



APLICAÇÃO DA METODOLOGIA BIM NO PROJETO DE ESTRUTURAS

KORINA SOPHIA BRUGNERA

Novembro de 2018

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA BIM NO PROJETO DE ESTRUTURAS

KORINA SOPHIA BRUGNERA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS

Orientador: Carlos Filipe Guedes Rodrigues

Co-Orientador: Alfonso Pappalardo Jr.

NOVEMBRO DE 2018

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xvii
Índice de Tabelas.....	xxiii
Glossário.....	xxvii
Abreviaturas	xxix
1 Introdução.....	1
2 Estado da arte	7
3 Manual de boas práticas BIM, baseado nas normas <i>AEC (UK) BIM protocol e common BIM requirements (COBIM)</i>	23
4 Metodologia BIM aplicada ao projeto de estruturas e dimensionamento por cálculo manual de um edifício	31
5 Dimensionamento pelo Robot e comparação de metodologias	69
6 Exportação para o Revit e correções por <i>plug-in</i>	115
7 Utilização dos dados do modelo paramétrico Revit	131
8 Considerações finais.....	141
Referências Bibliográficas	145
Anexo A – Plantas e elevações do estudo de caso.....	151
Anexo B – Memorial de cálculo.....	157
Anexo C – Notas do Robot.....	178

ÍNDICE GERAL

Anexo D – Decalagem, escalonamento e detalhamento	197
Anexo E– Detalhamento no Revit	205

RESUMO

A indústria da construção civil tem vindo a executar algumas etapas da construção de um edifício de forma desconexa e ineficiente. A divisão de um projeto em várias partes distintas, sendo que cada parte é executada por uma entidade diferente, promove lentidão e falta de rigor no produto final do edifício. A melhor integração desta fragmentação tornou-se possível, nos últimos anos por meio da aplicação do *Building Information Modeling* (BIM) dentro dos diferentes ramos da engenharia civil. Motivada por essa transcrição de realidade, este trabalho estuda a aplicação do BIM para um projeto estrutural, transitando desde o projeto arquitetônico, passando pela análise e dimensionamento estrutural, até ao uso de dados do projeto final para aplicações em obra ou por fabricantes. A base para a utilização da ferramenta BIM foram as normas AEC (UK) BIM e *Common BIM requirements* (COBIM), que foram assim, aplicadas na modelagem paramétrica do estudo de caso. A modelagem foi executada no *software* Revit Architecture, exportada para o Revit Structure e, posteriormente, para o Robot Structural Analysis, da Autodesk, promovendo assim a interoperabilidade entre os *softwares*. As etapas de dimensionamento no Robot foram comparadas com cálculos manuais, levantando as possíveis barreiras existentes no uso dos *softwares* para detalhamento de armadura. Para finalizar o fluxo do projeto estrutural, as armaduras foram exportadas para o Revit novamente, detalhadas e corrigidas por meio de um *plug-in* programado em C# pela ferramenta Visual Studio. A partir disso, todas as etapas da dissertação foram trabalhadas para que fosse possível entender a atuação de cada uma dentro da metodologia BIM, bem como os pontos de maior dificuldade da aplicação BIM dentro de um projeto estrutural. Também se salientou a vasta gama de possibilidades inovadoras que podem ser aplicadas aos projetos, por exemplo os *plug-ins*, que serão provavelmente o meio de transformação da metodologia BIM, pois são ferramentas que possibilitam a atuação dos usuários dentro dos *softwares*, criando uma produção personalizada. O resultado final da aplicação do BIM no projeto estrutural é importante para as outras áreas de exploração que ultrapassam o projeto, pelo que se identificam também possíveis destinos destes dados armazenados pela estrutura 3D paramétrica já dimensionada e armada.

Palavras-chave: BIM; Normas BIM; *Plug-in*; Projeto Estrutural.

ABSTRACT

The construction industry has been performing some of its processes in a disconnected and inefficient way. The division of a project into several distinct parts, being that each part is executed by a different entity, brings slowness and lack of rigor in the final product. A better integration of this fragmentation has become possible, in recent years, through the application of Building Information Modeling (BIM) within the many different areas of civil engineering. Motivated by this transition, this work studies the application of BIM into a structural project, going from the architectural design, through analyses and structural design, until the use of the final project's data for applications in construction or by manufacturers. The basis for the use of the BIM tool were the AEC (UK) BIM and Common BIM requirements (COBIM) standards that were applied in the parametric modeling of the case study. The modeling was performed in the Revit Architecture *software*, exported to Revit Structure and later on to the Autodesk's Robot Structural Analysis, promoting thus the interoperability between *software*. The design stages in the Robot were compared to manual calculations, overcoming the possible existing barriers in the use of the *software* for reinforcement detailing. To finalize the structural design flow, the reinforcements were exported to Revit again, detailed and corrected through a plug-in programmed in C# by the Visual Studio tool. All the steps of the dissertation were worked on so that it would be possible to understand the performance of each one within the BIM methodology and the most difficult points of the BIM application within a structural project. It was also highlighted the wide range of innovative possibilities that can be applied to projects, such as the plug-ins, which will probably be the means for transformation of the BIM methodology, for they are tools that allow the users to act within the *software* creating a customized production. The result of the application of BIM in the structural project is important for the other areas of exploration that surpass the project, so it is also possible to identify additional destinations for the data stored in the reinforced BIM model.

Keywords: BIM; BIM Standards; Plug-in; Structural Project.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha família pelo suporte incondicional, não há palavras para descrever o quanto devo a todos os meus irmãos, pai, mãe e madrasta.

Agradeço também aos amigos que me deram suporte, principalmente ao engenheiro Thiago Borba Marques, que me orientou em toda parte de pesquisa relacionada ao *plug-in* desenvolvido no trabalho.

Agradeço ao meu orientador Carlos Filipe Guedes Rodrigues, do Instituto de Engenharia Superior do Porto, pela ótima orientação, sempre me respondendo de maneira rápida e adequada a todos meus questionamentos sobre a dissertação. Agradeço também ao professor co-orientador Alfonso Pappalardo Junior pelo apoio durante todos os anos de estudo na Universidade Presbiteriana Mackenzie.

E, por último, agradeço ao meu noivo, pelo apoio e suporte emocional durante todo o período do mestrado.

ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução.....	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivos.....	5
1.3.1	Objetivo geral	5
1.3.2	Objetivos específicos.....	5
1.4	Estrutura da dissertação	5
2	Estado da arte	7
2.1	Relação da informática com projeto estrutural.....	7
2.2	BIM.....	8
2.2.1	Aplicabilidade em projetos estruturais e estudos do ramo BIM.....	9
2.3	Normas.....	12
2.3.1	Normas BIM.....	12
2.3.2	Normas para o cálculo estrutural	13
2.4	Ferramentas para o desenvolvimento de um <i>Plug-in</i>	15
2.4.1	Dynamo.....	15
2.4.2	Dynamo x Revit API.....	16
2.4.3	Revit API, Microsoft Visual Studio, Net.Framework e C#	16
2.4.4	Trabalhos desenvolvidos com API	19
3	Manual de boas práticas BIM, baseado nas normas <i>AEC (UK) BIM protocol e common BIM requirements (COBIM)</i>	23
3.1	Informações iniciais de projeto	23

3.2	Metodologia de modelagem.....	24
3.2.1	Geral e arquitetônica.....	24
3.2.2	Estrutural.....	25
3.3	Capítulos adicionais de gestão dos arquivos BIM.....	26
3.3.1	<i>Project BIM Execution Plan</i>	26
3.3.2	<i>Collaborative BIM working</i>	26
3.4	Regras gerais criadas pela autora (<i>softwares</i> base Revit e Robot).....	27
4	Metodologia BIM aplicada ao projeto de estruturas e dimensionamento por cálculo manual de um edifício.....	31
4.1	Introdução ao estudo de caso.....	31
4.2	Cargas e combinações.....	34
4.3	Modelo Revit, aplicação do BIM.....	37
4.3.1	Modelo arquitetura.....	38
4.3.2	Modelo estrutural.....	39
4.4	Transferência dos dados do modelo para o Robot.....	41
4.5	Verificações do modelo e comparação de resultados.....	42
4.5.1	Momentos fletores no painel A utilizando a tabela de Montoya.....	45
4.5.2	Momentos fletores no painel A utilizando a tabela de Czerny.....	45
4.5.3	Cálculo pelo Robot e comparação de resultados.....	46
4.6	Dimensionamento das lajes maciças.....	49
4.6.1	Dimensionamento da laje LM3.....	50
4.6.2	Dimensionamento da laje LM6 e LM7.....	54
4.7	Dimensionamento das vigas.....	55
4.7.1	Dimensionamento da viga 1-3.....	55
4.7.1.1	Disposição construtiva para barras inferiores.....	58
4.7.1.2	Disposição construtiva para barras superiores.....	59
4.7.2	Dimensionamento viga 1-5.....	60

4.7.3	Dimensionamento viga 2-1.....	61
4.8	Dimensionamento dos pilares	63
4.8.1	Dimensionamento do Pilar 1	63
4.8.2	Dimensionamento do Pilar 9	65
4.8.3	Dimensionamento do Pilar 15	67
5	Dimensionamento pelo Robot e comparação de metodologias	69
5.1	Configurações iniciais do Robot.....	69
5.2	Dimensionamento das lajes.....	70
5.2.1	Armadura necessária.....	70
5.2.2	Armadura fornecida.....	72
5.2.2.1	<i>Aba calculation options:</i>	72
5.2.2.2	<i>Aba reinforcement pattern</i>	72
5.3	Dimensionamento das vigas	74
5.3.1	Armaduras necessárias.....	74
5.3.2	Armaduras fornecidas	75
5.3.2.1	<i>Aba story parameters</i>	75
5.3.2.2	<i>Aba calculation options:</i>	75
5.3.2.3	<i>Aba reinforcement pattern</i>	77
5.3.2.4	<i>Aba reinforcement of beam</i>	79
5.3.2.5	<i>Abas Cross-Section type e openings</i>	79
5.3.3	Divergências do Robot.....	79
5.4	Dimensionamento dos pilares	80
5.4.1	Armadura necessária.....	80
5.4.2	Armadura fornecidas.....	81
5.4.2.1	<i>Aba calculation options</i>	82
5.4.2.2	<i>Aba reinforcement pattern</i>	83
5.4.2.3	<i>Aba Reinforcement of columns</i>	84

ÍNDICE DE TEXTO

5.4.2.4	Aba <i>Buckling Lengths</i>	84
5.4.2.5	Aba <i>Load definition e Governing cases results.</i>	85
5.5	Dimensionamento e detalhamento de lajes Manual x Robot	85
5.5.1	Laje LM3.....	86
5.5.2	Laje LM6.....	90
5.5.3	Laje LM7.....	93
5.5.4	Observações finais.....	95
5.6	Dimensionamento e detalhamento de vigas Manual x Robot	96
5.6.1	Viga 1-3.....	96
5.6.1.1	Armaduras necessárias.....	96
5.6.1.2	Armadura fornecida de esforço transverso	97
5.6.1.3	Armadura fornecida longitudinal inferior	98
5.6.1.4	Armadura fornecida longitudinal superior.....	99
5.6.2	Viga 1-5.....	102
5.6.3	Viga 2-1.....	102
5.6.4	Observações finais.....	103
5.7	Dimensionamento e detalhamento de pilares Manual x Robot.....	106
5.7.1	Pilar 1	106
5.7.2	Pilar 9.....	108
5.7.3	Pilar 15.....	111
5.7.4	Observações finais.....	113
6	Exportação para o Revit e correções por <i>plug-in</i>	115
6.1	Introdução.....	115
6.2	Exportação das vigas.....	115
6.3	Exportação dos pilares.....	117
6.4	Vantagens, problemas e conclusões sobre a exportação.....	118
6.5	<i>Plug-in</i>	119

6.5.1	<i>Plug-in</i> para modificar o diâmetro das dobras das armaduras	120
7	Utilização dos dados do modelo paramétrico Revit	131
7.1	Introdução.....	131
7.2	Detalhamento das armaduras e documentação	131
7.3	Levantamento de materiais e cálculo de custo	133
7.4	Análise e planejamento na indústria da construção	135
7.5	Uso do Bim para fabricantes e empreiteiros	139
8	Considerações finais.....	141
8.1	Conclusões	141
8.2	Desenvolvimentos Futuros	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – BIM aplicado as fases de um projeto de estruturas (Ferreira et al., 2012).....	2
Figura 1.2 – BIM aplicado ao projeto de estruturas em análise.	2
Figura 1.3 – Tempo gasto CAD x BIM (Silveira, 2016).....	4
Figura 2.1 – Aplicação do BIM no mundo (Mistry, 2018).	14
Figura 2.2 – Programação visual (Autodesk, 2018).....	15
Figura 2.3 – Programação por código (Autodesk, 2018).....	15
Figura 2.4 – Revit API x Dynamo (Kilkelly, 2017).....	16
Figura 2.5 – Diagrama de funcionamento do dotNet.	17
Figura 2.6 – Manifesto para o <i>plug-in Hallo World</i>	19
Figura 2.7 – Diagrama de simulação do processo (Wu e Clayton, 2013).....	21
Figura 3.1 – Divisão da metodologia CDE (AEC (UK) Committee, 2012).....	27
Figura 3.2 – Erro de conexão entre os elementos estruturais.....	28
Figura 3.3 – Erro de modelagem.	28
Figura 4.1 – Planta do 1º andar.....	31
Figura 4.2 – Planta do 2º andar.....	32
Figura 4.3 – Planta do 3º andar.....	32
Figura 4.4 – Elevação.....	33
Figura 4.5 – Planta com eixos de aplicação do vento.	35
Figura 4.6 – Zonas de neve conforme Eurocódigo (NP EN 1991-1-3, 2009).....	36
Figura 4.7 – Sobrecargas no 1º andar.	36
Figura 4.8 – Importação Autocad para Revit.....	38
Figura 4.9 – Modelação básica.	38

Figura 4.10 – Modelação com detalhes como janelas e portas.....	38
Figura 4.11 – Corte do detalhe da escada.....	38
Figura 4.12 – Perca de vínculo por atualização do <i>software</i>	39
Figura 4.13 – Importação da arquitetura em forma de <i>link</i>	39
Figura 4.14 – Partes da modelagem arquitetônica reaproveitadas.....	39
Figura 4.15 – Modelo estrutural sem as cargas aplicadas.	40
Figura 4.16 – Modelo analítico.....	40
Figura 4.17 – Fundação sobre a parede estrutural no Robot.	41
Figura 4.18 – Estrutura carregada.....	41
Figura 4.19 – Modo de cálculo em uma direção.....	42
Figura 4.20 – Estrutura calculada.....	42
Figura 4.21 – Deformações do modelo estrutural para combinação QPR.....	43
Figura 4.22 – Momentos fletores em y, COMB1.....	43
Figura 4.23 – Esforço transverso em z, COMB1.	43
Figura 4.24 – Momentos fletores em x, COMB1.....	43
Figura 4.25 – Deformação da escada.....	44
Figura 4.26 – Momentos fletores em x, COMB1 na escada.....	44
Figura 4.27 – Planta do Piso 1 com o Painel A.	44
Figura 4.28 – Condições de Apoio do Painel A.....	44
Figura 4.29 – Momentos na direção x, painel A.....	47
Figura 4.30 – Momentos na direção y, painel A.....	47
Figura 4.31 – Painel Cut momento negativo na direção x, painel A.	47
Figura 4.32 – Painel Cut momento negativo na direção y, painel A.	47
Figura 4.33 – Deformação das vigas.....	48
Figura 4.34 – Deformação geral.....	48
Figura 4.35 – Deformação das vigas com rigidez aumentada.....	48
Figura 4.36 – Deformação geral, vigas com rigidez aumentada.....	48

Figura 4.37 – Momento em y.....	48
Figura 4.38 – Momento em y, rigidez das vigas aumentada.....	48
Figura 4.39 – Momento na direção x, painel A engastado.....	49
Figura 4.40 – Momento na direção y, painel A engastado.....	49
Figura 4.41 – Momentos positivos na direção y LM3.....	51
Figura 4.42 – Momentos positivos na direção x LM3.....	51
Figura 4.43 – Momentos negativos na direção y LM3.....	51
Figura 4.44 – Momentos negativos na direção x LM3.....	51
Figura 4.45 – Esforço transversal em y na laje LM3.....	51
Figura 4.46 – Esforço transversal em x na laje LM3.....	51
Figura 4.47 – Gráfico de esforço transversal em y.....	54
Figura 4.48 – Momentos resultantes da viga 1-3.....	55
Figura 4.49 – Esforços transversos resultantes da viga 1-3.....	56
Figura 4.50 – Denominação dos elementos.....	58
Figura 4.51 – Seção da viga com os varões distribuídos.....	58
Figura 4.52 – Momentos atuantes na viga 1-5.....	60
Figura 4.53 – Esforços transversos na viga 1-5.....	60
Figura 4.54 – Momentos atuantes na viga 2-1.....	61
Figura 4.55 – Esforços transversos na viga 2-1.....	61
Figura 5.1 – Opções <i>Job Preference</i>	70
Figura 5.2 – Opções para a aba <i>Calculations</i> de lajes.....	72
Figura 5.3 – Armação com a opção <i>Entire plate</i>	73
Figura 5.4 – Armação LM3 utilizando <i>Single plate</i>	73
Figura 5.5 – <i>Code parameters</i> das vigas.....	75
Figura 5.6 – <i>Calculation Parameters</i> das vigas.....	75
Figura 5.7 – Definição da divisão <i>General</i> em <i>Calculation Option</i>	76
Figura 5.8 – Configurações do <i>Advanced Options</i>	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.9 – Definição da divisão <i>General</i> em <i>Reinforcement Pattern</i>	78
Figura 5.10 – Definição da divisão <i>Transversal Reinf.</i> em <i>Reinforcement Pattern</i>	78
Figura 5.11 – <i>Code parameters</i> dos pilares.	81
Figura 5.12 – Definição da divisão <i>General</i> em <i>Calculation Options</i> de pilares.	83
Figura 5.13 – Definição da divisão <i>Longitudinal Bars</i> para pilares.	84
Figura 5.14 – Definição da aba <i>Buckling lenghts</i>	84
Figura 5.15 – Mapa de armaduras positivas em XX.	86
Figura 5.16 – Mapa de armaduras positivas em YY.	86
Figura 5.17 – Mapa de armaduras negativas em XX.	86
Figura 5.18 – Mapa de armaduras negativas em YY.	86
Figura 5.19 – Armação inferior LM3 em x.	87
Figura 5.20 – Armação inferior LM3 em y.	87
Figura 5.21 – Armação superior LM3 em x.	87
Figura 5.22 – Armação superior LM3 em y.	87
Figura 5.23 – Armação inferior LM3 em x, Robot.	88
Figura 5.24 – Armação superior LM3 em x, Robot.	88
Figura 5.25 – Armação superior LM3 em y, Robot.	88
Figura 5.26 – Detalhes das ancoragens nos apoios.	88
Figura 5.27 – Armação inferior LM3, manual.	89
Figura 5.28 – Armação superior LM3, manual.	89
Figura 5.29 – Nota das armaduras da laje LM3 do Robot.	90
Figura 5.30 – Armação inferior LM6 em x, Robot.	91
Figura 5.31 – Armação inferior LM6 em y, Robot.	91
Figura 5.32 – Armação superior LM6 em x, Robot.	91
Figura 5.33 – Armação superior LM6 em y, Robot.	91
Figura 5.34 – Armação inferior LM6, manual.	92
Figura 5.35 – Armação superior LM6, manual.	92

Figura 5.36 – Armação superior 3D da laje LM6.	93
Figura 5.37 – Armação Robot 3D laje LM7.	94
Figura 5.38 – Armação inferior LM7 em x, Robot.	94
Figura 5.39 – Armação inferior LM7 em y, Robot.	94
Figura 5.40 – Armação superior LM7 em x, Robot.	94
Figura 5.41 – Armação superior LM7 em y, Robot.	94
Figura 5.42 – Armação inferior LM7, manual.	95
Figura 5.43 – Armação superior LM7, manual.	95
Figura 5.44 – Disposição dos estribos V1-3.	101
Figura 5.45 – Armadura longitudinal V1-3.	101
Figura 5.46 – Armadura longitudinal V1-5, cálculo manual.	104
Figura 5.47 – Armadura longitudinal V1-5, cálculo Robot.	104
Figura 5.48 – Armadura longitudinal V2-1, cálculo manual.	105
Figura 5.49 – Armadura longitudinal V2-1, cálculo Robot.	105
Figura 5.50 – Armação Robot P1, do térreo ao 1º andar.	107
Figura 5.51 – Armação Robot P1, do 1º andar ao 2º andar.	107
Figura 5.52 – Armação P1 pela metodologia manual (Anexo D).	108
Figura 5.53 – Armação Robot P9, do térreo ao 1º andar.	110
Figura 5.54 – Armação Robot P9, do 1º ao 2º andar.	110
Figura 5.55 – Armação Robot P9, do térreo ao 2º ao 3º andar.	110
Figura 5.56 – Armação manual P9.	110
Figura 5.57 – Armação Robot P15, do térreo ao 1º andar.	112
Figura 5.58 – Armação Robot P15, do 1º ao 2º andar.	112
Figura 5.59 – Armação Robot P15, do térreo ao 2º ao 3º andar.	113
Figura 5.60 – Armação Robot P15, do 1º ao 2º andar.	113
Figura 6.1 – Erro na transferência de dados da armadura para viga V1-6.	116
Figura 6.2 – Erro na transferência de dados da armadura para viga V1-8.	116

Figura 6.3 – Exportação do Robot para o Revit das vigas completas.....	116
Figura 6.4 – Encontro das armaduras das vigas V2-3 e V2-4.	117
Figura 6.5 – Encontro das armaduras das vigas V3-3 e V3-9.	117
Figura 6.6 – Pilares importados do Robot.....	118
Figura 6.7 – Nós do pórtico entre as vigas V2-3 e V2-4 e o pilar P11	118
Figura 6.8 – Nós do pórtico entre as vigas V3-3 e V3-9 e o pilar P10.	118
Figura 6.9 – Fluxograma da lógica do <i>Plug-in</i>	121
Figura 6.10 – Etapa início do <i>Plug-in</i>	122
Figura 6.11 – Etapas desde a seleção da barra até resultado fyk no display.....	123
Figura 6.12 – Filtro aplicado na barra.....	123
Figura 6.13 – Quinta e sexta etapa do <i>plug-in</i>	124
Figura 6.14 – Form da quinta e sexta etapa	124
Figura 6.15 – Programação do botão.	125
Figura 6.16 – Etapas sete e oito do <i>plug-in</i>	126
Figura 6.17 – Parâmetros da barra selecionada.....	126
Figura 6.18 – <i>InternalDefinition</i> parâmetro do diâmetro.	127
Figura 6.19 – Nona etapa do <i>plug-in</i>	128
Figura 6.20 – Nona etapa do <i>plug-in</i>	128
Figura 6.21 – Nona etapa do <i>plug-in</i>	128
Figura 7.1 – Exemplo de elevação e corte da viga V1-3.....	132
Figura 7.2 – Modelo no Naviswork e propriedades.	136
Figura 7.3 – Tarefa armação das vigas do 1º.....	137
Figura 7.4 – Tarefa de concretagem das vigas e lajes do 1º andar.	137
Figura 8.1 – Releitura do fluxo da tese, demonstrando os pontos de maior dificuldade por cores.	141

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais palavras para escrever um manifesto.	19
Tabela 4.1 – Características e Espessuras das Lajes do Edifício.	33
Tabela 4.2 – Dados dos materiais.	33
Tabela 4.3 – Cobrimento mínimo para requisitos relativos à durabilidade, $C_{min,dur}$ (mm).	34
Tabela 4.4 – Cargas permanentes do primeiro caso de estudo.	34
Tabela 4.5 – Resumo de sobrecargas utilizadas no edifício.	34
Tabela 4.6 – Resumo de sobrecargas do vento no eixo y.	35
Tabela 4.7 – Resumo de sobrecargas do vento no eixo x.	35
Tabela 4.8 – Nomenclatura das cargas.	37
Tabela 4.9 – Combinações para Estado Limite Último.	37
Tabela 4.10 – Tabela de Montoya para o Painel A (Montoya, Meseguer e Cabré, 2001).	45
Tabela 4.11 – Fatores a utilizar nos momentos para o Painel A.	45
Tabela 4.12 – Momentos fletores para o painel A pelo método de Montoya.	45
Tabela 4.13 – Tabela de Czerny (Beton Kalender, 1976).	46
Tabela 4.14 – Momentos fletores para o painel A pelo método de Czerny.	46
Tabela 4.15 – Comparação entre os resultados de Montoya e do Robot.	47
Tabela 4.16 – Comparação entre resultados do painel A.	49
Tabela 4.17 – Dados para cálculo da laje LM3.	50
Tabela 4.18 – Armadura em y LM3.	52
Tabela 4.19 – Armadura x LM3.	53
Tabela 4.20 – Dados para o cálculo das armaduras da LM6.	54
Tabela 4.21 – Dados para o cálculo das armaduras da LM7.	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.22 – Resultados do dimensionamento da laje LM6.	55
Tabela 4.23 – Resultados do dimensionamento da laje LM7.	55
Tabela 4.24 – Dados para armadura longitudinal.	56
Tabela 4.25 – Dados para cálculo de estribos.	56
Tabela 4.26 – Dimensionamento para o esforço transverso máximo.	57
Tabela 4.27 – Dimensionamento para o esforço transverso de 163 kN.	57
Tabela 4.28 – Resultados do dimensionamento armaduras para apoios centrais e armadura positiva. ...	57
Tabela 4.29 – Dados para armadura longitudinal V1-5.	60
Tabela 4.30 – Dados para cálculo de estribos V1-5.	60
Tabela 4.31 – Resultado do dimensionamento da armadura da V1-5.	61
Tabela 4.32 – Dimensionamento de estribos da V1-5.	61
Tabela 4.33 – Dados para dimensionamento da armadura V2-1.	62
Tabela 4.34 – Dados para cálculo dos estribos da V2-1.	62
Tabela 4.35 – Resultado do dimensionamento da armadura da V2-1.	62
Tabela 4.36 – Dimensionamento dos estribos V2-1.	62
Tabela 4.37 – Análise dos nós.	63
Tabela 4.38 – Dados para o cálculo do pilar 1.	63
Tabela 4.39 – Cálculo do pilar 1.	64
Tabela 4.40 – Cálculo da armação P1 – parte 1.	64
Tabela 4.41 – Cálculo da armação P1 – parte 2.	64
Tabela 4.42 – Dados para o cálculo do pilar 9.	65
Tabela 4.43 – Resultados do dimensionamento do pilar 9.	66
Tabela 4.44 – Cálculo da armação do P9 – Parte 1.	66
Tabela 4.45 – Cálculo da armação do P9 – Parte 2.	66
Tabela 4.46 – Cálculo da armação do P9 – Parte 3.	66
Tabela 4.47 – Dados para o cálculo do pilar 15.	67
Tabela 4.48 – Resultados do dimensionamento do pilar 15.	67

Tabela 4.49 – Cálculo da armação do P15 – Parte 1	68
Tabela 4.50 – Calculo da armação do P15 – Parte 2	68
Tabela 4.51 – Calculo da armação do P15 – Parte 3	68
Tabela 5.1 – Comparação entre as armaduras necessárias das metodologias utilizadas da LM3.....	87
Tabela 5.2 – Comparação entre armaduras fornecidas LM3.	90
Tabela 5.3 – Comparação entre as armaduras necessárias das metodologias utilizadas da LM6.....	91
Tabela 5.4 – Comparação entre armaduras fornecidas LM6.	92
Tabela 5.5 – Comparação entre as armaduras necessárias das metodologias utilizadas da LM7.....	93
Tabela 5.6 – Comparação entre armaduras fornecidas LM7.	93
Tabela 5.7 – Comparação entre armaduras necessárias V1-3.	96
Tabela 5.8 – Comparação entre armaduras necessárias V1-5.	102
Tabela 5.9 – Comparação entre armaduras necessárias V1-5.	103
Tabela 5.10 – Diferença entre as armaduras necessárias do pilar P1.....	106
Tabela 5.11 – Diferença entre as armaduras necessárias do pilar P9.....	109
Tabela 5.12 – Diferença entre as armaduras necessárias do pilar P15.....	111
Tabela 7.1 – Quantidade de materiais e custo de todas as vigas.	133
Tabela 7.2 – Quantidade de aço e custo.	135
Tabela 7.3 – Cronograma Naviswork.	137

GLOSSÁRIO

Building Information Modeling (BIM)

BIM é um conjunto de informações geradas a partir de um modelo paramétrico, que são utilizadas durante todo ciclo de vida de um edifício.

Interoperabilidade

A capacidade de conversação entre diferentes *softwares* e tecnologias visando a troca de informação entre as diversas áreas de trabalho no ramo da AEC.

Dynamic-link library

Bibliotecas compartilhadas dentro do sistema operacional Microsoft Windows.

Framework

Contém diversas funções unindo códigos comuns de diversos projetos para prover uma funcionalidade genérica.

Assembly

Linguagem de programação de baixo nível, ou seja, linguagem máquina.

Plug-in

Definido como um modulo de extensão, é um programa de computador que adiciona funções a outros programas maiores.

Gancho

Conjunto que leva em consideração a dobra e o trecho reto de uma amarração.

ABREVIATURAS

AEC – Arquitetura, Engenharia e Construção

BIM – *Building Information Modeling*

MEF – Método dos Elementos Finitos

COBIM – *Common BIM Requirements* (Finnmap Consulting Oy *et al.*, 2012)

REBAP – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP, 1984)

RSA – Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA, 1983)

Robot – *Autodesk Robot Structural Analysis* (Autodesk, 2018)

EC2 – NP EN 1992, Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010)

IFC – *Industry Foundation Class*

API – *Application Programming Interface*

dll – *Dynamic-link library*

SDK – *Revit Software Development Kit*

C# – *C Sharp*

CAD – *Computer Aided Design*

ELS ou SLS – Estado Limite de Serviço

ELU – Estado Limite Último

E_c – Módulo de Elasticidade Tangente na Origem

I – Momento de Inércia da Seção de Concreto

E_{cm} – Módulo de Elasticidade Secante do Concreto

BVBS – *Bundesvereinigung der BauSoftwarehäuser E.V.*

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O ramo da AEC sempre esteve envolvido no ciclo de vida útil de uma edificação. As fases desde a arquitetura até a gestão e monitoramento de edifícios eram feitas de maneira separada, com pouca troca de informação. As sequências executivas de qualquer projeto nos ramos da AEC passam por modelações em *softwares* e cálculos dentro de programas ou planilhas programadas com intuito de minimizar qualquer tempo gasto em excesso. Mesmo assim, a troca de informação ainda continua escassa entre as áreas, ou seja, evoluiu-se a forma de executar cada tipo de projeto, mas não estão ainda eliminados os erros por falta de compatibilização. Por esse motivo, uma metodologia chamada BIM começou a proliferar-se no setor.

A história do BIM começa com um protótipo de trabalho chamado "*Building Description System*" (1975), e publicado no extinto *AIA Journal* por Charles M. "Chuck" Eastman. O estudioso descrevia algumas noções de BIM que são utilizadas até hoje como: "qualquer mudança de arranjo teria que ser feita apenas uma vez para todos os desenhos futuros" ou "qualquer análise quantitativa poderia ser ligada diretamente à descrição". Essas e outras frases de seu trabalho já tinham como objetivo um modelo que tivesse, além das dimensões dos elementos, informações que pudessem abastecer toda a vida útil de um edifício. No período de 1970 a 1980, pesquisas sobre este assunto começaram a ser feitas no Reino Unido. Já a partir de 1980, o BIM foi mais desenvolvido pelos americanos, que o chamavam de "*Building Product Models*", e pelos Finlandeses, que o chamavam de "*Product Information Models*" (Eastman *et al.*, 2008).

A nomenclatura do BIM surgiu, portanto, da junção dos diferentes nomes aplicados pela Europa e Estados Unidos. Em 1986, Robert Aish (atualmente na *Bentley Systems*) usou pela primeira vez em um artigo documentado o termo *Building Modeling*. O artigo se tratava da aplicação de um *software* chamado RUCAPS, da empresa *GMW Computers Ltd*, para renovação do Terminal 3 de *Heathrow* em Londres (Aish, 1986). Seguidamente, em dezembro de 1992 o termo BIM foi utilizado em um artigo escrito por Van Nederveen e F. Tolman sobre automação da construção, em que as ideias apresentadas chegavam muito próximas de como é definido o BIM atualmente (Nederveen e Tolman, 1992). Nederveen e Tolman falam no artigo de integração das diferentes visões do mesmo elemento de um edifício entre designers (arquitetos) e engenheiros estruturais e de energia.

Atualmente, o BIM é definido de diversas maneiras, e uma das definições que mais cabe neste momento é feita pela Secretaria de Planejamento do Estado de Santa Catarina: “um processo que permite a gestão da informação, por todo o ciclo de vida da edificação” (Governo de Santa Catarina, 2015). Isto é, não é só um simples processo, como criar modelos 3D ou utilizar *softwares*, mas sim estar ciente das informações de todo processo do ciclo de vida de um edifício por meio da troca de dados (Handbook, 2014). Outra definição interessante é a do buildingSMARTS, que coloca o BIM como uma representação digital, física e funcional das características de uma instalação e a troca de informações dentro de todo um ciclo de vida de um edifício (BuildingSMART, [s.d.]).

Tratando-se de BIM, seu grande diferencial recai sobre a capacidade de modelagem paramétrica e interoperabilidade. A parametrização permite que os dados de cada elemento sejam inseridos em sua modelagem nos *softwares* (Papadopoulos, 2014). Esses dados de geometria, seções ou qualquer informação necessária podem ser compartilhados com outros *softwares*, gerando o ciclo de informação citado nas definições.

O trabalho aqui descrito aplicou a metodologia BIM voltado a um ramo específico da engenharia civil, que se trata do projeto estrutural de um edifício. Dentro de um projeto estrutural existem diversas fases, incluindo o modelo arquitetônico inicial, que devem ser trabalhadas em conjunto com toda a equipe de um escritório. O fato de se poder aplicar o BIM em nichos menores diminui a incompatibilidade dentro de escritórios de qualquer ramo da AEC (Ferreira *et al.*, 2012). Nesse sentido, a Figura 1.1 mostra o diagrama da interoperabilidade BIM em um projeto de estruturas padrão, enquanto a Figura 1.2 mostra o que foi concretamente efetivado na presente dissertação.

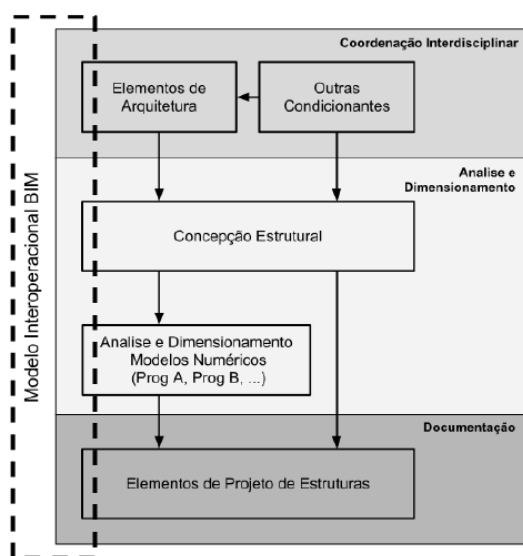


Figura 1.1 – BIM aplicado as fases de um projeto de estruturas (Ferreira et al., 2012).

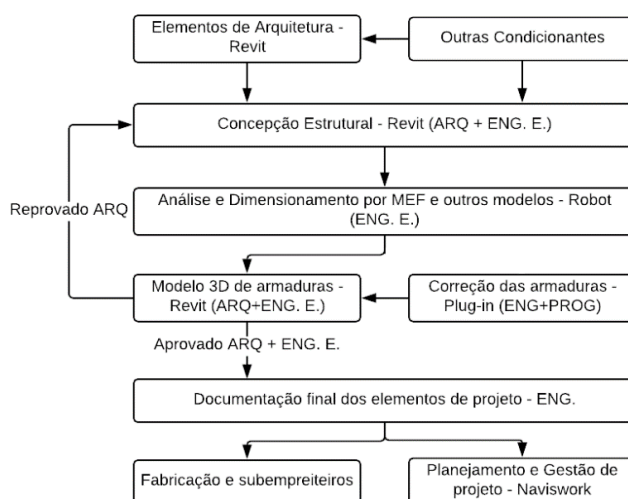


Figura 1.2 – BIM aplicado ao projeto de estruturas em análise.

Na sequência apresentada, a Figura 1.2 segue o fluxo de um edifício na fase de projeto até sua entrega para execução. O BIM começou a ser implementado pelos escritórios de arquitetura principalmente por melhorar a qualidade do projeto, diminuir o prazo de entrega e reduzir sua carga horária (Souza, Amorim e Lyrio, 2009). A parametrização evita retrabalho, pois com a mudança de um elemento, os outros são atualizados automaticamente se adaptando a essas mudanças.

Na Figura 1.2, a primeira e segunda fases são ligadas diretamente uma com a outra, gerando a importante troca de informações entre arquitetura (ARQ) e a engenharia estrutural (ENG.E.). A concepção estrutural é baseada, desta maneira, na arquitetura do projeto sendo, que as mudanças de quaisquer elementos são compartilhadas entre as equipes automaticamente sem perda de dados. A terceira, porém, é caracterizada pela atuação somente dos engenheiros de cálculo. Com dimensionamento pronto, suas características retornam para o *software* de modelagem ou para um *software* que tenha abertura para trocar informações posteriormente com outros. Nesta quarta fase, a interoperacionalidade é bastante ativa, tendo a troca de informações com a arquitetura para atualizar possíveis mudanças devido ao dimensionamento e o trabalho em conjunto entre engenheiro e programadores (PROG) para solucionar erros criados pelos *softwares* em geral. Com a aprovação da engenharia e da arquitetura, a quinta fase é a documentação de todo dimensionamento. A sexta fase consiste na utilização dos dados gerados pelo BIM no mercado como um todo.

1.2 MOTIVAÇÃO

A evolução tecnológica na engenharia civil é considerada lenta e não acompanha outras áreas da indústria no quesito inovação. Para esse atraso, a solução não é exata e tem diversas facetas. Alguns dos motivos citados são o conservadorismo existente nas empresas de engenharia civil, a descontinuidade no processo de aprendizagem, por serem empresas de projetos, e a causa mais provável: a metodologia de funcionamento do ramo da engenharia civil (Gradwohl, Freitas e Heineck, 2011). Esse atraso tecnológico causa a fragmentação do processo de implementação de um edifício e a dependência de formas de comunicação em papel. Os documentos gerados em papel com erros ou omissões causam gastos imprevistos e erros de projetos.

Nos últimos anos, tentou-se o compartilhamento em tempo real de arquivos em nuvens, porém, isto não solucionou os conflitos por falta de informações nos arquivos (Eastman *et al.*, 2008). A metodologia atual aplicada nos escritórios de cálculo é a utilização de sistemas CAD, considerados ineficientes comparados a uma possível transformação de análises 2D para 3D a 8D com o BIM. A utilização do CAD traz junto de si problemas como duplicações de arquivos, retrabalho, prazos de entrega, pressão do mercado, superprodução, tarefas paralelas, falta de confiabilidade nos dados, falta de rigor no design, falta de gerenciamento e comunicação no projeto (Arayici *et al.*, 2011). Muitas vezes, diversos escritórios têm que

sacrificar funcionários apenas para desenvolver e concertar desenhos CAD, eliminando possíveis incompatibilidades dentro do projeto. A mudança do CAD para o BIM tem como fundamento acabar com todos esses problemas, gerando um projeto mais confiável e compatibilizado entre as diversas áreas atuantes no projeto. O que levará a esta mudança é o fato de o BIM ser um modelo paramétrico, ou seja, além da geometria os objetos possuem outros atributos, obedecem a regras e possuem relações entre si. Assim, o BIM contém informações para uma vida útil inteira de um edifício, e pode ser alterado e visualizado por qualquer usuário que esteja trabalhando no projeto em questão.

A troca de informações pode evitar acontecimentos regulares de gastos por falta de comunicação, erros de compatibilização de projeto ou execução em obra. Isto causaria uma economia financeira grande para muitos países, por exemplo o país citado por Justi (2008): “Ineficiências, enganos e atrasos chegam a U\$200 bilhões dos \$650 bilhões gastos em construção nos EUA todo ano”. O BIM por si só é a justificativa de eliminar erros de projetos, diminuindo o tempo sem perder a qualidade. Segundo Silveira (2016), se comparar o uso do BIM e do CAD (ver Figura 1.3), o tempo de trabalho gasto na parte de anteprojeto é menor utilizando o CAD do que o BIM, porém, nos detalhes, por estar tudo sendo executado na mesma hora, o BIM é mais rápido que o CAD.

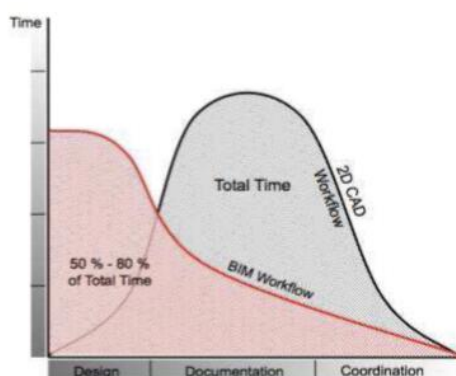


Figura 1.3 – Tempo gasto CAD x BIM (Silveira, 2016)

Um conjunto de vantagens vem acompanhado da aplicação da metodologia BIM no setor da AEC. As principais, tirando as já citadas durante o texto precedente, são: melhor planejamento do projeto, visualização em 3D, facilidade de estimativas de quantidades e custos, e aumento de produtividade sem perder qualidade. No âmbito do projeto estrutural, todas essas vantagens podem ser aplicadas para melhorar o projeto. A troca de informações ocorre em sua maioria entre os diferentes *softwares* utilizados, tais como programas de cálculo, desenho e modelagem (Tarrafa, 2012). Mas, apesar de todas as vantagens, o BIM ainda tem limitações e problemas que precisam ser pesquisados e solucionados. Nesse sentido, pode-se concluir que, para além da otimização dos benefícios, solucionar os problemas atuais do BIM é uma das grandes motivações das pesquisas atuais.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho foi abordar um projeto estrutural desde a fase arquitetônica até o dimensionamento e detalhamento das armaduras dos elementos estruturais, tirando partido da metodologia BIM, tendo em mente também o possível uso destes dados gerados em outras áreas da engenharia civil.

1.3.2 Objetivos específicos

Dentro dos estudos sobre o BIM em um projeto de estruturas, alguns pontos serão observados com mais atenção, tornando-se os objetivos específicos do trabalho.

O primeiro ponto de importância é o estudo de normas para melhorar o desempenho do projeto.

O segundo ponto é que o uso de diversos *softwares* pode causar erros de interoperabilidade, por isso, verificar sempre os modelos após importação de outro *software* é de extrema importância. Essa verificação deve ser efetuada por meio de cálculos manuais (comparados aos resultados dos modelos), análise do comportamento do modelo e posicionamento das armaduras na exportação final do Robot para o Revit.

O terceiro ponto é a validação dos resultados obtidos pelo *software* de cálculo. Dentro de um projeto estrutural não é admissível existirem erros de dimensionamento, desta maneira, a verificação por meio de cálculos manuais é de grande importância para se ter certeza da veracidade dos resultados.

O quarto ponto é a correção desses problemas de dimensionamento de projeto por meio de *plug-ins* dentro do Revit. Como o intuito do trabalho é aplicar o BIM aumentando a produtividade com qualidade, corrigir os erros do *software* à mão implicaria no retorno ao CAD ou mesmo edição 2D dentro do Robot. Erros pontuais podem ser corrigidos desta maneira, porém, erros recorrentes devem ser programados afim de se adaptarem melhor ao que o BIM propõe atualmente ao mercado.

O quinto e último ponto é o uso dos dados e detalhamentos gerados pelo Revit para outras áreas da engenharia civil.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é dividida em sete capítulos principais, sendo o Capítulo 1 o aqui descrito, e os outros que abordam os seguintes temas:

CAPÍTULO 1

- Capítulo 2: base de estudos iniciais para a dissertação. Foca principalmente no estudo do BIM em geral, trazendo normas e métodos para se desenvolver *Add-ins* no Revit;
- Capítulo 3: as normas são a base de qualquer projeto estrutural, e, por isso, este capítulo é separado para análise e estudo de normas BIM que não são tão conhecidas no mercado, como os Eurocódigos, RSA e REBAB. Engloba também um manual de utilização BIM elaborado pela autora para evitar erros que foram encontrados neste projeto;
- Capítulo 4: este capítulo engloba os estudos principais da tese. Aborda, por meio do estudo de caso, a utilização do BIM desde a arquitetura até o dimensionamento final dos elementos. São desenvolvidos cálculos manuais para comparação com os cálculos por *software*, assunto abordado com mais detalhamento no capítulo seguinte;
- Capítulo 5: a validação dos resultados de dimensionamento do capítulo anterior, feita a partir de comparações. Os possíveis erros de dimensionamento do Robot são aqui observados e anotados.
- Capítulo 6: explora a exportação das armaduras do Robot para o Revit e a correção de alguns erros do capítulo anterior por meio de *plug-ins*.
- Capítulo 7: Relata algumas utilidades para os dados gerados pelo projeto estrutural concluído nos capítulos anteriores.
- Capítulo 8: conclui sobre o uso do BIM em um projeto de estruturas, analisando a aplicação das normas, a interoperabilidade e veracidade da utilização de *softwares* para modelagem e dimensionamento. Finaliza com observações sobre a aplicação de *plug-ins* no Revit e futuros desenvolvimentos nessa área.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 RELAÇÃO DA INFORMÁTICA COM PROJETO ESTRUTURAL

Antes de se falar em BIM, existem assuntos sobre a aplicação de *softwares* dentro da engenharia estrutural que são importantes de serem abordados com intuito de evitar erros dentro dos projetos. Acerca disso, o livro do brasileiro Alio Kimura (2018) aponta a importância do engenheiro estrutural na utilização do *software* de forma correta. O entendimento de toda a parte técnica de cálculo estrutural é de grande importância para que o engenheiro perceba se o modelo está reagindo conforme o esperado. A verificação destes modelos pode ser executada por meio de validação manual e previsão de resultados — como por exemplo a deformação esperada de uma viga.

Não é sempre que os modelos mais complexos são os mais indicados para analisar situações específicas. A esse respeito, Kimura (2018) cita diversos tipos de modelos estruturais, como: método da viga contínua, pórtico plano, pórtico espacial, grelha somente de vigas, grelha de vigas e lajes e, por fim, modelo estrutural em 3D. Às vezes, para o cálculo de um edifício, pode-se usar diversos modelos diferentes: para sismo, por exemplo, pode-se modelar em 3D com um *software* de MEF e verificar os deslocamentos manualmente em um modelo de pórtico plano. Quando a estrutura é mais simples, a utilização de modelos 3D completos pode ser exagerada, gerando um tempo de trabalho maior que poderia ter sido realizado com uma análise reduzida por outro modelo. Logicamente, os modelos mais limitados têm alguns problemas, como o de viga contínua, que não analisa a ligação do nó do pilar com a viga. Seguindo os passos de um projeto estrutural, o livro aborda a importância de cada passagem do projeto no *software*, acompanhada com as análises que um engenheiro deve fazer antes de aceitar os resultados obtidos. Assim, a importância da verificação dos resultados dos esforços solicitantes e do dimensionamento são descritos no Capítulo 5 do livro de forma detalhada.

Indo ao encontro aos problemas citados por Kimura, um artigo publicado pelo americano Leroy Z. Emkin (2017) vai mais afundo nas críticas ao uso de novos *softwares* em que o engenheiros não tem consciência do que estão realmente executando. O autor também cita os diversos problemas que a utilização de *softwares* por engenheiros inexperientes pode causar, como a falta de percepção e entendimento da estrutura. Se o engenheiro não sabe como o *software* funciona e como calcularia o edifício sem as ferramentas disponibilizadas pela informática, torna-se muito difícil entender os resultados fornecidos

pelo *software* de maneira efetiva e verificar todos os erros que podem estar embutidos nas resoluções digitais. Resumindo as palavras de Kimura e Emkin, se torna importante a verificação e compreensão do uso do *software*.

Seguindo essas premissas, aplicou-se no presente projeto algumas verificações manuais com intuito de entender melhor a estrutura e aprovar os resultados fornecidos pelo *software*.

2.2 BIM

Pode-se definir BIM como uma metodologia que integra arquitetos, engenheiros, fabricantes e contratantes, elevando a produtividade e ganho em qualidade devido ao trabalho em conjunto que elimina muitos erros de projeto. As profissões aqui citadas foram exemplificadas para o ramo da AEC, porém, o BIM tem uma amplitude que pode chegar a atingir áreas foras deste ramo. O processo de colaboração do BIM tem uma única base de dados, no caso da parte de projeto um modelo 3D, que é compartilhado entre os colaboradores substituindo os desenhos 2D construídos de forma separada por cada área (Papadopoulos, 2014). O exemplo de modelo 3D é apenas uma das dimensões que o BIM pode atuar, pois ao se falar de BIM, normalmente emprega-se outras dimensões no projeto, como será abordado a seguir.

Segundo o artigo publicado *Application of BIM in Structural Engineering* (Bhusar e Akhare, 2014), o BIM tem a capacidade de integrar inteligência aos objetos, ou seja, além da modelação, esses ainda têm suas configurações de material, preço, geometria, fabricante e qualquer outra informação desejada salva no seu banco de dados. Este fato leva a extrapolação do modelo 3D para as dimensões denominadas de 4D a 8D. Sobre isso, a tese de Masotti (2014) descreve todas as dimensões, sendo elas: 4D, referente a planejamento; 5D, referente a orçamento; 6D, referente a sustentabilidade; 7D, referente a gestão de instalação; e 8D, referente a segurança. Tudo isto está conectado no famoso ciclo BIM, que é referente ao ciclo de vida de uma edificação (Cardoso *et al.*, 2012). Em todas as fases da edificação, pode-se aplicar BIM utilizando diferentes dimensões e *softwares*.

Conclui-se, portanto, que o BIM é uma metodologia de trabalho em que diversas áreas, *softwares* e pessoas trabalham em conjunto. Este fato se tornou possível a partir de um olhar diferente dos mesmos *softwares* que já eram aplicados no mercado, dando importância à interoperabilidade. Por meio desse novo olhar, criou-se os formatos de interoperabilidade para conversação dos diferentes programas e *softwares* novos que já tivessem dentro de seu layout diversas áreas embutidas — como o Revit. O estudo sobre as diversas facetas do BIM tem importância para entendimento do funcionamento desta metodologia, a fim de encontrar a melhor maneira de como aplicá-la. Tendo em vista a necessidade de estudar essa metodologia para sua aplicação, também se tem como essencial o estudo de seus problemas

e desvantagens — algumas dessas abordadas no capítulo anterior, pois entende-se que os problemas da aplicação de *softwares* na engenharia civil são parte também dos problemas do BIM nessa área.

O artigo *The benefits, obstacles and problems of practical bim implementation* (Migilinskas *et al.*, 2013) relata, por meio de estudos de casos, problemas e barreiras da aplicação do BIM em projetos. As principais barreiras descritas no artigo são:

- Preço dos *softwares* e de treinamento para novos usuários;
- Tamanho dos arquivos gerados pelo BIM;
- Transmissão dos dados do projeto que não é eficiente para todos os *softwares* utilizados, gerando retrabalho de construção dos modelos após a importação;
- Modelos tratados de forma superficial e, muitas vezes, não confiáveis, por falta de experiência do mercado com esta nova aplicação;
- Alinhamento entre as áreas de trabalho em conjunto, que precisa evoluir;
- Falta de normas específicas para BIM, apesar de em muitos países já estarem sendo desenvolvidas e, em alguns, aplicadas.

2.2.1 Aplicabilidade em projetos estruturais e estudos do ramo BIM

A metodologia BIM está cada vez mais disseminada mundialmente. Seus conceitos básicos, citados na introdução do trabalho e na primeira parte do capítulo BIM, são aprofundados em diversas bibliografias que instigaram o mercado a investir nessa metodologia. A aplicação do BIM já existe, sendo citada na tese de Tarrafa (2012) as principais empresas atuantes neste mercado:

- Autodesk: comprou o *software* Revit em 2002 da Revit Technolog Corporation. O Revit, hoje, é umas das principais ferramentas BIM no mercado, ganhando espaço por ter uma interoperabilidade direta com os *softwares* da mesma empresa AutoCAD e Robot;
- Bentley: concorrendo com a Autodesk, atua nos mesmos ramos com *softwares* de arquitetura, elétrica, cálculo estrutural e mecânica;
- Graitec: *softwares* para área de cálculo estrutural;
- Graphisoft: desenvolvedor do ArchiCAD, um dos maiores *softwares* de arquitetura juntamente ao Revit;
- Tekla: assim como a Autodesk é uma desenvolvedora de diversos *softwares* voltados a engenharia civil, como o Tekla Structures para modelagem, Tekla Sharing para compartilhar o projeto, assim

como Revit funciona, e talvez o grande diferencial, que seria o Tekla Field 3D, em que é possível acessar em tablets modelos 3D da estrutura;

- TQS Informática Ltda: criadora do TQS *software* de cálculo, que está investindo consideravelmente em BIM nos últimos anos.

Os diversos *softwares* que estão sendo criados nem sempre conseguem ter uma interoperabilidade direta e eficiente. A criação dos formatos de interoperabilidade, já citados anteriormente, ajudou a melhorar a troca de informação entre estes *softwares*. Segundo Almeida (2015), os formatos utilizados para interoperabilidade são: IFC, Formato BCF, SDNF, CIS/2, IFD Format, IDM Format, Cobie Format, Uniclass e OmniClass, Format, CityGML, GbXML, LandXML, Formato PDF e 3DPDF, e programação de *plug-ins*. Nota-se, portanto, que a abordagem sobre um modelo BIM pode ser executada de diversas formas, utilizando diferentes *softwares*, formatos de interoperabilidade e meios de funcionamento.

Dando ênfase às etapas de projeto, o trabalho flutuou entre a arquitetura, engenharia estrutural e correções por programação do projeto. Da parte arquitetônica, segundo Maria (2008), existem diversos *softwares* que se adequam à metodologia BIM — principais são Revit *Architecture* e ArchiCAD. Dentre estes dois *softwares*, uma comparação feita pelo escritório de projetos europeu e australiano Cadonia (2018) mostra que ambos têm facilidade de integração com outros. Porém, no ArchiCAD as funcionalidades que abrangem outras áreas (como quantidades, preço, tabelas etc.) são adquiridas por meio de *plug-ins* adicionais, em contraposição ao Revit, que as contém dentro do seu layout. O ArchiCAD também é conhecido por ter uma interface mais complexa, com layout mais difícil de se entender do que o Revit. Os dois *softwares* serviriam para o objetivo do projeto, pois ambos trabalhariam com metodologias CAD e, posteriormente, com *softwares* de cálculo por meio do formato de interoperabilidade IFC. Para o projeto estrutural, a gama de *softwares* disseminados é maior, e os principais são o SAP2000, Robot, TQS, ETABS e STRAP. Os *softwares* escolhidos para a presente dissertação foram o Revit e o Robot Structural Analysis, ambos da Autodesk, facilitando a troca de dados entre eles.

Para entender o funcionamento dos dois *softwares*, principalmente as dificuldades que poderão ser encontradas, se estudou algumas teses que tiveram como base o uso de ambos. A exemplo, a tese de Tarrafa (2012) aborda, na fase de estudo de caso, a capacidade da aplicação BIM para um projeto de estruturas utilizando a ferramenta Revit. A primeira análise feita na tese é sobre a troca de informações entre as áreas arquitetura, engenharia e infraestrutura pelo *software* Revit. O autor enfatiza a facilidade dessa interoperabilidade por ser uma plataforma que atua com três áreas diferentes dentro do mesmo layout sem necessitar de nenhuma expansão. Somado ao benefício de atuar dentro do mesmo layout com diversas áreas, o Revit tem uma ferramenta chamada “*Coordination Review*”, que faz com que as

mudanças feitas no projeto arquitetônico, por exemplo, sejam visualizadas pelo engenheiro, passivas de aprovação ou não.

Os relatos do autor sobre a exportação do modelo 3D do Revit para o Robot atestam uma boa funcionalidade entre a interoperabilidade dos *softwares*. Ou seja, as geometrias, materiais e configurações dos elementos foram enviados com sucesso do Revit para o Robot.

Alguns testes com elementos foram executados nesta dissertação a fim de comprovar e comparar as informações fornecidas por Tarrafa (2012). A única diferença significativa foi que, caso o usuário esteja utilizando alguma família modelada com seções diferentes dos padrões, o *software* Robot não consegue entender os dados desta seção. Os únicos dados decifrados pelo Robot de seções específicas são a inércia, centro de gravidade e propriedades de materiais estabelecidos para aquela seção no Revit.

Seguindo ainda com a tese desse autor, tem-se exemplos de armaduras e definições de como elas atuam dentro do Revit. A parte de armação dentro do Revit pode contar com automatização feita por meio de *add-ins* ou cálculo pelo *software* Robot e exportação da armadura do Robot para o Revit.

O processo de dimensionamento pelo Robot e exportação para o Revit, segundo Tarrafa (2012), tem limitações, como calcular apenas pilares e vigas com geometrias conhecidas. Ainda enfatiza que as armaduras de lajes e paredes não conseguem ser atualmente exportadas para o Revit, o que é uma deficiência considerável.

Outras duas teses abordam o mesmo tema de interoperabilidade entre Revit e Robot, sendo elas a tese de Carrasco (2016) e a de Papadopoulos (2014). O segundo faz uma análise focada na interoperabilidade dentro do Revit entre arquitetura, engenharia e infraestrutura importando depois para o Robot. A parte de interferência da estrutura com a infraestrutura não será abordada neste trabalho, porém, os erros encontrados por Papadopoulos na parte de exportação dos modelos foram parecidos com os observados no estudo de caso desta tese. O modelo analítico teve na tese de Papadopoulos alguns problemas por incompatibilidade de coordenada do encontro do nó da viga, fazendo com que o Robot criasse outros pilares sobre os já existentes. Além disso, a malha foi algo que saiu de maneira equivocada no projeto de Papadopoulos.

Já o projeto de Carrasco (2016) aborda de maneira diferente o uso do Revit e do Robot por trabalhar com estruturas metálicas. A troca de dados na tese do autor é executada para as informações de dimensionamento de tais estruturas, a fim de comparar com os resultados da verificação por um *plug-in* programado. O funcionamento desta troca de informações funciona com lentidão, porém, de maneira efetiva.

Tirando algumas limitações, a troca entre o Revit e o Robot é precisa e gera poucos erros.

2.3 NORMAS

2.3.1 Normas BIM

Com o crescimento do BIM no mundo, começaram a surgir diversas normas para controle e suporte desta nova metodologia. Acerca disso, Marco Almeida (2015) descreve a importância que o BIM foi tomando em diversos países e a movimentação de organizações para gerar documentos normativos. Este processo de normatização está ligado, também, ao que foi definido de “níveis de aplicação BIM”. Segundo Lorek (2018), os níveis BIM são divididos de 0 a 3.

- *Level 0*: a colaboração entre áreas é inexistente, os modelos são trabalhados em 2D e a distribuição é via papel;
- *Level 1*: nível em que a maioria das empresas se encontra atualmente. Há uma mistura de usos entre 2D e 3D, sendo o 2D usado na elaboração de documentos e o 3D no trabalho de concepção da estrutura. Os arquivos são divididos por meio de redes ou quaisquer dispositivos que permitam a compartilhamento dos dados. Nesses casos, deve existir uma nomenclatura, códigos e hierarquia dos arquivos a fim de evitar erros no compartilhamento;
- *Level 2*: atualmente, muitos países procuram atingir este nível de aplicação BIM. Isto implica na existência de colaboração entre diversas áreas, deixando para trás a ideia de uma rede para cada área (cada escritório). A troca de informações se dá principalmente por meio de arquivos IFC ou qualquer outro tipo de formato de interoperabilidade. Nesse âmbito, diversas áreas atuam juntas, aplicando efetivamente o que se espera da metodologia BIM. Diante disso, as normas são um método de alguns países para impor um nível mínimo de aplicação BIM, a exemplo da Inglaterra, que tem como foco a aplicação do nível 2;
- *Level 3*: este nível não está definido em sua totalidade, mesmo pelo plano estratégico publicado pelo governo britânico que detalha o nível 3 (HM Government, 2015). Seus principais objetivos são: criar padrões internacionais de utilização do BIM; estabelecer nova estrutura contratual para projetos com BIM; criar um ambiente que apoie a colaboração e o aprendizado, bem como treinar o setor público para utilizar o BIM em métodos operacionais e processos contratuais.

Entende-se, portanto, que a partir desta definição de níveis começou a surgir a necessidade de normatizações para padronizar e elevar o nível do país em aplicação BIM. Os países que levantaram esta bandeira com mais veemência foram os Estados Unidos, o norte da Europa (Finlândia e Noruega) e a Inglaterra. Lorek (2018) ainda cita algumas mudanças sofridas por cada nação com a aplicação BIM, como a Inglaterra, que teve uma redução de 20% dos custos no ramo da construção, ou os Estados Unidos, que

em 2010, no estado de Wisconsin, teve como medida obrigatória o uso de BIM em todos projetos públicos.

Comparando o andamento do BIM mundialmente, a partir da Figura 2.1 nota-se exatamente a forte influência do BIM nos Estados Unidos e Europa. Os outros países estão ainda se desenvolvendo, mas devem alcançar um nível 2 de BIM em alguns anos (Mistry, 2018).

2.3.2 Normas para o cálculo estrutural

Para o estudo de caso, tanto na parte de esforços quanto no dimensionamento, foram utilizadas literaturas e normas. Na primeira parte de esforços em lajes utilizou-se a metodologia criada por Montoya, Meseguer e Cabré (2001) e também Czerny (Beton Kalender, 1976), que descreve como os esforços nas lajes devem ser analisados e calculados. Seguindo para o dimensionamento, todos os cálculos foram feitos pautados no EC2, e para o cálculo de pilares se complementou o Eurocódigo com o livro Verificação da Segurança em Relação ao Estado Limite Último de Encurvadura (Azeredo, 1998), baseado no REBAP e no RSA.

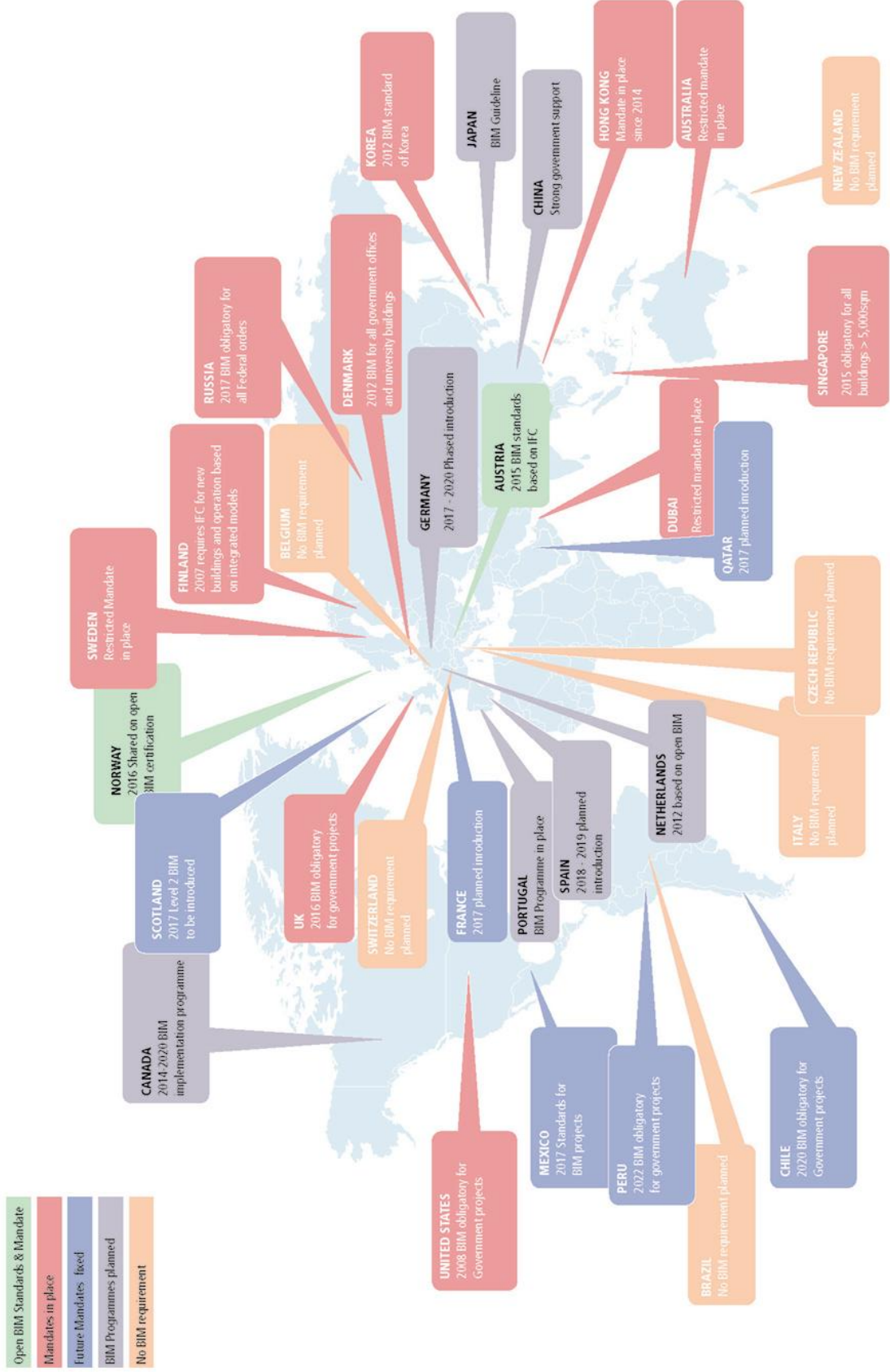


Figura 2.1 – Aplicação do BIM no mundo (Mistry, 2018).

2.4 FERRAMENTAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM *PLUG-IN*

2.4.1 Dynamo

O Dynamo da Autodesk começou como um *Add-in* do Revit, que cresceu de tal maneira até se tornar uma plataforma que cria rotinas, resolve problemas e desenvolve suas próprias ferramentas. Para criar *plug-ins*, o Dynamo utiliza da programação visual que, em vez de códigos, é executada por uma interface gráfica interativa. Essa programação funciona por meio de diversas caixas, que podem ser programadas com PHYTON ou utilizadas dentro dos próprios pacotes de caixas oferecidos pelo Dynamo, que são conectadas entre si por fios virtuais.

O funcionamento do Dynamo é como qualquer outro tipo programação, só que em vez de códigos escritos é executada com uma sequência de ações em caixas (Autodesk, 2018). Essa sequência é possível pelos fios virtuais que conectam os *outputs* de uma caixa com os *inputs* da próxima, formando no final uma teia de programação. Os programas Dynamo têm a terminação em formato *.dyn*, que são denominados como arquivos leves. Abaixo, seguem duas figuras mostrando a diferença entre os tipos de programações:

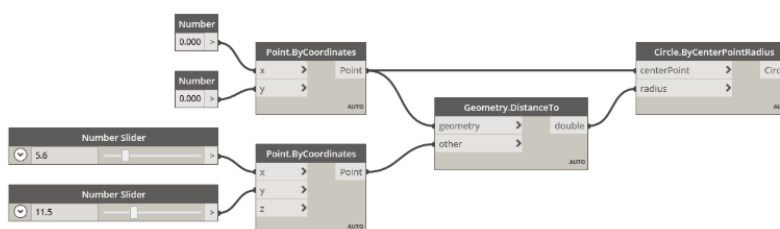


Figura 2.2 – Programação visual (Autodesk, 2018).

```
myPoint = Point.ByCoordinates(0.0,0.0,0.0);
x = 5.6;
y = 11.5;
attractorPoint = Point.ByCoordinates(x,y,0.0);
dist = myPoint.DistanceTo(attractorPoint);
myCircle = Circle.ByCenterPointRadius(myPoint,dist);
```

Figura 2.3 – Programação por código (Autodesk, 2018).

Dentro do Revit, o Dynamo tem uma interoperabilidade de fácil uso, principalmente por já ter sido um *add-in* do programa. Suas programações podem criar *add-ins* utilizando importações de tabelas Excel, como mencionado nas dissertações de Borges (2018) e Pires (2017).

2.4.2 Dynamo x Revit API

Ambas plataformas servem para programar *plug-ins* dentro do Revit. Teoricamente, tudo que se pode fazer com Dynamo é possível de ser feito por uma programação Revit API e vice-versa. O uso de uma ou outra metodologia depende muito do intuito do *plug-in*, nível de habilidade da pessoa, quão repetitivo é o problema que será solucionado e se esse é bem definido ou confuso.

As diferenças entre os dois métodos começam no modo que o *plug-in* deve ser executado. A execução no Dynamo é feita somente pelo próprio programa, que deve estar aberto. Já o Revit API é uma programação que funciona como uma biblioteca do Revit, ou seja, pode ser utilizado dentro do Revit por meio de um botão de execução. Outra diferença é que a programação em código precisa ser compilada antes de ser salva. Este fato faz com que o Dynamo seja mais devagar que o Revit API, pois é necessário sempre compilar para executar o *plug-in* (Kilkelly, 2017). A figura abaixo mostra os pontos fracos e fortes de cada tipo de programação:

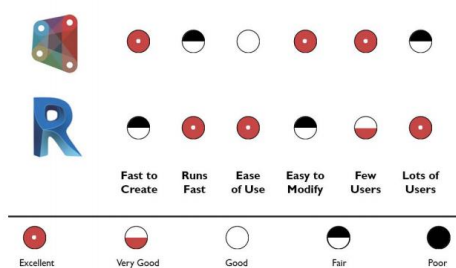


Figura 2.4 – Revit API x Dynamo (Kilkelly, 2017).

A escolha pelo Revit API nesta dissertação se deu por se acreditar que, apesar de ser uma programação mais difícil, seu uso e acesso é melhor. Criar um *plug-in* pelo Revit API é mais próximo de uma extensão ao programa do que um *plug-in* criado por um terceiro *software*.

2.4.3 Revit API, Microsoft Visual Studio, Net.Framework e C#

Segundo Vitor P. Silva(2014), interface de programação de aplicativos (conhecida pela sigla API) é uma biblioteca que possibilita o acesso, por meio de programação, às funcionalidades do programa. Isto significa que o programador escreve de modo que a API entenda e execute esses comandos dentro do programa desejado. Por ser voltado à aplicação da metodologia BIM, o Revit disponibiliza uma API para facilitar a conversação e integração de diversos programas e flexibilizar a inserção de novos *add-ins* e macros. Existem, no entanto, tipos de interfaces diferentes que podem ser mais fáceis ou mais difíceis de se usar, abrangendo maior ou menor conteúdo. Para o Revit, a interface disponível é a API em formato dll, que pode ser lida pelo ambiente de desenvolvimento integrado Microsoft Visual Studio. Outro exemplo é o AutoCad, que tem uma gama maior de API's (um exemplo de API do AutoCad é a Lisp).

A programação e uso de API's no Revit tem o suporte da Autodesk por meio do que foi chamado "Revit API". A Revit API, além de contemplar os arquivos de biblioteca utilizados para programação, disponibiliza o SDK e o *plug-in Structural Analysis Toolkit*. O SDK é um conjunto de arquivos de apoio e programações modelos para o uso das ferramentas e a execução da interface API para *plug-ins*. Já o *plug-in Structural Analysis Toolkit* é um programa de apoio para engenheiros estruturais, contendo o *plug-in* de ligação direta entre o Revit e o Robot, o Autodesk 360º e a análise estrutural para o Revit, que permite o cálculo em nuvem, ferramentas de avaliação e armazenamento de resultados.

Tanto o *plug-in* quanto o SDK foram utilizados no presente trabalho. Um dos principais arquivos empregados da SDK foi o Revit *Developer's Guide* (Autodesk Support, 2018), que também pode ser encontrado na internet. Além disso, o SDK é o responsável por liberar o funcionamento dos *plug-ins* dentro do Revit, e, por isso, é necessário baixá-lo.

A execução de um *plug-in* passa por diversas etapas de programação que incluem o uso da ferramenta Microsoft Visual Studio. Para compreensão destas etapas e do entendimento geral das ferramentas, baseou-se no blog *The Building Coder* (Tammik, 2012) e no artigo online *My First Plug-in* (Autodesk, 2018). Seguindo estas bibliografias, pesquisou-se sobre o funcionamento das ferramentas que seriam utilizadas e seus respectivos procedimentos. O Visual Studio é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) que reúne diversas ferramentas e características para criação de *softwares*. Dentre essas ferramentas, o Visual Studio conta com a .Net Framework (dotNet) e as linguagens de programação Visual Basic.Net (VB.Net), C, C++, C# e F#. O dotNet é uma plataforma criada para desenvolver e executar sistemas e aplicações em qualquer dispositivo que contenha um *framework*, eliminando a necessidade de escrever códigos para dispositivos específicos. A mudança causada pelo dotNet aconteceu pela interoperabilidade das diversas linguagens de programação proporcionadas pelos componentes *Common Language Runtime (CLR)* e *Framework Class Library (FCL)*. O CLR é responsável pela compilação do código digitado em qualquer linguagem que seja para a linguagem de máquina. Essa transcrição funciona a partir da compilação do código na *Common Intermediate Language (CIL - linguagem intermediária de baixo padrão)*, que gera um arquivo *assembly* — no caso do *plug-in*, um arquivo de biblioteca de funções (dll, bibliotecas compartilhadas nos sistemas operacionais).

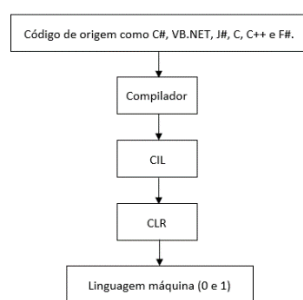


Figura 2.5 – Diagrama de funcionamento do dotNet.

As informações acima servem de base para entender como funciona a configuração e programação do *plug-in* para o Revit. A linguagem escolhida para a programação foi a C#, que será utilizado dentro da IDE Visual Studio. Esta linguagem é de alto nível e foi criada com base na linguagem C++, com objetivo de ser simples, moderna e de propósito geral. Antes de começar o *plug-in*, estudou-se, a partir do *site Home and Learn*¹ e do livro do autor Miles (2016), o funcionamento da linguagem C# e do Visual Studio.

