



Automatização da modelação BIM de armaduras no projeto de estruturas

HENRIQUE JOÃO DE CAMPOS PIRES

Outubro de 2017

AUTOMATIZAÇÃO DA MODELAÇÃO BIM DE ARMADURAS NO PROJETO DE ESTRUTURAS

HENRIQUE JOÃO DE CAMPOS PIRES

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS

Orientador: Carlos Filipe Guedes Rodrigues

Supervisor: José Carlos Basto Lino (NEWTON – Consultores de Engenharia)

OUTUBRO DE 2017

Aos meus pais e avô

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	v
Resumo.....	vii
Abstract	ix
Agradecimentos	xi
Índice de Texto	xiii
Índice de Figuras.....	xvii
Índice de Tabelas.....	xxi
Capítulo 1 Introdução	1
Capítulo 2 Estado de arte.....	5
Capítulo 3 Dimensionamento de lajes maciças	27
Capítulo 4 Interface de dimensionamento	53
Capítulo 5 Automatização da modelação BIM de armaduras	81
Capítulo 6 Conclusões.....	93
Referências Bibliográficas	95

RESUMO

A pormenorização de lajes é um processo moroso e repetitivo que requer bastantes horas de trabalho por parte de desenhadores especializados ou até mesmo engenheiros projetistas. O BIM veio alterar este paradigma, introduzindo novas funcionalidades e novas ferramentas que apoiam o engenheiro de estruturas permitindo criar algoritmos para automatizar este tipo de tarefas que consomem demasiado tempo quando executadas manualmente.

O uso da metodologia BIM tem como objetivos melhorar a visualização das armaduras nos modelos e possibilitar a partilha de informação entre o projeto e a montagem. A modelação BIM de armaduras no projeto de estruturas, em lajes de betão armado, ainda é uma atividade muito recente, necessitada de ser estudada e melhorada no que respeita à sua automatização. Existe muito pouca informação disponível e poucos softwares BIM com capacidade de modelar de uma forma automática. Por essa razão, os projetistas ainda preferem os métodos tradicionais como o CAD.

O objetivo desta dissertação passa pela criação automática de elementos tridimensionais de armaduras em lajes maciças a partir do dimensionamento, em modelos BIM da estrutura. Neste sentido, o presente trabalho tem por base a criação de um algoritmo capaz de automatizar a modelação 3D de armaduras em lajes simplesmente apoiadas. Foi desenvolvida uma folha de cálculo automática no Excel que permite o dimensionamento da laje. É apresentado um fluxo de trabalho entre Robot – Excel – Dynamo – Revit. Paralelamente, e como complemento ao objetivo proposto, foi desenvolvido um algoritmo com capacidade de automatizar a modelação de armaduras em lajes encastradas nos quatro bordos. Deste modo, cria-se um fluxo de trabalho automático possibilitando a visualização das armaduras no modelo BIM bem como a extração de mapa de quantidades.

De forma a avaliar as ferramentas desenvolvidas, será apresentado um caso de estudo de forma a ilustrar a sua aplicabilidade e interesse prático.

Palavras-chave: Modelação de armaduras, Dynamo, BIM.

ABSTRACT

The detailing of slabs is a lengthy and repetitive process which requires considerable hours of work by specialized designers and design engineers. BIM has changed this paradigm by introducing new features and new tools that support the structure engineer allowing the creation of algorithms to automate this type of tasks which are too time-consuming when executed manually.

The improvement of rebar visualization in the models and the possibility of sharing the information between the design and the assembly are objectives of the use of the BIM methodology. The BIM rebar modeling in the design of structures, in reinforced concrete slabs, is still a very recent activity, which needs further study and improvement regarding its automation. There is very little information available and few BIM software with the ability to model in an automatic way. Therefore, designers tend to prefer traditional methods such as CAD.

The objective of this thesis is the automatic creation of three-dimensional rebar elements of reinforcement by the sizing of solid slabs, in BIM models of the structure. In this sense, the present work is based on the creation of an algorithm capable of automating a 3D modeling of reinforcement in simply supported slabs. It was necessary to develop an automatic Excel spreadsheet that allows the slab dimensioning. It is introduced the workflow between Robot – Excel – Dynamo – Revit. In parallel, and in addition to the proposed objective, an algorithm was developed with the ability to automate the reinforcement in slabs fixed at the four edges.

In this way, an automatic workflow is created allowing the rebar visualization in the BIM model, as well as the map extraction of quantities.

To evaluate the tools developed, a case study will be presented in order to illustrate its applicability and practical interest.

Keywords: Rebar modeling, Dynamo, BIM

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor Carlos Rodrigues, meu Orientador, por todo o apoio, por toda a transmissão de conhecimentos e sugestões indispensáveis e por sempre se mostrar disponível em ajudar e colaborar.

Gostaria de deixar um agradecimento a toda a equipa da empresa de projeto NEWTON – Consultores de Engenharia, e um especial agradecimento ao Engenheiro José Carlos Lino, pela oportunidade dada de realizar o estágio curricular na sua empresa, pela sua disponibilidade, pelo modo cativante com que transmitiu os seus conhecimentos e pela sábia e experiente orientação.

Quero também agradecer aos meus colegas de estagiários que durante este período de tempo estiveram presentes acompanhando o desenvolvimento deste trabalho especialmente ao João Santos pelas longas conversas motivacionais e partilha de conhecimento, à Catarina Silva, João Alves, Bruno Vaz e Eduarda Macedo.

Um agradecimento à Renata Moreira pelo seu afeto, carinho e por todo o seu apoio.

Faço uma dedicatória especial ao João Gomes, colega e amigo de infância, que sempre me acompanhou dando sempre todo o seu apoio com o qual partilhei dos piores e dos melhores momentos deste meu trajeto profissional e pessoal.

ÍNDICE DE TEXTO

CAPÍTULO 1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Motivação e objetivos.....	2
1.3	Organização do relatório.....	2
CAPÍTULO 2	Estado de arte.....	5
2.1	Building Information Modeling (BIM).....	5
2.1.1	Conceito BIM.....	5
2.1.2	BIM aplicado ao projeto de estruturas.....	6
2.1.3	Nível de desenvolvimento (LOD).....	8
2.1.4	Modelação por objetos.....	9
2.1.5	Modelação digital 3D paramétrica.....	10
2.2	Análise Estrutural e Dimensionamento.....	10
2.2.1	Documentos normativos.....	11
2.2.2	Programas de análise e dimensionamento.....	12
2.2.3	Lajes.....	15
2.2.3.1	Métodos para cálculos de esforços em lajes armadas em duas direções.....	16
2.3	Modelação e Pormenorização.....	16
2.3.1	Pormenorização e detalhe de betão armado.....	17
2.3.2	Modelação de armaduras BIM.....	19
2.3.3	Software de modelação BIM de armaduras.....	20
2.3.3.1	Modelação de armaduras no Revit.....	21
2.3.3.2	Tekla Structures.....	22

2.3.4	Aplicação para produção de armaduras.....	23
2.3.4.1	Dynamo	24
CAPÍTULO 3	Dimensionamento de lajes maciças.....	27
3.1	Bases para o dimensionamento.....	27
3.1.1	Ações em estruturas.....	27
3.1.2	Comportamento do betão e do aço	29
3.1.3	Disposições construtivas gerais	32
3.1.4	Verificação da segurança aos Estados Limite Últimos.....	37
3.1.5	Verificação da segurança aos Estados Limite de Utilização.....	38
3.2	Dimensionamento aos Estados limite últimos.....	39
3.3	Avaliação da segurança aos estados limite de utilização	41
3.3.1	Limitação das tensões.....	41
3.3.2	Controlo da fendilhação	44
3.3.3	Controlo da deformação.....	46
3.4	Disposições gerais relativas a armaduras em lajes maciças	47
3.4.1	Verificações regulamentares	47
3.4.2	Lajes simplesmente apoiadas nos quatro bordos	49
3.4.3	Lajes encastradas nos quatro bordos	51
CAPÍTULO 4	Interface de dimensionamento.....	53
4.1	Fluxos de trabalho utilizados	53
4.2	Ferramenta computacional desenvolvida	56
4.2.1	Informação de Input	57
4.2.2	Resultados do programa.....	61
4.2.3	Ligação ao programa Robot Structural Analysis	65
4.2.4	Interligação com software de modelação BIM.....	66
4.3	Caso prático	67
4.3.1	Dimensionamento de uma laje simplesmente apoiada	67

4.3.2	Verificação aos Estados Limites de Utilização	71
4.3.3	Verificação do exemplo recorrendo a folha de cálculo automática.....	73
4.4	Considerações finais	80
CAPÍTULO 5	Automatização da modelação BIM de armaduras.....	81
5.1	Software de modelação BIM de armaduras	82
5.1.1	Pacotes do Dynamo utilizados.....	82
5.2	Produção automática de modelos BIM de armaduras	83
5.3	Mapas de quantidades.....	91
CAPÍTULO 6	Conclusões	93
6.1	Conclusões	93
6.2	Desenvolvimentos futuros.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - BIM ao longo do ciclo de vida de um edifício [4]	6
Figura 2.2 – Principais potencialidades do BIM aplicado ao projeto [9].....	7
Figura 2.3 - LOD como delimitador de fases do projeto [11].....	8
Figura 2.4 - Nível de desenvolvimento [10]	9
Figura 2.5 – Software PAC – Pórticos [18].....	13
Figura 2.6 - Interface gráfica do PAC – Pórticos [5].....	13
Figura 2.7 - Robot Structural Analysis 2018 [19].....	14
Figura 2.8 – Elementos finitos numa laje no Robot 2018	15
Figura 2.9 – Comportamento à flexão de uma viga e de uma laje [20]	16
Figura 2.10 - Comparação de software BIM [22]	17
Figura 2.11 – Desenhos de pormenorização de armaduras [23]	18
Figura 2.12 – Desenhos de pormenorização de armaduras em ambiente BIM [24]	19
Figura 2.13 - Exemplo da modelação de armaduras em ambiente BIM [24].....	20
Figura 2.14 – Extensão do Revit para modelação de armaduras em vigas [25]	21
Figura 2.15 – Introdução de Area ou Path em lajes	22
Figura 2.16 – Exemplo da modelação de armaduras numa laje recorrendo à ferramenta Area.....	22
Figura 2.17 – Modelação de armaduras no Tekla Structures [26]	23
Figura 2.18 – Exemplo da ligação entre nós no Dynamo [27].....	24
Figura 2.19 - Algoritmo desenvolvido para a automatização da modelação BIM de armaduras	25
Figura 2.20 – Fundação de uma turbina eólica [30].....	26
Figura 3.1 – Diagrama parábola-retângulo para o betão comprimido [31].....	30
Figura 3.2 – Diagramas tensão-extensão do aço de armaduras para betão armado [31].....	31

Figura 3.3 – Diagramas tensão-extensão, idealizado e de cálculo, do aço para armaduras de betão armado (tradicional ou comprimido) [31].....	32
Figura 3.4 – Elementos que asseguram o posicionamento das armaduras [33].....	36
Figura 3.5 – Diagramas extensão, tensões e as forças internas em estado limite último [30]	40
Figura 3.6 – Representação da secção efetiva de betão tracionado numa laje [31]	45
Figura 3.7 – Tabelas de Montoya para o cálculo da flecha elástica	47
Figura 3.8 – Espaçamento máximo das armaduras [20]	48
Figura 3.9 – Armadura principal inferior [20].....	49
Figura 3.10 – Distribuição das armaduras de canto em lajes simplesmente apoiadas [20]	49
Figura 3.11 – Armaduras de apoio [20]	50
Figura 3.12 – Armadura de apoio [20].....	50
Figura 3.13 – Distribuição das armaduras em lajes encastradas nos quatro bordos [20]	51
Figura 4.1 – Fluxo de trabalho inicial.....	54
Figura 4.2 – Fluxo de trabalho com introdução do Robot 2018.....	55
Figura 4.3 – Interface gráfica da folha de cálculo desenvolvida	56
Figura 4.4 – Inputs referentes à geometria da laje	57
Figura 4.5 – Inputs referentes à classe dos materiais	57
Figura 4.6 – Input das ações permanentes	58
Figura 4.7 – Input da sobrecarga de utilização.....	59
Figura 4.8 - Input relativo ao tipo de apoio da laje	59
Figura 4.9 – Recobrimento das amaduras.....	60
Figura 4.10 – Coeficientes parciais relativos às ações.....	60
Figura 4.11 - Obtenção dos esforços máximos na laje com recurso às tabelas de Montoya	61
Figura 4.12 – Obtenção dos esforços de uma laje encastrada nos quatro bordos	61
Figura 4.13 – Verificações regulamentares segundo o EC2	62
Figura 4.14 - Armaduras principais de flexão	62
Figura 4.15 – Avisos gerados automaticamente	63

Figura 4.16 – Dimensionamento das diferentes zonas da laje.....	64
Figura 4.17 – Introdução manual dos esforços obtidos no Robot 2018	65
Figura 4.18 - Folha desenvolvida para introdução manual dos resultados obtidos	66
Figura 4.19 – Estrutura do caso de estudo nos dois softwares.....	67
Figura 4.20 – Esquema da laje a dimensionar	68
Figura 4.21 - Representação dos momentos segundo Montoya	69
Figura 4.22 – Disposições de armaduras de lajes simplesmente apoiadas.....	70
Figura 4.23 – Inputs iniciais	73
Figura 4.24 – Definir as ações atuantes	73
Figura 4.25 – Visualização da carga de dimensionamento e das verificações regulamentares	74
Figura 4.26 - Esforços obtidos através do software de análise e dimensionamento Robot 2018.....	75
Figura 4.27 – Esforços obtidos através das tabelas de Montoya	75
Figura 4.28 – Determinação das soluções a adotar para as diferentes zonas da laje.....	77
Figura 4.29 – Estado limite de fendilhação	78
Figura 4.30 – Estado limite de deformação	79
Figura 4.31 – Limitação de tensões.....	79
Figura 5.1 – Pacotes do Dynamo utilizados.....	82
Figura 5.2 - Vista geral do algoritmo desenvolvido.....	83
Figura 5.3 - Rotina em Dynamo para importação dos valores do Excel.....	84
Figura 5.4 – Parâmetros exportados da folha de cálculo automática.....	84
Figura 5.5 - Inputs associados à geometria da laje	85
Figura 5.6 – Representação em Dynamo das camadas de referência	85
Figura 5.7 – Parte da rotina em Dynamo para definição dos pontos extremos da laje.....	86
Figura 5.8 – Rotina em Dynamo para definição da linha entre os dois pontos extremos	86
Figura 5.9 – Nó Rebar.ByCurve do pacote Dynamo for rebar	87
Figura 5.10 – Definição das zonas de distribuição	88
Figura 5.11 - Definição dos espaçamentos das armaduras principais inferiores.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.12 – Rotina em Dynamo para definição dos espaçamentos das armaduras de apoio e de canto 89

Figura 5.13 – Rotina em Dynamo para configurar a visualização das armaduras..... 89

Figura 5.14 - Algoritmo desenvolvido para automatização da modelação de armaduras em lajes encastradas 90

Figura 5.15 – Representação da modelação de armaduras na laje – Dynamo/Revit 91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Programa dos Eurocódigos [17]	12
Tabela 3.1 – Categoria de edifícios para definição da sobrecarga [16]	28
Tabela 3.2 – Valores da sobrecarga em edifícios [16].....	29
Tabela 3.3 - Classes de resistência do betão [31]	29
Tabela 3.4 – Recobrimentos mínimos e nominais para períodos de vida de 50 anos e 100 anos [31]	34
Tabela 3.5 – Diâmetro mínimo do mandril para evitar danos na armadura [31]	35
Tabela 3.6 – Valores dos coeficientes a_i	36
Tabela 3.7 – Valores dos coeficientes ψ para edifícios [34].....	38
Tabela 3.8 – Coeficientes para o cálculo das tensões em secções retangulares submetidas a flexão simples [20]	43
Tabela 3.9 – Valores recomendados de ω_{max}	44
Tabela 3.10 – Espaçamento máximo de armaduras [20]	48
Tabela 4.1 – Ações.....	68
Tabela 4.2 – Propriedades dos materiais	68
Tabela 4.3 – Coeficientes parciais relativos aos materiais.....	68
Tabela 5.1 – Tabela de armaduras	92

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A metodologia *Building Information Modeling* (BIM), veio alterar a forma de trabalhar entre projetistas, revolucionando o modo como toda a estrutura organizacional de trabalho é aplicada. Esta metodologia permite uma melhor coordenação e colaboração entre os intervenientes no projeto, bem como uma rápida deteção de conflitos e conseqüentemente uma otimização de tempo e custos.

O BIM veio ainda introduzir novas funcionalidades na prática do projeto digital. Neste novo conceito, o projetista não se apoia tanto nos desenhos, mas mais no modelo tridimensional e na informação que lhe está associada.

No enquadramento descrito, a modelação BIM de armaduras é uma dessas atividades. São várias as vantagens inerentes à utilização por parte dos projetistas desta atividade. Permite a visão de todas as soluções antes da sua execução em obra, a obtenção de mapas de quantidades e desenhos técnicos bem como a respetiva orçamentação de uma forma automática, otimizando a sua execução em obra.

Ainda assim, a pormenorização dos elementos de betão armado ainda está muito ligada aos métodos tradicionais de desenho CAD 2D. É necessário melhorar os *softwares* para que este processo funcione de uma forma cada vez mais automática.

Deste modo, este trabalho focou-se na automatização da modelação BIM de armaduras em lajes de betão armado, a partir do dimensionamento. Foi desenvolvida uma folha de cálculo automático para lajes simplesmente apoiadas e encastradas com recurso ao Microsoft Excel 2016. Para a automatização do processo, foi desenvolvido um algoritmo na plataforma de programação visual Dynamo, onde toda a informação será processada de modo a serem criadas automaticamente os modelos BIM de armaduras no Revit.

Foi realizada uma pesquisa, no que respeita a trabalhos já realizados sobre o mesmo tema, e verificou-se que existe uma lacuna no que respeita à automatização da modelação BIM de armaduras em lajes maciças com recurso à programação visual. Existem muitos trabalhos, mas com foco principalmente em estruturas de geometria complexa.

CAPÍTULO 1

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

O presente relatório foi desenvolvido no gabinete da empresa NEWTON – Consultores de Engenharia e surge no âmbito do mestrado em Engenharia Civil – Ramos Estruturas em ambiente de estágio profissional.

Esta relatório tem como objetivo desenvolver uma metodologia que permita automatizar a modelação BIM de armaduras no projeto de estruturas.

Para atingir os objetivos previamente definidos foi necessário:

- Desenvolver uma folha de cálculo para dimensionamento automático da armadura de lajes simplesmente apoiadas e encastradas com recurso ao Microsoft Excel 2016.
- Criar um algoritmo em Dynamo capaz de automatizar a modelação 3D de armaduras em lajes simplesmente apoiadas.

