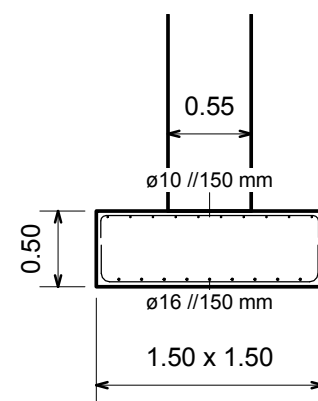
Pormenor laje

1 : 50



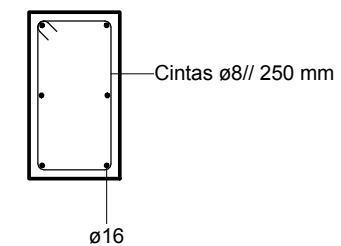
Armadura da cobertura

1 : 200



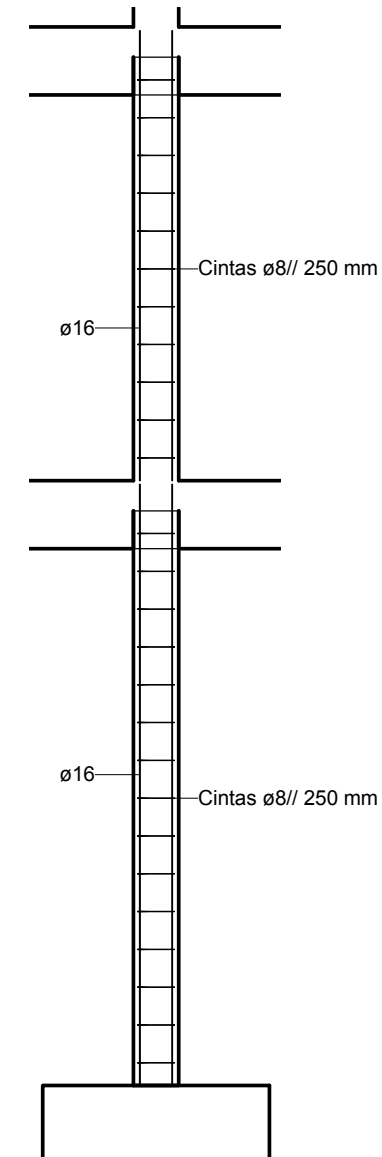
Pormenor sapata

1 : 50



Secção Pilar

1 : 25



Pormenor pilar

1 : 50