A metodologia de programação de ambas as linguagens não é complexa, pois tanto no *site* quanto no livro abordam de maneira simples as ferramentas de uso — como variáveis, *loopings*, métodos e as demais funções —, exemplificando sempre com modelos práticos. Para o *plug-in*, além da programação em C# percebeu-se importante ter um conhecimento maior sobre as bibliotecas do Revit, isto é, conhecer o conteúdo das bibliotecas e seu funcionamento, pois, assim, se torna mais fácil utilizá-las na programação.

O *plug-in* começa pela escolha de um modelo de documento (*Class Library template*), que gera um arquivo assembly dll — formato necessário para o carregamento do *plug-in* no Revit. O *template Class Library* do Visual Studio não compartilha das bibliotecas do Revit automaticamente, e, portanto, é necessário adicioná-las no programa. Cada uma dessas bibliotecas trabalha com diferentes partes do Revit. A primeira Revit API.dll tem função de acesso às aplicações, aos documentos, elementos e parâmetros do Revit. Já a segunda Revit APIUI.dll é responsável pela manipulação e customização da interface do Revit, como comandos, seleções e diálogos. Esta mesma biblioteca também dá suporte aos dois tipos de dlls disponíveis pelo Revit para construção de *plug-ins*: *External Command* e *External Application*.

O *External Command* é capaz de adicionar novos comandos à interface do Revit, esses que aparecerão abaixo na aba *External Tools* do Revit, enquanto o *External Application* adiciona uma nova aba que pode ser programada para uso também de comandos e outras aplicações.

Ambos os tipos de dlls precisam ser registrados para serem reconhecidos pelo Revit. Este registro funciona por meio de um arquivo manifesto de formato .addin, que pode ser criado a partir de um simples bloco de notas. Para que o manifesto seja lido, é necessário colocá-lo dentro da pasta C: \ ProgramData \ Autodesk \ Revit \ Addins \ 201X. Todos os manifestos dentro desta pasta serão lidos na inicialização do Revit por ordem alfabética e o seu conteúdo pela escrita. Algumas palavras são obrigatórias em um manifesto, já outras dependem da aplicação do *plug-in*. No guia já citado, são dispostas todas as palavras e aplicações, e na tabela abaixo foram listadas apenas as principais palavras.

¹ Disponível em: <https://www.homeandlearn.co.uk/index.html>. Acesso em: 05 nov. 2018.

Tabela 2.1 – Principais palavras para escrever um manifesto.

PRINCIPAIS PALAVRAS CHAVES PARA UM MANIFESTO		NECESSIDADE DE USO	
Tag	Descrição	E.Command	E.Application
Assembly	Caminho completo do arquivo do add-in	X	X
FullName	Nome completo da Class (namespace.Class1)	X	X
AddInId	Identificador Único Universal (GUID) que será uma especie de identidade para o add-in. Cada um deve ter um numero especifico.	X	X
VendorId	Identidade do usuario. Tem que ser exclusivo sendo indicado o nome ao contrario.	X	X
VendorDescription	Descrição da identidade	Opcional	Opcional
Name	Nome do aplicativo	Opcional	X
Text	Texto do botão de comando	Opcional	-

A partir do *Revit Developer's Guide* criou-se o primeiro *plug-in* mais básico conhecido, o *Hallo World*. A Figura 2.6 é um exemplo de manifesto de dll *ExternalCommand* feito para o *plug-in Hallo World*.

```

Texto add.bit - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" standalone="no"?>

<RevitAddIns>
  <AddIn Type="Command">
    <Name>HelloWorld</Name>
    <FullName>HelloWorld.Class1</FullName>
    <Text>HelloWorld</Text>
    <Assembly> C:\Samples\HelloWorld\HelloWorld\bin\Debug\HelloWorld.dll</Assembly>
    <AddInId>239BD853-36E4-461f-9171-C5ACEDA4E721</AddInId>
    <VendorId>BSK</VendorId>
    <VendorDescription>Brugnera.K</VendorDescription>
  </AddIn>
</RevitAddIns>

```

Figura 2.6 – Manifesto para o *plug-in Hallo World*.

2.4.4 Trabalhos desenvolvidos com API

Fora do Revit, APIs são aplicadas em diversas coisas no dia a dia das pessoas. A esse respeito, Merino (2014) exemplifica como APIs as ferramentas de busca e filtragem de qualquer rede social e a capacidade de poder incluir produtos na *Amazon* ou *eBay*. Define-se com uma capacidade de agrupar funções em um só comando.

Dentro do Revit, uma das primeiras aplicações de API foi executada nos Estados Unidos pela Universidade do Texas. Um artigo publicado pelos alunos Yan e Liu (2007) consistia em um jogo para estimular o design sustentável por parte do arquitetos e aumentar as pesquisas de BIM nos ramos da arquitetura, engenharia e construção. O jogo consiste em três fases, sendo a primeira a modelagem em BIM do edifício sustentável, a segunda o jogo e a terceira o *update* das modificações feitas no jogo para o modelo inicial. A fase do jogo funciona de maneira que o jogador navegue pelas construções e faça alterações no que ele achar necessário em questões de conforto, sustentabilidade, visibilidade e qualquer outro parâmetro que interesse ao usuário. Essa comunicação entre o jogo e o BIM foi feita por meio de uma API que permite

recuperar a informação das mudanças no edifício e atualizar no BIM. O BIM, neste caso, funciona como banco de dados a ser acessado por essa API.

Três anos depois de Yan e Liu, foi publicado um artigo pelo arquiteto Momchil Stoyanov, que tratava de um aplicativo “simples que analisa parâmetros de insolação de aberturas em modelos digitais pré-existent” (Stoyanov, 2009). Novamente, o aplicativo é executado em três etapas, sendo elas: modelagem dos elementos, aplicação do *plug-in* programado em C# e verificação dos resultados (ganho de calor no local por metro quadrado, gráfico exemplificando os ganhos de noite e de dia, etc.). O *plug-in* em si atuava de maneira a coletar informações básicas de insolação e não analisava essas informações, pois a análise, segundo o próprio artigo, teria que ser executada posteriormente. O código e a execução do *plug-in* são descritos no artigo. Outro trabalho que também seguiu para a parte de eficiência energética e insolação foi o de Aksamija et al. (2012), voltado a controlar os dados analíticos das geometrias das famílias, a fim de criar, caso necessário pela radiação solar ou ângulo solar, elementos como guarda-sóis ou qualquer outro referente a insolação do local.

A parte de *plug-in* no Brasil teve também seu avanço. Em 2010, Andrade et al. publicaram um artigo com intuito de modificar a forma de gestão das obras públicas brasileiras, melhorando a troca de informação durante todo o processo, o que acarretaria na diminuição dos custos gastos. Segundo o artigo, o objetivo do *plug-in* a ser desenvolvido dentro da ferramenta BIM seria:

“Temos por objetivo criar um novo método para substituir o uso da extração automática de serviços dentro da plataforma BIM pela extração automática de quantitativos de insumos. O planejamento por quantitativos resulta em uma fiscalização mais eficiente para todos os atores da obra. (KAKU, 1998). A partir da extração automática dos insumos diretamente de uma plataforma BIM facilitará as tomadas de decisões de todas as etapas de planejamento e programação de obra.”
(Andrade et al., 2013)

Assim como foi estudado neste trabalho, o *plug-in* que serviu como instrumento para planejamento e programação de obras públicas foi desenvolvido por meio da plataforma Visual Studio, com a programação executada em C#.

Avançando para o ano de 2013, Wu e Clayton pesquisaram sobre o uso do BIM para análise acústica de salas e locais pequenos. O artigo publicado tinha o intuito de modelar o local em BIM e adquirir as informações de materiais aplicados, geometrias, acabamento, absorção de frequências e fonte sonora. Após uma simulação acústica do local, o *plug-in* seria responsável por retornar todas informações necessárias para uma análise acústica daquele ambiente. Para ilustrar, a Figura 2.7 mostra como seria o funcionamento entre o BIM, *plug-in* e os testes.

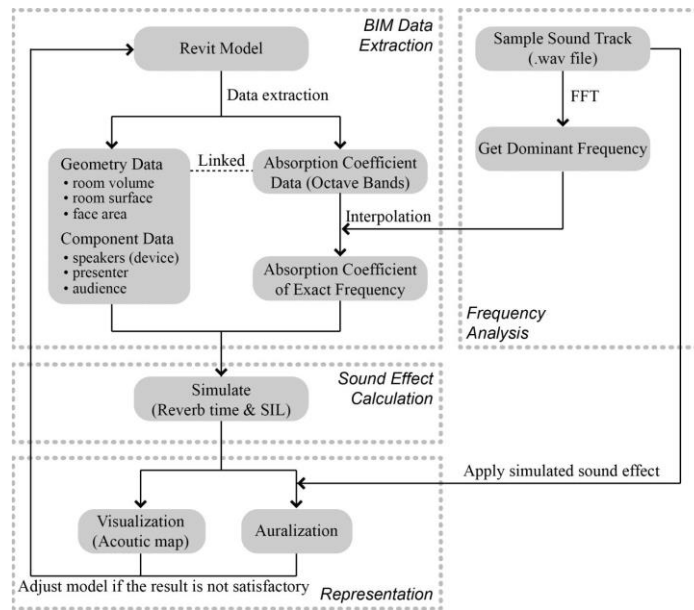


Figura 2.7 – Diagrama de simulação do processo (Wu e Clayton, 2013).

Finalizando os trabalhos estudados, tem-se a tese de Carrasco (2016). O autor aborda a verificação de elementos metálicos para a norma brasileira NBR 8800:2008, descrevendo o cálculo estrutural manual do projeto e comparando-o com os resultados retirados do cálculo por *softwares*, por meio de um *plug-in* programado dentro do Revit. O *plug-in* compara o cálculo pela nuvem do Revit com auxílio do Robot partindo dos resultados obtidos manualmente. A tese tem como principal ponto a descrição da programação do *plug-in*, indicando os *softwares* e aplicativos necessários para tal façanha.

3 MANUAL DE BOAS PRÁTICAS BIM, BASEADO NAS NORMAS AEC (UK) BIM PROTOCOL E COMMON BIM REQUIREMENTS (COBIM)

A metodologia BIM é complexa e envolve trabalho com arquivos que podem se tornar pesados e ineficientes. Para evitar essas situações, as normas foram desenvolvidas com intuito de guiar seus usuários a como usar o BIM da melhor maneira.

Como o BIM é uma metodologia nova, muitas de suas normas ainda não estão consolidadas (como visto na Figura 2.1). Dentre todas as apresentadas e estudadas, optou-se por escolher as europeias pelo fato de a edificação estar em Portugal e essas consolidadas há algum tempo.

A princípio, a norma a ser seguida seria a inglesa, porém, notou-se que essa tinha algumas lacunas preenchidas pela norma finlandesa. Após chegar a essa conclusão, montou-se, então, um manual com os principais pontos das duas normas.

A norma Inglesa está dividida nos seguintes capítulos: *Best Practice; Project BIM Execution Plan; Collaborative BIM Working; Interoperability; Data Segregation; Modelling Methodology; Folder Structure and Naming Conventions; Presentation Styles; Resources e Appendices*. Dentre estes, os mais abordados serão *Best Practice, Interoperability e Modelling Methodology*. Alguns outros serão descritos no final para aprendizado acerca da organização de um projeto em suas partes (AEC (UK) Committee, 2012).

Por sua vez, a norma finlandesa também é dividida por diversos capítulos, porém, serão abordados apenas alguns, com intuito de complementação da norma inglesa: *General Part; Modeling of the starting situation; Architectural design; MEP design e Structural design* (Finnmap Consulting Oy et al., 2012).

3.1 INFORMAÇÕES INICIAIS DE PROJETO

As normas dão premissas básicas de como se deve desenvolver um projeto partindo das informações gerais. Informações repetidas serão adicionadas apenas uma vez, pois este manual tem como objetivo consolidar as mais relevantes de ambas as normas, não importando, portanto, de qual delas esta informação vem. Por questões didáticas, separou-se as duas normas para a presente análise.

Premissas da AEC (UK) BIM (2012):

- Salvar regularmente revisões para manter a integridade do arquivo e o fluxo do trabalho;
- Separar os arquivos por áreas de atuação para o *software* não ficar sobrecarregado;
- Ter cópias salvas em pastas específicas dos arquivos exportados (CAD, Inventor, etc.);
- Não modelar elementos sobrepostos, sobrecarregando o projeto;
- Desenhos devem ter o mínimo de detalhe sem perder a qualidade do projeto;
- Manter os desenhos organizados e com número mínimo;
- Evitar duplicações de vistas para garantir a integridade do projeto;
- Minimizar quaisquer mudanças que sejam desnecessárias no projeto;
- Importações no CAD devem, preferencialmente, ser na coordenada 0,0,0.

Premissas da COBIM (2012):

- Definir formato de interoperabilidade antes de começar o projeto (em que formato irá se trabalhar). É recomendado pela norma finlandesa o formato IFC 2x3;
- O cliente deve receber tanto o IFC compatibilizado como os projetos de cada área separadamente;
- É indicado que a modelo base seja feita nas partes positivas de X e Y;
- Elementos modelados à parte devem ser bem detalhados, em uma escala opcional de 100 a 200mm.

3.2 METODOLOGIA DE MODELAGEM

3.2.1 Geral e arquitetônica

Entre todos os capítulos apresentados das normas, este em excelência é um dos mais importantes. A norma finlandesa define alguns pontos que devem ser considerados ao se começar a modelar no Revit.

- *Layers* do *Autocad* não podem ser aplicados diretamente no Revit;
- O nível 0 da *stories* deve ser definido no nível térreo para estruturas sem escada ou onde a escada começa no térreo;
- No modelo arquitetônico, as fundações não precisam ser modeladas;
- O modelo é dividido em níveis;

- O papel da arquitetura inclui o desenho de paredes não estruturais, aberturas com tamanho nominais, janelas, portas e outros detalhes.

Isto posto, as normas inglesa e finlandesa têm como presságio a divisão do nível de detalhamento dos modelos. Segundo a norma inglesa, os elementos devem ser modelados no Revit e salvos com seus respectivos nomes e nível de detalhamento.

Os níveis impostos pela norma são:

- *Component Grade 0 (G0) – Schematic*: objeto sem escala e dimensões. Será irrelevante para este projeto;
- *Component Grade 1 (G1) – Concept*: detalhamento simples para apenas se reconhecer o objeto. Modelado como material consistente “*Concept–White*” ou “*Concept–Glazing*”;
- *Component Grade 2 (G2) – Defined*: contém informações sobre o tipo de material, informações técnicas, escalonado e modelado de forma a se identificar o modelo do objeto dentro de uma classe (cadeira de escritório dentro da classe cadeiras);
- *Component Grade 3 (G3) – Rendered*: mesmas configurações do Grade 2, porém, tem um nível de detalhamento em 3D maior.

Podem ser criados mesmos modelos com diferentes grades, dependendo do objetivo do trabalho. Os objetos criados devem ser salvos junto dos arquivos da parte de *Work in Progress*, citado nos títulos adicionais que seguem abaixo.

3.2.2 Estrutural

Muito da escolha da norma finlandesa COBIM (Finnmap Consulting Oy *et al.*, 2012) foi pelo fato dessa ter uma seção sobre design estrutural. Desta forma, algumas observações foram feitas a respeito desse capítulo:

- Todas as cargas devem ser modeladas no modelo estrutural;
- As partes estruturais do projeto devem ser verificadas após a exportação, a fim de notar se houve troca de definição (mostrar, por exemplo, que a parede continua definida como parede);
- Os elementos são modelados de forma a se aproximarem ao máximo da realidade. Se um elemento é contínuo, deve, portanto, encostar seus lados em cada *storie* (nível).

3.3 CAPÍTULOS ADICIONAIS DE GESTÃO DOS ARQUIVOS BIM

3.3.1 *Project BIM Execution Plan*

Como plano de execução, a norma inglesa coloca em prática a divisão de trabalho planejada e a comunicação entre as diferentes empresas de forma clara. Para isso ocorrer foram criadas funções primárias, que são processos de execução na maioria dos projetos, sendo elas:

- **Estratégia:** qualquer projeto estrutural precisa de padronização em seus *templates*, memoriais de cálculos e arquivos em geral. Isto deve ser executado pelas empresas na divisão da função estratégia descrita na norma, juntamente a determinação dos objetivos e fluxos de trabalho do projeto;
- **Produção:** após a definição das diretrizes do projeto, esse é produzido, modelado e calculado;
- **Gestão:** a parte de gestão deve gerenciar a da produção do projeto. Ou seja, deve coordenar cada área em específico e ter um coordenador para o segmento de interdisciplinaridade do BIM, a fim de garantir a troca de dados e informações de maneira correta.

Seguindo mais adiante, a norma ainda detalha quais pontos um projeto deve abordar na fase de planejamento. Alguns desses aspectos mais importantes são descritos abaixo:

- *Software Platform:* definição das plataformas a serem utilizadas e como a interoperabilidade será abordada;
- *Project Deliverable:* definição do formato que o projeto será entregue;
- *Project Characteristics:* número de andares, tamanho, localização, divisão do trabalho e cronograma;
- *Shared Coordinates:* definição de um sistema de coordenadas comuns entre todos os arquivos;
- *Data Exchange:* formato e protocolo de transmissão de dados.

3.3.2 *Collaborative BIM working*

O trabalho colaborativo segue na norma inglesa a metodologia *Common Data Environment* (CDE). Esta se baseia em quatro fases de projeto em grupo, conforme a Figura 3.1.

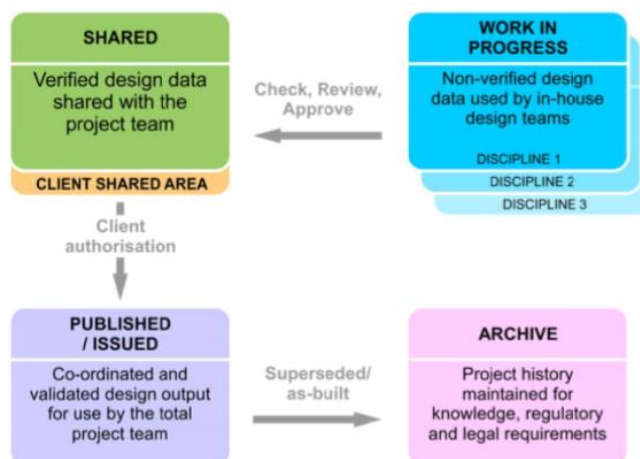


Figura 3.1 – Divisão da metodologia CDE (AEC (UK) Committee, 2012).

O começo do processo começa na primeira parte de *Work in Progress*, em que o projeto está em andamento e não foi verificado e autorizado pela equipe que nele trabalha. Nesta fase, o arquivo deve ser projetado em cada uma de suas áreas e, depois, compartilhado com aprovação de todos os envolvidos. Após esse primeiro passo, começa-se a segunda fase, chamada de *Shared*. Conforme o próprio nome já diz, é a fase que os arquivos serão compartilhados com as outras empresas em uma área chamada *Shared Area*. Os arquivos só devem proceder a essa área após verificação e aprovação. A terceira parte é *Published/Issued*, que compreende controlar o padrão de revisões conforme adotado no planejamento, e, para isso, o arquivo deve estar em formato não editável (todas mudanças de vistas devem ser feitas no *Work in Progress*). O quarto e último passo é *Archive*, em que cita modos de montar os arquivos seguindo pastas datadas.

A norma aborda ainda outros tipos de metodologias para publicar, porém, não serão abordadas aqui por não fazerem parte do objetivo deste projeto.

3.4 REGRAS GERAIS CRIADAS PELA AUTORA (SOFTWARES BASE REVIT E ROBOT)

Os pontos citados pelas normas são de extrema importância para construção de um modelo que possa minimizar os erros. Seguindo vários pontos indicados por eles, foi possível modelar a estrutura do estudo de caso sem maiores dificuldades.

Por parte de aprendizado pessoal, notou-se que alguns detalhes têm mais importância do que outros no momento de modelagem e dimensionamento da estrutura. As principais observações são descritas abaixo.

- **Propriedade dos materiais bem definidas:** os materiais que forem ser utilizados tanto na arquitetura como na engenharia devem estar com o máximo de observações possíveis. Para parte

estrutural, é importante verificar se seus padrões de resistência física e térmica se adequam ao que o calculista está esperando. Ao importar para o Robot, os materiais são importados juntos. Esta observação vale principalmente para o Brasil, pois a norma brasileira não é cadastrada no Robot e os materiais estão configurados de maneira diferente do que o usual. Devido a esse fato, é mais produtivo configurar os materiais estruturais corretamente no Revit, já que esses serão exportados;

- **Definição de eixos:** uma das partes mais importantes para não ocorrer erros de diferença analítica para física é a definição de eixos. O projeto deve ser construído por meio de eixos que guiem a modelagem, eliminando a possibilidade de que ocorram erros por *miss clicks*. Caso, por exemplo, o eixo de vigas esteja só um pouco afastado do prumo do pilar, no modelo analítico essas coordenadas não se conectarão, e ao passar para o Robot os problemas ficarão ainda piores;
- **Eliminar erros e avisos do Revit antes de importar o arquivo:** essa orientação já é citada nas normas, mas com o objetivo de intensificar seu aviso grifou-se aqui novamente a importância de se atentar para avisos do Revit, em especial aos de consistência. Avisos da parte de sustentação (suporte) da estrutura podem ser desconsiderados em alguns casos específicos, em que o calculista esteja ciente de possíveis erros de estabilidade no Robot;
- **Criação dos elementos estruturais sempre atentando aos pontos de encontro entre os elementos:** os *grids* ajudam a eliminar erros no momento de selecionar o ponto onde a viga deve começar ou acabar. Porém, é importante que o projetista preste extrema atenção ao criar os elementos para manter a ligação entre eles no modo analítico;
- **Verificar o modo analítico e as cargas antes de importar:** além de prestar atenção na criação dos elementos, deve-se verificar todos e também os carregamentos no modo analítico — responsável por importar para o Robot, e, por esse motivo, deve estar perfeito em questões de modelagem. Um dos exemplos a ser verificado é o da Figura 3.2. No caso do modelo físico, a laje foi modelada corretamente, mas no analítico o contorno da laje ficou fora do eixo da viga. Este fato pode criar uma malha incoerente no Robot e erro de instabilidade em nós;



Figura 3.2 – Erro de conexão entre os elementos estruturais.



Figura 3.3 – Erro de modelagem.

- **Direção das vigas e lajes:** como a estrutura é modelada, também importa para os eixos locais dos elementos. Por esse motivo, vigas e lajes devem ser criadas no mesmo sentido sempre, a fim de padronizar os eixos locais no Robot;
- **Sentido das lajes:** caso haja lajes que distribuam cargas em uma só direção, é relevante selecionar a direção correta na ferramenta *Span Direction* do Revit. Com as direções configuradas no Revit, ao importar para o Robot essas direções também são importadas, porém, é necessário mudar o tipo de laje de *two-ways* ou por elementos finitos para *one way*. Caso essa alteração não seja feita no Robot, somente com as configurações de direção do Revit a laje não trabalhará em uma direção só;
- **Fundações:** deve-se atentar ao tipo de apoio que a fundação modela no Revit e se transforma no Robot;
- **Erros de malha no Robot:** a malha do edifício será algo criado dentro do próprio Robot, por isso, é importante sua verificação, pois em muitas teses lidas ocorrem erros nas malhas que podem indicar outros erros do projeto;
- **Verificações pós-exportações dos modelos:** sempre depois de uma exportação para algum outro *software*, o modelo deve ser checado de todas as maneiras possíveis, pois erros de troca de dados são comuns;
- **Conhecimento dos métodos de cálculo dos *softwares* de dimensionamento:** os *softwares* de cálculos são constituídos por diversos parâmetros de cálculo que devem ser configurados pelos usuários. O conhecimento aprofundado de como cada um desses atua dentro do *software* é de suma importância para o entendimento dos resultados e mitigação dos erros por validação incorreta das respostas geradas;
- **Preenchimento de todos os dados necessários para outras áreas de atuação da engenharia:** apesar de o principal tema ser o cálculo estrutura, o preenchimento dos custos, fornecedores ou quaisquer informações relevantes devem ser inseridas dentro das configurações dos modelos paramétricos, a fim de facilitar a utilização do mesmo para troca de dados com as diversas áreas do ciclo BIM;
- **Fluxo de trabalho:** os arquivos gerados pela utilização de múltiplos *softwares* devem ser muito bem organizados. A numeração e nomenclatura devem ser seguidas de forma padronizada.

4 METODOLOGIA BIM APLICADA AO PROJETO DE ESTRUTURAS E DIMENSIONAMENTO POR CÁLCULO MANUAL DE UM EDIFÍCIO

4.1 INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE CASO

O estudo de caso teve seus dados baseados no trabalho aplicado na unidade curricular Análise Estrutural Avançada, ministrada pela Engenheira Isabel Alvim Teles (2017).

O edifício se localiza na zona de Póvoa de Varzim, cidade portuguesa, e é constituído em geral por elementos de concreto armado. Sua utilização varia entre edifício industrial e de escritórios, dependendo do piso. Além do piso térreo, o edifício contém dois pisos elevados e uma cobertura em terraço não acessível. A conexão entre esses é feita por meio de uma escada, e as lajes variam de espessura e tipologia em cada um deles. Os pilares e vigas são, em sua maioria, quadrados, com exceção de um pilar que é circular.

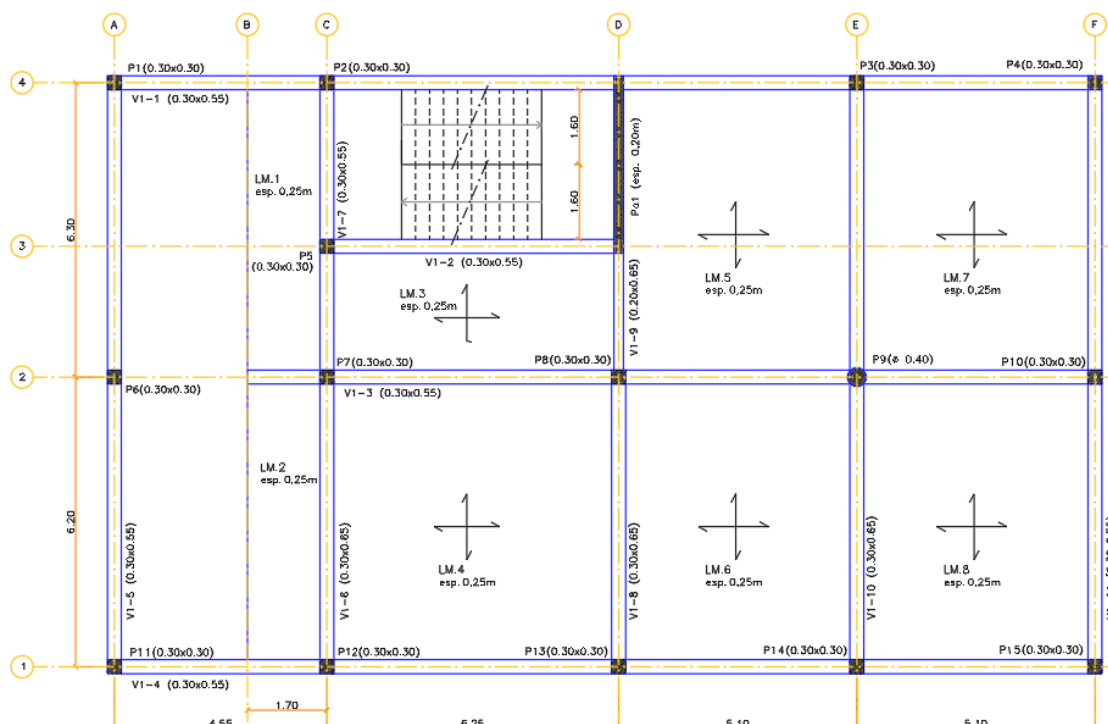


Figura 4.1 – Planta do 1º andar.

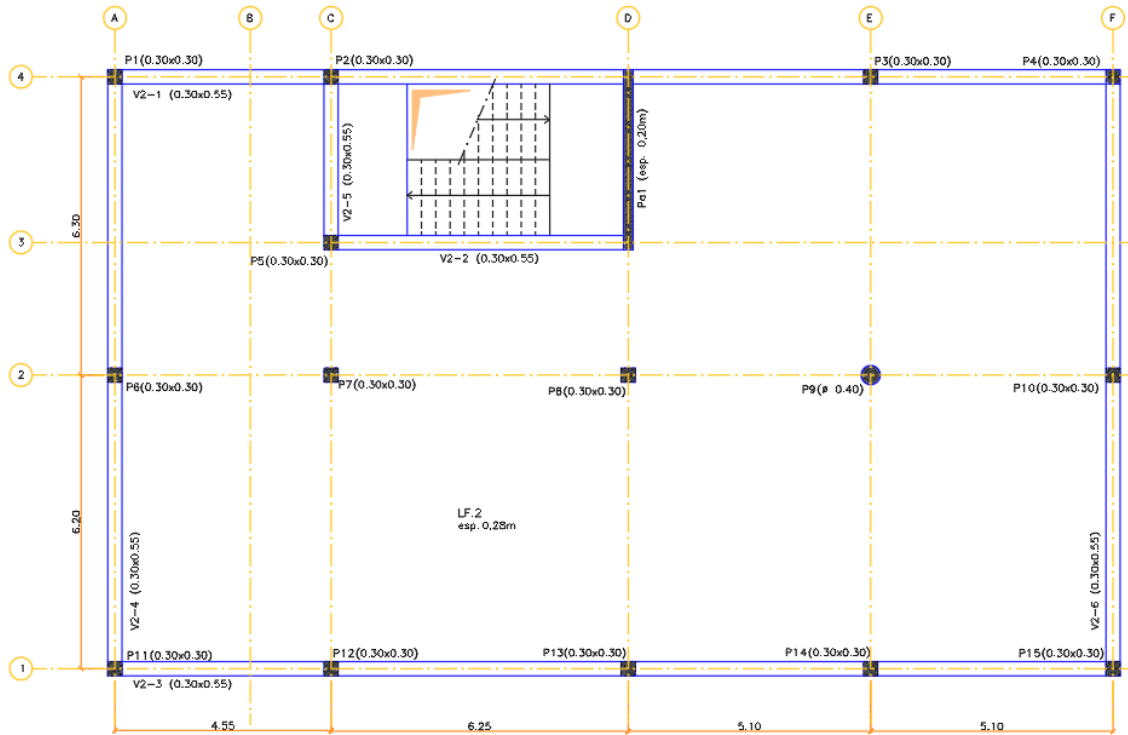


Figura 4.2 – Planta do 2º andar.

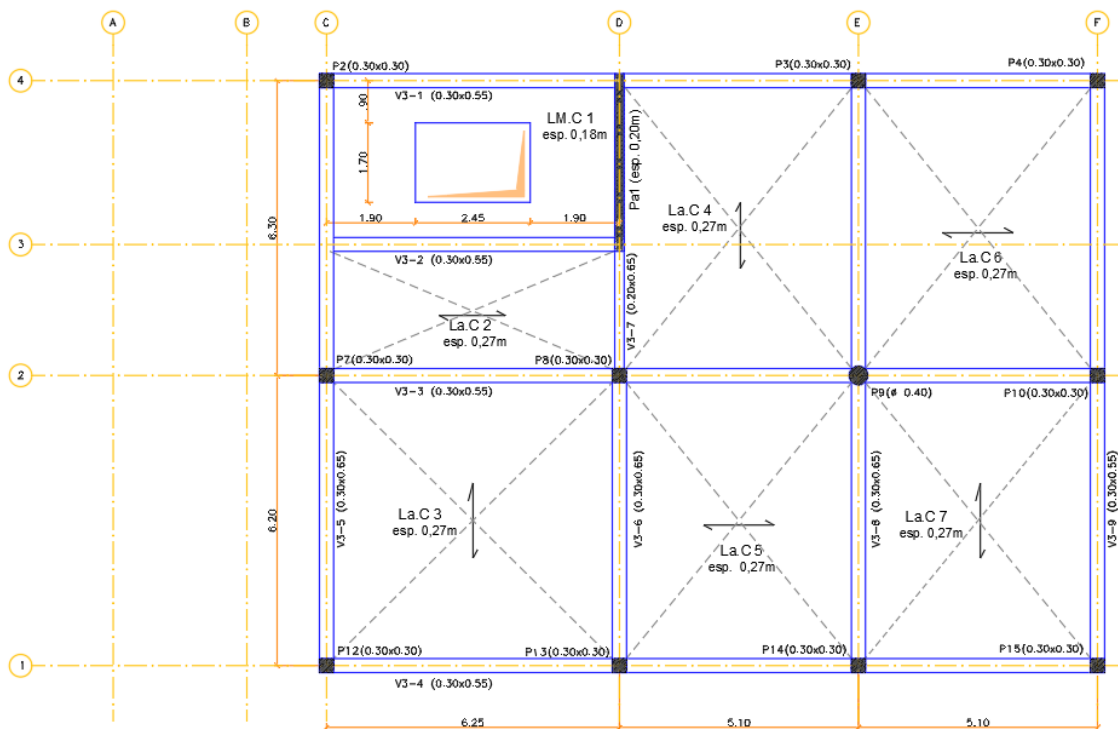


Figura 4.3 – Planta do 3º andar.

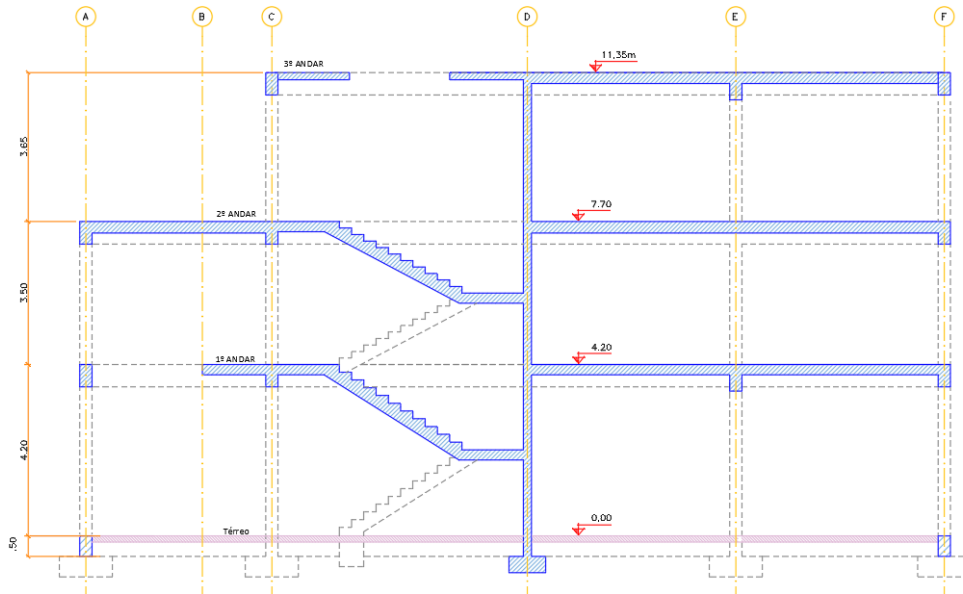


Figura 4.4 – Elevação.

A Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4 representam o edifício em planta e alçado. O comprimento é de no máximo 21,00 m entre os eixos A e F, e uma largura de 12,50 m entre os eixos 1 e 4; a altura varia de andar a andar, tendo o total de 11,35 m (altura do térreo até o topo). Sua fundação é constituída por sapatas retangulares, sendo a altura do topo da fundação até ao topo do edifício de 11,85 m.

O projeto foi escolhido por contemplar diferentes tipos de lajes, pilares, vigas e geometrias. As características das lajes são apresentadas na Tabela 4.1 e os materiais na Tabela 4.2. O cobrimento de lajes, vigas e pilares foi definido com base no EC2. A vida útil de projeto é, neste caso, de 50 anos, classe S4, e a classe de agressividade foi adotada como XC3. Com isso, se retira da Tabela 4.3 o valor de $C_{min,dur}$ de 25 mm, que deve ser majorado em fase de projeto para se considerar as tolerâncias de execução ΔC_{dev} . A tolerância, ΔC_{dev} , tem um valor recomendado de 10 mm. Somando estas duas parcelas, foi obtido o valor do cobrimento nominal de 35 mm. No caso de bitolas de aço maiores que 20 mm, deve-se verificar o cobrimento, pois o mesmo depende deste fator.

Tabela 4.1 – Características e Espessuras das Lajes do Edifício.

Nível	Característica das lajes
Térreo	Laje térrea
Piso 1	Laje maciça vigada, armada em duas direções com 25 cm de espessura
Piso 2	Laje fungiforme maciça com 28 cm de espessura
Cobertura	Laje maciça vigada armada em uma direção com 14 cm

Tabela 4.2 – Dados dos materiais.

Dados	
γ_c	1,500
γ_s	1,150
fck (MPa)	30,000
fyk (MPa)	500,000
fcd (MPa)	20,000
fyd (MPa)	434,783
fctm	2,900

Tabela 4.3 – Cobrimento mínimo para requisitos relativos à durabilidade, $C_{min,dur}$ (mm).

Tempo de vida útil de projecto	Classe de exposição						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
50 anos (Classe S4)	10	15	25	30	35	40	45
100 anos (Classe S6)	20	25	35	40	45	50	55

4.2 CARGAS E COMBINAÇÕES

As cargas permanentes estão resumidas na Tabela 4.4, tendo em conta os revestimentos e as paredes divisórias contempladas. Além das cargas permanentes do quadro, também deve-se considerar uma carga de 5 kN/m nas fachadas por causa das paredes, e uma carga de 2,38 kN/m² na escada (peso dos degraus).

Tabela 4.4 – Cargas permanentes do primeiro caso de estudo.

Cargas de dimensionamento			
Utilização	Indústria	Escritório	Cobertura
Revestimentos	0,80kN/m ²	1,00 kN/m ²	1,50 kN/m ²
Paredes Divisórias	-	1,60 kN/m ²	-

As sobrecargas de utilização foram definidas conforme o Eurocódigo 1, parte 1 (NP EN 1991-1-1, 2009). A Tabela 4.5 contém todas as cargas definidas para cada tipo de uso em função da respetiva categoria.

Tabela 4.5 – Resumo de sobrecargas utilizadas no edifício.

Níveis	Categoria	Sobrecarga (kN/m ²)
Cobertura	H	0,4
Piso 2-Escritório	B	3,0
Piso 1-Industrial	E1	7,5
Escada	E1/B	7,50/3,0

Além da sobrecarga de utilização, também levou-se em consideração a ação do vento. O cálculo foi executado conforme o Eurocódigo 1, parte 4 (NP EN 1991-1-4, 2010), e a ação do vento nos eixos x+, x-, y+ e y-.

O vento foi aplicado sob a forma de uma carga distribuída nas vigas do edifício. O ideal seria a aplicação dessas em painéis como os *cladding* do Robot, porém, preferiu-se modelar tudo no Revit para evitar a necessidade de adaptações antes de calcular a armadura e os esforços da estrutura. Isto significa que com as cargas aplicadas no Revit se minimizaria a oportunidade de ocorrer erros na etapa de carregamentos entre os diferentes *softwares* de cálculo.

A planta da edificação (Figura 4.5) mostra os eixos em que as cargas de vento atuaram. Quando denominado x+ ou y+, significa que o vento está atuando segundo o sentido positivo do respetivo eixo. Outra nomenclatura adotada recorre às designações Pv,1 e Pv,2, em que 1 significa pressão barlavento e

2 sotavento. Caso o sinal seja negativo, o vento passa a atuar em sentido oposto, e, portanto, continua sendo 1 e 2, porém, 1 passa a ser sotavento e 2 barlavento. A Tabela 4.6 e a Tabela 4.7 são resultados obtidos pelas pressões do vento, e o Anexo B detalha o cálculo da ação deste.

Tabela 4.6 – Resumo de sobrecargas do vento no eixo y.

EIXO Y			
Pressões		Pv,1 (kN/m)	Pv,2 (kN/m)
Pavimento 1	Pressão interna = 0,20	3,788	4,350
	Pressão interna = - 0,30	7,011	1,136
Pavimento 2	Pressão interna = 0,20	3,518	4,04
	Pressão interna = - 0,30	6,51	1,054
Cobertura	Pressão interna = 0,20	1,796	2,062
	Pressão interna = - 0,30	3,323	0,538

Tabela 4.7 – Resumo de sobrecargas do vento no eixo x

EIXO X			
Pressão		Pv,1 (kN/m)	Pv,2 (kN/m)
Pavimento 1	Pressão interna = 0,20	3,473	4,350
	Pressão interna = - 0,30	6,695	0,497
Pavimento 2	Pressão interna = 0,20	3,225	3,453
	Pressão interna = - 0,30	6,217	0,461
Cobertura	Pressão interna = 0,20	1,646	1,763
	Pressão interna = - 0,30	3,174	0,235

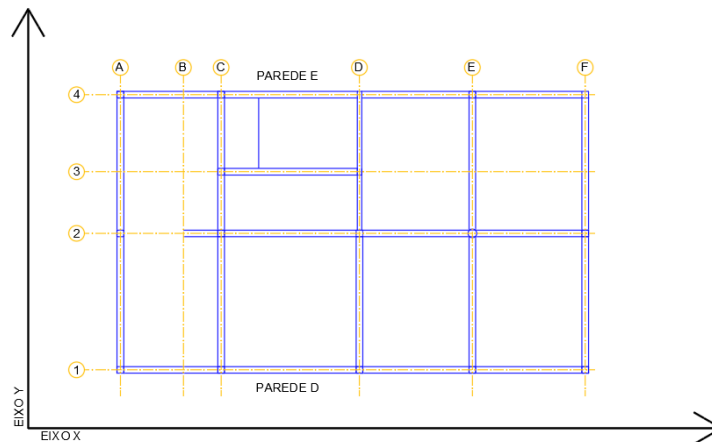


Figura 4.5 – Planta com eixos de aplicação do vento.

Para as lajes da cobertura, contemplou-se ainda a ação da neve regulamentar (NP EN 1991-1-3, 2009). Pelo Eurocódigo 1, a zona em que se encontra Póvoa de Varzim é a Zona Z2 (Figura 4.6), e o cálculo da neve é executado por meio da equação (4-1), resultando em uma carga uniformemente distribuída de 0,522 kN/m². O efeito do sismo não foi levado em consideração para essa estrutura.

$$S_k=0,1 \times [1+(235/500)^2]= 0,122 \text{ (KN/m}^2\text{)} \quad (4-1)$$

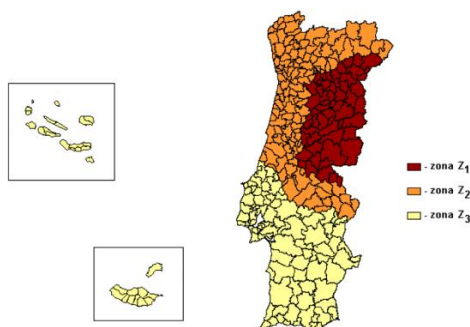


Figura 4.6 – Zonas de neve conforme Eurocódigo (NP EN 1991-1-3, 2009).

Todas as cargas aqui citadas foram aplicadas em combinações para o Estado Limite Último (Tabela 4.9) e em combinações para os Estados Limites de Serviço (combinações características, frequentes e quase permanentes), criadas para verificar deformação, largura de fendas e controlo de tensões. As combinações últimas foram executadas manualmente para poder aplicar alternância de sobrecargas com melhor controlo, já as de serviço foram geradas automaticamente pelo Robot. As sobrecargas foram numeradas de SC1 a SC20. As sobrecargas do piso industrial foram aplicadas de forma alternada a fim de se conseguir a pior situação por alternâncias de sobrecargas no 1º andar (Figura 4.7).

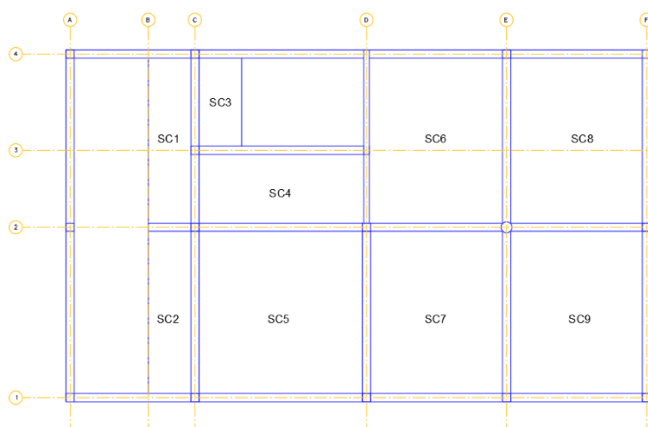


Figura 4.7 – Sobrecargas no 1º andar.

A SC10 é referente a todas sobrecargas de escritório; a SC11 da cobertura e a SC12 da escada. As sobrecargas de 13 a 20 são referentes às cargas de vento calculadas. Para ilustrar, a Tabela 4.8 contém todas as cargas de forma simplificada para o entendimento da Tabela 4.9. Somente as combinações de ELU foram detalhadas, pois aplicaram diferentes combinações para a alternância de sobrecarga que foram efetuadas de maneira manual. As combinações de serviço seguem o padrão do EC2 e foram aplicadas automaticamente no Robot, como já descrito.

Tabela 4.8 – Nomenclatura das cargas.

CARGAS PERMANENTES	
Peso Próprio	PP
Carga permanente	CP
SOBRECARGAS DE USO	
Indústria	SC1 a SC9
Escritório	SC10
Cobertura	SC11
Escada	SC12
Vento y+	SC13 e SC14
Vento y-	SC15 e SC16
Vento x+	SC17 e SC18
Vento x-	SC19 e SC20

Tabela 4.9 – Combinações para Estado Limite Último.

Combinações		
COMB1	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(\sum SC1 \text{ a } SC12)$
COMB2	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(SC1+SC5+SC6+SC9)$
COMB3	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(SC2+SC3+SC4+SC7+SC8)$
COMB4	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(SC3+SC4+SC5+SC8+SC9)$
COMB5	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(SC1+SC2+SC6+SC7)$
COMB6	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(SC1+SC2)$
COMB7	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(SC4+SC5+SC6+SC7)$
COMB8	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(SC6+SC7+SC8+SC9)$
COMB10	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,05*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+1,50*SC13$
COMB11	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+0,90*SC13$
COMB12	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,05*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+1,50*SC14$
COMB13	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+0,90*SC14$
COMB14	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,05*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+1,50*SC15$
COMB15	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+0,90*SC15$
COMB16	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,05*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+1,50*SC16$
COMB17	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+0,90*SC16$
COMB18	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,05*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+1,50*SC17$
COMB19	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+0,90*SC17$
COMB20	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,05*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+1,50*SC18$
COMB21	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+0,90*SC18$
COMB22	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,05*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+1,50*SC19$
COMB23	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+0,90*SC19$
COMB24	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,05*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+1,50*SC20$
COMB25	ULS	$1,35*(PP+CP)+1,50*(\sum SC1 \text{ a } SC12)+0,90*SC20$

4.3 MODELO REVIT, APLICAÇÃO DO BIM

O modelo BIM teve suas premissas baseadas no capítulo 3, criado pela própria autora e introduzido no Capítulo 3.

Para a execução do projeto em Revit, optou-se por importar as plantas já fornecidas do AutoCAD para o Revit. Seguindo a orientação das normas, importou-se o arquivo na coordenada 0,0,0. Sabe-se que os projetos serão desenhados em Revit pela própria arquitetura, porém, no caso de se ter um modelo em AutoCAD, a importação é uma ferramenta viável e facilita o processo de transcrição para Revit.

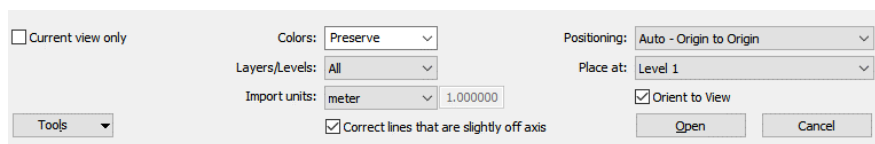


Figura 4.8 – Importação Autocad para Revit.

Ao clicar na opção *Import CAD*, as opções ilustradas na Figura 4.8 serão selecionadas para garantir que ambos os projetos trabalhem na mesma unidade e ponto de origem. A visualização do modelo fica em 2D no nível escolhido no momento da importação, e para transformar um modelo CAD para Revit 3D é necessário criar os elementos verticais por cima do modelo 2D.

4.3.1 Modelo arquitetura

A partir da planta de AutoCAD, modelou-se a arquitetura. No estudo de caso, a arquitetura foi proposta pela autora: seu formato é simples, com elementos básicos apenas para testar a comunicação do *software* entre estrutura e arquitetura. Seguindo os padrões de detalhamento da norma finlandesa, modelou-se na *Grade 2*. A modelação teve como resultado as imagens abaixo:

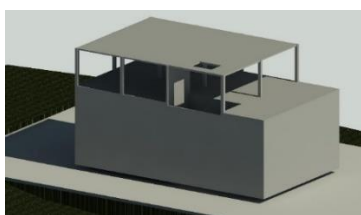


Figura 4.9 – Modelação básica.



Figura 4.10 – Modelação com detalhes como janelas e portas.

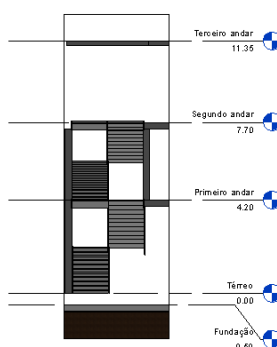


Figura 4.11 – Corte do detalhe da escada.

Após modelar no Revit *Architecture*, abriu-se um arquivo novo no *template* de estruturas. O vínculo com o arquivo da arquitetura foi executado com uma função do próprio Revit, e por cima do modelo arquitetônico desenhou-se o esqueleto estrutural. Observa-se, no entanto, que se por algum motivo for necessário a atualização do Revit ou mudança do local do arquivo da arquitetura, após a inserção do

modelo arquitetônico, esse arquivo perde o vínculo conforme mostra a Figura 4.12. O vínculo é de extrema importância, pois se estivesse trabalhando como realmente é executado um projeto, os escritórios dos modelos arquitetônico e estrutural seriam distintos, já com o *link*, os modelos comunicam e partilham informação. Ou seja, ao mudar algo no modelo arquitetônico muda-se também no arquivo estrutural o qual o modelo arquitetônico foi vinculado.

Manage Links ×

Revit IFC CAD Formats DWF Markups Point Clouds

Link Name	Status	Reference Type	Positions Not Saved	Saved Path	Path Type	Local Alias
ARQUITETUR EC1.passo 1.r	Not Found	Overlay	<input type="checkbox"/>	ESTUDO DE CASO 1\ARQU	Relative	

Figura 4.12 – Perca de vínculo por atualização do *software*.

Ao se utilizar o comando *Link Revit*, o modelo vem a partir de um bloco que não pode ser editável no *template* de estruturas. A fim de poder reutilizar algumas das peças modeladas pela arquitetura, copiou-se por meio do comando *Collaborate>>Copy/Monitor>>Select Link*. Como a arquitetura não posiciona (na maioria das vezes) os pilares, a parte em que esses estavam embutidos nas paredes não foi modelada na arquitetura, o que deverá ser feito posteriormente no *template* de estruturas.

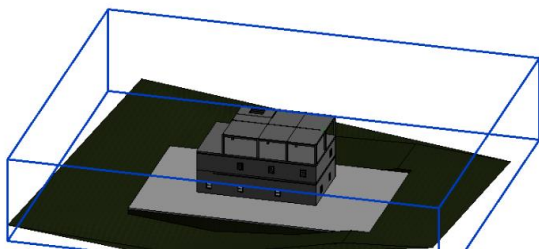


Figura 4.13 – Importação da arquitetura em forma de *link*.

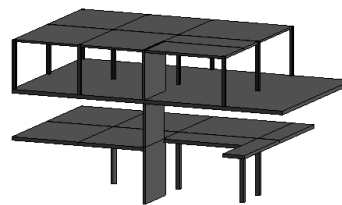


Figura 4.14 – Partes da modelagem arquitetônica reaproveitadas.

4.3.2 Modelo estrutural

Com o vínculo ligado, modelou-se a parte da estrutura que faltava no edifício, seguindo as dimensões dos elementos que constam na planta do Anexo A. Normalmente, estas dimensões deveriam ser calculadas pelo engenheiro, mas como o dimensionamento não é o foco do presente trabalho, adotou-se o já indicado no anexo.

Ao criar o modelo físico (Figura 4.15) do projeto, o modelo analítico é automaticamente fornecido caso a opção “disponibilizar modelo analítico” esteja assinalada. O modelo analítico (Figura 4.16) consiste no modelo que será exportado para o Robot, e deve ser verificado para não conter qualquer erro de

consistência e instabilidade, conforme citado no capítulo do Manual de boas práticas BIM, baseado nas normas *AEC (UK) BIM protocol* e *common BIM requirements (COBIM)*.

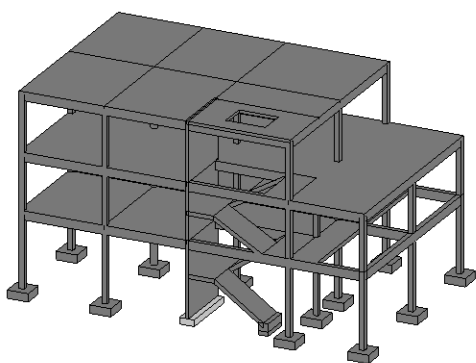


Figura 4.15 – Modelo estrutural sem as cargas aplicadas.

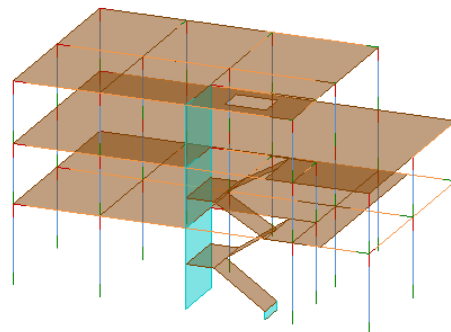


Figura 4.16 – Modelo analítico.

O *link* entre os modelos arquitetônicos e estrutural estará sempre ativo. Por exemplo: se um eixo ou elemento for movimentado no projeto estrutural, devido ao fato de os arquivos estarem conectados a arquitetura receberá uma mensagem avisando sobre as alterações.

A modelação teve um desenvolvimento linear sem maiores problemas no Revit. Observou-se, no entanto, os aspectos citados no Capítulo 3. Visto que a direção de vigas e lajes é significativa para os eixos dos elementos que são essências no Robot, padronizou-se uma metodologia de sempre modelar as vigas da esquerda para direita, de baixo para cima, e as lajes da esquerda para a direita.

A parte das escadas e sua fundação foi algo a ser experimentado por diversas vezes. O melhor resultado para representar uma escada foram lajes inclinadas a partir do comando *Slope Arrow*. As lajes que representam a escada trabalham bi apoiadas nas lajes criadas no patamar e com fundação no primeiro lanço. A laje inclinada que chega ao piso térreo foi conectada a uma parede estrutural que interligou a fundação com a escada.

As outras fundações foram executadas de maneira simples e sem maiores problemas. Observou-se, contudo, que quando se modela, por exemplo, uma sapata corrida no Revit, a mesma tem que ter o comprimento igual do elemento que está apoiando. No caso, uma das fundações era uma viga baldrame da parede estrutural e ultrapassava em 0,35 m de cada lado o tamanho da parede. Ao exportar para o Robot, o apoio gerado pela viga em questão no Revit ficou maior do que a parede estrutural, resultando em nós sem utilidades e isolados (Figura 4.17).

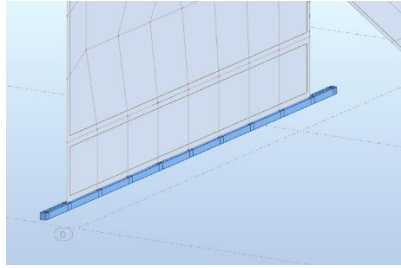


Figura 4.17 – Fundação sobre a parede estrutural no Robot.

Após solucionar todos os inconvenientes da modelagem, carregou-se a estrutura com as cargas e combinações já descritas e verificou-se a consistência e o suporte do modelo. Na parte da consistência não houve nenhum aviso ou erro.

A verificação de suportes não indicou nenhum erro até a inserção da escada. Com ela, surgiram avisos de que talvez ocorresse instabilidade nas lajes inclinadas por essas estarem apoiadas em outras lajes. Como a escada normalmente é executada por meio de cálculos manuais e modelagem posterior em *softwares* de cálculo, era de se esperar que pudesse existir algumas limitações na nova abordagem. Levando em conta o aviso, decidiu-se exportar o projeto da mesma maneira para o Robot, a fim de verificar no *software* de cálculo se ocorreria algum erro e se os resultados seriam próximos aos calculados pelos outros métodos. O modelo final está representado na Figura 4.18.

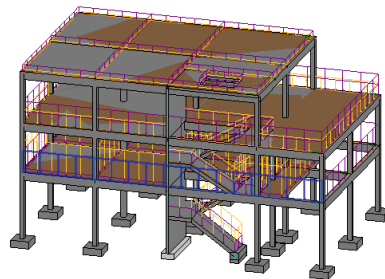


Figura 4.18 – Estrutura carregada.

4.4 TRANSFERÊNCIA DOS DADOS DO MODELO PARA O ROBOT

O Revit tem uma ferramenta para a troca de dados com o Robot, criada a partir do *Plug-in Structural Analysis Toolkit*. Usou-se, portanto, a ferramenta do próprio Revit (*Robot Structural Analysis Link*) para exportar o modelo, que foi concluído com sucesso exportando as cargas, combinações, apoios, dimensões de elementos, materiais e eixos corretamente. Porém, notou-se que as direções de distribuição de cargas das lajes escolhidas no Revit (uma direção ou duas) não foram aplicadas no Robot. Para deixar as lajes da cobertura trabalhando em uma só direção, teve-se que criar um modo de calcular escolhendo essa especificação (Figura 4.19). Ao mesmo tempo, as configurações do Revit das direções feitas no momento

da criação das lajes estavam salvas, portanto, ao selecionar a opção de uma direção no Robot, a direção escolhida de trabalho das lajes já estava configurada, conforme o que havia sido selecionado no Revit.

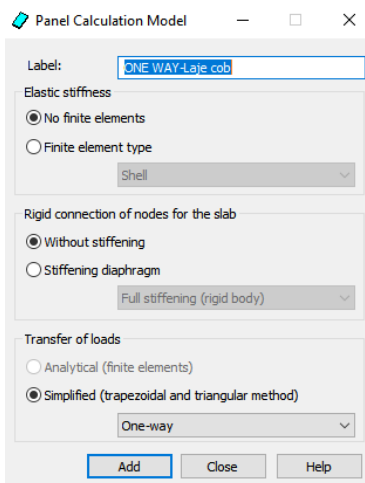


Figura 4.19 – Modo de cálculo em uma direção.

A estrutura foi calculada pelo Robot, não identificando nenhum erro ou aviso. No segundo andar, criaram-se *emitters* na junção da laje com os pilares. Esses *emitters* foram desenvolvidos visto que em lajes fungiformes se tem o efeito de punção nesses pontos, que devem ser analisados com maior detalhamento das malhas (detalhe da malha é visível na Figura 4.20).

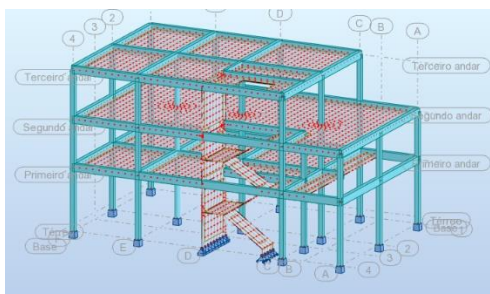


Figura 4.20 – Estrutura calculada.

Outro detalhe que foi preciso configurar no *software* foi a inércia das vigas. O intuito de se reduzir a rigidez à torção das vigas, inerente ao seu expectável estado fendilhado, alterou a inércia em x para 0,10 da inércia à torção da secção elástica.

4.5 VERIFICAÇÕES DO MODELO E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

O modelo do Robot foi verificado de diversas maneiras nos quesitos eixos, materiais, ligações entre elementos, tipos de apoios e possíveis erros de malhas.

Antes de verificar os momentos e ações na estrutura é importante observar o modelo estrutural. As deformações encontradas para combinação quase permanente (flechas devido a ações de longa duração)

no modelo mostram que não há nenhum elemento desligado da estrutura, ou seja, essa está se deformando como um todo, e a deformação máxima não ultrapassa o limite de deformação das lajes e vigas (Figura 4.21). Nota-se, no entanto, que as das lajes do primeiro e último andar são diferentes do que poderia ser inicialmente esperado: deformam como se não existisse grande rigidez das vigas.

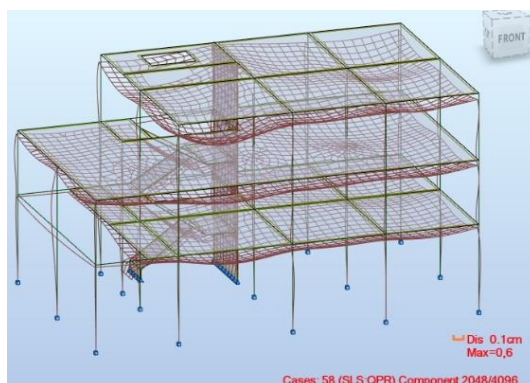


Figura 4.21 – Deformações do modelo estrutural para combinação QPR.

Seguindo as observações, analisou-se os gráficos de esforços a fim de identificar qualquer erro do modelo estrutural (Figura 4.22 a Figura 4.24)

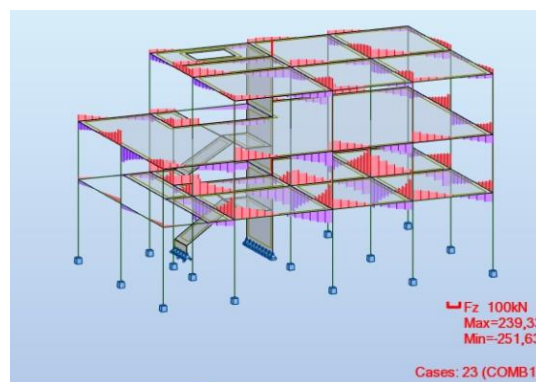
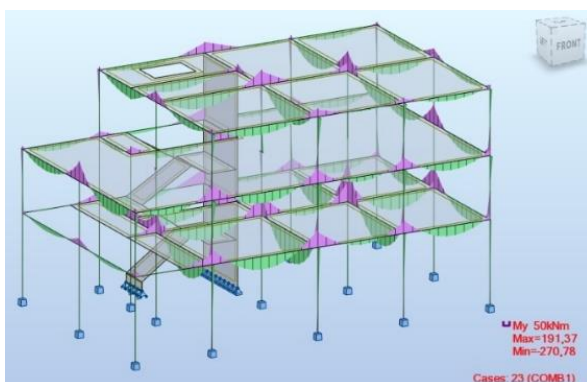


Figura 4.22 – Momentos fletores em y, COMB1. Figura 4.23 – Esforço transversal em z, COMB1.

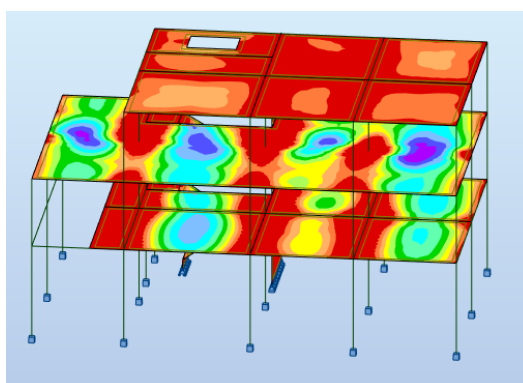


Figura 4.24 – Momentos fletores em x, COMB1.

Observando o resultado dos esforços e das deformações para algumas combinações diferentes, não se notou nenhum erro grave no modelo. Além das análises gerais da estrutura, a escada foi um elemento analisado à parte por se tratar de uma modelagem alternativa feita no Revit.

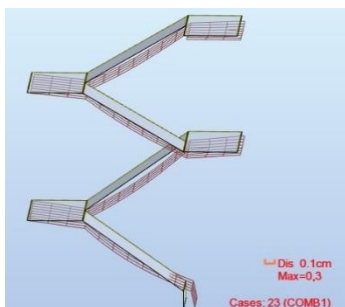


Figura 4.25 – Deformação da escada.

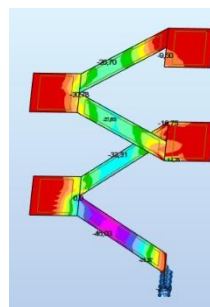


Figura 4.26 – Momentos fletores em x, COMB1 na escada.

A Figura 4.25 representa a deformada da escada. O aspecto da deformação está como esperado, e observando também a deformação geral da estrutura, conclui-se que os elementos estão ligados de forma correta e deformando em conjunto. Os momentos fletores foram analisados na Figura 4.26, e sua distribuição está coerente com o aspecto esperado.

Para confirmar se o modelo geral está dando resultados próximos do esperado, comparou-se os esforços de uma das lajes do primeiro piso do Robot com os esforços desta mesma laje pelo método de Montoya (Montoya, Meseguer e Cabré, 2001) e Czerny (Beton Kalender, 1976). Ambos os métodos necessitam da definição das condições de apoio da laje. O painel A (Figura 4.27) da laje do piso 1, que será analisado, está simplesmente apoiado no lado menor, que é o contorno da fachada do edifício, e engastado nos demais bordos. Assim, comparar os métodos manuais com o resultado do Robot dará uma percepção da validade do modelo, porém, pela própria deformada apresentada nota-se que as lajes estão trabalhando praticamente ignorando a rigidez das vigas, o que ocasionara em diferenças notáveis nos resultados entre ambos os métodos. A esse respeito, na Figura 4.28 é possível observar as condições de apoio do painel.

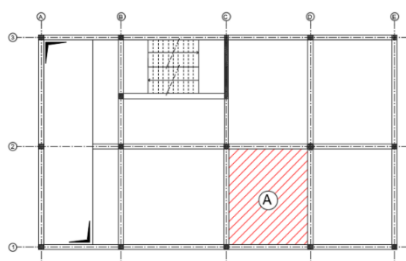


Figura 4.27 – Planta do Piso 1 com o Painel

A.

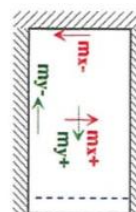


Figura 4.28 – Condições de Apoio do Painel

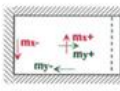
A.

4.5.1 Momentos fletores no painel A utilizando a tabela de Montoya

Delimitando as condições de apoio da laje, pode-se utilizar a tabela de Montoya para o cálculo de momento da laje. O fator de multiplicação é calculado pela Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Tabela de Montoya para o Painel A (Montoya, Meseguer e Cabré, 2001).

Esforços em lajes rectangulares apoiadas em quatro bordos MONTOYA-MESEGUER-MORAN

Método Clássico $\nu=0,15$	Tabela 23.1	Carga UNIFORME ①					
	I_y / I_x Vão menor / Vão Maior	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	$W = 0,001 \cdot q \cdot l_y^4 / Eh^3$	29	29	27	24	21	19
	$m_{y+} =$	42	40	37	33	29	26
	$m_{x+} =$	9	12	15	18	19	21
	$m_{y-} =$	85	83	79	74	68	62
	$m_{x-} =$	56	57	58	58	57	55

Calculando vão menor sobre vão maior temos: $\frac{l_y}{l_x} = \frac{5,10}{6,20} = 0,823$. Como a relação x e y está entre dois parâmetros, se interpolou encontrando os valores da Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Fatores a utilizar nos momentos para o Painel A.

My+ (kN.m)	32,10
Mx+ (kN.m)	18,23
My- (kN.m)	72,65
Mx- (kN.m)	57,77

A carga da laje (q) foi calculada para uma combinação de estado limite último justamente para poder se comparar com os valores calculados no Robot.

Resolvendo a equação para momentos de Montoya, calculou-se então os momentos para cada direção da laje. Abaixo, segue a Tabela 4.12 com os momentos calculados.

Tabela 4.12 – Momentos fletores para o painel A pelo método de Montoya.

Mom.	Tab. de Montoya
My + (kN.m)	17,34
Mx + (kN.m)	9,85
My - (kN.m)	39,24
Mx - (kN.m)	31,21

4.5.2 Momentos fletores no painel A utilizando a tabela de Czerny

O cálculo por Czerny é parecido com o cálculo de Montoya e foi utilizado como parâmetro comparativo para observar se os cálculos de Montoya estavam corretos. Mais uma vez com os contornos definidos e a carga, pode-se então calcular os momentos por Czerny. Observa-se que o lx de Czerny é o menor vão e

não l_y como em Montoya. Outra mudança também é o coeficiente de Poisson, considerado nulo em Czerny e 0,15 em Montoya.

Para o cálculo, a carga utilizada é a mesma calculada para Montoya. A laje é considerada armada em duas direções, pois $l_y < 2 \cdot l_x$ e o fator utilizado na tabela é o cociente de l_y com l_x ($l_y/l_x = 1,22$).

Tabela 4.13 – Tabela de Czerny (Beton Kalender, 1976).

TIPO	TABELA DE CÁLCULO DE LAJES (Czerny, com Coeficiente de Poisson nulo)															Flecha $a = p \cdot l_x^4 / (\alpha_x \cdot E \cdot h^3)$						
	p = carga uniformemente distribuída																					
Revisão RD	Apoio Simples															Engaste						
	l_y/l_x	1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7	1,75	1,8	$m_x = p \cdot l_x^2 / \alpha_x$	$m_y = p \cdot l_x^2 / \alpha_y$	$m'_x = - p \cdot \alpha_x' / \beta_x$	$m'_y = - p \cdot \alpha_y' / \beta_y$
α_2	53,2	49,5	46,7	44,2	42,4	40,8	39,5	38,3	37,3	36,5	35,7	35,1	34,6	34,0	33,6	33,2	33,0	32,8	32,6	32,5	32,4	31,3
α_1	43,5	40,0	38,5	35,7	33,3	32,3	31,3	30,3	29,4	28,6	27,8	27,0	26,3	26,3	25,6	25,0	25,0	25,0	25,0	24,4	24,4	23,8
α_y	55,6	58,8	58,8	62,5	66,7	68,7	71,4	71,4	71,4	71,4	76,9	76,9	76,9	83,3	83,3	83,3	83,3	90,9	90,9	90,9	100,0	100,0
β_x	16,1	15,4	14,7	14,3	13,9	13,5	13,2	12,8	12,7	12,7	12,5	12,3	12,3	12,2	12,2	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
β_y	18,2	17,9	17,9	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5

Pela tabela acima e com a relação dos vãos encontra-se o valor de α_2 e, posteriormente, de α_x , α_y , β_x e β_y . As fórmulas para calcular cada momento se encontram no cabeçalho da Tabela 4.13, e os resultados dos momentos encontrados estão dispostos na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Momentos fletores para o painel A pelo método de Czerny.

Momentos	Czerny
$M_x +$ (kN.m)	16,720
$M_y +$ (kN.m)	8,090
$M_x -$ (kN.m)	40,010
$M_y -$ (kN.m)	30,860

4.5.3 Cálculo pelo Robot e comparação de resultados.

A comparação do cálculo manual foi feita por meio da COMB 1 do Robot, que considera cargas permanentes, sobrecargas de utilização e peso próprio. Os resultados foram tirados pelo comando *Maps* utilizando a aba *Detailed* (Figura 4.29 e Figura 4.30), utilizada uma vez que Montoya e Czerny calculam os momentos em xx e yy não levando em consideração os momentos xy , que no caso na aba *Complex* do Robot são considerados.

Os cálculos de Montoya e Czerny têm como respostas os momentos máximos tanto negativo quanto positivo e, portanto, as comparações devem ser feitas com os momentos máximos representados no Robot. Porém, para os momentos negativos, os máximos representados no Robot são praticamente em cima do pilar onde deveria ser zero por Montoya e Czerny. Por esse motivo, para a comparação dos momentos negativos foi feita a integral de um *panel cut* dividida pelo comprimento do lado em análise (Figura 4.31 e Figura 4.32).

Trata-se de método paliativo para chegar ao momento negativo, desconsiderando picos de momentos negativos gerados por elementos estruturais adjacentes. Salienta-se, no entanto, que é necessário levar

em conta que as tabelas de Montoya e Czerny são métodos simplificados que não consideram a plastificação das peças de concreto armado, as condições de apoio da laje e a rigidez dos elementos adjacentes, como as vigas. É de se esperar, portanto, que os momentos resultem em valores diferentes, principalmente pelas condições impostas por Montoya e Czerny, as quais, em muitos casos, não são realistas.

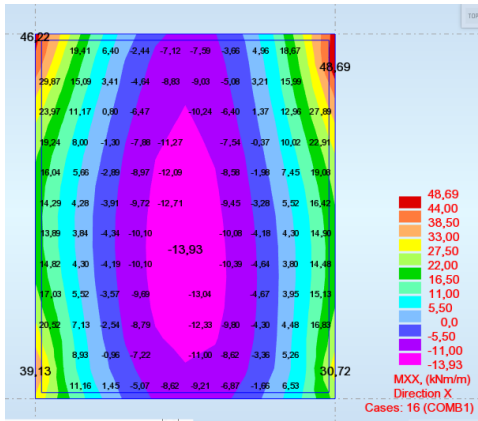


Figura 4.29 – Momentos na direção x, painel A.

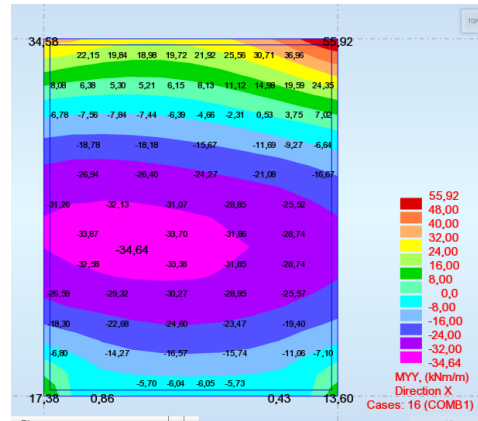


Figura 4.30 – Momentos na direção y, painel A.

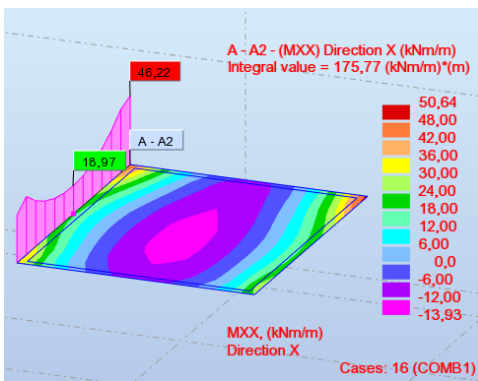


Figura 4.31 – Painel Cut momento negativo na direção x, painel A.