De forma a avaliar as ferramentas desenvolvidas, decidiu-se criar algo mais exemplificativo e capaz de demonstrar tanto as funcionalidades do programa como comprovar os objetivos definidos, desenvolvendo um caso de estudo. Será ainda feita a extração de informação do modelo BIM de armaduras para obtenção de mapas de quantidade de volume de betão e de armaduras com o objetivo de demonstrar as vantagens que se podem obter em relação aos métodos tradicionais.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O presente relatório está dividido em 6 capítulos principais dos quais o primeiro é a presente introdução.

- O Capítulo 2 inicia com o estudo do estado de arte. É feito um enquadramento teórico acerca do BIM.
- No Capítulo 3 serão apresentadas as bases para o dimensionamento de lajes bem como métodos utilizados para o desenvolvimento da folha de cálculo.
- No Capítulo 4 apresenta-se a folha de cálculo desenvolvida, bem como todas as suas funcionalidades. Será iniciado um caso de estudo de uma laje simplesmente apoiada onde será possível testar a ferramenta computacional desenvolvida.
- O Capítulo 5 tem como objetivo apresentar o algoritmo que foi desenvolvido de uma forma sintetizada com recurso a esquemas ilustrativos de forma a proporcionar uma fácil leitura e entendimento do mesmo. Será finalizado o caso de estudo do capítulo 3 com representações dos modelos 3D das armaduras no Revit. Será ainda feita a extração dos mapas de quantidades dos materiais.

- No Capítulo 6 serão expostas a considerações finais e propostos alguns desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO 2

ESTADO DE ARTE

2.1 BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)

O principal objetivo deste subcapítulo passa por uma abordagem teórica em torno do tema principal, o *Building Information Modeling* (BIM).

2.1.1 Conceito BIM

Para o engenheiro de hoje, o BIM é incontornável. Cada vez mais esta atividade está associada à nova metodologia de trabalho, beneficiando de toda a tecnologia e do suporte à gestão da informação que lhe está associada [1].

O BIM é uma metodologia inovadora de trabalho colaborativo baseada na elaboração de um modelo virtual que vem proporcionar uma nova abordagem à gestão da informação na construção, à qual se destinam edifícios e outras obras de engenharia civil [2].

O BIM pode também ser definido como a tecnologia de modelação e conjunto de processos associados para produzir, analisar, comunicar e partilhar modelos de uma construção, ao longo de todo o seu ciclo de vida [1]. Um modelo BIM fiável e quantificável exige sempre um esforço de modelação que cresce exponencialmente em relação ao grau de detalhe que se pretende atingir [1].

São várias as definições que se associam ao BIM, contudo é inequívoco que não se trata simplesmente do uso de um software, mas sim de uma metodologia de trabalho. Permite introduzir no próprio modelo informações quer na fase conceptual do projeto, quer durante todo o ciclo de vida do edifício [3].

O BIM, como referido anteriormente, é aplicado ao longo de todo o ciclo de vida do edifício, desde a fase de conceção e planeamento, passando pelo projeto e construção, mantendo-se ativo na fase de exploração (Figura 2.1). A metodologia só é finalizada quando se alcançar o período de fim de vida útil da estrutura e a sua respetiva demolição.

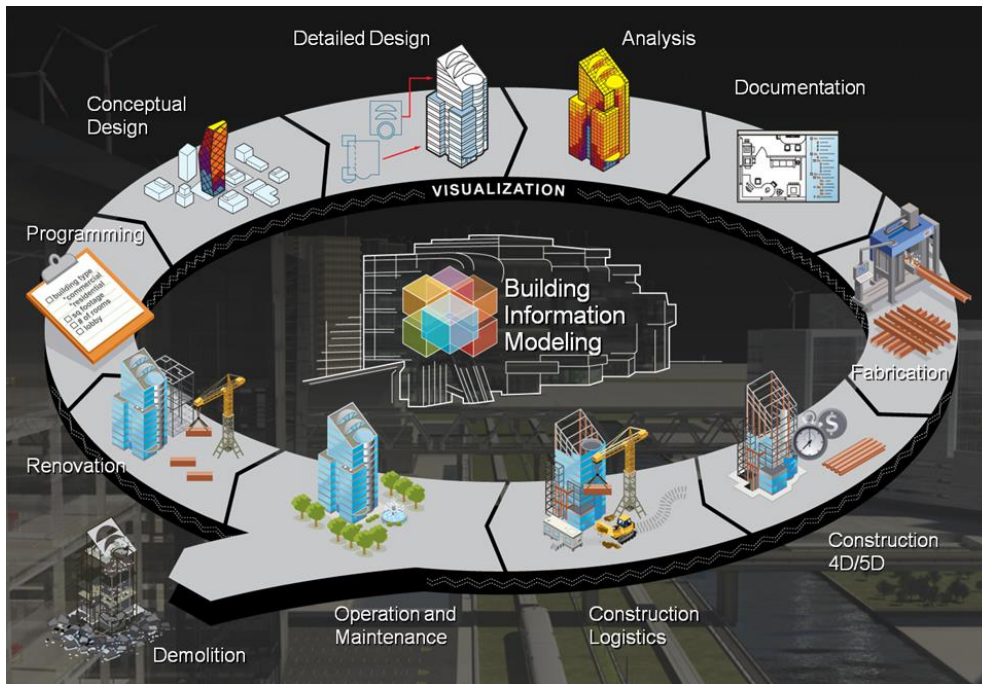


Figura 2.1 - BIM ao longo do ciclo de vida de um edifício [4]

Com esta nova forma de trabalhar, o campo da engenharia de estruturas está também sujeito a novas metodologias de trabalho, como na elaboração do projeto e da respetiva documentação daí proveniente. A globalização do BIM é uma realidade. As grandes empresas de engenharia já não o dispensam. Os esforços de normalização BIM são globais e intensos.

2.1.2 BIM aplicado ao projeto de estruturas

Tradicionalmente, no projeto de estruturas, a conceção e a preparação das peças desenhadas são auxiliadas por ferramentas de desenho CAD 2D, não existindo nenhuma interligação com os modelos 3D de cálculo que as suportam, sendo por isso necessário uma forte componente humana na sincronização entre as diferentes plataformas [6]. A utilização de modelos computacionais para análise e dimensionamento de estruturas já é habitual há muito tempo entre os engenheiros de estruturas.

Os engenheiros de estruturas são muito ativos na utilização e criação de novas aplicações informáticas. Desenvolveram vários programas computacionais com capacidade de simular o comportamento estrutural, o mais próximo da realidade possível. O projeto estrutural, desde a década de 80, através das aplicações informáticas vem-se revelando cada vez mais completo e complexo [7].

Existe ainda um processo de trabalho fechado nos gabinetes de projeto, devido ao software disponível funcionar sem interoperabilidade. A utilização do BIM veio trazer uma forte ajuda tanto na parte da modelação como na parte de interpretação de projetos.

Atualmente, a indústria da AEC (Arquitetura Engenharia e Construção) tem vindo a sofrer grandes desafios no aumento da complexidade dos seus edifícios. São procuradas cada vez mais formas e soluções arrojadas. Por consequência, a complexidade da modelação destes edifícios aumenta exponencialmente. Esta metodologia traduz-se numa mudança de paradigma para a indústria AEC que procura cada vez mais soluções de automatização e modernização.

A utilização do BIM combinada com a capacidade de simulação virtual da construção é uma mais valia que pode facilitar em projetos complexos e multidisciplinares [8].

A metodologia prevê que a conceção do projeto passe agora a ser realizada em equipa, com base num modelo de informação. Relativamente ao projeto de estruturas, esta nova forma de trabalho tem um papel fundamental na organização e partilha de informação necessária na definição estrutural. A estrutura é modelada parametricamente, ou seja, todos os objetos possuem um conjunto de propriedades e características que o envolvem com os restantes elementos estruturais. Está inerente ao modelo paramétrico o modelo analítico. Este modelo digital vai apoiar os arquitetos, os engenheiros, e os construtores no projeto e no planeamento da construção.

Face as abordagens tradicionais, uma das vantagens desta metodologia é a visualização da estrutura em ambiente 3D, bem como a produção automática de desenhos (cortes, plantas, alçados e pormenorização), as respetivas atualizações, produção automática de mapas de quantidades e a estimativa orçamental. (Figura 2.2).

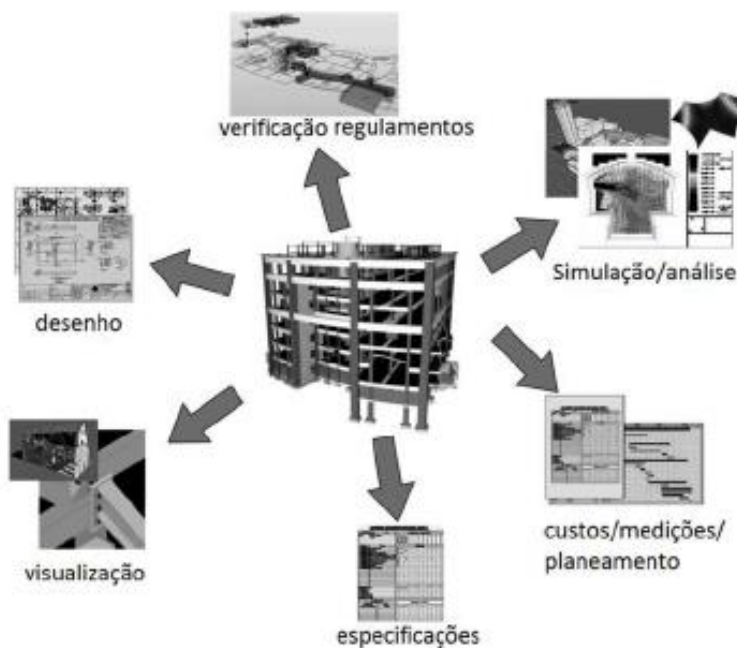


Figura 2.2 – Principais potencialidades do BIM aplicado ao projeto [9]

2.1.3 Nível de desenvolvimento (LOD)

Nível de desenvolvimento (LOD) define a profundidade do nível de informações que um determinado elemento BIM deve ter no modelo. Está relacionado com a quantidade de informação presente num elemento de um modelo e à geometria desse elemento [10].

Esta implementação tem o objetivo de permitir ao utilizador saber o quão úteis são os modelos que estão a receber e quais as suas limitações e ajuda a identificar melhor em que parte do processo de projeto um elemento está [10]. É uma medida de certeza, ou da confiança, qualidade, da informação disponibilizada e, ao mesmo tempo, uma forma de medir o progresso da modelação do edifício (Figura 2.3). É importante salientar que não existe relação direta do LOD com as fases de um projeto.

No âmbito do BIM, como uma ferramenta de colaboração, troca de informação e comunicação é fundamental definir o nível de desenvolvimento.

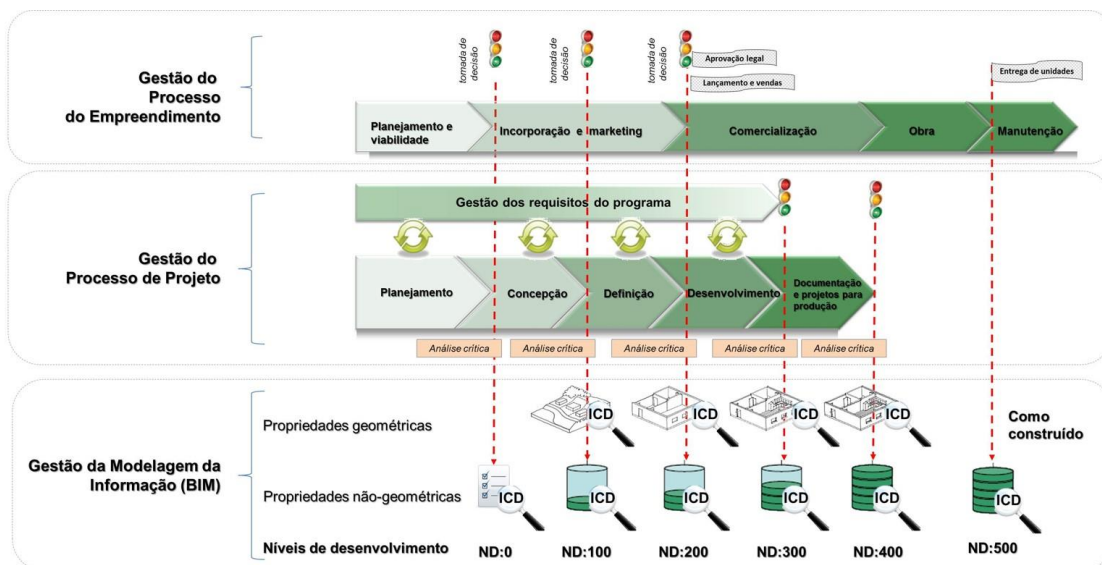


Figura 2.3 - LOD como delimitador de fases do projeto [11]

No momento da construção é mais importante saber qual o fabricante e o modelo de determinado elemento do que saber, por exemplo, a sua aparência. É também importante para compatibilizar com os elementos ao seu redor as suas dimensões. Deste modo, o nível de desenvolvimento é essencial pois auxilia os envolvidos no processo a ter uma melhor visão dos elementos BIM envolvidos.

Em termos gerais, são definidos cinco níveis de desenvolvimento conforme é visível na Figura 2.4:

- LOD 100 – O Modelo é representado como um estudo de massas e os seus elementos podem ser representados graficamente por meio de símbolos, linhas ou volumes genéricos, mas que não satisfaz os requerimentos para o LOD 200;

- LOD 200 – Neste nível de desenvolvimento os elementos possuem geometrias com dimensões, formas, quantidade e localização próximos aos reais;
- DOD 300 – Os elementos possuem informação que refletem as condições reais do empreendimento;
- LOD 400 – Os elementos do modelo podem ser utilizados para gerar documentos de fabricação e/ou montagem para a construção. Este LOD é recomendado para ser utilizado por empreiteiros durante o processo de construção, pois engloba informação sobre geometria, localização e quantidades;
- LOD 500 – Os elementos refletem o modelo conforme construído em termos de dimensões, forma, localização, quantidade, posição, dados técnicos e fabricante.



Figura 2.4 - Nível de desenvolvimento [10]

2.1.4 Modelação por objetos

No âmbito da metodologia BIM, um objeto contém muito mais do que a sua representação geométrica. Para além disso, este pode conter informações relativas às suas propriedades (tipo de material, massa, propriedades acústicas, entre outros), informação sobre o seu posicionamento espacial, custo, fabricante, ou qualquer outro tipo de informação relevante para o projetista [12]. Toda esta informação será relevante, posteriormente, para a obtenção de mapas de quantidades e orçamentos, ou para uma eventual análise de estudos acústicos e energéticos. Um modelo com todas estas características é designado de modelo paramétrico. Desde o ano de 1990, as indústrias da engenharia mecânica e aeroespacial já utilizavam conceitos semelhantes ao BIM com modelação paramétrica [13].

O conceito dos objetos paramétricos é fundamental para a compreensão do BIM e da sua diferenciação em relação aos tradicionais objetos 3D [14].

CAPÍTULO 2

Em qualquer fase do projeto, todas as características definidas inicialmente para cada objeto poderão ser alteradas, ou seja, o elemento é totalmente editável em qualquer fase do projeto. O utilizador poderá assim acrescentar o que achar fundamental para um determinado objeto.

Todas as ferramentas de autoria BIM têm a capacidade de produzir modelos paramétricos.

2.1.5 Modelação digital 3D paramétrica

A modelação digital 3D paramétrica ou design computacional consiste na utilização de estratégias computacionais para resolver problemas de desenho através da programação visual.

A modelação digital 3D paramétrica utiliza parâmetros e as suas inter-relações para a definição de formas geométricas [15]. Hoje em dia, as exigências e os prazos de entrega dos projetos são cada vez mais curtos e com a mudança do paradigma em relação à forma das estruturas o design paramétrico permite uma panóplia de opções de geometria. Este tipo de modelação está ligado ao desenvolvimento de algoritmos, o que permite a alteração da forma da geometria em qualquer fase do projeto. A utilização de algoritmos para gerar geometrias torna possível desenvolver geometrias cada vez mais complexas que seriam impraticáveis através das metodologias tradicionais de design.

Um dos softwares mais utilizados neste tipo de modelação é o Rhinoceros que permite gerar e representar curvas e superfícies. A modelação paramétrica neste ambiente é facilitada através de plugins como o Grasshopper 3D. No Revit, o plugin que contém a interface gráfica de programação é o Dynamo.

2.2 ANÁLISE ESTRUTURAL E DIMENSIONAMENTO

O uso de software no auxílio das diferentes áreas do projeto de estruturas, nos dias de hoje, é imprescindível. Todo o cálculo estrutural é realizado com recurso aos vários softwares disponíveis no mercado.

Com estes programas é possível obter uma análise dos modelos mais realista, conseguindo desta forma soluções mais económicas, seguras e com maior rapidez na obtenção de resultados.

Num procedimento seguindo a metodologia BIM, numa primeira fase, é necessário a criação do modelo de arquitetura, em seguida é feita uma análise e um estudo estrutural do modelo. Nesse software são obtidos os esforços e poderá ser feito o dimensionamento na mesma ferramenta ou num programa diferente, seguindo sempre os regulamentos aplicáveis.

2.2.1 Documentos normativos

A regulamentação aqui apresentada é referente à situação nacional e à realidade Europeia. Existe um conjunto de Normas Europeias (EN) referentes ao projeto de estruturas de edifícios, designado de Eurocódigos.

Os Eurocódigos visam uniformizar critérios e normas de cálculo e dimensionamento de estruturas na Europa. Nestes documentos são estabelecidas normas de segurança nacional, pelos países membros, adaptadas à realidade de construção que estão especificadas no Anexo Nacional NA. Este anexo contém os parâmetros determinados a nível nacional (e.g. dados específicos do país, valores e/ou classes). Cabe ao IPQ - Instituto Português de Qualidade em coordenação com o LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, a tradução dos Eurocódigos e a elaboração dos Anexos Nacionais NA.

O programa dos Eurocódigos está dividido em 10 Documentos. Estes estão divididos em várias partes, contabilizando no total 58 partes de Normas Europeias (EN) com cerca de 44.500 páginas. A forma como estes estão organizados, o seu âmbito, o número de Norma Europeia (EN) e o número de partes em que se subdividem encontra-se resumida na Tabela 2.1.

A norma mais relevante para o desenvolvimento do presente trabalho é a parte 1 da EN 1992 [16] no que diz respeito às regras para edifícios em projetos de estruturas de betão. Esta norma descreve os princípios e os requisitos de segurança, de utilização e de durabilidade das estruturas de betão. A verificação de segurança baseia-se nos estados limite em conjunto com um método dos coeficientes parciais.

No presente trabalho, serão abordados as indicações e os aspetos das normas EN 1990 [34], EN 1991 [31] relativo às bases e ações e a EN 1992 no que se refere ao dimensionamento de estruturas de betão armado para o desenvolvimento de uma folha de cálculo.