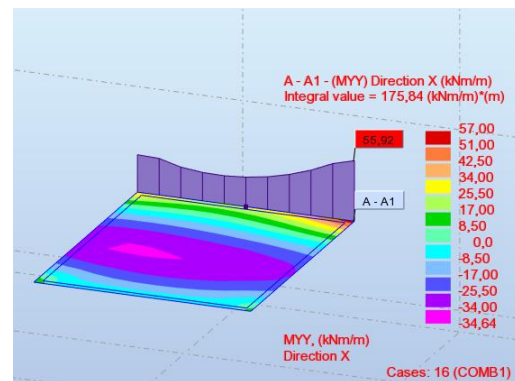


Figura 4.32 – Painel Cut momento negativo na direção y, painel A.

Tabela 4.15 – Comparação entre os resultados de Montoya e do Robot.

Momentos	Montoya	Robot	Montoya x Robot
Mx + (kN.m)	17,340	13,930	-24,48%
My + (kN.m)	9,850	34,640	71,56%
Mx - (kN.m)	39,240	28,350	-38,41%
My - (kN.m)	31,210	34,478	9,48%

A Tabela 4.15 mostra claras diferenças entre os resultados de Montoya e do Robot. Isso se deve por todos os fatos citados anteriormente e por causa das vigas do edifício em análise serem muito deformáveis. Essas diferenças eram esperadas conforme descrito no começo do Capítulo 4.5. Para tentar alcançar o

mais próximo possível do método simplificado de Montoya e do Czerny, modificou-se a rigidez das vigas por meio de diferentes métodos.

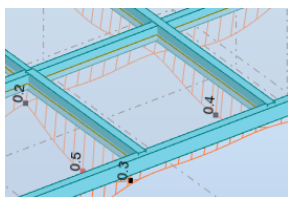


Figura 4.33 –
Deformação das vigas.

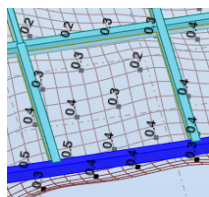


Figura 4.34 –
Deformação geral.

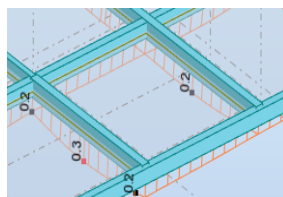


Figura 4.35 –
Deformação das vigas
com rigidez aumentada.

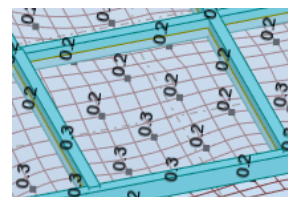


Figura 4.36 –
Deformação geral, vigas
com rigidez aumentada.

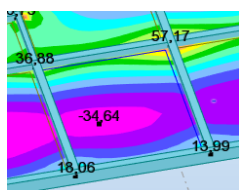


Figura 4.37 – Momento em y.

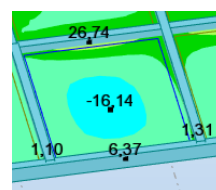


Figura 4.38 – Momento em y, rigidez das vigas
aumentada

Da Figura 4.33 a Figura 4.38 são representadas as deformações e momentos atuantes para as vigas e lajes do projeto com e sem a rigidez elevada. Para aumentar a rigidez, criou-se um material alterando o módulo de elasticidade e se aplicou nas vigas, obtendo, então, os resultados da Figura 4.35, Figura 4.36 e Figura 4.38.

Na Figura 4.33 e na Figura 4.34 nota-se na laje em análise que as deformações no meio do vão são menores do que as deformações perto da viga, pelo fato da rigidez das vigas serem baixas. Isto não quer dizer que o modelo elementos finitos (MEF) está incorreto, somente que os simplificados são menos efetivos, já que as hipóteses básicas de contorno não são aqui aplicadas.

Ao aumentar a rigidez das vigas, vê-se a diferença na deformação, que diminui significativamente. Os momentos se aproximaram aos calculados por Czerny e por Montoya, porém, como o engaste de ambos os métodos absorve todo esforço, ainda existem diferenças entre seus momentos.

Entendeu-se, então, que para chegar aos momentos de Montoya seria necessário que os apoios das lajes absorvessem os esforços como um engaste perfeito. A Figura 4.39 e a Figura 4.40 representam os momentos para os painéis engastados em x e y respectivamente.

Utilizando os artifícios de engaste das laterais, os momentos se aproximaram muito dos calculados por Montoya e Czerny. Porém, mesmo deixando as laterais engastadas, a parte que é considerada apoiada da viga recebe momentos negativos, ou seja, não funciona 100% como um apoio simples em que os

momentos deveriam ser nulos. Outra observação importante é que os coeficientes de Poisson são diferentes entre Montoya, Czerny e Robot (respectivamente 0,15; 0 e 0,20). Os resultados estão dispostos na Tabela 4.16.

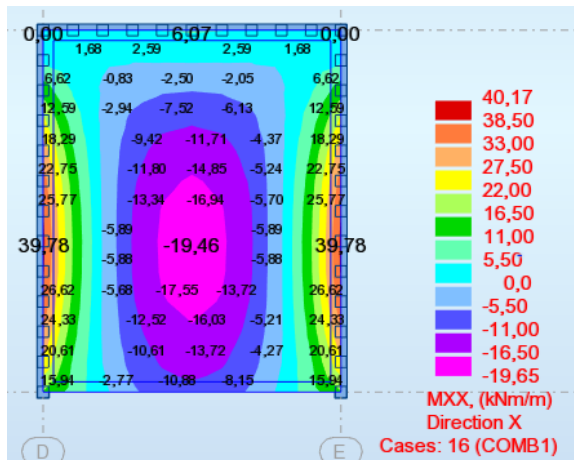


Figura 4.39 – Momento na direção x, painel A engastado.

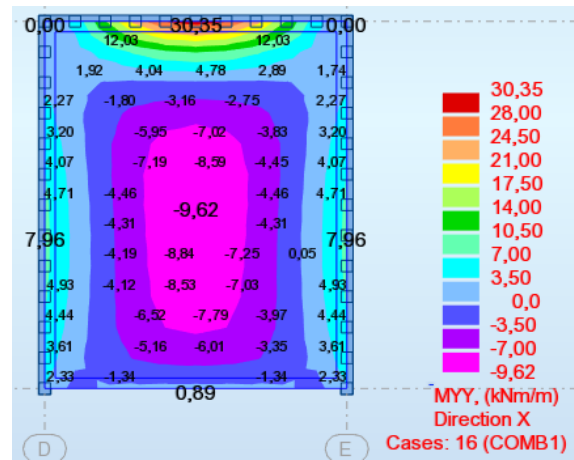


Figura 4.40 – Momento na direção y, painel A engastado.

O modelo de MEF já tinha sido verificado por meio da análise do modelo estrutural. As pesquisas aqui descritas foram formas de se chegar próximo do que seria o cálculo manual no MEF, levando em conta que esse é, atualmente, o modelo mais realista (Kimura, 2018). Pode-se também confirmar que os carregamentos e combinações foram importados com sucesso, já que os resultados em condições iguais de contorno foram extremamente parecidos para ambos os modelos. Seguindo este pensamento, conclui-se que o modelo está dando os resultados esperados e que nenhum dado de forças, combinações, materiais ou qualquer outro tipo de informação importante foi perdido no processo de modelagem e interoperabilidade dos *softwares*.

Tabela 4.16 – Comparação entre resultados do painel A.

Momentos	Czerny	Montoya	Robot-Eng.	Robot	Montoya x Robot-Eng.	Montoya x Robot	Czerny x Robot-Eng.	Czerny x Montoya
Mx + (kN.m)	16,720	17,340	19,460	13,930	10,89%	-24,48%	14,08%	-3,71%
My + (kN.m)	8,090	9,850	9,620	34,640	-2,39%	71,56%	15,90%	-21,76%
Mx - (kN.m)	40,010	39,240	39,780	28,350	1,36%	-38,41%	-0,58%	1,92%
My - (kN.m)	30,860	31,210	30,350	34,478	-2,83%	9,48%	-1,68%	-1,13%

4.6 DIMENSIONAMENTO DAS LAJES MACIÇAS

O cálculo do dimensionamento das lajes foi executado similar ao das vigas, que está no próximo capítulo, utilizando o EC2 (Félix, 2010 e Félix; Guedes; Never, 2014). As lajes que foram analisadas são todas maciças, variando somente os tipos de apoio e a direção que elas trabalham. Os resultados foram calculados para a envoltória de combinações entre COMB 1 a COMB 25 de ELU, a deformação foi

verificada pela combinação quase permanente de estado limite de serviço e a abertura de fissuras para as combinações frequentes da estrutura. A nomenclatura das lajes consta no Anexo A, a metodologia de cálculo no Anexo B e os detalhes constam no Anexo D.

4.6.1 Dimensionamento da laje LM3

Assim como toda a estrutura, a laje LM3 tem os mesmos materiais já citados no começo do Capítulo 4 da Tabela 4.2. A definição dos contornos foi executada levando em consideração se a laje era simplesmente apoiada, contínua ou engastada. Os momentos negativos (Figura 4.43), por terem picos nos encontros com os pilares, foram calculados como integral do *panel cuts* dividido pelo comprimento do vão (assim como no capítulo 4.5). Além dos momentos, o esforço transversal nas lajes é algo pouco analisado, mas que foi verificado no trabalho. A Tabela 4.17 contém os dados necessários para o cálculo e verificações das armaduras da laje.

Tabela 4.17 – Dados para cálculo da laje LM3.

Dados	
h (m)	0,250
d (m)	0,200
b(m)	1,000
lx (m)	6,250
ly (m)	2,800
lx/ly - Arm. uma direção.	2,232
η	1,000
Mxx + (kN.m)	37,030
Mxx - (kN.m)	65,325
Myy + (kN.m)	14,350
Myy - (kN.m)	23,006
Ved máx (kN)	259,520
ϵ_c (%)	3,500
Es (GPa)	200,000
Smáx - armd. Principal (mm)	300,000
Smáx - armd. Distribuição (mm)	300,000
Smáx + esforço principal (mm)	250,000
Smáx + esforço distribuição (mm)	300,000
Dados para verificar esf. transversal	
CRd,c	0,120
k	2,000
ρ_1	0,002

Apesar da relação da laje resultar em uma armação unidirecional, neste caso teve-se que armar em duas direções. A causa disto foi a baixa rigidez (alta deformabilidade) das vigas, fato que já foi citado e abordado nas comparações feitas do Capítulo 4.5.3. Pelos motivos citados, ambas as direções foram analisadas e dimensionadas como se fosse uma laje armada em duas direções.

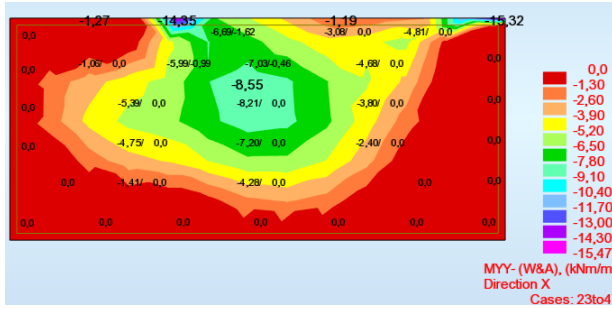


Figura 4.41 – Momentos positivos na direção y LM3.

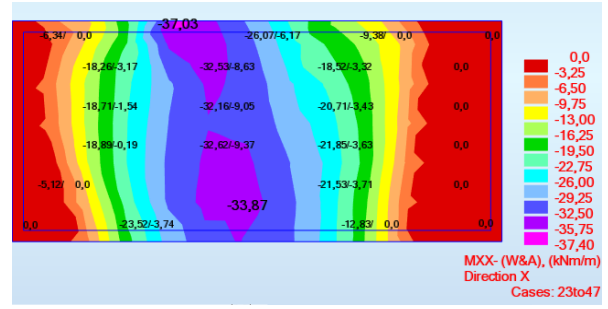


Figura 4.42 – Momentos positivos na direção x LM3.

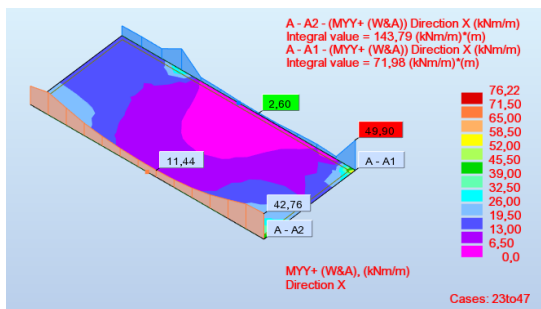


Figura 4.43 – Momentos negativos na direção y LM3.

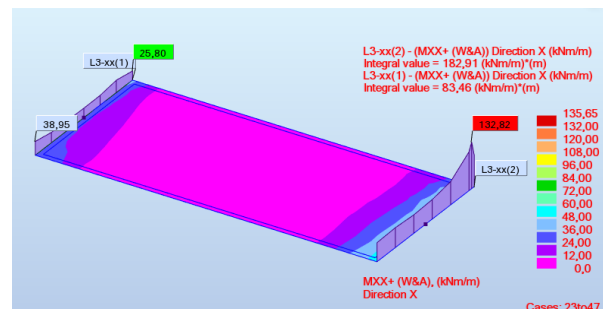


Figura 4.44 – Momentos negativos na direção x LM3.

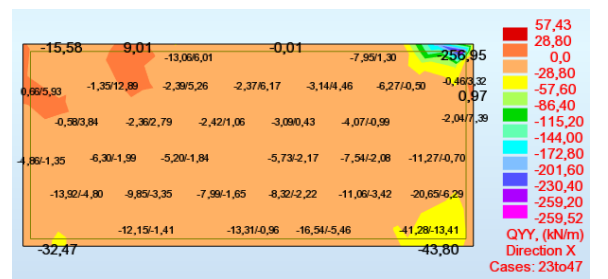
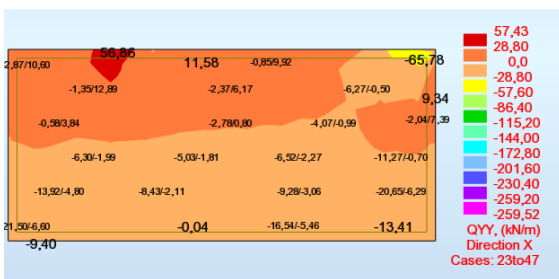


Figura 4.45 – Esforço transversal em y e na laje LM3.

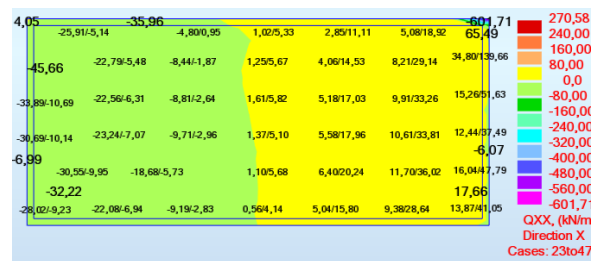
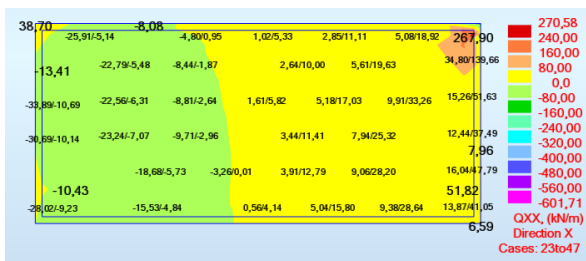


Figura 4.46 – Esforço transversal em x na laje LM3.

Os resultados obtidos no Robot para os momentos e esforços transversos da laje LM3 são visíveis nas imagens da Figura 4.41 até Figura 4.46. Os resultados dos momentos foram obtidos por meio do comando *maps, complex* (modelo *Wood & Armer*) para as opções de momentos positivos ou negativos, utilizando a metodologia *Wood & Armer*. Para as envoltórias, é necessário também assinalar na aba *case component* a opção *bottom or top envelope*, para momentos positivos ou negativos respectivamente. Os esforços transversos foram retirados a partir da aba *maps, detailed* na opção *shear forces* — também é necessário analisar para envoltórias positivas e negativas como nos momentos. Com base nesses dados e nas anotações feitas no memorial de cálculo do Anexo B, calcularam-se a Tabela 4.18 e Tabela 4.19.

Tabela 4.18 – Armadura em y LM3.

Cálculo das armaduras positivas direção YY			
Equações	Igualdade	Incógnitas	Resultado
0,000	0,000	x (m)	0,005
14,350	14,350	Arm. calculada (cm ² /m)	1,665
Verificações			
x/d	0,023	$\epsilon_s = \epsilon_c \cdot (d-x)/x$	153,685
X/d limite	0,617	$\epsilon_y = f_{yd}/E_s$	2,174
Verificação	Arm. Simples	Verificação	Arm.cedência
Cálculo da arm. máxima, mínima e verificação			
Designação	Resultado	Designação	Resultado
Arm. Mín. (cm ² /m)	3,016	Verificação de Arm. Mín.	Adotar arm.mín.
Arm. Máx. (cm ² /m)	100,000	Verificação de Arm. Máx.	Adotar arm. calculada
Ø Escolhido (mm)	8	Espaçamento (cm)	16,578
Solução adotada	Ø8//15	Área de aço (cm ²)	3,350
Arm. no apoio (cm ² /m)	3,016	Solução adotada	Ø8//15
Arm. Distribuição (cm ² /m)	0,670	Solução adotada	Ø6//30
Verificação do esforço transversal			
VRd,c (kN)	82,215	$0,035 \cdot k^{3/2} \cdot v_{fck} \cdot b \cdot d$ (cm ² /m)	108,444
Verificação		Calcular arm. eforço transversal	
Cálculo das armaduras negativas direção YY			
Equações	Igualdade	Incógnitas	Resultado
0,000	0,000	x (m)	0,007
23,006	23,006	Arm. calculada (cm ² /m)	2,685
Verificações			
x/d	0,036	$\epsilon_s = \epsilon_c \cdot (d-x)/x$	94,943
X/d limite	0,617	$\epsilon_y = f_{yd}/E_s$	2,174
Verificação	Arm. Simples	Verificação	Arm.cedência
Cálculo da arm. máxima, mínima e verificação			
Designação	Resultado	Designação	Resultado
Arm. Mín. (cm ² /m)	3,016	Verificação de Arm. Mín.	Adotar arm.mín.
Arm. Máx. (cm ² /m)	100,000	Verificação de Arm. Máx.	Adotar arm. calculada
Ø Escolhido (mm)	8	Espaçamento (cm)	16,57824934
Solução adotada	8//15	Área de aço (cm ²)	3,350
Arm. nos apoios (cm ² /m)	3,016	Solução adotada	Ø8//15
Arm. distribuição (cm ² /m)	0,603	Solução adotada	Ø6//30

Tabela 4.19 – Armadura x LM3.

Cálculo da armadura positiva direção XX			
Equações	Igualdade	Incógnitas	Resultado
0,000	0,000	x (m)	0,012
37,030	37,030	Arm. calculada (cm ² /m)	4,362
Verificações			
x/d	0,059	$\epsilon_s = \epsilon_c \cdot (d-x)/x$	152,066
X/d limite	0,617	$\epsilon_y = f_y d / E_s$	2,174
Verificação	Arm. Simples	Verificação	Arm. cedência
Cálculo da arm. máxima, mínima e verificação			
Designação	Resultado	Designação	Resultado
Arm. Mín. (cm ² /m)	3,016	Verificação de Arm. Mín.	Adotar área de aço calc.
Arm. Máx. (cm ² /m)	100,000	Verificação de Arm. Máx.	Adotar arm. calculada
Ø Escolhido (mm)	8	Espaçamento (cm)	11,463
Solução adotada	Ø8//10	Área de aço (cm ²)	5,030
Arm. do apoio (cm ²)	3,016	Solução adotada	Ø8//15
Arm. Distribuição (cm ² /m)	1,006	Solução adotada	Ø6//25
Cálculo das armaduras negativas direção XX			
Equações	Igualdade	Incógnitas	Resultado
0,000	0,000	x (m)	0,021
65,325	65,325	Arm. calculada (cm ² /m)	7,847
Verificações			
x/d	0,107	$\epsilon_s = \epsilon_c \cdot (d-x)/x$	31,828
X/d limite	0,617	$\epsilon_y = f_y d / E_s$	2,174
Verificação	Arm. Simples	Verificação	Arm. cedência
Cálculo da arm. máxima, mínima e verificação			
Designação	Resultado	Designação	Resultado
Arm. Mín. (cm ² /m)	3,016	Verificação de Arm. Mín.	Adotar área de aço calc.
Arm. Máx. (cm ² /m)	100,000	Verificação de Arm. Máx.	Adotar arm. calculada
Verificação de Arm. Máx.	Adotar arm. calculada	Verificação de Arm. Mín.	Adotar área de aço calc.
Ø escolhido (mm)	10	espaçamento (cm)	10,068
Solução adotada	Ø10//10	Área de aço (cm ² /m)	7,850
Arm. no apoio (cm ² /m)	3,016	Solução adotada	Ø8//15
Arm. Distribuição xx (cm ² /m)	1,569	Solução adotada	Ø8//30

Da mesma forma que as vigas, a distribuição da armadura é executada por meio do cálculo das emendas, diâmetro do mandril e amarração. Para os diâmetros encontrados, executou-se os cálculos abaixo:

- l_{bd} boa aderência = $35 \cdot 0,008 = 0,28$ m
- $\phi_{m,min} = 17 \cdot \phi = 17 \cdot 0,008 = 0,136$ m
- l_{bd} má aderência = $50 \cdot \phi = 50 \cdot 0,008 = 0,40$ m

Em locais de momento positivo que tem continuidade de laje, pode-se fazer a amarração das armaduras de maneira reta em vez de com dobra. Se l_{bd} ultrapassar o tamanho do apoio, pode-se também executar emendas entre as armaduras de continuidade das duas lajes.

A armação para flexão da laje foi calculada sem maiores problemas, porém, esta teve esforços transversos maiores que os resistentes. No entanto, caso o pico de esforço transversal alcance o resistente em um intervalo igual a d (0,20 m), junto ao apoio, não é necessário calcular o reforço para esse esforço.

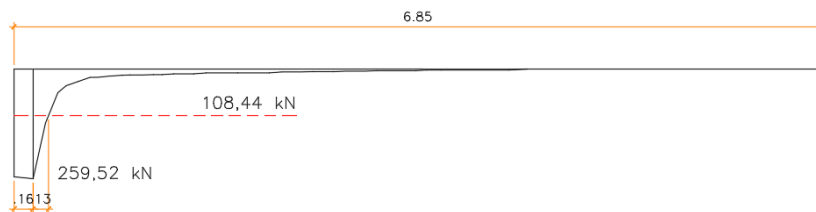


Figura 4.47 – Gráfico de esforço transverso em y.

A Figura 4.47 mostra que o valor do pico até o ponto de resistência é de 0,13 m. Com isso, comprova-se que não é necessário armar esta laje para esforço transverso, mesmo com o pico apresentado no Robot.

4.6.2 Dimensionamento da laje LM6 e LM7

Utilizando as mesmas metodologias e equações, calculou-se as lajes LM6 e LM7, que são armadas em duas direções com seus contornos definidos e esforços retirados do Robot da mesma maneira executada para a laje LM3.

Os dados necessários para a execução da planilha Excel programada estão na Tabela 4.20 para a laje LM6 e na Tabela 4.21 para a laje LM7. Utilizando as mesmas tabelas apresentadas para o cálculo de LM3 (Tabela 4.18 e Tabela 4.19), baseadas no EC2 e nos materiais de apoio, calculou-se os resultados da Tabela 4.22 (LM6) e da Tabela 4.23 (LM7).

Tabela 4.20 – Dados para o cálculo das armaduras da LM6

Dados	
h (m)	0,250
d (m)	0,200
b(m)	1,000
lx (m)	6,200
ly (m)	5,100
lx/ly - Arm. duas direções.	1,216
η	1,000
Mxx + (kN.m)	24,320
Mxx - (kN.m)	30,721
Myy + (kN.m)	36,770
Myy - (kN.m)	42,002
Ved máx (kN)	55,590
ϵ_c (%)	3,500
Es (GPa)	200,000
Smáx - armd. Principal (mm)	300,000
Smáx - armd. Distribuição (mm)	300,000
Smáx + esforço principal (mm)	250,000
Smáx + esforço distribuição (mm)	300,000
Dados para verificar esf. transverso	
CRd,c	0,120
k	2,000
ρ_1	0,003

Tabela 4.21 – Dados para o cálculo das armaduras da LM7

Dados	
h (m)	0,250
d (m)	0,200
b(m)	1,000
lx (m)	6,300
ly (m)	5,100
lx/ly - Arm. duas direções.	1,235
η	1,000
Mxx + (kN.m)	33,500
Mxx - (kN.m)	25,110
Myy + (kN.m)	33,910
Myy - (kN.m)	41,249
Ved máx (kN)	60,550
ϵ_c (%)	3,500
Es (GPa)	200,000
Smáx - armd. Principal (mm)	400,000
Smáx - armd. Distribuição (mm)	450,000
Smáx + esforço principal (mm)	250,000
Smáx + esforço distribuição (mm)	400,000
Dados para verificar esf. transverso	
CRd,c	0,120
k	2,000
ρ_1	0,003

Tabela 4.22 – Resultados do dimensionamento da laje LM6.

Resultados das armaduras LM6	
Armaduras positiva na direção XX	
Armadura longitudinal	ø8//15
Armadura do apoio	ø8//15
Armaduras negativas na direção XX	
Armadura longitudinal	ø8//12,5
Armadura de Distribuição	ø6//30
Armaduras positiva na direção YY	
Armadura longitudinal	ø8//10
Armadura do apoio	ø8//15
Armaduras negativas na direção YY	
Armadura longitudinal	ø10//15
Armadura do apoio	ø8//15
Armadura de Distribuição	ø6//30

Tabela 4.23 – Resultados do dimensionamento da laje LM7.

Resultados das armaduras LM7	
Armaduras positiva na direção XX	
Armadura longitudinal	ø8//12,5
Armadura do apoio	ø8//15
Armaduras negativas na direção XX	
Armadura longitudinal	ø8//15
Armadura do apoio	ø8//15
Armadura de Distribuição	ø6//30
Armaduras positiva na direção YY	
Armadura longitudinal	ø8//12,5
Armadura do apoio	ø8//15
Armaduras negativas na direção YY	
Armadura longitudinal	ø10//15
Armadura do apoio	ø8//15
Armadura de Distribuição	ø6//30

O cálculo para a distribuição das armaduras foi o mesmo feito para LM3, e o esforço transversal passou e estava abaixo do resistente. O detalhamento das lajes consta no Anexo D deste trabalho.

4.7 DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS

As vigas que foram analisadas estão nomeadas no Anexo A como V1-3, V1-5 e V2-1. A metodologia de dimensionamento e distribuição da armadura se encontra no Anexo B deste documento. Todas as vigas seguiram esta metodologia, e os esforços foram retirados da envoltória entre as combinações COMB1 a COMB25 do modelo.

4.7.1 Dimensionamento da viga 1-3

Para se dimensionar a viga 1-3 (numeração no Anexo A), utilizou-se o EC2. Os esforços retirados do Robot, momentos da Figura 4.48 e do esforço transversal da Figura 4.49, foram a base para o dimensionamento desta viga.

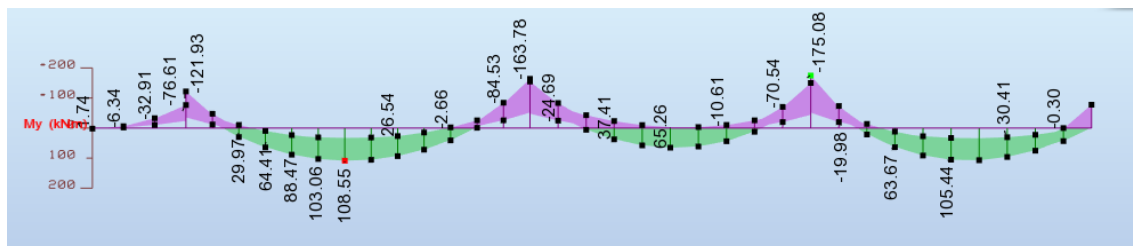


Figura 4.48 – Momentos resultantes da viga 1-3.

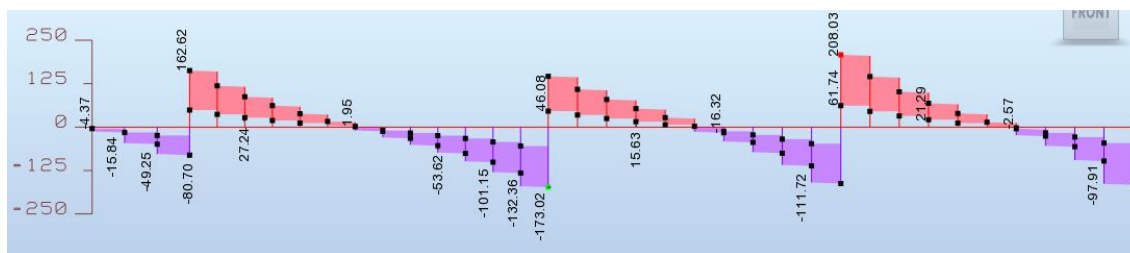


Figura 4.49 – Esforços transversos resultantes da viga 1-3.

Os dados utilizados para o cálculo da armadura longitudinal e dos estribos se encontram na Tabela 4.24 e Tabela 4.25 respectivamente.

Tabela 4.24 – Dados para armadura longitudinal.

Tabela 4.25 – Dados para cálculo de estribos.

Dados	
h (m)	0,550
d (m)	0,500
b(m)	0,300
η	1,000
ϵ_c (%)	3,500
Es (GPa)	200,000
Med + (kN.m)	108,550
Med - central (kN.m)	175,080
Med - apoio extremos (kN.m)	77,980

Dados	
h (m)	0,550
d (m)	0,500
b(m)	0,300
z (m)	0,450
cotg θ	2,500
Ved-máx (kN)	208,030
Ved-red (kN)	163,000
α_{cw}	1,000

A partir desses dados e de uma tabela programada no Excel pela autora (Tabela 4.26, Tabela 4.27 e Tabela 4.28), calculou-se as armaduras de toda a viga. Na tabela programada, considerou-se $d=h - 0,05\text{cm}$ (considerando de 3,0 a 4,0 cm de cobrimento mais o diâmetro dos estribos e do varão). O cálculo da área de aço necessária para suportar os momentos foi executado por meio das equações de equilíbrio do cálculo de rotura com diagrama retangular de tensões, conforme citado no Anexo B. As armaduras mínimas e máximas longitudinais e o cálculo dos estribos que resultaram na Tabela 4.26 e na Tabela 4.27 são demonstrados detalhadamente no memorial de cálculo do Anexo B. A Tabela 4.27 deve-se ao escalonamento executado com intuito de diminuir o uso de aço na viga. A parte de distribuição da armação da viga também é baseada no EC2, porém, além da norma utilizou-se a apostila de Concreto 1 e 2 do Instituto Superior de Engenharia do Porto (Félix, 2010 e Félix, Guedes e Neves, 2014).

Com os resultados da Tabela 4.26 e da Tabela 4.27, entende-se, portanto, que os estribos foram espaçados a 22,5 cm com área de $4,47\text{ cm}^2/\text{m}$ nos locais com esforço transverso maior que 163 kN, e nos locais com esforço transverso menor foram espaçados 30,0 cm com área de $3,35\text{ cm}^2/\text{m}$. O escalonamento está detalhado no Anexo D.

- Estribos 2 ramos $\phi 8 // 0,225\text{ m}$ (A_{sw}/s)_{eff} = $4,47\text{ cm}^2/\text{m}$
- Estribos 2 ramos $\phi 8 // 0,30\text{ m}$ (A_{sw}/s)_{eff} = $3,35\text{ cm}^2/\text{m}$

Tabela 4.26 – Dimensionamento para o esforço transverso máximo.

Dimensionamento	
v	0,528
Vrdmáx (kN)	491,586
VRdmáx>=Ved	Verifica
Asw/s (m ² /m)	0,0004
Asw/s (cm ² /m)	3,741
pw	0,125%
pw,mín	0,088%
Adota-se pw	
sl,máx (m)	0,300
st,máx (m)	0,300

Tabela 4.27 – Dimensionamento para o esforço transverso de 163 kN.

Dimensionamento	
v	0,528
Vrdmáx (kN)	491,586
VRdmáx>=Ved	Verifica
Asw/s (m ² /m)	0,0003
Asw/s (cm ² /m)	3,332
pw	0,111%
pw,mín	0,088%
Adota-se pw	
sl,máx (m)	0,300
st,máx (m)	0,300

Tabela 4.28 – Resultados do dimensionamento armaduras para apoios centrais e armadura positiva.

CÁLCULO DA ARMADURA POSITIVA			
Equações	Igualdade	Incógnitas	Resultado
0,000	0,000	x (m)	0,047
108,550	108,550	Arm. calculada (cm ²)	5,188
Verificações			
x/d	0,0940	$\epsilon_s = \epsilon_c \cdot (d-x)/x$	36,237
X/d limite	0,6170	$\epsilon_y = f_{yd}/E_s$	2,174
Verificação	Arm. Simples	Verificação	Arm.cedência
Cálculo da arm. máxima, mínima e verificação			
Designação	Resultado	Designação	Resultado
Arm. Mín. (cm ²)	2,262	Arm. Máx. (cm ²)	66,000
Verificação de Arm. Máx.	Adotar arm. calculada	Verificação de Arm. Mín.	Adotar área de aço calc.
Solução adotada:	3ø16	Área de aço (cm²)	6,03
CÁLCULO DA ARMADURA NEGATIVA NOS APOIOS CENTRAIS			
Equações	Igualdade	Incógnitas	Resultado
0,000	0,000	x (m)	0,078
175,080	175,080	Arm. calculada (cm ²)	8,588
Verificações			
x/d	0,1556	$\epsilon_s = \epsilon_c \cdot (d-x)/x$	21,496
X/d limite	0,6170	$\epsilon_y = f_{yd}/E_s$	2,174
Verificação	Arm. Simples	Verificação	Arm.cedência
Cálculo da arm. máxima, mínima e verificação			
Designação	Resultado	Designação	Resultado
Arm. Mín. (cm ²)	2,262	Arm. Máx. (cm ²)	66,000
Verificação de Arm. Máx.	Adotar arm. calculada	Verificação de Arm. Mín.	Adotar área de aço calc.
Solução adotada:	5ø16	Área de aço (cm²)	10,05
CÁLCULO DA ARMADURA NEGATIVA NO APOIO EXTREMO			
Equações	Igualdade	Incógnitas	Resultado
0,000	0,000	x (m)	0,033
77,980	77,980	Arm. calculada (cm ²)	3,686
Verificações			
x/d	0,0668	$\epsilon_s = \epsilon_c \cdot (d-x)/x$	51,422
X/d limite	0,6170	$\epsilon_y = f_{yd}/E_s$	2,174
Verificação	Arm. Simples	Verificação	Arm.cedência
Cálculo da arm. máxima, mínima e verificação			
Designação	Resultado	Designação	Resultado
Arm. Mín. (cm ²)	2,262	Arm. Máx. (cm ²)	66,000
Verificação de Arm. Máx.	Adotar arm. calculada	Verificação de Arm. Mín.	Adotar área de aço calc.
Solução adotada:	2ø16	Área de aço (cm²)	4,02

4.7.1.1 Disposição construtiva para barras inferiores.

Com o dimensionamento executado foi necessário verificar todas as regras de distribuição da armadura do EC2. Neste capítulo, foram dispostos somente os resultados e uma breve explicação sobre o calculado.

A viga 1-2 foi dividida da maneira abaixo para melhor entendimento de qual vão e apoio está sendo analisado.

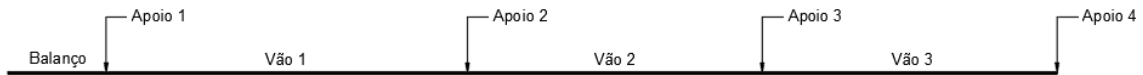


Figura 4.50 – Denominação dos elementos

Seguindo o descrito no Anexo B, calculou-se os espaçamentos dos varões que resultaram nos valores abaixo e na Figura 4.51. Nota-se que os espaçamentos estão longe do mínimo estabelecido pela norma.

- $Ch \text{ ou } Cv \geq = \begin{cases} 16 \text{ mm} \\ 17,7 \text{ mm} \\ 20 \text{ mm} \end{cases}$

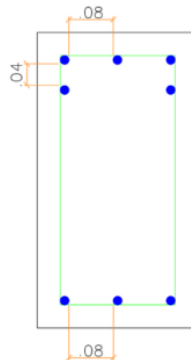


Figura 4.51 – Seção da viga com os varões distribuídos.

Seguindo com os cálculos, foi necessário calcular al e l_{bd} , a fim de desenhar a decalagem da viga (Anexo D) e obter os valores de amarrações dos varões.

- $l_{bd} = 35 * \phi = 35 * 0,016 = 0,56 \text{ m}$
- $al = 1,125 d = 1,125 * 0,50 = 0,56 \text{ m}$
- $l_{b,min} > \text{máx}\{0,3*560; 10*16; 100\text{mm}\} \therefore l_{b,min} < 168 \text{ mm}$
- $l_{b,rqd} > l_{b,min}$ OK!

Continuando o detalhamento, definiu-se quanto de armadura que entraria no apoio extremo e o diâmetro da dobra do varão. Para o apoio central, calculou-se o valor de a , comprimento que a barra deve percorrer após entrar no apoio central.

- $25\% A_{s,v\tilde{a}o} = 0,25 * 6,03 = 1,51 \text{ cm}^2$
- $A_{s,min} = 2,08 \text{ cm}^2 \rightarrow$ portanto $2\phi 16 = 4,02 \text{ cm}^2$
- $ab \approx 3,00 \phi \gg$ pior caso 2ϕ
- $\phi_{m,min} = 17 * \phi = 17 * 0,016 = 0,272 \text{ m}$
- $a = \text{m\acute{a}x} \{b, 10 * \phi\} = \{30 \text{ cm}, 160 \text{ cm}\}$

Os valores de transpasse de barras em caso de sobreposição necessária foram calculados abaixo, conforme o memorial de cálculo do Anexo B.

- Diferença de altura entre os varões: $4 * 16 = 64 \text{ mm}$ ou 50 mm . Deve-se escolher o menor, portanto, 50 mm .
- $l_0 = 0,56 * 1,50 = 0,84 \text{ m}$
- $l_{0,min} \geq \{0,3 * \alpha_6 * l_{b,rqd}; 15 * \phi; 200 \text{ m}\} \rightarrow \{252 \text{ mm}; 180 \text{ mm}; 200 \text{ mm}\}$
- $l_{0,min} < l_0$ OK!

4.7.1.2 Disposição construtiva para barras superiores

Seguindo as mesmas diretrizes, calculou-se o necessário para o detalhamento da barra superior.

- $l_{b,eq} = 50 * \phi = 50 * 0,016 = 0,80 \text{ m}$
- $a_1 = 0,56 \text{ m}$
- $l_{b,min} > \text{m\acute{a}x} \{0,3 * 800; 10 * 16; 100 \text{ mm}\} \therefore l_{b,min} > 240 \text{ mm}$
- $l_{b,rqd} > l_{b,min}$ OK!
- $l_0 = 1,20 \text{ m}$
- $l_{0,min} \geq \{0,3 * \alpha_6 * l_{b,rqd}; 15 * \phi; 200 \text{ m}\} \rightarrow \{360 \text{ mm}; 240 \text{ mm}; 200 \text{ mm}\}$
- $l_{0,min} < l_0$ OK!

Nos apoios de armadura negativa é necessário no mínimo uma armadura para suportar 15% do momento máximo do vão. Como o momento do vão é $108,55 \text{ kN.m}$ e 15% do mesmo é $16,28 \text{ kN.m}$, não se levou em consideração no cálculo esse momento, já que o momento no apoio é de $77,98 \text{ kN.m}$, superior a $16,28 \text{ kN.m}$. O diâmetro do mandril é o mesmo calculado para as armaduras dos momentos positivos, e o valor de a_1 foi calculado abaixo.

- $a_1 = \text{m\acute{a}x} \{b, 2 * d\} = \{30 \text{ cm}, 99 \text{ cm}\}$

A disposição das armaduras se encontra no Anexo D do trabalho.

4.7.2 Dimensionamento viga 1-5

Da mesma maneira que se calculou a viga 1-2, foi calculada a viga 1-5.

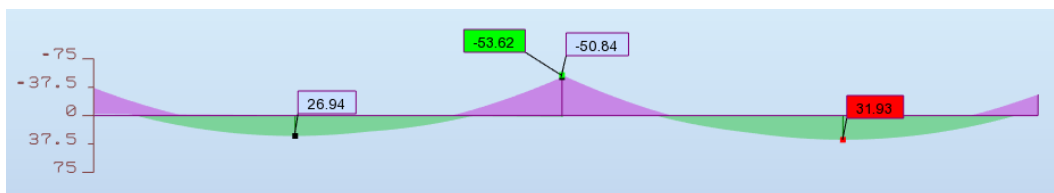


Figura 4.52 – Momentos atuantes na viga 1-5.

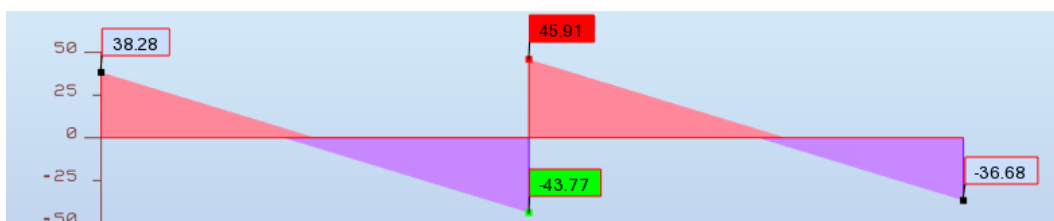


Figura 4.53 – Esforços transversos na viga 1-5.

O cálculo das armaduras longitudinais teve base nos momentos da Figura 4.52 e nos dados da Tabela 4.29 e o cálculo dos estribos teve base na Figura 4.53 e na Tabela 4.30. O método de dimensionamento foi o mesmo do aplicado para a Viga 1-3, resultando para as armaduras longitudinais na Tabela 4.31 e para os estribos na Tabela 4.32.

Simplificando o resultado dos estribos tem-se o resultado abaixo. Como o espaçamento já é máximo, não foi necessário efetuar o escalonamento.

- Estribos 2 ramos $\varnothing 8 // 0,30 \text{ m}$ $(A_{sw}/s)_{\text{eff}} = 3,35 \text{ cm}^2/\text{m}$

Seguindo a metodologia do Anexo B, a disposição de armadura da viga 1-5 foi executada de maneira semelhante à da viga 1-3. Toda a distribuição da armadura utilizou dos mesmos métodos já demonstrados, e, portanto, não serão novamente detalhados.

Tabela 4.29 – Dados para armadura longitudinal V1-5.

Dados	
h (m)	0,550
d (m)	0,500
b(m)	0,300
η	1,000
ϵ_c (%)	3,500
Es (GPa)	200,000
Med + (kN.m)	31,930
Med apoio central - (kN.m)	53,620
Med (apoio extremos) - (kN.m)	36,700

Tabela 4.30 – Dados para cálculo de estribos V1-5.

Dados	
h (m)	0,550
d (m)	0,500
b(m)	0,300
z (m)	0,450
cotg θ	2,500
Ved (kN)	45,910
α_{cw}	1,000

Tabela 4.31 – Resultado do dimensionamento da armadura da V1-5.

Resultado da armadura da V1-5	
Solução	Área de aço (cm ²)
Armadura Positiva no meio do vão	
2ø12	2,26
Armadura negativa no apoio central	
3ø12	3,39
Armadura negativa no apoio extremo	
2ø12	2,26

Tabela 4.32 – Dimensionamento de estribos da V1-5.

Dimensionamento	
v	0,528
Vrdmáx (kN)	491,586
VRdmáx >= Ved	Verifica
Asw/s (m ² /m)	0,000094
Asw/s (cm ² /m)	0,939
ρw	0,031%
ρw,mín	0,088%
Adota-se ρw,min	
Asw,mín/s (cm ² /m)	2,629
sl,máx (m)	0,300
st,máx (m)	0,300

4.7.3 Dimensionamento viga 2-1

A Figura 4.54 e a Figura 4.55 foram base para o cálculo executado pelas tabelas e metodologia do Anexo B. Observa-se que o cálculo da armadura positiva foi executado para o maior momento de 61,08 kN.m, que resulta em 3ø12, porém, todos os outros momentos positivos podem ser armados com 2ø12. O mesmo vale para os momentos negativos, que tiveram resultado de armadura de 4ø12 somente nos 88,38 kN.m e no restante de 2ø12. A armadura mínima é de 2ø12.

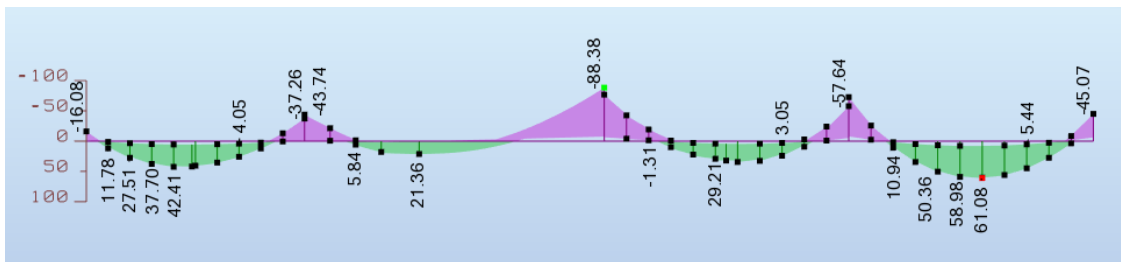


Figura 4.54 – Momentos atuantes na viga 2-1.

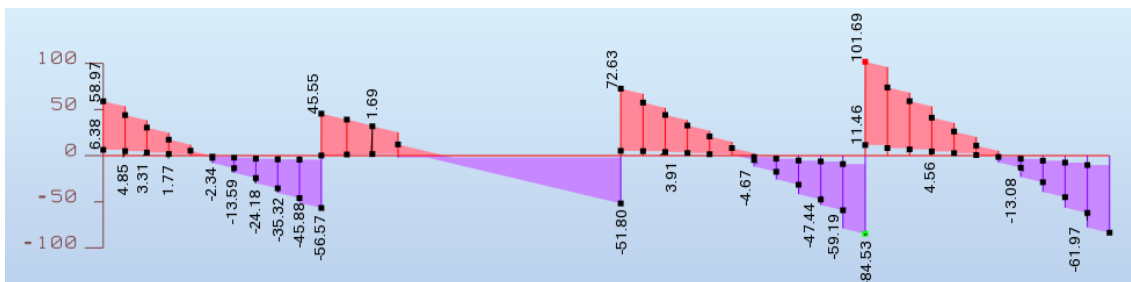


Figura 4.55 – Esforços transversos na viga 2-1.

Os dados da viga para o cálculo da armadura longitudinal e estribos se encontram na Tabela 4.33 e Tabela 4.34. Posteriormente, estão as tabelas com os resultados das armaduras longitudinais e estribos.

Tabela 4.33 – Dados para dimensionamento da armadura V2-1.

Dados	
h (m)	0,550
d (m)	0,500
b(m)	0,300
η	1,000
ϵ_c (%)	3,500
Es (GPa)	200,000
Med + (kN.m)	61,080
Med apoio central - (kN.m)	88,380
Med (apoio extremos) - (kN.m)	45,070

Tabela 4.34 – Dados para cálculo dos estribos da V2-1.

Dados	
h (m)	0,550
d (m)	0,500
b(m)	0,300
z (m)	0,450
cotg θ	2,500
Ved (kN)	101,690
α_{cw}	1,000

Tabela 4.35 – Resultado do dimensionamento da armadura da V2-1.

Resultado da armadura da V2-1	
Solução	Área de aço (cm ²)
Armadura Positiva no meio do vão	
3 ϕ 12	3,39
Armadura negativa no apoio central	
4 ϕ 12	4,52
Armadura negativa no apoio extremo	
2 ϕ 12	2,26

Tabela 4.36 – Dimensionamento dos estribos V2-1.

Dimensionamento	
v	0,528
Vrdmáx (kN)	491,586
VRdmáx \geq Ved	Verifica
Asw/s (m ² /m)	0,000208
Asw/s (cm ² /m)	2,079
ρ_w	0,069%
$\rho_{w,min}$	0,088%
Adota-se $\rho_{w,min}$	
Asw,mín/s (cm ² /m)	2,629
sl,máx (m)	0,300
st,máx (m)	0,300

Resumindo o cálculo dos estribos, tem-se o resultado de ϕ 8 // 0,30. Como o espaçamento já é máximo, não se efetuou o escalonamento.

- Estribos 2 ramos ϕ 8 // 0,30 m (A_{sw}/s)_{eff} = 3,35 cm²/m

Conforme o que já foi explicado, os espaçamentos mínimos serão de 20mm e máximos de 30cm.

Os valores da decalagem dos momentos negativos e positivos, as emendas e as amarrações dos varões dos momentos positivos e negativos foram calculados da mesma maneira explicada para a Viga 1-3.

4.8 DIMENSIONAMENTO DOS PILARES

Os pilares escolhidos para o cálculo foram os P1, P9 e P15. Para calcular os pilares utilizou-se o livro de Manuel de Azeredo (1998), baseado no RSA e no RABAP. Ambos foram fundamento para o memorial de cálculo em anexo, que descreve os procedimentos utilizados para se chegar nas tabelas Excel apresentadas nos próximos subcapítulos. O detalhamento dos pilares foi executado conforme o material de Concreto 1 e 2 do ISEP, referente ao EC2 (FÉLIX, 2010 e FÉLIX; GUEDES; NEVES, 2014). O edifício é composto por nós móveis na direção y e fixos na direção z (eixo dos pilares), conforme indica a Tabela 4.37.

Tabela 4.37 – Análise dos nós.

Eci (kN/m²)	34650000	Iy (m⁴)	0,981	Resultado em y	Nós móveis
Ntotal (kN)	10291,670	Iz (m⁴)	0,014	Resultado em z	Nós Fixos
htotal (m)	11,350				

4.8.1 Dimensionamento do Pilar 1

O pilar 1 teve os valores dos momentos e força normal retirados dos gráficos do Robot. Além dos esforços, também foi necessário retirar das plantas do Anexo A as dimensões do pilar, vigas e qualquer outro elemento que interferissem nos cálculos. A partir desta coleta de dados, construiu-se a Tabela 4.38

Tabela 4.38 – Dados para o cálculo do pilar 1.

Dados	Parte 1			Parte 2		
h viga-y1 (m)	0,55			0,55		
h viga-z1 (m)	0,55			0,55		
Base das vigas (m)	0,3			0,3		
h pilar-y (m)	0,3			0,3		
h pilar-z (m)	0,3			0,3		
fck (MPa)	30					
fcd (MPa)	20					
fyd (MPa)	434,7826087					
L pilar (m)	4,7			3,5		
L viga em y (m)	4,55			4,55		
L viga em z (m)	6,3			6,3		
Esforços COMB 22						
Tipo	Base	Centro	Topo	Base	Centro	Topo
Fx (kN)	226,20	-	211,93	143,94	-	133,31
My (kN.m)	6,23	3,41	-8,52	19,37	9,77	-24,43
Mz (kN.m)	40,00	16,00	-37,93	7,10	6,89	-16,21

O pilar 1 foi dividido em trechos para o cálculo, nomeados de 1,2 e 3, contando de baixo para cima nos níveis do projeto. O cálculo do pilar resultou na Tabela 4.39.

Tabela 4.39 – Cálculo do pilar 1.

Cálculo	Parte 1 - eixo yy	Parte 1 - eixo zz	Parte 2 - eixo yy	Parte 2 - eixo zz
α -base	1,000	1,000	0,368	0,510
α -topo	0,368	0,510	0,211	0,292
η	1,205	0,775	1,087	0,740
lo (m)	5,664	3,645	3,804	2,590
λ	65,408	42,086	43,925	29,910
λ limite	35,000	64,224	35,000	56,570
Excentricidade de 2º ordem (e2 em metros)	0,05	sem e2	0,02	sem e2
Excentricidade acidental(m)	0,020	0,000	0,020	0,000
Excentricidade fluência (ec)	sem ec	sem ec	sem ec	sem ec
Excentricidade final (m)	0,073	0,000	0,044	0,000
Momentos e cálculos finais				
Momentos finais (kN.m)	8,520	40,000	24,430	16,210
ν	0,126		0,080	
μ	0,016	0,074	0,045	0,030
Definição para o gráfico	$\mu_1=\mu_z$ e $\mu_2=\mu_y$		$\mu_1=\mu_y$ e $\mu_2=\mu_z$	

Os valores dos fatores ν e μ são utilizados em ábacos que servem para encontrar o fator ω — referente a armadura necessária que o pilar deve ter para aguentar os esforços aplicados. A partir desse fator ω e utilizando a equação 42, indicada no Anexo B, calcula-se o valor da área de aço necessária no pilar. Por se tratar de um pilar com momentos em duas direções e força normal, o ábaco que deve ser utilizado para interpolação dos fatores ν e μ é o de flexão biaxial com esforço normal. O resultado da interpolação nos ábacos (Barros e Figueiras, 2008) resultou na Tabela 4.40 e na Tabela 4.41. O pilar 15 foi calculado da mesma maneira utilizando o mesmo ábaco.

Tabela 4.40 – Cálculo da armação P1 – parte 1.

Cálculo da armação P1 - Parte 1	
ω	0,070
As (cm²)	2,910
As,min(cm²)	1,800
As, máx (cm²)	36,000
As,calc	4 ϕ 10
As,calc (cm²)	4,71
Cálculo das cintas	
Diâmetro da cinta (mm)	6
	2,5
Espaçamento máx (cm)	20
	30
	40
	12
Espaçamento máx. para zona reduzida (cm)	18
	24

Tabela 4.41 – Cálculo da armação P1 – parte 2

Cálculo da armação P1 - Parte 2	
ω	0,059
As (cm²)	2,422
As,min(cm²)	1,800
As, máx (cm²)	36,000
As,calc	4 ϕ 10
As,calc (cm²)	3,14
Cálculo das cintas	
Diâmetro da cinta (mm)	6
	2,5
Espaçamento máx (cm)	20
	30
	40
	12
Espaçamento máx. para zona reduzida (cm)	18
	24

Os valores dos comprimentos de ancoragem, transpasse e emenda são calculados como explicado para as vigas, apenas os alfas são adotados de maneira diferente (para zona comprimida). O detalhamento dos pilares segue no Anexo D.

- $l_{b,eq} = \alpha_1 * l_{b,rqd}$
- $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1,0$ zonas comprimidas, α_4 e α_5 não se aplicam
- $l_{bd} = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * l_{b,rqd}$

4.8.2 Dimensionamento do Pilar 9

O pilar 9, assim como pilar 1, teve seus cálculos baseados no memorial de cálculo em anexo. Por ser redondo, os valores de b e h passam a ser o raio da seção do pilar, e o ábaco utilizado deve ser específico para seções circulares. Este pilar contém três lances diferentes, sendo feita a análise de cada lance separadamente. A partir do Robot, retirou-se os momentos e força normal para cada combinação condicionante de cada parte, sendo essas 19, 17 e 16 para as partes um, dois e três, respectivamente (Tabela 4.42). No segundo andar, como não existem vigas, considerou-se que a laje fungiforme faz o papel de travamento do pilar, e por esse motivo foi considerada no cálculo do η . Os dados necessários para este cálculo estão na Tabela 4.42.

Tabela 4.42 – Dados para o cálculo do pilar 9.

Dados	Parte 1			Parte 2			Parte 3		
h viga-y1 (m)	0,55			0,25			0,55		
h viga-z1 (m)	0,65			0,25			0,65		
Base das vigas (m)	0,30			0,50			0,30		
∅ Pilar (m)	0,40			0,40			0,40		
fck (MPa)	30,00								
fcd (MPa)	20,00								
fyd (MPa)	434,78								
L pilar (m)	4,70			3,50			3,65		
L viga em y (m)	5,10		5,10	5,10		5,10	5,10		5,10
L viga em z (m)	6,20		6,30	6,20		6,30	6,20		6,30
Esforços									
Tipo	Base	Centro	Topo	Base	Centro	Topo	Base	Centro	Topo
Fx (kN)	1777,210	-	1757,280	1023,040	-	1008,190	363,100	-	347,620
My (kN.m)	-3,990	1,42	2,430	-3,960	2,09	0,720	2,570	2,31	1,920
Mz (kN.m)	82,210	32,88	-82,630	19,790	7,92	-14,860	18,760	10,14	-25,340

Juntando todas informações dos dados apresentados e metodologias de cálculo demonstradas no anexo, modelou-se a Tabela 4.43, que mostra o resultado do dimensionamento do pilar. Utilizando os resultados da tabela de dimensionamento (valores de v e μ), encontrou-se pelo ábaco o valor de ω . É importante destacar que, como o pilar é redondo, foi utilizado o maior valor de μ para o dimensionamento no ábaco.

Tabela 4.43 – Resultados do dimensionamento do pilar 9.

Cálculo	Parte 1 - eixo yy	Parte 1 - eixo zz	Parte 2 - eixo yy	Parte 2 - eixo zz	Parte 3 - eixo yy	Parte 3 - eixo zz
α -base	1,000	1,000	0,384	0,285	2,755	3,376
α -topo	0,384	0,285	2,755	3,376	0,261	0,320
η	1,208	0,764	1,471	0,883	1,452	0,866
l_0 (m)	5,676	3,592	5,148	3,091	5,301	3,161
λ	56,757	35,920	51,479	30,906	53,013	31,609
λ limite	35,000	64,924	35,000	61,263	35,000	61,105
Excentricidade de 2º ordem (e2 em metros)	0,023	sem e2	0,033	sem e2	0,035	sem e2
$\eta(z)$	0,566	-	0,983	-	1,000	-
1/r	0,007	-	0,012	-	0,013	-
Excentricidade acidental(m)	0,020	0,000	0,020	0,000	0,020	0,000
Excentricidade fluência (ec)	sem ec	sem ec	sem ec	sem ec	sem ec	sem ec
Excentricidade final (m)	0,043	0,000	0,053	0,000	0,055	0,000
Momentos e cálculos finais						
Momentos finais (kN.m)	3,990	108,910	3,960	61,678	1,920	30,153
ν	0,707		0,407		0,145	
μ	0,004	0,108	0,004	0,061	0,002	0,030

A Tabela 4.44, Tabela 4.45 e Tabela 4.46 mostram os resultados das interpolações nos gráficos, a armação adotada em cada trecho do pilar, dimensionamento das cintas e seus espaçamentos.

Tabela 4.44 – Cálculo da armação do P9 – Parte 1

Cálculo da armação - Parte 1	
ω	0,150
As (cm²)	8,671
As,min(cm²)	4,088
As, máx (cm²)	50,265
As,calc	8ø12
As,calc (cm²)	9,05
Cálculo das cintas	
Diâmetro da cinta (mm)	6 3
Espaçamento máx (cm)	24 40 40
Espaçamento máx. para zona reduzida (cm)	14,4 24 24

Tabela 4.45 – Cálculo da armação do P9 – Parte 2

Cálculo da armação - Parte 2	
ω	0,000
As (cm²)	0,000
As,min(cm²)	2,51
As, máx (cm²)	50,265
As,calc	6ø10
As,calc (cm²)	4,71
Cálculo das cintas	
Diâmetro da cinta (mm)	6 2,5
Espaçamento máx (cm)	20 40 40
Espaçamento máx. para zona reduzida (cm)	12 24 24

Tabela 4.46 – Cálculo da armação do P9 – Parte 3

Cálculo da armação - Parte 3	
ω	0,000
As (cm²)	0,000
As,min(cm²)	2,51
As, máx (cm²)	50,265
As,calc	6ø10
As,calc (cm²)	4,71
Cálculo das cintas	
Diâmetro da cinta (mm)	6 2,5
Espaçamento máx (cm)	20 40 40
Espaçamento máx. para zona reduzida (cm)	12 24 24

O detalhamento do pilar 9, assim como do pilar 1, segue a disposição da armadura explicada no memorial de cálculo em anexo. Apenas uma observação extra deve ser analisada para pilares redondos: o número de varões dispostos na seção redonda deve ser superior ou igual a quatro, porém, é indicado pelo Anexo Nacional o total de seis varões. Por esse motivo, adotou-se 6ø10 nas duas últimas partes, em vez de 4ø10. A junção do pilar com as fundações também depende do valor de ancoragem l_{bd} , assim como em todos os outros pilares.

4.8.3 Dimensionamento do Pilar 15

O pilar 15 teve seu dimensionamento e detalhamento das armaduras brevemente explicado, pois esse é muito parecido com o executado no pilar 1. Os esforços foram retirados para as combinações 19,17 e 16 (parte 1,2 e 3 respectivamente), e foram escritos na Tabela 4.47. O dimensionamento do pilar consta na Tabela 4.48, Tabela 4.49, Tabela 4.50 e Tabela 4.51, e os cálculos foram executados conforme o Anexo B.

Tabela 4.47 – Dados para o cálculo do pilar 15.

Dados	Parte 1			Parte 2			Parte 3		
h viga-y1 (m)	0,55			0,55			0,55		
h viga-z1 (m)	0,55			0,55			0,55		
Base das vigas (m)	0,30			0,30			0,30		
h pilar-y (m)	0,30			0,30			0,30		
h pilar-z (m)	0,30			0,30			0,30		
fck (MPa)	30,00								
fcd (MPa)	20,00								
fyd (MPa)	434,78								
L pilar (m)	4,70			3,50			3,65		
L viga em y (m)	5,10			5,10			5,10		
L viga em z (m)	6,20			6,20			6,20		
Esforços									
Tipo	Base	Centro	Topo	Base	Centro	Topo	Base	Centro	Topo
Fx (kN)	458,750	-	473,030	270,560	-	259,930	86,120	-	75,030
My (kN.m)	-6,720	6,966	16,090	-45,210	18,084	43,420	-38,810	15,524	37,390
Mz (kN.m)	-29,063	13,584	33,960	-23,830	9,532	22,400	-17,930	7,172	16,920

Tabela 4.48 – Resultados do dimensionamento do pilar 15.

Cálculo	Parte 1 - eixo yy	Parte 1 - eixo zz	Parte 2 - eixo yy	Parte 2 - eixo zz	Parte 3 - eixo yy	Parte3 - eixo zz
α -base	1,000	1,000	0,413	0,502	0,463	0,563
α -topo	0,413	0,502	0,463	0,563	0,227	0,276
η	1,212	0,775	1,131	0,753	1,103	0,742
lo (m)	5,696	3,643	3,960	2,636	3,960	2,636
λ	65,770	42,064	45,724	30,442	45,724	30,442
λ limite	35,000	62,837	35,000	64,100	35,000	64,155
Excentricidade de 2ª ordem (e2 em metros)	0,05	sem e2	0,03	sem e2	0,03	sem e2
Excentricidade acidental(m)	0,020	0,000	0,020	0,000	0,020	0,000
Excentricidade fluência (ec)	sem ec	sem ec	sem ec	sem ec	sem ec	sem ec
Excentricidade final (m)	0,074	0,000	0,046	0,000	0,046	0,000
Momentos e cálculos finais						
Momentos finais (kN.m)	16,090	47,564	45,210	22,400	38,810	17,930
ν	0,255		0,150		0,048	
μ	0,030	0,088	0,084	0,041	0,072	0,033
Definição para o gráfico	$\mu_1=\mu_z$ e $\mu_2=\mu_y$		$\mu_1=\mu_y$ e $\mu_2=\mu_z$		$\mu_1=\mu_y$ e $\mu_2=\mu_z$	

Tabela 4.49 – Cálculo da armadura do P15 – Parte 1

Cálculo da armadura - Parte 1	
ω	0,037
As (cm ²)	1,542
As,min(cm ²)	1,800
As, máx (cm ²)	36,000
As,calc	4 ϕ 10
As,calc (cm ²)	3,14
Cálculo das cintas	
Diâmetro da cinta (mm)	6
	2,5
Espaçamento máx (cm)	20
	30
	40
Espaçamento máx. para zona reduzida (cm)	12
	18
	18
	24

Tabela 4.50 – Cálculo da armadura do P15 – Parte 2

Cálculo da armadura - Parte 2	
ω	0,103
As (cm ²)	4,244
As,min(cm ²)	1,800
As, máx (cm ²)	36,000
As,calc	6 ϕ 10
As,calc (cm ²)	4,710
Cálculo das cintas	
Diâmetro da cinta (mm)	6
	2,5
Espaçamento máx (cm)	20
	30
	40
Espaçamento máx. para zona reduzida (cm)	12
	18
	18
	24

Tabela 4.51 – Cálculo da armadura do P15 – Parte 3

Cálculo da armadura - Parte 3	
ω	0,144
As (cm ²)	5,978
As,min(cm ²)	1,800
As, máx (cm ²)	36,000
As,calc	8 ϕ 10
As,calc (cm ²)	6,280
Cálculo das cintas	
Diâmetro da cinta (mm)	6
	2,5
Espaçamento máx (cm)	20
	30
	40
Espaçamento máx. para zona reduzida (cm)	12
	18
	18
	24

As emendas e ancoragens para ϕ 10 foram calculadas da mesma maneira apresentada nos capítulos anteriores e no memorial de cálculo. Os resultados de 4 ϕ 10 foram executados como 8 ϕ 10 por questões construtivas, para se padronizar as armaduras em todos os lances do pilar. Também não é usual ter armaduras menores na parte inferior do pilar e maiores na superior, portanto, adotou-se a maior de cima a baixo.

5 DIMENSIONAMENTO PELO ROBOT E COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS

Este capítulo foi dividido em duas etapas, o dimensionamento pelo Robot e a comparação entre o dimensionamento manual com o executado pelo *software*. O intuito desta comparação é encontrar erros de dimensionamento, entendendo as possíveis barreiras que a metodologia BIM ainda pode conter nesta etapa.

5.1 CONFIGURAÇÕES INICIAIS DO ROBOT

Com a importação do Revit concluída e verificada, alguns parâmetros normativos devem ser escolhidos dentro da aba *Tools* em *Job Preference*. A janela de preferências de trabalho tem sete divisões (Figura 5.1), sendo as quatro primeiras as mais alteradas: *Units and Formats*, *Materials*, *Databases* e *Structure Analysis*. Na primeira divisão, são configuradas as unidades de preferência do engenheiro, e na segunda, escolhe-se a norma dos materiais – no caso Eurocódigo, os materiais de preferência para cálculo e pode-se também criar ou modificar materiais, sendo que o material importado do Revit consta automaticamente dentro da seleção dos materiais do Robot. Na terceira divisão, escolhem-se as normas para diversos ramos do cálculo, tais como normas para estruturas de aço, cargas de veículos, solos, ancoragens e parafusos, armaduras e telas. Foi selecionado para cada divisão as normas utilizadas no projeto, que no caso foram os Eurocódigos. A última divisão é composta apenas pelas normas de cargas, e novamente selecionou-se o Eurocódigo.

Todas informações que seguirão no Capítulo 5 foram retiradas no site da Autodesk (Autodesk, 2018), e as notas de todos os dimensionamentos seguem no Anexo C. A partir do modelo confeccionado no Capítulo 4.4, retirou-se a armadura pelo Robot. A armação dos elementos do Robot é efetuada em duas partes: armaduras necessárias e armaduras fornecidas.

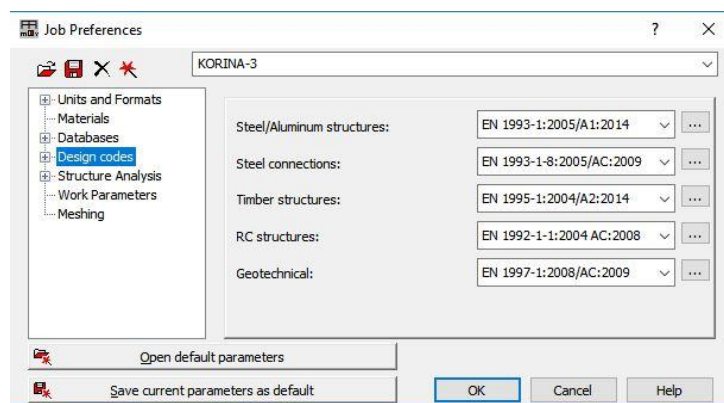


Figura 5.1 – Opções *Job Preference*.

5.2 DIMENSIONAMENTO DAS LAJES

5.2.1 Armadura necessária

As armaduras necessárias das lajes são calculadas por meio da aba *Design*, dentro de *Required Reinforcement of Slabs/Walls Options*, na opção *Code parameters*. A janela aberta pela opção *Code parameters* é dividida em *General*, *Materials*, *SLS Parameters* e *Reinforcement*. A divisão *General* é utilizada para escolher o tipo de cálculo que dimensionará a laje (somente flexão, flexão e compressão/tração, e somente compressão/tração) e a direção principal da armação das lajes. A direção da armadura principal foi deixada como opção *auto* (o próprio Robot verifica as direções da armação). Seguindo para próxima divisão (*Materials*), pode-se configurar os materiais utilizados no cálculo da laje, sendo que esta aba já estava configurada com o material do Revit exportado.

A divisão *SLS Parameters* contém configurações para análise de estado limite de serviço, e o primeiro quadro de configurações da janela é referente a fissuração e deformação. As opções *Cracking* ou *Deflection* são referentes a abertura de fissura e a deformação, assim, se essas opções forem selecionadas, o Robot calculará a abertura máxima de fendas e a deformação, porém, não irá corrigir caso esses parâmetros passem dos limites. Para ser corrigido, a opção ao lado *Reinforcement adjust* tem que estar selecionada. No cálculo manual foi considerado ELU e fissuração, portanto, selecionou-se a opção de abertura de fissuras (com ajuste do reforço) para a laje. A janela abaixo da descrita contém as informações de classe de agressividade da estrutura na parte superior e inferior da laje, abertura máxima de fissura admissível e configurações do concreto (idade do concreto, umidade relativa e fluência). As classes de agressividade foram

alteradas para XC3 e o restante dos parâmetros foram deixados de modo que o Robot calcule sozinho com base no EC2.

A última divisão tem opções de reforço da laje como cobertura, diâmetro de barras, escolha por lajes unidirecionais e método de cálculo de armadura mínima — além do cobertura que foi alterado, a armadura mínima também precisou ser configurada. A primeira opção de armadura mínima é a *for FE for which reinforcement $A_s > 0$* , que calcula a armadura mínima em todos os locais que esta for menor que a mínima, porém, nos locais em que a armadura necessária é zero, a mínima não é aplicada. A segunda opção *for the whole panel* aplica a armadura mínima em qualquer situação em que ela seja menor que a necessária. Abaixo dessas opções tem três opções de marcação. A primeira é para o cálculo da armadura mínima para abertura de fissuras na peça, se este item não for selecionado a equação (12) não é utilizada. As duas outras opções são para desabilitar as condições de espaçamentos para as lajes (levadas em conta no cálculo manual, por isso não se selecionou esta opção) e a armadura mínima para controle de fissuração.

Com as configurações dos parâmetros de normas selecionados, deve-se aplicar esses padrões a toda estrutura e calcular os painéis por meio da função *Calculations* (Figura 5.2). A janela aberta para cálculo das lajes requer alguma explicação, diferente de vigas e pilares que são janelas simples e intuitivas. Dentro desta janela é possível selecionar as combinações que serão utilizadas para o cálculo da laje, os painéis que serão calculados, o método de cálculo dos momentos utilizados no dimensionamento, a opção *Globally averaged design forces* e a opção *Reduction forces*. A seleção da opção *Globally averaged design forces* faz com que os diferentes momentos de um nó de encontro, de diversos trechos de elementos finitos, sejam calculados como um momento médio global. Quando existe encontros de paredes, lajes ou superfícies, não é recomendado selecionar esta opção. O outro parâmetro, *Reduction forces*, faz com que os momentos e tensões sobre um apoio sejam calculados como valor médio dessas forças obtido em uma área determinada. Essa opção é equivalente a redução feita pela integral; são dois métodos diferentes, mas que visam reduzir os momentos de pico.

A última opção aqui detalhada é a do método de cálculo de momentos. Existem três opções disponíveis para os cálculos de momentos em lajes no Robot, sendo elas *Wood & Armor*, analítica e momentos equivalentes (NEN). Para esta dissertação adotou-se o *Wood & Armor*, porém, os outros dois métodos são detalhados no manual auxiliar da Autodesk sobre o Robot (Autodesk, 2018). A importância da seleção *Wood & Armor* é que possibilita a comparação entre

os resultados dos momentos do modelo analítico (geometria modelada) com os selecionados na hora de armar a laje. Se ao calcular manualmente utilizar os momentos *Wood & Armor* e na hora do cálculo pelo Robot escolher outra metodologia, a comparação dos resultados e dos momentos fica quase inviável.

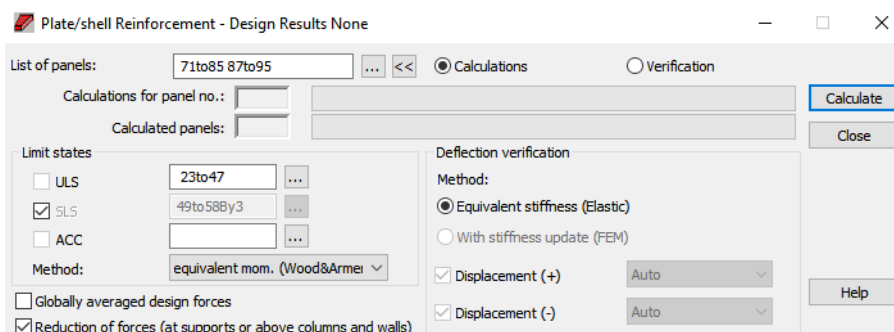


Figura 5.2 – Opções para a aba *Calculations* de lajes.

5.2.2 Armadura fornecida

As armaduras fornecidas das lajes, assim como as vigas e pilares, são calculadas por meio do ícone *Provided Reinforcement*. As abas a serem configuradas são de mesmo nome das três principais recorrentes entre vigas e pilares, começando pela aba *Story parameters*. Esta aba não é editável, pois o Robot adota as mesmas configurações feitas para a armadura necessária.

5.2.2.1 Aba *calculation options*:

As opções das abas analisadas são divididas em quatro: *General*, *Concrete*, *Reinforcing bars*, *Wire fabrics* e *Reinf. for punching*. A aba *General* é responsável pelo cobrimento da laje e não é editável, pois o Robot adota o configurado para armadura necessária. As outras três abas seguintes são configurações de materiais, bitolas dos varões e tipos de malhas de aço. A última aba é referente a punçoamento, em que se pode escolher por barras inclinadas para o reforço, o diâmetro das barras e o material. A aba de materiais já estava configurada com material selecionado nas opções da armadura necessária. Os diâmetros das barras foram deixados todos assinalados e as telas e reforços de punçoamento não foram utilizadas neste projeto.

5.2.2.2 Aba *reinforcement pattern*

Segundo os padrões, esta aba é dividida em cinco partes: *General*, *Bars*, *Wire fabrics reinf*, *Constructional reinf.* e *Shapes*. A primeira divisão *General* é onde se escolhe se a armação será por barras ou telas (a opção escolhida foi a só com barras, como no cálculo manual), diâmetro

mínimo da armação, comprimento máximo e a opção mais importante: se a laje escolhida será calculada sozinha ou como um todo. Essa seleção faz com que ao escolher diversas lajes para serem calculadas ao mesmo tempo, para essas lajes terem interação entre si como os cálculos manuais a opção *Entire plate* tem que estar ativa.

Outra coisa que a seleção desta opção faz é padronizar a armação de todas as lajes que estão sendo calculadas juntas. Tem-se, portanto, ao selecionar esta opção, o lado positivo de conseguir com que o Robot calcule as lajes com interação, fazendo com que os varões da armação positiva passem por emenda de transpasse para a próxima laje sem dobra, ou a armação negativa seja na faixa do apoio e não somente do apoio para uma das lajes. O outro lado, o negativo, é a padronização da armação, que pode gerar maior consumo de aço. Porém, esta não é uma regra e às vezes pode acontecer o contrário na padronização, diminuindo o consumo.

A Figura 5.3 e a Figura 5.4 retratam a junção entre as lajes LM3, a esquerda, com a laje LM4, a direita. Utilizando o *Entire plate*, a armação da laje é distribuída conforme mostra a Figura 5.3, com emenda no apoio central entre as armaduras positivas e gancho (definido como o conjunto dobra e trecho reto que segue após sua curvatura) somente nos apoios extremos. A Figura 5.4 utiliza da opção *single plate*, calculando as lajes como se fossem isoladas sem interação entre si.

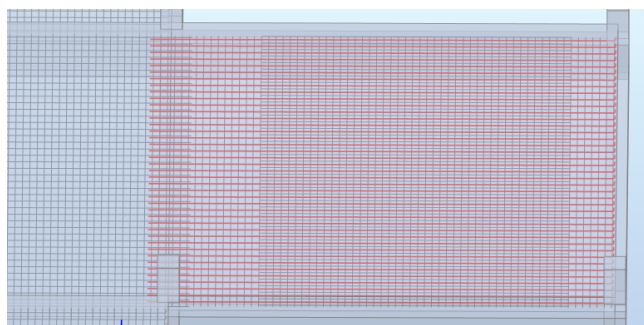


Figura 5.3 – Armação com a opção *Entire plate*.

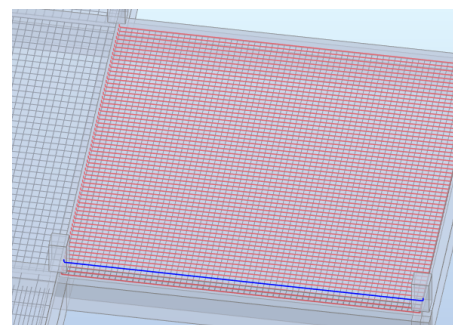


Figura 5.4 – Armação LM3 utilizando *Single plate*.

Continuando os esclarecimentos das outras divisões desta aba, optou-se por explicar a divisão *Bars*. Nesta aba são configurados parâmetros gerais sobre os diâmetros de varões e espaçamentos, e a maioria foi deixado no automático, somente o espaçamento máximo foi alterado para 30cm. A aba que vem na sequência da *Bars* é a *Wire Fabric reinf*. Como não se

utilizou tela nesta dissertação, esta aba foi desconsiderada, porém, nela é possível escolher as telas, direção da locação das telas e outros parâmetros relacionados a telas de armação.

A penúltima aba é referente a armaduras de canto. Nesta aba é possível escolher as formas, tamanho de aberturas na laje que devem ser ignoradas, o comprimento das barras que serão inseridas nos cantos, número de inserções da armadura de canto e reforço de apoios sobre vigas. Os parâmetros desta aba foram deixados no modo padrão do programa, sem maiores alterações. Por fim, a última aba, *Shapes*, tem a mesma utilidade que nos outros elementos estruturais, e apenas se escolheu a opção com ganchos quando necessário.

5.3 DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS

5.3.1 Armaduras necessárias

Os parâmetros de norma e das armaduras necessárias são considerados dentro da aba *Design>Required Reinforcement of RC beams/columns>Code parameters* ou *Calculation Parameters*. Como o EC2 já está como norma padrão, as configurações de normas (Figura 5.5) não foram modificadas. Essas configurações são o método do cálculo do vão da viga, tamanho do suporte, flecha admissível, configurações de viga T e forças calculadas.

Os parâmetros de cálculo (*Calculation Parameters*) são divididos em três partes. A primeira, chamada *General* (Figura 5.6), é onde se pode configurar o concreto utilizado para cálculo, coeficiente de fluência do concreto, classe de agressividade, abertura máxima de fissuras, classe da estrutura e $ctg \theta$ para o cálculo dos estribos. A opção do concreto a ser considerada foi deixada como o aplicado na estrutura, a classe de agressividade foi mudada para XC3, a da estrutura foi para S4 e a $ctg \theta$ adotada como 2,5. Todas modificações feitas foram baseadas nos parâmetros adotados para o cálculo manual.

As outras duas abas dos parâmetros de cálculo são referentes as armaduras longitudinais e transversais, em que se pode escolher módulos de espaçamento, tipos de aço, diâmetros, entre outras opções básicas da disposição dos varões. Todas as configurações devem ser aplicadas às vigas e, depois, deve-se calcular a armadura necessária dentro da mesma aba das configurações em *Calculation*.

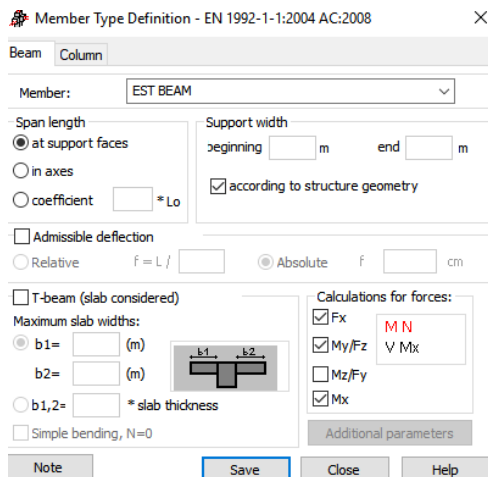


Figura 5.5 – Code parameters das vigas.

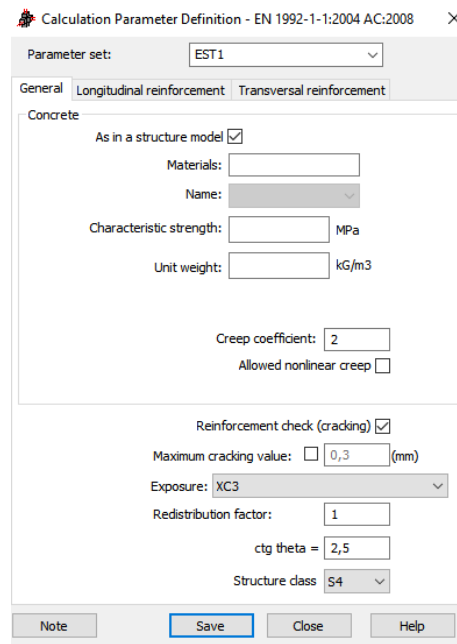


Figura 5.6 – Calculation Parameters das vigas.

5.3.2 Armaduras fornecidas

As armaduras fornecidas foram calculadas por meio do ícone *Provided reinforcement of RC element*. Dentro da janela aberta, deve-se selecionar as combinações que serão utilizadas para o cálculo. Antes de executá-los, configurou-se as abas laterais do Robot e os parâmetros adotados para o cálculo.

5.3.2.1 Aba story parameters

Nesta aba, constam os parâmetros de classe de ambiente, fissura admissível, idade do concreto e a classe da estrutura. Todos parâmetros foram configurados conforme os adotados no cálculo manual ou deixados em modo automático para o Robot.

5.3.2.2 Aba calculation options:

Dentro desta aba lateral existe cinco divisões, sendo elas: *General*, *Concrete*, *Longitudinal reinf.*, *Transversal reinf.* e *Additional reinforcement*. Na tela principal da divisão *General* são configuradas as opções de cobrimento, $\cot \theta$, $\cot \theta_f$ (para vigas T), flechas, correção de fissuras com aumento da armação e suporte de pré-moldados. A Figura 5.7 mostra os valores adotados

para esta divisão. Somente os parâmetros de cobrimento e $\cot \theta$ foram alterados: a $\cot \theta$ foi alterada para o valor adotado nos cálculos manuais de 2,5 e o cobrimento foi definido como 2,5 cm somado ao desvio de 10 mm. Todos os parâmetros sem edição são calculados automaticamente, conforme o EC2. Além da tela principal, a divisão *General* tem as opções avançadas, de otimização da geometria, parâmetros relacionados ao fogo e parâmetros relacionados ao sismo.

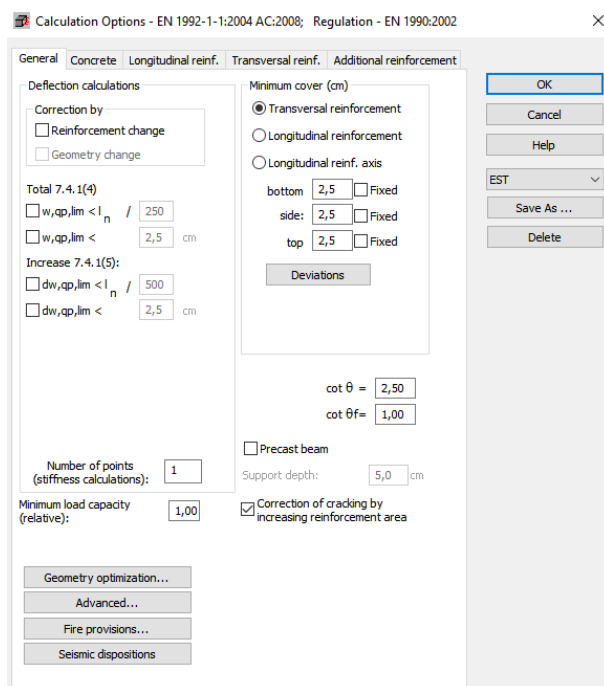


Figura 5.7 – Definição da divisão *General* em *Calculation Option*.

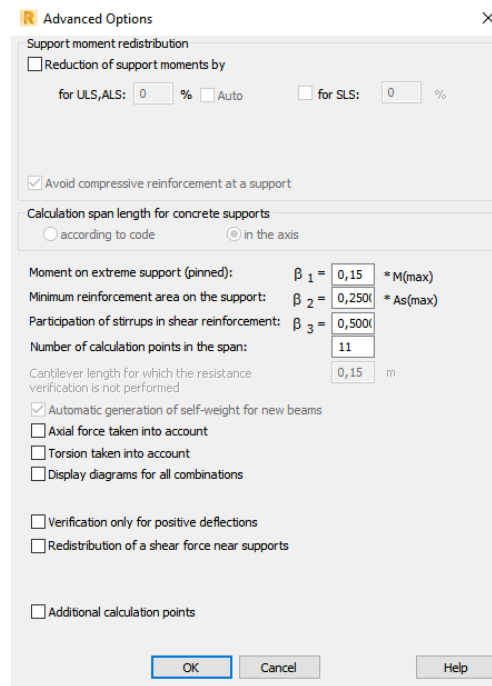


Figura 5.8 – Configurações do *Advanced Options*.

As opções de otimização da geometria, parâmetros relacionados a proteção de fogo e sismo não foram abordados neste projeto, porém, podem ser de extrema utilidade para outras pesquisas. As opções da aba *Advanced* são demonstradas na Figura 5.8. Destaca-se as opções redistribuição de esforços, os betas e o número de divisões que a viga deve ter para sua análise (importantíssimo para comparação entre os resultados do cálculo pelo Robot e o cálculo manual). O β_1 é referente ao valor de momento que deve ser considerado na seção do apoio; o β_2 é referente a quantidade de armadura que deve chegar até o apoio, e o β_3 corresponde à porcentagem mínima de estribos que deve combater o esforço transversal. A parte de redistribuição dos esforços, como não foi aplicada no cálculo manual, também não foi aplicada no cálculo do Robot.

As outras divisões desta aba não têm tantas configurações de difícil entendimento. Na divisão *concrete* é configura-se o concreto que está sendo utilizado na estrutura. Nas demais divisões configura-se o aço e os diâmetros de preferência para o cálculo da viga.

5.3.2.3 *Aba reinforcement pattern*

A principal aba em questão de configurações conta com seis divisões: *General*, *Bottom Reinf.*, *Top Reinf.*, *Transversal Reinf.*, *Constr. Reinf.* e *Shapes*. Na divisão *General* (Figura 5.9) é necessário prestar atenção em muitos parâmetros importantes. O primeiro é o número de segmentos da viga, podendo se escolher entre *single span* e *whole beam*, ou seja, armação por trechos da viga ou para viga toda. Para o cálculo manual a armação foi calculada para viga toda, sendo escolhida, portanto, essa opção. Os espaçamentos dos varões foram configurados para no mínimo 2,0 cm e no máximo 30 cm, como calculado nos capítulos anteriores. A opção de barras dobradas não foi utilizada neste projeto.

Além destas configurações, a parte de ancoragem não deve ser modificada, deixando os dois primeiros campos desmarcados. As opções que constam para ancoragem são de considerar a dobra no comprimento de amarração e ancoragem por *looping* no fim da viga. Nenhuma dessas opções foi utilizada no projeto do cálculo manual. As divisões de *Bottom Reinf.* e *Top Reinf.* são para configurar o número de camadas de varões e o número de varões em uma camada. Outra divisão importante é a *Transversal Reinf* (Figura 5.10), em que se configura os parâmetros dos estribos. Seguindo o adotado para o cálculo manual, foi selecionado para o arranjo dos estribos a opção de se ajustar a envoltória dos esforços transversos. Os espaçamentos foram configurados conforme os adotados no cálculo manual, e o espaçamento do primeiro estribo próximo ao apoio foi adotado como nulo ou próximo de zero.

Abaixo das opções de espaçamento estão as configurações de seções, como mostra a Figura 5.10. Caso se queira alguma seção diferente das apresentadas, deve-se utilizar o *User definition*. Como no projeto utilizou-se estribos de dois ramos simples, a opção *auto* selecionando a primeira figura dos estribos já cumpre a seção utilizada nos cálculos manuais. O restante não foi utilizado no trabalho, como cargas suspensas, estribos abertos ou estribos inclinados.

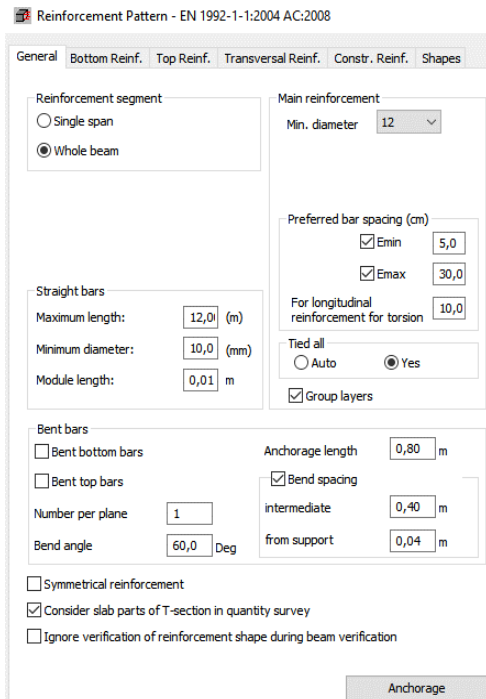


Figura 5.9 – Definição da divisão *General* em *Reinforcement Pattern*.

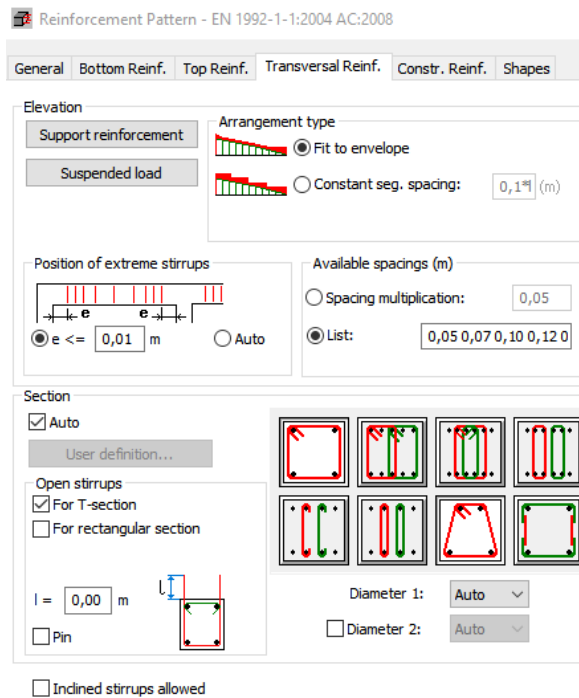


Figura 5.10 – Definição da divisão *Transversal Reinf.* em *Reinforcement Pattern*.

Na divisão *Constr.Reinf.* existe algumas opções relevantes para armadura de reforço e armaduras sobre os apoios. As outras opções não foram alteradas para esse projeto. Na parte da armadura de reforço a opção *bar prologation* deve estar assinalada para liberar que as armaduras principias de diferentes trechos se unam. Dentro das opções *joint method* deve-se assinalar a opção *Lap splice*, que é a opção de emenda que foi utilizada nos cálculos manuais. O limite de *l* é somente o tamanho da barra de reforço, caso seja necessário (barra que é colocada quando o momento é zero para unir as barras principais). Na última divisão, *Shapes*, é possível selecionar formas diferentes para as armaduras longitudinais e transversais. O único parâmetro alterado nesta divisão foi a dobra para 90°, quando necessário.

Após a configuração de todas as abas laterais, deve-se calcular a viga por meio da opção *start calculation*. O Robot responde a esse comando com o modelo da armação em 3D (com informações de espaçamento, diâmetro e assim por diante), diagramas de esforços considerados nas vigas e notas dos elementos estruturais.

5.3.2.4 *Aba reinforcement of beam*

Esta aba não foi utilizada na dissertação, mas é uma das abas mais úteis caso já se tenha a resposta do dimensionamento da viga em questão. Nesta aba pode-se personalizar muitos parâmetros do dimensionamento da viga, como os de distribuição dos estribos, ganchos nas pontas, barras adicionais, emendas das barras, entre outras funções. É uma aba de personalização das armaduras que pode incluir muitos detalhes.

A escolha por não utilizar esta aba é justificada devido ao fato de que, para este trabalho, o objetivo do projeto era utilizar o BIM, que tem como pontos positivos o aumento de produção (velocidade do processo) em relação ao CAD. Caso seja necessário configurar todos os parâmetros de armação na mão, o sentido de aumentar a velocidade do processo se perderia, e o trabalho seria o mesmo de calcular na mão e desenhar em CAD. Por isso, optou-se por calcular alterando os parâmetros e analisando o resultado que o *software* propõe. Esse exercício também tem conotação de pesquisa para melhorar o desempenho atual do *software* em análise, fazendo com que no futuro possa-se usar a ferramenta de dimensionamento sem ter os erros recorrentes encontrados nesta tese.

5.3.2.5 *Abas Cross-Section type e openings*

Estas duas abas são voltadas a alteração da seção da viga, caso necessário, e configurações de aberturas nessas. Não se utilizou tais abas nesta dissertação.

5.3.3 **Divergências do Robot**

As primeiras comparações feitas com os métodos foram entre os próprios momentos gerados pelo Robot na parte geométrica (*Structure Model*) e, posteriormente, gerados na aba de *RC beam module*. A diferença visível entre alguns momentos e esforços transversos, que deveriam ser iguais, levou a essa comparação. O momento positivo máximo na viga 1-3, que na geométrica foi de 108,36 kN.m, tem o valor de 107,98 kN.m no módulo *RC beam*. O motivo da diferença entre os momentos se dá pelo fato do momento na parte geométrica ser baseado nos pontos gerados pela malha que encontram a viga, isto é, quanto mais refinada a malha menor a probabilidade de erros nesses momentos, bem como do momento no *RC beam module* ser gerado com base no número de divisões da viga escolhido dentro da aba *Calculation option* (por padrão cada trecho é dividido em 11 partes).

Este fato causa diferenças grandes, já que os mesmos elementos estruturais estão sendo analisados com número de trechos de elementos finitos diferentes (Autodesk Support, 2018). Os momentos negativos sofreram mais com a diferença entre divisões que os positivos, pelo fato de ocorrerem com uma elevação muito maior, principalmente sobre os pilares. Somado a diferença de trechos de elementos finitos, nos momentos negativos o Robot desconsidera em um intervalo sobre o pilar o momento de pico negativo. Essa desconsideração vem do EC2, que permite um intervalo de suavização dos momentos negativos (não se considerou essa suavização no cálculo manual).

A partir destas observações, foram analisadas as armaduras geradas pelo Robot. É importante ter em mente tais diferenças, pois pode haver divergências no dimensionamento e na distribuição das armaduras, pelo fato do momento utilizado para o cálculo manual ser diferente do utilizado pelo Robot.

Os relatórios de cálculo retirados do Robot seguem no Anexo C do trabalho.

5.4 DIMENSIONAMENTO DOS PILARES

O reforço de um pilar tem seus primeiros passos iguais aos citados para as vigas: calcular as armaduras necessárias e fornecidas.

5.4.1 Armadura necessária

A configuração dos parâmetros para a norma da armadura necessária é executada por meio da mesma opção selecionada para as vigas (*Design>Required Reinforcement of RC beams/columns>Code parameters ou Calculation Parameters*). Dentro da opção parâmetros de norma (Figura 5.11), é possível configurar o comprimento de flambagem dos pilares e o método de cálculo que será utilizado. O comprimento de flambagem o qual o Robot se refere é o comprimento efetivo de encurvadura (l_0) no cálculo manual. Observa-se que em ambos os cálculos se tem o comprimento livre (l no manual, que significa o mesmo que l_y ou l_z do Robot), que é multiplicado pelo fator η (o mesmo que o k do Robot), resultando em l_0 .

A diferença entre os dois métodos está na abordagem dos eixos. O guia da Autodesk (2018b) descreve que no eixo y o comprimento de flambagem é aquele que causa aumento do momento y no pilar, e na direção z o comprimento de flambagem é o que causa o aumento do momento z no pilar. Já no cálculo manual o comprimento de flambagem em y gera excentricidade em y ,

que aumenta o momento em z. Por esses motivos, os resultados de ambos os eixos aparecem com designações trocadas no memorial do Anexo C em comparação com o memorial de cálculo do método manual.

Na Figura 5.11, o comprimento de flambagem é essencial para o cálculo da armadura necessária. Para cada pilar deve-se definir os apoios, de forma que o Robot calcule automaticamente o valor de k ou manualmente atribua valores calculados de k. Como pelo método manual teve-se uma ideia do intervalo de variância de k nas duas direções, aplicou-se esses valores a tais parâmetros. Na prática, o uso dos tipos de apoios dos pilares é mais utilizado e não necessita de cálculos paralelos ao Robot.

Os métodos de cálculo são selecionados em *Additional parameters*. Em armaduras fornecidas, a escolha dos métodos de cálculo e os métodos de cálculos disponíveis serão abordados de maneira mais efetiva. Nesta etapa, selecionou-se como metodologia de cálculo a opção baseada na distribuição de tensão nos pilares, e para análise dos efeitos de segunda ordem a metodologia escolhida foi a curvatura nominal. Os parâmetros de cálculo foram adotados iguais aos das vigas. Todas as configurações foram aplicadas nos pilares e esses foram calculados por meio da mesma opção *Calculation* citada para as vigas.

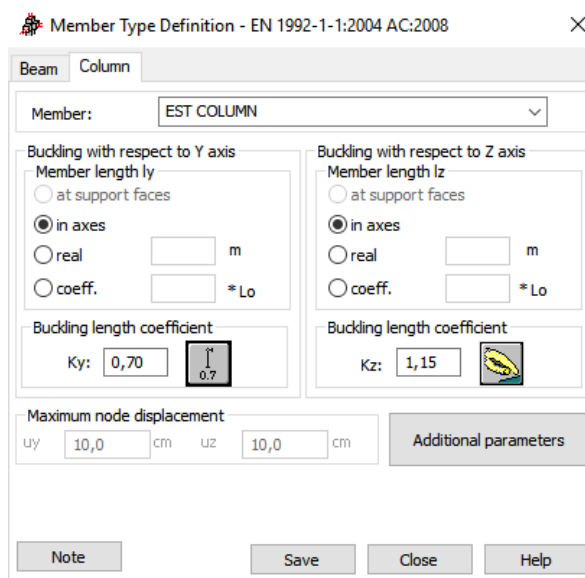


Figura 5.11 – Code parameters dos pilares.

5.4.2 Armadura fornecidas

Por meio do mesmo ícone das vigas calculou-se os pilares. A aba *story parameters* foi configurada assim como nas vigas, portanto, não será detalhada.

5.4.2.1 Aba *calculation options*

Dentro desta aba há quatro divisões: *General*, *Concrete*, *Longitudinal reinf.* e *transversal reinf.* Na divisão *General* (Figura 5.12) é possível escolher o método de cálculo que será utilizado. O primeiro método é retirado do Capítulo 5.8.9 do EC2 para flexão desviada, por ser considerado um método simplificado; o segundo é mais elaborado, descrito pelo Capítulo 6.1 do EC2, flexão simples ou composta. Comparando esses dois métodos do Robot, a única diferença é que o método simplificado tem algumas limitações que fazem com que seus resultados sejam maiores ou iguais ao método de flexão simples ou composta. Por estar sendo avaliado pilares com flexão composta, como citado no cálculo manual, optou-se pela segunda opção.

No cálculo manual o dimensionamento foi efetuado com base no REBAP, o que significa que diferenças pequenas entre os resultados do Robot e do cálculo manual são esperadas. Logo abaixo das opções de cálculo estão as opções de método de cálculo para efeito de segunda ordem. Como demonstrado Azeredo (1998), utilizou-se o método de encurvadura aproximada para o dimensionamento dos pilares no Robot. Os parâmetros de cobertura foram alterados para os calculados no estudo de caso, e os demais não foram alterados para essa dissertação, mas são de suma importância e devem sempre ser observados.

O significado de cada um deles foi brevemente descrito, sendo primeiro a opção *reinforcemet optimization level*, que serve para aumentar ou diminuir o número de soluções que o programa calculará para o pilar. O parâmetro seguinte é o *minimum (relative) capacity*, que aumenta ou diminui a capacidade do pilar receber carga, ou seja, caso tenha algum fator já determinado que irá abaixar a resistência de um pilar, pode-se, por exemplo, diminuir a capacidade desse. Abaixo dos dois parâmetros citados está o *Design for simple bending*, que faz com que o momento em uma das direções do pilar seja ignorado.

Os outros parâmetros são para configurar proteção ao sismo e ao fogo, verificar o pilar contra cisalhamento, fissuras e limite de tensão para o ELS, bem como determinar se o pilar é pré-moldado ou não. Deixando esta divisão de lado, as outras são somente para configurar o concreto, aço e bitolas que serão utilizadas no dimensionamento do pilar.

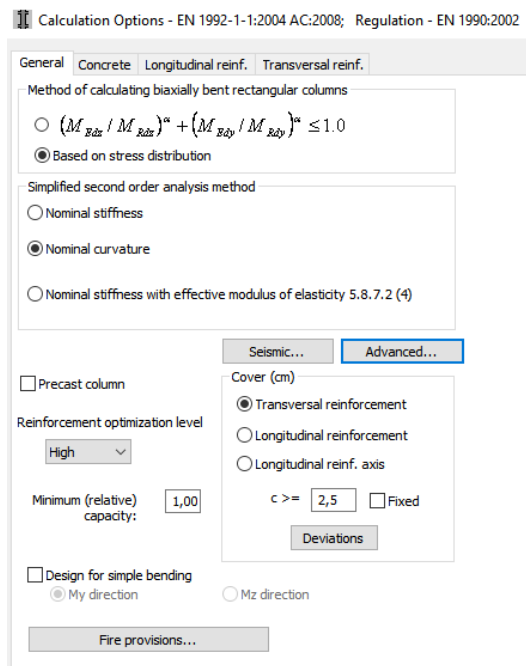


Figura 5.12 – Definição da divisão *General* em *Calculation Options* de pilares.

5.4.2.2 *Aba reinforcement pattern*

Dividida em quatro, a aba *reinforcement pattern* é onde o usuário pode escolher espaçamentos, comprimento de arranque, tipo de cinta, entre outras coisas. A primeira divisão desta aba é a *Longitudinal Bars*. As configurações da parte esquerda da Figura 5.13 tem como objetivo: a escolha do diâmetro das barras de canto; o número de barras no mesmo canto do pilar (agrupamento); diâmetro das barras intermediárias entre as barras do canto; número de barras agrupadas na parte intermediária e configurar se essas têm o mesmo diâmetro que as de canto; escolher entre gerar ou não barras construtivas que não serão levadas em consideração na resistência do pilar; selecionar se essas barras construtivas terão ou não o mesmo diâmetro que as intermediárias; e se é necessário todas as barras estarem presas por estribos suplementares.

A parte direita da figura mostra as configurações adotadas na esquerda em uma seção do pilar. Além disso, pode-se configurar os espaçamentos entre as barras e a opção *All tide*, que significa que serão colocados estribos adicionais de forma que todas as barras estarão nos cantos dos estribos.

A segunda divisão são as configurações sobre as armaduras transversais. Nesta parte configuram-se os espaçamentos entre as cintas, se a cinta é interrompida na base da laje ou na base da viga e o formato dessas. Não foram alterados nenhum dos padrões de espaçamento de cinta na segunda divisão, deixando para que o Robot calculasse automaticamente esses

espaçamentos. A terceira divisão é onde se configura os arranques da estrutura, e na primeira parte pode-se configurar o diâmetro, comprimento e se o arranque será preso ou não por cintas. Todos esses parâmetros foram deixados em cálculo automático do Robot. Abaixo destas configurações estão os parâmetros de conexão com o pilar superior e, por fim, se o arranque terá ajustes de dobra ou se será reto.

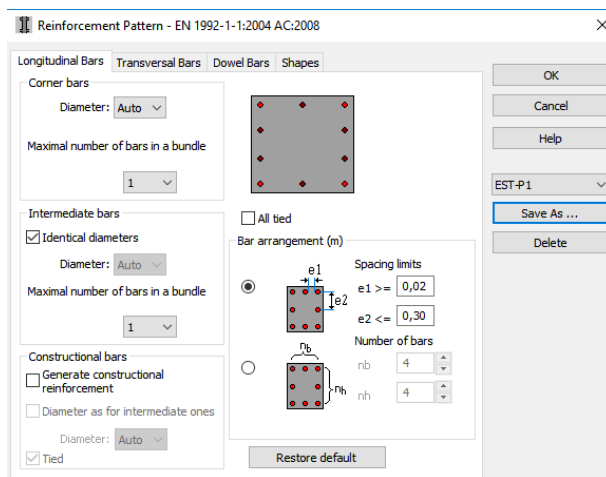


Figura 5.13 – Definição da divisão *Longitudinal Bars* para pilares.

5.4.2.3 *Aba Reinforcement of columns*

Da mesma maneira que funciona o *Reinforcement of beam* funciona o de pilares. É uma aba que possibilita configurações mais precisas na distribuição dos varões em geral.

5.4.2.4 *Aba Buckling Lengths*

A aba *Buckling* é onde os parâmetros de flambagem são definidos para o pilar, que influenciam diretamente nos parâmetros de excentricidade de segunda ordem, como o l_0 , comprimento efetivo de encurvadura (ver no Anexo B definições para o cálculo dos pilares) ou l , o comprimento livre. Tem exatamente a mesma função das opções de comprimento de flambagem do Capítulo 5.4.1, e as observações feitas para o *code parameters* da armadura necessária também se aplicam a esta aba. A Figura 5.14 mostra tais opções.

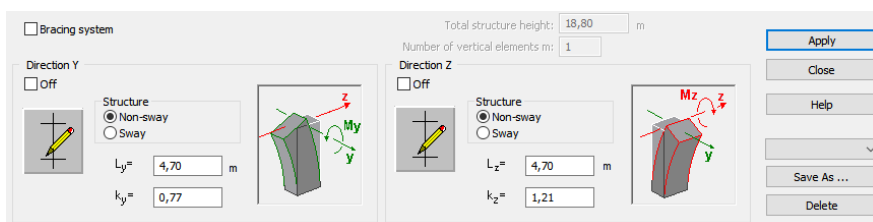


Figura 5.14 – Definição da aba *Buckling lengths*.

5.4.2.5 *Aba Load definition e Governing cases results.*

A aba *Load definition* mostra os resultados calculados de cada combinação para a força normal e os momentos nas posições a, b e c (topo, base e centro do pilar, respectivamente). A outra aba relacionada às cargas *Governing cases results* mostra as combinações levadas em conta no cálculo do pilar em questão: a seção do pilar referente a combinação selecionada dividida entre área comprimida (amarela) e tracionada (cinza). Depois da execução do cálculo, uma dessas combinações é selecionada como crítica, que é utilizada para o dimensionamento do pilar.

5.5 DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO DE LAJES MANUAL X ROBOT

A análise da primeira laje foi mais detalhada, pois os problemas e causas descobertos nessa não foram descritos novamente para as demais, e sim somente citados.

Uma análise importante é a observação das zonas de armaduras pelos mapas gerados. As figuras 5.15 a 5.18 representam as zonas com maior ou menor armação para cada eixo. Sua escala é executada por coloração, sendo a azul sem armação, amarelo menor armação possível, até o vermelho escuro, que é a maior armação. Pelas cores, é possível analisar se estes gráficos correspondem ao esperado para cada direção e momentos aplicados nas lajes.

Para os momentos positivos, os mapas devem resultar em armaduras mais pesadas no centro das lajes e armaduras leves ou sem armaduras sobre os apoios das lajes, como indica as figuras 5.17 e 5.18. Por outro lado, as armaduras para os momentos negativos devem resultar em armaduras mais pesadas sobre os apoios e armaduras leves ou sem armaduras no centro das lajes, como indica as figuras 5.15 e 5.16. Todas as figuras abaixo estão representando seus mapas como esperado.

Nota-se uma armação maior na laje LM4 para os momentos positivos, e no apoio da parede e do pilar redondo uma armação mais pesada para os momentos negativos. A parede e o pilar redondo, por terem uma rigidez maior que o restante dos pilares, têm essa característica de absorver mais os momentos.

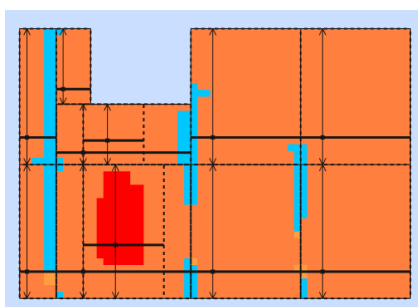


Figura 5.15 – Mapa de armaduras positivas em XX.

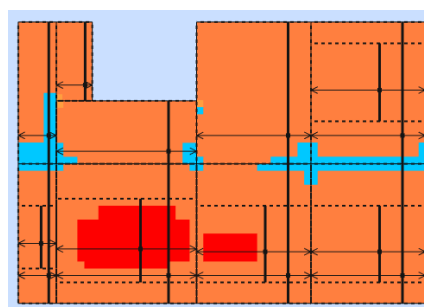


Figura 5.16 – Mapa de armaduras positivas em YY.

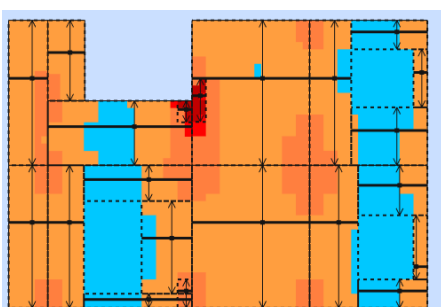


Figura 5.17 – Mapa de armaduras negativas em XX.

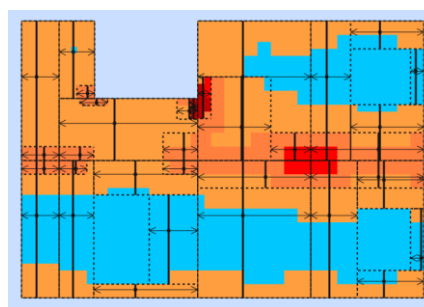


Figura 5.18 – Mapa de armaduras negativas em YY.

5.5.1 Laje LM3

A comparação entre as duas metodologias de cálculo foi baseada primeiramente nas respostas das armaduras necessárias e seus momentos de cálculo, para depois serem especificados possíveis erros na distribuição da armadura. Esta primeira laje foi calculada para a armadura fornecida de duas maneiras, sendo a primeira de maneira isolada, para comparação de resultados simplificados e melhor entendimento do processo do Robot e a segunda pela opção *Entire Plate* sendo influenciada pelas lajes ao redor. Todas as lajes foram dimensionadas com a opção *Entire plate* que considera a interação entre essas, resultando em armaduras mais realistas.

O Robot escolhe por meio de coordenadas indicadas nas notas os momentos que geraram maior armação em x ou em y para o dimensionamento das armaduras necessárias e fornecidas.

A Tabela 5.1 mostra as diferenças entre momentos e armaduras necessárias entre as duas metodologias. Como no cálculo do Robot e no cálculo manual (momentos pegos na geometria

pela aba *Results em Maps*) foram usadas a mesma metodologia *Wood & Armor*, e não existe diferenças entre os momentos. A diferença dos momentos negativos, como na direção y, são causados pelas metodologias de suavização dos momentos de pico.

A diferença nos momentos reflete imediatamente na diferença das armaduras necessárias. As outras diferenças menores entre as armaduras são causadas pela variação de d, que no cálculo manual foi adotado em primeira instância como hlaje - 0,05 cm para poder calcular a armadura.

Tabela 5.1 – Comparação entre as armaduras necessárias das metodologias utilizadas da LM3.

Metodologia	Momentos (kN.m)		Diferença %	Armaduras (cm ² /m)		Diferença %
	Manual	Robot	Robot x Manual	Manual	Robot	Robot x Manual
Positiva na direção y	14,35	14,35	0,00%	3,02	3,18	5,03%
Positiva na direção x	37,03	37,03	0,00%	4,36	4,12	5,54%
Negativo na direção y	23,0064	38,13	39,66%	2,68	4,86	44,75%
Negativo na direção x	65,325	64,92	0,62%	7,85	7,50	4,42%

A armadura fornecida teve diâmetros diferentes dos escolhidos no cálculo manual, porém, no geral as armaduras corresponderam ao valor esperado. A primeira análise para a armadura fornecida foi executada com a laje isolada, sem influência das demais adjacentes.

Para a laje isolada, nota-se que as armaduras negativas no Robot foram superiores em alguns pontos, onde os esforços de pico se concentram normalmente. As figuras 5.19 a 5.22 representam as armaduras fornecidas através da opção *single plate*.



Figura 5.19 – Armação inferior LM3 em x.

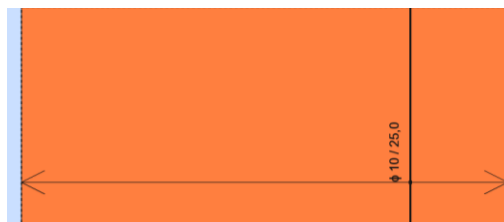


Figura 5.20 – Armação inferior LM3 em y.

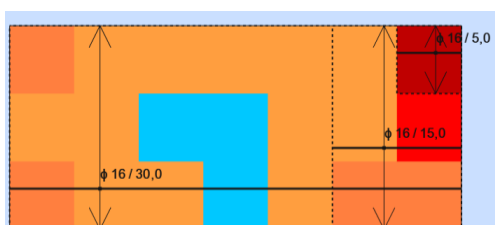


Figura 5.21 – Armação superior LM3 em x.

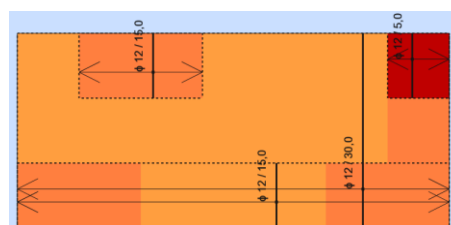


Figura 5.22 – Armação superior LM3 em y.

Pela falta de compatibilidade das armaduras, optou-se por executar a análise das armaduras fornecidas através da laje calculada utilizando a opção *Entire Plate*. As figuras 5.23 a 5.25

demonstram as diferenças ao utilizar a opção *Entire Plate*. No caso da armadura inferior em y, não houve mudanças, e em x o espaçamento da armadura inferior diminuiu em uma zona específica para $\phi 10$ c/10cm, mas aumentou o espaçamento no geral para $\phi 10$ c/20cm. A armadura superior em x diminuiu o espaçamento, mas tirou a área armada com espaçamento de 15 cm e aumento o espaçamento de 5cm para 7,5cm. A armadura em y superior não mudou praticamente nada.

Em suma a distribuição da armadura é mais coerente, como esperado, e as diferenças dos resultados não são grandes.

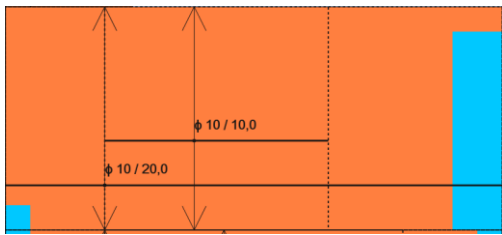


Figura 5.23 – Armação inferior LM3 em x, Robot.

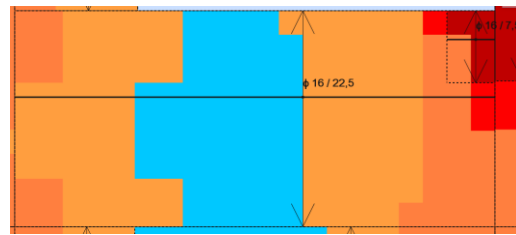


Figura 5.24 – Armação superior LM3 em x, Robot.

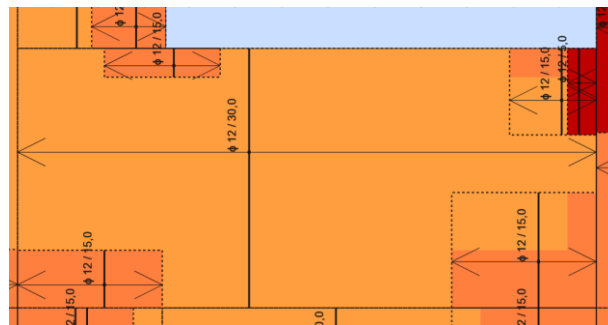


Figura 5.25 – Armação superior LM3 em y, Robot.

As figuras citadas representam o cálculo pelo Robot, já a Figura 5.26, Figura 5.27 e a Figura 5.28 representam a armadura dimensionada manualmente.

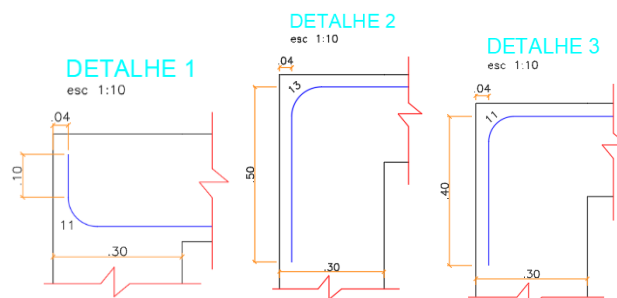


Figura 5.26 – Detalhes das ancoragens nos apoios.

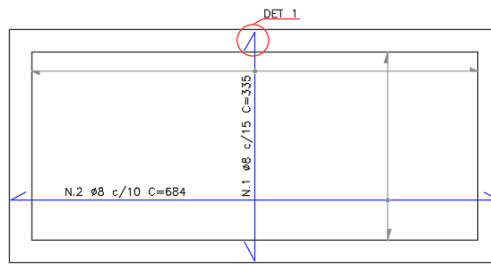


Figura 5.27 – Armação inferior LM3, manual.

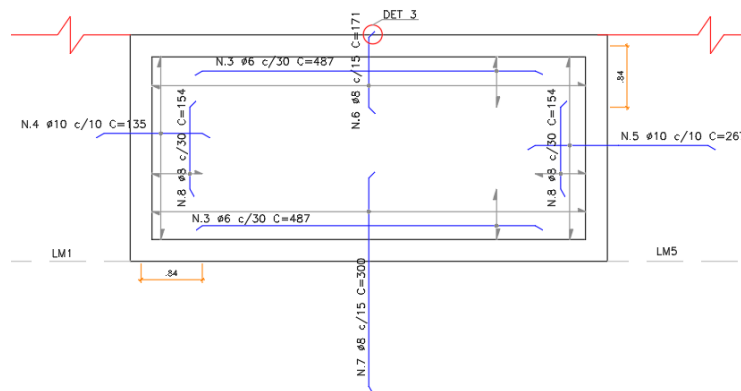


Figura 5.28 – Armação superior LM3, manual.

Os pontos de amarração da armação manualmente calculada, onde não há nenhum detalhe demarcado, podem ser executadas como amarrações retas, com ganchos ou emendas por transpasse a próxima laje, dependendo do tamanho de l_{bd} .

Além da comparação por imagens, foi disponibilizado, no Anexo C, as notas do dimensionamento de todas as lajes do primeiro andar. Para a comparação da distribuição das armaduras fornecidas, foi necessário comparar tanto as figuras como os resultados da distribuição do Robot.

As emendas das armaduras positivas e negativas estão corretamente posicionadas e calculadas. As escolhas das barras utilizadas em ambos os métodos foram diferentes, porém, as áreas por metro de armadura são muito parecidas com as calculadas manualmente. Comparando a área das armaduras fornecidas (Tabela 5.2), nota-se que há locais onde a armadura aplicada foi muito maior do que a necessária. O Robot faz com que essas diferenças entre as armaduras necessárias e fornecidas existam, pois é programado para sempre tentar diminuir os espaçamentos pela metade em uma mesma armação, como marcado a vermelho na Figura 5.29.

As armaduras de distribuição calculadas na Tabela 4.18 e na Tabela 4.19 devem também ser consideradas na laje. O Robot distribuiu essa armadura de maneira correta, porém, com área de aço muito maior do que a necessária. O Robot padroniza a armação e detalha a armadura de distribuição com a mesma área de aço da armadura necessária calculada naquela direção. Isto causa uma diferença considerável no consumo de aço, mas facilita a construção destas lajes.

Tabela 5.2 – Comparação entre armaduras fornecidas LM3.

Metodologia	Diâmetro/espacamento		Armaduras (cm ² /m)	
	Manual	Robot	Manual	Robot
Positiva na direção y	8/15,0cm	10/25,0cm	3,35	3,14
Positiva na direção x	8/10,0cm	10/10,0cm	5,03	7,85
Negativo na direção y	8/15,0cm	12/30,0cm	3,35	3,77
Negativo na direção x	10/10,0cm	16/22,5cm	7,85	8,94

Provided reinforcementAt φ (mm) / (cm)	(cm ² /m)	Ar (cm ² /m)
10,0 / 17,5	4,12 <	4,49
10,0 / 25,0	3,06 <	3,14

Provided reinforcementAt φ (mm) / (cm)	(cm ² /m)	Ar (cm ² /m)
16,0 / 5,0	23,77 <	40,21
16,0 / 15,0	7,50 <	13,40
16,0 / 30,0	4,66 <	6,70
0,00	12,0 / 5,0	13,54 < 22,62
-1,87	12,0 / 15,0	4,86 < 7,54
0,00	12,0 / 15,0	4,13 < 7,54
12,0 / 30,0	3,72 <	3,77

Figura 5.29 – Nota das armaduras da laje LM3 do Robot.

A distribuição das armaduras no geral, pelo Robot, tem bom aspecto (para essa laje) quando usado o *Entire plate*, mas ainda apresenta algumas falhas inconvenientes para construção. Um exemplo é a execução de ganchos em lugares inapropriados e a criação de armaduras muito pontuais, desnecessárias ou que poderiam ser substituídas por uma melhor distribuição da armadura;

5.5.2 Laje LM6

A laje LM6, assim como as outras, tiveram, no geral, os seus momentos positivos muito próximos dos calculados. No caso da laje LM6, o momento positivo na direção x (eixos globais) escolhido pelo Robot foi divergente do momento máximo escolhido no método manual. Por esse motivo, os momentos em Mx positivos estão com maior erro do que nas outras lajes. Esta diferença ocorre por uma falha do Robot na escolha do momento de cálculo para Mx.

Tabela 5.3 – Comparação entre as armaduras necessárias das metodologias utilizadas da LM6.

Metodologia	Momentos (kN.m)		Diferença %	Armaduras (cm ² /m)		Diferença %
	Manual	Robot	Robot x Manual	Manual	Robot	Robot x Manual
Positiva na direção y	36,77	36,77	0,00%	4,33	4,24	2,09%
Positiva na direção x	24,32	18,29	24,79%	3,02	3,18	5,03%
Negativo na direção y	42,00	57,85	27,40%	4,96	6,91	28,16%
Negativo na direção x	30,72	53,14	42,19%	3,60	5,94	39,34%

Os momentos negativos são diferentes pelos mesmos fatos citados para as lajes LM3 e LM7. Percebe-se que nas armaduras necessárias a diferença de momentos de Mx positivo não influenciaram. A armação de 3,18 cm²/m é a armação mínima calculada pelo Robot, que pode se diferenciar da calculada manualmente pela variação do d utilizado no cálculo. Portanto, ambos momentos deram armadura mínima, não causando diferenças nos resultados. Diante disso, reforça-se o alerta para verificar sempre os momentos utilizados para os cálculos das armaduras no Robot.

A comparação entre as armaduras fornecidas foi executada da mesma maneira que para LM3 e LM7. As Figuras 5.30 a 5.33 representam as armaduras fornecidas calculadas pelo Robot, e as Figuras 5.34 e 5.35 representam as para o cálculo manual.

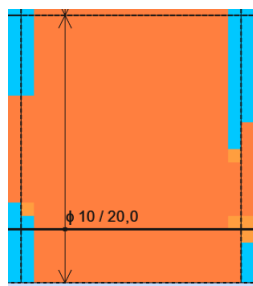


Figura 5.30 – Armação inferior LM6 em x, Robot.

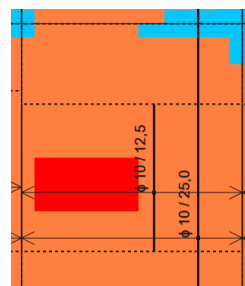


Figura 5.31 – Armação inferior LM6 em y, Robot.

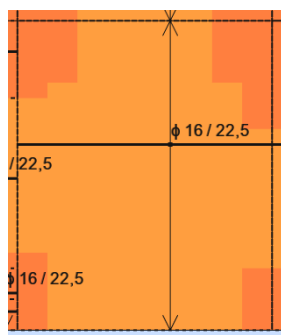


Figura 5.32 – Armação superior LM6 em x, Robot.

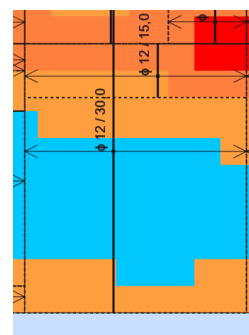


Figura 5.33 – Armação superior LM6 em y, Robot.

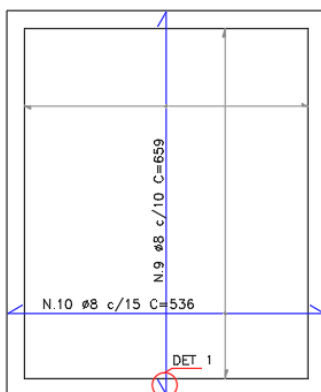


Figura 5.34 – Armadura inferior LM6, manual.

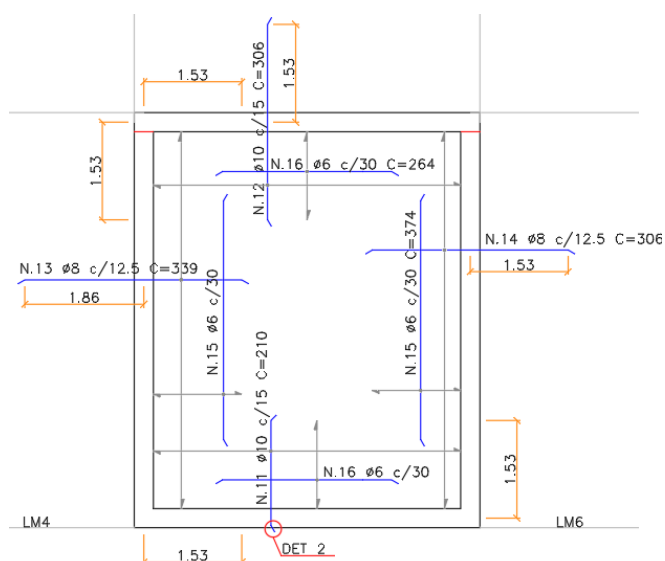


Figura 5.35 – Armadura superior LM6, manual.

As armaduras fornecidas foram comparadas pela Tabela 5.4. A diferença em y, novamente, é causada pela prática do Robot de dividir sempre os espaçamentos pela metade.

Tabela 5.4 – Comparação entre armaduras fornecidas LM6.

Metodologia	Diâmetro/espaçamento		Armaduras (cm ² /m)	
	Manual	Robot	Manual	Robot
Positiva na direção y	8/10,0cm	10/12,5cm	5,03	6,25
Positiva na direção x	8/15,0cm	10/20,0cm	3,35	3,93
Negativa na direção y	10/15,0cm	12/12,5cm	5,24	9,05
Negativa na direção x	8/12,5cm	16/22,5cm	4,02	8,94

A distribuição desta laje é parecida com as da laje LM3 e LM7. Sua armadura tem uma distribuição boa, mas mesmo assim ainda possui ganchos fora dos locais (no meio da laje, como mostra a

Figura 5.36), armadura de distribuição com valores excessivos e diâmetro das dobras calculados de forma errada.

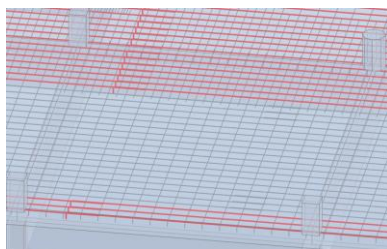


Figura 5.36 – Armação superior 3D da laje LM6.

5.5.3 Laje LM7

As armaduras necessárias (Tabela 5.5) e fornecidas (Tabela 5.5) tiveram poucas diferenças, sendo as diferenças presentes devido aos fatos já elucidados na laje LM3 e LM6.

Tabela 5.5 – Comparação entre as armaduras necessárias das metodologias utilizadas da LM7.

Metodologia	Momentos (kN.m)		Diferença %	Armaduras (cm ² /m)		Diferença %
	Manual	Robot	Robot x Manual	Manual	Robot	Robot x Manual
Positiva na direção y	33,91	33,91	0,00%	3,98	3,92	1,51%
Positiva na direção x	33,50	33,50	0,00%	3,93	3,72	5,34%
Negativo na direção y	41,25	60,62	31,95%	3,02	6,91	56,30%
Negativo na direção x	25,11	50,40	50,18%	4,87	7,26	32,92%

Tabela 5.6 – Comparação entre armaduras fornecidas LM7.

Metodologia	Diâmetro/espaçamento		Armaduras (cm ² /m)	
	Manual	Robot	Manual	Robot
Positiva na direção y	8/12,5cm	10/20,0cm	4,02	3,93
Positiva na direção x	8/12,5cm	10/12,5cm	4,02	6,25
Negativo na direção y	10/15,0cm	16/22,5cm	5,24	8,94
Negativo na direção x	8/15,0cm	12/15,0cm	3,35	7,54

As armaduras fornecidas foram comparadas por meio das Figuras 5.38 a 5.41 que representam o cálculo pelo Robot, e das Figuras 5.42 e 5.43 que representam o cálculo manual.

Além das escolhas das armaduras, a distribuição da laje LM7 é pior que a da laje LM3. A Figura 5.40 e a Figura 5.41 mostram uma variação excessiva de espaçamentos e das armaduras em comparação a laje LM3. Somando a variação excessiva ainda se tem erros nos apoios, conforme indica a Figura 5.37. As barras de aço em vermelho não têm ganchos de amarração em suas pontas mesmo nos apoios, e esses, por sua vez, têm tamanho menor que l_{bd} , e deveriam, portanto, receber amarrações com ganchos. Existe também nesta imagem algumas ganchos

desnecessárias marcadas em verde. As restantes conclusões são muito parecidas com as da laje LM3.

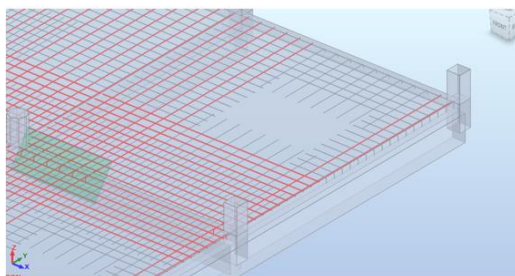


Figura 5.37 – Armação Robot 3D laje LM7.

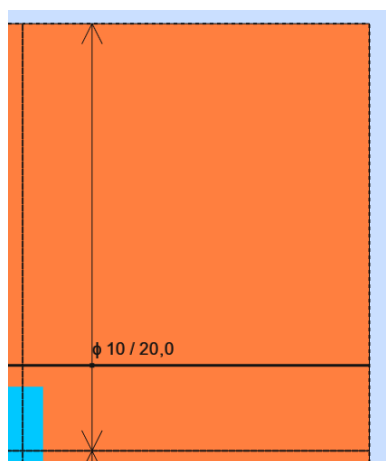


Figura 5.38 – Armação inferior LM7 em x,
Robot.

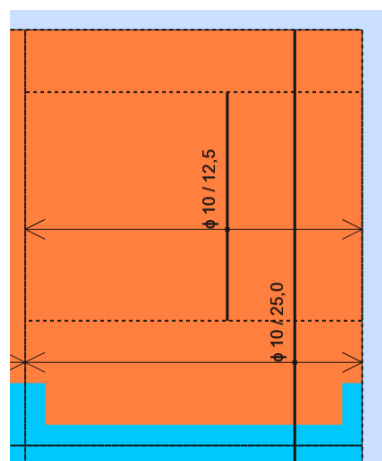


Figura 5.39 – Armação inferior LM7 em y,
Robot.

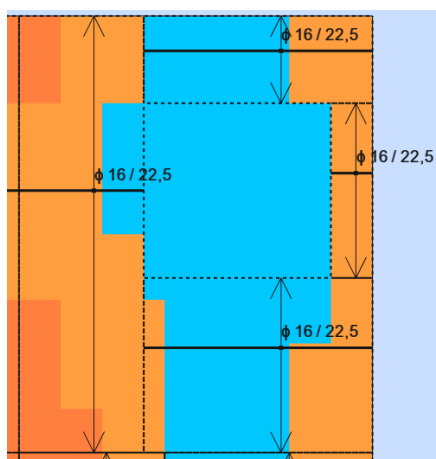


Figura 5.40 – Armação superior LM7 em x,
Robot.

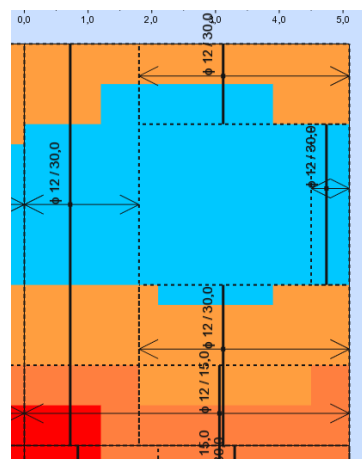


Figura 5.41 – Armação superior LM7 em y,
Robot.

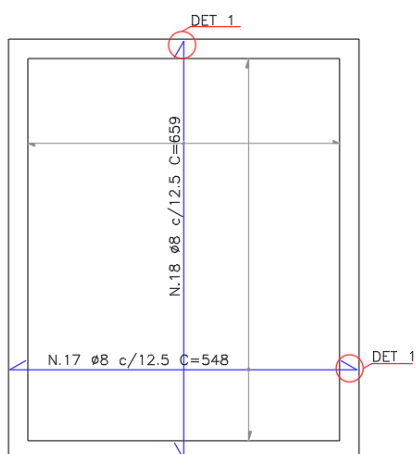


Figura 5.42 – Armação inferior LM7, manual.

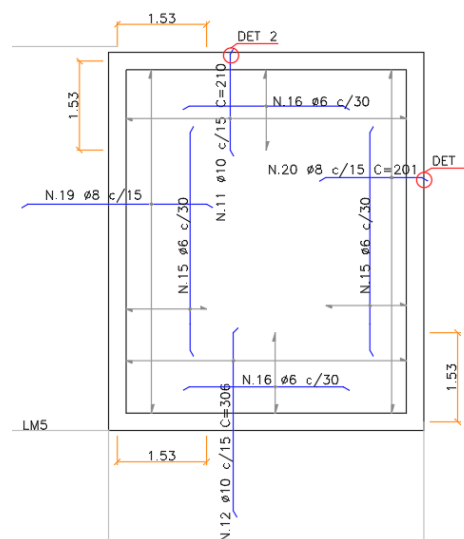


Figura 5.43 – Armação superior LM7, manual.

5.5.4 Observações finais

Em geral, o dimensionamento das armaduras necessárias do Robot é correto, porém, na hora de calcular as armaduras fornecidas e detalhá-las, o *software* ainda comete alguns erros. Esses erros não têm consequências para a segurança da estrutura, mas podem significar um aumento de armação e uma dificuldade maior na execução dessas. Além disso, há erros como ganchos no meio da laje que podem ser retirados por meio da aba *Shape*, mas isso causaria outro problema, que seria a amarração nos apoios sem ganchos. Retirar todos os ganchos é pior do que ter alguns em locais errados esporadicamente. Assim como as vigas, falta no cálculo das dobras considerar a fissuração do concreto. No geral, a distribuição das armaduras parece menos otimizada e tem algumas características, como a dos espaçamentos pela metade não funcionais.

Somado a isso, a exportação das lajes do Robot para o Revit ainda não é possível. Muitas pesquisas estão sendo feitas para essa exportação, no entanto, até o momento a empresa Autodesk não apresentou nada para executar essa exportação. Esse fato quebra a execução em BIM dos projetos em geral. As lajes são um dos principais elementos de uma estrutura e não podem deixar de ser contabilizadas no modelo Revit, que servirá de banco de dados para diversas outras áreas na época da construção, gestão e planejamento da obra. Existem outros meios para exportação dos resultados das armaduras (como IFC), mas a perda de dados ainda é muito grande se comparado aos *plug-ins* de conversação direta entre o Robot e o Revit. A

abertura para exploração de *plug-ins* pode fazer com que a evolução do Revit seja muito rápida, corrigindo esses erros citados.

5.6 DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO DE VIGAS MANUAL X ROBOT

O método manual foi descrito no Capítulo 4.7, em que são abordadas as escolhas de cálculos e métodos de distribuição das armaduras em vigas. Seguindo os mesmos parâmetros adotados para o cálculo manual, no Capítulo 5.3 é tratado como configurar o *software* para dimensionar vigas. Os parâmetros não configurados no Robot são calculados com base nos Eurocódigos, que foi a base para o cálculo e distribuição das armaduras de ambos os métodos. Os resultados dos dois dimensionamentos foram analisados e comparados com intuito de encontrar possíveis divergências que possam ser barreiras a aplicação da metodologia BIM no projeto de estruturas.

5.6.1 Viga 1-3

A Figura 5.44 e a Figura 5.45 representam as armaduras fornecidas finais obtidas pelo método manual e pelo Robot, respectivamente. Grande parte das observações que foram realizadas se basearam na diferença entre ambos os resultados destas figuras e alguns pontos de incoerência que o Robot ainda tem.

5.6.1.1 Armaduras necessárias

Antes de analisar as armaduras fornecidas, foram analisadas as armaduras necessárias das vigas. A Tabela 5.7 mostra as diferenças encontradas para os resultados de armaduras necessárias para os momentos positivos e negativos da viga 1-3. A diferença de 3,05% das armaduras necessárias positivas e a diferença grande das armaduras negativas é explicado pelo Capítulo 5.3.3. A diferença de momentos, causada pela divisão dos elementos finitos como explicado, faz com que seja aceitável as porcentagens apresentadas. Em geral, as armaduras necessárias estão próximas ao esperado.

Tabela 5.7 – Comparação entre armaduras necessárias V1-3.

Comparação de armaduras necessárias (cm ²)			
Local da armadura	Manual	Robot	Diferença %
Arm. + vão	5,19	5,03	3,05%
Arm. - apoio central	8,59	5,00	41,78%
Arm. - apoio extremo	3,69	2,49	32,44%

5.6.1.2 Armadura fornecida de esforço transverso

As primeiras comparações que foram feitas entre os resultados das armaduras fornecidas têm intuito analisar as diferenças na armadura de esforço transverso composta por estribos. O cálculo manual resultou em um estribo $\varnothing 8$ a cada 22,5cm (demarcados na Figura 5.44) nos locais definidos pelo escalonamento do Anexo D. O escalonamento foi executado conforme o gráfico de esforço transverso retirado da geometria do *Struture Model*. Os estribos do dimensionamento do Robot foram distribuídos nas duas faixas cotadas no canto direito superior da Figura 5.45.

Comparando os resultados, nota-se que existe diferença entre o espaçamento dos estribos, a extensão das áreas que recebem maior esforço transverso e o local dessas áreas de reforço aumentado. Para entender essas diferenças, primeiramente analisou-se os gráficos de esforços transversos da geometria do Robot e do *RC beam*, pelo fato já citado da diferença entre os gráficos. Como esperado, todas essas divergências são devidas as diferenças de divisão de trechos da viga para análise e o intervalo de suavização utilizado pelo Robot nos apoios. Por desconsiderar os pontos de esforços máximos nos apoios, o aumento de armação perto do pilar P8 à esquerda do eixo D não chegou a superar os 163 kN como ocorreu nos esforços retirados da parte geométrica do Robot.

Por causa deste fato, o Robot não aumentou a taxa de armadura para esta posição. Já nas outras duas faixas de aumento de armadura do cálculo manual, mesmo com a suavização dos esforços no apoio foi necessário diminuir os espaçamentos dos estribos também no Robot. Nota-se que o resultado do espaçamento entre o cálculo manual e o Robot é divergente justamente por ser ignorado o esforço transverso sobre o apoio, o que, apesar de pouco usual na prática, tem cobertura regulamentar. O esforço transverso máximo no apoio E é de 208,03 kN no cálculo manual e 183,32 kN no cálculo pelo Robot. Esta diferença faz com que o espaçamento de 22,5 cm passe a ser de 25,0 cm. O comprimento em que esse espaçamento menor foi aplicado depende muito do gráfico de esforços. Até chegar ao valor de 163 kN, o espaçamento deve ser mantido como 22,5 cm ou 25,0 cm, dependendo do dimensionamento em análise.

Além de suavizar os valores máximos nos apoios, o *RC beam* tem um gráfico mais realista, pois seu formato é contínuo e não em degraus como nos esforços retirados por geometria. A solução para melhorar os gráficos seria aumentar a malha das lajes, porém, como a edificação é simples, tirando alguns pontos que merecem uma malha mais detalhada, o maior detalhamento da

malha só iria sobrecarregar o modelo, sendo que os resultados não seriam diferentes a ponto de influenciar a estrutura.

Mesmo sendo mais realista, o comprimento de aumento de taxa de armadura que o Robot adotou é muito superior do que o necessário. Analisando o gráfico de esforço transversal das próprias notas criadas pelo Robot, é possível perceber que se esse interrompesse esta armação assim que o esforço transversal diminuísse para 163 kN, o comprimento de aumento de taxa de armação seria muito próximo do calculado manualmente. Os estribos nas zonas com esforço transversal abaixo de 163 kN receberam armadura $\varnothing 8$ a cada 30 cm.

5.6.1.3 Armadura fornecida longitudinal inferior

Após a comparação dos estribos, se comparou a armadura principal inferior de ambos os dimensionamentos. As barras inferiores da viga tanto do Robot quanto do cálculo manual resultaram em $3\varnothing 16$. O resultado da armação em si não teve nenhuma divergência, porém, na distribuição da armadura alguns pontos importantes são executados de uma maneira injustificada no Robot. O resultado do Robot é composto por muitos trechos de barras que poderiam ser aglutinados em um só, pois é possível dentro do próprio editar as barras, conectando-as por meio do comando *Connect Reinforcing Bars*.

Todavia, o intuito do trabalho era automatizar o processo de armação de tal maneira que o resultado das armaduras fosse o mínimo possível manualmente editado. Outro ponto problemático da distribuição de armação da viga são as emendas, em que cada uma tem o comprimento l_0 , que depende de $l_{b,rqd}$ que vale, segundo o Eurocódigo 2 para esse aço, concreto e diâmetro de barra 0,56 m (conforme calculado no memorial de cálculo do Anexo B).

O fator α_6 é descrito no Anexo B, sendo dependente do número de emendas em um determinado intervalo. No cálculo manual, α_6 foi adotado como pior caso 1,50, que consiste em uma emenda no intervalo, ou seja, 100% das emendas estão naquele intervalo (Tabela B.7 contém valores de α_6). Já no Robot, o valor adotado para α_6 foi de 1,00, e estas diferenças causaram uma redução para o Robot de 0,28 m de emenda por sobreposição. A localização das emendas nas barras dos momentos positivos também foi algo diferente entre o cálculo manual e o Robot, sendo que no primeiro optou-se por colocar essas emendas em cima do apoio (onde as barras sofrem compressão), já no segundo as emendas estão situadas a aproximadamente 1,50 m dos apoios.

As emendas são um assunto a ser corrigido, principalmente no que diz respeito ao seu comprimento. A localização da emenda, desde que seja em locais com poucos esforços, não altera significativamente o desempenho da viga em sua vida útil.

A última diferença encontrada entre os dois dimensionamentos foi o método de amarração das armaduras. Apesar da amarração do Robot estar correta por aplicar dobras e não trechos retos, o diâmetro da dobra considerada no Robot está diferente do cálculo manual.

A diferença entre o diâmetro da dobra do cálculo manual e do Robot é que o segundo não considerou a fissuração do concreto em seu cálculo. De acordo com o EC2, para evitar danificar a armadura o diâmetro do mandril deve ser para $\varnothing \leq 16$ mm no mínimo $4 * \varnothing$ e para $\varnothing > 16$ mm no mínimo $7 * \varnothing$. Porém, a dobragem quando os varões estão tracionados geram em seu interior tensões de esmagamento do concreto, e para evita-las deve-se calcular o diâmetro do mandril por meio da tabela apresentada no Anexo B. Mediante isso, não considerar essa verificação é um erro do Robot que deve ser corrigido.

5.6.1.4 Armadura fornecida longitudinal superior

Assim como a armadura inferior, a armadura superior tem diferenças nas emendas e ganchos. Além destes dois problemas, a armadura superior tem diferença entre a taxa de armadura aplicada em alguns pontos da barra e o comprimento do trecho reto após as dobras.

O número de divisões da armadura superior está melhor que a inferior, sendo sua disposição construtiva muito mais prática. Por outro lado, pelo fato da diferença dos gráficos de momentos, em vez de se ter $5\varnothing 16$ como calculado no dimensionamento manual, o Robot calculou $4\varnothing 16$ para os momentos negativos. Por esses $4\varnothing 16$ serem necessários apenas nos dois apoios centrais, o Robot criou como armação principal $3\varnothing 16$ por grande parte da viga, e o quarto varão foi colocado entre os suportes centrais como reforço. No caso, para o cálculo manual calculou-se a armadura negativa para o maior momento, e aplicou-se essa mesma armadura em todos os apoios com momentos negativos significativos. Por isso, no apoio P7 no cálculo manual se tem $5\varnothing 16$, valor que pode ser reduzido para $3\varnothing 16$, como adotado no Robot. O outro extremo da viga, o apoio P10 tem a armadura manual de $2\varnothing 16$ comparada a armadura do Robot de $3\varnothing 16$. Como a armadura de $2\varnothing 16$ é superior a armadura mínima, a adoção de $3\varnothing 16$ foi apenas por padronização, podendo ser, portanto, reduzida no Robot caso desejado.

Outra observação é que próximo ao apoio P7 do balanço existe uma zona onde os momentos são nulos. Nesse local, o Robot variou os varões de 16 para varões de 8 por aproximadamente

2,70 m (armadura construtiva), ao contrário do que foi feito manualmente, que somente se estendeu $2\phi 16$. Esta variação de armadura não é equivocada, mas pode gerar dificuldades na hora da construção da viga.

A amarração da armadura negativa no apoio do P10 e no balanço próximo ao P7 foram executadas por um trecho reto e um gancho, respectivamente. O correto seria aplicar ganchos já que l_{bd} é maior que o apoio.

Além de aplicar ganchos nos trechos retos, as dobras existentes do dimensionamento do Robot estão com a mesma divergência dos da armadura inferior. O diâmetro do mandril utilizado está equivocado. Outro problema nos ganchos da armadura superior são os comprimentos retos após a dobra. No Anexo B, a Figura B.8 demonstra que a altura total do gancho deve ter o tamanho de l_{bd} . A armadura, que está no apoio P10, deveria, portanto, ser modificada para a aplicação da dobra e trecho reto adequados conforme o cálculo manual.

As divergências de tamanho das emendas são iguais para a armadura inferior e superior, e a causa também é a mesma.