Tabela 2.1 - Programa dos Eurocódigos [17]

Norma Europeia	Eurocódigo	Nº de Parte
EN 1990	EUROCÓDIGO relativo às bases para o projeto de estruturas	1
EN 1991	EUROCÓDIGO 1 relativo às ações em estruturas	10
EN 1992	EUROCÓDIGO 2 relativo ao projeto de estruturas de betão	4
EN 1993	EUROCÓDIGO 3 relativo ao projeto de estruturas de aço	20
EN 1994	EUROCÓDIGO 4 relativo ao projeto de estruturas mistas aço-betão	3
EN 1995	EUROCÓDIGO 5 relativo ao projeto de estruturas de madeira	3
EN 1996	EUROCÓDIGO 6 relativo ao projeto de estruturas de alvenaria	4
EN 1997	EUROCÓDIGO 7 relativo ao projeto geotécnico	2
EN 1998	EUROCÓDIGO 8 relativo ao projeto de estruturas para resistência aos sismos	6
EN 1999	EUROCÓDIGO 9 relativo ao projeto de estruturas de alumínio	5

O regulamento que se encontra em vigor em Portugal surgiu no ano de 1983 e é designado de Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (REBAP). Este regulamento foi desenvolvido devido à necessidade de estruturar a antecedente regulamentação. O referente ao projeto de estruturas de betão, equivalente ao REBAP, é o Eurocódigo 2.

2.2.2 Programas de análise e dimensionamento

Existem no mercado uma enorme panóplia de softwares de análise e dimensionamento estrutural cada vez mais sofisticados. Atualmente, estes programas têm a capacidade de potencializar e agilizar o processo de cálculo, bem como de prevenir erros de projeto. Para o correto manuseamento destas ferramentas, é necessário deter conhecimentos e competências que serão adquiridos não só a nível académico, como através de formação especializada.

Há particularidades que distinguem estes softwares, tornando-se diferentes entre si. A seguir, serão descritas as principais características e funcionalidades de dois desses programas: o PAC – Pórticos e o Robot Structural Analysis.

A Newton, fruto de vários anos de investigação, de práticas profissionais e por dispor nos seus quadros de especialistas, desenvolveu o seu próprio programa de cálculo automático de estruturas, PAC-Pórticos, Projeto de Pórticos Assistido por Computador, um dos primeiros em Portugal (Figura 2.5). O software possui, entre outros, a capacidade de dimensionar vigas, pilares e sapatas de fundação com as saídas de desenhos para CAD, um módulo para análise estática e dinâmica de ações horizontais com três graus de liberdade por piso e ainda um módulo de dimensionamento e pormenorização de lajes fungiformes [18]. Na Figura 2.6 é visível a interface gráfica do software.



Figura 2.5 – Software PAC – Pórticos [18]



Figura 2.6 - Interface gráfica do PAC – Pórticos [5]

O Robot Structural Analysis é um software de cálculo automático comercializado pela Autodesk que permite fazer análises lineares e não-lineares estáticas e dinâmicas de estruturas (Figura 2.7). Neste programa são utilizados modelos de cálculo tridimensional baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF é um procedimento numérico que permite uma estimativa dos valores das tensões, deformações e extensões nos diferentes elementos estruturais. Complementarmente, podem ser feitas verificações regulamentares com base nos Eurocódigos ou noutros regulamentos internacionais. Foi o programa de cálculo escolhido para a obtenção de esforços neste trabalho.

Os dois programas mencionados têm a capacidade de produzir peças desenhadas.

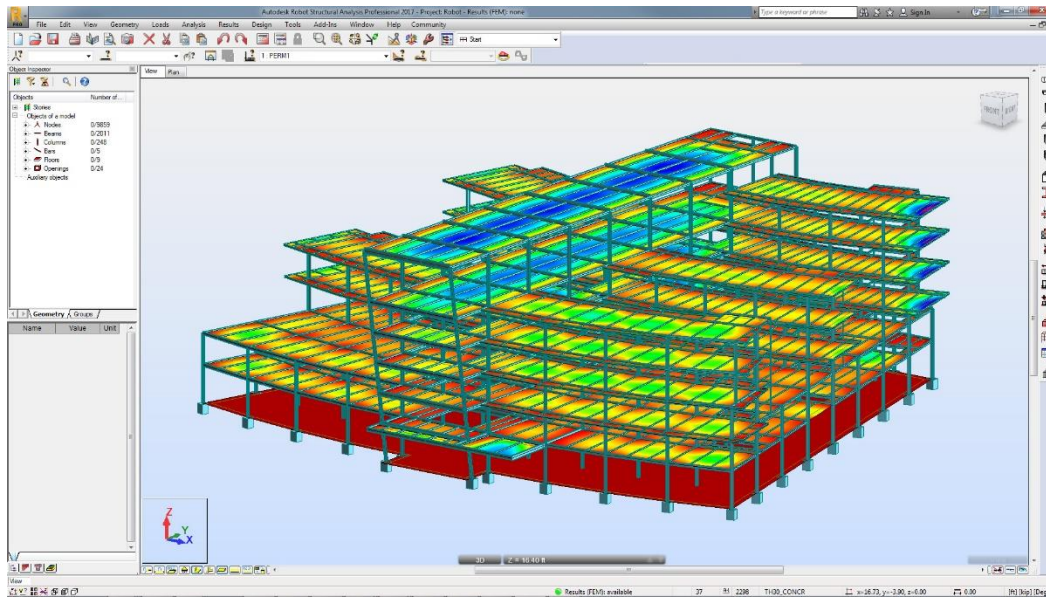


Figura 2.7 - Robot Structural Analysis 2018 [19]

Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos baseia-se na divisão do elemento estrutural em vários elementos com dimensão mais reduzida, possibilitando uma obtenção aproximada dos deslocamentos nodais e consequentemente das tensões e dos esforços (Figura 2.8). Cada elemento encontra-se ligado ao elemento adjacente através de nós, mantendo as propriedades do elemento original.

São estabelecidas equações de equilíbrio nos nós o que permite uma compatibilização de deslocamentos nodais entre nós vizinhos. As equações de equilíbrio são resolvidas através de funções interpoladoras (funções de forma). Através da resolução do problema é possível conhecer, por aproximação, em qualquer ponto o campo das tensões e de das deformações.

São distinguidos, entre outros, os elementos finitos de barra/pórtico para modelar vigas e pilares e elementos de casca para modelar lajes.

A utilização deste método tornou-se bastante viável com o desenvolvimento e os avanços computacionais. Atualmente é aplicado na maioria dos softwares de cálculo automático.

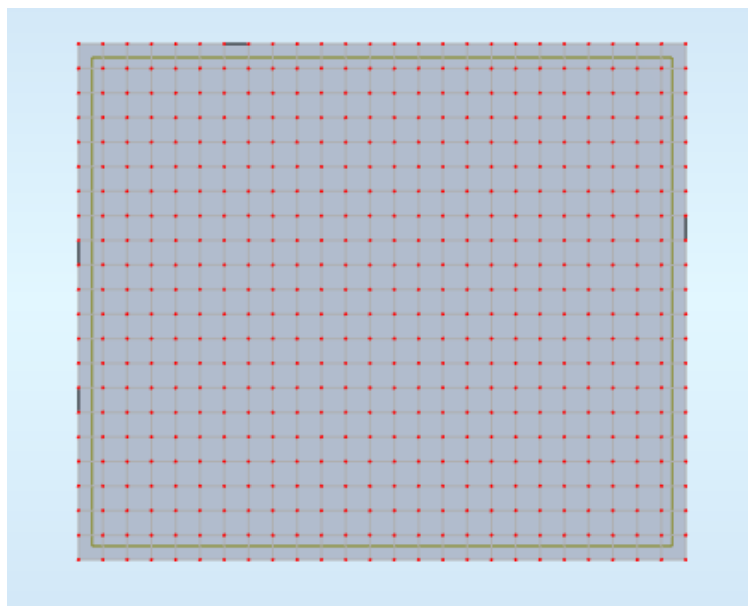


Figura 2.8 – Elementos finitos numa laje no Robot 2018

2.2.3 Lajes

No presente relatório, serão abordados elementos estruturais de superfície plana que estão sujeitos especialmente a ações normais ao seu plano, designados por lajes. O principal objetivo deste trabalho, como já referido, é obter, a partir de um modelo BIM, a automatização da modelação das armaduras em lajes.

As lajes são os elementos estruturais que constituem os pisos e as coberturas dos edifícios. A sua principal função é a de criar superfícies planas proporcionando a circulação ou a colocação de cargas. Desta forma, as lajes são especialmente solicitadas por cargas perpendiculares ao seu plano (Figura 2.9).

As lajes são classificadas quanto ao tipo de apoio, constituição, modo de flexão dominante e forma de fabrico. Quanto ao tipo de apoio, distinguem-se as lajes vigadas, fungiformes e os ensoleiramentos. Relativamente à constituição, temos as lajes maciças, aligeiradas e as nervuradas que podem ser armadas numa ou em duas direções. Quanto à forma de fabrico, são reconhecidas as lajes betonadas “in situ” e as pré-fabricadas. Para o objetivo deste trabalho, serão analisadas as lajes maciças armadas nas duas direções.

A espessura das lajes varia em função do vão, no caso das lajes maciças o intervalo mais comum é compreendido entre 0,12 e 0,30 m.

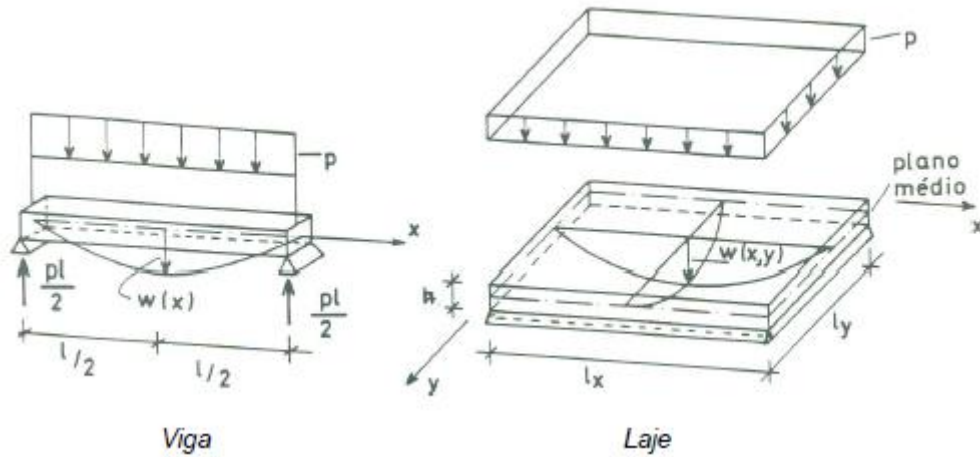


Figura 2.9 – Comportamento à flexão de uma viga e de uma laje [20]

2.2.3.1 Métodos para cálculos de esforços em lajes armadas em duas direções

A determinação dos esforços de lajes armadas em duas direções exige métodos de cálculo elaborados visto que a flexão ocorre em múltiplas direções. Existem tabelas e regras simplificadas que foram usadas para o desenvolvimento da folha que permitem o cálculo dos esforços elásticos, com um grau de aproximação razoável. Estas tabelas, de Montoya, permitem diferentes tipos de carregamento bem como diferentes condições de apoio. É ainda possível calcular a flecha da laje.

O regulamento britânico (BS8110) apoia-se também numa análise elástica para fornecer os esforços em lajes. Neste método, os valores fornecidos podem ser usados diretamente para o dimensionamento sem ser feito qualquer redistribuição. Alguns dos inconvenientes face ao outro método é que, em termos de condições de apoio, só será possível obter esforços de lajes constituídas por painéis retangulares apoiados em todo o contorno e sujeita a cargas uniformemente distribuídas.

2.3 MODELAÇÃO E PORMENORIZAÇÃO

Na construção de qualquer estrutura, é fundamental fazer um bom planeamento com o objetivo de pensar sobre as formas de construção, fazer estimativas de tempo e material para a realização desse projeto [21].

Os programas de modelação de sólidos que começaram a surgir nos anos 70 e 80 devem muito aos primeiros programas de interface gráfica, em especial ao Sketchpad de Ivan Sutherland, que começou a ser desenvolvido em 1963 no laboratório Lincoln do MIT, em Lexington, Massachusetts [1].

Atualmente, existe uma vasta gama de programas com capacidade de modelação. A empresa G2 Crowd, especializada na análise e classificação de software, refere como principais e mais bem classificados softwares de modelação o AutoCAD, SketchUp, Revit e o ArchiCAD conforme é visível na Figura 2.10. Estas

entidades assumem que existe, efetivamente, uma redução de erros na projeção e desenho e há uma maior facilidade em criar peças desenhadas.

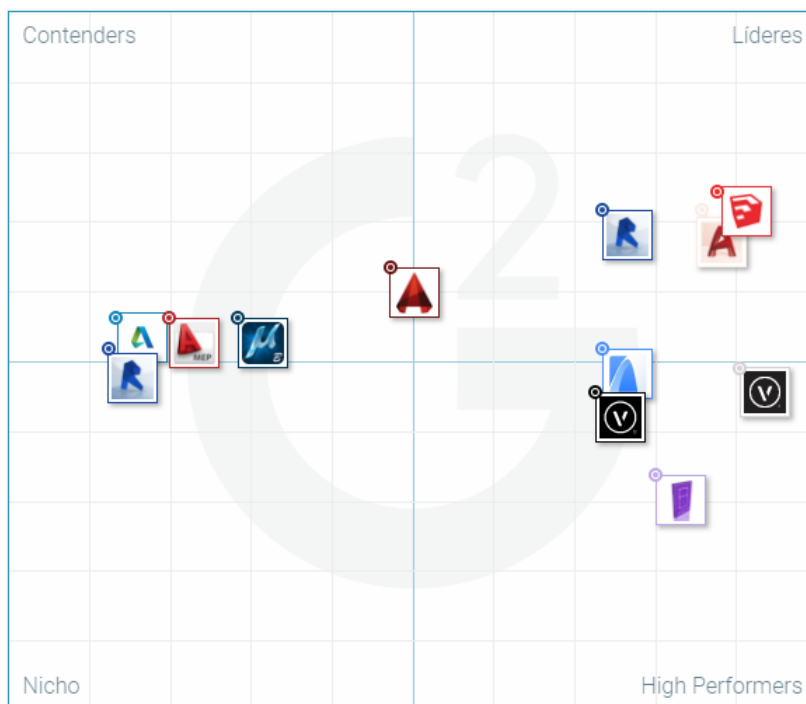


Figura 2.10 - Comparação de software BIM [22]

Estes programas têm a capacidade de modelar e ainda têm a possibilidade de incluir toda a informação específica sobre cada elemento modelado. A modelação BIM é cada vez mais aproximada da realidade devida ao grande número de programas comerciais existente para o efeito.

2.3.1 Pormenorização e detalhe de betão armado

A pormenorização de um projeto de betão armado é um processo complexo e lento que requer uma interação entre os vários intervenientes do processo. Os desenhos do projeto, para além de incluírem desenhos de dimensionamento, incluem desenhos de pormenorização de armaduras.

Em projetos de grande complexidade, e com um elevado número de armaduras para pormenorizar e detalhar, essa complicação vem dificultar a interpretação dos desenhos CAD 2D, tanto para o projetista como para o empreiteiro durante a fase de construção. Nestes projetos de grandes dimensões, o dimensionamento e detalhe são realizados por equipas de vários engenheiros que interagem entre si.

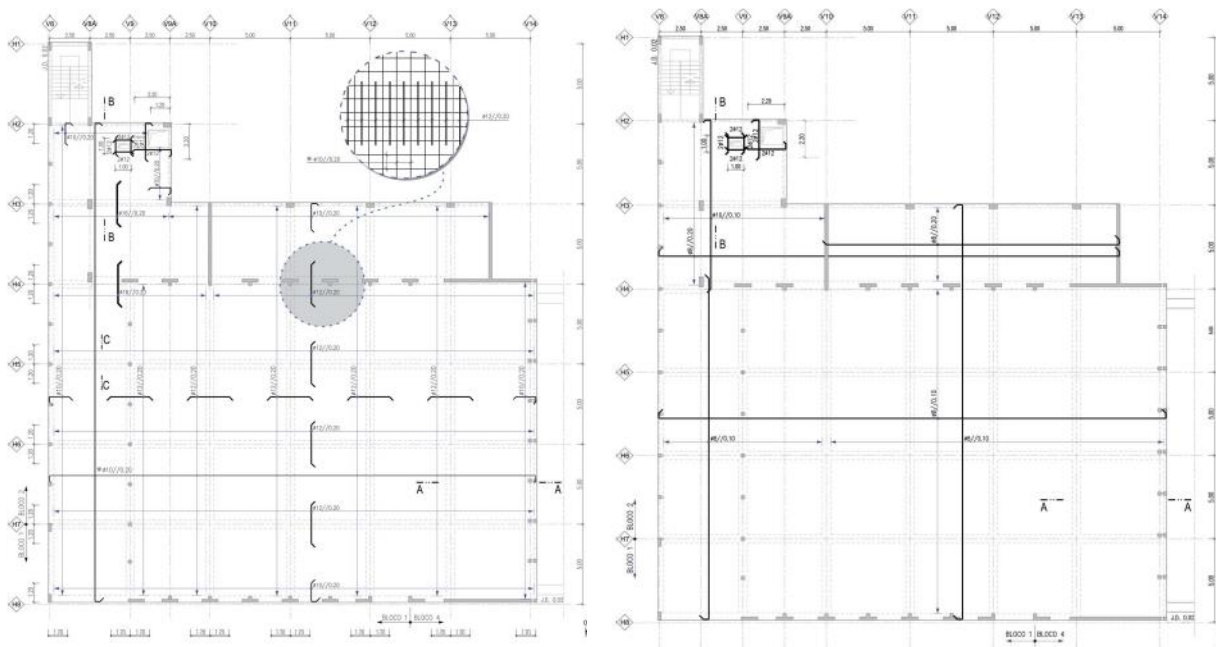
Os desenhos de pormenorização das armaduras e do pré-esforço devem ser claros, completos e detalhados contendo toda a informação relevante [23].

CAPÍTULO 2

Em lajes, as armaduras são representadas em planta e em corte. Deve-se separar em planta as armaduras inferiores das armaduras superiores. Apresentam-se a título ilustrativo, na Figura 2.11 alguns desenhos de pormenores de lajes em betão armado.

Com a metodologia BIM, este processo de pormenorização funciona de uma forma automática e irá reduzir a situações de erros na elaboração de desenhos no projeto. A produção de peças desenhadas (2D e 3D) e a produção de mapas de quantidades, através desta metodologia, é conseguida com o mínimo de esforço (Figura 2.12). Outra das vantagens ao serem apresentados os desenhos em 3D é a possibilidade de reduzir a quantidade de informação dos esquemas que serão entregues à equipa construtora.