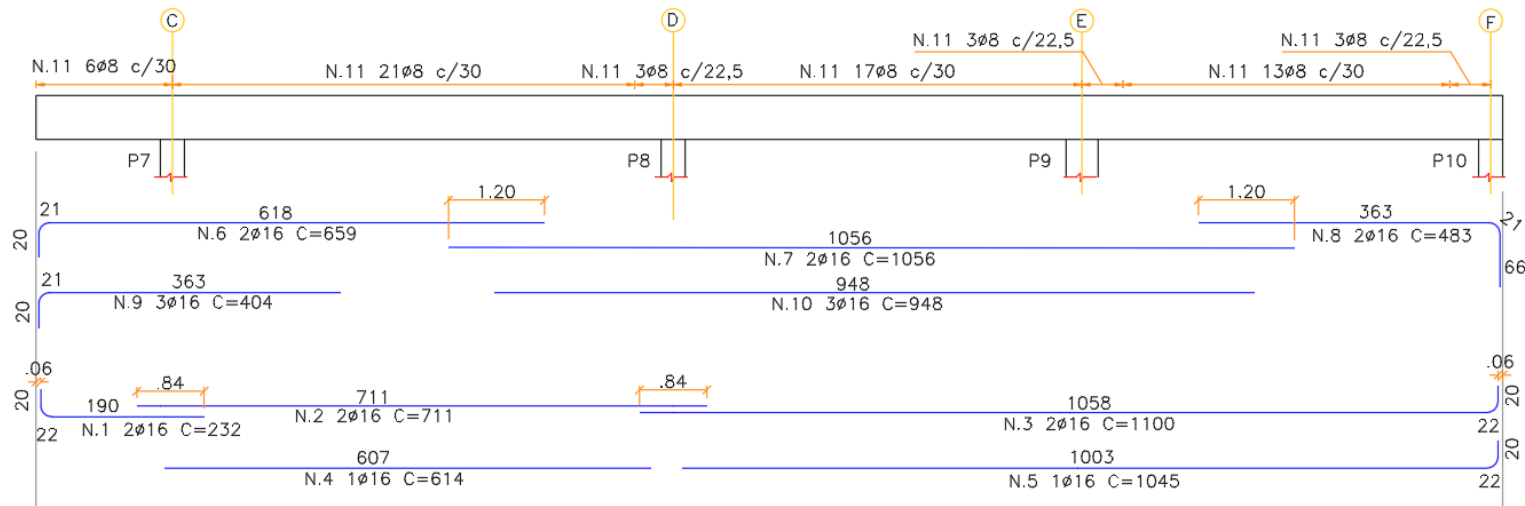


Figura 5.44 – Disposição dos estribos V1-3.

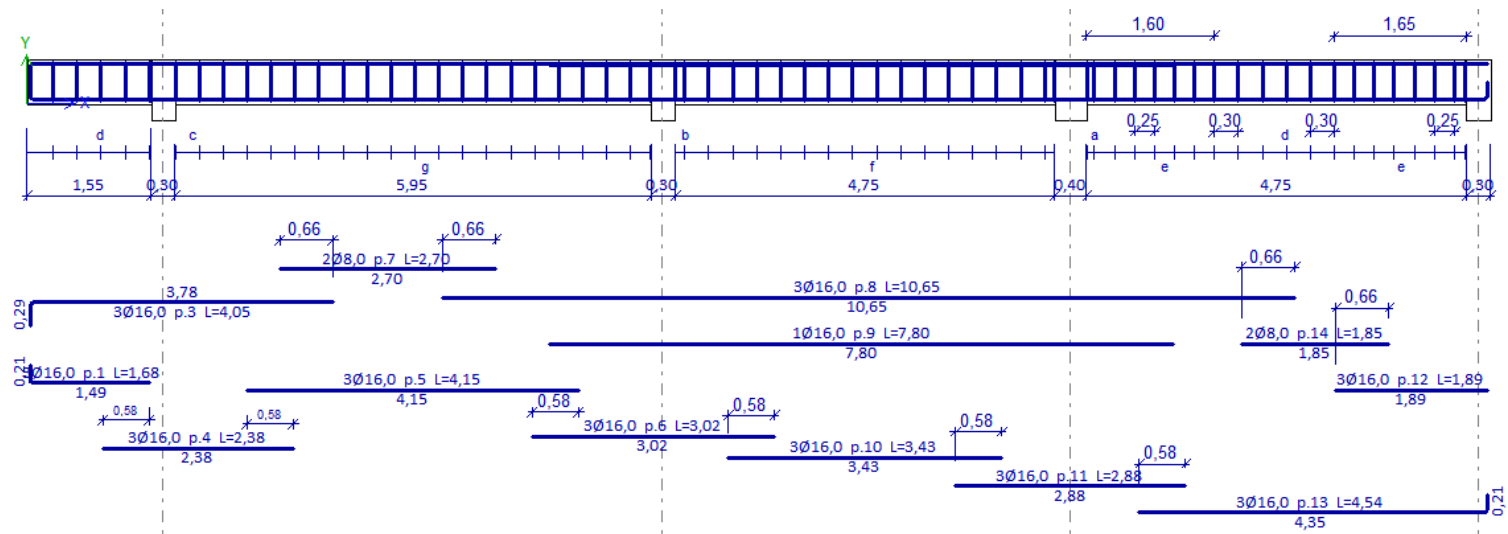


Figura 5.45 – Armadura longitudinal V1-3.

5.6.2 Viga 1-5

A análise da viga 1-5 foi condensada em um só tópico por muitos dos problemas indicados na viga 1-3 serem recorrentes.

As armaduras fornecidas, assim como na V1-3, tiveram diferenças que são apresentadas na Tabela 5.8. A armadura negativa no apoio só não resultou em uma diferença maior por que ambas resultaram em armadura mínima.

Tabela 5.8 – Comparação entre armaduras necessárias V1-5.

Comparação de armaduras necessárias (cm ²)			
Local da armadura	Manual	Robot	Diferença %
Arm. + vão	2,26	2,24	0,88%
Arm. - apoio central	3,39	2,40	29,20%
Arm. - apoio extremo	2,26	2,24	0,88%

A armadura fornecida da viga 1-5 foi totalmente idêntica entre os diferentes dimensionamentos. O Robot, conforme indicado no Anexo C e nas Figura 5.47, teve o resultado de seu dimensionamento de 2 ϕ 12 para toda a viga (armadura positiva e negativa). Este valor corresponde a armação mínima necessária, calculada conforme indicado no Anexo B. O cálculo manual que consta no Anexo D mostra que foi adotado 2 ϕ 12 para todas as partes da viga, exceto o apoio central, que resultou em 3 ϕ 12 para o momento negativo (Figura 5.46). A diferença de 2 ϕ 12 do cálculo do Robot para 3 ϕ 12 do manual é devido a diferença dos gráficos de momentos.

Outras falhas recorrentes do Robot para o cálculo manual são as emendas e os ganchos na extremidade da armação. Essas correções devem ser feitas conforme a Figura 5.46 e o dimensionamento manual executado no Capítulo 4.7. A distribuição da armadura executada pelo Robot está com bom aspecto e não precisaria ser modificada. Os estribos resultaram em ϕ 8 a cada 30cm para toda viga em ambos os dimensionamentos.

5.6.3 Viga 2-1

A viga 2-1 não se difere das outras apresentadas. Os erros cometidos pelo *software* Robot foram os mesmos (emendas e ganchos). Ambos problemas não serão detalhados novamente, sendo as soluções as mesmas aplicadas para as vigas 1-3 e 1-5.

A armadura necessária consta na Tabela 5.9 e a causa de suas diferenças são as mesmas já citadas.

Tabela 5.9 – Comparação entre armaduras necessárias V1-5.

Comparação de armaduras necessárias (cm ²)			
Local da armadura	Manual	Robot	Diferença %
Arm. + vão	2,87	2,79	2,79%
Arm. - apoio central	4,19	3,70	11,69%
Arm. - apoio extremo	2,26	2,24	0,88%

Uma diferença que ocorreu na viga 2-1 foi que na hora do dimensionamento se limitasse os varões longitudinais para apenas $\varnothing 8$ e $\varnothing 12$ mm, o Robot dimensionava a viga com $3\varnothing 12$ em toda sua extensão, reforçando alguns pontos com um varão de 12 mm extra (mesmo sendo desnecessário em muitos pontos a armadura de $3\varnothing 12$ mm). Para se chegar ao resultado da Figura 5.49, foi necessário dimensionar considerando os outros diâmetros e, depois, reduzir manualmente os de 16mm para 12mm onde possível. Isto mostrou uma falha no número de possibilidades que o Robot pode apresentar de armaduras para as vigas.

Comparando o resultado do dimensionamento por cálculo manual da Figura 5.48 com o resultado apresentado na Figura 5.49 pelo Robot, nota-se que a disposição das armaduras é muito mais prática na Figura 5.48. A disposição estranha da Figura 5.49 aconteceu principalmente pelo problema de dimensionamento citado acima, mas também devido ao número de trechos em que a armadura foi dividida pelo Robot.

Ambos os dimensionamentos estão corretos na questão de área de aço para os varões longitudinais. A armadura para esforço transversal resultou em $\varnothing 8$ a cada 30cm.

5.6.4 Observações finais

As diferenças encontradas entre os dois dimensionamentos foram significativas em alguns pontos. Um deles, de grande relevância, é a diferença entre os gráficos de momento dentro do próprio Robot. Seria interessante se o gráfico apresentado no modelo analítico (geometria do Robot) fosse igual aos utilizados pelo Robot no dimensionamento das armaduras. Essas correções de momentos dificultam a verificação do dimensionamento do Robot, etapa fundamental que deve sempre ser efetuada pelos engenheiros.

Todas essas diferenças encontradas poderiam ser modificadas dentro do próprio Robot, pois qualquer alteração pode ser executada na parte de modificação das armaduras ou mesmo na aba *Reinforcement bar*, porém, o trabalho é manual e deve ser executado barra por barra. Tornando essa execução manual o trabalho de modificação das armaduras, pode ser comparado ao trabalho feito atualmente no escritório de cálculo por meio do CAD. Comparando as duas metodologias, existe uma redução na modificação da armadura, mas seria mais objetivo se os *softwares* já corrigissem esses pequenos erros de detalhamento sem que o usuário precisasse realizar grandes interferências.

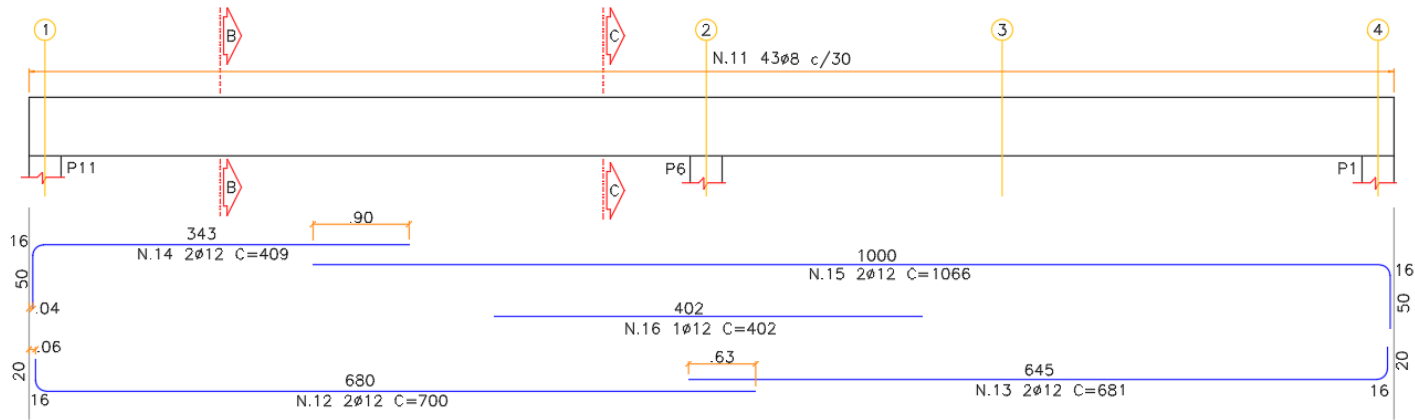


Figura 5.46 – Armadura longitudinal V1-5, cálculo manual.

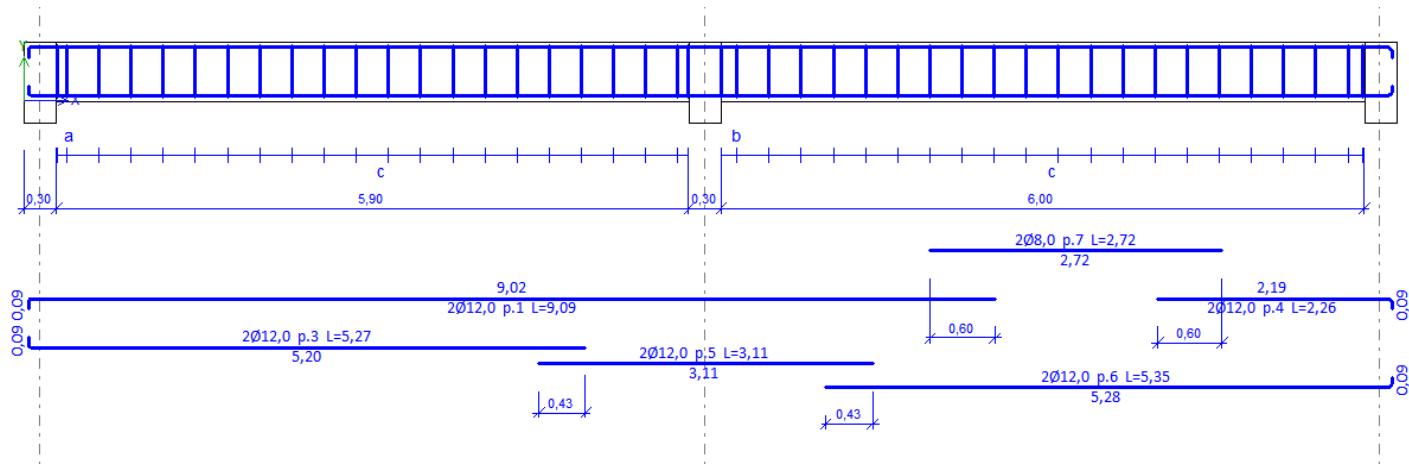


Figura 5.47 – Armadura longitudinal V1-5, cálculo Robot.

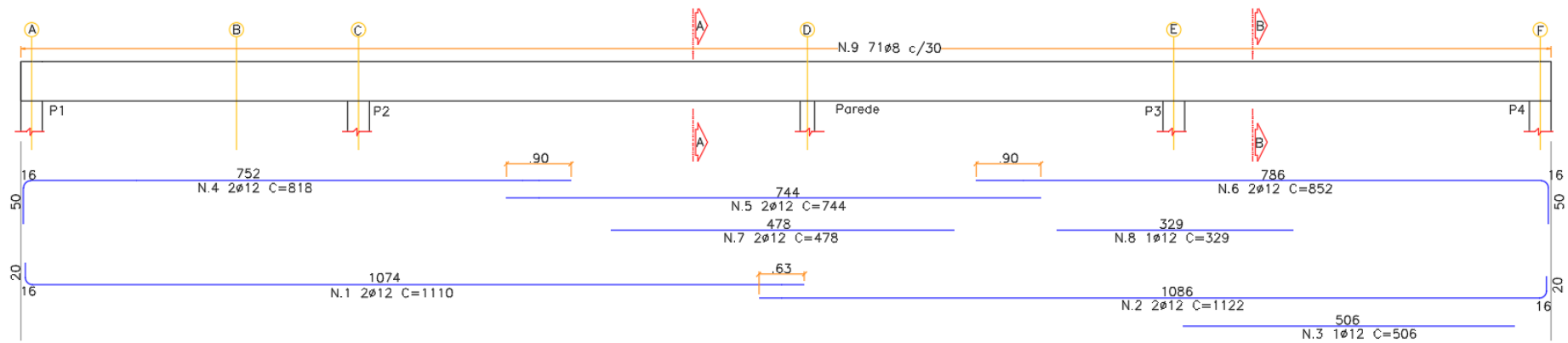


Figura 5.48 – Armadura longitudinal V2-1, cálculo manual.

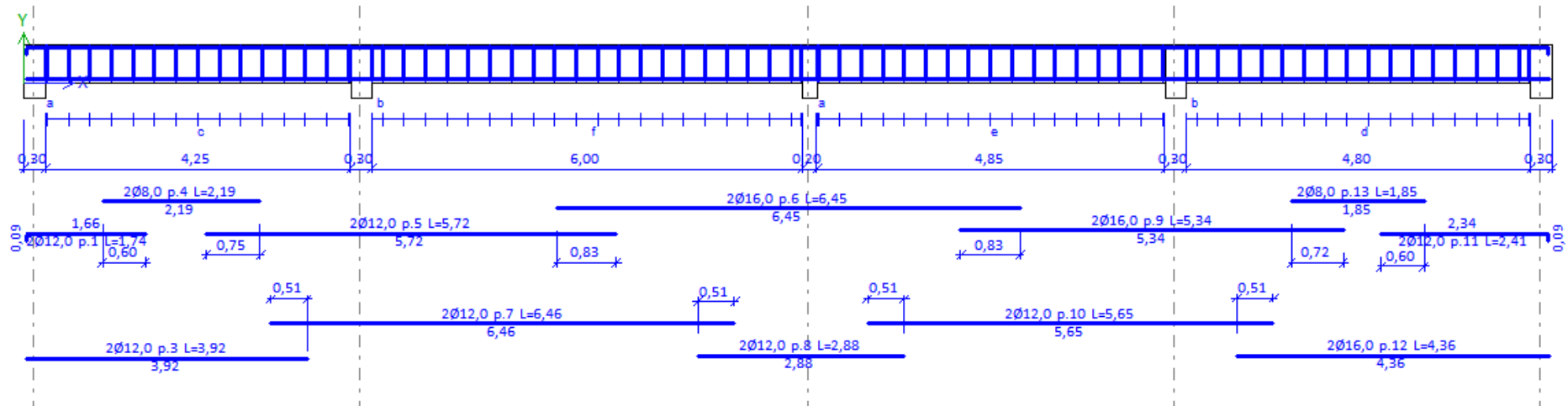


Figura 5.49 – Armadura longitudinal V2-1, cálculo Robot.

5.7 DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO DE PILARES MANUAL X ROBOT

O dimensionamento manual e pelo Robot dos pilares tiveram algumas diferenças no modo que foram conduzidos. O cálculo dos pilares pelo método manual se baseou no Eurocódigo e no livro de Manuel de Azeredo (compilação de informações de diversos regulamentos portugueses, como REBAP e RSA), enquanto o Robot usou somente o Eurocódigo para o cálculo. Algumas diferenças nos resultados dos cálculos do Robot e manuais são, portanto, esperadas. Por isso, recomenda-se a leitura do Capítulo V.II sobre as diferenças dos regulamentos.

5.7.1 Pilar 1

Da mesma maneira executada para as vigas, comparou-se dimensionamentos executados manualmente e pelo Robot. As armaduras do Robot são executadas por segmento construído, portanto, o pilar 1 foi executado em duas partes (térreo ao 1º andar e do 1º andar ao 2º andar).

O resultado para o pilar 1 de ambas as partes do Robot (Figura 5.50 e Figura 5.51) foi muito parecido com o cálculo efetuado manualmente (Figura 5.52).

Tabela 5.10 – Diferença entre as armaduras necessárias do pilar P1.

Armaduras necessárias pilar P1 (cm ²)			
Parte 1			
Metódo	Manual (cm ²)	Robot (cm ²)	Diferença (%)
Resultados	2,91	3,12	6,73%
Parte 2			
Metódo	Manual (cm ²)	Robot (cm ²)	Diferença (%)
Resultados	2,42	1,94	19,83%

A diferença entre os métodos quando a força normal não é muito elevada, e ω está muito próximo de zero, chega a ser irrisória, conforme indica a Tabela 5.10. Na primeira parte, a diferença entre as armaduras deve-se provavelmente pelo fato de o Robot considerar a excentricidade acidental e o cálculo manual não ter considerado, o erro humano possível ao se usar o ábaco e a metodologia de cálculo da armadura necessária do Robot que leva em consideração o valor de η como padronizado no *code parameters*. Na segunda parte do pilar, a diferença das armaduras se dá na última parte do cálculo da armação e no uso do ábaco. Os momentos e força normal finais, utilizadas para o dimensionamento, são praticamente iguais em ambos os métodos, e, por isso, esta vem da última parte como citado.

Em ambas as partes, apesar do cálculo manual resultar em excentricidade de segunda ordem para a direção y, a mesma não influencia no resultado. Este fato acontece, pois, o efeito das excentricidades

somadas ao momento intermediário de qualquer uma das combinações não ultrapassa o momento de extremidade da COMB 22.

O fato de o Robot considerar excentricidade acidental e o cálculo manual não, acontece, pois, o REBAP só considera as excentricidades quando os efeitos de segunda ordem ocorrem. No caso de o momento central do pilar ser desconsiderado por ser menor que os das extremidades, a excentricidade acidental no REBAP também é desconsiderada. No EC2 isto não acontece, uma vez que a excentricidade acidental mínima e outras são consideradas no momento de primeira ordem.

Por ambos terem resultado na armadura mínima, o diâmetro e o número de barras deram iguais para os dois dimensionamentos. Os espaçamentos das cintas e arranque na transição entre a primeira e segunda parte do pilar foram calculados corretamente pelo Robot. Os comprimentos dos locais de espaçamentos das cintas reduzidas foram calculados de forma equivocada, porém, os valores obtidos pelo Robot são maiores do que o mínimo imposto pelo EC2, e, portanto, não estão errados, mas somente superarmados. O valor de 48 cm pode ser reduzido para 30 cm em todos os locais, exceto o trecho pós-fundação, que deveria ser aumentado para o valor de duas vezes a maior dimensão do pilar, e a primeira cinta colocada dentro da fundação. Como a fundação não foi modelada no Robot, o programa adotou o valor padrão para o comprimento, onde as cintas devem ter espaçamento reduzido. Apesar das diferenças no comprimento dos espaçamentos reduzidos, a armação do Robot para este pilar é muito satisfatória e os erros são irrisórios.

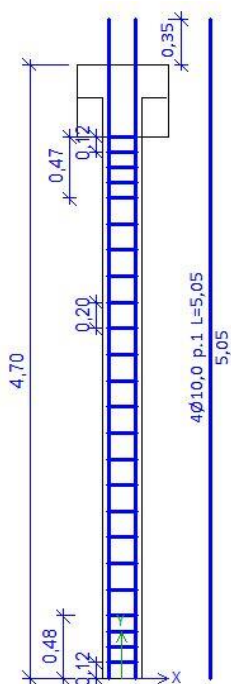


Figura 5.50 – Armação Robot P1, do térreo ao 1º andar.

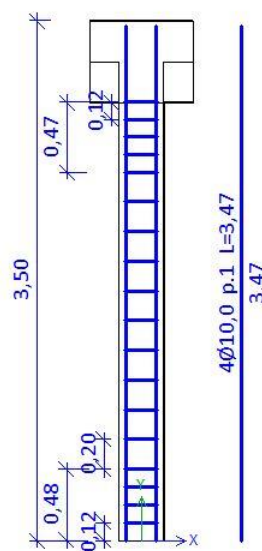


Figura 5.51 – Armação Robot P1, do 1º andar ao 2º andar.

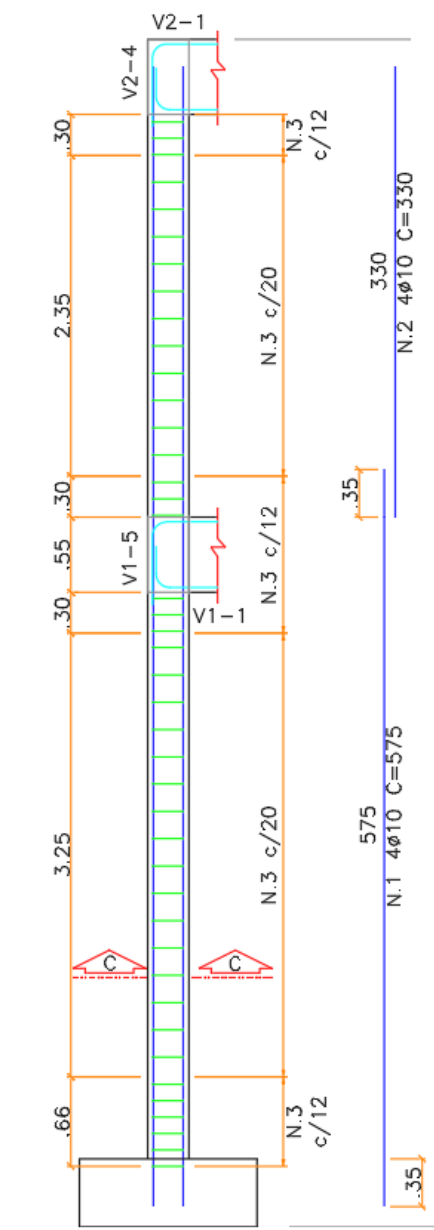


Figura 5.52 – Armação P1 pela metodologia manual (Anexo D).

5.7.2 Pilar 9

O pilar 9 tem algumas características diferentes dos dois outros pilares. Os esforços neste são maiores por ser um pilar de centro e não de canto. No segundo andar, por causa da laje fungiforme, os travamentos são menos efetivos que nos outros.

A comparação entre as armaduras necessárias se encontra na Tabela 5.11. As Figuras 5.53 a 5.55 representam o cálculo das armaduras fornecidas pelo Robot, e a Figura 5.56 a armadura fornecida do cálculo manual.

Tabela 5.11 – Diferença entre as armaduras necessárias do pilar P9.

Armaduras necessárias pilar P9 (cm ²)			
Parte 1			
Metódo	Manual (cm ²)	Robot (cm ²)	Diferença (%)
Resultados	8,67	14,44	39,96%
Parte 2			
Metódo	Manual (cm ²)	Robot (cm ²)	Diferença (%)
Resultados	2,51	2,51	0,00%
Parte 3			
Metódo	Manual (cm ²)	Robot (cm ²)	Diferença (%)
Resultados	2,51	2,51	0,00%

O primeiro trecho calculado tem uma diferença muito grande entre as armaduras necessárias dos dois métodos. Para entender a causa dessas diferenças, pesquisou-se sobre comparações entre REBAP e EC2. Essas foram base para construção do texto do Anexo B, que descreve as diferenças entre os métodos, sendo as principais quando há efeito de segunda ordem no pilar, pois com isso todas as excentricidades entram no dimensionamento do REBAP, e no cálculo pelo REBAP pode ocorrer uma redução a partir do cálculo da variável ε (η no REBAP).

Por meio do Anexo C pode-se notar, comparando com o cálculo manual, que a diferença de armadura se dá pela consideração de ε no cálculo do efeito de segunda ordem e pela diferença no método de cálculo de λ_{lim} entre as duas metodologias (ver tabelas do cálculo manual citadas para verificar ε). A primeira causa, o fator ε , faz com que no cálculo manual a excentricidade de segunda ordem tenha uma redução de aproximadamente 0,02 m. Mesmo que no REBAP o valor da excentricidade acidental seja superior à do Robot em 0,70 cm, a soma dessas acidentais com as de segunda ordem no Robot é superior à soma do cálculo manual. Ou seja, a diferença entre as excentricidades de segunda ordem é maior que a diferença entre as acidentais. Essa diferença de excentricidades resulta em um momento final 23,35 kN.m menor no cálculo manual que no Robot.

A segunda causa é referente a esbeltez limite do eixo z no cálculo manual. Devido a λ_{lim} não há efeito de segunda ordem no cálculo manual, já no cálculo pelo Robot o efeito de segunda ordem é considerado também nessa direção, aumentando o momento de 3,99 kN.m para 39,57 kN.m. A soma dessas duas causas faz com que esta diferença entre armaduras aconteça.

As outras partes dos pilares resultaram em armadura mínima de 2,51 cm² para ambos os métodos. Apesar das diferenças de λ_{lim} e de atuação ou não dos efeitos de segunda ordem, o resultado não foi afetado, sendo os momentos e força normal finais quase iguais em ambos os métodos.

A distribuição das armaduras nos pilares teve diferença em todos os trechos para o número de varões escolhidos na armação. No primeiro trecho, pelo fato da armadura necessária ter dado maior, o dimensionamento do Robot resultou em 14 ϕ 12, e o no cálculo manual resultou em 8 ϕ 12. Com isso, os espaçamentos entre os varões longitudinais variaram, e todos os parâmetros dependentes da quantidade de barras na seção.

Nos outros trechos, a armadura necessária foi a mesma. Porém, é indicado no anexo nacional que se arme um pilar redondo com seis varões ao invés do mínimo de quatro. Essa observação do anexo nacional é apenas indicativa, portanto, a armadura gerada pelo Robot não está equivocada somente abaixo do indicado.

Todos os espaçamentos de cintas, comprimentos de ancoragens e arranques estão corretos. No caso do pilar 9, até mesmo o comprimento do espaçamento reduzido está certo para quase todo o pilar. A exceção é a zona pós-fundação, que deveria ter 80cm e não 48cm. Novamente pelo fato de as fundações não terem sido dimensionadas no Robot, este erro não pode ser considerado.

5.7.3 Pilar 15

A comparação entre as armaduras necessárias pode ser feita por meio da Tabela 5.12. Para a primeira parte do pilar existe algumas diferenças entre os cálculos, sendo elas a excentricidade de segunda ordem no eixo y do cálculo manual, que contribui a um aumento significativo de M_z e de excentricidades de primeira ordem no cálculo do Robot para ambos os eixos (não só para um eixo, como o cálculo manual). As outras partes do pilar 15, apesar de se ter efeito de segunda ordem no cálculo manual, as excentricidades não influenciam no resultado, pois são superadas pelos momentos de extremidade. Acontece, portanto, a mesma coisa citada no pilar 1, em que as excentricidades são ignoradas (diferenças de armaduras com as mesmas causas do P1)

Tabela 5.12 – Diferença entre as armaduras necessárias do pilar P15.

Armaduras necessárias pilar P15 (cm ²)			
Parte 1			
Metódo	Manual (cm ²)	Robot (cm ²)	Diferença (%)
Resultados	1,8	1,80	0,00%
Parte 2			
Metódo	Manual (cm ²)	Robot (cm ²)	Diferença (%)
Resultados	4,24	4,44	4,50%
Parte 3			
Metódo	Manual (cm ²)	Robot (cm ²)	Diferença (%)
Resultados	5,98	6,26	4,47%

No geral, o cálculo do pilar 15 pelo Robot e manualmente não deram diferenças nas armaduras principais. As diferenças entre os dois dimensionamentos para esse pilar ocorreram, na parte da escolha na distribuição da armadura. A primeira decisão tomada no detalhamento foi padronizar a armação do pilar de cima a baixo com 8Ø10 mm. Não é comum ver pilares com armadura superior maior que a inferior, devido ao fato dos pilares serem geralmente armados para a força normal, porém, com a atuação dos momentos nos pilares (devido a vento ou quaisquer outras forças) este fato tornou-se mais comum. A variação da armação no pilar gera variação de rigidez e deixa a base desse fragilizada, suscetível ao sismo ou, caso ocorra uma excentricidade maior que a prevista, há momentos de maior ordem devido ao valor

alto da força normal. Por isso, a padronização da armação pode evitar alguns problemas durante a vida útil do pilar. Outra opção escolhida foi emendar as barras no meio do vão do pilar. Segundo o Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1-1, 2010), as emendas em nós podem enfraquecer a rigidez do pilar naquele ponto, tornando-o mais suscetível a ruptura. Sempre a viga deve ter rigidez menor que o pilar, expressando o conceito viga fraca e pilar forte defendido pelo Eurocódigo 8.

Como o estudo de caso não foi calculado para sismos, a opção de distribuição construtiva para tal não precisava ser atendida. O pilar 1 foi disposto sem atender essas premissas para poder se comparar com o pilar 15. Caso tivesse sido considerado o dimensionamento sísmico, todas as recomendações do Eurocódigo 8 deveriam ser verificadas na distribuição de armaduras do Robot.

Pelo fato de a junção das barras terem sido no meio do vão, calculou-se como emendas, e não como arranque do pilar. Por isso, o resultado de 0,52 m e não de 0,35 m. O método construtivo para este tipo de distribuição é mais complicado e pode gerar dificuldades na obra. As figuras 5.57 a 5.59 representam a armação do Robot e a Figura 5.60 o detalhamento do dimensionamento manual.

No restante das comparações, as diferenças encontradas foram as mesmas do pilar 1.

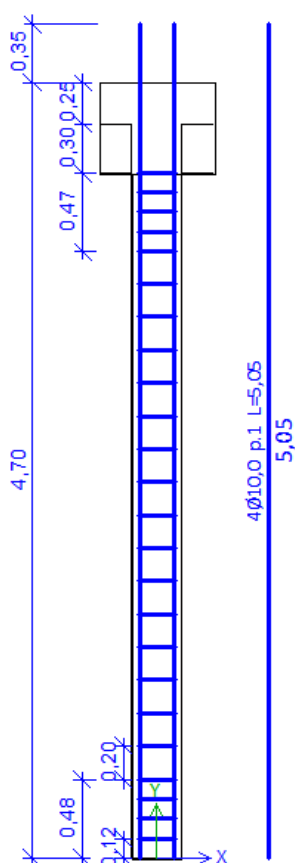


Figura 5.57 – Armação Robot P15, do térreo ao 1º andar.

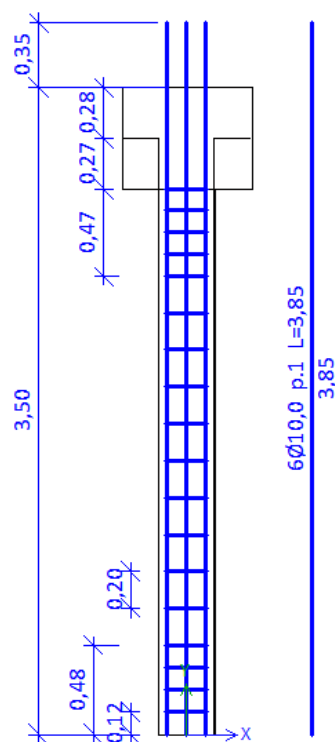


Figura 5.58 – Armação Robot P15, do 1º ao 2º andar.

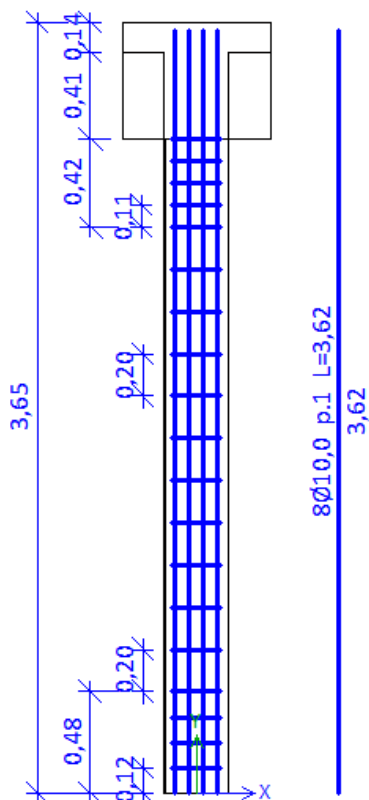


Figura 5.59 – Armação Robot P15, do térreo ao 2º ao 3º andar.

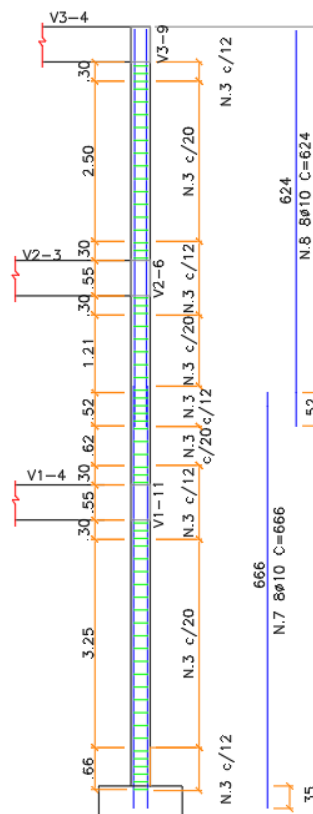


Figura 5.60 – Armação Robot P15, do 1º ao 2º andar.

5.7.4 Observações finais

O cálculo do pilar pelo *software* Robot mostrou-se, com as comparações, confiável. As diferenças de dimensionamento, ao contrário das vigas, são opções construtivas que não alteram na resistência dos elementos estruturais. O único caso que resultou em divergências, teve sua variância de armaduras principalmente pelo fato de serem duas bases de normas diferentes. O cálculo em si do EC2 está correto e, portanto, aprovado.

Praticamente, só com as configurações mostradas no Capítulo 5.4, o Robot dimensiona sozinho pilares com baixo índice de erros. Alguns pontos, como as excentricidades, limite de esbeltez e o cálculo do fator de correção do comprimento efetivo do vão, são muito divergentes em ambas as normas, afetando diretamente os resultados do dimensionamento.

6 EXPORTAÇÃO PARA O REVIT E CORREÇÕES POR *PLUG-IN*

6.1 INTRODUÇÃO

Os procedimentos de dimensionamento e comparação de resultados executados no Capítulo 5 foram estendidos a todas as vigas e todos os pilares. As armaduras dimensionadas no Robot foram exportadas para o Revit a partir do *plug-in Structural Analysis Toolkit*, pertencente a extensão SDK do Revit. As lajes e paredes não têm aplicação disponível ainda para exportação do Robot para o Revit. Após as exportações, por meio dos dados das vigas e da materialização 3D das armaduras no projeto, foram feitas observações sobre a aplicação BIM no projeto estudado.

6.2 EXPORTAÇÃO DAS VIGAS

A exportação das vigas foi de certa forma linear, porém, alguns problemas na troca de dados entre os dois *softwares* ainda ocorrem com certa frequência. Pelo fato dos dois arquivos, tanto o Robot como o Revit, estarem muito pesados, por diversas vezes o computador não aguentou processar todas informações ao mesmo tempo e foi necessário fechar os *softwares*. Outras muitas vezes a exportação da armadura teve que ser repetida, pois era colocada totalmente fora das coordenadas de localização da armação. As vigas com maior dificuldade de exportação foram aquelas que tinham variação de seção, a exemplo as vigas V1-6, V1-8 e V3-6.

Por causa dessa dificuldade na exportação, optou-se por padronizar o maior tamanho para toda a viga. Essa padronização foi feita por meio de um aplicativo chamado *Merge* (DB, 2018), que junta vigas diferentes com a maior dimensão de uma delas. Preferiu-se utilizar esse aplicativo do que apagar a viga e refazer, visto que refazer as vigas pode gerar problemas geométricos se não feito com atenção. Em uma das tentativas de recolocar a viga por outra, a dimensão das armaduras ficou um pouco menor do que era esperado. É possível alterar essas dimensões pelo Robot, mas seguramente utilizar o aplicativo é mais vantajoso e causa menos problemas na troca de dados. Além de padronizar as vigas que variavam, a viga V1-10 não passou na resistência à flexão, e sua base foi aumentada de 35 cm para 40 cm.

Ao se exportar as armaduras, no final do processo algumas vezes o Revit pode dar avisos como *rebar is placed completely outside of its host*. As armaduras que supostamente estão fora do seu local correto

devem ser verificadas comparando os posicionamentos no Robot com resultados do Revit. Para ilustrar melhor a ocorrência deste erro, foram executadas duas armaduras do projeto de forma incorreta. A primeira transferência das armaduras resultou na Figura 6.1 e Figura 6.2. No primeiro exemplo, a armação saiu por completo da viga, sendo muito fácil de perceber o porquê do aviso dado pelo Revit. Já no segundo erro, apesar de também ser bem perceptível, mostra a armação da viga V1-8 dentro da viga, localizada de forma correta verticalmente, porém, de forma incorreta horizontalmente.

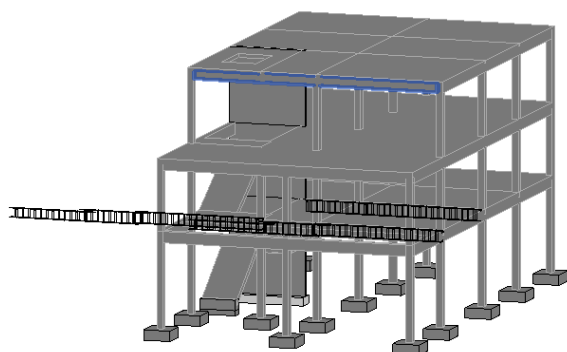


Figura 6.1 – Erro na transferência de dados da armadura para viga V1-6.

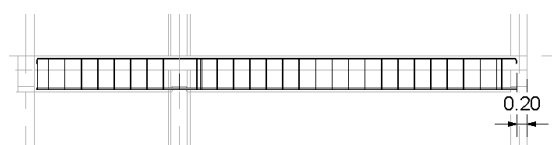


Figura 6.2 – Erro na transferência de dados da armadura para viga V1-8.

Após superar os problemas citados, completou-se a transferência das armaduras para o Revit conforme mostra a Figura 6.3. As vigas que foram alteradas de tamanho no Robot são automaticamente modificadas quando se executa a exportação das barras e do modelo do Robot.

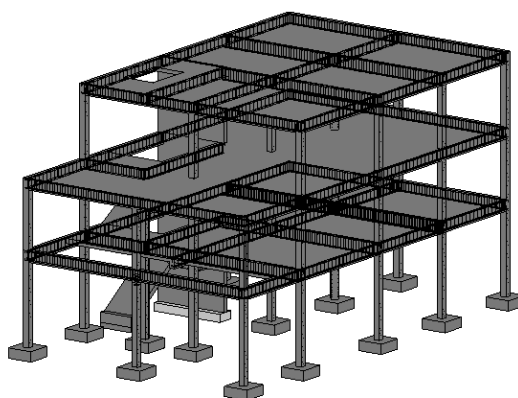


Figura 6.3 – Exportação do Robot para o Revit das vigas completas.

Antes de entrar no âmbito da utilização dos dados que essas armaduras trazem consigo, foram feitas algumas observações sobre as próprias armaduras calculadas no Robot. A utilização de *softwares* 3D, capazes de modelarem armaduras, trazem uma vantagem grande comparado aos *softwares* 2D, a verificação da execução das armaduras calculadas.

Segundo Mayr (2000), a maioria dos problemas de projeto são geralmente por não se imaginar na hora do cálculo como aquilo será construído. Mesmo sendo de 2000, a tese é assunto atual, abordado por outros artigos como o de Correia et al. (2017), que discorre sobre a mesma falta de comunicação, presente até hoje nos projetos de estruturas. A utilização de estruturas em 3D pode quebrar esse paradigma, pois com essa tecnologia é possível que o projetista navegue pela estrutura, notando pontos que na execução da obra podem ser problemáticos e os evitando. Os nós entre vigas e pilares são pontos sempre de maior atenção que, com a armadura em 3D são melhores compreendidos e corrigidos. No dimensionamento em 2D se o projetista não se atenta a esses nós, pode acontecer que na obra sua execução não seja possível. A Figura 6.4 e Figura 6.5 demonstram o resultado nos encontros das vigas.

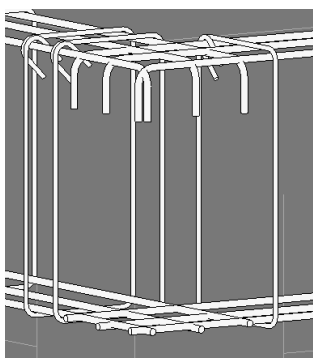


Figura 6.4 – Encontro das armaduras das vigas V2-3 e V2-4.

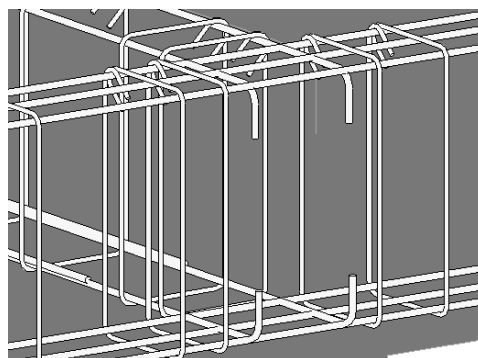


Figura 6.5 – Encontro das armaduras das vigas V3-3 e V3-9.

Apesar das armaduras estarem sobrepostas e não em diferentes níveis como será executado em obra, é possível notar que a quantidade de armação para o local é exequível em obra. Ainda se observa que são necessárias correções nos ganchos e emendas das vigas, pois foram dimensionados de maneira equivocada pelo Robot. O intuito da metodologia de criação do *plug-in* e de encontrar os erros recorrentes do Robot e corrigir de maneira automática por meio de um *plug-in* dentro do Robot ou do Revit.

6.3 EXPORTAÇÃO DOS PILARES

A exportação das armaduras dos pilares para o Revit (Figura 6.6) é praticamente perfeita para o estudo de caso em questão, que tem uma estrutura simples. Não houve durante o processo nenhum erro na troca de dados e todas as armaduras foram posicionadas corretamente no *software*. O único problema que foi citado para as vigas, e que também se aplica aos pilares, é a lentidão no uso dos diversos *softwares* em paralelo. Os problemas citados no dimensionamento do Robot dos pilares, também são irrisórios, o que, portanto, configura que os pilares estariam prontos para fase de documentação.

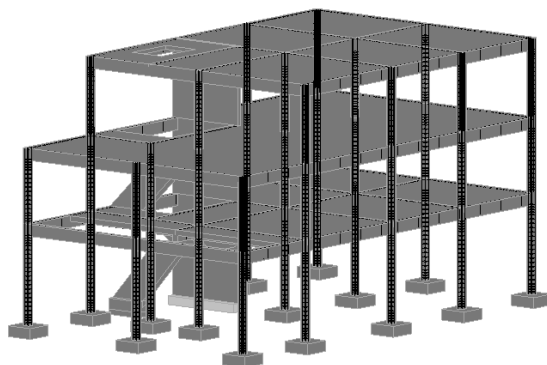


Figura 6.6 – Pilares importados do Robot.

A Figura 6.4 e a Figura 6.5 mostram a armadura dos nós, de pórticos sem as armaduras dos pilares. A avaliação desses mesmos nós é refeita por meio da Figura 6.7 e da Figura 6.8, com a armação dos pilares. O pilar, estando incluso, gera alguma dificuldade na obra para armar tudo no mesmo lugar. Novamente, os espaçamentos existentes são suficientes para todas as barras presentes, mas o mais correto é que esta ligação estivesse detalhada de tal maneira que fosse de fácil entendimento sua construção e o entrelaçamentos entre essas barras. O Robot, portanto, não tem uma percepção dos elementos juntos. A armação é executada de maneira separada para cada elemento, deixando os encontros entre essas armaduras com falhas de detalhamento e possível falha de entendimento em obra na hora da execução.

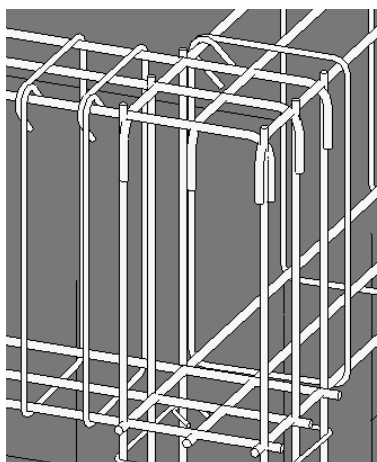


Figura 6.7 – Nós do pórtico entre as vigas V2-3 e V2-4 e o pilar P11

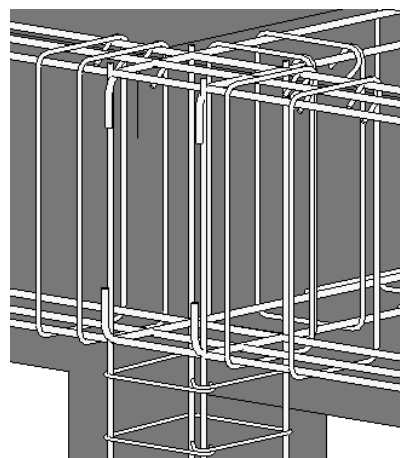


Figura 6.8 – Nós do pórtico entre as vigas V3-3 e V3-9 e o pilar P10.

6.4 VANTAGENS, PROBLEMAS E CONCLUSÕES SOBRE A EXPORTAÇÃO

Os arquivos, por serem muito pesados, trabalham com uma lentidão um pouco acima do normal para a agilidade que se espera da utilização da ferramenta BIM. O computador utilizado para os cálculos e modelagem, apesar de não ser de ponta (processador Intel Core i7 com placa de vídeo NVIDIA GEFORCE

920M e 8GB de memória), é consideravelmente potente para aguentar os programas. Mesmo assim, o processo para uma estrutura simples, como a analisada, demorou alguns dias para se conseguir dimensionar e exportar todas as armaduras sem erros. Nota-se, portanto, que com a metodologia BIM, a necessidade de atualização das máquinas e *softwares* utilizados pelas empresas vem em conjunto. Para manter o processo agilizado, é de extrema importância ter máquinas capazes de aguentar tais *softwares*, aumentando a dependência dessas de qualidade para os escritórios.

A troca de dados entre os dois *softwares* é boa, porém ainda acontecem erros nesta transferência de dados que para uma estrutura simples como a analisada não deveriam ocorrer. A armadura das vigas é muito mais problemática para transferência do que a dos pilares. O número de vezes que ocorreram erros por barras estarem fora do lugar, ou o *software* fechar por incapacidade de processamento foram elevados. Observando os erros mais frequentes pode-se dizer que o envio dos dados das armaduras não é o problema, o maior problema é a localização das armaduras. O Revit muitas vezes não consegue interpretar onde as armaduras estão localizadas no Robot e como elas devem ser distribuídas dentro do seu modelo.

Somado a tudo isso, a importação de lajes e paredes ainda não é possível. Este fato é sem dúvida um dos maiores problemas a serem solucionados por estes *softwares*. A armação das lajes no Robot, além de não ser exportada, precisa de muitos ajustes. A distribuição das armaduras em lajes é pior que das vigas e pilares.

A opção de atualização de modelagem do Robot para o Revit acontece sem maiores problemas (como por exemplo modificar tamanho de pilares e vigas no Robot atualizar no modelo do Revit).

Pode-se dizer que, no geral, para modelos simples, a integração entre Revit e Robot é intermediária, mas para modelos mais complexos, como os citados nas teses do Capítulo 2, ocorrem muitos erros entre esta troca de dados.

6.5 PLUG-IN

O Capítulo 5 retrata os problemas no dimensionamento executado pelo Robot. A correção de maneira manual de todos esses problemas encontrados nas armações, gera um retrabalho dos detalhamentos, aumentando as horas necessárias para um projeto utilizando a ferramenta BIM, fugindo do pretexto de automatização e agilização dos processos envolvendo BIM.

No Capítulo 2.4 são citadas situações em que *plug-ins* podem ser aplicados. Uma destas é a programação de rotinas frequentes de trabalho. As correções das armaduras são rotinas em que o usuário teria que editar cada barra, uma por uma, consertando o diâmetro das dobras e os comprimentos retos após as dobras (ganchos) e as emendas.

Os problemas apresentados foram principalmente nas armaduras das lajes e vigas. Como as lajes não conseguem ser exportadas do Robot para o Revit² (local de aplicação dos *plug-ins* estudados), as armaduras dos elementos escolhidos para correção por *plug-in* foram as das vigas. Dentro dessas existe três erros recorrentes que foram mapeados no Capítulo 5, sendo eles os citados nas rotinas de trabalho acima. Entre esses três problemas se escolheu um deles para criar um *plug-in* modelo, que apresentará o funcionamento dos *softwares* base da programação, os conhecimentos que devem ser adquiridos para a execução de um *plug-in* e o funcionamento de um *plug-in* dentro do Revit.

6.5.1 *Plug-in* para modificar o diâmetro das dobras das armaduras

Utilizando as ferramentas citadas no Capítulo 2.4 e algumas outras, programou-se o *plug-in* para modificação do diâmetro das dobras das vigas. Os primeiros passos para a programação são instalar os *softwares* necessários como o Visual Studio, a extensão disponível no próprio instalador do Revit o SDK, baixar o *template* de modelo para programação na versão do Revit em utilização e baixar o aplicativo *RevitLookup*.

No Capítulo 2.4, foram citadas as etapas de inserção das bibliotecas do Revit e execução dos manifestos. Os *templates* do Revit citados acima são programações feitas e disponibilizadas pelo Jeremy Tammik (2012), um parceiro desenvolvedor de APIs e serviços *Web* da Autodesk, que executam as inserções e as configurações dos manifesto e das bibliotecas automaticamente. A execução do manifesto pelo *template* faz com que não seja necessário inserir o arquivo dentro das pastas citadas no Capítulo 2.4. O *download* do *template* pode ser executado no site da bibliografia Tammik (2012) e deve ser referente à versão do Revit utilizado no projeto, em formato zip, e ser inserido neste formato dentro da pasta [Documentos]\Visual Studio 20XX\ProjectTemplates\Visual C#. Com isso, ao iniciar o Visual Studio, além dos *templates* usuais como o *Class Library template*, haverá um novo *template* Revit20XXAddin que poderá ser utilizado.

O aplicativo *RevitLookup* também é fornecido por Jeremy e tem a funcionalidade de exploração do banco de dados interativo do Revit para visualizar e navegar nas propriedades dos elementos modelados. A utilização deste aplicativo foi necessária para identificar os nomes dos parâmetros procurados a serem empregados em alguns pontos da programação.

Antes de começar a programar o *plug-in*, foi elaborada a lógica do *plug-in* por meio de um fluxograma, indicando as etapas a serem executadas para se chegar no resultado esperado. A Figura 6.9 representa o fluxograma do *plug-in*, sendo as geometrias quadradas referentes aos processos; os trapézios retângulos

² A exportação do Robot para o Revit pode ser solucionada, também, através de *plug-ins* com alto grau de dificuldade.

às entradas manuais; o cilindro à base de dados; a geometria de início e fim do *plug-in* referente a exterminador e a geometria restante referente aos Displays.

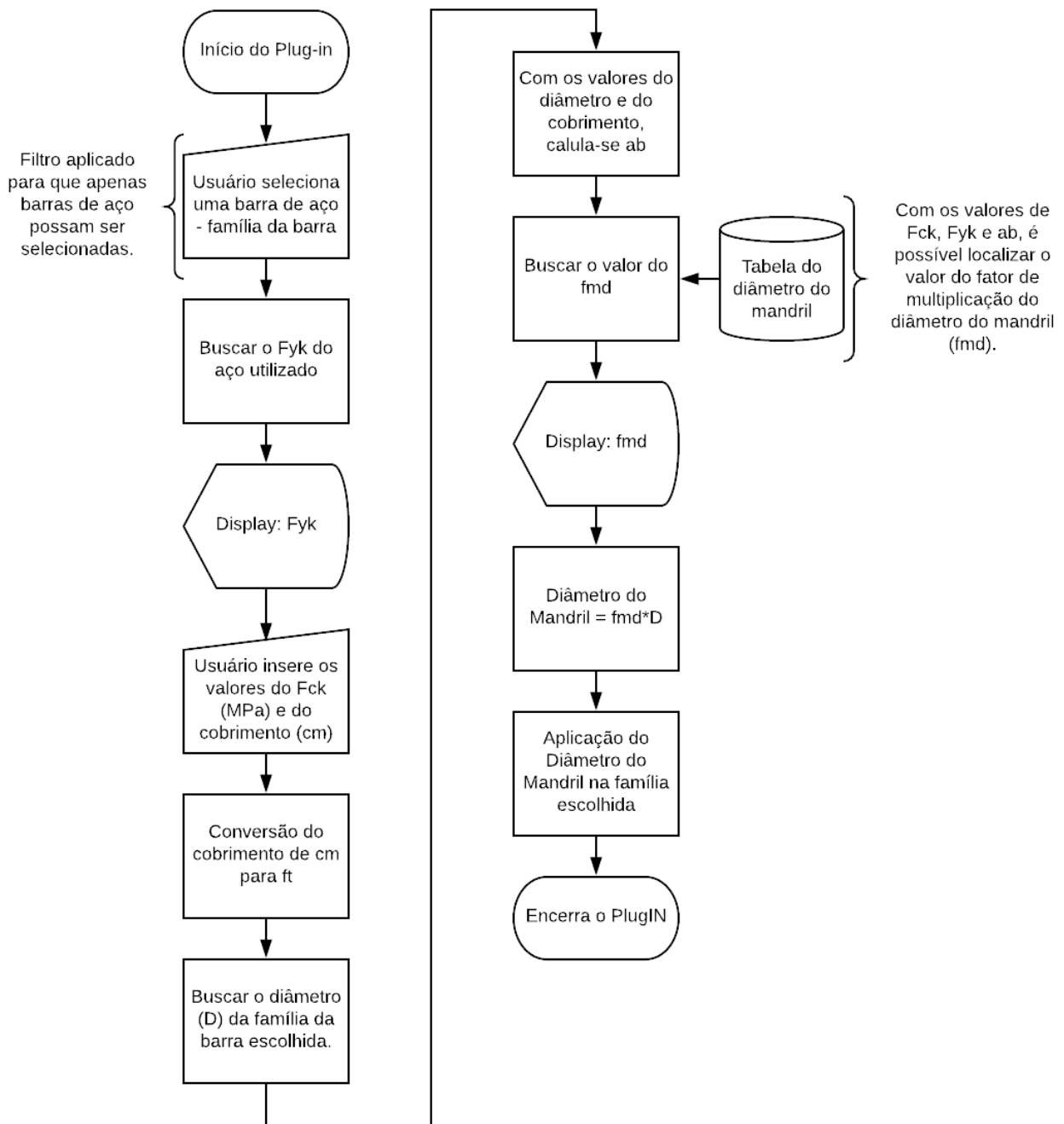


Figura 6.9 – Fluxograma da lógica do *Plug-in*.

A primeira etapa a ser analisada é o início do *Plug-in*, que é referente as linhas de código da Figura 6.10.

```

1 #region Namespaces
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.Linq;
4 using Autodesk.Revit.ApplicationServices;
5 using Autodesk.Revit.Attributes;
6 using Autodesk.Revit.DB;
7 using Autodesk.Revit.DB.Structure;
8 using Autodesk.Revit.UI;
9 using Autodesk.Revit.UI.Selection;
10 #endregion
11
12 namespace RevitAddinRebar
13 {
14     [Transaction(TransactionMode.Manual)]
15     public class Command : IExternalCommand
16     {
17         public Result Execute(
18             ExternalCommandData commandData,
19             ref string message,
20             ElementSet elements)
21         {
22             UIApplication uiapp = commandData.Application;
23             UIDocument uidoc = uiapp.ActiveUIDocument;
24             Application app = uiapp.Application;
25             Document doc = uidoc.Document;

```

Figura 6.10 – Etapa início do *Plug-in*

As primeiras linhas da programação são referentes a inserção das bibliotecas que serão utilizadas no programa. Dentro da *namespace* (conjunto de classes), pode-se criar as classes que serão usadas no código. A primeira classe criada utiliza a interface *IExternalCommand* que faz com que dentro do Revit se inicie a execução do programa. A execução do programa é acionada pelo método *Execute*, composto pelos parâmetros *commandData*, *message* e *elements*. O *commandData* é responsável por fornecer acesso aos dados do Revit, o *message* pelos avisos em caso de falha ou erro da programação e o *elements* permite escolher elementos que serão destacados caso ocorra falha ou cancelamento do *plug-in*.

Por meio da igualdade *UIApplication.uiapp = commandData.Application* é possível acessar pelo parâmetro *commandData* as propriedades do Revit que são salvas dentro do variável contêiner *uiApp* do tipo *UIApplication*. Na segunda igualdade, utilizando a variável *uiApp* que fornece acesso ao documento ativo na interface por meio do *ActiveUIDocument*, é possível armazenar propriedades desse documento ativo na variável *uidoc* do tipo *UIDocument*. Os objetos da classe *Document* e *Application* são salvos nas equações três e quatro nas variáveis *app* e *doc*, respectivamente, e representam os parâmetros de dentro do projeto escolhido que podem ser utilizados no *plug-in*.

A segunda etapa é composta pela seleção do varão, a terceira pela busca da característica resistência ao escoamento do aço (*fyk*) e a quarta pelo *display* com o resultado encontrado do *fyk*. A Figura 6.11 mostra a programação para efetuar todas essas etapas.

```

27      //****Criar um objeto o usuário clicar na Rebar.****//
28
29      Reference rebarReference = uidoc.Selection.PickObject
        (ObjectType.Element,
30         new RebarSelectionFilter(), "Selecione o vergalhão!");
31      Rebar barraEscolhida = doc.GetElement(rebarReference) as Rebar;
32
33      //****Fyk do Vergalhão****//
34
35      string nomeVergalhao = barraEscolhida.Name;
36      double vergalhaoFyk = 0;
37      if (nomeVergalhao.Contains("500"))
38      {
39          vergalhaoFyk = 500;
40      }
41      else if (nomeVergalhao.Contains("600"))
42      {
43          vergalhaoFyk = 600;
44      }
45      else
46      {
47          vergalhaoFyk = 400;
48      }
49
50      TaskDialog.Show("Fyk do Vergalhão (MPa)", vergalhaoFyk.ToString
        ());

```

Figura 6.11 – Etapas desde a seleção da barra até resultado fyk no display.

A seleção da barra de aço funciona por meio da classe *Selection* do documento ativo, utilizando o método *PickObject* que tem como parâmetros o tipo de objeto a ser selecionado e o filtro aplicado a esse objeto (Figura 6.12). O objeto selecionado é, então, salvo na variável *rebarReference* da classe *Reference* (responsável por referenciar um objeto do modelo Revit). A última linha da seleção é a utilização do método *GetElement*, da classe *Document*, para selecionar fisicamente no Revit a barra referenciada nas linhas anteriores, salvando-a na variável *barraEscolhida* da classe *Rebar*.

O filtro aplicado trabalha em cima de apenas liberar a seleção de objetos cujo nome contenha *Structural Rebar*. O filtro foi criado em uma classe separada que foi chamada *RebarSelectionFilter*. Esta classe pode ser utilizada em outra, assim como uma função.

```

108      //Filtro para seleção de barras
109      public class RebarSelectionFilter : ISelectionFilter
110      {
111          public bool AllowElement(Element element)
112          {
113              if (element.Category.Name == "Structural Rebar")
114              {
115                  return true;
116              }
117              return false;
118          }
119
120          public bool AllowReference(Reference refer, XYZ point)
121          {
122              return false;
123          }
124      }

```

Figura 6.12 – Filtro aplicado na barra

Depois da seleção do varão ocorre a etapa três, em que o programa busca o fyk do aço. As linhas 35 e 36 são apenas para criação de duas variáveis, sendo uma *string* (composta só por letras) e outra *double* (composta de números). A linha 35 da etapa três, salva na variável nomeVergalhao, a propriedade do nome do elemento escolhido barraEscolhida; a linha 36 é apenas a criação de uma variável vergalhãoFyk, utilizada para salvar a resistência de escoamento do aço (ela é igualada a zero apenas para conter um valor inicial).

As linhas seguintes desta etapa representam a verificação de que se no nome do elemento barraEscolhida for encontrado o valor 500, então o valor salvo em vergalhãoFyk será igualado a 500. Porém, se for encontrado 600 o valor salvo em vergalhãoFyk será 600, e se não for reconhecido o valor salvo será 400. A última linha da Figura 6.11 representa a quarta etapa, que utilizando o método *Show* da classe *TaskDialog* mostra em display o valor da variável vergalhãoFyk. Por ser uma variável *double*, para poder ser utilizada pelo método *Show* deve-se converter de *double* para *string*, por isso é necessário colocar a variável e o método de conversão *ToString*.

A quinta e sexta etapa do *plug-in* (Figura 6.13) funcionam por meio de uma janela de inserção de dados para o fck e o cobrimento dos elementos em análise. A linha 56 é a criação desta janela (*form*). O *form* criado gera uma outra aba ao lado da aba da programação, em que é possível alterar o design do *form* por meio das opções fornecidas pela caixa de ferramentas desse. A esse respeito, a Figura 6.14 demonstra o resultado final do *form* após a inserção de duas caixas de textos, um botão e dois *labels*. O botão tem a particularidade de ter que ser programado, para que ao ser pressionado recolha as informações inseridas nas caixas de texto. Sua programação segue na Figura 6.15.

```

52      //****Fck do elemento estrutural****//
53      double fckViga=0;
54      double cobrimento=0;
55
56      Form1 form = new Form1();
57      if(form.ShowDialog() == System.Windows.Forms.DialogResult.OK)
58      {
59          fckViga = form.GetFckValue();
60          //Transformar em pés
61          cobrimento = form.GetCobrimento()* 0.0328084;
62      }

```

Figura 6.13 – Quinta e sexta etapa do *plug-in*.

Figura 6.14 – Form da quinta e sexta etapa.

```

1 using System;
2 using System.Windows.Forms;
3
4 namespace RevitAddinRebar
5 {
6     public partial class Form1 : Form
7     {
8         public Form1()
9         {
10             InitializeComponent();
11         }
12
13         private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
14         {
15             this.DialogResult = DialogResult.OK;
16         }
17         public double GetFckValue()
18         {
19             return Convert.ToDouble(textBox1.Text);
20         }
21
22         public double GetCobramento()
23         {
24             return Convert.ToDouble(textBox2.Text);
25         }
26
27         private void label1_Click(object sender, EventArgs e)
28         {
29
30         }
31     }
32 }

```

Figura 6.15 – Programação do botão.

Como citado, a programação do botão apenas pega o valor inserido nas caixas de texto e transforma em variáveis *Double*. Essa coleta dos valores é executada por meio dos métodos *GetFckValue* e *GetCobramento*.

Nas linhas 57 a 62, a programação da quinta e sexta etapa escreve uma condicionante, em que se o botão OK for pressionado na janela gerada, os valores da variável *form* coletados pelos métodos citados são salvos nas variáveis *fckViga* e *cobramento* (variáveis criadas da mesma maneira descrita das variáveis das linhas 35 e 36.). A sexta etapa é o processo de converter o cobramento, que é inserido em centímetros, para pés. O Revit é um *software* americano que, portanto, trabalha com sistema de unidades americano. Se o valor do cobramento não for convertido, o resultado de *ab* sairia equivocado, pois o diâmetro estaria em pés e o cobramento em centímetros.

Para calcular *ab* é necessário saber o valor do diâmetro da família da barra, que é um parâmetro da barra. O uso do aplicativo *RevitLookup* é importante para poder se pesquisar os nomes dos parâmetros do Revit. A utilização do aplicativo é simples: basta escolher o elemento que o usuário gostaria de visualizar no banco de dados e escolher a opção *Snoop Current Selection*. Pela janela aberta no programa tem-se acesso aos dados dos métodos e propriedades do elemento selecionado.

```

63      //****Cálculo do ab****//
64      Parameter builtInDiameter = barraEscolhida.get_Parameter
        (BuiltInParameter.REBAR_BAR_DIAMETER);
65      double diameter = builtInDiameter.AsDouble();
66
67      double calculo_ab = (cobrimento + diameter/2);
68      calculo_ab = calculo_ab / diameter;
69
70      if (calculo_ab < 4)
71      {
72          calculo_ab = 2.0;
73      }
74
75      else if (calculo_ab < 8)
76      {
77          calculo_ab = 4.0;
78      }
79      else
80      {
81          calculo_ab = 8.0;
82      }
    
```

Figura 6.16 – Etapas sete e oito do *plug-in*.

O diâmetro da barra é um parâmetro e, por isso, está dentro da opção *GetOrderedParameters*, que mostra os parâmetros da barra conforme a Figura 6.17. A definição do diâmetro da barra se encontra dentro de *InternalDefinition*. A Figura 6.18 mostra as propriedades da barra, dando destaque a propriedade *Built In Parameter*, referente ao parâmetro do diâmetro denominado REBAR_BAR_DIAMETER.

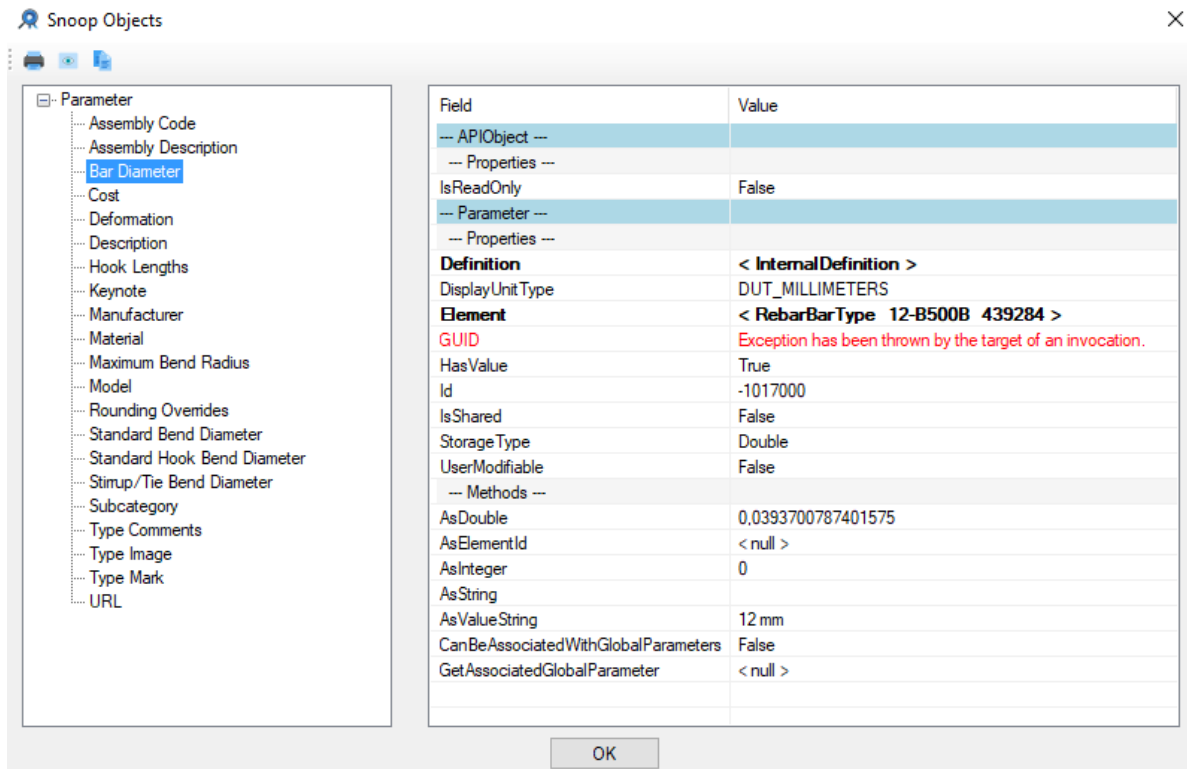


Figura 6.17 – Parâmetros da barra selecionada

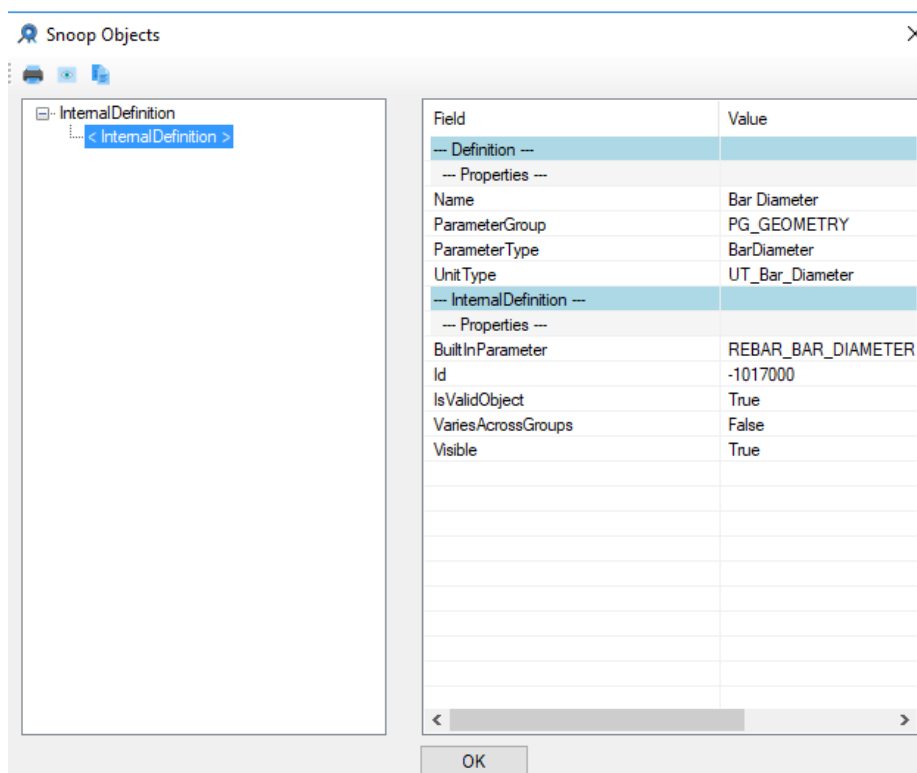


Figura 6.18 – *InternalDefinition* parâmetro do diâmetro.

Tendo conhecimento do parâmetro que deve ser selecionado, programou-se as linhas de código 63 a 68. Para a barra escolhida, coletou-se o parâmetro do diâmetro (nome explicado pelas figuras do *RevitLookup*), atribuindo este à variável *builtInParameter* da classe *Parameter*, que depois foi atribuída a variável *double* criada pelo usuário e chamada *diameter*. O restante do código da oitava etapa é parecido com a segunda e terceira, e utiliza *if* e *else* para comparar o valor do resultado do cálculo de *ab* com as condições impostas.

Com os valores de *fyk*, *fck* e *ab*, por meio da consulta na classe criada que representa a Tabela B.6, retirou-se o fator que, multiplicado pelo diâmetro da barra, resulta no diâmetro do mandril. A base de dados representativa da Tabela B.6 foi programada como uma lista. As variáveis da lista foram criadas na classe *OrdemDaTabelaEuroCode*, de forma ordenada, para depois serem aplicadas dentro da classe *list*, em que foi detalhada a Tabela B.6. A lista foi programada com os valores na seguinte ordem: *fck*, *fyk*, *ab* e o valor do fator (*ftm*) que multiplicara o diâmetro da barra resultando no diâmetro do mandril.