As empresas que adotem esta forma de trabalhar garantem uma clara vantagem sobre os seus concorrentes.



a) Laje – armadura superior

b) Laje – armadura inferior

Figura 2.11 – Desenhos de pormenorização de armaduras [23]

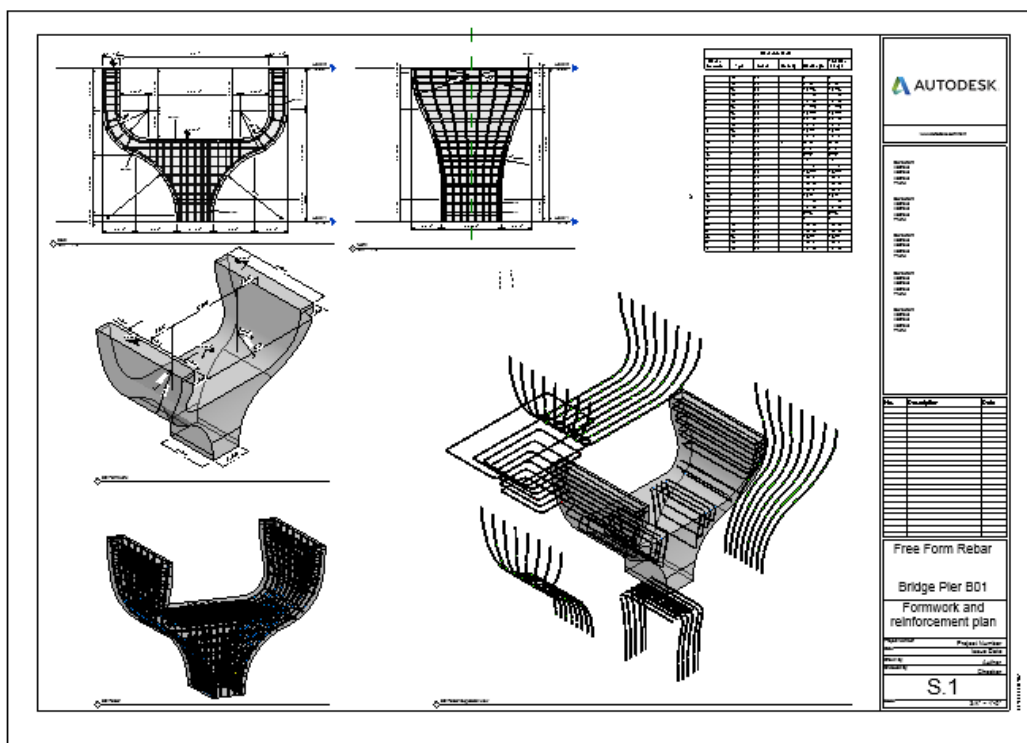


Figura 2.12 – Desenhos de pormenorização de armaduras em ambiente BIM [24]

2.3.2 Modelação de armaduras BIM

A modelação de armaduras em ambiente BIM (Figura 2.13) é um processo que ainda se encontra em fase de desenvolvimento. Ainda há muito trabalho por desenvolver para se conseguir uma automatização da modelação de armaduras principalmente nas lajes de betão armado.

Nas diversas reuniões decorridas ao longo destes últimos meses, na NEWTON, foi clara a necessidade de melhorar o processo de pormenorização e detalhe em lajes de betão armado.

Obter automaticamente peças desenhadas bem como mapas de quantidades a partir do modelo BIM de armaduras é o principal objetivo e é nesse sentido que se foca o presente trabalho.

Atualmente, o software BIM para modelação de armaduras está longe de estar totalmente automatizado. Para a obtenção das peças desenhadas ainda se segue o fluxo de trabalho tradicional, recorrendo às ferramentas de desenho CAD 2D. Por essa razão, existe alguma resistência a mudar do desenho assistido por computadores para o BIM, apesar das inúmeras vantagens que esta metodologia traz face ao método tradicional tanto a nível de redução de erros, custos e o tempo.

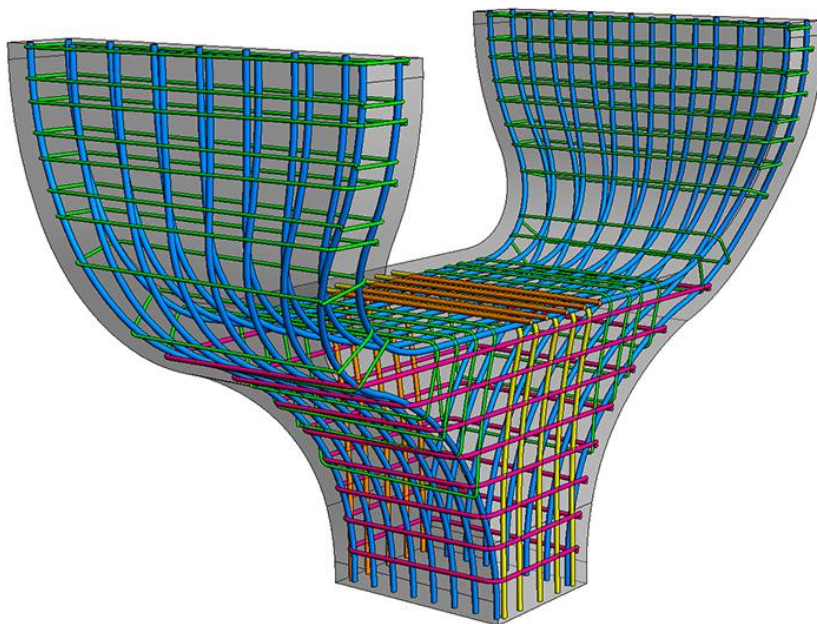


Figura 2.13 - Exemplo da modelação de armaduras em ambiente BIM [24]

2.3.3 Software de modelação BIM de armaduras

Existe, no mercado, um vasto leque de ferramentas de modelação BIM que o utilizador tem acesso. A modelação é feita com recurso a bibliotecas ou famílias que podem ser criadas e/ou editadas conforme a necessidade. A modelação BIM permite ainda a criação de novos objetos que podem ser parametrizados e posteriormente adicionados à biblioteca.

No campo da modelação de estruturas, existem vários softwares BIM com capacidade de modelação de armaduras como o Autodesk Revit Structures, Tekla Structures, Autodesk Advance Concrete, proCConcrete, proRebar e o PowerPack.

Alguns programas de dimensionamento, como o Robot Structural Analysis, detêm módulos para a produção e pormenorização de modelos 3D de armaduras. No caso de elementos estruturais planos, este apresenta algumas limitações, não sendo possível um correto posicionamento dos varões de aço que se pretende introduzir. Os modelos de armaduras não apresentam qualidade suficiente para serem usados num modelo BIM muito menos para uso técnico em obra. Hoje em dia, as empresas que desenvolvem software de análise e dimensionamento procuram incluir estes módulos que permitem modelar e pormenorizar armaduras nos próprios programas.

Serão aprofundados, nos subcapítulos seguintes, os programas de modelação Autodesk Revit Structures e o Tekla Structures.

2.3.3.1 Modelação de armaduras no Revit

O software Revit Structures foi desenvolvido especificamente para o modelo de construção BIM e possui funcionalidades para a engenharia de estruturas e construção [24]. É uma ferramenta que serve de plataforma no processo de colaboração de equipas. Neste software, é possível modelar diferentes tipos de materiais, como betão armado, alvenaria, madeira e aço.

A troca de informação entre o Revit e o Robot é facilitada devido a estas ferramentas pertencerem ao mesmo fabricante.

A modelação de armaduras, recorrendo ao programa de modelação Revit, não é intuitiva e requer bastante trabalho, por essa razão a Autodesk disponibiliza aos utilizadores um conjunto de extensões de modo a facilitar a modelação de armaduras nos elementos estruturais. As que estão disponíveis não possuem ferramentas para definição de armaduras em lajes, apenas para elementos estruturais como pilares, vigas e sapatas (Figura 2.14).

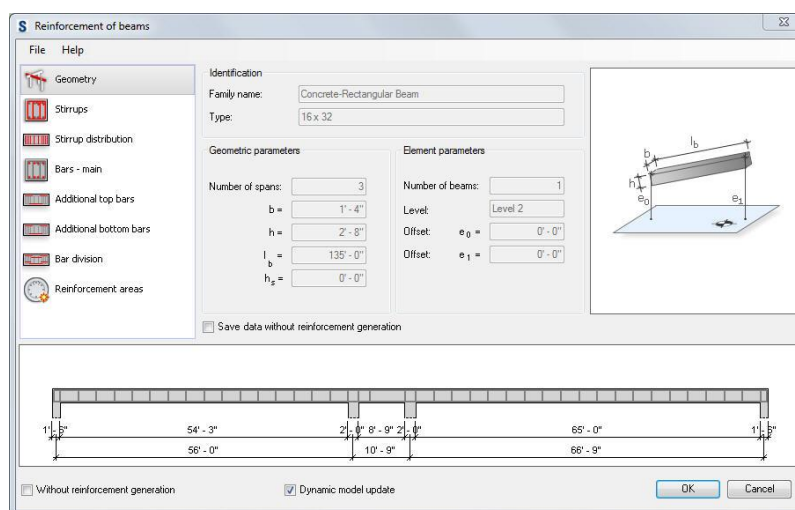


Figura 2.14 – Extensão do Revit para modelação de armaduras em vigas [25]

É possível também aplicar armaduras em elementos de betão armado de uma forma manual, sendo que só é permitido a modelação numa vista bidimensional como um corte ou em planta. Numa visualização 3D a opção encontra-se desativada. Em elementos planos como lajes e paredes, com a opção *Area* ou *Path* do separador *Reinforcement* é permitido a modelação de armaduras em ambiente tridimensional (Figura 2.15).

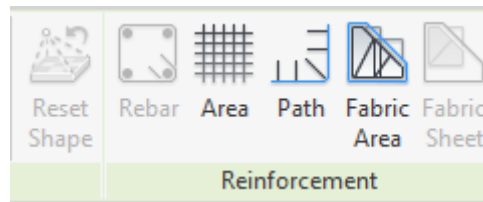


Figura 2.15 – Introdução de *Area* ou *Path* em lajes

Conforme representado na Figura 2.16, com a ferramenta *Area* consegue-se definir uma área de armadura na superfície de uma laje. É permitido definir o diâmetro dos varões longitudinais, o tipo de aço e o espaçamento entre estes para cada uma das faces.

No Revit, existe a possibilidade de criar novas formas de varões que serão inseridos posteriormente nas bibliotecas para uma futura utilização.

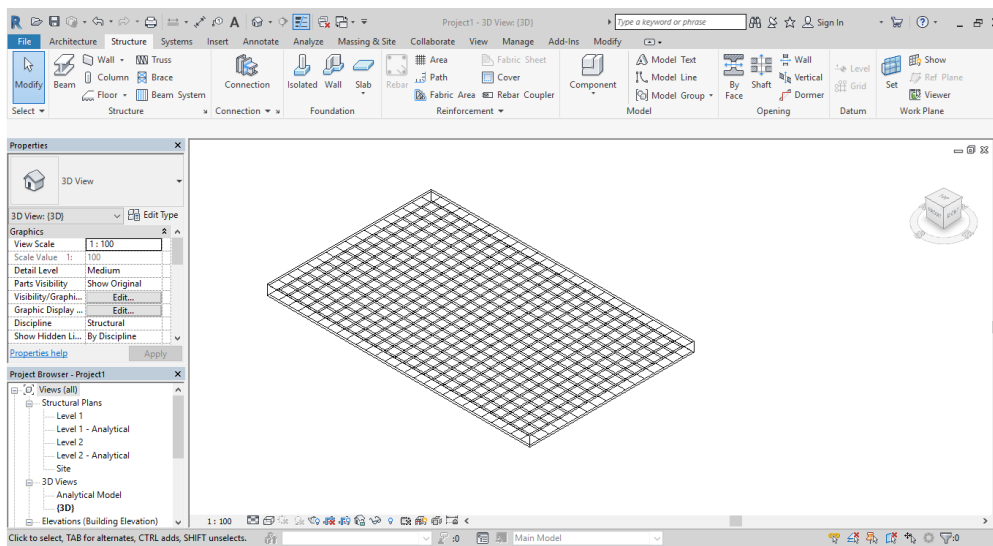


Figura 2.16 – Exemplo da modelação de armaduras numa laje recorrendo à ferramenta *Area*

Em suma, modelar armaduras no Revit recorrendo a extensões ou de uma forma manual ainda é um processo bastante moroso que apresenta dificuldades, ajudando a que a implementação deste processo ainda se arraste até aos dias de hoje.

2.3.3.2 Tekla Structures

O Tekla Structures é um software que permite ao utilizador modelar a estrutura, utilizando o tipo de material desejado ou incluir vários materiais num só modelo. Devido à possibilidade de modelar em 3D e de pré-fabricar armaduras, apresenta benefícios que auxiliam na produção e montagem dos varões. Neste âmbito, existe a oportunidade de aumentar a produtividade, desenvolver novas soluções e, assim, poupar durante o processo.

No Tekla Structures a modelação de armaduras pode ser feita de uma forma manual ou de uma forma mais automática recorrendo às bibliotecas de catálogos que o software fornece. A modelação manual é muito idêntica ao Revit podendo o utilizador definir as formas das armaduras que pretende para cada elemento estrutural (Figura 2.17). As bibliotecas contêm vários exemplos de modelos pré-definidos que podem ser aplicados ao elemento construtivo.

Este software apura incompatibilidades, pois permite que sejam gerados todos os desenhos necessários a partir do modelo, ou seja, o engenheiro sabe o posicionamento da armadura produzida antes mesmo de esta ser colocada na obra. Para isso, o Tekla Structures conta com vastas bibliotecas de armaduras e modelos que possuem os detalhes necessários à sua fabricação.

A consequente automatização resulta numa redução do trabalho manual, demorado e repetitivo que atrasa o projeto e permite produzir exatamente a quantidade necessária de armaduras, economizando tempo e dinheiro [26]

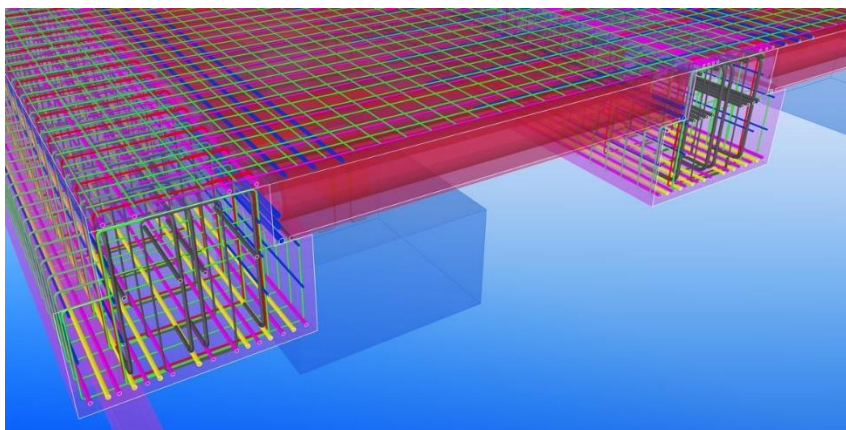


Figura 2.17 – Modelação de armaduras no Tekla Structures [26]

2.3.4 Aplicação para produção de armaduras

Existem inúmeros softwares BIM com capacidade de modelação de armaduras. Muitas extensões desenvolvidas por entidades externas vêm potenciar as ferramentas destes softwares. São várias as ferramentas desenvolvidas com o objetivo de otimizar o processo de pormenorização de detalhe de betão armado. A maior parte destas aplicações não apresenta qualquer custo para o utilizador.

O Revit disponibiliza na sua página estas aplicações com o objetivo de melhorar as ferramentas deste software como o Dynamo, que tem capacidade de modelar objetos 3D. Outra dessas aplicações é a SOFISTIK Reinforcement Detailing 2018, add-in compatível com o Revit, que apresenta várias ferramentas para a elaboração de desenhos de pormenorização de armaduras.

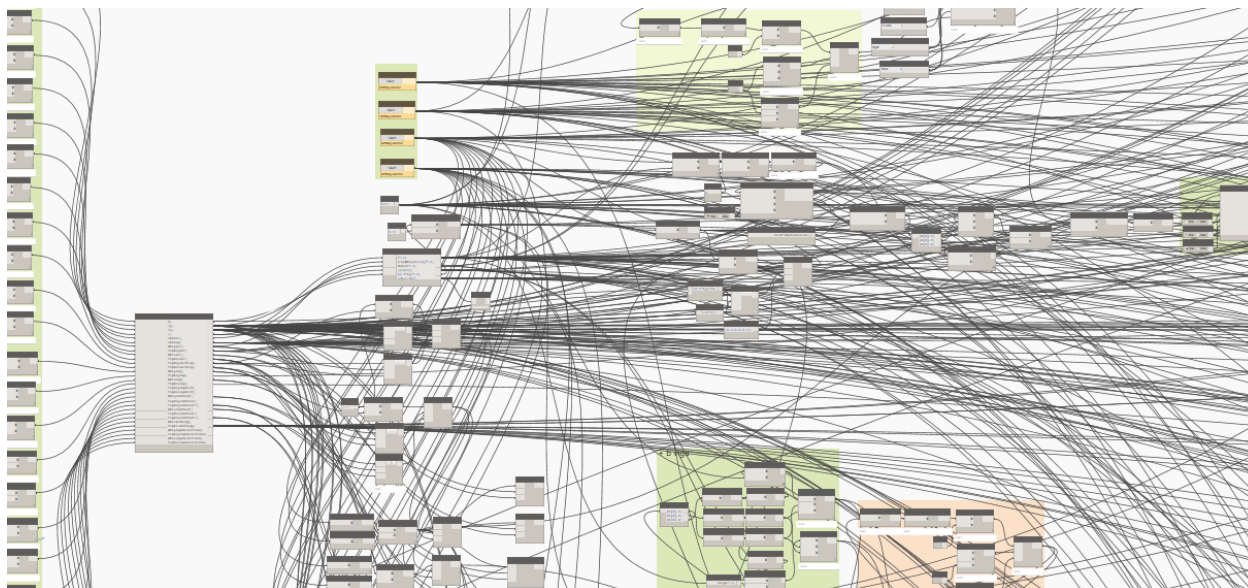


Figura 2.19 - Algoritmo desenvolvido para a automatização da modelação BIM de armaduras

Existem vários pacotes disponíveis para download na página dynamobim.org com uma panóplia de utilidades. A ferramenta dá a opção ao utilizador de produzir os seus próprios nós personalizados através da criação de *Custom Nodes*.

Para a realização deste trabalho foram utilizados dois pacotes, *Dynamo for rebar* desenvolvido pela CORE studio de Thornton Tomasetti e *Bim4struc.Rebar* desenvolvido por Dieter Vermeulen, engenheiro da Autodesk. A biblioteca destes pacotes contém um conjunto de nós que ajudam a criar armaduras no Revit [28].

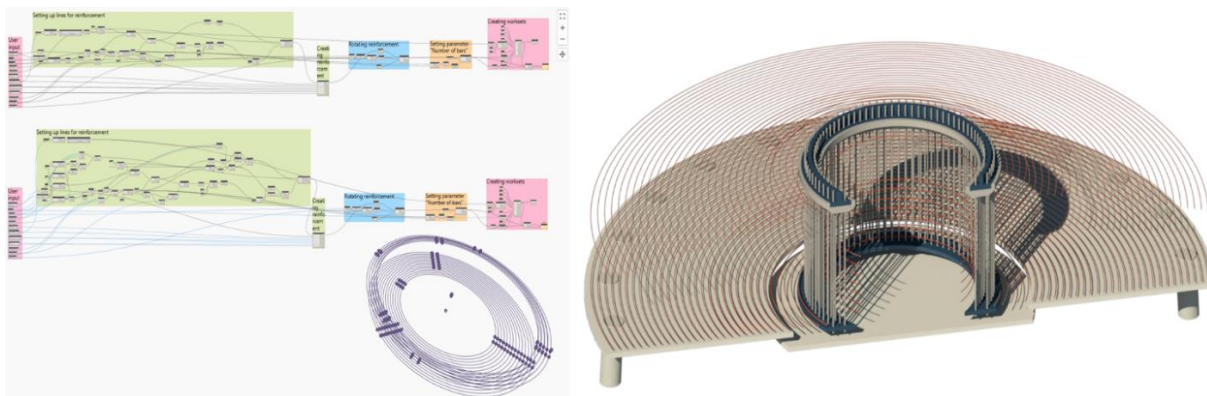
Existem vários métodos para a criação de modelos paramétricos de armaduras em Revit, através do Dynamo. Um dos métodos baseia-se na criação de elementos paramétricos tridimensionais representativos de armaduras que poderão ser importados para Revit como elementos de armaduras [29]. O que torna este método inexecutável é que toda a informação relativa a comprimentos, coordenadas, diâmetro e tipo de aço são geradas numa folha de Excel. O Revit não reconhece estas informações. Torna-se num método muito pouco produtivo, sendo que poderão existir centenas de armaduras, e a leitura desses elementos torna-se uma tarefa quase impossível e muito pouco produtiva [29].

A utilização destes pacotes abre muitas portas para a automatização da modelação de armaduras, por essa razão, foi o método que foi desenvolvido para automatizar a modelação de armaduras em lajes. Ao contrário do método acima mencionado, todas as informações relativas ao elemento ficam guardadas no Revit.

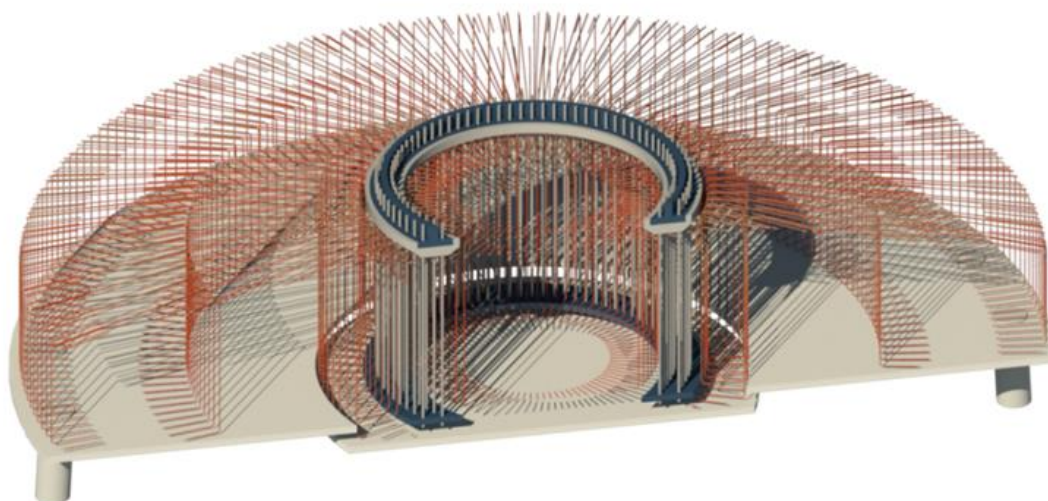
Um exemplo da modelação de armadura a partir do Dynamo é ilustrado na Figura 2.20, desenvolvida pela abt, empresa de engenharia ligada, *inter alia*, à engenharia de estruturas e arquitetura, que está a usar o

CAPÍTULO 2

Dynamo como ferramenta para automatizar a modelação de armaduras em fundações de turbinas eólicas.



a) Criação de armaduras no Dynamo



b) Visualização das armaduras no Revit

Figura 2.20 – Fundação de uma turbina eólica [30]

CAPÍTULO 3

DIMENSIONAMENTO DE LAJES MACIÇAS

3.1 BASES PARA O DIMENSIONAMENTO

No presente capítulo serão apresentadas as bases de cálculo para o projeto de estruturas de betão armado. Os regulamentos apresentados serão os Eurocódigos nomeadamente a NP EN 1990: Bases para o projeto de estruturas (também designado de EC0), a NP EN 1991 (EC1) para a quantificação das ações a NP EN 1992 (EC2). Serão abordadas expressões e procedimentos de cálculo utilizados no desenvolvimento da folha de cálculo. Será também sintetizada toda a informação relevante ao longo do capítulo com maior ênfase no que respeita a lajes e as principais características do seu funcionamento em flexão.

Para o dimensionamento das lajes serão considerados dois Estados Limite:

- Estados Limite Últimos: estes estão associados a perda de equilíbrio (EQU), deformação excessiva, ou rotura local (STR), rotura ou deformação excessiva do terreno (GEO) e rotura por fadiga (GEO).
- Estados Limite de Utilização: estes estão relacionados com a funcionalidade da estrutura. Limitação das tensões, controlo das deformações e da fendilhação são as verificações realizadas na folha de cálculo.

É necessária a definição de estado limite para determinação dos correspondentes esforços resistentes das secções.

3.1.1 Ações em estruturas

As ações podem ser classificadas em:

- Ações permanentes (G): ação com elevada probabilidade de atuar. São exemplos o peso próprio da estrutura ou os equipamentos fixos.
- Ações variáveis (Q): ação cuja variação de intensidade no tempo não é desprezável.
- Ações acidentais (A): ação com pequena probabilidade de ocorrência. O choque provocado por um veículo é um exemplo desta ação.

CAPÍTULO 3

Peso próprio

O peso próprio é classificado como uma ação permanente fixa.

Sobrecargas

As sobrecargas são classificadas como ações variáveis e o seu valor em edifícios corrente é determinado em função das categorias, A a D, conforme visível na Tabela 3.1 e 3.2. São definidos dois valores, uma ação distribuída, q_k para uma análise dos efeitos globais e uma carga concentrada, Q_k para uma análise dos efeitos locais.

Tabela 3.1 – Categoria de edifícios para definição da sobrecarga [16]

Categoria	Utilização específica	Exemplos
A	Actividades domésticas e residenciais	Salas em edifícios de habitação; quartos e enfermarias de hospitais; quartos de hotéis, cozinhas e lavabos.
B	Escritórios	
C	Locais de reunião (com excepção das utilizações correspondentes às categorias A, B e D) ¹⁾	C1: Zonas com mesas, etc.; por exemplo, em escolas, cafés, restaurantes, salões de jantar, salas de leitura, recepções. C2: Zonas com assentos fixos; por exemplo, em igrejas, teatros ou cinemas, salas de conferências, salas de aulas, salas de reunião, salas de espera. C3: Zonas sem obstáculos para a movimentação de pessoas; por exemplo, em museus, salas de exposição, etc. e em acessos de edifícios públicos e administrativos, hotéis, hospitais, e em átrios de entrada de estações de comboio. C4: Zonas em que são possíveis actividades físicas; por exemplo, salões de dança, ginásios, palcos. C5: Zonas de possível acolhimento de multidões; por exemplo, edifícios para eventos públicos, tais como salas de concertos, salas para actividades desportivas incluindo bancadas, terraços e zonas de acesso; plataformas ferroviárias.
D	Actividades comerciais	D1: Zonas de lojas em geral. D2: Zonas de grandes armazéns.

1) Chama-se a atenção para 6.3.1.1(2), em particular para C4 e C5. Ver a EN 1990 quando for necessário considerar efeitos dinâmicos. Para a Categoria E, ver o Quadro 6.3.

NOTA 1: Dependendo das utilizações previstas, as zonas que seriam normalmente classificadas como C2, C3 e C4 poderão ser classificadas como C3 por decisão do dono de obra e/ou do Anexo Nacional.

NOTA 2: O Anexo Nacional poderá estabelecer subcategorias para A, B, C1 a C5, D1 e D2.

NOTA 3: Ver 6.3.2 para zonas de armazenamento ou de actividades industriais.

Tabela 3.2 – Valores da sobrecarga em edifícios [16]

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

3.1.2 Comportamento do betão e do aço

Betão

O betão é caracterizado pela sua classe de resistência, que se relaciona com o seu valor característico da resistência à compressão. Segundo o EC2, as classes de resistência estão baseadas no valor característico da resistência de provetes cilíndricos, f_{ck} , e cúbicos, $f_{ck,cube}$, determinados aos 28 dias. Os valores característicos de resistência estão indicados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Classes de resistência do betão [31]

Classes de resistência do betão														
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5
$f_{ctk,0.05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2	2,2	2,5	2,7	2,9	3	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk,0.95}$ (MPa)	2	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6	6,3	6,6
E_{cm} (GPa)	2,7	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ϵ_{e1} (‰)	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ϵ_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3	2,8	2,8	2,8
ϵ_{e2} (‰)	2									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ϵ_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n	2									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
ϵ_{e3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2	2,2	2,3
ϵ_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

CAPÍTULO 3

O valor denominado de dimensionamento ou de cálculo, f_{cd} , é definido através do valor característico da tensão e calculado pela seguinte expressão:

$$f_{cd} = a_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (3.1)$$

em que:

γ_c coeficiente parcial de segurança relativo ao betão (1,50 é o valor adotado);

a_{cc} coeficiente que tem em conta os efeitos de longo prazo na resistência à compressão e os efeitos desfavoráveis resultantes de modo como a carga é aplicada (valor entre 0,8 e 1,0, sendo recomendado 1,0).

O betão tem um comportamento não linear, isto é, tem uma relação tensão-extensão que não segue a lei de Hook. Na análise estrutural pode admitir-se que o betão tem um comportamento elástico. Para a determinação dos esforços resistentes em estado limite ultimo de resistência (ELU), considera-se a relação tensão-extensão característica do betão com base numa parábola e num retângulo como representado na Figura 3.1.

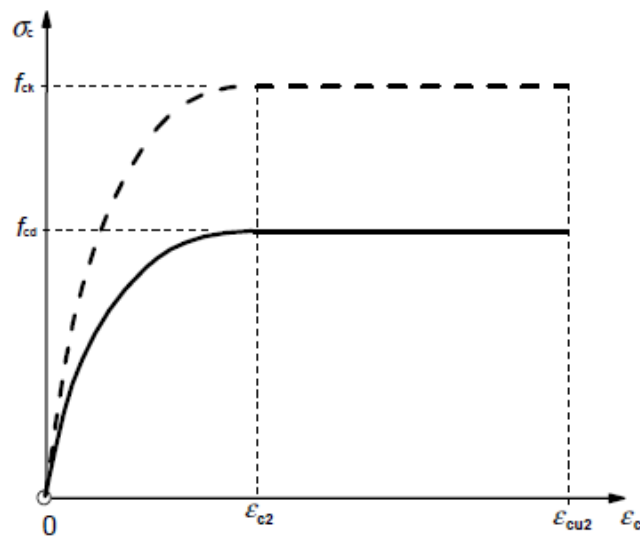


Figura 3.1 – Diagrama parábola-retângulo para o betão comprimido [31]

A tensão de cálculo resistente à compressão é definida pelas seguintes expressões.

$$\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad (3.3)$$

Aço

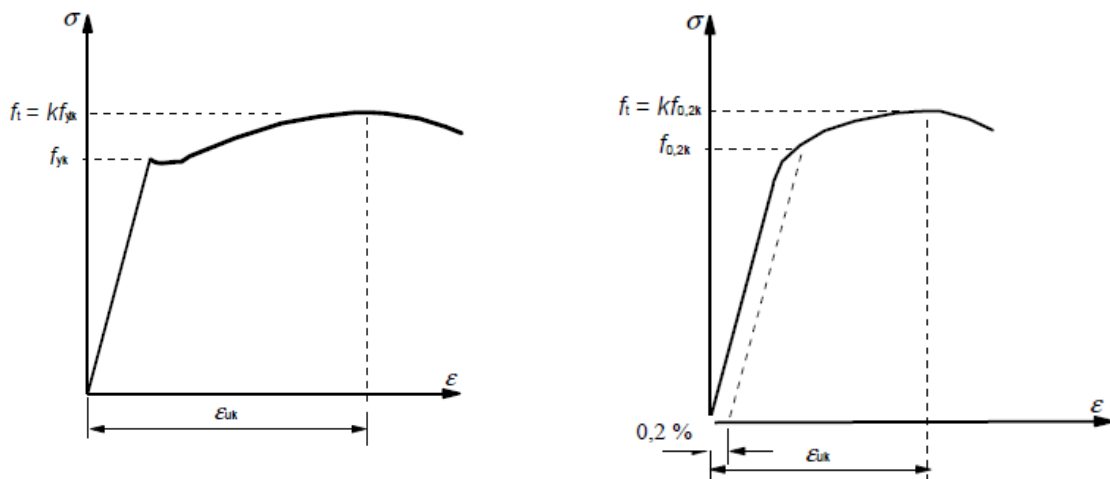
A classe de um aço é definida pela sua tensão de cedência, f_{yk} , i.e, por o valor característico da força de cedência e pela sua ductilidade. Os aços para betão armado normalmente possuem uma tensão de cedência de 400 ou 500MPa. O valor de cálculo da tensão de cedência, f_{yd} , segundo o EC2 é definido pela seguinte expressão.

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \tag{3.4}$$

em que:

γ_s coeficiente parcial de segurança relativo ao aço para betão armado (1,15 é o valor adotado pelo EC2).

Os diagramas típicos tensões-extensões de armaduras para betão armado estão representados na Figura 3.2.



a) Aço laminado a quente

b) Aço laminado a frio

Figura 3.2 – Diagramas tensão-extensão do aço de armaduras para betão armado [31]

O valor da extensão máxima do aço depende da classe de ductilidade das armaduras.

Na Figura 3.3 apresentam-se os diagramas bilineares tensão-extensão. Poderão ser adotados dois modelos de cálculo com base nestes diagramas. Para a realização da ferramenta computacional, optou-se pelo diagrama com o ramo superior horizontal. Neste diagrama não é necessário verificar o limite da extensão.

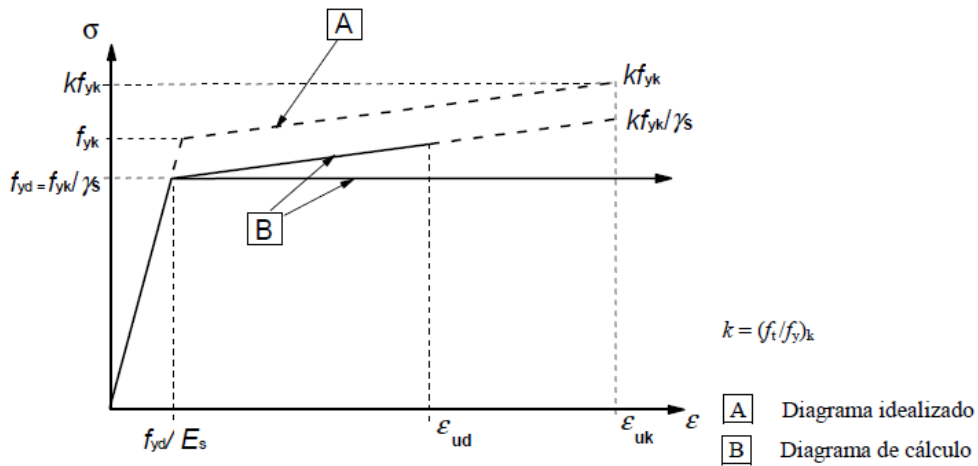


Figura 3.3 – Diagramas tensão-extensão, idealizado e de cálculo, do aço para armaduras de betão armado (tradicional ou comprimido) [31]

A tensão de cálculo será calculada pelas seguintes expressões:

$$\sigma_s = \frac{f_{cd}}{E_s} \epsilon_s \quad \text{se } 0 \leq \epsilon_s \leq f_{yd}/E_s \quad (3.5)$$

$$\sigma_s = f_{yd} \quad \text{se } f_{yd}/E_s \leq \epsilon_s \quad (3.6)$$

3.1.3 Disposições construtivas gerais

Garantir uma correta disposição das armaduras em elementos de betão armado é de extrema importância para garantir o bom funcionamento e a durabilidade da estrutura. Serão apresentadas neste subcapítulo as regras e os requisitos gerais no que diz respeito à pormenorização das armaduras para betão armado.

Recobrimento

Para garantir a transmissão das forças de aderência e para proteger uma estrutura durante o seu ciclo de vida, o recobrimento das armaduras tem um papel fundamental. A proteção da estrutura contra a corrosão das armaduras depende da espessura do recobrimento.

Os recobrimentos mínimos em anos anteriores eram bastante mais reduzidos, no regulamento de 1918 estava especificado para lajes um recobrimento mínimo, $c_{min} = 1 \text{ cm}$ [32]. Este recobrimento teria ainda que cumprir 1,5 vezes o diâmetro do varão. No caso das vigas e pilares este valor era de 2 cm. Era ainda recomendado que estes valores para construções junto a costa ou para terem uma maior resistência ao fogo fossem duplicados. Com o passar dos anos as especificações em relação aos recobrimentos passaram

a ser mais exigentes. Um exemplo disso, é que no regulamento de 1983 foram definidas três classes de exposição ambiental a que correspondia valores de recobrimento mínimos. Com o aparecimento dos Eurocódigos a classe de valores dos recobrimentos mínimos está associada ao conceito de classe estrutural para as várias classes de exposição. No capítulo 4 do EC2, estão tabeladas as classes de exposição entre outros requisitos. Abaixo temos as expressões que conduzem ao valor do recobrimento nominal das armaduras.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (3.7)$$

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10mm\} \quad (3.8)$$

em que:

c_{nom}	recobrimento nominal;
c_{min}	recobrimento mínimo;
Δc_{dev}	tolerância dimensional no posicionamento das armaduras;
$c_{min,b}$	recobrimento mínimo para os requisitos de aderência;
$c_{min,dur}$	recobrimento mínimo relativo às condições ambientais;
$\Delta c_{dur,\gamma}$	margem de segurança;
$\Delta c_{dur,st}$	redução do recobrimento mínimo no caso da utilização de aço inoxidável;
$\Delta c_{dur,add}$	redução do recobrimento mínimo no caso de proteção adicional.

CAPÍTULO 3

Os valores dos recobrimentos mínimo e nominal a adotar em Portugal, estão definidos para períodos de vida das estruturas de 50 anos e 100 anos e estão tabelados, em Anexo Nacional NA (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Recobrimentos mínimos e nominais para períodos de vida de 50 anos e 100 anos [31]

		X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
Tempo de vida útil de projecto de 50 anos (Classe Estrutural S4)	Recobrimento mínimo (mm)	10	15	25	30	35	40	45
	Recobrimento nominal (mm)	20	25	35	40	45	50	55
Tempo de vida útil de projecto de 100 anos (Classe Estrutural S6)	Recobrimento mínimo (mm)	20	25	35	40	45	50	55
	Recobrimento nominal (mm)	30	35	45	50	55	60	65

Distância entre varões

Para assegurar adequadas condições de aderência e uma compactação do betão eficiente é necessário estabelecer uma correta distância entre varões. Em termos regulamentares, no caso de armaduras para betão armado, deve ser garantido o seguinte espaçamento mínimo entre varões:

$$d_{livre} = \max \{ k_1 \times \varphi, (d_g + 5 \text{ mm}), 20 \text{ mm} \} \quad (3.9)$$

d_{livre} distância livre entre varões;

d_g representa a máxima dimensão dos agregados;

Φ dimensão do varão;

k_1 constante com valor recomendado de 1 mm e 5 mm.