A nona etapa em suas primeiras linhas busca dentro da lista criada, na ordem das variáveis desenvolvidas na classe *OrdemDaTabelaEuroCode*, o primeiro valor da variável *valorDobra*, que condiz com os valores salvos nas variáveis *fckViga*, *vergalhãoFyk* e cálculo *ab*, configuradas nas etapas passadas. A décima etapa apenas mostra o valor da variável *valorDobra* por meio dos mesmos artifícios usados na etapa quatro.

```

133     public class OrdemDaTabelaEuroCode
134     {
135         public double fck;
136         public double fyk;
137         public double ab;
138         public double valorDobra;
139
140         public OrdemDaTabelaEuroCode(double fck1, double fyk1, double ab1,
141             double valorDobra1)
142         {
143             fck = fck1;
144             fyk = fyk1;
145             ab = ab1;
146             valorDobra = valorDobra1;
147         }
148         public OrdemDaTabelaEuroCode()
149         {
150         }
151     }
152
153     public List<OrdemDaTabelaEuroCode> RetornaTabelaEuroCode()
154     {
155         List<OrdemDaTabelaEuroCode> listaEuroCode = new
156             List<OrdemDaTabelaEuroCode>();
157
158         listaEuroCode.Add(new OrdemDaTabelaEuroCode(12, 400, 2, 34));
159         listaEuroCode.Add(new OrdemDaTabelaEuroCode(12, 400, 4, 26));
160         listaEuroCode.Add(new OrdemDaTabelaEuroCode(12, 400, 8, 21));

```

Figura 6.19 – Nona etapa do *plug-in*.

```

85     //Consulta do valor de dobra pela tabela Eurocode
86     List<OrdemDaTabelaEuroCode> minhaLista = RetornaTabelaEuroCode();
87     OrdemDaTabelaEuroCode linha = minhaLista.FirstOrDefault(p => p.fck
88     == fckViga && p.fyk == vergalhaoFyk && p.ab == calculo_ab);
    TaskDialog.Show("valor de dobra", linha.valorDobra.ToString());

```

Figura 6.20 – Nona etapa do *plug-in*.

As últimas etapas da execução do *plug-in* são o cálculo do diâmetro do mandril e sua aplicação.

```

91     //Aplicação do diâmetro de dobra do vergalhão
92     Parameter builtInBendDiameter = barraEscolhida.get_Parameter
93         (BuiltInParameter.REBAR_INSTANCE_BEND_DIAMETER);
94
95     using (Transaction t = new Transaction(doc, "Dobra"))
96     {
97         t.Start();
98         double bendDiameter = linha.valorDobra * diameter;
99         RebarBarType type = doc.GetElement(barraEscolhida.GetTypeId())
100             as RebarBarType;
101
102         type.StandardHookBendDiameter = bendDiameter;
103         t.Commit();
104     }
105     return Result.Succeeded;
106 }

```

Figura 6.21 – Nona etapa do *plug-in*.

A aplicação do novo diâmetro do mandril a dobra deve ser executada por meio da classe *Transaction*. Qualquer alteração do documento do projeto só pode ser executada a partir de uma transação ativa, que só é completada quando confirmada. Por esse motivo o uso desta classe em específico, para a aplicação final do resultado do diâmetro do mandril. Dentro da classe foi criada uma variável *double bendDiameter*, é resultado da multiplicação entre o diâmetro da barra (salvo na variável *diameter* em etapas anteriores) com o valorDobra encontrado na etapa anterior. O resultado da variável *bendDiameter* foi aplicado dentro do *Edit Type*, no parâmetro da família do diâmetro escolhido, *Standard Hook Bend Diameter*.

O *plug-in* da correção da dobra, ao ser aplicado em uma barra da família de diâmetro 12mm, corrige todas as barras que utilizam a mesma família. Notou-se, porém, que a correção do comprimento de l_{bd} deve ser executada antes de se corrigir o diâmetro do mandril. Este fato é importante ser citado, pois caso o *plug-in* seja aplicado em uma barra que não contenha comprimento de aço suficiente para executar a dobra, o Revit gerará um erro e não aceitará essas mudanças. Dentro do estudo de caso em questão, o *plug-in* foi aplicado com sucesso, sendo perceptível a diferença entre o detalhamento do Revit do Anexo E e o detalhamento gerado pelo Robot mostrado no Capítulo 5.

7 UTILIZAÇÃO DOS DADOS DO MODELO PARAMÉTRICO REVIT

7.1 INTRODUÇÃO

A finalização de um edifício por meio do Revit tem grande importância, não só pela parte visual do projeto, mas sim pela base de dados que cria e que pode ser utilizada em outras áreas. Dois dos motivos para a modelagem 3D em modelos BIM ser diferencial são o fato de ser paramétrica e de conter dados dentro de cada objeto desenhado dados de material, custo, formato e quaisquer outros que o usuário possa precisar.

Para os projetos de cálculo estrutural, a primeira vantagem de utilizar modelo paramétricos em 3D são os detalhamentos de armaduras. Compor uma folha e detalhamento que se atualiza automaticamente quando qualquer mudança é efetuada em suas barras minimiza muito dos retrabalhos praticados atualmente nos escritórios de cálculo estrutural.

Dentro da indústria da construção civil há temas que são abordados com frequência, como o levantamento de quantidades e custos, detecção de interferências, planejamento da construção e pré-fabricação de elementos fora do campo de obra. Alguns desses temas são detalhados nos capítulos em seguida.

7.2 DETALHAMENTO DAS ARMADURAS E DOCUMENTAÇÃO

As armaduras importadas do Robot podem ser detalhadas por meio do Revit com facilidade. As elevações de vigas e pilares foram executadas utilizando a ferramenta *Framing Elevation*, que cria uma elevação a partir de um eixo escolhido. Para armar o pilar P1 e a viga V1-5, por exemplo, utilizou-se essa ferramenta no eixo A das plantas do Anexo A. A Figura 7.1 demonstra a simbologia dos cortes e elevações executadas para o detalhamento das vigas.

Na elevação criada, ajustou-se a janela de limite somente no elemento estrutural que seria detalhado, e configurou-se a visibilidade a fim de mostrar as armações do interior do elemento. Os cortes das vigas e pilares foram feitos por meio do comando *Section*.

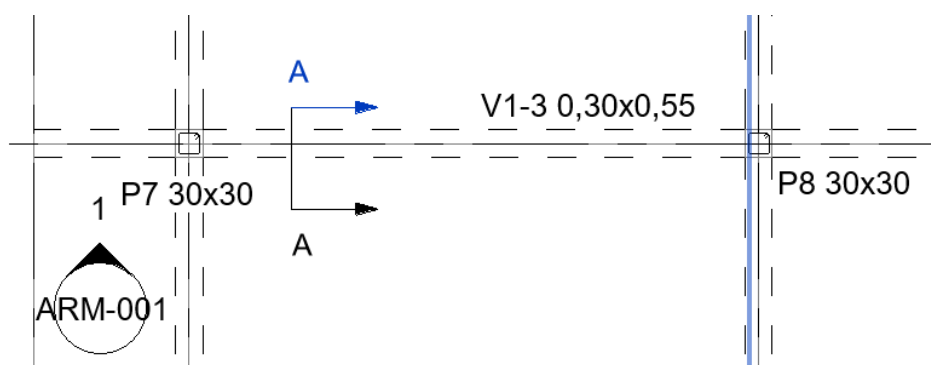


Figura 7.1 – Exemplo de elevação e corte da viga V1-3.

Com as elevações e seções prontas, colocou-se pela aba *Annotate* as cotas, *tags* e detalhes necessários. As cintas ou estribos foram detalhados com a ferramenta *Aligned Multi-Rebar Annotation*, que cria um *tag* para diversas barras ao mesmo tempo. As configurações do texto, a serem mostradas pelos *tags*, devem ser alteradas dentro das famílias. Por se tratar de elementos compostos por diversos dados, dentro da família o usuário é capaz de escolher quais informações sobre as barras de aço (como por exemplo diâmetro da barra, número da barra, comprimento, custo e muitas outras informações) devem ser mostradas. Todas essas configurações resultaram nas folhas de detalhamento do Anexo E.

Somado aos detalhamentos em 2D, é possível também detalhar em 3D e, até mesmo, criar vídeos dentro das armações executadas. Uma opção interessante é delinear em 3D os pontos mais complicados da armação. Como exemplo, nos pilares todos os nós de pórticos foram armados em 3D e detalhados, o que pode ser executado por meio das vistas 3D utilizando a ferramenta *section box*.

Os detalhamentos e anotações feitas nas barras ainda são executados de maneira bastante manual. Pode-se também utilizar a ferramenta *Tag-all*, que cria legendas para todos os elementos do tipo selecionado (por exemplo, vigas, barras de aço, etc.), mas o controle sobre o posicionamento deve ser feito pelo usuário. O detalhamento da armadura dentro do Revit é algo muito pesquisado, tanto que existem alguns *plug-ins* para detalhamento automático, arrastar barras para fora do elemento estrutural (estilo de detalhamento brasileiro), numeração de barras por folha entre outras ferramentas para agilizar o processo de detalhamento das armaduras no Revit (Softstik, [s.d.]).

A numeração das barras no Revit é executada por meio do tipo, tamanho, material e forma das barras. Ao mudar qualquer um desses parâmetros, a numeração do Revit (que não é manualmente editável) também muda. As barras também podem ser divididas nas chamadas *Partition*, e esse tipo de divisão pode ser usada para a separação das armações de cada fase construtiva, separação por tipo de fabricação, pedido, local de colocação do vergalhão e quaisquer outras necessidades dos empreiteiros.

No caso da dissertação, dividiu-se os pilares em:

- T-1º: pilares do térreo ao 1º andar;

- 1º-2º: pilares do 1º até o 2º andar;
- 2º-3º: pilares do 2º até o 3º andar.

As vigas foram divididas por pavimento:

- 1ºA: vigas do primeiro andar;
- 2ºA: vigas do segundo andar;
- 3ºA: vigas do terceiro andar.

Desta maneira, pode-se retirar pela tabela de quantidades o peso do aço para cada andar, e no caso também para cada fase de construção definida.

7.3 LEVANTAMENTO DE MATERIAIS E CÁLCULO DE CUSTO

O *software* Revit é utilizado para uma gama vasta de ações dentro de um projeto arquitetônico e estrutural. Além das funcionalidades citadas já neste trabalho, o Revit também faz renderizações da arquitetura, vídeos renderizados, detalhamento de plantas, superfícies topográficas importadas, tabelas de quantidades, dimensionamento por nuvem e troca de dados contidas no projeto para outros *softwares*. Existe uma diversidade grande de tipos de *Schedules* que podem ser produzidos pelo Revit, entre eles de quantidades, tabela de numeração das folhas, tabela de notas adicionadas no projeto, tabelas com imagens, entre outras tantas.

No estudo de caso em análise, optou-se por fazer um levantamento dos principais materiais necessários para a construção da estrutura (como concreto, aço e forma). O levantamento do concreto e aço acontecem de maneira muito linear, já o levantamento das formas requer alguma mudança em parâmetros das famílias ou na criação de fórmulas dentro de tabela. Dentro da aba *Schedules* se escolheu a opção *Material Takeoff* que tem mais opções de detalhamento para levantamento de material. Para levantamento das quantidades dos materiais das vigas, basta escolher a opção do elemento *Structural Framing* e selecionar as opções dos parâmetros que serão mostrados na tabela gerada.

Tabela 7.1 – Quantidade de materiais e custo de todas as vigas.

Forma, Concreto e Custo Total das Vigas					
Geometria	Volume de Concreto	Área de Forma	Custo Total de Forma (EUR)	Custo Total do Concreto (EUR)	Custo Total das Vigas (EUR)
300 x 550mm	25,39 m ³	348 m ²	12433	2418,64	9962,19
300 x 650mm	5,51 m ³	69 m ²	2456	525,26	2163,5
400 x 650mm	1,66 m ³	20 m ²	714	158,32	652,1
Grand total: 26	32,56 m ³	437 m ²	15603	3102,21	12777,78

A Tabela 7.1 foi criada no Revit e exportada para o Excel. Os parâmetros escolhidas para a tabela foram *type* (Geometria), *material:volume* (volume de concreto), perímetro da forma, *Length* (comprimento da

viga), área da forma, custo da forma por metro quadrado, custo total da forma, custo do concreto por metro cúbico, custo total do concreto, custo das vigas incluindo materiais e mão de obra por metro cúbico e custo total para a construção das vigas.

O perímetro da forma, os custos de concreto e o custo da forma foram inseridos dentro das famílias das vigas como parâmetros. Dentro desse, foi criado na aba *Family Types* um novo parâmetro, que deve ser categorizado como *Shared Parameter*. A seção de parâmetros compartilhados faz com que seja possível utilizá-los posteriormente dentro das tabelas de quantidades. Assim como as famílias, para se criar um parâmetro novo é necessário criar um arquivo RFA, configurando um novo grupo e, por fim, um novo parâmetro para a viga. Esse pode ser incluso dentro de diversas abas, como *Dimensions* (onde estão as dimensões configuráveis da viga do Revit), *Identity Data* entre outros. O perímetro foi configurado como *Dimensions* e foi calculado por meio do campo fórmula disponível nas famílias. Os custos foram adicionados em *Identity Data*, e optou-se por criar um preço para cada material, assim não ocorrem erros na hora de utilizar o parâmetro já disponibilizado dos *Schedules*, que é o *Material: Cost*, pois se tem dois materiais com custos diferentes.

Dentro das propriedades de um *Schedules* existem cinco abas *Fields*, *Filter*, *Sorting/Grouping*, *Formatting* e *Appearance*. A primeira serve para escolher os parâmetros já citados, e a segunda para criar filtro desses escolhidos. A terceira tem o intuito de organizar os resultados dentro de certos parâmetros, tendo-se a opção de detalhar cada item ou juntar todos mostrando o resultado final. A quarta é onde se pode configurar as unidades do parâmetro, se o mesmo deve apresentar os valores unitários ou totais e se essa coluna deve estar escondida ou visível na tabela. A última aba é apenas para configurar a aparência das tabelas.

No caso da Tabela 7.1, na aba três os dados foram agrupados pela geometria das vigas (*types*), de forma a não detalhar cada item e mostrar os resultados finais. Já na aba quatro o volume, área de forma e custos totais tiveram a opção de cálculo total (*calculate totals*) das quantidades ativada e alguns foram modificadas as unidades. Os parâmetros de custo total e área de forma foram criados por equações dentro da primeira aba. A área de forma é a multiplicação do comprimento com o perímetro de forma criado dentro dos parâmetros das famílias.

Já os custos totais são os custos de material multiplicado pela quantidade utilizada na obra. Todos os dados das tabelas de materiais e custos são automaticamente atualizados quando o modelo é modificado. Isto ocorre devido ao modelo ser paramétrico, todos os custos foram retirados através do site gerador de preços (Ingenieros, [s.d.]). Essas tabelas podem ser transferidas para o Excel por meio da opção de exportação *Reports* da divisão *Schedules*. O arquivo gerado é um txt que pode ser importado para o Excel.

Todas outras tabelas executadas seguem o mesmo padrão desta primeira. Na tabela de aço (Tabela 7.2), a única mudança é o tipo de tabela, que passa de *Material Takeoff* para *Schedules/Quantities*.

Tabela 7.2 – Quantidade de aço e custo.

Tabela de Aço por Diâmetro					
Tipo de Barras	Diâmetro	Comprimento das Barras	Peso das Armaduras (kg)	Custo do Aço (EUR/kg)	Custo Total das Armaduras (EUR)
Rebar Bar: 6-B500B	6 mm	125396 mm	189,61	0,79	149,79
Rebar Bar: 8-B500B	8 mm	524299 mm	762,86	0,79	602,66
Rebar Bar: 10-B500B	10 mm	826849 mm	510,46	0,79	403,27
Rebar Bar: 12-B500B	12 mm	1571189 mm	1398,02	0,79	1104,43
Rebar Bar: 16-B500B	16 mm	464085 mm	734,24	0,79	580,05
Grand total: 1051		3511818 mm	3595,19		2840,2

Por meio das tabelas geradas para todos os elementos chegou-se em um valor final para estrutura de 122.169,00 Euros.

O levantamento de quantidades pelo Revit pode ser feito para construções de pequeno porte sem muita complexidade. Porém, para obras maiores, *softwares* de orçamentos podem ser utilizados para ajudar a quantificar e calcular o preço de cada insumo (*softwares* como Innovaya, Exactal ou OnCenter). O Revit, porém, é uma fonte de dados sobre materiais e montagens dos elementos, o restante das informações como mão de obra e outros pequenos detalhes devem ser configurados no *software* de orçamento. Um dos *softwares* ainda utilizado para orçamento é o Excel, que tem conexão com o Revit como descrito acima (Eastman et al., 2008). Melhor que os *softwares* de orçamentos são os denominados 4D, que serão abordados no capítulo seguinte.

7.4 ANÁLISE E PLANEJAMENTO NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

O planejamento dentro da construção civil foi denominado no mundo BIM de 4D. Essa dimensão é responsável pelo sequenciamento de atividades no espaço e no tempo, considerando os recursos de cada tarefa a serem atribuídos e organizando as limitações de cada fase construtiva. Anterior aos modelos 4D, o mercado utilizava de ferramentas com o Método do Caminho Crítico (CPM), que são os *softwares* como o Microsoft Project (MS Project), Primavera SureTrak e o P3. Este tipo de *software* mostra como as atividades são conectadas, e os caminhos críticos dessas conexões, porém, não têm uma ligação visível com o modelo da construção, não capturando de maneira efetiva os componentes espaciais relacionados a cada atividade (Eastman et al., 2008).

O uso do 4D chega para modificar essa linha de pensamento, integrando os modelos da construção ao planejamento, trazendo benefícios como comunicação mais efetiva por meio de modelos 3D explicativos, logística de canteiro aplicada no tempo e espaço das disciplinas e comparação dos cronogramas com os processos da construção de maneira mais visual e fácil.

A construção de um modelo 4D pode ser executada de diversas maneiras, sendo elas manualmente, por meio de ferramentas BIM com recursos 4D embutidos e exportação de modelos BIM 3D para ferramentas 4D de planejamento. Uma ferramenta BIM com recurso 4D é, por exemplo, o Revit. Nele, pode-se

configurar as fases da obra para cada elemento e, por meio de *plug-ins* feitos por usuários, exportar cronogramas do MS Project ou outros *softwares* do tipo. A exportação para *softwares* 4D, no entanto, é mais completa, e consegue abranger melhor a parte de visualização no modelo 3D das fases da obra. Os *softwares* 4D são o Navisworks da própria Autodesk, Innovaya, VICO *software* entre tantos outros (Eastman *et al.*, 2008).

Como exemplo de aplicação 4D, a partir de um projeto Revit, utilizou-se a estrutura modelada no estudo de caso para uma análise simples no Naviswork. Dentro do Revit criou-se fases de construção seguindo da fundação ao último andar, contando a fase de armação separada da concretagem. Por meio da vista 3D, em que todos os elementos têm que estar aparentes para exportação dos dados, selecionou-se na aba *Add-in* em *External Tools* a opção para exportação para o Naviswork. Antes de salvar pela aba aberta pelo *External Tools*, é importante configurar no Navisworks *settings* as opções de envio, como a opção que permite exportação das propriedades do projeto para o Naviswork e a opção para somente enviar a vista aberta e não o projeto inteiro.

A opção de enviar as propriedades do projeto é a base do conceito BIM, ter projetos que trabalham pela interoperabilidade com os mesmos dados. Depois de salvar o arquivo configurado, deve-se por meio do Naviswork abrir este arquivo. Com isso, a exportação estará concluída com sucesso e as propriedades do Revit estarão embutidas no modelo (Figura 7.2 – Modelo no Naviswork e propriedades). Ao selecionar qualquer elemento no Naviswork, é possível analisar suas propriedades como método comparativo para verificar a exportação de dados. Além da verificação por propriedades, também é possível medir todos os elementos pela aba *Review*.

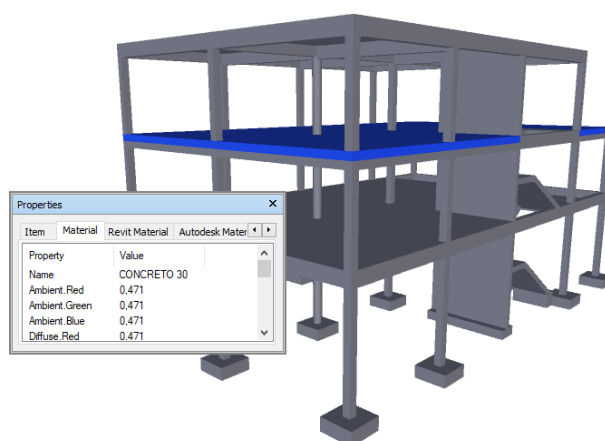


Figura 7.2 – Modelo no Naviswork e propriedades.

O Naviswork é uma ferramenta extensa, por isso, foram citados neste trabalho somente algumas opções de cronograma e geração de tabela de quantidades pelo *software*.

O cronograma é criado com base no MS Project, sendo possível importar arquivos desse ou do Primavera dentro da aba *Data Sources* do *TimeLiner* do Naviswork. No estudo de caso em questão, foram criadas tarefas no *TimeLiner* com datas de início e fim apenas representativas. Cada tarefa foi vinculada a seleção dos objetos das fases criadas no Revit, resultando em um cronograma de construção do edifício. Por meio da ferramenta de exportação *Export the Schedule*, do *TimeLiner* do Naviswork, é possível exportar o cronograma e o gráfico de Gantt criado juntos para o *MS Project* ou para o Excel. A Tabela 7.3 é a representação das principais partes do cronograma do Navisworks no Excel.

Tabela 7.3 – Cronograma Naviswork.

Name	Planned Start	Planned End	Actual Start	Actual End	Task Type	Attached
FUNDAÇÕES	12/11/2018 09:00	19/11/2018 17:00	-	-	Construct	Sets->FUNDAÇÕES
ARM. PILARES	19/11/2018 09:00	23/11/2018 17:00	-	-	Construct	Sets->ARM. PILARES
CONC.PILARES	26/11/2018 09:00	07/12/2018 17:00	-	-	Construct	Sets->CONC.PILARES
ARM.VIGAS 1º ANDAR	10/12/2018 09:00	14/12/2018 17:00	-	-	Construct	Sets->ARM.VIGAS 1º ANDAR
CONC.VIGAS E LAJES	17/12/2018 09:00	21/12/2018 17:00	-	-	Construct	Sets->CONC.VIGAS E LAJES
ARM.PILARES 2ºA	24/12/2018 09:00	26/12/2018 17:00	-	-	Construct	Sets->ARM.PILARES 2ºA
CONC.PILARES 2º	27/12/2018 09:00	31/12/2018 17:00	-	-	Construct	Sets->CONC.PILARES 2º
ARM VIGAS 2º ANDAR	01/01/2019 09:00	04/01/2019 17:00	-	-	Construct	Sets->ARM. VIGAS 2º
CONC. VIGAS LAJES	07/01/2019 09:00	11/01/2019 17:00	-	-	Construct	Sets->CONC.VIGAS LAJES 2º
ARM PILARES 3º	14/01/2019 09:00	18/01/2019 17:00	-	-	Construct	Sets->ARM PILARES 3º
CONC.PILARES 3º	21/01/2019 09:00	25/01/2019 17:00	-	-	Construct	Sets->CONC.PILARES 3º
ARM VIGAS 3º ANDAR	28/01/2019 09:00	31/01/2019 17:00	-	-	Construct	Sets->ARM VIGAS 3º
CONC .VIGAS E LAJES	04/02/2019 09:00	08/02/2019 17:00	-	-	Construct	Sets->CONC VIGAS E LAJES

O *TimeLiner* é composto por diversas colunas. A primeira é a opção de ativar ou não aquela tarefa para o estudo em questão, a segunda é o nome de cada tarefa, a terceira é o *status* no gráfico de Gantt, a quarta e a quinta são as datas de começo e fim da tarefa em análise, a sexta e a sétima são as datas de começo e fim das atividades em obra, a oitava é o tipo de tarefa (construção, demolição etc.), a nona é o nome da seleção de objetos que estão vinculados a cada tarefa e a décima é o custo de cada tarefa. Na Tabela 7.3, foram representadas as tarefas da segunda coluna e as tarefas da quarta a nona coluna.

A partir do cronograma, o gráfico Gantt é criado automaticamente pelo Naviswork juntamente a um simulador da estrutura, retratando em 3D cada tarefa sendo comprida em seu tempo determinado. O simulador da construção da estrutura é uma das opções que inova dentro do 4D.

domingo 05:40:00 16/12/2018 Day=34 Week=5

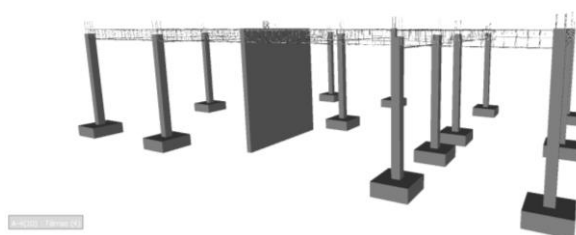


Figura 7.3 – Tarefa armação das vigas do 1º

domingo 14:20:00 23/12/2018 Day=42 Week=6

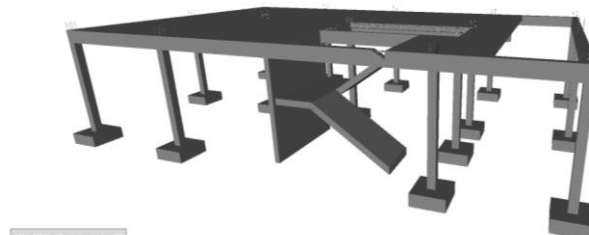


Figura 7.4 – Tarefa de concretagem das vigas e lajes do 1º andar.

A Figura 7.3 representa a quarta tarefa, e a Figura 7.4 a quinta do cronograma executado dentro do vídeo representativo da construção do edifício. No topo do lado esquerdo de ambas as figuras está a data e a semana da construção programada no cronograma. Para uma estrutura mais completa com muitas fases de construção, a aplicação do Naviswork ou de qualquer *software* 4D leva a um planejamento e acompanhamento da obra com controle maior. Ter acesso a todos os materiais, fases de construção, metodologias de construção (pode ser adicionada em notas) e movimentação de recursos em um só modelo é extremamente importante para conseguir entender o que ocorre na obra e quais das tarefas foram concluídas com sucesso dentro do cronograma implantado.

Deixa-se claro que o Naviswork é apenas uma das opções para planejamento 4D, existindo outros *softwares* que podem aplicar os mesmos conceitos no mercado.

Além do planejamento, o Naviswork também pode executar o levantamento de quantidades utilizando a opção *Quantification*, que ao ser ativada gera uma janela onde pode-se configurar as opções do *Project Setup*. Dentro da opção *Project Setup* é possível selecionar qual catálogo será utilizado como base para o levantamento de quantidades. As quantidades referentes aos elementos da estrutura podem ser criadas por cada seleção de objetos ou para o projeto todo ao mesmo tempo.

Para criar os quantitativos, basta clicar com o botão direito sobre as seleções escolhidas, e dentro da opção *Quantification* escolher *Take off to new catalog item*. Todas as quantidades criadas podem ser exportadas para o Excel, caso o usuário queira compor uma tabela de quantidades fora do Naviswork. O custo tanto no planejamento quanto no levantamento quantitativo pode ser configurado de maneira a ser automatizado.

A grande diferença de utilizar uma ferramenta 4D, é a possibilidade de usufruir da base de dados dos modelos paramétricos, criando quantitativos e cronogramas baseados nos modelos 3D. O livro BIM Handbook (Eastman *et al.*, 2008) ainda vai mais além, citando a integração do controle de custos, programação e funções gerais com os modelos BIM. Segundo Eastman (2008), no processo de construção são utilizados diversos tipos de ferramentas que “vão desde sistemas de cronogramas e controle de custos até sistemas de contabilidade, provisionamento, pagamento de pessoal, segurança etc.” Muitos desses processos são dependentes de informações do projeto, que podem ser consultadas nos modelos BIM e conectadas a outras aplicações. Dois exemplos para essas ideias de processos citas por Eastman são:

- Criação para os componentes de um campo chamado estado. O estado do componente pode ser, por exemplo, em projeto ou em fabricação. Aplicando isso ao modelo paramétrico, pode-se acompanhar o estado de cada componente da obra tendo uma visão geral de seu andamento;

- Compra e cotação de produtos via modelo BIM é uma ideia em avanço que pode também fazer a diferença para os modelos. Alguns *plug-ins* criados conseguem cotar em tempo real o preço de certos produtos dentro de *softwares*. Seria a aplicação da indústria 4.0 no BIM.

7.5 USO DO BIM PARA FABRICANTES E EMPREITEIROS

Os elementos pré-fabricados (fabricados fora do canteiro ou pré-montados), por serem econômicos e com controle de qualidade maior, estão em crescimento dentro da construção civil. Esses são divididos por alguns autores como padrão, produzidos sob encomenda e projetados sob encomendas. As duas primeiras opções são padronizadas por catálogos e podem ser acessadas dentro das ferramentas BIM, como exemplificado na ferramenta Naviswork. Os elementos projetados sob encomenda são o possível futuro em grande parte da engenharia civil, pois cada vez mais elementos personalizados são solicitados em construções, fugindo dos padrões. Com isso, a relação entre os projetistas e a fase construtiva das obras foi mudada com o tempo.

Atualmente, por serem peças específicas, modificações do projeto inicial podem ser solicitadas quando na parte de construção o elemento previsto não esteja detalhado corretamente com a realidade do edifício. A partir desta demanda, os construtores e fabricantes começaram a ter a necessidade de executar desenhos executivos de peças, que para serem construídas necessitam de aprovação dos projetistas. A troca de informações de revisões em detalhamentos 2D entre projetistas e construtores pode causar imprecisões e contradições nos desenhos e nos relatórios gerados.

O BIM tem a vantagem de ser paramétrico, por isso, ao alterar elementos estruturais modifica-se toda a estrutura, detalhamentos e relatórios para as novas configurações impostas, eliminando os erros humanos de retrabalho que são gerados no ciclo entre projetistas e construtores. Somado a automatização de desenhos, o BIM também cria a oportunidade de testar diversos métodos construtivos em modelos 3D com facilidade. A conversão de moldado *in loco* para métodos pré-fabricados se torna mais fácil, dando uma opção para mudanças em um curto espaço de tempo (Eastman *et al.*, 2008).

No caso de peças pré-fabricadas, as ligações entre elas são pontos importantes que podem ser modificados conforme o andamento da obra. Os mesmos comentários aplicados aos detalhamentos em geral também são aplicadas às ligações de pré-fabricados e metálicas. Utilizando parametrização, essas mudanças tornam-se “automáticas”, reduzindo o tempo de produção de desenhos executivos.

O BIM traz uma outra característica que é positiva, porém, ainda tem sua limitação. O Naviswork, além das aplicações de planejamento e quantificação, pode verificar conflitos entre os projetos. Apesar de efetuar essa verificação, o retorno do projeto para o Revit com as modificações necessárias ainda é muito

limitado, fazendo com que as mudanças tenham que ser feitas no modelo original BIM de modelagem (no caso o Revit).

A evolução da tecnologia se expande também para as máquinas de fabricação dos elementos, como por exemplo as de corte e dobra de barras aço, laser para perfuração e corte do aço estrutural, entre outras. Entretanto, a conversação entre as máquinas e os modelos BIM ou CAD em alguns ramos ainda é por meio de inserção manual dos comandos para execução das peças. Espera-se que evolua para uma completa automatização.

Dentro do ramo de corte e dobras de armaduras e aço, estão sendo estudadas diversas maneiras para executar a transferência dos dados do modelo BIM para as máquinas de corte de forma automatizada.

O processo de armação de um edifício passa pelas fases de projeto, fabricação e armação. A fase de corte e dobra dos aços é executada após a fase de fabricação pelos próprios fornecedores do aço ou em obra (atualmente está se extinguindo a dobra e corte em obra sendo parte do processo de fabricação dos fornecedores de aço). A fase de projeto foi abordada neste trabalho até seu detalhamento. A última parte indicada como projeto é o envio dos dados do detalhamento ao contratante (informações com medidas de diâmetros, formato de vergalhões, emendas, ancoragens, cobrimento, tipo de aço e quaisquer outras informações relevantes para a fabricação do projeto). Os dados são repassados à empresa construtora, que entra em contato com distribuidoras de aço ou siderúrgicas (Maciel, 2018).

A fabricação das armações é executada atualmente por máquinas altamente tecnológicas, porém, a transcrição dos dados dos detalhamentos ainda é efetuada de forma manual, por leitura de códigos, dispositivos USB, pela rede de dados ou sistemas CAD-CAM que possibilitam a transferência dos dados de uma armação 2D para as máquinas em questão (sistema em formato BVBS ou IGV da TQS). Apesar de funcional, o sistema CAD-CAM é afetado pelos problemas de desenhos em 2D, que são a interpretação errada dos desenhos, fragmentação de informação e problemas de erros nos detalhamentos.

Novamente, a aplicação BIM busca solucionar todos esses problemas dos desenhos 2D, tendo como vantagem a parametrização das barras, visualização 3D para empreendedores, planejamento da fabricação integrado aos modelos de detalhamento, adaptação a mudanças tardias no projeto, geração de relatórios automaticamente e qualidade na gestão de suprimentos e logística. Por outro lado, a interoperabilidade entre os *softwares* BIM e as máquinas de corte e dobra ainda não é executada com perfeição (Maciel, 2018).

Segundo Maciel (2018), a troca de dados por modelos IFC ainda não tem um funcionamento desejado. Apesar de existirem outros formatos de interoperabilidade, a função de troca de dados ainda não é efetivamente perfeita, no entanto, está evoluindo de forma que, provavelmente, serão aplicadas no futuro.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 CONCLUSÕES

A conclusão da tese foi executada com base na releitura da Figura 1.2, resultando na Figura 8.1. Esta releitura tem como intuito mostrar os pontos de dificuldades dentro de um projeto estrutural que aplica a metodologia BIM, variando da cor verde para etapas bem-sucedidas e com poucas dificuldades encontradas, até vermelho para etapas ainda problemáticas.

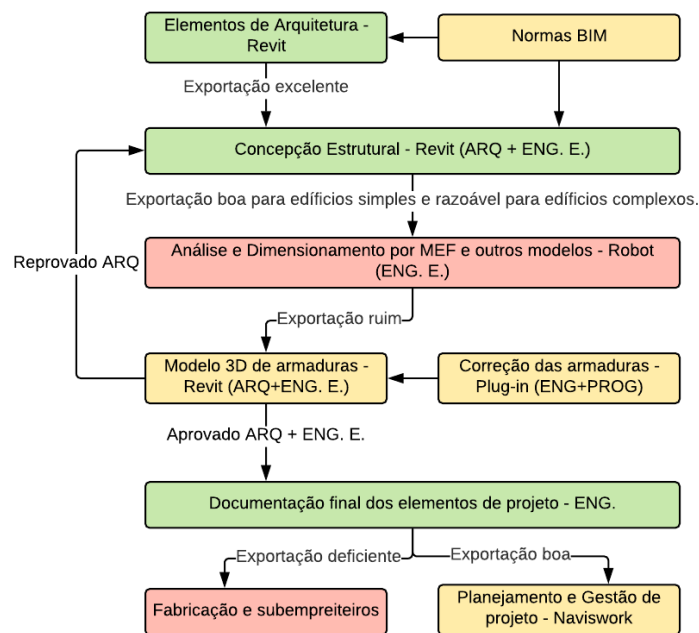


Figura 8.1 – Releitura do fluxo da tese, demonstrando os pontos de maior dificuldade por cores.

O detalhamento da arquitetura dentro do Revit ou ArchiCAD é uma etapa que traz muitos pontos positivos, pois gera cortes, elevações e plantas de maneira fácil e atualiza todos esses detalhes automaticamente com qualquer mudança executada no modelo. Comparado com as soluções atuais de utilização CAD ou modelos 3D como SketchUp, os modelos 3D paramétricos são muito práticos.

A parte de normas para a metodologia BIM tem ainda algumas falhas, que devem com o tempo deixar de existir. Os pontos que tornam esta etapa um pouco problemática é a falta de normas que englobem, além da parte relacionada a gestão, as outras áreas da engenharia civil. Por outro lado, as normas atuais contêm

conteúdos relevantes e, por isso, não devem ser consideradas como desnecessárias. A exportação da arquitetura para o modelo do Revit estrutural acontece com perfeição. O uso do Revit para diversas áreas gera uma comunicação muito maior entre arquitetura e engenharia. A modelagem do modelo estrutural sobre o de arquitetura faz com que o projetista tenha uma visão geral, em 3D do produto final, diminuindo muito os erros de falta de comunicação.

A partir da exportação do modelo paramétrico 3D para os *softwares* de cálculo, alguns problemas de interoperabilidade e dos próprios *softwares* começam a surgir. A exportação do Revit para o Robot nesta dissertação foi muito boa, considerando que nenhuma dado inserido dentro do Revit foi perdido.

A etapa de dimensionamento pelo Robot é um dos pontos que necessitam de uma grande melhoria se tratando da aplicação do BIM em um projeto estrutural. O entendimento do *software* se mostrou muito relevante, pois se o dimensionamento for executado sem o devido conhecimento, a armação pode resultar em valores totalmente diferentes dos esperados. Por isso, torna-se vital a verificação das armaduras, a fim de perceber se algum ponto dimensionado pelo Robot está muito longe do esperado pelo engenheiro. Além de ser uma etapa que exige muitos cuidados, também demonstra limitações se tratando da distribuição e do resultado de dimensionamento do Robot.

A distribuição das armaduras pelo Robot ainda é um pouco deficitária, pois divide em muitos trechos os vergalhões e não obedece aos valores normativos de ganchos (dobras e comprimentos retos) e emendas de vigas e lajes. Dividindo por elementos, pode-se concluir que os pilares têm um dimensionamento muito bom, as vigas um dimensionamento bom e as lajes um dimensionamento razoável. Apesar dos problemas das vigas, as áreas de aço são coerentes entre os resultados dos cálculos manuais com os do Robot. Já as lajes realmente precisam ser aprimoradas, pois têm uma distribuição de aço pouco otimizada e erros de dimensionamento.

Uma das piores etapas do projeto, pior até que o dimensionamento, é a exportação de armaduras. A primeira limitação é a não exportação das armaduras de lajes e paredes, um problema significativo limitando o uso do BIM para esses dois *softwares*. Outro problema é o frequente erro no momento de locação das armaduras exportadas nas coordenadas corretas. Novamente, por ser uma estrutura simples, esperava-se mais linearidade nas exportações, principalmente nas vigas. Os nós de pórticos são outros pontos que ainda precisam ser melhorados; as armações ficam sobrepostas mostrando que no dimensionamento do Robot os elementos são dimensionados isolados, não considerando a influência das outras armaduras na disposição construtiva.

Apesar dos problemas de exportação, poder aplicar *plug-ins* no Revit ou mesmo no Robot geram uma produtividade de pesquisa muito grande, diminuindo o tempo em que esses problemas serão solucionados. O único problema dos *plug-ins* é o aprendizado da programação, porém, o resultado da aplicação de maneira correta é excepcional.

O detalhamento e levantamento de material final feito pelo Revit é excelente. A parametrização dos elementos que atualizam os detalhes e quantitativos com qualquer mudança faz com que o retrabalho diminua muito.

O uso dos dados finais para gestão é muito positivo, e a exportação dos modelos para o Naviswork é boa. O problema nesta etapa é o fato de não ser possível retornar ao modelo após a verificação dos pontos de interferência no Naviswork. Em suma, é uma ótima aplicação dos dados, diminuindo mais uma vez os erros de comunicação entre essas áreas e podendo gerar modelos de evolução das fases de construção de fácil entendimento.

O uso de dados pelos fabricantes ainda é limitado. Na indústria de corte e dobra de armaduras, a leitura dos dados exportados por IFC ainda não é suficiente para uma implementação efetiva nesta área.

No geral, a aplicação do BIM para um projeto estrutural é positiva. Considera-se que o retrabalho evitado no detalhamento e a possibilidade de visualização 3D dos elementos supera os problemas no dimensionamento e na exportação de seus resultados. Somado a isso, o uso dos dados para as outras áreas, é muito relevante na parte de planejamento e gestão do projeto, e tem muito potencial para a área de fabricação de elementos.

8.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os estudos feitos neste trabalho mostram os principais pontos que precisam ser melhorados na aplicação da metodologia BIM em um projeto estrutural. As sugestões para desenvolvimentos futuros são focadas principalmente nas etapas de exportação das armaduras e correção dessas. Em ambas as etapas se propõe como solução o desenvolvimento de *plug-ins*, seja pelo Visual Studio ou pelo Dynamo. Os possíveis *plug-ins* a serem estudados são:

- Correção do l_{bd} dos ganchos por meio de um *plug-in* que atue junto ao executado para diâmetro do mandril;
- Correção das emendas;
- Exportação das armaduras das lajes e paredes ou automatização do dimensionamento de sua armação dentro do próprio Revit utilizando nuvem;
- Detalhamento automático dos elementos, gerando rotinas de programação para o uso de cota, legendas e quaisquer outros modelos de detalhes 2D.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEC (UK) BIM - Implementing UK BIM Standards for the Architectural, Engineering and Construction industry, 2012.

AISH, Robert - Building modelling: the key to integrated construction CAD. Em CIB 5th International Symposium on the Use of Computers for Environmental Engineering Related to Buildings. University College London, 1986.

AKSAMIJA, Ajla *et al.* - PARAMETRIC CONTROL OF BIM ELEMENTS FOR SUSTAINABLE DESIGN IN REVIT. Research Journal. Vol.3. nº1 (2011), p.32–45.

ALMEIDA, Marco Romeu Baptista De - Análise da interoperabilidade aplicada ao projeto BIM de Estruturas Metálicas Tecnologia BIM aplicada ao Projeto de Estruturas Metálicas. [S.l.] : Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2015.

ANDRADE, Ludmila Santos De *et al.* - Os Sistemas BIM e a Redução de Inexatidões e Tempo nas Obras Públicas Brasileiras. SIGraDi. Brasília. 2013, p. 284–287.

ARAYICI, Y. *et al.* - Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice. Automation in Construction. ISSN 0926-5805. Vol.20 (2011). p. 189-195.

AUTODESK - Dynamo [Em linha], atual. 2018. Disponível em WWW:<URL:<http://primer.dynamobim.org/en/>>.

AUTODESK - My First Revit Plug-in Overview [Online], atual. 2018. [Consult. 5 mai. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/learn-explore/caas/simplecontent/content/my-first-revit-plug-overview.html>>.

AUTODESK - Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2018 [Online], atual. 2018. [Consult. 9 out. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<https://help.autodesk.com/view/RSAPRO/2018/ENU/>>.

AUTODESK SUPPORT - Revit Developer's Guide [Online], atual. 2018. [Consult. 5 mai. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<http://help.autodesk.com/view/RVT/2018/ENU/>>.

AUTODESK SUPPORT - ROBOT – RC beam design : Bending moment diagrams differences between the model (Bars + FE panels) and the RC beam module [Online], atual. 2018. [Consult. 7 jun. 2018]. Disponível

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

em WWW:<URL:https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/troubleshooting/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ROBOT-RC-beam-design-Bending-moment-diagrams-differences-between-the-model-Bars-FE-panels-and-the-RC-beam-module.html>.

AZEREDO, Manuel De - Verificação de segurança em relação ao estado limite último de encurvadura

BARROS, Helena; FIGUEIRAS, Joaquim - Concrete Structures Design tables and abacuses under Eurocode 2 for sections subject to bending and axial forces. Porto: 2008.113 p. ISBN 9789004310087.

BHUSAR, Arpit A.; AKHARE, Ashish R. - Application of BIM in Structural Engineering. SSRG International Journal of Civil Engineering. ISSN 2348-8352. Vol. 1, nº:5 (2014), p. 12–20.

BORGES, Margarida Magalhães - BIM Modelling Automation on Reinforcement Detailing of Slabs. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2018. Tese de mestrado.

buildingSMART - Technical Vision [Online] [Consult. 15 out. 2018]. Disponível em WWW:<URL:https://www.buildingsmart.org/standards/technical-vision/>.

CADONIA - Which BIM software is better? ArchiCAD or Revit? [Online] [Consult. 14 out. 2018], atual. 2018. Disponível em WWW:<URL:http://cadonia.com.au/which-bim-software-is-better-archicad-or-revit/>.

CARDOSO, Andréia *et al.* - BIM: O que é?. Porto: Universidade do Porto, 2012. Tese de mestrado.

CARRASCO, Hernán Sebastián Bueno - Um plug-in para verificação de estruturas metálicas pela norma NBR 8800 : 2008 em um ambiente BIM. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2016. Tese de Mestrado.

COBIM: Common BIM Requirements. FINNMAP CONSULTING OY *et al.* Finlândia 2012, 341 p.

CORREIA, Flaviana Silva Moraes *et al.* - Análise Dos Principais Problemas Construtivos Decorrentes De Falhas De Projeto – Estudo De Caso Em Maceió-Al. Caderno de graduação : Ciências exatas e tecnológicas. ISSN 1980-177. Vol.4, nº2 (2017), p. 57–72.

CZERNY - Tabelas de Czerny. In Beton Kalender. Alemanha: Ernst&Sohn, 1976.

DB, DECODE - DECODE DB [Online], atual. 2018. [Consult. 13 out. 2018]. Disponível em WWW:<URL:https://www.youtube.com/watch?v=ymNIHiQAIBg>.

Decreto-Lei nº349-C/83. RSA - Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pontes (83/05/31)

Decreto-Lei nº 235/83.REBAP - Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes, (84/07/30)

EASTMAN, Chuck *et al.* - BIM HANDBOOK: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-85-8260-118-1.

FÉLIX, Carlos - Disposições construtivas relativas a armaduras. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.

FÉLIX, Carlos; GUEDES, Paulo; NEVES, Trigo - Disposições construtivas relativas a elementos estruturais. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2010.

FERREIRA, Bruno *et al.* - Integração da Tecnologia BIM no Projeto de Estruturas de Betão. Encontro Nacional Betão Estrutural. - BE2012, no. Outubro, p. 24–26, 2012.

GOVERNO DE SANTA CATARINA - Caderno de apresentação de projetos BIM. 2015.

GRADVOHL, Renata Furtado; FREITAS, Ana Augusta Ferreira De; HEINECK, Luiz Fernando Mahlmann - Desenvolvimento de um modelo para análise da acumulação de capacidades tecnológicas na indústria da construção civil: subsetor de edificações. *Ambiente Construído*. Vol.11(2011), p. 41–51. [Consult. 10 out. 2018]. Disponível em WWW: ISSN 1678-8621.

HM GOVERNMENT - Digital Built Britain Level 3 Building Information Modelling - Strategic Plan. UK Government. February (2015). p. 1–47. doi: URN BIS/15/155.

INGENIEROS, CYPE - Gerador de preços para construção civil [Online] [Consult. 10 out. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.geradordeprecos.info/>>.

JUSTI, Alexander Rodrigues - Implantação Da Plataforma Revit Nos Escritórios Brasileiros. *Gestão & Tecnologia de Projetos*. Vol.3, nº1 (2008), p. 140-152. ISSN: 1981-1543.

KILKELLY, Michael - Code vs Node: The Ultimate Revit Automation Smackdown! [Online] [Consult. 10 out. 2018]. Disponível em WWW:<URL: <http://archsmarter.com/cvn/>>

KIMURA, Alio - Informática aplicada a estruturas de concreto armado. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018. ISBN 978-85-7975-310-7.

Home and Learn - Home and Learn [Online] [Consult. 1 set. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.homeandlearn.co.uk/>>.

EMKIN, Leroy Z. - Misuse of Computers by Strutral Engineers - a Clear and Preset Danger. *Strutural Engineering Forum of India*. Georgia Institute of Technology, 2017.

LOREK, Sarah - Global BIM Standards: Is Your Country Next? [Online], atual. 2018. [Consult. 26 set. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<https://constructible.trimble.com/construction-industry/global-bim-standards-is-your-country-next>>.

MACIEL, A. R. - Automação do processo de corte e dobra de armaduras para estruturas de concreto integrada ao processo BIM. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018. Tese de mestrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MARIA, Mônica Mendonça - Tecnologia BIM na Arquitetura. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2008. Tese de Mestrado.

MASOTTI, Luís Felipe Cardoso - Análise Da Implementação E Do Impacto Do Bim No Brasil. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2014. Tese de graduação

MAYR, Luiz Roberto - Falhas de projeto e erro de execução: Uma Questão de Comunicação. Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina, 2000. Tese de metrado.

MERINO, Marcos - ¿Qué es una API y para qué sirve? [Online], atual. 2014. [Consult. 28 set. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.ticbeat.com/tecnologias/que-es-una-api-para-que-sirve/>>.

MIGILINSKAS, Darius *et al.* - The benefits, obstacles and problems of practical bim implementation. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013. . ISSN 1877-7058. Vol.57 (2014), p. 767-774.

MILES, Rob - C# Programming Yellow Book. 8.2 ed. [S.l.] : Microsoft Press, 2016.ISBN: 978-15-0930-115-7.

MISTRY, Niraj - Global BIM – which countries have adopted Building Information Modelling? [Online], atual. 2018. [Consult. 26 set. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.stroma.com/news/global-bim>>.

MONTOYA, Pedro Jiménez; MESEGUER, Álvaro García; CABRÉ, Francisco Morán - Hormigón armado. 14. ed. Barcelona : Gustavo Gili, 2000. ISBN 84-252-1825-X.

NEDERVEEN, G. A. Va.; TOLMAN, F. P. - Modeling multiple views on buildings. Automation in Construction. Vol. 1, nº3 (1992). p. 215–224.

NP EN 1991-1-1 Eurocódigo 1 - Ações em Estruturas: Parte 1-1: Ações Gerais Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios. Instituto Português da Qualidade, 2009.

NP EN 1991-1-4 Eurocódigo 1- Acções em estruturas : Acções gerais: Part 1-4 : Acções do vento. Instituto Português da Qualidade, 2010.

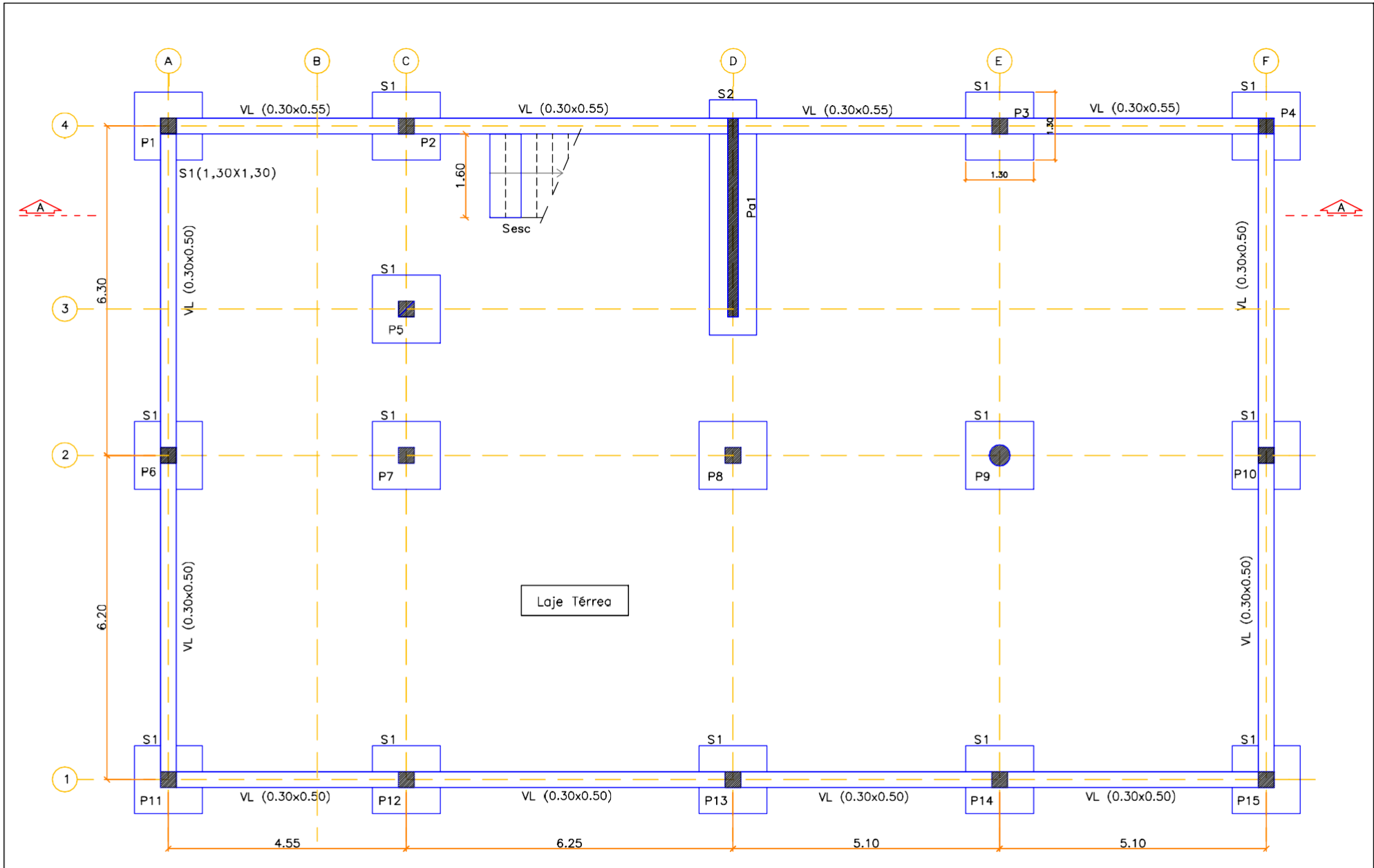
NP EN 1992-1-1 Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão: Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Instituto Português da Qualidade, 2010.

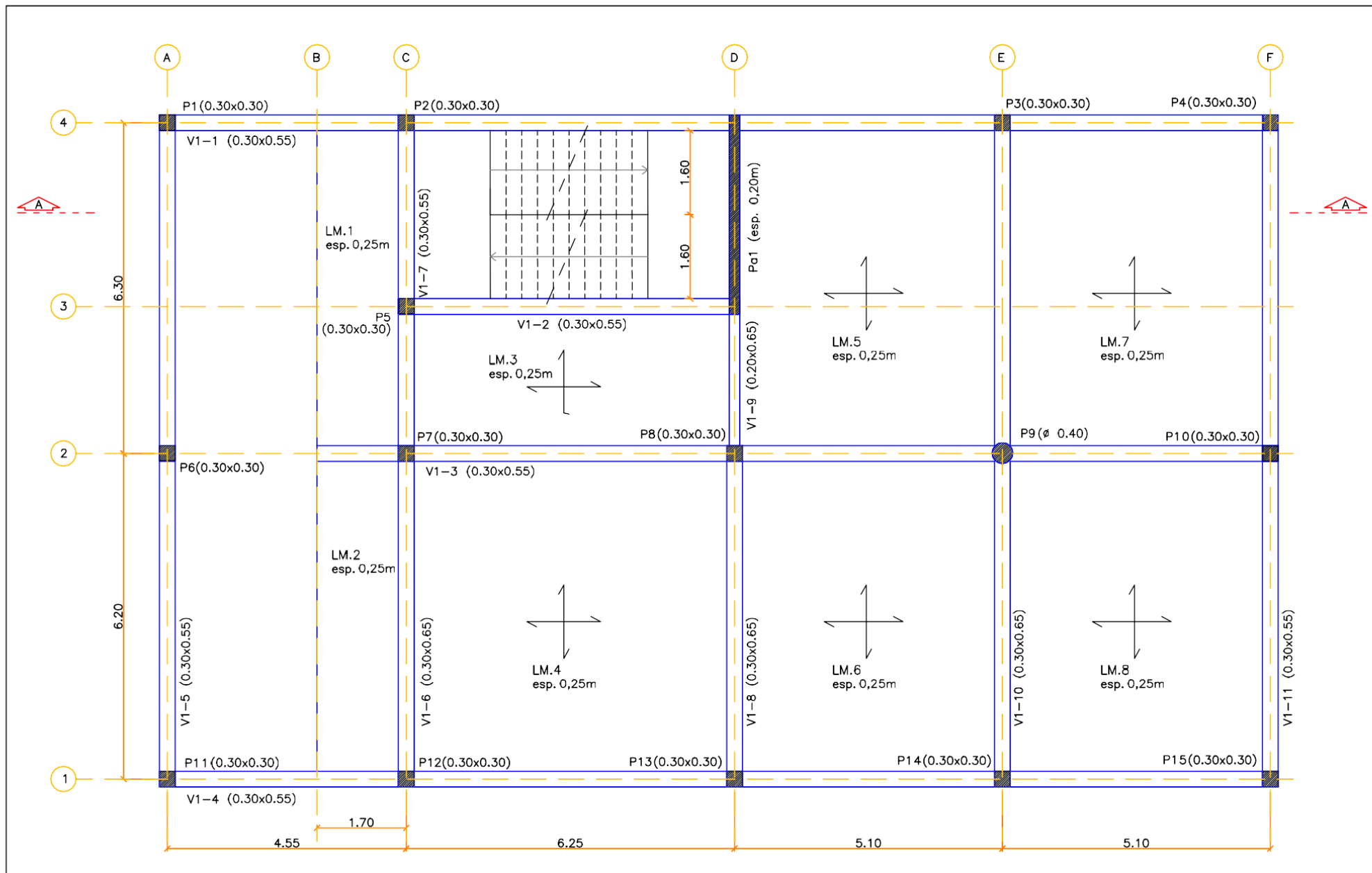
NP EN 1998-1-1 Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos: Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios, 2010.

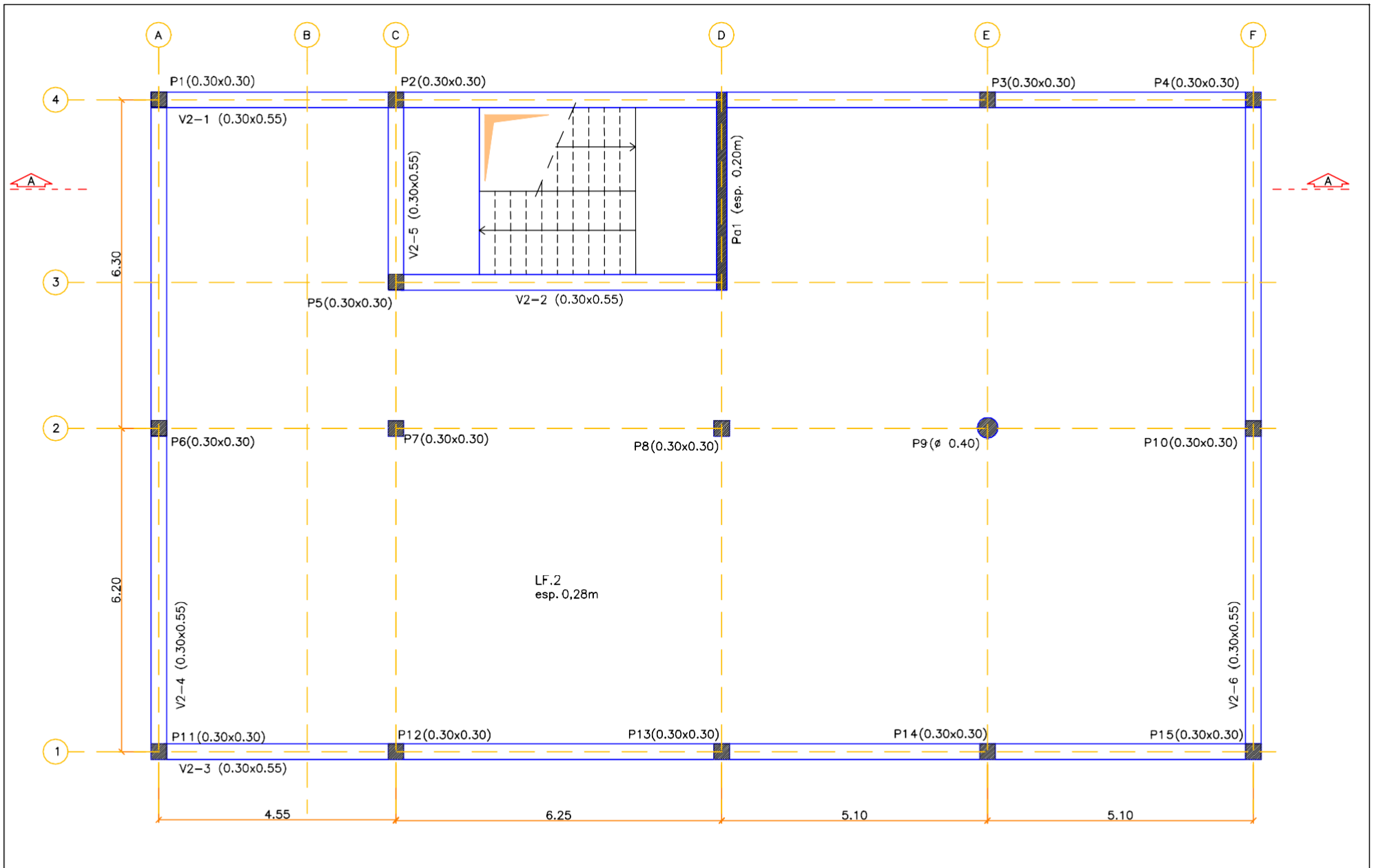
PAPADOPOULOS, Nicolas Alexandros - Avaliação da metodologia BIM através da modelagem paramétrica 3D de um projeto convencional. Rio de Janeiro : Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014. Tese de mestrado.

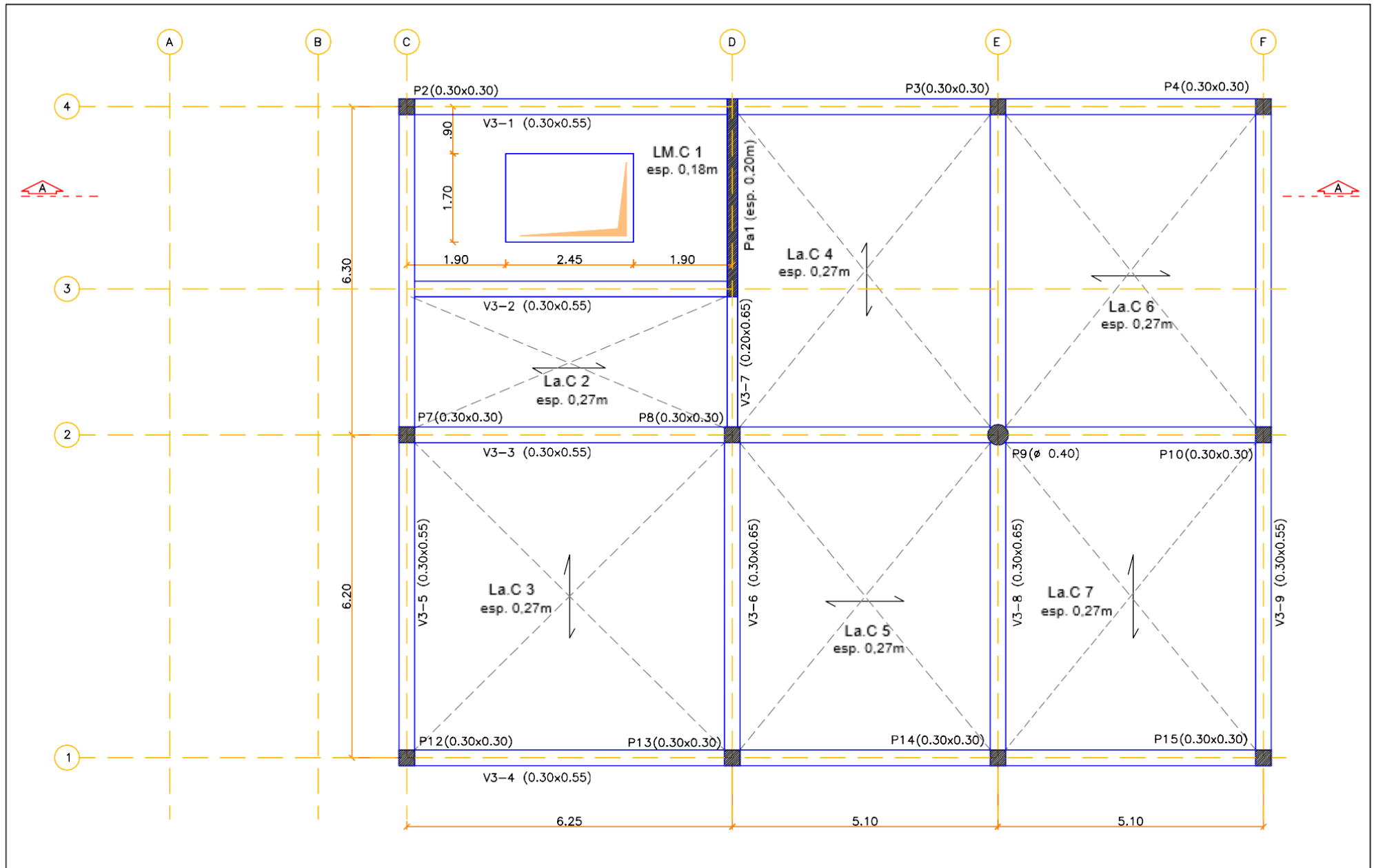
- PIRES, Henrique - *Automatização da Modelação Bim de Armaduras no Projeto de Estruturas*. Porto : Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2017. Tese de mestrado.
- SILVA, Vitor Paulo - *Como se tornar um desenvolvedor de plug-ins para AutoCAD e Revit*. Autodesk University Brasil, 2014.
- SILVEIRA, Thalita De Andrade - *Aplicação do sistema BIM para um projeto de habitação*. Joinville : Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. Tese de graduação.
- SOFTSTIK - Reinforcement Detailing [Online] [Consult. 10 out. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.sofistik.com/products/bim-cad/reinforcement-detailing/>>.
- SOUZA, Livia Laubmeyer Alves de; AMORIM, Sérgio Roberto Leusin; LYRIO, Arnaldo de Magalhães - Impact From the Use of Bim in Architectural Design Offices: Real Estate Market Oportunities. *Gestão & Tecnologia de Projetos*. ISSN 19811543. Vol.4, nº2 (2009),p. 26–53.
- STOYANOV, Momchil - Análise Lumínica Virtual de Elementos Construídos por Meio de Programação: Exemplo de Aplicação em Software do Tipo BIM. *SIGraDi*, 2009, p.449-451.
- TAMMIK, Jeremy - Preparing for a Hands-on Revit API Training [Em linha], atual. 2012. [Consult. 8 ago. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<http://thebuildingcoder.typepad.com/>>.
- TARRAFA, Diogo Gonçalo Pinto - *Aplicabilidade prática do conceito BIM em projeto de estruturas*. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2012. Tese de metrado.
- TELES, Isabel Alvim - *Análise estrutural avançada (2017/2018)*.Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2010.
- New Zealand BIM Handbook - *New Zealand BIM Handbook*. ISBN 978-0-473-29223-2.2014, p. 1–22.
- WU, Chengde; CLAYTON, Mark J. - BIM-Based Acoustic Simulation Framework. *CIB W78 International Conference*, 2013, p. 99–108.
- YAN, Wei; LIU, Geqing – BIM Game: Integrating Building Information Modeling and Games to Enhance Sustainable Design and Education. *Predicting the Future: 25th eCAADe Conference Proceedings*. Texas A&M University, 2007, p.211-218.

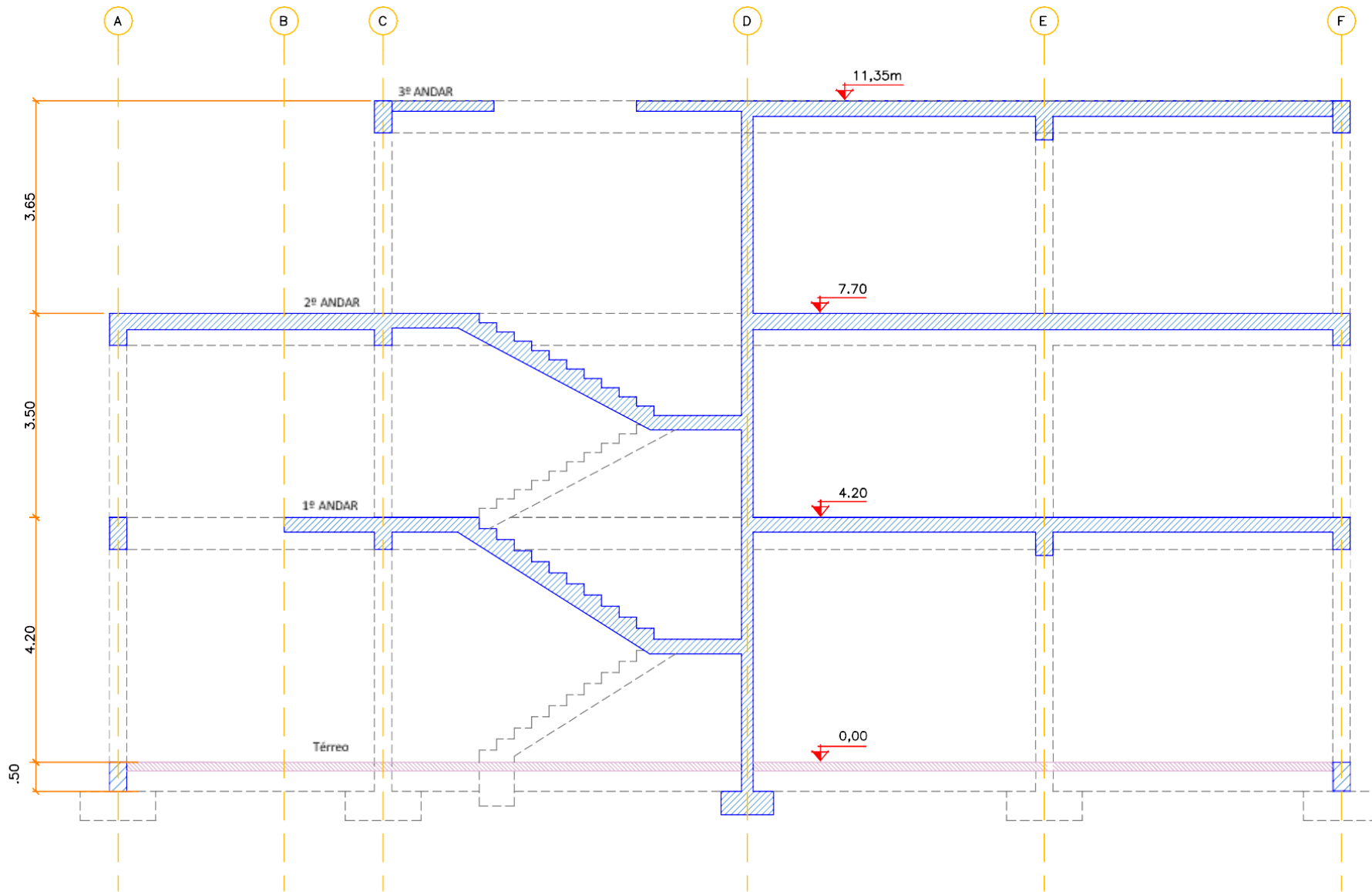
ANEXO A – PLANTAS E ELEVAÇÕES DO ESTUDO DE CASO











ANEXO B – MEMORIAL DE CÁLCULO

I INTRODUÇÃO

O memorial de cálculo foi executado para complementar a presente dissertação, de modo a simplificar e resumir as informações necessárias ao longo do texto.

II CARGAS (REFERENTES AO CAPÍTULO 4.1)

II.1 SOBRECARGA VENTO

Dentro do Capítulo 4.2 são explicados resumidamente os cálculos de vento, mostrando alguns quadros finais com seus resultados. Por isso, segue neste capítulo do memorial o cálculo detalhado do vento.

O vento foi calculado pelo Eurocódigo 1 (NP EN 1991-1-4, 2010), parte 4, referente a ações de vento. Para o cálculo da ação vento é necessário quantificar a sua velocidade no local. Esta velocidade é determinada pelas zonas que o Eurocódigo 1(NP EN 1991-1-4, 2010) estabelece, sendo elas:

- Zona A — a generalidade do território, exceto as regiões pertencentes à zona B;
- Zona B — os arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente, situadas numa faixa costeira com 5 Km de largura ou altitudes superiores a 600 m;

A estrutura analisada se localiza na cidade de Póvoa de Varzim, em Portugal. Por ser uma cidade costeira, a zona, onde a mesma se encontra, é a B que tem a velocidade estabelecida pelo Tabela B.1. No caso em análise, o período de retorno é de 50 anos, e, portanto, a velocidade de referência é multiplicada pelo fator 1,0.

Tabela B.1 – Valor básico de velocidade de referência (NP EN 1991-1-4, 2010).

Zona	$v_{b,0}$ [m/s]
B	30

As velocidades dos ventos e seus perfis também são afetadas pelos obstáculos do terreno. Por esse motivo, o Anexo Nacional do Eurocódigo 1 (NP EN 1991-1-4, 2010) categoriza os terrenos em cinco zonas. Acerca disso, a Tabela B.2 mostra a zona resultante do estudo de caso em análise.

Tabela B.2 – Categoria de terreno e seus parâmetros (NP EN 1991-1-4, 2010).

Categoria de terreno		z_0 [m]	z_{min} [m]
I	Zona costeira exposta aos ventos de mar	0,005	1

Sendo que:

- Z_0 – comprimento de rugosidade.
- Z_{min} – altura mínima a se considerar, abaixo desse valor a velocidade é constante.

Levando em consideração que o terreno se localiza em uma cidade costeira, adotou-se a categoria de terreno I. Além desses dois dados principais, alguns outros parâmetros serão citados durante o processo de cálculo. Entre estes parâmetros os primeiros a serem necessários são:

- C_{dir} – coeficiente relacionado à direção do vento, em geral $C_{dir}=1,0$. Somente quando a direção do vento for particular e com intensidade menor do que máximas adotadas no local, pode-se reduzir esse coeficiente;
- C_{season} – coeficiente de sazão relacionado a época do ano, com valor um para situações corriqueiras. Caso a construção ocorra entre maio e agosto do mesmo ano, pode-se reduzir esse coeficiente;
- $\rho=1,25 \text{ kg/m}^3$;
- C_s – ocorrência das pressões de pico sobre a superfície;
- C_d – efeito das vibrações da estrutura devidas a turbulências.

A multiplicação destes dois parâmetros $C_s C_d$ pode ser determinada de diversas formas descritas no Eurocódigo 1. Por nossa estrutura ser menor que 15,0 m, adota-se $C_s C_d=1,0$.

Agrupando todas as informações aqui descritas, tem-se que para esse caso os parâmetros adotados são:

- Categoria B;
- Calor básico da velocidade de referência do vento $V_{b,0} = 30 \text{ m/s} = 108 \text{ km/h}$;
- Terreno tipo I;
- $C_{dir}=1,0$;
- $C_{season}=1,0$;

- Não existem beirados;
- $\rho_{ar}=1,25 \text{ kg/m}^3$;
- $C_s C_d=1,0$ (para estruturas menores que 15 metros);

Com esses dados, calculou-se desde a velocidade de referência até as pressões resultantes do problema. Os primeiros cálculos foram os da velocidade de referência e da pressão dinâmica de referência, equações (2) e (3).

$$V_b = V_{b,0} * C_{season} * C_{dir} = 30 \text{ m/s} \quad (2)$$

$$q_b = \rho * V_b^2 / 2 = 1,25 * 30^2 / 2 = 0,5625 \text{ kN/m}^2 \quad (3)$$

O segundo cálculo foi o da pressão dinâmica de pico equação (4), referente à altura do edifício. Para o cálculo dessa pressão, deve-se levar em consideração o perfil de pressão dinâmica que é estabelecido conforme o Eurocódigo 1, na figura abaixo. O vento deve ser analisado nas direções x e y, sendo divididos em x+, x-, y+ e y-.

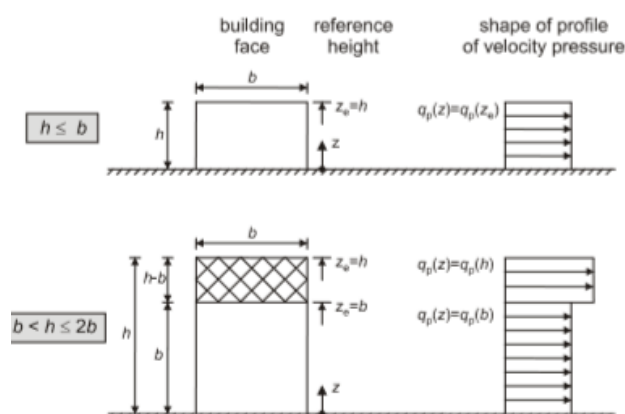


Figura B. 1 – Altura de referência z é determinada por meio de h e b , correspondente a perfil de pressão dinâmica na parede D barlavento (NP EN 1991-1-4, 2010).

Vento em y+ e y-:

O cálculo do vento em y foi executado conforme demonstrado abaixo.

- $\frac{h=11,35\text{m}}{b=21,00\text{m}} \therefore h < b \rightarrow$ altura de referência única $z = h = 11,35 \text{ m}$

O Terreno foi caracterizado como de tipo I, $z_0=0,005 \text{ m}$, $z_{\min}=1,0 \text{ m}$, e a equação de pressão dinâmica de pico é a descrita abaixo.

$$q_{p(z_e)} = C_e(z) * q_b \quad (4)$$

$$C_e = \left(1 + \frac{7}{\ln(z/z_0)}\right) * \left[0,19 * \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right]^2 \quad (5)$$

Onde:

- $C_e(z)$ é o coeficiente de exposição em função da altura calculado pela equação (5).

Levando em consideração o resultado de C_e igual a 2,976 e q_b igual a 0,562 kN/m², tem-se o resultado de $q_{p(ze)}$ de 1,674 kN/m². Para o cálculo das pressões finais foi usada a pressão de pico.

O terceiro passo após o cálculo da pressão de pico é calcular os coeficientes de pressões exteriores e interiores do edifício. A Tabela B.3 retirada do Eurocódigo 1 relaciona os valores da altura do prédio (h) com o comprimento paralelo a força do vento (d) do edifício.

Tabela B.3 – Valores dos coeficientes de pressão exterior (NP EN 1991-1-4, 2010).

Zona	D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	+0,8	+1,0	-0,7	
1	+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	+0,7	+1,0	-0,3	

Os coeficientes são relativos a áreas igual ou menores que 1 m² ($C_{pe,1}$) ou maior ou igual a 10 m² ($C_{pe,10}$).

Os valores de h e d foram retirados do Anexo A, sendo eles d=12,50m e h=11,35m.

- $h/d=11,35/12,5=0,908$;
- Parede D - $C_{pe,10} = 0,788$ (INTERPOLAÇÃO);
- Parede E - $C_{pe,10} = -0,475$ (INTERPOLAÇÃO).

Levando em consideração que a arquitetura pode optar por mais aberturas posteriormente ou mudanças, os coeficientes de pressão internos foram adotados como 0,20 para o caso “a” e -0,30 para o caso “b”, como indicado pelo Eurocódigo.

O último passo referente ao cálculo da força da pressão do vento na edificação é efetuado por meio da equação (6).

$$p_w = (C_{pe,10} + C_{pi}) * q_p * (z_e) \quad (6)$$

Caso “a”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a +0,20 (Figura B.2 e Figura B.3):

- $P_w 1 = 1,674 * (0,788-0,2) = 0,984$ kN/m²
- $P_w 2 = 1,674 * (0,475+0,2) = 1,130$ kN/m²

Caso “b”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a -0,30 (Figura B.2 e Figura B.3):

- $P_w 1 = 1,674 * (0,788+0,3) = 1,821$ kN/m²
- $P_w 2 = 1,674 * (0,475-0,3) = 0,295$ kN/m²

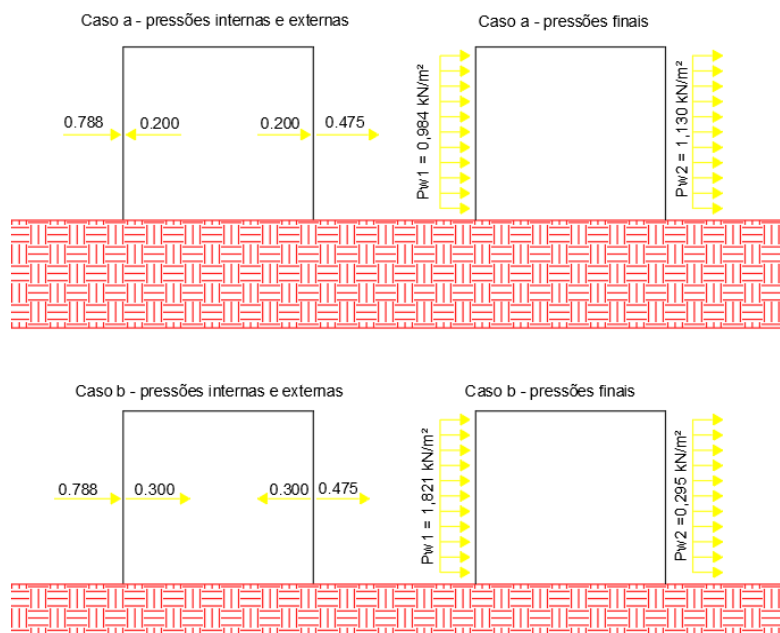


Figura B.2 – Coeficiente de pressões e pressão final calculada y+.

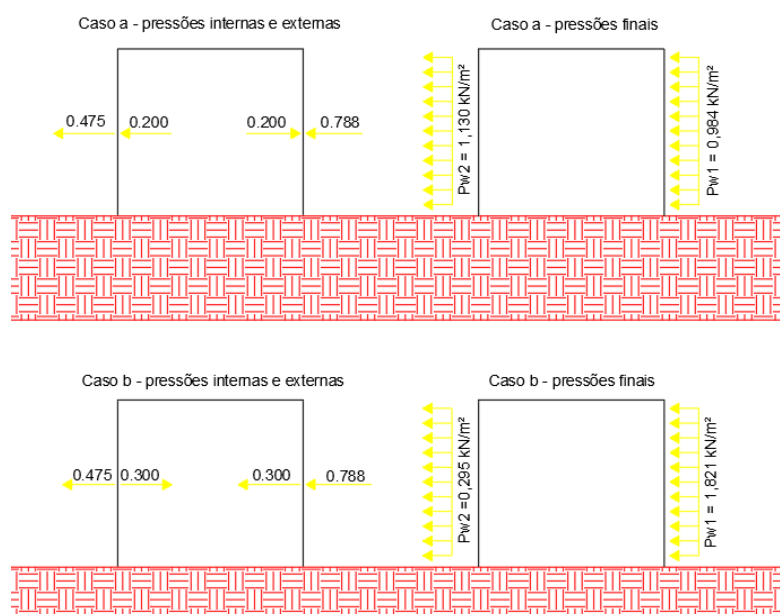


Figura B.3 – Coeficiente de pressões e pressão final calculada y-.

Vento em x+ e x-:

O cálculo do vento na direção x segue os mesmos passos executados para direção y.

- $\frac{h=11,35\text{m}}{b=12,50\text{m}} \therefore h < b \rightarrow$ altura de referência única $z=h = 11,35\text{m}$

O terreno foi caracterizado como de tipo I, $z_0=0,005\text{m}$ e $z_{\min}=1,0\text{m}$ (assim como para a direção y). O valor de C_e foi o mesmo já calculado pela equação (5). Como C_e é igual ao valor anterior, e o q_b também é o mesmo, o valor de $q_{p(z_e)}$ é igual ao da direção y.

- $q_{p(ze)} = 1,674 \text{ kN/m}^2$.

Seguindo os mesmos passos já demonstrados no cálculo na direção y, utilizou-se novamente a Tabela B.3, com intuito de obter os valores dos coeficientes de pressão exterior na direção x.

Novamente os coeficientes são relativos a áreas maiores ou iguais a 10 m^2 ($C_{pe,10}$). Os valores de h e d foram retirados do Anexo A, resultando em $d=21,00\text{m}$ e $h=11,35\text{m}$. Os coeficientes de pressão interna adotados foram os mesmos da direção y.

- $h/d=11,35/21,00=0,540$;
- Parede D $C_{pe,10} = 0,739$ (INTERPOLAÇÃO);
- Parede E $C_{pe,10} = -0,377$ (INTERPOLAÇÃO).

A partir dos valores dos coeficientes de pressão e $q_{p(ze)}$, calculou-se utilizando a equação (6) as pressões finais para $x+$ e $x-$.

Caso “a”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a $+0,20$ (Figura B.4 e Figura B.5):

- $P_{w-y 1} = 1,674 * (0,739-0,2) = 0,902 \text{ kN/m}^2$
- $P_{w-y 2} = 1,674 * (0,377+0,2) = 0,966 \text{ kN/m}^2$

Caso “b”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a $-0,30$ (Figura B.4 e Figura B.5):

- $P_{w-y 1} = 1,674 * (0,739+0,3) = 1,739 \text{ kN/m}^2$
- $P_{w-y 2} = 1,674 * (0,377-0,3) = 0,129 \text{ kN/m}^2$

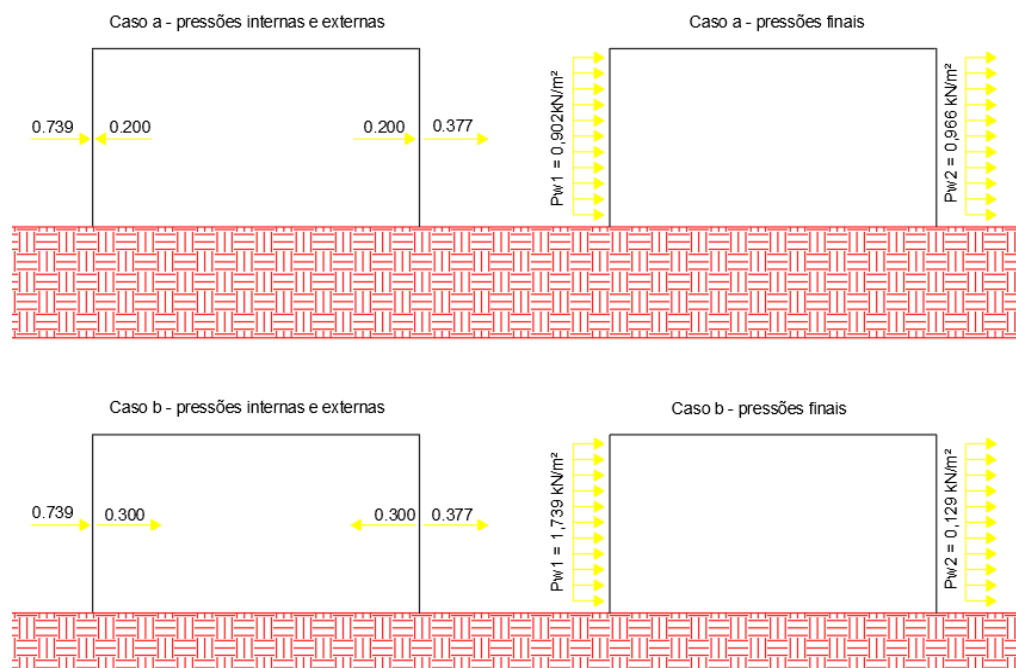


Figura B.4 – Coeficiente de pressões e pressão final calculada $x+$.

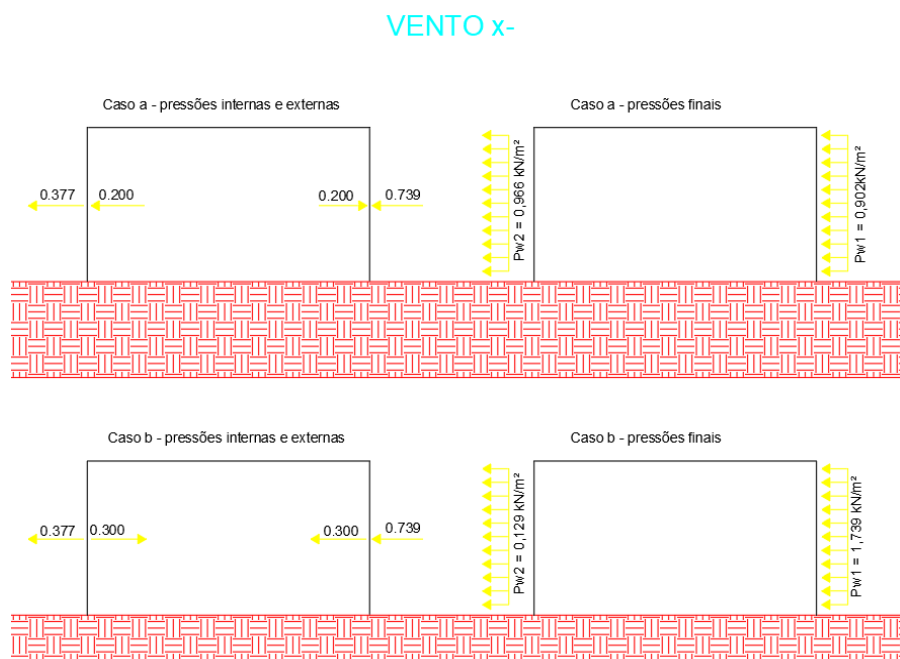


Figura B.5 – Coeficiente de pressões e pressão final calculada x-.

Transformação da carga em área para cargas nas vigas:

Pavimento 1 – ação do vento por carga linear nos eixos y+ e y-.

Caso “a”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a +0,20:

- $Pv,1 = Pw\ 1 * (2,10 + 1,75) = 3,788 \text{ kN/m}$
- $Pv,2 = Pw\ 2 * (2,10 + 1,75) = 4,350 \text{ kN/m}$

Caso “b”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a -0,30:

- $Pv,1 = Pw\ 1 * (2,10 + 1,75) = 7,011 \text{ kN/m}$
- $Pv,2 = Pw\ 2 * (2,10 + 1,75) = 1,136 \text{ kN/m}$

Pavimento 2 – ações do vento por carga linear nos eixos y+ e y-:

Caso “a”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a +0,20:

- $Pv,1 = Pw\ 1 * (1,75 + 1,825) = 3,518 \text{ kN/m}$
- $Pv,2 = Pw\ 2 * (1,75 + 1,825) = 4,040 \text{ kN/m}$

Caso “b”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a -0,30:

- $Pv,1 = Pw\ 1 * (1,75 + 1,825) = 6,510 \text{ kN/m}$
- $Pv,2 = Pw\ 2 * (1,75 + 1,825) = 1,054 \text{ kN/m}$

Cobertura de ação do vento por carga linear nos eixos y+ e y-:

ANEXO

Caso “a”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a +0,20:

- $P_{v,1} = P_w 1 * (1,825) = 1,796 \text{ kN/m}$
- $P_{v,2} = P_w 2 * (1,825) = 2,062 \text{ kN/m}$

Caso “b”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a -0,30:

- $P_{v,1} = P_w 1 * (1,825) = 3,323 \text{ kN/m}$
- $P_{v,2} = P_w 2 * (1,825) = 0,538 \text{ kN/m}$

Pavimento 1 – ação do vento por carga linear nos eixos x+ e x-:

Caso “a”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a +0,20:

- $P_{v,1} = P_w 1 * (2,10+1,75) = 3,473 \text{ kN/m}$
- $P_{v,2} = P_w 2 * (2,10+1,75) = 4,350 \text{ kN/m}$

Caso “b”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a -0,30:

- $P_{v,1} = P_w 1 * (2,10+1,75) = 6,695 \text{ kN/m}$
- $P_{v,2} = P_w 2 * (2,10+1,75) = 0,497 \text{ kN/m}$

Pavimento 2 – ações do vento por carga linear nos eixos x+ e x-:

Caso “a”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a +0,20:

- $P_{v,1} = P_w 1 * (1,75+1,825) = 3,225 \text{ kN/m}$
- $P_{v,2} = P_w 2 * (1,75+1,825) = 3,453 \text{ kN/m}$

Caso “b”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a -0,30:

- $P_{v,1} = P_w 1 * (1,75+1,825) = 6,217 \text{ kN/m}$
- $P_{v,2} = P_w 2 * (1,75+1,825) = 0,461 \text{ kN/m}$

Cobertura – ação do vento por carga linear nos eixos x+ e x-:

Caso “a”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a +0,20:

- $P_{v,1} = P_w 1 * (1,825) = 1,646 \text{ kN/m}$
- $P_{v,2} = P_w 2 * (1,825) = 1,763 \text{ kN/m}$

Caso “b”, utilizando coeficiente de pressão interna igual a -0,30:

- $P_{v,1} = P_w 1 * (1,825) = 3,174 \text{ kN/m}$
- $P_{v,2} = P_w 2 * (1,825) = 0,235 \text{ kN/m}$

III DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO DAS LAJES (REFERENTE AO CAPÍTULO

4.6)

O cálculo das lajes maciças tem base no cálculo de elementos à flexão, sendo, para efeito, calculadas por metragem (equivalente a “viga” de 1,00m de largura). O dimensionamento começa por definir como a laje trabalha e seus apoios, que depende do seu tamanho e de seu contorno, respectivamente. Por definição, as lajes atuam em uma direção só quando l_y (menor lado da laje) é duas vezes menor que l_x ou quando a mesma está bi apoiada (Félix, Guedes e Neves, 2014). O fato de ser armada em uma só direção não exclui a armadura na outra; uma armadura de distribuição (construtiva) deve ser disposta na laje, conforme indicam Félix; Guedes e Neves (2014). A área desta armadura de distribuição é sempre 20% referente a armadura principal.

Os tipos de apoios são definidos como contínuos (engaste parcial dependendo da laje que gera a continuidade), engaste ou apoio simples. Em caso de apoios contínuos, as armaduras negativas devem transpassar de uma laje para outra.

Para a armação principal, nos apoios inferiores deve-se chegar com 50% da armadura inferior do vão. Já nos apoios do tipo engastamentos parciais e engastamentos de momentos negativos, este valor é igual ao utilizado nas vigas, devendo prever-se armação que aguarde 15% do momento do vão. As armaduras negativas dos apoios devem ter o comprimento a partir do eixo de $0,30 \cdot l_y$, e as positivas podem reduzir a área da armação a $0,20 \cdot l_y$ do apoio, ou seja, os 50 % que vão para o apoio devem apenas estar a $0,20 \cdot l_y$ do eixo da laje. As armação principais devem respeitar a armadura mínima calculada pelo maior valor entre equações (12) e (13), e também deve respeitar a armadura máxima calculada pela equação (14). Os espaçamentos máximos das lajes são diferentes para as armaduras principais e a de distribuição, detalhadas por zonas de maior ou menor esforço. Os espaçamentos em zonas de maiores esforços (momentos máximos ou cargas concentradas) foram denominados $e_{z. Crítica}$ enquanto que nas zonas de menores esforços os espaçamentos foram denominados $e_{z. Geral}$. Um resumo dos espaçamentos foi feito na tabela abaixo.

Tabela B.4 – Espaçamento máximo em lajes (Félix, Guedes e Neves, 2014).

Espaçamentos	Armaduras principais	Armaduras de distribuição
$e_{z. Crítica}$	2h Máx.250mm	3h Máx.400mm
$e_{z. Geral}$	3h Máx.400mm	3,5h Máx.450mm

O esforço transversal deve ser verificado nas lajes, assim como nas vigas. O cálculo tem algumas diferenças e é utilizado com as equações (7) a (11).

$$CR_{d,c} = 0,18/\gamma_c \quad (7)$$

$$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2 \quad (8)$$

$$\rho_l = A_{ls}/(b_w * d) \leq 0,02 \quad (9)$$

$$VR_{d,c} = CR_{d,c} * k * (100 * \rho_l * f_{ck})^{2/3} * b_w * d \quad (10)$$

$$VR_{d,c} \geq 0,035 * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2} * b_w * d \quad (11)$$

Complementar as armaduras principais, distribuídas e de esforço transversal também é necessário verificar se é preciso a utilização de armadura de canto (Figura B.6). Esta armadura é necessária em apoios com liberdade de rotação (apoio fixo ou móvel), pois a flexão das lajes gera uma rotação nos apoios que acabam com tendência de levantar, gerando momento *mxy torsor* na região do canto. A área de armação para ambas direções deve ser igual ou superior a armadura do momento máximo do vão.

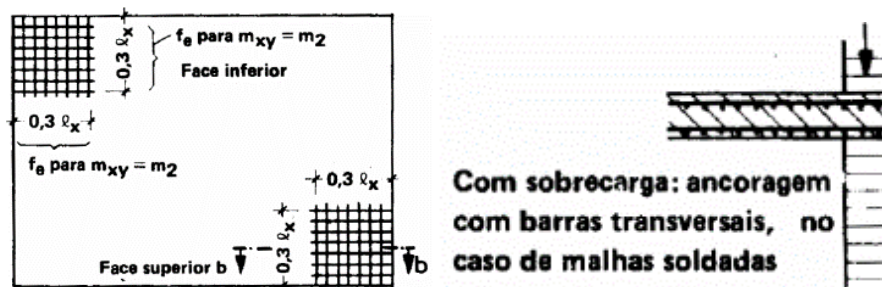


Figura B.6 – Exemplo de armação de canto com corte b-b ao lado direito (Félix, Guedes e Neves, 2014).

Informações adicionais de construção das lajes maciças:

- Espaçadores a cada 0,50m;
- Cavalete de diâmetro 10mm.

IV DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS (REFERENTE AO CAPÍTULO 4.7)

O cálculo da armadura longitudinal foi executado por meio do cálculo orgânico (cálculo com os domínios), não constando nenhuma novidade, e, por isso, não será aqui representado.

A armadura longitudinal mínima foi calculada pelo Eurocódigo 2, seção 9, que a define com uma armadura para controlar as fissurações e evitar a rotura frágil da seção de concreto (equações (12) e (13)). Já a armadura máxima é definida pela equação (14). No caso de armaduras construtivas, não é necessário levar em consideração a armadura mínima.

$$A_{s,min} = 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b * d \quad (12)$$

$$A_{s,\min} > 0,0013 \cdot b \cdot d \quad (13)$$

$$A_{s,\max} = 0,04 A_c \quad (14)$$

Também baseado no Eurocódigo 2, o cálculo dos estribos é fundamentado em duas equações (15) e (16) [consequentemente a (17)]. Para o cálculo dos mesmos serão necessários os dados da $\alpha_{cw}=1,0$ para concretos não pré-esforçado, $z=0,90 \cdot d$, $\cotg\theta$ e $d = h - 0,05$. Um resumo desses dados, é disposto no cálculo de todas as vigas no Capítulo 4.7.

$$VR_{d,s} = (A_{sw}/s) \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta \quad (15)$$

$$VR_{d,\max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta) \quad (16)$$

$$v_1 = 0,6 \cdot [1 - (f_{ck}/250)] \quad (17)$$

O primeiro passo para o cálculo dos estribos é verificar se, adotando uma $\cot\theta = 2,5$, o $VR_{d,\max}$ é maior que o esforço transversal atuante. Utilizando a equação (16), calcula-se o valor de $VR_{d,\max}$. Após a verificação do esforço transversal atuante, calcula-se a área de estribo necessária para suportar esse esforço. A equação que foi utilizada para esse cálculo é a (15), em que o valor de $VR_{d,s}$ foi adotado como V_{ed} . Com a armadura calculada deve-se verificar se a porcentagem de estribos na seção é maior que a mínima exigida pelo Eurocódigo pelas equações (18) e (19).

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s} \cdot \frac{1}{b_w \cdot \sin\alpha} \quad (18)$$

$$\rho_{w,\min} = \frac{(0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}})}{f_{yk}} \quad (19)$$

Depois do dimensionamento da armadura, calculam-se os espaçamentos necessários para o estribo, equações (20) e (21).

$$s_{l,\max} = 0,75 \cdot d \cdot (1 + \cotg) \quad (20)$$

$$s_{t,\max} = 0,75 \cdot d \leq 600 \text{mm} \quad (21)$$

O valor de $s_{t,\max}$ atende à largura da seção, portanto, serão suficientes 2 ramos por estribo. O espaçamento máximo, apesar de ter resultado em 0,37m, se adotou 0,30m como indicado em várias metodologias de cálculo utilizadas.

IV.1 DISTRIBUIÇÃO DA ARMAÇÃO EM VIGAS

A distribuição da armadura nas vigas segue a sequência de cálculo: verificar os espaçamentos dos varões; executar a decalagem calculando $l_{b,rqd}$ e a_l ; amarração nos apoios extremos e intermediários; e emenda das barras.

O espaçamento entre varões é calculado segundo a equação (22) e a decalagem é feita utilizando os valores de amarração da barra ($l_{b,rqd}$ descrito na Tabela B.5) e al.

$$Ch \text{ ou } Cv \geq \begin{cases} \phi \\ dg+5mm \\ 20mm \end{cases} \quad (22)$$

A Tabela B.5 tem como parâmetros a resistência do concreto do projeto (30 MPa), do aço (500 MPa) e se a armadura se localiza em local de má ou boa aderência. Para as armaduras localizadas nos momentos positivos, em que normalmente o concreto é considerado de boa aderência, o valor de $l_{b,eq}$ é de $35 * \phi$. Já para locais com momentos negativos, considerado normalmente má aderência, o $l_{b,eq}$ será de $50 * \phi$. O valor de al simplificado é de $al = 1,125 * d$.

Tabela B.5 – Tabela de $l_{b,req}$ (Félix, 2010).

f_{yk} [MPa]	(*)	f_{ck} [MPa]								
		12	16	20	25	30	35	40	45	50
400	A	55Ø	45Ø	35Ø	30Ø	30Ø	25Ø	25Ø	20Ø	20Ø
	B	75Ø	60Ø	55Ø	45Ø	40Ø	35Ø	35Ø	30Ø	30Ø
500	A	65Ø	55Ø	45Ø	40Ø	35Ø	30Ø	30Ø	25Ø	25Ø
	B	95Ø	80Ø	65Ø	60Ø	50Ø	45Ø	40Ø	40Ø	35Ø
600	A	80Ø	65Ø	55Ø	50Ø	45Ø	40Ø	35Ø	35Ø	30Ø
	B	115Ø	95Ø	80Ø	70Ø	60Ø	55Ø	50Ø	45Ø	45Ø

(*) A – Condições de boa aderência; B – Condições de fraca aderência.

Para amarrações curvas em tração estes valores podem ser multiplicados por $\alpha_1 = 0.7$

Seguindo o descrito por norma, a partir do comprimento de amarração equivalente multiplicando o mesmo por α_1 , pode-se encontrar o comprimento de amarração de referência. Como $\alpha_1 = 1,0$ nos casos analisados, $l_{b,eq}$ vai ser igual a $l_{b,rqd}$. Ainda assim, o $l_{b,rqd}$ não é o comprimento de amarração de cálculo (l_{bd}). Para encontrar l_{bd} , é necessário utilizar a equação (23) que depende da equação (24) utilizada para varões tracionados e a equação (25) para varões comprimidos.

$$l_{bd} = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * l_{b,rqd} \geq l_{b,min} \quad (23)$$

$$l_{b,min} > \text{máx}\{ 0,3 * l_{b,rqd}; 10 * \phi; 100mm \} \quad (24)$$

$$l_{b,min} > \text{máx}\{ 0,6 * l_{b,rqd}; 10 * \phi; 100mm \} \quad (25)$$

Os alfas da equação de l_{bd} são dispostos no quadro 8.2 do EC2, em que é detalhado os valores usados de cada alfa. Neste caso, todos tiveram fator de 1,0 ou não eram aplicáveis ao projeto.

Com esses dados, foi possível executar a decalagem das vigas (Anexo D) e as amarrações, sendo que a dos apoios se dividem em diferentes tipos. A primeira é a amarração de armadura positiva nos apoios extremos, que deve ser feita com uma armação que aguarde no mínimo 25% do valor do momento no meio do vão ou a armadura mínima calculada para o projeto. Para simplificar os cálculos, foi utilizado 25%

da armadura e não do momento, deixando claro que esta adoção está do lado da segurança e não descumpra a norma.

Outro detalhe é que para os apoios extremos, segundo o Eurocódigo , é necessário a partir da face interior do apoio o varão entrar a distância de $l_{b,rqd}$. No caso de o apoio ser menor que $l_{b,rqd}$, é necessário amarração com dobra. A dobra deve cumprir o diâmetro mínimo de dobragem calculado pela Tabela B.6, em que é necessário ter os dados de resistência do concreto, tipo de aço e o valor a_b . A definição de a_b é descrita por Carlos Félix (2010) como: “metade da distância entre eixos de varões medida na perpendicular ao plano de dobragem. Para varões próximos do paramento do elemento, a_b é dado pelo cobrimento acrescido de $\phi/2$.”

Tabela B.6 – Diâmetro mínimo do mandril $\phi_{m,min}$ (Félix, 2010).

f_{yk} [MPa]	a_b	f_{ck} [MPa]								
		12	16	20	25	30	35	40	45	50
400	2Ø	34Ø	26Ø	20Ø	16Ø	14Ø	12Ø	10Ø	9Ø	8Ø
	4Ø	26Ø	19Ø	15Ø	12Ø	10Ø	9Ø	8Ø	7Ø	6Ø
	8Ø	21Ø	16Ø	13Ø	10Ø	9Ø	7Ø	6Ø	6Ø	5Ø
500	2Ø	43Ø	32Ø	26Ø	20Ø	17Ø	15Ø	13Ø	11Ø	10Ø
	4Ø	32Ø	24Ø	19Ø	15Ø	13Ø	11Ø	10Ø	9Ø	8Ø
	8Ø	27Ø	20Ø	16Ø	13Ø	11Ø	9Ø	8Ø	7Ø	6Ø
600	2Ø	51Ø	38Ø	31Ø	25Ø	20Ø	18Ø	15Ø	14Ø	12Ø
	4Ø	38Ø	29Ø	23Ø	18Ø	15Ø	13Ø	12Ø	10Ø	9Ø
	8Ø	32Ø	24Ø	19Ø	15Ø	13Ø	11Ø	10Ø	9Ø	8Ø

(*) Admitindo a tracção máxima na armadura no início da parte curva.

A segunda amarração é nos apoios centrais (intermediários), em que é normal se executar as amarrações por barras retas sem as dobras dos extremos, conforme indica a Figura B.7.

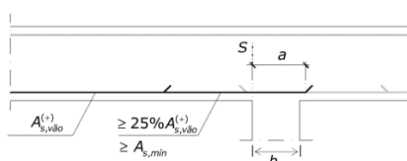


Figura B.7 – Apoio intermediário (Félix, Guedes e Neves, 2014).

A terceira amarração é a das barras negativas em apoios dos extremos. Assim como para a amarração em extremos positivos, a armação dos varões negativos também tem um mínimo de armação que deverá continuar até os apoios. Este mínimo é de uma armação que agüente 15 % do momento do vão.

A Figura B.8 demonstra o mínimo que a armação negativa deve ter de comprimento após a dobra do varão, o quanto este varão deve entrar no apoio e a distância que essa deve percorrer antes de acabar. O valor

de a_1 é calculado pela equação abaixo. Os outros valores são conhecidos e o valor de “ a ” pode ser considerado como o comprimento da decalagem $a_1 + l_{bd}$.

$$a_1 = \max \{ b, 2 \cdot d \} \quad (26)$$

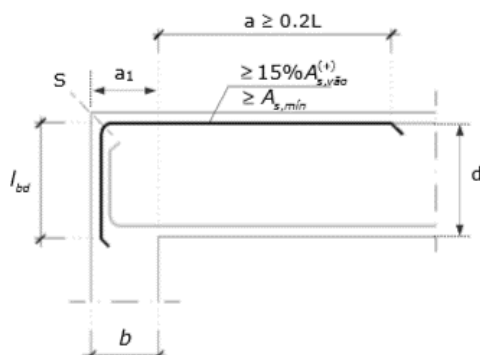


Figura B.8 – Armadura do apoio (Félix, Guedes e Neves, 2014).

Nos locais onde haja sobreposição de comprimento de amarração das barras, ou barras maiores que 12m de comprimento, é necessário executar emendas por sobreposição (Figura B.9). Essas devem atender altura entre os varões sobrepostos de $4 \cdot \phi$ e comprimento de sobreposição (l_0), conforme a equação (27) e (28).

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{b,min} \quad (27)$$

$$l_{0,min} \geq \{ 0,3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd}; 15 \cdot \phi; 200m \} \quad (28)$$

Novamente, os valores de alfa são todos 1,0 excetos α_6 . O fator α_6 depende da porcentagem de emendas que são executadas em um espaço de $1,20 \cdot l_0$. No cálculo manual, α_6 foi adotado como pior caso 1,50, que consiste em uma emenda no intervalo, ou seja, 100% das emendas estão naquele intervalo (Tabela B.7).

Tabela B.7 – Valores de α_6 .

Porcentagem de varões sobrepostos em relação à área total da secção transversal	< 25 %	33 %	50 %	>50 %
α_6	1	1,15	1,4	1,5

NOTA: Valores intermédios poderão ser obtidos por interpolação.

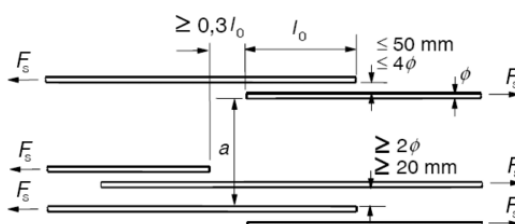


Figura B.9 – Comprimento de transpasse (Félix, Guedes e Neves, 2014).

V DIMENSIONAMENTO DOS PILARES (REFERENTE AO CAPÍTULO 4.8)

Seguindo as indicações de Manuel de Azeredo (1998) e do Eurocódigo 2, calculou-se os pilares conforme as diretrizes detalhadas abaixo.

O primeiro cálculo a ser executado é o do comprimento efetivo de encurvadura (l_0). Segundo Azeredo, o comprimento efetivo é resultado da multiplicação entre o comprimento livre (l) e o fator que depende das condições das suas extremidades (η). O valor de l foi encontrado na própria elevação do Anexo A, sendo para o primeiro andar 4,70m, para o segundo 3,50m e para o terceiro 3,65m. O valor do fator η depende dos parâmetros α_1 e α_2 . Cada alfa é correspondente a uma extremidade do pilar, sendo eles a relação entre a soma de rigidez de flexão dos pilares e a soma de rigidez de flexão das vigas que ocorrem no nó analisado. A escolha da equação de η depende de o fator da estrutura ter nós móveis ou fixos.

Azeredo define com uma frase os tipos de nós de uma estrutura: “*Consideram-se como estruturas de nós fixos aquelas cujos nós, sob efeito dos valores de cálculo das acções, sofrem deslocamentos horizontais de valor desprezável; em caso contrário, as estruturas são consideradas como estruturas de nós móveis*” (Azeredo, 1998).

Por meio de tipos de deslocamentos usuais, o autor definiu padrões próximos de como seriam os deslocamentos para nós fixos e móveis. No caso dos pilares em estudo, os gráficos de deformação da estrutura são compatíveis com as imagens “b” e “c” da Figura B.10 de deformações usuais de nós fixos.

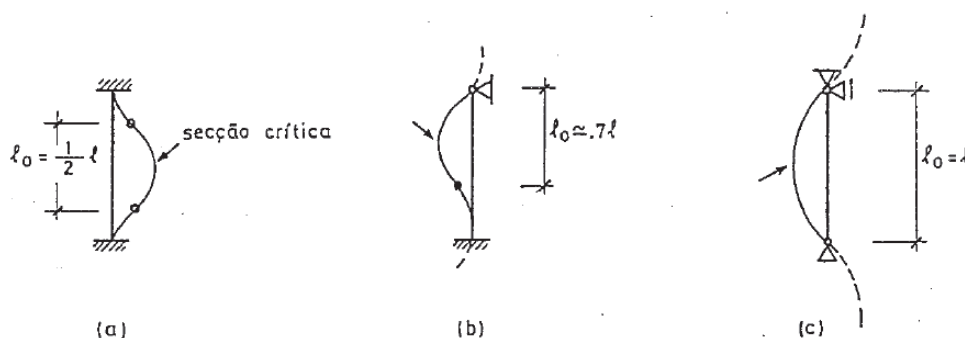


Figura B.10 – l_0 em relação a cada tipo de apoio (Azeredo, 1998)

A verificação utilizada para o cálculo de nós leva em consideração os fatores de rigidez de flexão dos elementos ($E_c \cdot I$), os esforços nominais totais (N_{tot}) e a altura total do edifício (h_{tot}). O limite para saber se os nós são móveis ou fixos é denominado de η , porém, como essa letra já foi utilizada no fator multiplicam-te por l , utilizou-se a letra κ no lugar. Abaixo, seguem as equações para o cálculo do limite κ e do fator correspondente aos deslocamentos do nó analisado. Os valores de E_{cm} são retirados do EC2 com base no concreto utilizado no projeto, o restante é calculado.

ANEXO

$$\kappa = 0,2 + 0,1 * \text{número de andares do res do chão (x)} \quad (29)$$

$$h * \sqrt{N / (E_c I)} \leq \kappa \quad (30)$$

Sendo que:

- $E_c = E_{cm} * 1,05$;
- $I = bh^3/12$ ou $d^4 * \pi / 64$.

Caso os nós sejam fixos, deve-se usar as equações de η 31 e 32, e para nós móveis as equações 33 e 34 (valor de η é o menor resultado entre as equações). Nas equações abaixo, α_{\min} é o menor valor entre os dois alfas calculados.

$$\eta = 0,7 + 0,05 * (\alpha_1 + \alpha_2) \leq 1,0 \quad (31)$$

$$\eta = 0,85 + 0,05 * \alpha_{\min} \leq 1,0 \quad (32)$$

$$\eta = 1,0 + 0,15 * (\alpha_1 + \alpha_2) \quad (33)$$

$$\eta = 2,0 + 0,3 * \alpha_{\min} \quad (34)$$

Os alfas para engastamentos parciais são definidos como 1, para engastamentos perfeitos são definidos como 0 e para fundações que não assegurem a transmissão de momentos são definidos como 10. Calculou-se todos os parâmetros já citados acima e alguns outros que serão explicados para o pilar 1. Os pilares foram divididos por trechos para a análise dos alfas e esbeltez.

Com o valor de l_0 se calcula a esbeltez do pilar (λ). Além de l_0 , o valor de λ depende também do h do pilar, sendo sua equação a 35. O limite de esbeltez é definido dependendo novamente dos tipos de nós das estruturas: para nós fixos esse limite é calculado conforme a equação 36 e para nós móveis λ_{\lim} é definido como 35. Comparando a esbeltez limite com a calculada, é definido se o pilar sofre ou não com excentricidade de segunda ordem. No caso, para existir excentricidade de segunda ordem a esbeltez calculada pela equação 35 deve ser maior que a calculada pela equação 36, ou, no caso de nós móveis, que o limite de 35. Nos casos com excentricidade de segunda ordem, calculou-se essas a partir das equações 37, 38 e 39.

Além disso, ainda se verificou a existência de excentricidade por fluência (ec) e a excentricidade acidental (ea). A segunda é calculada como $l_0/300$ no caso de l ser menor que 6,00m (todos os casos analisados no trabalho).

Para excentricidade por fluência, o limite de esbeltez que deve ser adotado é 70. No projeto em análise, a excentricidade por fluência não influenciou o cálculo dos pilares.

O cálculo da armação dos pilares é feito utilizando as equações 40, 41 e 42. Os primeiros fatores dependem da força normal e dos momentos finais atuantes no pilar, que serão calculados de diferentes

maneiras. Para todos os tipos de nós, caso não exista efeito de segunda ordem, deve-se utilizar pior combinação entre os três pontos (topo, base e centro) para o cálculo do pilar.

Por outro lado, se o pilar sofrer com os efeitos de segunda ordem, deve-se para pilares de nós fixos adotar o maior momento entre os de extremidade, e uma posição intermédia que recebe o efeito de segunda ordem. Para calcular o momento no centro do pilar de nó fixo, deve-se utilizar o maior valor entre as equações 43 e 44. O cálculo do momento final intermédio do pilar, em caso de efeito de segunda ordem em nós fixos, é executado pelo momento calculado numa posição intermédia do pilar somado ao valor da normal multiplicada pela excentricidade total calculada.

Para os nós móveis, a execução final do processo é a mesma, porém, esta multiplicação da normal com a excentricidade total é somada com o maior momento das extremidades. Levando em conta os momentos finais calculados (topo, base e centro), deve-se, então, escolher a pior combinação. Os momentos são utilizados para o cálculo do μ (equação 40), que tem a função de ser correlacionado com o fator v (equação 41) para se encontrar o fator ω (equação 42). Percebe-se que na equação 42, com o valor de ω retirado das tabelas e ábacos (Barros e Figueiras, 2007), é possível isolar A_s e calcular a área de aço necessária para o pilar.

$$\lambda = l_0 / i \quad (35)$$

$$\lambda_{lim} = 50 - 15 * M_{sd} \text{ (menor)} / M_{sd} \text{ (maior)} \quad (36)$$

$$e_2 = (1/r) * l_0^2 / 10 \quad (37)$$

$$1/r = 5 * 10^{-3} * n / h \quad (38)$$

$$n = 0,40 * f_{cd} * A_c / N_{sd} \quad (39)$$

$$\mu = M_{rd} / (b * h^2 * f_{cd}) \quad (40)$$

$$v = N_{rd} / (b * h * f_{cd}) \quad (41)$$

$$\omega = A_s * f_{yd} / (b * h * f_{cd}) \quad (42)$$

$$M_{Sd} = 0,6 * M_{Sd,a} + 0,40 * M_{Sd,b} \quad (43)$$

$$M_{Sd} = 0,40 * M_{Sd,a} \quad (44)$$

Sendo que das equações acima:

- b e h são referentes a dimensão do pilar;
- a_{min} é a menor dimensão do pilar;
- ϕ diâmetro dos varões longitudinais;
- $i = \sqrt{I / \text{Área}}$;

- MSd,a maior momento entre as duas extremidades em módulo;
- MSd,b menor momento em módulo.

As armaduras calculadas devem ser comparadas com a área mínima de aço e máximas, por meio das equações 45 e 46, respectivamente. Com a armação calculada, foi necessário calcular também as cintas e seus espaçamento, a partir das equações 47 ,48 e 49.

$$A_{s,min} = 0,10 * N_{ed} / f_{yd} \text{ ou } 0,002 * A_c \quad (45)$$

$$A_{s,máx} = 0,04 * A_c \quad (46)$$

$$\phi_c \geq \begin{cases} 6\text{mm} \\ \frac{1}{4} * \phi_{l,máx} \end{cases} \quad (47)$$

$$s \leq \begin{cases} 20 * \phi_{l,min} \\ a_{min} \\ 400\text{mm} \end{cases} \quad (48)$$

$$s \leq \begin{cases} 12 * \phi_{l,min} \\ 0,60 * a_{min} \\ 180\text{mm} \end{cases} \quad (49)$$

V.I DISTRIBUIÇÃO DA ARMAÇÃO EM PILARES (REFERENTE AO CAPÍTULO 4.8)

Os parâmetros para detalhamento da armadura do pilar são parecidos com os das vigas. Os valores de l_{bd} e l_0 (comprimento da emenda não do pilar) são calculados da mesma maneira, considerando boa aderência desses. A Figura B.11 representa como o detalhamento dos pilares deve proceder no encontro com as fundações, já a Figura B.12 indica como as zonas de emendas devem ser executadas (tramo a tramo no topo ou base do pilar). Porém, na literatura base utilizada para distribuição da armadura (de onde essas figuras foram retiradas), há uma observação sobre as emendas que, inclusive, cita a Figura B.12 (Figura 13.49 no texto), posta da seguinte forma:

“Refira-se ainda que, não obstante o esquematizado na Figura 13.49, as emendas e interrupções da armadura longitudinal devem ser preferencialmente localizadas a meia altura dos pilares, especialmente se se pretende obter um melhor comportamento da estrutura as ações sísmicas. As emendas das armaduras nas zonas dos nos, sendo muito praticas do ponto de vista da execução, fragilizam esta zona considerada crítica, por serem máximos os esforços de corte. Daí também se recomendar que não seja interrompida a armadura transversal do pilar, mesmo na zona de inserção com as armaduras da viga ou da laje” (Félix, Guedes e Neves, 2014).

Devida a essas observações, foram executadas emendas no meio do pilar 15, para obter-se uma diferença de execução entre o Robot e o cálculo manual, quando levado em conta o sismo ou não.

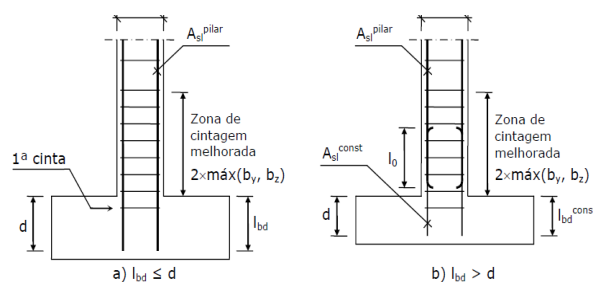


Figura B.11 – Detalhamento da armação dos pilares (Félix, Guedes e Neves, 2014).

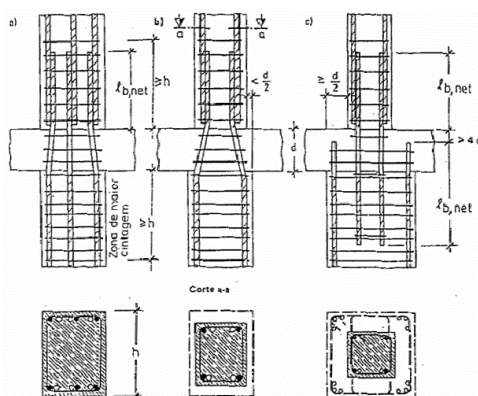


Figura B.12 – Zonas de cintagem e ligação entre vigas e lajes (Félix, Guedes e Neves, 2014).

As cintas dos pilares devem ser executadas de modo que o fechamento tenha as dimensões da Figura B.13.

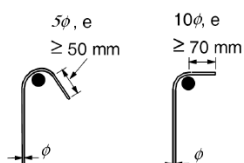


Figura B.13– Fechamento de estribos (Félix, Guedes e Neves, 2014).

V.II COMPARAÇÃO ENTRE REBAP E RSA E O EC2 (REFERENTE AO CAPÍTULO 4.8)

Pelo fato de os pilares utilizarem duas metodologias diferentes de cálculo, analisou-se os possíveis pontos que poderiam gerar diferenças entre os dimensionamentos.

A primeira etapa de cálculo dos pilares, que é calcular o comprimento efetivo (l_0) e o comprimento livre, tem entre o Eurocódigo e o livro de Azeredo (baseado no REBAP e no RSA) algumas diferenças, pois o cálculo do fator η , que multiplica l_0 para se encontrar l , é executado de maneira distinta. O EC2 calcula o

fator de multiplicação do comprimento efetivo por meio das fórmulas 5.15 e 5.16, do Capítulo 5.8.3.2, do EC2.

O conceito é muito próximo, ambas as metodologias levam em consideração a flexibilidade das extremidades. Ao dimensionar pelo Robot, se impôs um valor de η a fim de diminuir as diferenças entre os dimensionamentos (Capítulo 5.4). Portanto, o valor de l encontrado no *software* e na planilha Excel são iguais por adaptação do usuário. Por consequência, como a esbeltez é calculada da mesma maneira em ambos os métodos, também resultou nos mesmos valores em ambos dimensionamentos.

Com a esbeltez calculada, o próximo passo é calcular a esbeltez limite para analisar se há ou não efeito de segunda ordem. O modo que a esbeltez limite é calculada é consideravelmente diferente entre ambos os métodos. Toda metodologia do REBAP e RSA está descrita no Capítulo 5, portanto, não será novamente abordada. O cálculo pelo Eurocódigo utiliza a equação 50, que é descrita abaixo.

$$\lambda_{lim} = 20 * A * B * C / \sqrt{n} \quad (50)$$

Sendo que:

- $n = N_{ed} / (A_c * f_{cd})$; esforço normal reduzido;
- φ_{ef} = coeficiente de fluência efetivo;
- $\omega = A_s * f_{yd} / (A_c * f_{cd})$; taxa mecânica de armadura;
- $r_m = M_{01} / M_{02}$; razão de momentos;
- A_s = área total da seção das armaduras longitudinais;
- $A = 1 / (1 + 0,2\varphi_{ef})$, sendo que se φ_{ef} não é conhecido, pode-se adotar $A=0,7$;
- $B = \sqrt{1 + 2 * \omega}$, sendo que se ω não é conhecido pode-se adotar $B=1,1$;
- $C = 1,7 - r_m$; sendo que se r_m não é conhecido pode-se adotar $C=0,70$.

A diferença de limite da esbeltez faz com um dos dimensionamentos possa ter excentricidade de segunda ordem, enquanto que o outro não. Um dos exemplos é o primeiro trecho do pilar P1, em que no cálculo manual se considerou excentricidade em y e no Robot não (ocorreram em outros trechos de outros pilares também).

Após verificar se existe ou não excentricidade de segunda ordem no pilar, são calculadas as outras que podem influenciá-lo. Uma dessas é a excentricidade acidental, devido a imperfeições geométricas. No REBAP e RSA, essa excentricidade varia de acordo com o tamanho do pilar, sendo adotado um valor fixo de 20mm ou $l_0/300$. Já no EC2, o cálculo dessa é um pouco mais complexo, e pode ser considerado apenas para a direção mais desfavorável do pilar. Além do comprimento da estrutura, também são levadas em

consideração as imperfeições geométricas representadas por uma inclinação (Θ_i). A equação abaixo mostra como é calculada a excentricidade acidental pelo EC2.

$$e_i = \Theta_i * l_0 / 2 \quad (51)$$

Ainda no Eurocódigo, calculam-se as excentricidades iniciais (M/N) e excentricidades mínima. A excentricidade de primeira ordem é calculada pelo EC2 como a soma da e_i com a excentricidade inicial, e a excentricidade total é o maior valor entre a de primeira ordem em comparação com a mínima. As excentricidades descritas são levadas em consideração no cálculo de momento de primeira ordem. No caso do REBAP, se a esbeltez não ultrapassar a esbeltez limite, todas excentricidades podem ser desconsideradas, até mesmo a acidental, para o cálculo do momento de primeira ordem. As excentricidades acidentais, atualmente, devem ser sempre consideradas. Esta é, portanto, uma falha do REBAP em comparação com o EC2.

Caso a esbeltez seja maior que a limite, além do momento de primeira ordem será somado o momento de segunda ordem, calculado como a força normal multiplicada pela excentricidade de segunda ordem. Este momento, como descrito, é adicionado a momentos de diferentes posições dependendo do tipo de deformada. Ambos os tipos de dimensionamento (EC2 e REBAP + RSA) calculam a excentricidade de segunda ordem (e_2) de maneira muito aproximada, e a única diferença no cálculo de e_2 é o parâmetro η (se utilizou a letra z , pois η já foi utilizada para uma equação deste capítulo), demonstrado na equação 52. O final do cálculo utilizando o ábaco também é executado por ambos da mesma forma.

$$z = 0,40 * f_{cd} * A_c / N_{sd} \quad (52)$$

ANEXO C – NOTAS DO ROBOT

I DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS PELO ROBOT

O cálculo efetuado pelo Robot emitiu notas que detalham desde os materiais até ao dimensionamento da armadura. Não serão colocadas aqui muitas informações pelo tamanho da nota gerada, somente os aspectos de dimensionamento relevantes para comparação com os manuais. Os materiais, cobrimentos e normas dos elementos foram os mesmos para ambos os métodos.

I.1 LAJE LM3

As lajes foram calculadas para ELU e ELS (abertura de fissuras). As notas geradas pelo Robot disponibilizam os esforços das combinações ELU e ELS; as armaduras necessárias e fornecidas; as coordenadas dos esforços selecionados pelo Robot para cálculo da armadura; a abertura máxima das fissuras da laje; método de cálculo da armação; materiais da laje e cobrimentos. Como a nota do Robot tem uma extensão muito grande, foram detalhados aqui os esforços das notas e as armaduras.

Tabela C. 1 – Resultado das armaduras máximas e momentos máximos.

Área de aço necessária/Área de aço fornecida				
	Ax(+)	Ax(-)	Ay(+)	Ay(-)
Ax(+) (cm2/m)	23,77/26,81	3,17/9,27	23,31/26,81	3,17/8,94
Ax(-) (cm2/m)	0,00/3,93	4,12/7,85	0,00/3,93	3,18/7,85
Ay(+) (cm2/m)	6,34/22,62	4,13/7,54	13,54/22,62	3,14/6,98
Ay(-) (cm2/m)	0,00/3,14	3,06/3,14	0,00/3,14	3,06/3,14
Momentos ELU				
Mx(+) (kN*m/m)	64,92	0,00	46,22	6,77
Mx(-) (kN*m/m)	0,00	-37,03	0,00	-13,90
My(+) (kN*m/m)	38,13	6,18	21,44	17,34
My(-) (kN*m/m)	0,00	-14,35	0,00	-1,82
Coordinates* (m)	10,79;9,04;4,20	6,82;9,15;4,20	10,70;8,85;4,20	5,70;7,35;4,20

A Tabela C. 1 representa as armaduras para os pontos de máximos esforços da laje, por isso, diferem das utilizadas para comparação no Capítulo 5.5. As armaduras para os picos de momentos negativos não representam a armadura principal da laje, tanto que utilizando a *Table – Plate and Shell Reinforcement* da aba *Design, Required Reinforcement of Slabs/Walls – Options*, os resultados são os dispostos na Tabela 5.1. Os momentos apontados pelo Robot são os utilizados para o dimensionamento das armaduras principais da laje. As armaduras máximas (de pico), apresentadas na Tabela C. 1, são calculadas para os

momentos de pico, e as coordenadas representam no modelo do Robot o ponto em que os momentos para o dimensionamento foram retirados.

A armadura fornecida resultante é a mesma da Tabela 5.2 e das figuras dos resultados do Robot que estão no Capítulo 5.5.

I.II LAJE LM6

Seguindo os mesmos padrões da laje LM3, retirou-se a Tabela C. 1 das notas, que contém os momentos e armaduras da laje LM6. As observações feitas da laje LM3 são as mesmas para a laje LM6. As diferenças entre as armaduras negativas do Capítulo 5.5, para a tabela abaixo são menores, pois não há um elemento rígido como uma parede que gera momentos negativos de pico significativos. As armaduras fornecidas constam no Capítulo 5.5.2.

Tabela C. 2 – Resultado das armaduras máximas e momentos máximos.

Área de aço necessária/Área de aço fornecida				
	Ax(+)	Ax(-)	Ay(+)	Ay(-)
Ax(+) (cm2/m)	6,21/8,94	3,84/9,27	5,94/8,94	3,17/8,94
Ax(-) (cm2/m)	0,00/0,00	3,18/3,93	0,00/3,93	3,18/3,93
Ay(+) (cm2/m)	4,98/7,54	3,14/3,77	7,38/7,54	0,00/3,77
Ay(-) (cm2/m)	0,00/0,00	3,06/3,14	0,00/3,14	4,26/6,28
Momentos ELU				
Mx(+) (kN*m/m)	53,14	13,20	36,82	6,41
Mx(-) (kN*m/m)	0,00	-0,53	0,00	-18,29
My(+) (kN*m/m)	40,82	1,55	57,85	0,00
My(-) (kN*m/m)	0,00	-10,09	0,00	-36,77
Coordinates* (m)	10,79;9,04;4,20	6,82;9,15;4,20	10,70;8,85;4,20	5,70;7,35;4,20

I.III LAJE LM7

A laje LM7, assim como as outras duas, teve a tabela abaixo baseada nas notas do Robot. Todas observações feitas para LM3 são pertinentes para a LM7. As armaduras fornecidas constam no Capítulo 5.5.3.

Tabela C. 3 – Resultado das armaduras máximas e momentos máximos.

Área de aço necessária/Área de aço fornecida				
	Ax(+)	Ax(-)	Ay(+)	Ay(-)
Ax(+) (cm2/m)	5,94/8,94	0,00/0,00	5,94/8,94	0,00/0,00
Ax(-) (cm2/m)	0,00/3,93	3,72/3,93	0,00/3,93	3,63/3,93
Ay(+) (cm2/m)	7,38/8,20	0,00/3,77	7,38/8,20	0,00/0,00
Ay(-) (cm2/m)	0,00/3,14	3,13/6,28	0,00/3,14	3,92/6,28
Momentos ELU				
Mx(+) (kN*m/m)	50,40	0,00	36,63	0,00
Mx(-) (kN*m/m)	0,00	-33,50	0,00	-32,32
My(+) (kN*m/m)	44,15	0,00	60,62	0,00
My(-) (kN*m/m)	0,00	-26,94	0,00	-33,91
Coordinates* (m)	16,05;6,83;4,20	19,11;8,77;4,20	16,56;6,35;4,20	19,11;10,23;4,20

I.IV VIGA 1-3

A numeração de pilares e vãos da viga estão dispostos na Figura C. 1. Todos os cálculos são baseados nesta divisão da viga.

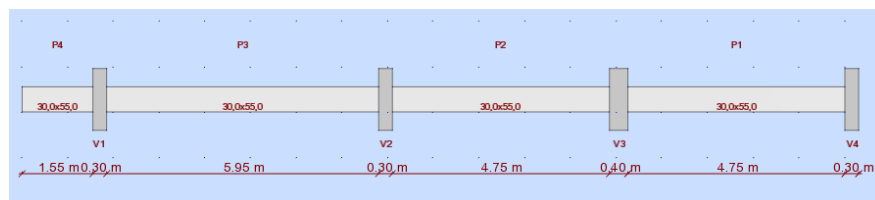


Figura C. 1 – Disposição da viga pelo Robot V1-3.

I.IV.I RESULTADOS DOS ESFORÇOS

As notas do Robot resultam em uma descrição detalhada vão a vão de cada momento e esforço transverso da viga. Pela extensão das notas, serão colocados aqui somente os momentos máximos e mínimos, e esforços transversos teóricos e reduzidos por suavização próximo a apoios (V_t e V_r). Os dados seguem na Tabela C. 4 e os gráficos desta tabela seguem abaixo.

Tabela C. 4 – Valores de momentos e esforços transversos adotados pelo Robot.

Vão	Mt max. (kN*m)	Mt min. (kN*m)	Vt (kN)	Vr (kN)
P4	1,76	-65,28	-12,87	-80,68
P3	106,95	-9,82	150,87	-162,4
P2	65,37	-46,71	135,14	-161,79
P1	107,19	-19,27	183,32	-165,58

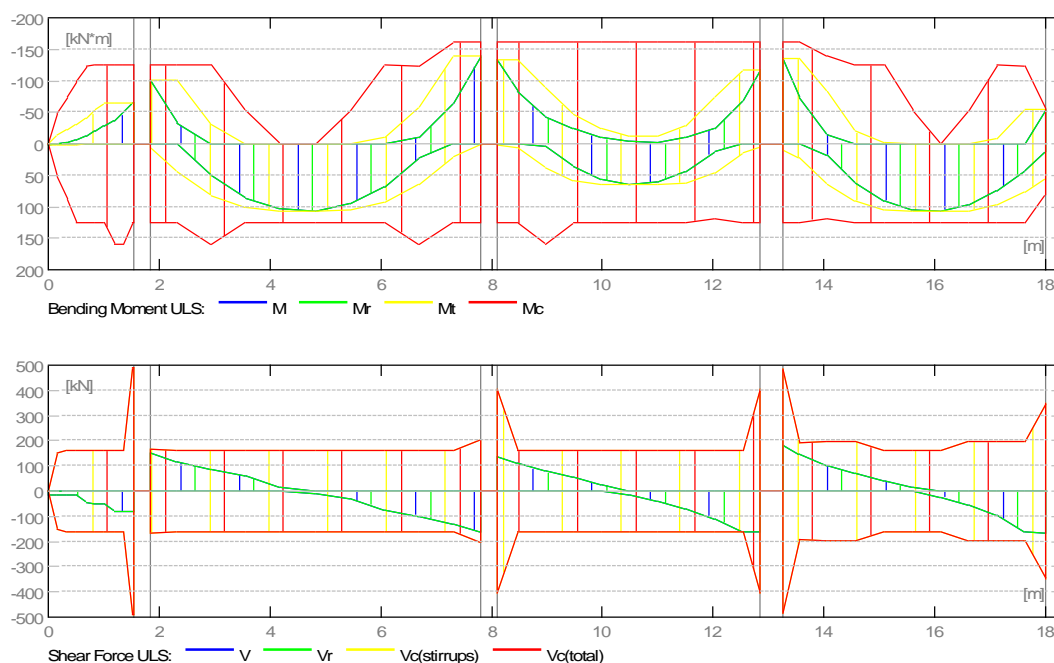


Figura C. 2 – Gráfico de momento e esforço transverso da viga V1-3 pelo Robot.

I.IV.II RESULTADOS DO REFORÇO

O dimensionamento foi executado com base nos dados fornecidos acima, resultando nos valores abaixo.

Para o início da viga em P4 é atribuída a coordenada 0,0m.

Vão P4:

- Armadura longitudinal inferior de 3 ϕ 16 com comprimento de l=1,68m de 0,0 a 1,53m;
- Armadura transversal de 6 ϕ 8 com espaçamentos e = 1*0,33 + 4*0,30 + 1*0,02 (m).

Vão P3:

- Armadura longitudinal inferior de 3 ϕ 16 com comprimento de l=2,38m de 0,95 a 3,33m;
- Armadura longitudinal inferior de 3 ϕ 16 com comprimento de l=4,15m de 2,75 a 6,90m;
- Armadura longitudinal inferior de 3 ϕ 16 com comprimento de l=3,02m de 6,32 a 9,34m;
- Armadura longitudinal superior de 3 ϕ 16 com comprimento de l=4,05m de 0,00 a 3,82m;
- Armadura construtiva superior de 2 ϕ 8 com comprimento de l=2,70m de 3,16 a 5,86m;
- Armadura transversal de 21 ϕ 8 com espaçamentos e = 1*0,01 + 1*0,29 + 18*0,30 + 1*0,24 (m).

Vão P2:

- Armadura longitudinal inferior de 3 ϕ 16 com comprimento de l=3,43m de 8,76 a 12,19m;
- Armadura longitudinal inferior de 3 ϕ 16 com comprimento de l=2,88m de 11,61 a 14,49m;
- Armadura longitudinal superior de 3 ϕ 16 com comprimento de l=10,65m de 5,20 a 15,85m;
- Armadura transversal de 18 ϕ 8 com espaçamentos e = 1*0,01 + 1*0,12 + 15*0,30 + 1*0,12 (m).

Vão P1:

- Armadura longitudinal inferior de 3 ϕ 16 com comprimento de l=4,54m de 13,91 a 18,27m;
- Armadura longitudinal superior de 3 ϕ 16 com comprimento de l=1,89m de 16,37 a 18,27m;
- Armadura construtiva superior de 2 ϕ 8 com comprimento de l=1,85m de 15,19 a 17,03m;
- Armadura transversal de 20 ϕ 8 com espaçamentos e = 1*0,01 + 1*0,09 + 6*0,25 + 5*0,30 + 6*0,25 + 1*0,14 (m).

I.V VIGA 1-5

Da mesma maneira que a viga 1-3, o cálculo da viga 1-5 é baseado na figura abaixo.

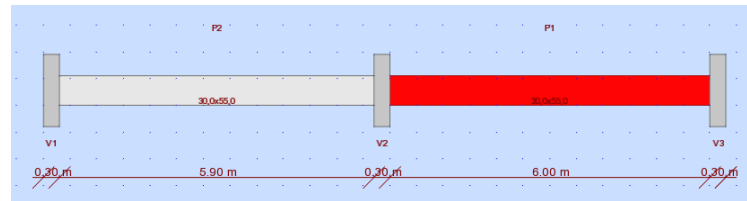


Figura C. 3 – Disposição da viga pelo Robot V1-5.

I.V.I RESULTADOS DOS ESFORÇOS

Os mesmo momentos e esforços transversos foram retirados das notas e detalhados na Tabela C. 5 e nos gráficos da Figura C. 4

Tabela C. 5 – Valores de momentos e esforços transversos adotados pelo Robot.

Vão	Mt max. (kN*m)	Mt min. (kN*m)	Vt (kN)	Vr (kN)
P2	26,77	-5,41	36,43	-41,93
P1	31,91	-4,91	44,06	-34,84

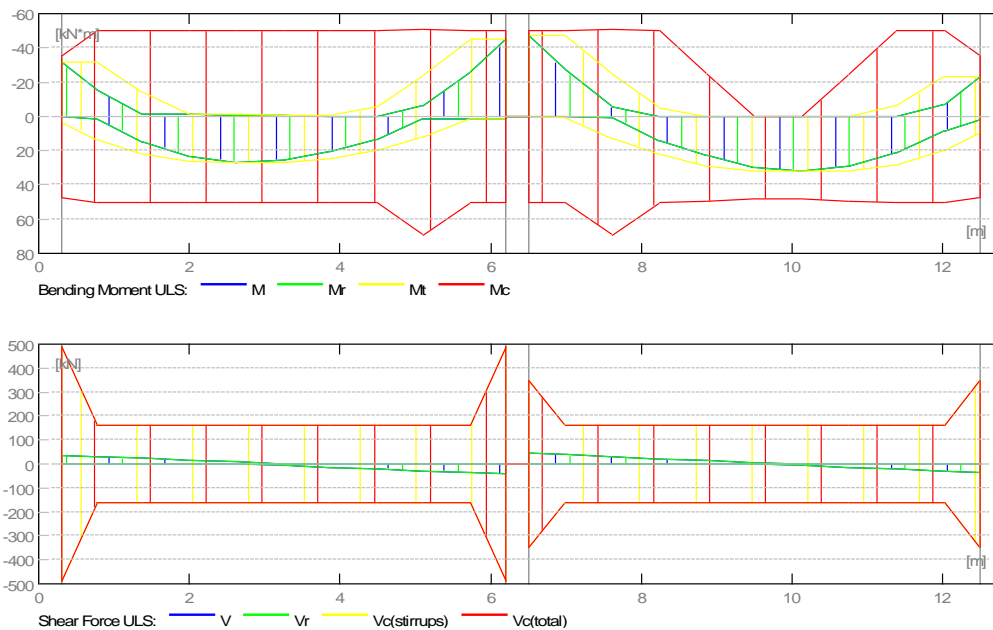


Figura C. 4 – Gráfico de momento e esforço transverso da viga V1-5 pelo Robot.

I.V.II RESULTADOS DO REFORÇO

Assim como a viga 1-3, o dimensionamento foi executado conforme os vãos, sendo o início da viga em P2 na coordenada 0,0m.

Vão P2:

- Armadura longitudinal inferior de 2 ϕ 12 com comprimento de $l=5,57\text{m}$ de 0,00 a 5,24m;
- Armadura longitudinal superior de 2 ϕ 12 com comprimento de $l=9,09\text{m}$ de 0,00 a 9,09m;
- Armadura transversal de 22 ϕ 8 com espaçamentos $e = 1*0,01 + 1*0,09 + 19*0,30 + 1*0,09$ (m).

Vão P1:

- Armadura longitudinal inferior de 2 ϕ 12 com comprimento de $l=3,11\text{m}$ de 4,80 a 7,92m;
- Armadura longitudinal inferior de 2 ϕ 12 com comprimento de $l=5,35\text{m}$ de 7,48 a 12,77m;
- Armadura longitudinal superior de 2 ϕ 12 com comprimento de $l=2,26\text{m}$ de 10,57 a 12,77m;
- Armadura construtiva superior de 2 ϕ 8 com comprimento de $l=2,72\text{m}$ de 8,46 a 11,17m;
- Armadura transversal de 22 ϕ 8 com espaçamentos $e = 1*0,01 + 1*0,14 + 19*0,30 + 1*0,14$ (m).

I.VI VIGA 2-1

A viga 2-1 foi detalha assim como as demais. A figura abaixo representa a nomenclatura dos vãos adotada pelo Robot.

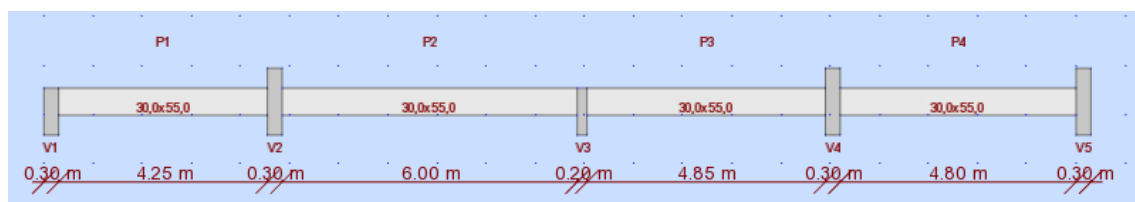


Figura C. 5 – Disposição da viga pelo Robot.

I.VI.I RESULTADOS DOS ESFORÇOS

Os esforços foram retirados das notas, assim como foi executado para outras vigas (Tabela C. 6). Os gráficos dos esforços constam na Figura C. 6

Tabela C. 6 – Valores de momentos e esforços transversos adotados pelo Robot V2-1.

Vão	Mt max. (kN*m)	Mt min. (kN*m)	Vt (kN)	Vr (kN)
P1	41,01	-2,87	54,02	-54,72
P2	21,26	-31,04	43,73	-50,57
P3	31,99	-17,97	69,55	-76,91
P4	59,63	-2,08	93,34	-76,95

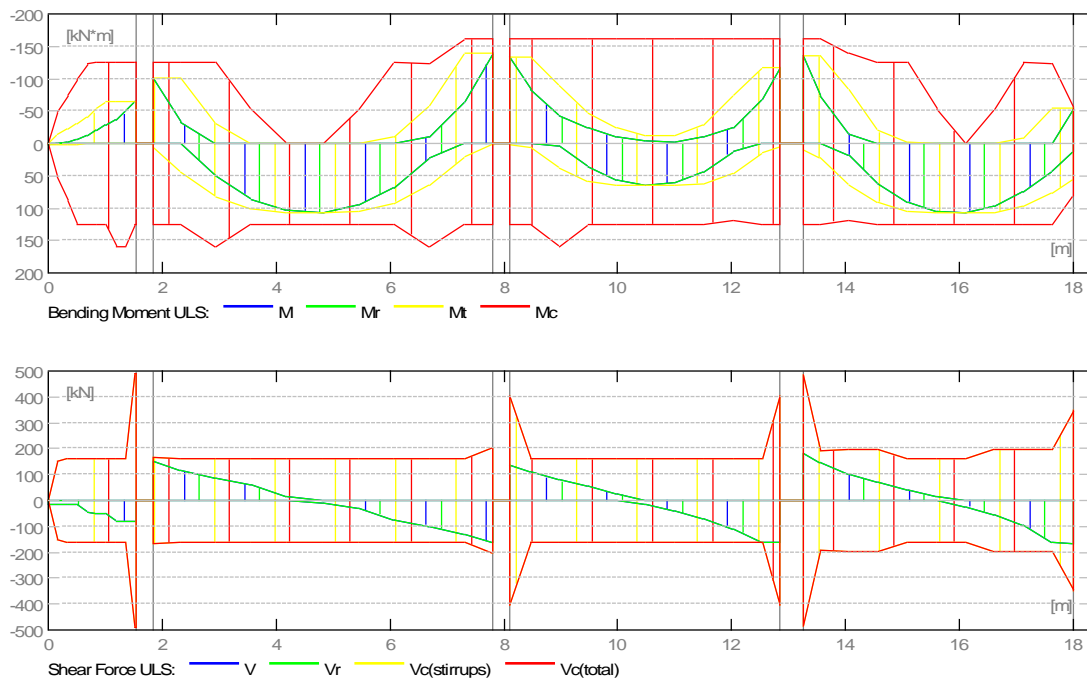


Figura C. 6 – Gráfico de momento e esforço transverso da viga V2-1 pelo Robot.

I.VI.II RESULTADOS DO REFORÇO

O dimensionamento foi executado com base nos dados fornecidos acima, resultando nos valores abaixo.

Para o início da viga em P4, é atribuída a coordenada 0,0m.

Vão P1:

- Armadura longitudinal inferior de 2 ϕ 12 com comprimento de $l=3,95\text{m}$ de 0,00 a 3,95m;
- Armadura longitudinal superior de 2 ϕ 12 com comprimento de $l=1,74\text{m}$ de 0,00 a 1,74m;
- Armadura construtiva superior de 2 ϕ 8 com comprimento de $l=2,19$ de 1,10 a 3,29m;
- Armadura transversal de 17 ϕ 8 com espaçamentos $e = 1*0,01 + 1*0,02 + 14*0,30 + 1*0,02$ (m).

Vão P2:

- Armadura longitudinal inferior de 2 ϕ 12 com comprimento de $l=6,46\text{m}$ de 3,45 a 9,90m;
- Armadura longitudinal inferior de 2 ϕ 12 com comprimento de $l=2,88\text{m}$ de 9,40 a 12,27m;
- Armadura longitudinal superior de 2 ϕ 12 com comprimento de $l=5,72\text{m}$ de 2,54 a 8,26m;
- Armadura longitudinal superior de 2 ϕ 16 com comprimento de $l=6,45\text{m}$ de 7,44 a 13,89m;
- Armadura transversal de 22 ϕ 8 com espaçamentos $e = 1*0,01 + 1*0,14 + 19*0,30 + 1*0,14$ (m).

Vão P3:

- Armadura longitudinal inferior de 2 ϕ 12 com comprimento de l=5,65m de 11,77 a 17,41m;
- Armadura longitudinal superior de 2 ϕ 16 com comprimento de l=5,34m de 13,06 a 18,40m;
- Armadura transversal de 19 ϕ 8 com espaçamentos e = 1*0,01 + 1*0,02 + 16*0,30 + 1*0,02 (m).

Vão P4:

- Armadura longitudinal inferior de 2 ϕ 16 com comprimento de l=4,36m de 16,91 a 21,27m;
- Armadura longitudinal superior de 2 ϕ 12 com comprimento de l=2,41m de 18,92 a 21,27m;
- Armadura construtiva superior de 2 ϕ 8 com comprimento de l=1,85m de 17,68 a 19,52m;
- Armadura transversal de 18 ϕ 8 com espaçamentos e = 1*0,01 + 1*0,14 + 15*0,30 + 1*0,14 (m).