Dobragem das armaduras

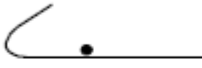

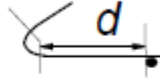

A dobragem das armaduras é um processo que deve ser realizado de forma a não afetar a resistência do aço nem provocar o esmagamento ou fendilhação do betão.

O diâmetro mínimo do mandril depende do tipo de aço, do diâmetro do varão e do tipo de armadura como indicado no tabela seguinte do EC2.

Tabela 3.5 – Diâmetro mínimo do mandril para evitar danos na armadura [31]

<i>Diâmetro do varão</i>	<i>Diâmetro mínimo do mandril para cotovelos, ganchos e laços (ver a Figura 8.1)</i>
$\phi \leq 16 \text{ mm}$	4ϕ
$\phi > 16 \text{ mm}$	7ϕ

a) varões e fios

<i>Diâmetro mínimo do mandril</i>	
 ou 	 ou 
5ϕ	$d \geq 3\phi : 5\phi$ $d < 3\phi$ ou soldadura no interior da zona curva: 20ϕ
<i>NOTA: No caso de uma soldadura localizada no interior da zona curva, o diâmetro do mandril poderá ser reduzido para 5ϕ se a soldadura for efectuada de acordo com o Anexo B da EN ISO 17660.</i>	

b) armaduras e redes soldadas dobradas após a soldadura

Amarração

As armaduras longitudinais devem ser amarradas de modo a assegurarem uma boa transferência das forças para o betão. Normalmente realiza-se a amarração das armaduras por prolongamento reto, curvo ou laços.

O comprimento de amarração de cálculo, l_{bd} , será calculado através da seguinte expressão:

$$l_{bd} = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + l_{b,rqd} \geq l_{b,min} \quad (3.10)$$

onde a_1, a_2, a_3, a_4 e a_5 são coeficientes tabelados no EC2, como valores iguais ou menores a 1,0, podendo ser consultados na tabela seguinte.

Tabela 3.6 – Valores dos coeficientes α_i

Factor de influência	Tipo de amarração	Armadura para betão armado	
		Traccionada	Comprimida
Forma dos varões	Recta	$\alpha_1 = 1,0$	$\alpha_1 = 1,0$
	Outra, não recta (ver a Figura 8.1(b), (c) e (d))	$\alpha_1 = 0,7$ se $c_d > 3\phi$ caso contrário $\alpha_1 = 1,0$ (ver a Figura 8.3 para os valores de c_d)	$\alpha_1 = 1,0$
Recobrimento das armaduras	Recta	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - \phi) / \phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_2 = 1,0$
	Outra, não recta (ver a Figura 8.1(b), (c) e (d))	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - 3 \phi) / \phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$ (ver a Figura 8.3 para os valores de c_d)	$\alpha_2 = 1,0$
Cintagem das armaduras transversais não soldadas à armadura principal	Todos os tipos	$\alpha_3 = 1 - K\lambda$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_3 = 1,0$
Cintagem das armaduras transversais soldadas ^{*)}	Todos os tipos, posições e diâmetros, como representado na Figura 8.1(e)	$\alpha_4 = 0,7$	$\alpha_4 = 0,7$
Cintagem por compressão transversal	Todos os tipos	$\alpha_5 = 1 - 0,04p$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	-

Posicionamento das armaduras

Na montagem das armaduras das lajes maciças é necessário a utilização de diversos dispositivos. Na Figura 3.4 estão ilustrados alguns exemplos de dispositivos de posicionamento.

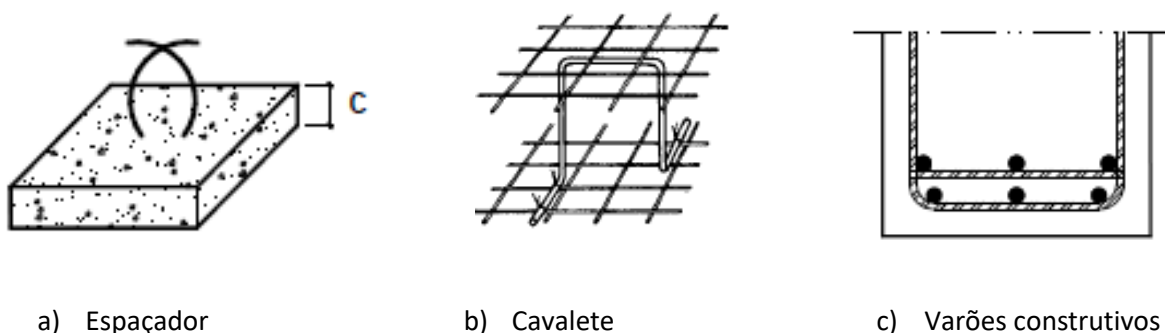


Figura 3.4 – Elementos que asseguram o posicionamento das armaduras [33]

3.1.4 Verificação da segurança aos Estados Limite Últimos

São classificados como estados limite últimos os que se referem à segurança das pessoas e/ou à segurança da estrutura.

A verificação da segurança, no que diz respeito aos estados limite últimos de resistência (STR), é feita comparando a resistência de cálculo, R_d , com o valor de cálculo das ações E_d :

$$E_d \leq R_d \quad (3.11)$$

A verificação ao estado limite de equilíbrio da estrutura (EQU) deve garantir:

$$E_{d,ats} \leq E_{d,stb} \quad (3.12)$$

em que:

E_d é o valor de cálculo do efeito das ações;

R_d é o valor de cálculo da resistência;

$E_{d,ats}$ é o valor de cálculo do efeito das ações destabilizantes;

$E_{d,stb}$ é o valor de cálculo do efeito das ações estabilizantes.

Combinação de ações

Os valores de cálculo das ações, E_d , são calculados combinando o valor das ações que poderão ocorrer em simultâneo.

Para o estado limite ultimo foi considerado apenas a combinação de ação fundamental:

$$\sum_{j=1}^n \gamma_{G,j} G_{kj} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.13)$$

Os coeficientes parciais de segurança para a verificação da segurança aos estados limite últimos estão especificados na EN NP 1990 e têm o valor:

$\gamma_{G,j} = 1,35$ ou $1,0$ (respetivamente se a ação for desfavorável ou favorável);

$\gamma_{Q,1}$ e $\gamma_{Q,i} = 1,5$ ou $0,0$ (respetivamente de a ação foi desfavorável ou favorável).

Os valores dos coeficientes ψ estão especificados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Valores dos coeficientes ψ para edifícios [34]

Acção	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecargas em edifícios (ver a EN 1991-1-1)			
Categoria A: zonas de habitação	0,7	0,5	0,3
Categoria B: zonas de escritórios	0,7	0,5	0,3
Categoria C: zonas de reunião de pessoas	0,7	0,7	0,6
Categoria D: zonas comerciais	0,7	0,7	0,6
Categoria E: zonas de armazenamento	1,0	0,9	0,8
Categoria F: zonas de tráfego, peso dos veículos ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categoria G: zonas de tráfego, 30 kN $<$ peso dos veículos ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Categoria H: coberturas	0	0	0
Acção da neve em edifícios (ver a EN 1991-1-3) ^{*)}			
– Finlândia, Islândia, Noruega, Suécia	0,70	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H > 1000$ m acima do nível do mar	0,70	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H \leq 1000$ m acima do nível do mar	0,50	0,20	0
Acção do vento em edifícios (ver a EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatura (excepto incêndio) em edifícios (ver a EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

3.1.5 Verificação da segurança aos Estados Limite de Utilização

São classificados como estado limite de utilização os que se referem ao funcionamento da estrutura, ao seu aspeto e ao conforto das pessoas. A verificação relativamente a este estado limite tem como principal objetivo verificar a adequação do comportamento da estrutura à sua função.

Será feita a verificação de segurança a três estados limite de utilização. O controlo da fendilhação, da deformação e limitação das tensões no betão.

Combinação de ações

As combinações de ações para o Estado Limite de Utilização a ter em conta são:

- Combinação característica

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "Q_{k,1} " + " \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \tag{3.14}$$

- Combinação frequente

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + " \psi_{1,1} Q_{k,1} " + " \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \tag{3.15}$$

- Combinação quase permanente

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.16)$$

3.2 DIMENSIONAMENTO AOS ESTADOS LIMITE ÚLTIMOS

O projeto tem de garantir que não há possibilidade de qualquer tipo de rotura da estrutura, seja ela por tração ou compressão, flexão, esforço transversal, torção ou por uma combinação destas. O estado limite último é uma situação de referência que nunca deve ser atingida. O dimensionamento tem como objetivo determinar a quantidade de armadura necessária de forma a verificar a segurança da secção. O presente capítulo tem como objetivo estabelecer os modelos de cálculo para a verificação da segurança ao estado limite último de flexão.

Dimensionamento de lajes de betão armado

O comportamento das lajes à flexão é muito idêntico ao das vigas. As lajes sendo elementos bidirecionais apresentando um comportamento bidirecional ao contrário das vigas que são elementos lineares.

As armaduras de flexão, numa laje, são calculadas por metro de largura.

Equação de equilíbrio

O dimensionamento e a verificação da segurança baseiam-se na noção de equilíbrio estático, i.e, quando uma determinada secção de betão armado, sujeita a um determinado conjunto de esforços, o valor das reações iguala o valor dos esforços atuantes. No caso de elementos sujeitos à flexão simples a segurança ao estado limite último de flexão é verificada quando a secção permite que a condição apresentada na expressão seguinte seja verificada.

$$\sum M = M_{Ed} + M_{Rd} = 0 \quad (3.17)$$

em que:

M_{Rd} momento fletor resistente de cálculo;

M_{Ed} momento fletor atuante de cálculo.

CAPÍTULO 3

Como já foi referido, a presente dissertação, trata lajes maciças sujeitas unicamente a situações de flexão simples.

Na determinação da resistência à flexão última são consideradas as seguintes hipóteses:

- a) Hipótese de Bernoulli (as secções mantêm-se planas);
- b) a resistência do betão à tração é ignorada;
- c) é atingido o estado limite último quando se verifica uma das seguintes extensões:

$$- \varepsilon_c = 3,5\%$$

$$- \varepsilon_s = \varepsilon_{ud}$$

É utilizado o diagrama retangular de tensões equivalente ao diagrama parábola-retângulo descrito no ponto 3.1.2 para resolver problemas de flexão simples. Desta forma, é feita uma simplificação na distribuição das tensões no betão. Na Figura 3.23, estão representados os diagramas de extensões e tensões bem como as forças internas em estado limite último.

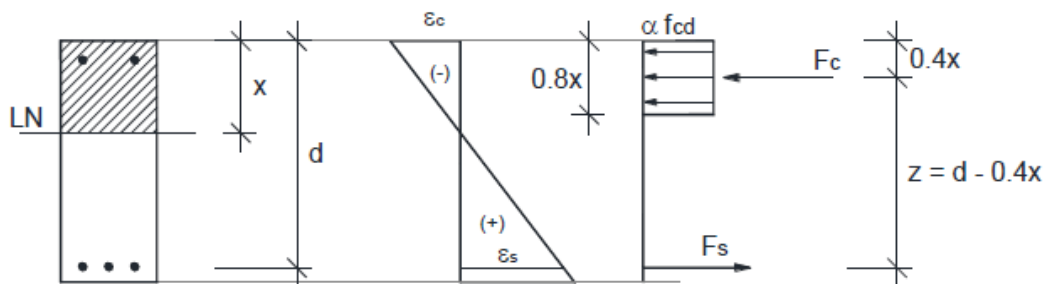


Figura 3.5 – Diagramas extensão, tensões e as forças internas em estado limite último [30]

A partir das hipóteses a cima mencionadas e conhecidos os estados limite de deformação dos materiais são estabelecidas as seguintes equações de equilíbrio nas secções:

$$F_s = F_c \tag{3.18}$$

$$M_{Rd} = F_s \times z \tag{3.19}$$

Na presente dissertação a profundidade do eixo neutro é controlada ao limitar o valor do momento fletor reduzido, μ , que depende do momento atuante, da classe de betão e da geometria da secção. O momento reduzido é calculado segundo a seguinte expressão:

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{bd^2 f_{cd}} \quad (3.20)$$

Depois de se fazer a análise estrutural e de se avaliar a distribuição dos esforços atuantes, é necessário proceder ao dimensionamento da estrutura, determinando a quantidade de armadura necessária para verificar a segurança. Para a automatização do processo de dimensionamento foram utilizadas as variáveis adicionais do momento fletor reduzido e a formula resolvente descrita em 3.21 para determinar a percentagem mecânica de armadura e assim concluir o dimensionamento.

$$\omega = (1 - \sqrt{1 - 2.42\mu}) / 1.21 \quad (3.21)$$

3.3 AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA AOS ESTADOS LIMITE DE UTILIZAÇÃO

Para a verificação da segurança aos estados limite de utilização é necessário:

- uma combinação de ações apropriada;
- métodos de análise para que os efeitos das ações possam ser calculados;
- propriedades dos materiais conhecidas;
- critérios para definir os limites de comportamento adequado;
- método de cálculo

3.3.1 Limitação das tensões

As tensões de compressão no betão e de tração na armadura devem ser limitadas a fim de evitar a formação de fendas longitudinais e níveis de fendilhação ou de deformação inaceitáveis, respetivamente.

As disposições do EC2 no que diz respeito à limitação das tensões são as seguintes (de acordo com as respetivas combinações):

- No aço (garantir a não cedência do aço)
 - a) $\sigma_s \leq 0,8f_{yk}$
 - b) $\sigma_s \leq f_{yk}$
- No betão
 - a) $\sigma_c \leq 0,6f_{ck}$ (controlar a fendilhação longitudinal)
 - b) $\sigma_c \leq 0,45f_{ck}$ (controlo da fluência excessiva)

CAPÍTULO 3

No cálculo das tensões e das deformações as secções serão consideradas não fendilhadas desde que seja respeitado o valor limite da tensão de tração por flexão $f_{ct,eff}$, caso contrário a secção será considerada fendilhada. O valor de $f_{ct,eff}$ será considerado igual a f_{ctm} .

Cálculo de tensões em secção não fendilhada (estado I)

Para o cálculo das tensões, admite-se que se a secção não está fendilhada, a relação entre as tensões e as extensões é linear e o módulo de elasticidade é considerado com o seu valor médio.

Desta forma, as expressões consideradas são as da resistência dos materiais:

$$\sigma_{ci} = \frac{M}{I_{ci}} y_i \quad (3.22)$$

$$\sigma_s = \alpha_e \sigma_{ci} \quad (3.23)$$

em que:

y_i distância da fibra ao centro de gravidade da secção homogeneizada;

$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}}$ coeficiente de homogeneização.

Foi considerado um coeficiente de homogeneização de 15 tendo em consideração a fluência do betão.

Cálculo de tensões em secção fendilhada (estado II)

Quando a tensão de tração no betão ultrapassar o valor de f_{ctm} , admite-se que a secção está fendilhada.

Desta forma é considerado que o betão não tem capacidade de suportar qualquer tração.

É possível calcular as tensões no betão aplicando as seguintes expressões:

$$\sigma_c = c_c \frac{M}{bd^2} \quad (3.24)$$

$$\sigma_s = c_s \frac{M}{bd^2} \quad (3.25)$$

Na Tabela 3.8 são apresentados os valores de c_c e c_s para o cálculo das tensões no betão.

Tabela 3.8 – Coeficientes para o cálculo das tensões em secções retangulares submetidas a flexão simples [20]

ρ [%]	α	C_c	C_s
0.10	0.132	15.87	1045.9
0.12	0.143	14.65	875.2
0.14	0.154	13.70	752.9
0.16	0.164	12.93	661.0
0.18	0.173	12.30	589.5
0.20	0.181	11.76	532.1
0.22	0.189	11.30	485.1
0.24	0.196	10.90	445.9
0.26	0.204	10.54	412.6
0.28	0.210	10.23	384.1
0.30	0.217	9.94	359.3
0.32	0.223	9.69	337.6
0.34	0.229	9.46	318.4
0.36	0.235	9.24	301.4
0.38	0.240	9.05	286.1
0.40	0.246	8.87	272.3
0.42	0.251	8.70	259.8
0.44	0.256	8.54	248.5
0.46	0.261	8.40	238.1
0.48	0.266	8.26	228.6
0.50	0.270	8.14	219.8
0.52	0.275	8.02	211.7
0.54	0.279	7.90	204.2
0.56	0.283	7.80	197.2
0.58	0.287	7.69	190.7
0.60	0.292	7.60	184.6
0.62	0.296	7.51	178.9
0.64	0.299	7.42	173.6
0.66	0.303	7.34	168.6
0.68	0.307	7.26	163.8
0.70	0.311	7.18	159.4
0.72	0.314	7.11	155.1
0.74	0.318	7.04	151.1
0.76	0.321	6.97	147.4
0.78	0.325	6.91	143.8

ρ [%]	α	C_c	C_s
0.80	0.328	6.85	140.3
0.82	0.331	6.79	137.1
0.84	0.334	6.73	134.0
0.86	0.338	6.68	131.0
0.88	0.341	6.62	128.2
0.90	0.344	6.57	125.5
0.92	0.347	6.52	122.9
0.94	0.350	6.47	120.4
0.96	0.353	6.43	118.0
0.98	0.355	6.38	115.8
1.00	0.358	6.34	113.6
1.02	0.361	6.30	111.5
1.04	0.364	6.26	109.4
1.06	0.366	6.22	107.5
1.08	0.369	6.18	105.6
1.10	0.372	6.14	103.8
1.12	0.374	6.10	102.0
1.14	0.377	6.07	100.3
1.16	0.379	6.03	98.7
1.18	0.382	6.00	97.1
1.20	0.384	5.97	95.6
1.22	0.387	5.94	94.1
1.24	0.389	5.90	92.7
1.26	0.392	5.87	91.3
1.28	0.394	5.84	89.9
1.30	0.396	5.82	88.6
1.32	0.398	5.79	87.4
1.34	0.401	5.76	86.1
1.36	0.403	5.73	84.9
1.38	0.405	5.71	83.8
1.40	0.407	5.68	82.7
1.50	0.418	5.56	77.5
1.60	0.428	5.45	72.9
1.80	0.446	5.26	65.3
2.00	0.463	5.11	59.1

3.3.2 Controlo da fendilhação

A abertura de fendas corresponde à diferença de alongamento entre a armadura e o betão. O máximo valor de abertura de fendas, ω_{max} está limitado aos valores indicados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Valores recomendados de ω_{max}

Classe de Exposição	Elementos de betão armado e elementos de betão pré-esforçado com armaduras não aderentes	Elementos de betão pré-esforçado com armaduras aderentes
	Combinação de acções quase-permanente	Combinação de acções frequente
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Descompressão
<p><i>NOTA 1: Para as classes de exposição X0 e XC1, a largura de fendas não tem influência sobre a durabilidade e este limite é estabelecido para dar em geral um aspecto aceitável. Na ausência de especificações no que respeita ao aspecto, este limite poderá ser reduzido.</i></p> <p><i>NOTA 2: Para estas classes de exposição deverá verificar-se, ainda, a descompressão para a combinação quase-permanente de acções.</i></p>		

De acordo com o parágrafo 4.4.2.3(1) do EC2, as lajes cuja espessura total não exceda 200 mm não necessitam de medidas específicas para controlar a fendilhação, desde que se respeite as disposições construtivas indicadas na secção 5.4.3. A Verificação a este estado limite será feita independentemente da espessura da laje.