I.VII PILAR P1

Assim como para as vigas, o Robot, após armar um pilar, disponibiliza notas completas com muitas informações sobre o pilar analisado. Para não se estender, serão dispostos aqui somente o relevante para o dimensionamento do pilar. Os esforços das combinações mostradas podem variar levemente com as adotadas no método manual, isso por causa da divisão dos trechos dos pilares na geometria do Robot e na aba de dimensionamento *Reinforcement* (fato também aplicado à viga e explicado com mais detalhes durante a dissertação).

I.VII.I RESULTADOS P1-1

A primeira parte do Pilar 1 foi armado para combinação COMB22 (B). No Robot, o pilar é dividido em três partes: topo (a), base (b) e centro (c). A pior combinação foi a COMB22 na base do pilar. Os resultados dos esforços e excentricidades de primeira ordem seguem na Tabela C. 7.

Tabela C. 7 – Esforços e excentricidades de primeira ordem para o pilar P1-1.

Esforços para ELU, forças internas			
COMB22 (B)	Nsd = 226,09 (kN)	Msd _y = -6,24 (kN*m)	Msd _z = -39,94 (kN*m)
Esforços corrigidos com excentricidade de 1 ^o ordem			
COMB22 (B)	N = 226,09 (kN)	N*etot _z = -6,24 (kN*m)	N*etot _y = -42,88 (kN*m)
Excentricidades			
Eccentricity	Tipologia	ez (My/N)	ey (Mz/N)
Initial	e0:	-2,8 (cm)	-17,7 (cm)
Imperfection	ei:	0,0 (cm)	1,3 (cm)
I order (e0 + ei)	e0Ed:	-2,8 (cm)	-16,4 (cm)
II order	e2:	0,0 (cm)	0,0 (cm)
Minimal	eEdmin:	2,0 (cm)	2,0 (cm)
Total	eEd:	-2,8 (cm)	-19,0 (cm)

A verificação para efeitos de segunda ordem ocorre conforme descrito no Anexo B para o Eurocódigo. Foram colocados aqui somente a esbeltez e a esbeltez limite. O valor de l_0 é o mesmo do cálculo manual. Apenas lembrando que no Robot os eixos são invertidos relativamente aos eixos considerados no cálculo manual.

Dimensionamento no eixo y:

A esbeltez calculada em y resultou em 41,79, e a esbeltez limite em 97,05, portanto, é um pilar curto sem efeito de segunda ordem. O momento utilizado no dimensionamento é ou a soma do momento inicial $M_0 = -6,24$ kN.m, com a normal multiplicada pela excentricidade acidental (e_i), ou o momento mínimo, que é a normal multiplicada pela excentricidade mínima. O maior desses momentos é o utilizado para o cálculo em y.

- $M_0 = -6,24$ (kN*m);
- $e_a (e_i) = 0,0$ (cm);
- $M_a = N * e_a = 0,00$ (kN*m);
- $M_{Edmin} = 4,52$ (kN*m);
- $M_{0Ed} = \max (M_{Edmin}, M_0 + M_a) = -6,24$ (kN*m).

Dimensionamento no eixo z:

Novamente na direção z, o pilar resultou em pilar curto com esbeltez no valor de 65,13 e esbeltez limite com valor de 105,66. O cálculo para o momento de dimensionamento foi o mesmo, a única diferença é que a excentricidade e_a resultou em 1,3cm, como foi demonstrado pelo Robot.

- $M_0 = -39,94$ (kN*m);
- $e_a (e_i) = \theta_1 * l_0 / 2 = 1,3$ (cm);
- $\theta_1 = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m = 0,0092$, sendo $\theta_0 = 0,01$; $\alpha_h = 0,92$; $\alpha_m = (0,5(1+1/1))^{0.5} = 1,00$;
- $M_a = N * e_a = 2,94$ (kN*m);
- $M_{Edmin} = 4,52$ (kN*m);
- $M_{0Ed} = \max (M_{Edmin}, M_0 + M_a) = - 42,88$ (kN*m).

Resultados:

- Armadura principal do pilar 4 ϕ 10 equivalente a uma área de 3,14 cm² com barras de comprimento $l = 5,05$ m taxa de armação $\rho = 0,25\%$;
- Número de Cintas de 24 ϕ 6.

I.VII.II RESULTADOS P1-2

A segunda parte do pilar utilizou a COMB22, mas no topo do pilar (A). A Tabela C. 8 mostra os esforços e excentricidades para esse trecho.

Tabela C. 8 – Esforços e excentricidades de primeira ordem para o pilar P1-2.

Esforços para ELU, forças internas			
COMB22 (A)	Nsd = 143,99 (kN)	Msd _y = 24,44 (kN*m)	Msd _z = 16,20 (kN*m)
Esforços corrigidos com excentricidade de 1º ordem			
COMB22 (A)	N = 143,99 (kN)	N*etot _z = 25,37 (kN*m)	N*etot _y = 16,20 (kN*m)
Excentricidades			
Eccentricity	Tipologia	ez (My/N)	ey (Mz/N)
Initial	e0:	17,0 (cm)	11,2 (cm)
Imperfection	ei:	0,6 (cm)	0,0 (cm)
I order (e0 + ei)	e0Ed:	17,6 (cm)	11,2 (cm)
II order	e2:	0,0 (cm)	0,0 (cm)
Minimal	eEdmin:	2,0 (cm)	2,0 (cm)
Total	eEd:	17,6 (cm)	11,2 (cm)

Seguindo os mesmos passos da primeira parte do pilar 1, foi verificado pelo Robot o efeito de segunda ordem em ambos os eixos e os momentos atuantes no elemento estrutural.

Dimensionamento no eixo y:

A esbeltez em y resultou em 29,91 e a esbeltez limite em 124,63.

- $M_0 = 24,44 \text{ (kN*m)}$;
- $ea \text{ (ei)} = \Theta_1 * l_0 / 2 = 0,60 \text{ (cm)}$;
- $\Theta_1 = \Theta_0 * \alpha_h * \alpha_m = 0,01$, sendo $\Theta_0 = 0,01$; $\alpha_h = 1,00$; $\alpha_m = (0,5(1+1/1))^{0.5} = 1,00$;
- $Ma = N * ea = 0,93 \text{ (kN*m)}$;
- $ME_{dmin} = 2,88 \text{ (kN*m)}$;
- $MO_{Ed} = \max (ME_{dmin}, M_0 + Ma) = 25,37 \text{ (kN*m)}$.

Dimensionamento no eixo z:

Esbeltez em z resultou em 43,65 e a esbeltez limite em 106,77.

- $M_0 = 16,20 \text{ (kN*m)}$;
- $ea \text{ (ei)} = 0,00 \text{ (cm)}$;
- $Ma = N * ea = 0,00 \text{ (kN*m)}$;
- $ME_{dmin} = 2,88 \text{ (kN*m)}$;
- $MO_{Ed} = \max (ME_{dmin}, M_0 + Ma) = 16,20 \text{ (kN*m)}$.

Resultados:

- Armadura principal do pilar 4 ϕ 10 equivalente a uma área de 3,14 cm² com barras de comprimento l=3,47m taxa de armação $\rho = 0,25\%$;
- Número de Cintas de 18 ϕ 6.

I.VIII PILAR P9

A mesma metodologia explicada para o pilar P1 foi aplicada ao pilar P9. Os comprimentos efetivos de encurvadura e livres são os mesmos dos cálculos manuais.

I.VIII.I RESULTADOS P9-1

A combinação resultante para a primeira parte do pilar P9 foi a COMB22 (C). Os dados dos esforços e as excentricidades seguem na Tabela C. 9.

Tabela C. 9 – Esforços e excentricidades de primeira ordem para o pilar P9-1

Esforços para ELU, forças internas			
COMB22 (C)	Nsd = 1777,21 (kN)	Msd _y = 1,59 (kN*m)	Msd _z = 33,05 (kN*m)
Esforços corrigidos com excentricidade de 1ª ordem			
COMB22 (C)	N = 1777,21 (kN)	N*etot _z = 39,57 (kN*m)	N*etot _y = 132,26 (kN*m)
Excentricidades			
Eccentricity	Tipologia	ez (My/N)	ey (Mz/N)
Initial	e0:	0,1 (cm)	1,9 (cm)
Imperfection	ei:	0,0 (cm)	1,3 (cm)
I order (e0 + ei)	e0Ed:	0,1 (cm)	3,2 (cm)
II order	e2:	2,1 (cm)	4,3 (cm)
Minimal	eEdmin:	2,0 (cm)	2,0 (cm)
Total	eEd:	2,2 (cm)	7,4 (cm)

Dimensionamento no eixo y:

A esbelteza resultou em 35,72 e a esbelteza limite em 13,86. Portanto, neste trecho do pilar 9, pelo Robot, houve excentricidade de segunda ordem, essa que foi calculada abaixo. Como a excentricidade de segunda ordem foi aplicada no meio do pilar, é necessário o cálculo do momento em C por meio das equações 43 e 44 do Anexo B. No caso, o valor do momento em C é o mesmo que está disposto na Tabela C. 9, pois a combinação é justamente para o ponto central do pilar C.

- M0e = -1,59 (kN*m);
- ea (ei) = 0,0 (cm).

Além dos dois cálculos acima, para esse pilar calculou-se o efeito de segunda ordem pelo método da curvatura nominal.

- $M2 = N * e2 = 37,98 \text{ (kN*m)}$;
- $e2 = l_0^2 / c * (1/r) = 2,1 \text{ (cm)}$;
- $ME_{dmin} = 35,54 \text{ (kN*m)}$;
- $ME_d = \max (ME_{dmin}, M0Ed + M2) = 39,57 \text{ (kN*m)}$.

Sendo que:

$$c = 10,00;$$

$$(1/r) = Kr * K\phi * (1/r_0) = 0,02;$$

$$Kr = 0,65;$$

$$K\phi = 1 + \beta * \varphi_{ef} = 1,65;$$

$$\beta = 0.35 + f_{ck}/200 - \lambda/150 = 0,26, \text{ sendo } \varphi_{ef} = 2,47;$$

$$1/r_0 = (f_{yd}/E_s)/(0.45*d) = 0,02;$$

$$d = 30,8 \text{ (cm)};$$

$$E_s = 200000,00 \text{ (MPa)};$$

$$f_{yd} = 434,78 \text{ (MPa)}.$$

Dimensionamento no eixo z:

Em ambas direções deste pilar houve excentricidade de segunda ordem. A esbelteza calculada pelo Robot foi de 56,87 e a esbelteza limite de 53,36.

- $M0e = 33,05 \text{ (kN*m)}$;
- $ea (ei) = \Theta_1 * l_0 / 2 = 1,3 \text{ (cm)}$;
- $\Theta_1 = \Theta_0 * \alpha_h * \alpha_m = 0,0092$, sendo $\Theta_0 = 0,01$; $\alpha_h = 0,92$; $\alpha_m = (0,5(1+1/1))^{0.5} = 1,00$.

Cálculo do efeito de segunda ordem:

- $M2 = N * e2 = 75,89 \text{ (kN*m)}$;
- $e2 = l_0^2 / c * (1/r) = 4,3 \text{ (cm)}$;
- $ME_{dmin} = 35,54 \text{ (kN*m)}$;
- $ME_d = \max (ME_{dmin}, M0Ed + M2) = 132,26 \text{ (kN*m)}$.

Sendo que:

$$c = 10,00;$$

$$(1/r) = Kr \cdot K\phi \cdot (1/r_0) = 0,02.$$

Resultados:

- Armadura principal do pilar 4 ϕ 10 equivalente a uma área de 3,14 cm² com barras de comprimento l=5,05m taxa de armação $\rho = 0,25\%$;
- Número de Cintas de 24 ϕ 6.

I.VIII.II RESULTADOS P9-2

A combinação utilizada para o cálculo da segunda parte foi a COMB23 (C). Os dados dos esforços e as excentricidades seguem na Tabela C. 10.

Tabela C. 10 – Esforços e excentricidades de primeira ordem para o pilar P9-1

Esforços para ELU, forças internas			
COMB23 (C)	Nsd = 1021,97 (kN)	Msd _y = 2,36 (kN*m)	Msd _z = -7,90 (kN*m)
Esforços corrigidos com excentricidade de 1º ordem			
COMB23 (C)	N = 1021,97 (kN)	N*etot _z = 28,31 (kN*m)	N*etot _y = -79,18 (kN*m)
Excentricidades			
Eccentricity	Tipologia	ez (My/N)	ey (Mz/N)
Initial	e0:	0,2 (cm)	-0,8 (cm)
Imperfection	ei:	0,0 (cm)	1,3 (cm)
I order (e0 + ei)	e0Ed:	0,2 (cm)	0,5 (cm)
II order	e2:	2,5 (cm)	5,7 (cm)
Minimal	eEdmin:	2,0 (cm)	2,0 (cm)
Total	eEd:	2,8 (cm)	-7,7 (cm)

Dimensionamento no eixo y:

No eixo y, o pilar tem uma esbeltez de 30,80 e uma esbeltez limite de 15,47. Por ser efeito de segunda ordem, novamente teve que aplicar as equações e encontrar o momento no meio do pilar.

- M0e = 2,36 (kN*m);
- ea (ei) = 0,0 (cm).

Calculo do efeito de segunda ordem:

- M2 = N * e2 = 25,94 (kN*m);
- e2 = lo² / c * (1/r) = 2,5 (cm);
- ME_{dmin} = 20,44 (kN*m);
- ME_d = max (ME_{dmin}, M0Ed + M2) = 28,31 (kN*m).

Sendo que:

$$(1/r) = Kr \cdot K\phi \cdot (1/r_0) = 0,03.$$

Dimensionamento no eixo z:

Esbeltez resultante em 51,45 e esbeltez limite de 20,30.

- $M_{0e} = -7,90$ (kN*m);
- $e_a (e_i) = \Theta_1 \cdot l_0 / 2 = 1,3$ (cm);
- $\Theta_1 = \Theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 0,01$, sendo $\Theta_0 = 0,01$; $\alpha_h = 1,00$ $\alpha_m = (0,5(1+1/1))^{0.5} = 1,00$.

Cálculo do efeito de segunda ordem:

- $M_2 = N \cdot e_2 = 58,13$ (kN*m);
- $e_2 = l_0^2 / c \cdot (1/r) = 5,70$ (cm);
- $M_{Edmin} = 29,44$ (kN*m);
- $M_{Ed} = \max(M_{Edmin}, M_{0Ed} + M_2) = -79,18$ (kN*m).

Sendo que:

$$(1/r) = \kappa_r \cdot \kappa_\phi \cdot (1/r_0) = 0,02.$$

Resultados:

- Armadura principal do pilar 4 ϕ 10 equivalente a uma área de 3,14 cm² com barras de comprimento $l=3,85$ m taxa de armação $\rho = 0,25\%$;
- Número de Cintas de 20 ϕ 6.

I.VIII.III RESULTADOS P9-3

A Tabela C. 11 contém os esforços para a combinação COMB22 (C) e as excentricidades de primeira ordem da terceira parte do pilar 9.

Tabela C. 11 – Esforços e excentricidades de primeira ordem para o pilar P9-1

Esforços para ELU, forças internas			
COMB22 (C)	Nsd = 362,55 (kN)	Msd _y = -2,33 (kN*m)	Msd _z = 10,13 (kN*m)
Esforços corrigidos com excentricidade de 1º ordem			
COMB22 (C)	N = 362,55 (kN)	N*etot _z = -15,22 (kN*m)	N*etot _y = 10,13 (kN*m)
Excentricidades			
Eccentricity	Tipologia	ez (My/N)	ey (Mz/N)
Initial	e0:	-0,6 (cm)	2,8 (cm)
Imperfection	ei:	0,8 (cm)	0,0 (cm)
I order (e0 + ei)	e0Ed:	0,2 (cm)	2,8 (cm)
II order	e2:	2,8 (cm)	0,0 (cm)
Minimal	eEdmin:	2,0 (cm)	2,0 (cm)
Total	eEd:	-4,2 (cm)	2,8 (cm)

Dimensionamento no eixo y:

A esbeltez em y de 32,12 e a esbeltez limite de 25,97.

- $M_{0e} = -2,33 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$;
- $e_a (e_i) = \Theta_1 \cdot l_0 / 2 = 0,8 \text{ (cm)}$;
- $\Theta_1 = \Theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 0,01$, sendo $\Theta_0 = 0,01$; $\alpha_h = 1,00$ $\alpha_m = (0,5(1+1/1))^{0.5} = 1,00$.

Calculo do efeito de segunda ordem:

- $M_2 = N \cdot e_2 = 9,98 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$;
- $e_2 = l_0^2 / c \cdot (1/r) = 2,80 \text{ (cm)}$;
- $M_{Edmin} = 7,25 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$;
- $M_{Ed} = \max (M_{Edmin}, M_{0Ed} + M_2) = -15,22 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$.

Sendo que:

$$(1/r) = K_r \cdot K_\phi \cdot (1/r_0) = 0,03.$$

Dimensionamento no eixo z:

Esbeltez resultante em 52,93 e esbeltez limite de 90,54.

- $M_{0e} = 10,13 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$;
- $e_a (e_i) = 0,00 \text{ (cm)}$;
- $M_{Edmin} = 7,25 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$;
- $M_{0Ed} = \max (M_{Edmin}, M_0 + M_a) = 10,13 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$.

Resultados:

- Armadura principal do pilar $4\phi 10$ equivalente a uma área de $3,14 \text{ cm}^2$ com barras de comprimento $l=3,62\text{m}$ taxa de armação $\rho = 0,25\%$;
- Número de Cintas de $19 \phi 6$.

I.IX PILAR P15

O dimensionamento e coleta de dados foi executado assim como nos pilares anteriores.

I.IX.I RESULTADOS P15-1

Os esforços para COMB19 (C) e as excentricidades de primeira ordem, estão dispostos na Tabela C. 12.

Tabela C. 12 – Esforços e excentricidades de primeira ordem para o pilar P9-1

Esforços para ELU, forças internas			
COMB19 (C)	Nsd = 473,03 (kN)	Msd _y = -6,96 (kN*m)	Msd _z = -13,59 (kN*m)
Esforços corrigidos com excentricidade de 1º ordem			
COMB19 (C)	N = 473,03 (kN)	N*etot _z = -9,46 (kN*m)	N*etot _y = -19,80 (kN*m)
Excentricidades			
Eccentricity	Tipologia	e _z (M _y /N)	e _y (M _z /N)
Initial	e ₀ :	-1,5 (cm)	-2,9 (cm)
Imperfection	e _i :	0,0 (cm)	1,3 (cm)
I order (e ₀ + e _i)	e _{0Ed} :	-1,5 (cm)	-1,6 (cm)
II order	e ₂ :	0,0 (cm)	0,0 (cm)
Minimal	e _{Edmin} :	2,0 (cm)	2,0 (cm)
Total	e _{Ed} :	-2,0 (cm)	-4,2 (cm)

Dimensionamento no eixo y:

Esbeltez de 41,79 e esbeltez limite de 46,74.

- $M_{0e} = -6,96 \text{ (kN*m)}$;
- $e_a (e_i) = 0,00 \text{ (cm)}$;
- $M_{Edmin} = 9,46 \text{ (kN*m)}$;
- $M_{0Ed} = \max (M_{Edmin}, M_0 + M_a) = -9,46 \text{ (kN*m)}$.

Dimensionamento no eixo z:

Esbeltez de 65,67 e esbeltez limite de 70,46.

- $M_{0e} = -13,59 \text{ (kN*m)}$;
- $e_a (e_i) = \theta_1 * l_0 / 2 = 1,3 \text{ (cm)}$;
- $\theta_1 = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m = 0,0092$, sendo $\theta_0 = 0,01$; $\alpha_h = 0,92$; $\alpha_m = (0,5(1+1/1))^{0.5} = 1,00$;
- $M_a = N * e_a = 6,20 \text{ (kN*m)}$;
- $M_{Edmin} = 9,46 \text{ (kN*m)}$;
- $M_{0Ed} = \max (M_{Edmin}, M_0 + M_a) = -19,80 \text{ (kN*m)}$.

Resultados:

- Armadura principal do pilar 4 ϕ 10 equivalente a uma área de 3,14 cm² com barras de comprimento l=5,05m taxa de armação $\rho = 0,25\%$;
- Número de Cintas de 24 ϕ 6.

I.IX.II RESULTADOS P15-2

Resultado da combinação COMB17 e as excentricidade de primeira ordem constam na Tabela C. 13.

Tabela C. 13 – Esforços e excentricidades de primeira ordem para o pilar P9-1

Esforços para ELU, forças internas			
COMB17 (B)	Nsd = 270,66 (kN)	Msd _y = 45,04 (kN*m)	Msd _z = 23,71 (kN*m)
Esforços corrigidos com excentricidade de 1º ordem			
COMB17 (B)	N = 270,66 (kN)	N ^e etot _z = 46,82 (kN*m)	N ^e etot _y = 23,71 (kN*m)
Excentricidades			
Eccentricity	Tipologia	e _z (My/N)	e _y (Mz/N)
Initial	e ₀ :	16,6 (cm)	8,8 (cm)
Imperfection	e _i :	0,7 (cm)	0,0 (cm)
I order (e ₀ + e _i)	e _{0Ed} :	17,3 (cm)	8,8 (cm)
II order	e ₂ :	0,0 (cm)	0,0 (cm)
Minimal	e _{Edmin} :	2,0 (cm)	2,0 (cm)
Total	e _{Ed} :	17,3 (cm)	8,8 (cm)

Dimensionamento no eixo y:

Esbeltez de 30,31 e esbeltez limite de 100,27.

- $M_0 = 45,04$ (kN*m);
- ea (e_i) = $\Theta_1 \cdot l_0 / 2 = 0,70$ (cm);
- $\Theta_1 = \Theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 0,01$, sendo $\Theta_0 = 0,01$; $\alpha_h = 1,00$; $\alpha_m = (0,5(1+1/1))^{0.5} = 1,00$;
- $Ma = N \cdot ea = 1,78$ (kN*m);
- $ME_{dmin} = 5,41$ (kN*m);
- $MO_{Ed} = \max(ME_{dmin}, M_0 + Ma) = 46,82$ (kN*m).

Dimensionamento no eixo z:

Esbeltez resultante de 45,67 e esbeltez limite de 99,52.

- $M_0 = 23,71$ (kN*m);
- ea (e_i) = 0,00 (cm);

- $M_a = N \cdot e_a = 0,00$ (kN*m);
- $M_{Edmin} = 5,41$ (kN*m);
- $M_{0Ed} = \max(M_{Edmin}, M_0 + M_a) = 23,71$ (kN*m).

Resultados:

- Armadura principal do pilar 6 ϕ 10 equivalente a uma área de 4,71 cm² com barras de comprimento $l=3,85$ m taxa de armação $\rho = 0,52\%$;
- Número de Cintas de 18 ϕ 6.

I.IX.III RESULTADOS P15-3

Os esforços foram retirados pelo Robot da COMB 16(B). A Tabela C. 14 contém os esforços da combinação e as excentricidades de primeira ordem da terceira parte do pilar 15.

Tabela C. 14 – Esforços e excentricidades de primeira ordem para o pilar P9-1

Esforços para ELU, forças internas			
COMB16 (B)	Nsd = 86,18 (kN)	Msd _y = 38,86 (kN*m)	Msd _z = 18,00 (kN*m)
Esforços corrigidos com excentricidade de 1º ordem			
COMB16 (B)	N = 86,18 (kN)	N*etot _z = 39,44 (kN*m)	N*etot _y = 18,00 (kN*m)
Excentricidades			
Eccentricity	Tipologia	e _z (My/N)	e _y (Mz/N)
Initial	e ₀ :	45,1 (cm)	20,9 (cm)
Imperfection	e _i :	0,7 (cm)	0,0 (cm)
I order (e ₀ + e _i)	e _{0Ed} :	45,8 (cm)	20,9 (cm)
II order	e ₂ :	0,0 (cm)	0,0 (cm)
Minimal	e _{Edmin} :	2,0 (cm)	2,0 (cm)
Total	e _{Ed} :	45,8 (cm)	20,9 (cm)

Dimensionamento no eixo y:

A esbeltez é de 31,19 e esbeltez limite de 183,11.

- $M_0 = 38,86$ (kN*m);
- $e_a(e_i) = \theta_1 \cdot l_0 / 2 = 0,70$ (cm);
- $\theta_1 = \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 0,01$, sendo $\theta_0 = 0,01$; $\alpha_h = 1,00$; $\alpha_m = (0,5(1+1/1))^{0.5} = 1,00$;
- $M_a = N \cdot e_a = 0,58$ (kN*m);
- $M_{Edmin} = 1,72$ (kN*m);
- $M_{0Ed} = \max(M_{Edmin}, M_0 + M_a) = 39,44$ (kN*m).

Dimensionamento no eixo z:

ANEXO

A esbeltez é de 43,41 e esbeltez limite de 181,75.

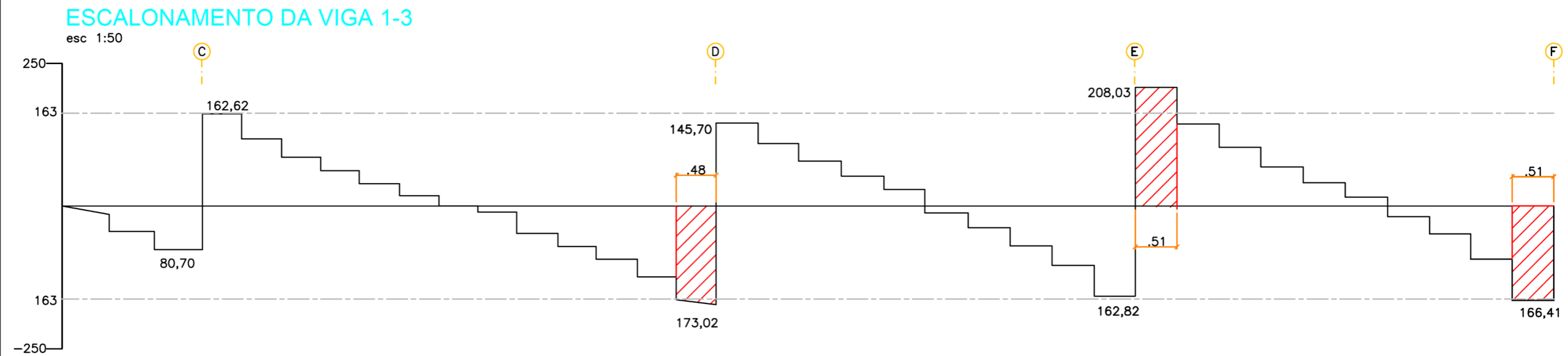
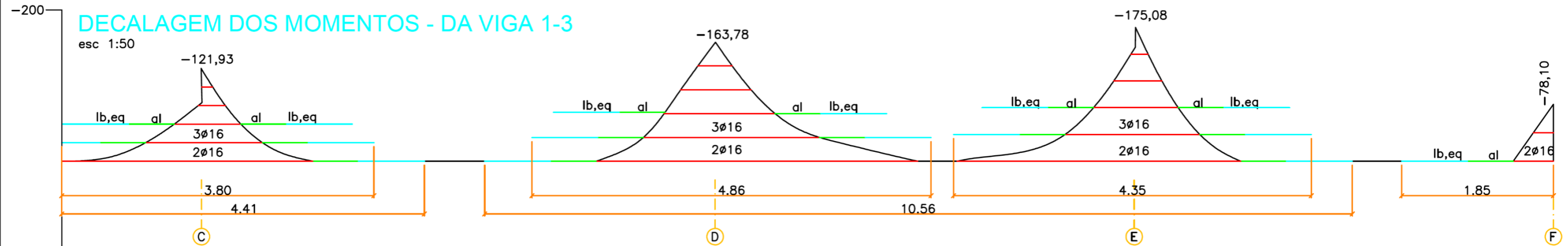
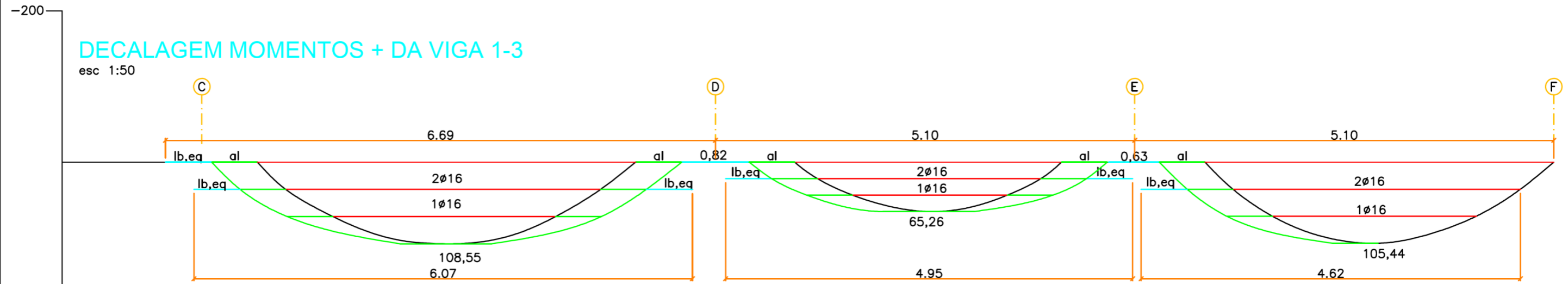
- $M_0 = 18,00$ (kN*m);
- $e_a (e_i) = 0,00$ (cm);
- $M_a = N * e_a = 0,00$ (kN*m);
- $M_{Edmin} = 1,72$ (kN*m);
- $M_{0Ed} = \max (M_{Edmin}, M_0 + M_a) = 18,00$ (kN*m).

Resultados:

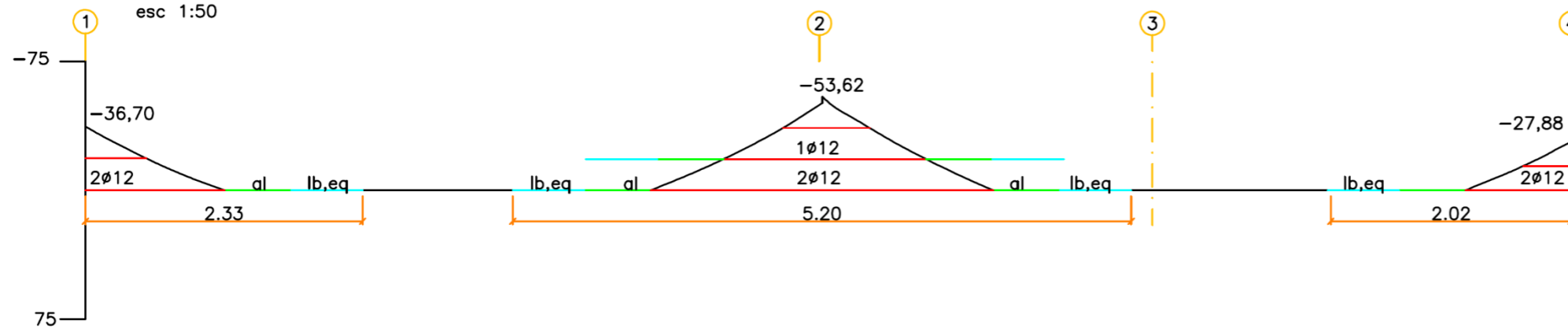
- Armadura principal do pilar 8 ϕ 10 equivalente a uma área de 6,29 cm² com barras de comprimento $l=3,62$ m taxa de armação $\rho = 0,70\%$;

Número de Cintas de 19 ϕ 6.

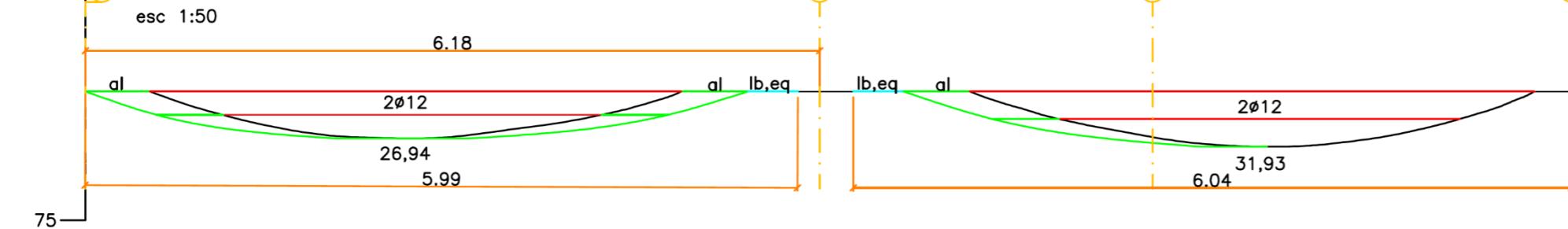
ANEXO D – DECALAGEM, ESCALONAMENTO E DETALHAMENTO



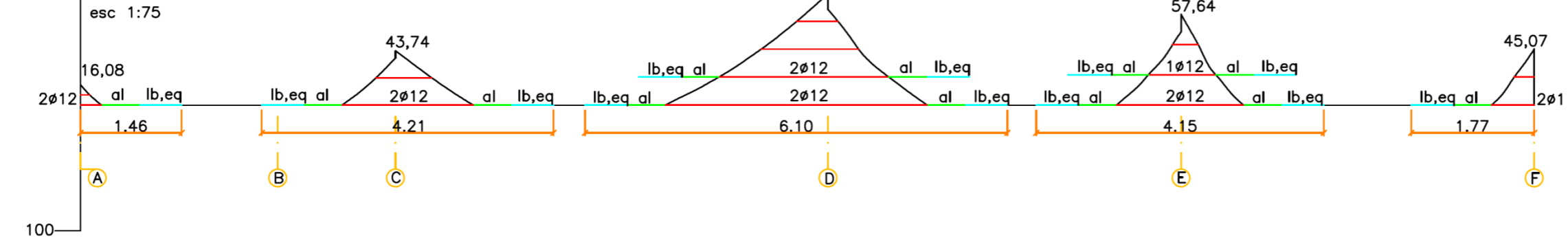
DECALAGEM DOS MOMENTOS - DA VIGA 1-5



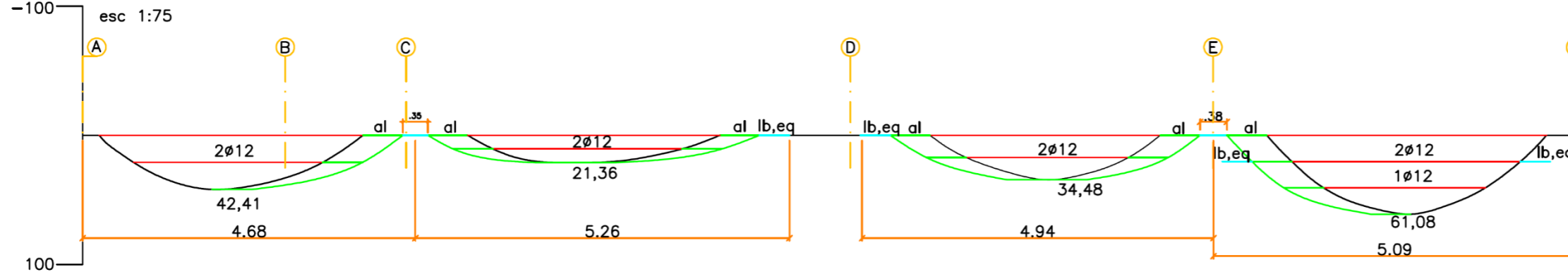
DECALAGEM MOMENTOS + DA VIGA 1-5



DECALAGEM DOS MOMENTOS - DA VIGA 2-1

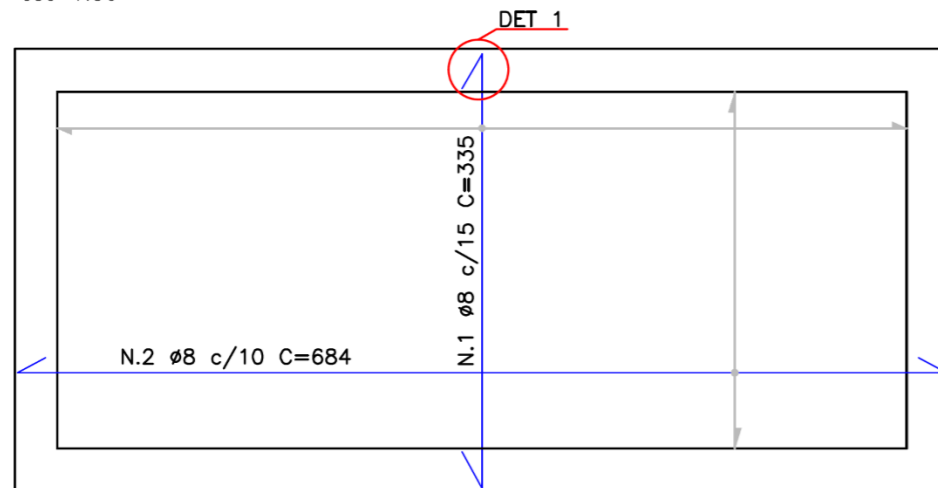


DECALAGEM MOMENTOS + DA VIGA 2-1



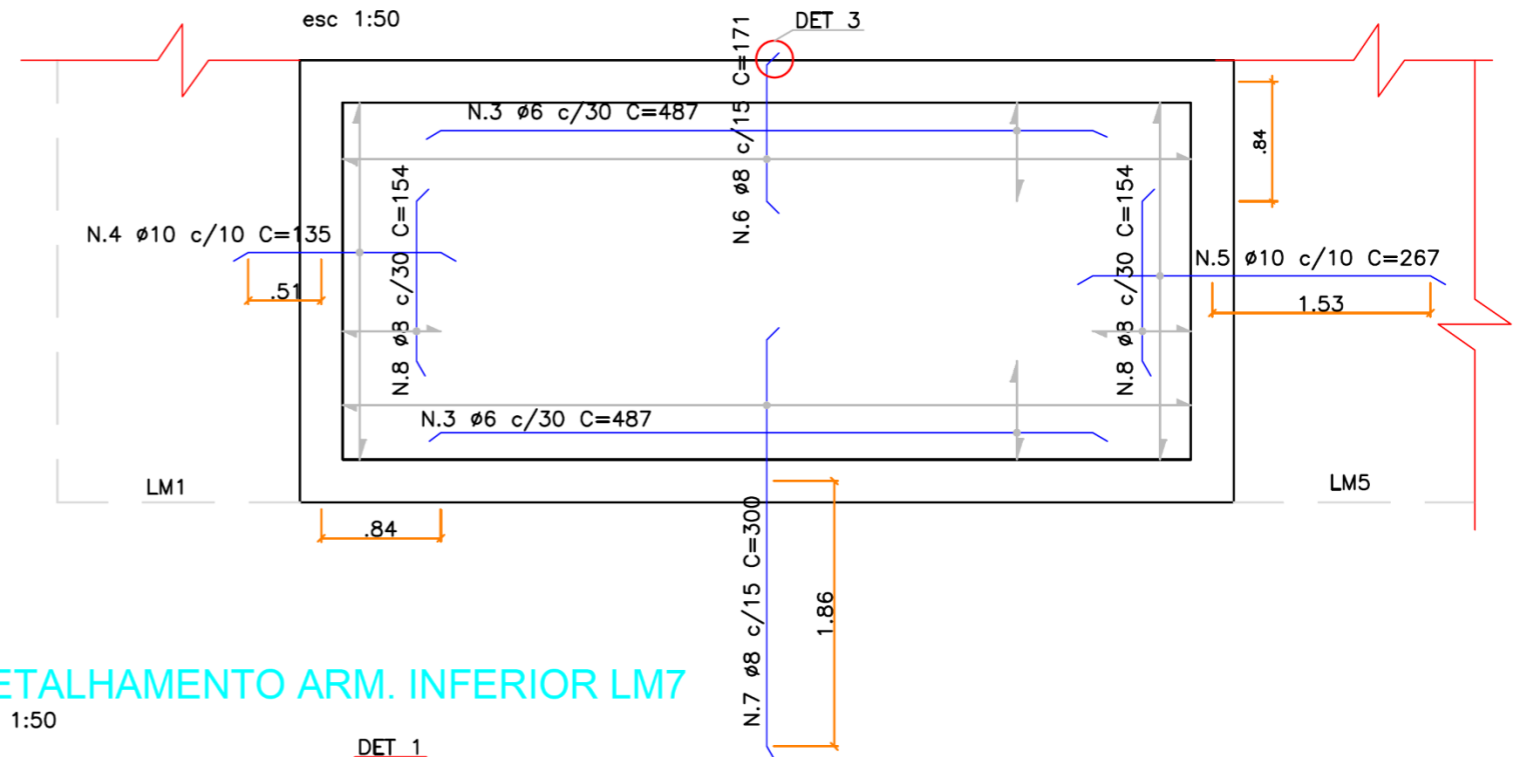
DETALHAMENTO ARM. INFERIOR LM3

esc 1:50



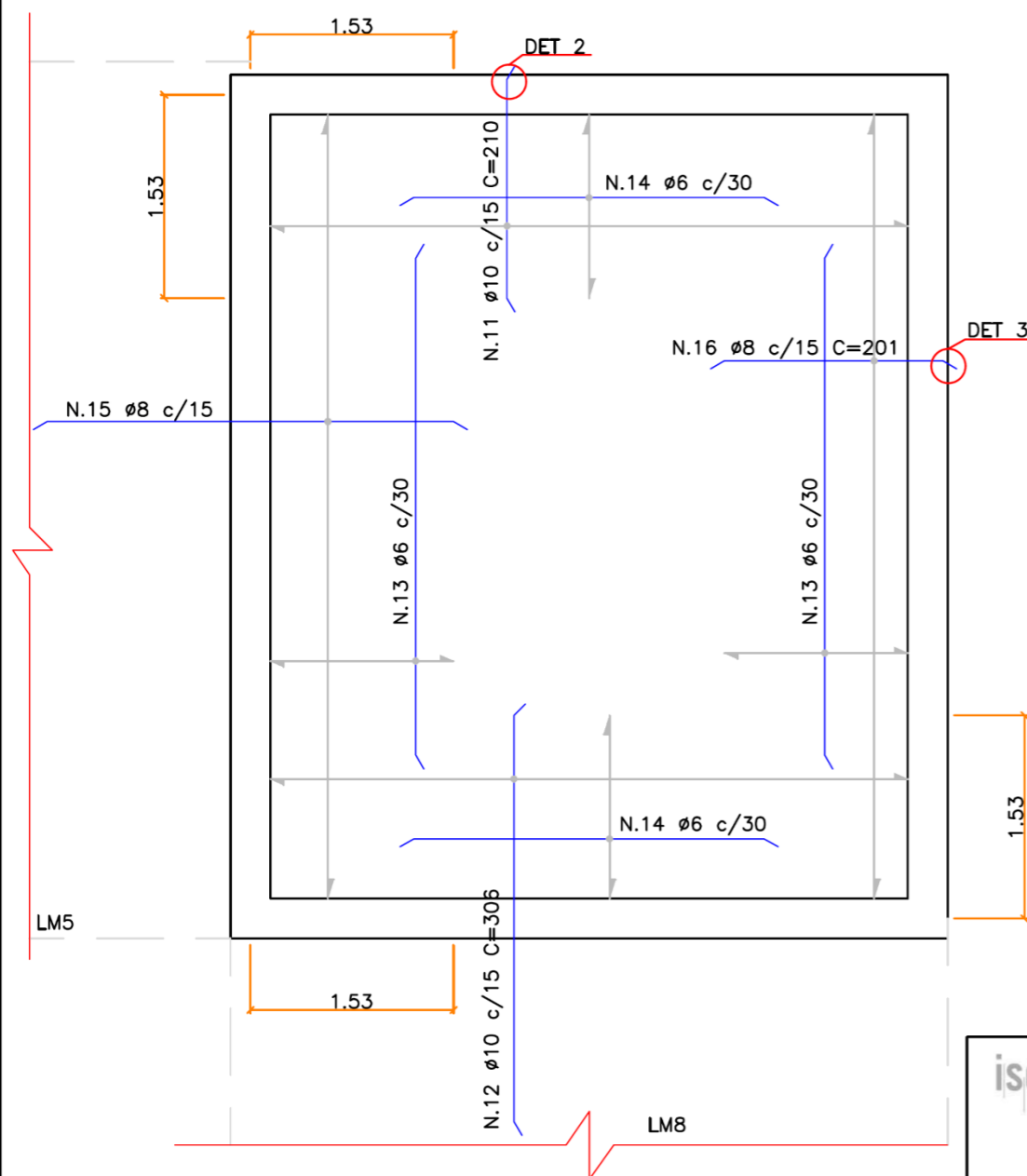
DETALHAMENTO ARM. SUPERIOR LM3

esc 1:50



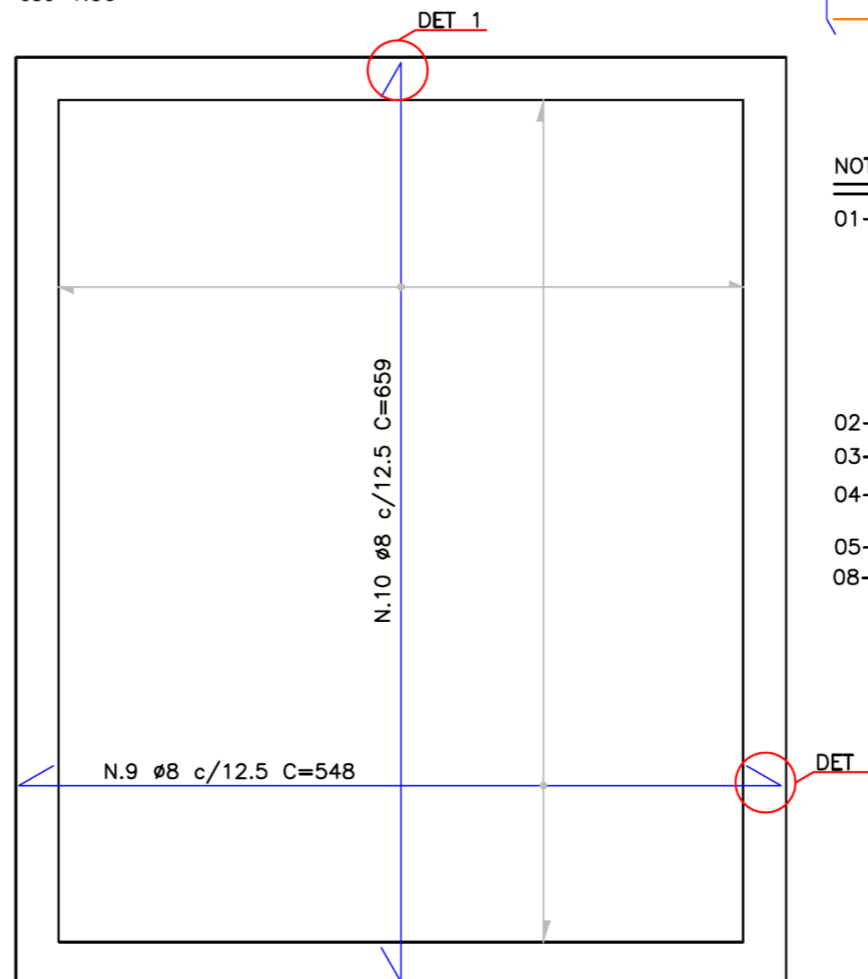
DETALHAMENTO ARM. SUPERIOR LM7

esc 1:50



DETALHAMENTO ARM. INFERIOR LM7

esc 1:50

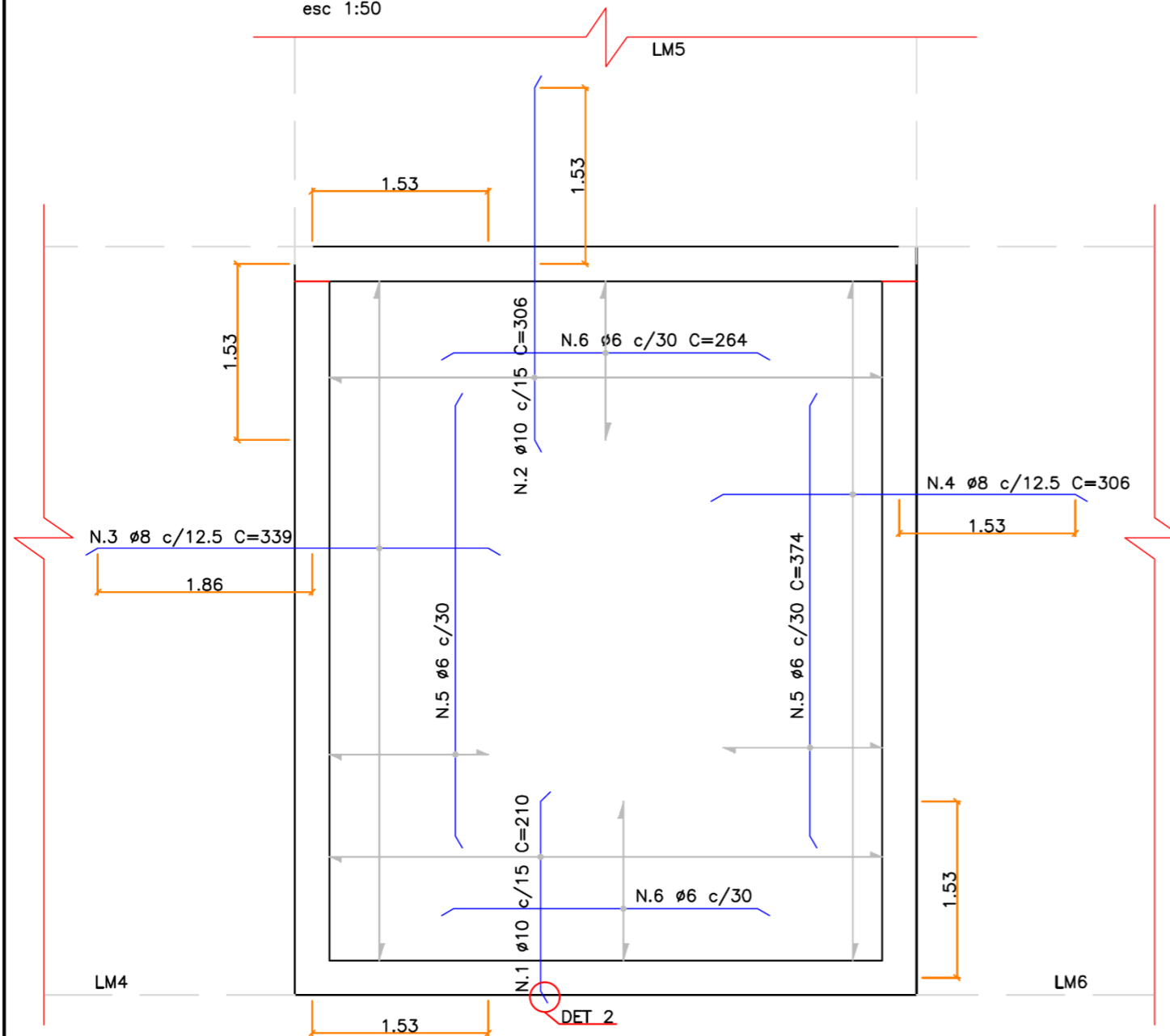


NOTAS:

- 01- NORMAS DE REFERÊNCIA:
 - NP EN 1992-1-1: Projecto de estruturas de betão
 - NP EN 1998-1 : Projecto de estruturas para resistência aos sismos
 - REBAP - Regulamento de Estruturas de Concreto Armado e Pré-Esforçado
 - RSA - Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes
- 02- NÍVEL DE REFERÊNCIA CONFORME PROJETO DE ARQUITETURA.
- 03- XC3 (CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL)
- 04- AÇÕES VERTICAIS ADOTADAS NAS LAJES : ESPECÍFICO PARA CADA PAVIMENTO.
- 05- MATERIAIS: CONCRETO : $f_{ck} = 30/37$ MPa Aço: A500NR
- 08- COBRIMENTO = 3,5 cm

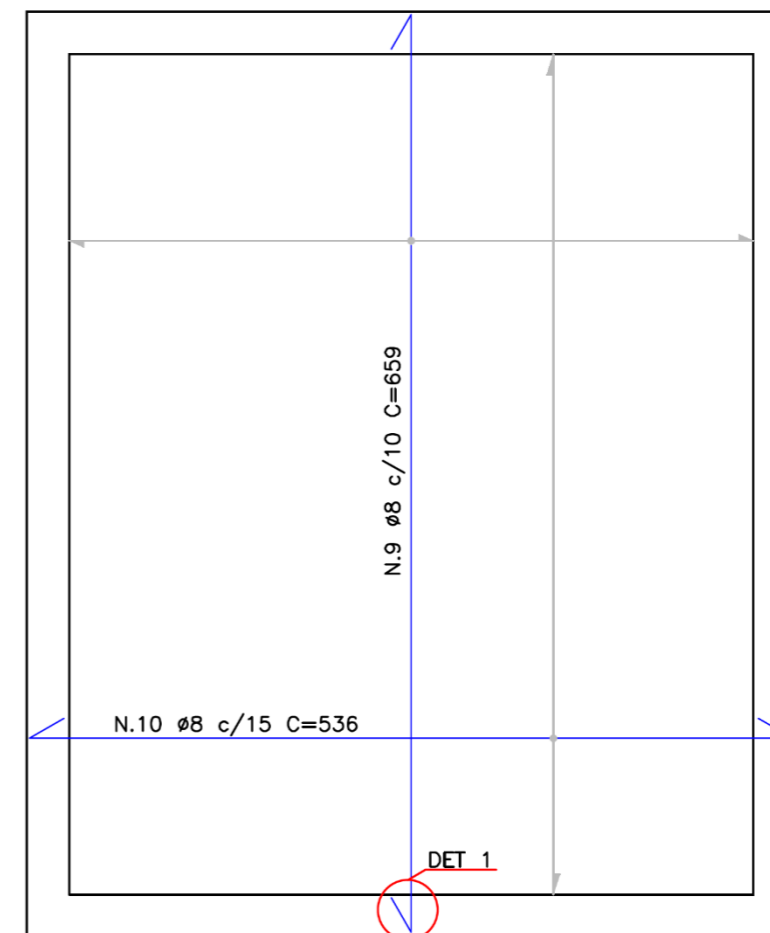
DETALHAMENTO ARM. SUPERIOR LM6

esc 1:50



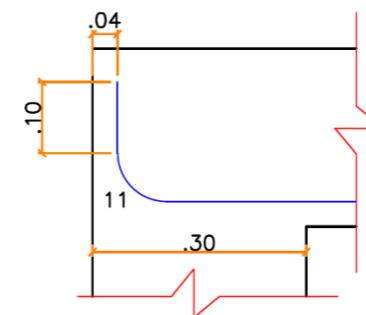
DETALHAMENTO ARM. INFERIOR LM6

esc 1:50



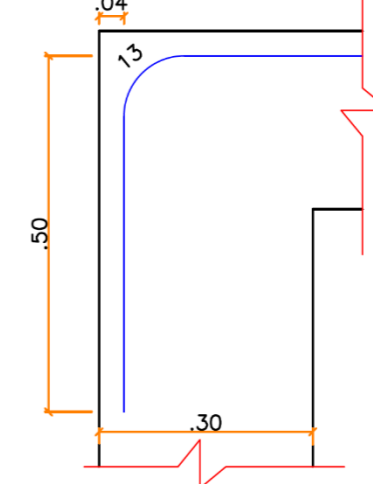
DETALHE 1

esc 1:10



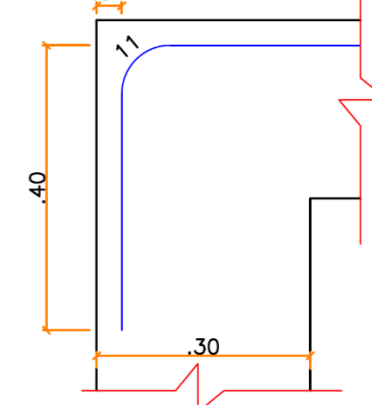
DETALHE 2

esc 1:10



DETALHE 3

esc 1:10



NOTAS:

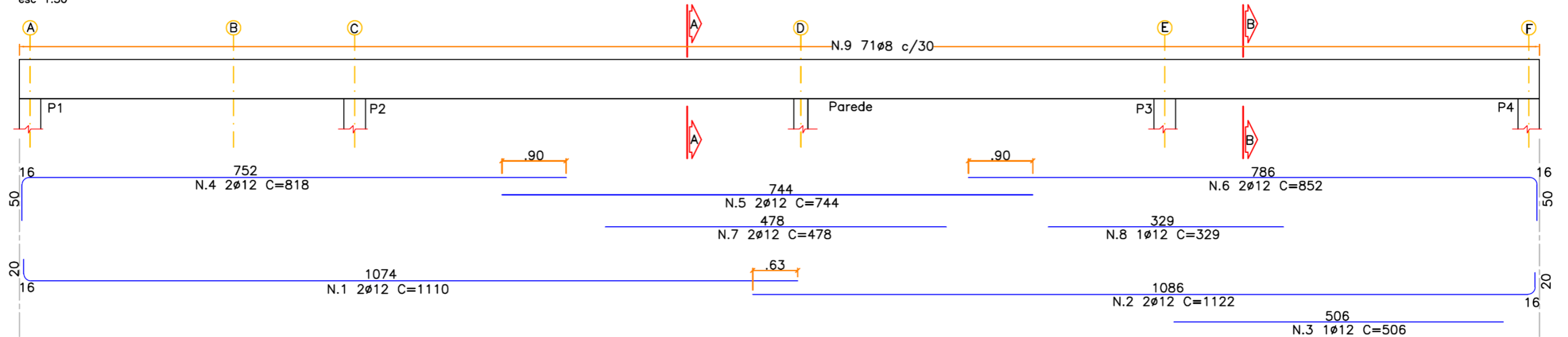
- 01- NORMAS DE REFERÊNCIA:
 - NP EN 1992-1-1: Projecto de estruturas de betão
 - NP EN 1998-1 : Projecto de estruturas para resistência aos sismos
 - REBAP - Regulamento de Estruturas de Concreto Armado e Pré-Esforçado
 - RSA - Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes
- 02- NÍVEL DE REFERÊNCIA CONFORME PROJETO DE ARQUITETURA.
- 03- XC3 (CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL)
- 04- AÇÕES VERTICAIS ADOTADAS NAS LAJES : ESPECÍFICO PARA CADA PAVIMENTO.
- 05- MATERIAIS: CONCRETO : $f_{ck} = 30/37$ MPa Aço: A500NR
- 08- COBRIMENTO = 3,5 cm



TÍTULO:	ARMADURA DAS LAJES	RESPONSÁVEL TÉCNICO:	KORINA S. BRUGNERA
ASSUNTO:	DISSERTAÇÃO	ESCALA:	INDICADO
CLIENTE:	CARLOS F. G. RODRIGUES E ALFONSO P. JUNIOR	REVISOR:	R00
		FOLHA:	ARM-01
		DATA:	10/10/2018

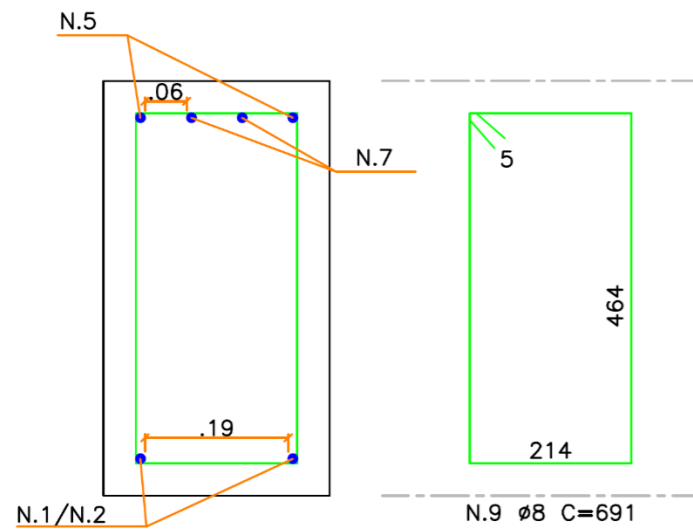
DISTRIBUIÇÃO DA ARMAÇÃO DA VIGA 2-1

esc 1:50



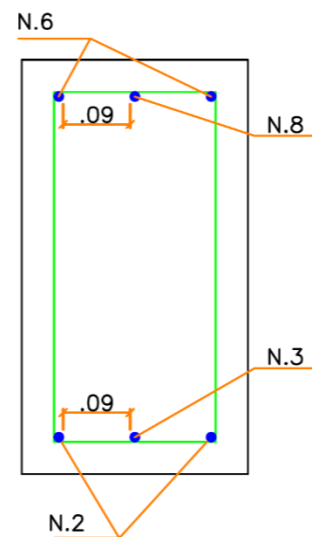
CORTE A-A

esc 1:10



CORTE B-B

esc 1:10

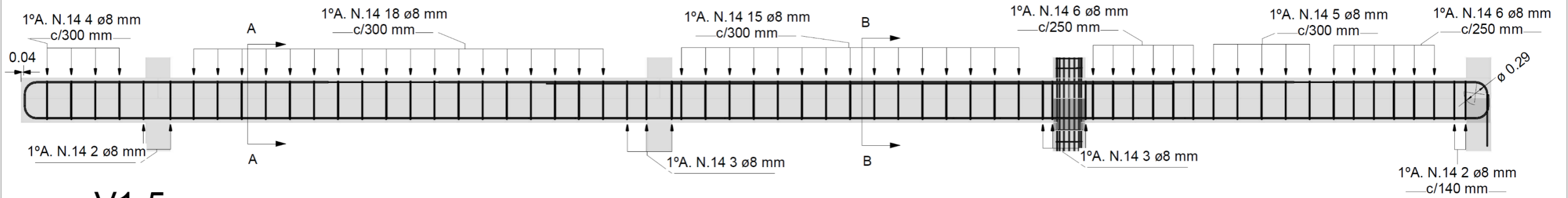


NOTAS:

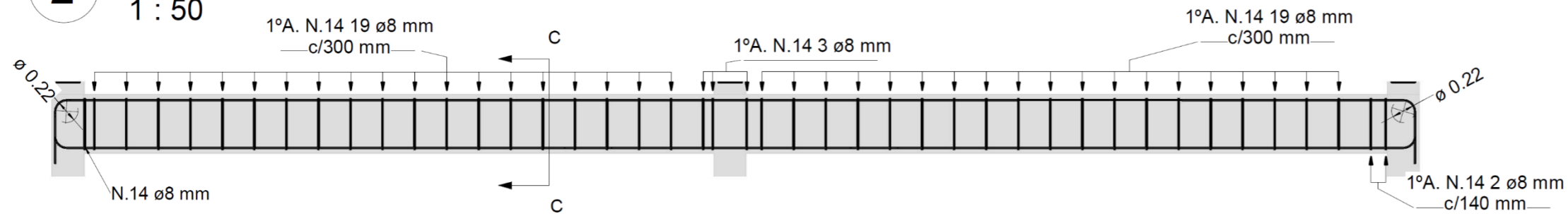
- 01- NORMAS DE REFERÊNCIA:
 - NP EN 1992-1-1: Projecto de estruturas de betão
 - NP EN 1998-1 : Projecto de estruturas para resistência aos sismos
 - REBAP - Regulamento de Estruturas de Concreto Armado e Pré-Esforçado
 - RSA - Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes
- 02- NÍVEL DE REFERÊNCIA CONFORME PROJETO DE ARQUITETURA.
- 03- XC3 (CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL)
- 04- AÇÕES VERTICAIS ADOTADAS NAS LAJES : ESPECÍFICO PARA CADA PAVIMENTO.
- 05- MATERIAIS: CONCRETO : $f_{ck} = 30/37$ MPa Aço: A500NR
- 06- COBRIMENTO = 3,5 cm

ANEXO E– DETALHAMENTO NO REVIT

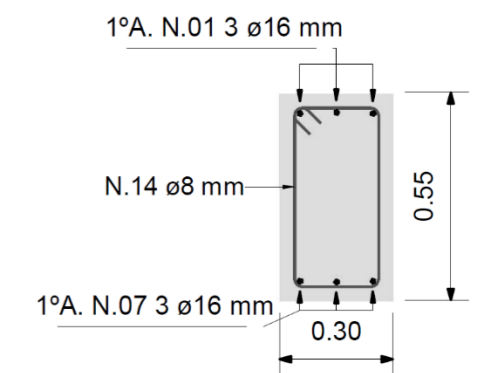
1 V1-3
1 : 50



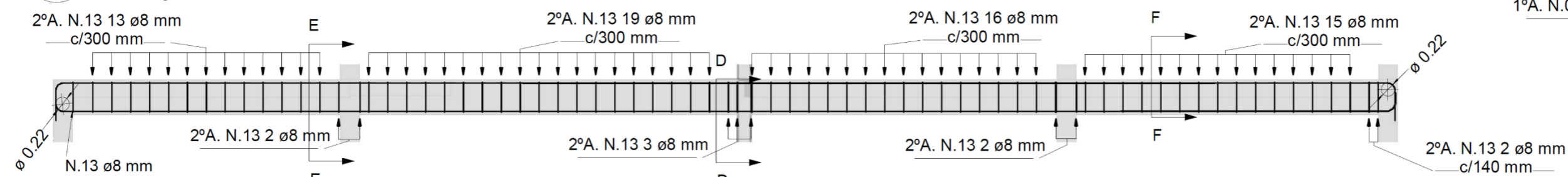
2 V1-5
1 : 50



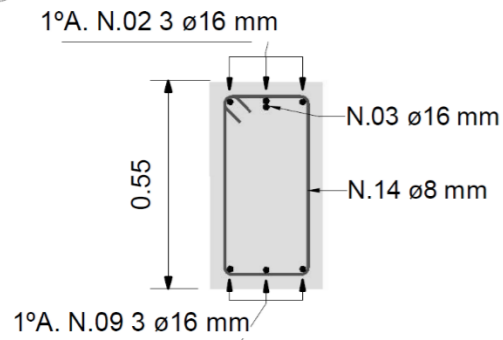
A CORTE A-A
1 : 20



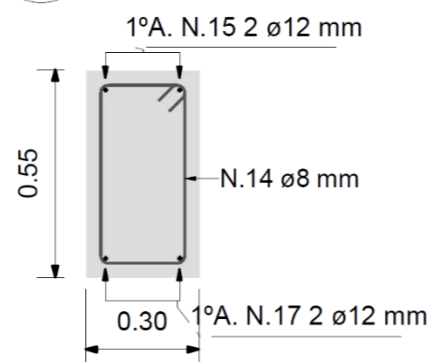
3 V2-1
1 : 75



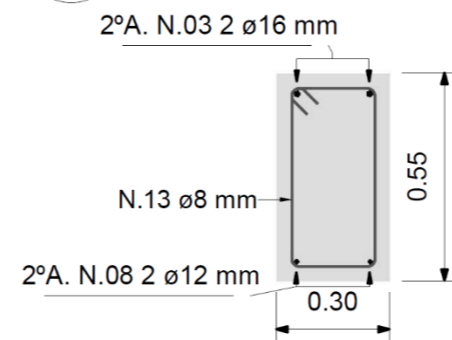
B CORTE B-B
1 : 20



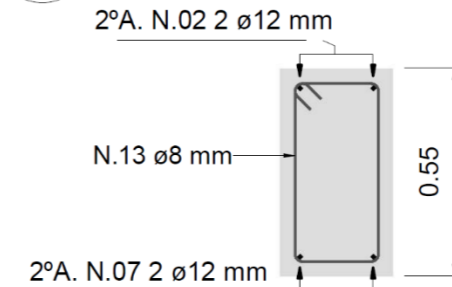
C CORTE C-C
1 : 20



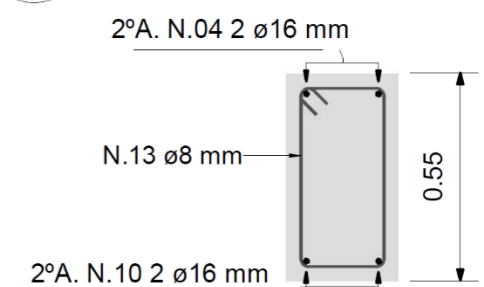
D CORTE D-D
1 : 20



E CORTE E-E
1 : 20



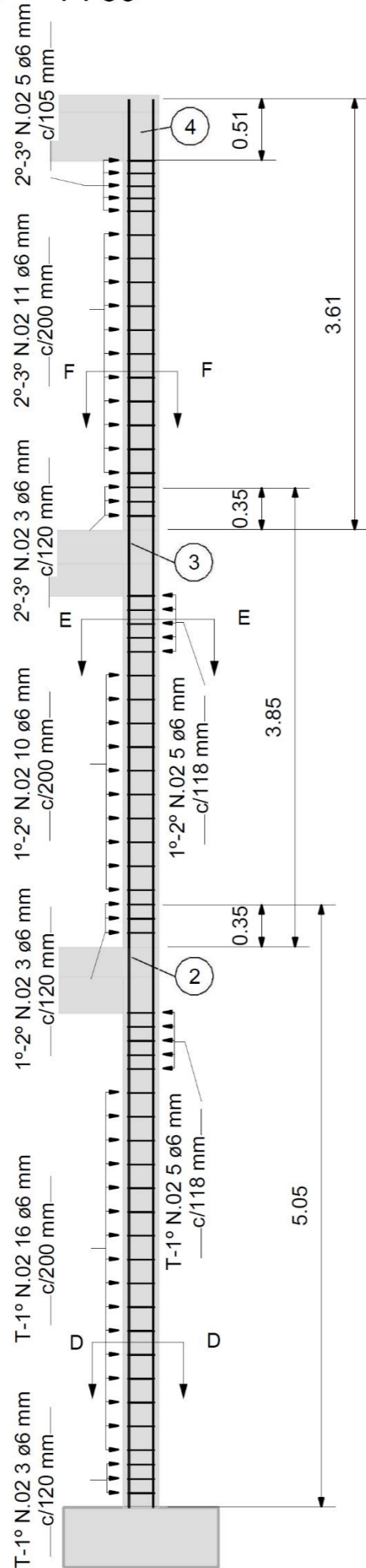
F CORTE F-F
1 : 20



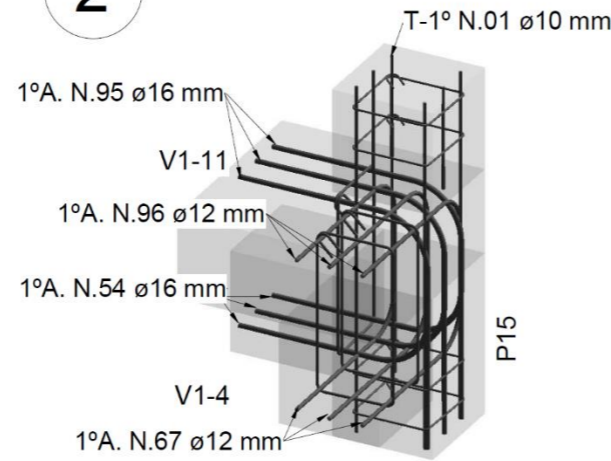
Número	Descrição	Data	ARMADURA DAS VIGAS	
1	R00	03/10/2018	Número do projeto	001
			Data	03/10/2018
			Desenhadas por	KSB
			Verificado por	CGF
			Escala	As indicated

1 P15

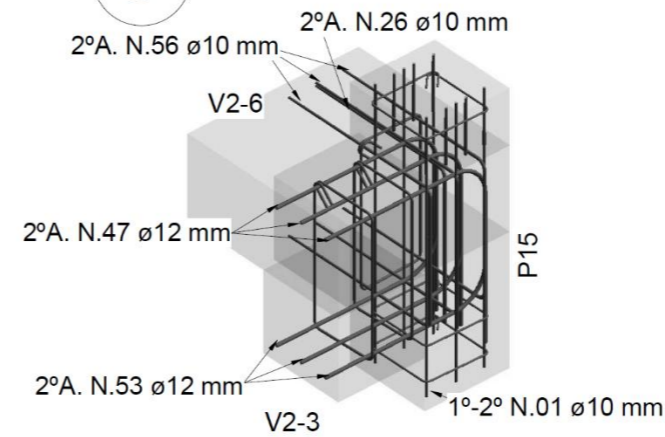
1 : 50



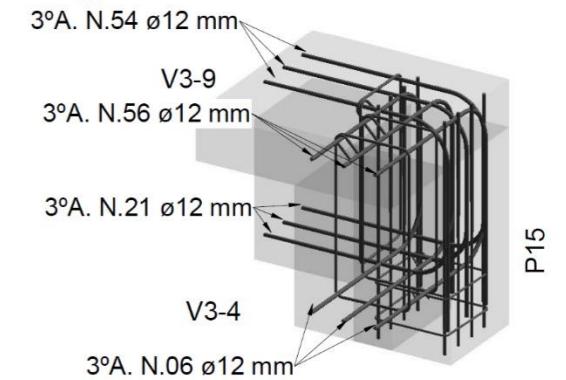
2 NÓ P15 INF.



3 NÓ P15 INT.

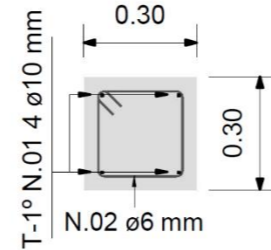


4 NÓ P15 SUP.



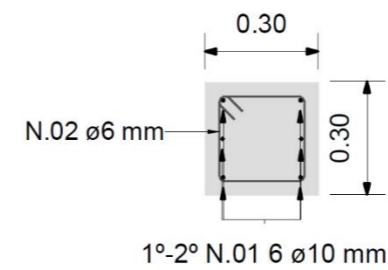
D CORTE D-D

1 : 20



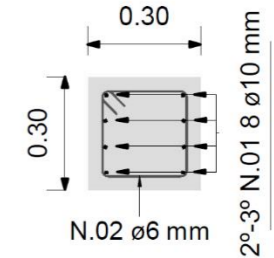
E CORTE E-E

1 : 20



F CORTE F-F

1 : 20



NOTAS:

01-NORMAS DE REFERÊNCIA

- NP EN 1992-1-1: Projecto de estruturas de betão
- NP EN 1998-1-1: Projecto de para resistência aos sismos
- REBAP - Regulamento de Estruturas de Concreto Armado e Pré Esforçado
- RSA - Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes

02-NÍVEL DE REFERÊNCIA CONFORME PROJETO DE ARQUITETURA

03-XC3(CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL)

04-MATERIAIS: CONCRETO: fck=30/37 MPa AÇO: A500NR

05-COBRIMENTO:3,5cm

Número	Descrição	Data	ARMADURA DOS PILARES	
1	R00	03/10/2018		
			Número do projeto	001
			Data	03/10/2018
			Desenhadas por	KSB
			Verificado por	CFG
			Escala	As indicated
			ARM-003	