A realização da folha de cálculo teve como base uma estimativa direta da abertura de fendas, w_k . Este valor é calculado pela expressão.

$$w_k = s_{r,max} \times \epsilon_{srm} \tag{3.26}$$

em que:

$s_{r,max}$ representa a distância máxima entre fendas e é calculado pela expressão:

$$s_{r,max} = 3,54c + 0,425k_1k_2 \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \tag{3.27}$$

em que:

c recobrimento das armaduras tracionadas;

k_1 0,8 para varões de alta aderência;

1,6 para varões de superfície lisa;

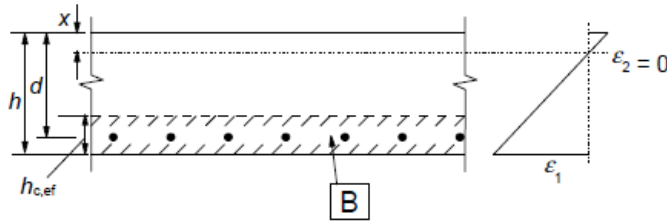
k_2 0,5 para flexão simples;

Φ diâmetro dos varões;

$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}}$ representa a percentagem efetiva de armadura

Nesta expressão:

A_s representa a área de aço e $A_{c,ef}$ a área da secção efetiva do betão tracionado que envolve as armaduras para betão armado com uma altura $h_{c,ef}$ (Figura 3.6).



B - área da secção efetiva de betão tracionado envolvente da armadura, $A_{c,eff}$

Figura 3.6 – Representação da secção efetiva de betão tracionado numa laje [31]

O EC2 considera esta altura a menor dos seguintes valores:

$$h_{c,ef} \leq \begin{cases} 2,5(h-d) \\ (h-x) \\ 3 \\ \frac{h}{2} \end{cases} \quad (3.28)$$

e ainda:

$$\epsilon_{srm} = \epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + a_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (3.29)$$

Nesta expressão:

σ_s representa a tensão na armadura de tração admitindo a secção fendilhada;

a_e relação E_s/E_{cm} ;

k_t 0,6 para ações de curta duração;

0,4 para ações de longa duração;

O valor de ϵ_{srm} terá de cumprir ainda o limite mínimo de $0,6 \sigma_s/E_s$.

3.3.3 Controlo da deformação

O controlo da deformação tem como objetivo garantir um bom funcionamento da estrutura e uma boa aparência garantindo que não ocorram danos em elementos não estruturais. O fenómeno da deformação afeta peças sujeitas à flexão, como vigas e lajes. Para um pavimento as deformações não deverão exceder o milímetro máximo, $w_{max} = v\tilde{a}o/250$, para a combinação quase permanente de ações e $w_{max} = v\tilde{a}o/500$ para flechas suscetíveis de danificar elementos adjacentes à estruturas [31].

Para determinar os deslocamentos máximos na laje recorreu-se ao método proposto na EN 1992-1-1, o qual permite calcular o deslocamento instantâneo, a_0 , e o deslocamento a longo prazo, a_t . É tido em conta o efeito da fluência e da fendilhação. Nos deslocamentos a longo prazo o valor adotado para o coeficiente de fluência, φ , foi de 2,5. O cálculo dos deslocamentos foi determinado através da aplicação da seguinte expressão:

$$a = (1 - \tau)a^I + \tau a^{II} \quad (3.30)$$

em que:

a^I e a^{II} são as flechas calculadas em estado I e em estado II e

τ representa o coeficiente de interpolação da flecha e é calculado pela expressão:

$$\tau = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M_0} \right)^2 \quad (3.31)$$

onde:

$\tau = 0$ para secções não fendilhadas;

β coeficiente que tem em conta a influência na extensão média da duração do carregamento. Foi considerado o valor de 0,5 (carregamento de longa duração).

A flecha instantânea é determinada para $t = 0$. A flecha elástica foi calculada segundo as tabelas de Montoya (Figura 3.7).

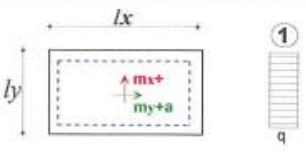
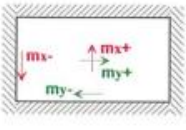
Método Clássico $\nu=0,15$		Tabela 23.1		Carga UNIFORME						
		l_y / l_x Vão menor / Vão Maior	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0		
		$W = 0,001 \cdot q \cdot l_y^4 / Eh^3$	119	102	85	71	58	48		
$m_{y+} = 0,001 \cdot q \cdot l_y^2$		99	86	73	61	51	42			
$m_{x+} = 0,001 \cdot q \cdot l_y^2$		32	37	40	42	43	42			
$W = 0,001 \cdot q \cdot l_y^4 / Eh^3$		30	28	25	22	18	15			
$m_{y-} = 0,001 \cdot q \cdot l_y^2$		41	38	34	29	25	21			
$m_{x-} = 0,001 \cdot q \cdot l_y^2$		10	13	17	18	20	21			
$m_{y-} = 0,001 \cdot q \cdot l_y^2$		84	80	74	67	59	52			
$m_{x-} = 0,001 \cdot q \cdot l_y^2$		58	58	58	57	55	52			

Figura 3.7 – Tabelas de Montoya para o cálculo da flecha elástica

3.4 DISPOSIÇÕES GERAIS RELATIVAS A ARMADURAS EM LAJES MACIÇAS

Neste subcapítulo são referidos os requisitos e os pormenores tipo de disposições de armaduras usados para o desenvolvimento da folha de cálculo. As lajes maciças normalmente apresentam uma malha de armadura na face inferior e superior. Na face superior poderá não ser necessário a colocação de armaduras apesar de ser recomendada a preconização de uma malha de armaduras para controlo de fendilhação na laje devida à retração do betão. O algoritmo que foi desenvolvido para a automatização deste tipo de lajes não tem em consideração este tipo de malha.

3.4.1 Verificações regulamentares

Armadura mínima

É tido em conta uma área mínima de armadura principal de modo a garantir uma reserva suficiente de resistência após a fendilhação. O EC2 especifica que essa área mínima não deverá ser inferior a $A_{s,min}$:

$$A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d \quad (3.32)$$

$$A_{s,min} \geq 0,0013 b_t d \quad (3.33)$$

em lajes, $b_t = 1$.

As armaduras em qualquer direção em que possam ocorrer trações, devem respeitar estes valores mínimos.

CAPÍTULO 3

Armadura máxima

A área da secção da armadura de tração ou compressão, não poderá ser superior a, $A_{s,max}$:

$$A_{s,max} \geq 0,04A_c \quad (3.34)$$

sendo A_c a área da secção de betão.

Espaçamento das armaduras

Os valores dos espaçamentos máximos a adotar na armadura principal e de distribuição estão indicados na Tabela 3.10 (Figura 3.8). Foi adotado o valor de 10 cm para o espaçamento mínimo de modo a criar condições para uma adequada colocação e compactação do betão.

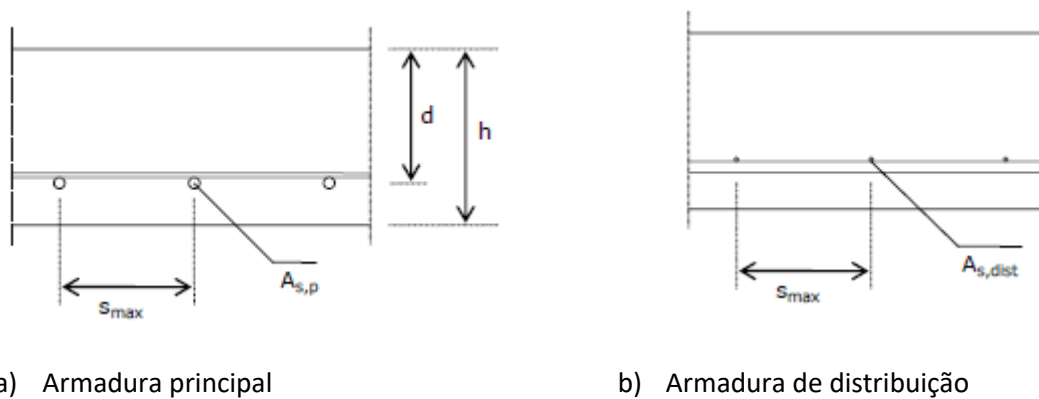


Figura 3.8 – Espaçamento máximo das armaduras [20]

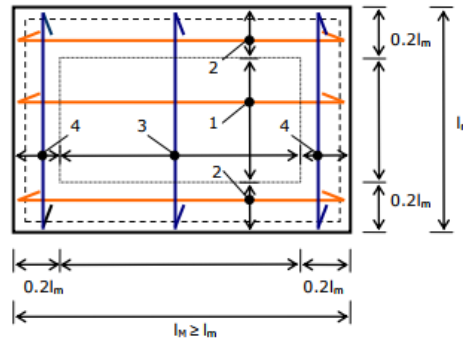
Tabela 3.10 – Espaçamento máximo de armaduras [20]

	Armaduras principais	Armaduras de distribuição
Zonas de momento máximo ou com cargas concentras	2h Max. 250mm	3h Max. 400mm
Zonas restantes	3h Max. 400mm	3.5h Max. 450mm

3.4.2 Lajes simplesmente apoiadas nos quatro bordos

Armadura principal

Como já foi referido a armadura principal das lajes é disposta numa malha retangular nas duas direções principais (x e y). Esta armadura tem de respeitar, quer a percentagem mínima quer os espaçamentos máximos e mínimo. A dispensa da armadura no vão será feita a 20% como esquematizado na Figura 3.9.



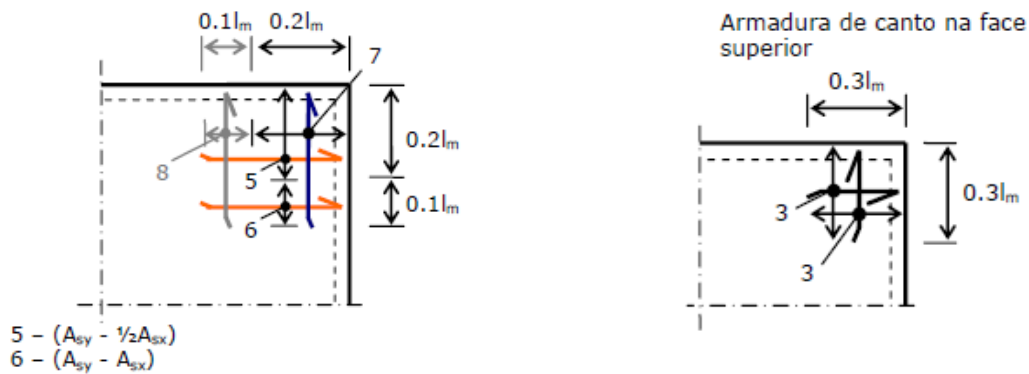
Neste esquema l_m representa o menor vão

- 1 - A_{sx} para $m_{x,max}$
- 2 - $1/2 A_{sx}$
- 3 - A_{sy} para $m_{y,max}$
- 4 - $1/2 A_{sy}$

Figura 3.9 – Armadura principal inferior [20]

Armadura de canto

A armadura de canto na face inferior, em cada direção, deverá ser pelo menos igual à armadura correspondente ao momento máximo do vão. Esta armadura é contabilizada pela diferença que é dada pela armadura necessária e a armadura aí existente (Figura 3.10). Na face superior esta armadura é disposta na totalidade. O prolongamento desta armadura será feito a partir da face inferior do apoio até uma distancia de 0,3 vezes o menor vão.



a) Armadura de canto na face inferior

b) Armadura de canto na face superior

Figura 3.10 – Distribuição das armaduras de canto em lajes simplesmente apoiadas [20]

CAPÍTULO 3

Armadura inferior junto aos apoios

A armadura de apoio nas lajes simplesmente apoiadas deverá ser pelo menos metade da armadura calculada para o vão, $A_{s,v\tilde{a}o}$ (Figura 3.11).

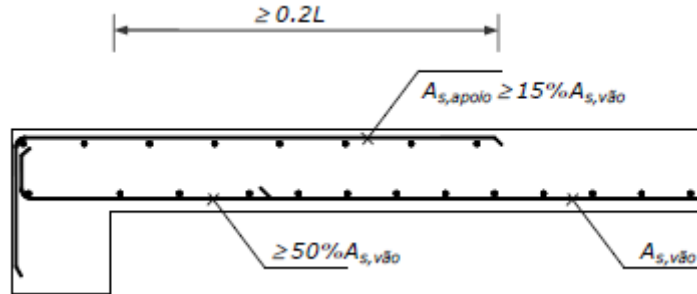


Figura 3.11 – Armaduras de apoio [20]

Armadura de apoio

No caso de não serem contabilizados quaisquer momentos fletores negativos nos apoios, é necessário calcular uma área de armadura superior com capacidade de resistir a pelo menos 15% do momento fletor existente no vão, nessa direção (Figura 3.12). Essa armadura será prolongada por 0,3 vezes o menor vão, medida a partir da face interior do apoio, respeitando quer a armadura mínima quer os espaçamentos máximos. Esta armadura tem como objetivo absorver flexões que possam surgir nos apoios.

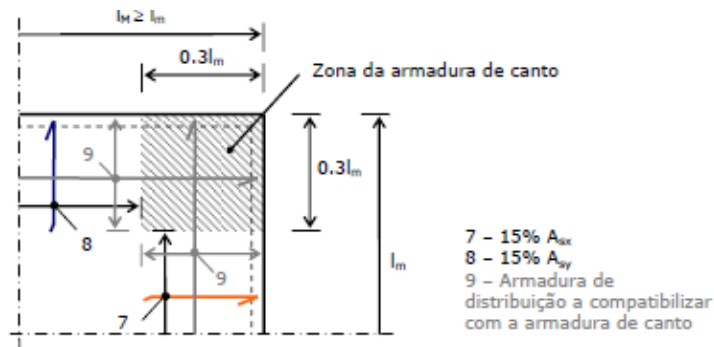
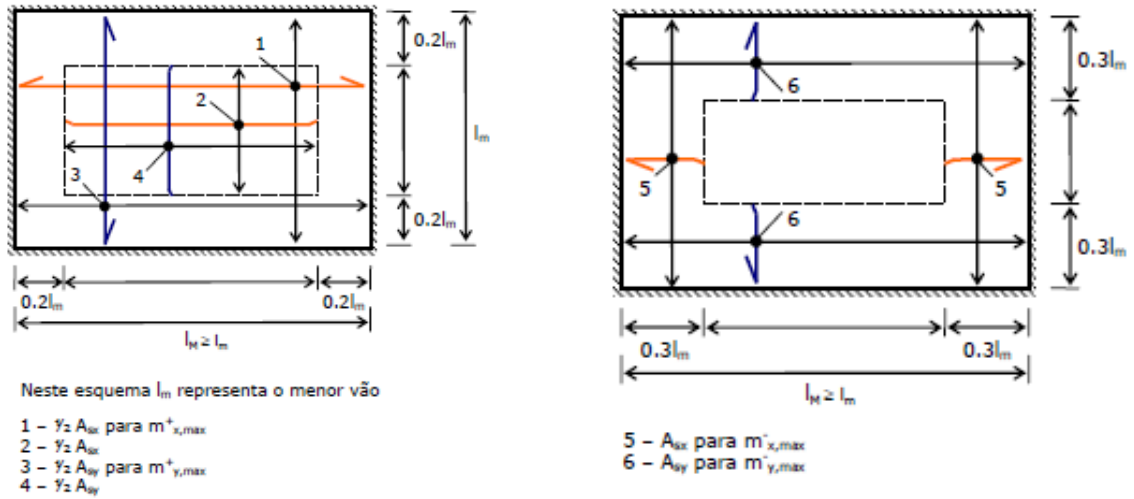


Figura 3.12 – Armadura de apoio [20]

3.4.3 Lajes encastradas nos quatro bordos

Armadura principal

A interrupção da armadura principal nas lajes encastradas nos quatro lados é feita a 0,2 vezes o menor vão tendo que respeitar as verificações regulamentares indicadas em 3.3.4.2. A armadura superior será prolongada por 0,3 vezes o menor vão, desde a face interior do apoio. A distribuição de armadura que foi adotada neste tipo de lajes está esquematizada na Figura 3.13.



a) Armadura na face inferior

b) Armadura na face superior

Figura 3.13 – Distribuição das armaduras em lajes encastradas nos quatro bordos [20]

CAPÍTULO 4

INTERFACE DE DIMENSIONAMENTO

No presente capítulo, dedicado ao dimensionamento de lajes, desenvolve-se uma folha de cálculo automático para lajes simplesmente apoiadas e encastradas com recurso ao Microsoft Excel 2016.

Pretende-se com esta folha de cálculo uma exportação da geometria do elemento bem como todos os resultados obtidos relativamente a disposições construtivas, o tipo de aço a utilizar e o respetivo diâmetro das armaduras. Posteriormente toda a informação será processada no Dynamo de forma a gerar modelos BIM de armaduras no Revit automaticamente.

No final deste capítulo será apresentado um caso de estudo onde será possível testar e validar a folha desenvolvida de forma a ilustrar a sua aplicabilidade e interesse prático.

4.1 FLUXOS DE TRABALHO UTILIZADOS

Após o conhecimento do tema da presente dissertação, iniciou-se uma pesquisa intensiva do mesmo. Foi muito importante estruturar quais seriam os inputs, os outputs e todos os processos de transformação de informação necessários para obter uma melodia de trabalho perfeita. Após várias análises de diferentes abordagens, optou-se por os dois fluxos de trabalho apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2.

Fluxo de trabalho 1

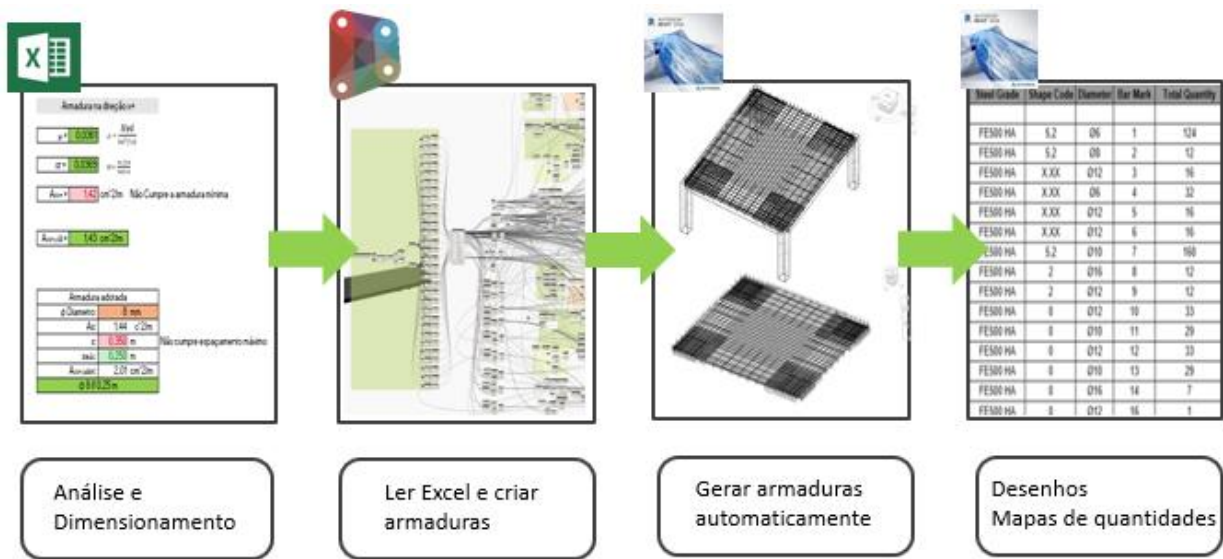


Figura 4.1 – Fluxo de trabalho inicial

Para caracterizar melhor o esquema apresentado na Figura 4.1, descreve-se, de forma detalhada, a informação partilhada entre cada programa.

Neste fluxo de trabalho o processo inicial passa pela introdução, por parte do utilizador, dos esforços atuantes na laje. Os passos que se seguem neste processo estão automatizados e têm o objetivo final da obtenção de todas as armaduras presentes na laje. A folha de cálculo referente a este fluxo de trabalho foi desenvolvida para fazer uma análise e um dimensionamento de lajes simplesmente apoiadas e encastradas com base nas tabelas de Montoya.

Os outputs desta fase servirão de inputs no Dynamo onde toda a informação será processada para a terceira fase que é a produção automática de modelos BIM de armaduras que será apresentada no capítulo seguinte. No Autodesk Revit 2018 serão geradas, automaticamente, as armaduras na laje bem como os mapas de quantidades dos materiais.

Fluxo de trabalho 2

Na Figura 4.2 encontra-se esquematizado o segundo fluxo de trabalho que tem como principal diferença a obtenção dos esforços num software de análise e dimensionamento.

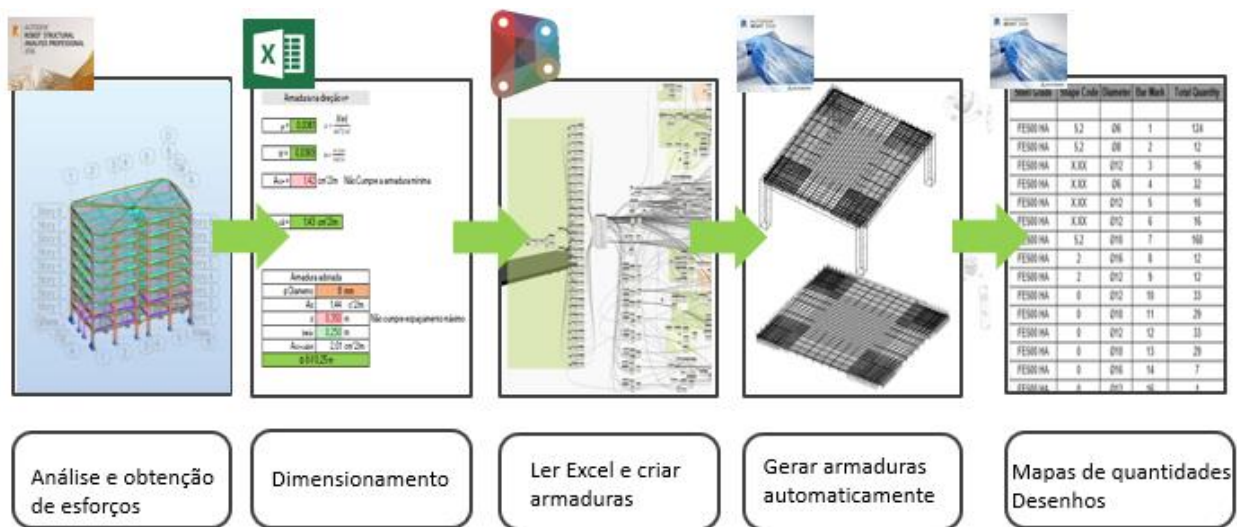


Figura 4.2 – Fluxo de trabalho com introdução do Robot 2018

Neste segundo fluxo de trabalho, o processo inicial passa por fazer a modelação, uma análise e obter os esforços da laje e, para tal, o software escolhido foi o Robot Structural Analysis 2018. A escolha deste software, deveu-se à experiência adquirida pelo autor ao longo dos 2 anos de mestrado do curso de engenharia civil, ao corrente uso deste programa de cálculo automático por parte da Newton e à simplicidade de obtenção de licenças académicas. A modelação da estrutura poderá também ser feita no Revit, sendo que neste, o modelo analítico terá que ser posteriormente exportado para o programa de análise e dimensionamento. É essencial ter o elemento e/ou a estrutura já modelados neste software permitindo um fluxo de trabalho muito mais rápido e eficiente.

Segue-se com a introdução manual dos esforços obtidos na folha de cálculo desenvolvida no Excel onde será efetuado o dimensionamento da laje. Todos os passos a seguir serão idênticos ao primeiro fluxo de trabalho.

A grande vantagem da inclusão deste software é na análise que será feita à estrutura. Esta deixa de estar limitada a cargas verticais, podendo ser feita uma análise muito mais realista com a introdução de diversas ações como o vento ou sismo. A solução de problemas usando o método dos elementos finitos também possibilita a análise de um maior número de lajes, o que torna a folha muito mais abrangente.

A seguir serão explicadas todas as particularidades da ferramenta de cálculo.

4.2 FERRAMENTA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDA

No âmbito deste trabalho, foi desenvolvida uma folha de cálculo que tem como objetivo dimensionar lajes maciças de betão armado e fazer a ligação entre o Robot Structural Analysis e o Revit. Esta permite organizar toda a informação necessária para posteriormente ser tratada no software de suporte à metodologia BIM, o Dynamo.

O programa desenvolvido determina a armadura necessária para o Estado Limite Último de flexão e ainda verifica a segurança aos estados limite de utilização, controlo da fendilhação, limitação das tensões e deformação.

No caso de lajes simplesmente apoiadas serão calculadas as armaduras principais inferiores nas duas direções, as armaduras de canto superiores e inferiores, as armaduras de apoio e as armaduras de distribuição. No que respeita às lajes encastradas nos quatro bordos, são calculadas as armaduras principais inferiores e superiores.

A regulamentação utilizada tem como base os procedimentos preconizados no EC2. A partir da introdução da geometria da laje e das cargas atuantes pelo utilizador serão determinadas automaticamente as armaduras.

Toda a folha está acompanhada de tabelas, gráficos e alguns apontamentos do EC2 de forma a facilitar o utilizador e de tornar a interface gráfica mais interativa. É uma ferramenta bastante eficiente uma vez que determina todas as armaduras presentes na laje podendo o utilizador decidir qual a solução mais adequada para cada tipo de armadura. Na Figura 4.3 está representada a interface gráfica da folha desenvolvida.

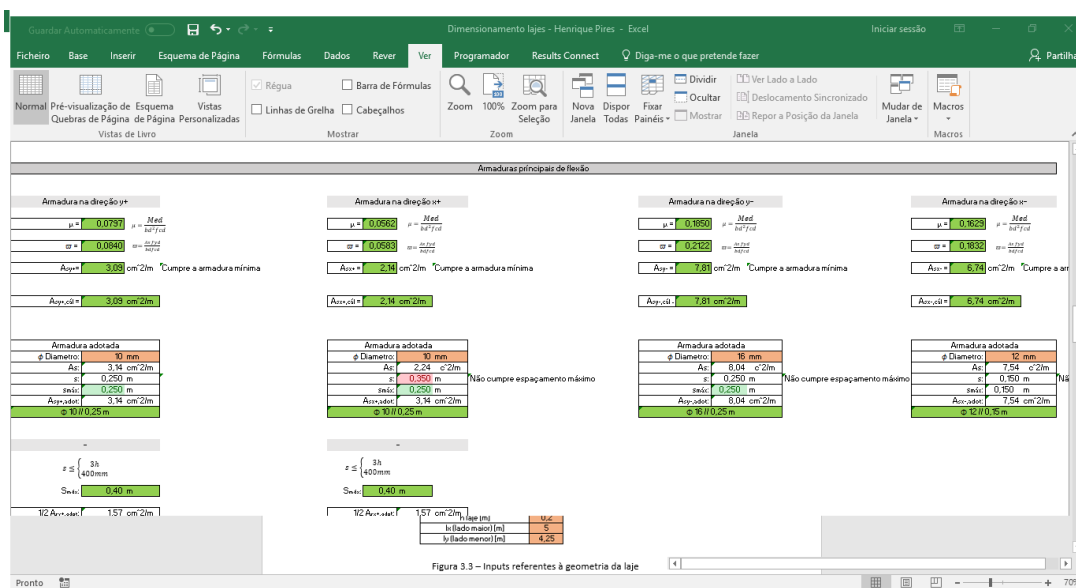


Figura 4.3 – Interface gráfica da folha de cálculo desenvolvida

4.2.1 Informação de Input

Ao iniciar a folha de cálculo é possível visualizar células de diferentes cores. As células a laranja são para introdução de dados e as células a verde são os outputs que são calculados automaticamente. É aconselhável que o utilizador siga a ordem pela qual a folha está estruturada.

A informação de input inicial é relativa à geometria da laje, como a altura, h , o vão menor denominado, l_y , e vão maior denominado, l_x . Todos as grandezas dimensionais deverão ser introduzidas em metros (m) (Figura 4.4).

Obs: As células a laranja são para entrada de dados

Definição de secções	
h laje [m]	0,2
lx (lado maior) [m]	5
ly (lado menor) [m]	4,25

Figura 4.4 – Inputs referentes à geometria da laje

Definida a geometria da laje, segue-se a escolha dos materiais (Figura 4.5). A folha tem uma base de dados desde a classe de betão C12/15 a C45/55 e em relação ao aço é possível escolher aços S400, S500 e S600. As regras aplicadas no Eurocódigo relativas ao projeto de estruturas e às disposições construtivas são válidas para um intervalo de tensões de $f_{yk} = 400$ MPa a 600MPa. Ao serem escolhidas as classes dos materiais, todas as características mecânicas serão automaticamente reconhecidas. Nesta fase, são também introduzidos os coeficientes parciais de segurança dos materiais.

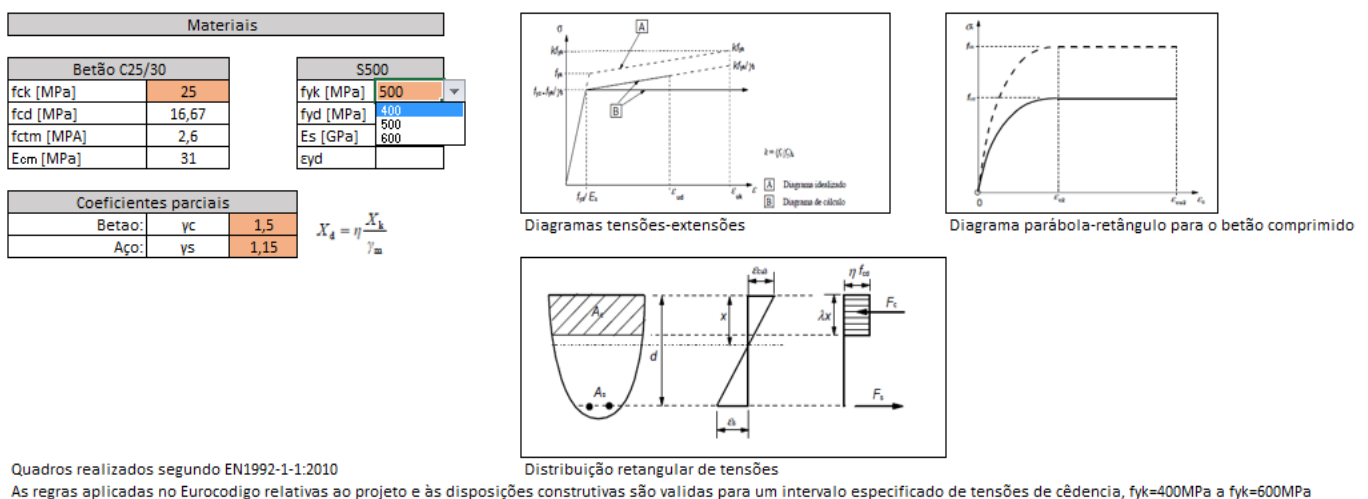


Figura 4.5 – Inputs referentes à classe dos materiais

CAPÍTULO 4

Uma vez introduzida a classe de betão e a geometria da peça, é feito o calculo automático do peso próprio da laje. Importa definir as restantes ações permanentes (Figura 4.6) e as ações variáveis (Figura 4.7). O utilizador tem a opção de inserir as restantes cargas permanentes (RCP) e a sobrecarga de utilização (Q). Esta vem acompanhada de um quadro da NP EN 1991:2009 (EC1) onde é possível identificar qual o valor correspondente à categoria das zonas carregadas.

Classificação das ações

Ação permanente (G)

É uma ação com elevada probabilidade de atuar.

São exemplos o peso próprio das estruturas, dos equipamentos fixos e dos pavimentos rodoviários e ações indiretas causadas por retrações e assenta-

Ação variável (Q)

É uma ação cuja variação de intensidade no tempo não é desprezável nem monotónica.

são exemplos as sobrecargas nos pavimentos, vigas e coberturas dos edifícios, a ação do vento e da neve.

Ação de acidente (A)

Ação com pequena probabilidade de ocorrência numa dada estrutura. Explosões ou choque provocado por veículos são exemplos de ações acidentais.

Ações Permanentes (G)	
Peso Próprio laje [kPa]	5
RCP [kPa]	15

Ações Variáveis (Q)	
Sobrecarga [kPa]	4

Categoria	Utilização específica	Exemplos
A	Actividades domésticas e residências	Salas em edifícios de habitação; quartos e enfermarias de hospitais; quartos de hotéis, comodas e lavabos.
B	Escritórios	
C	Locais de reunião (com excepção das utilizações correspondentes às categorias A, B e D) ¹⁾	<p>C1: Zonas com mesas, etc.; por exemplo, em escolas, cafés, restaurantes, salões de jantar, salas de leitura, recepções.</p> <p>C2: Zonas com assentos fixos; por exemplo, em igrejas, teatros ou cinemas, salas de conferências, salas de aulas, salas de reunião, salas de espera.</p> <p>C3: Zonas sem obstáculos para a movimentação de pessoas; por exemplo, em museus, salas de exposição, etc. e em acessos de edifícios públicos e administrativos, hotéis, hospitais, e em áreas de entrada de estações de comboio.</p> <p>C4: Zonas em que são possíveis actividades físicas; por exemplo, salões de dança, ginásios, paleas.</p> <p>C5: Zonas de possível acolhimento de multidões; por exemplo, edifícios para eventos públicos, tais como salas de concertos, salas para actividades desportivas incluindo bancadas, terraços e zonas de acesso; plataformas ferroviárias.</p>
D	Actividades comerciais	<p>D1: Zonas de lojas em geral.</p> <p>D2: Zonas de grandes armazéns.</p>

1) Consultar a anexo para 6.3.1.1(2), em particular para C4 e C5. Ver a EN 1991 quando for necessário considerar efeitos dinâmicos. Para a Categoria E, ver o Quadro 6.3.

NOTA 1: Dependendo das utilizações previstas, as zonas que seriam normalmente classificadas como C1, C3 e C4 poderão ser classificadas como C2 por decisão do dono da obra ou do Anexo Nacional.

NOTA 2: O Anexo Nacional poderá estabelecer subcategorias para A, B, C1 e C2, D1 e D2.

NOTA 3: Ver 6.3.2 para zonas de armazenamento ou de actividades industriais.

Quadro da EN1991-1-2009 - Categorias de utilização

As sobrecargas em edifícios são as que resultam da sua ocupação.

As áreas dos pavimentos e das coberturas são classificadas em função da sua utilização.

Categorias de zonas carregadas	Q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Pavimentos		
Categoria A	2,0	2,0
Categoria B	3,0	4,0
Categoria C		
C1	3,0	4,0
C2	4,0	4,0
C3	5,0	4,0
C4	5,0	7,0
C5	6,0	4,5
Categoria D		
D1	4,0	4,0
D2	5,0	6,0
Varandas	Ver a Nota 1	Ver a Nota 3
Escadas	Ver a Nota 2	Ver a Nota 3

NOTA 1: Deve adoptar-se uma sobrecarga uniformemente distribuída idêntica à do pavimento adjacente, com um mínimo de 5,0 kN/m² numa faixa de 1 m de largura adjacente ao parapeto.

NOTA 2: Deve adoptar-se uma sobrecarga uniformemente distribuída idêntica à do pavimento adjacente, com um mínimo de 3,0 kN/m².

NOTA 3: Deve adoptar-se uma sobrecarga concentrada idêntica à do pavimento adjacente.

Quadro da EN1991-1-2009

Figura 4.6 – Input das ações permanentes

Classificação das ações

Ação permanente (G)

É uma ação com elevada probabilidade de atuar.

São exemplos o peso próprio das estruturas, dos equipamentos fixos e dos pavimentos rodoviários e ações indiretas causadas por retrações e assenta

Ação variável (Q)

É uma ação cuja variação de intensidade no tempo não é desprezável nem monotónica.

são exemplos as sobrecargas nos pavimentos, vigas e coberturas dos edifícios, a ação do vento e da neve.

Ação de acidente (A)

Ação com pequena probabilidade de ocorrência numa dada estrutura. Explosões ou choque provocado por veículos são exemplos de ações acidentais.

Ações Permanentes (G)	
Peso Próprio laje [kPa]	5
RCP [kPa]	15

Ações Variáveis (Q)	
Sobrecarga [kPa]	4

Categoria	Utilização específica	Exemplos
A	Atividades domésticas e residenciais	Salas em edifícios de habitação; quartos e enfermarias de hospitais; quartos de hotéis, cozinhas e lavabos.
B	Escritórios	
C	Locais de reunião (com exceção das utilizações correspondentes às categorias A, B e D) ⁽¹⁾	<p>C1: Zonas com mesas, etc.; por exemplo, em escolas, cafés, restaurantes, salões de jantares, salas de leitura, recepções.</p> <p>C2: Zonas com assentos fixos; por exemplo, em igrejas, teatros ou cinemas, salas de conferências, salas de aulas, salas de reunião, salas de espera.</p> <p>C3: Zonas sem obstáculos para a movimentação de pessoas; por exemplo, em museus, salas de exposição, etc. e em acessos de edifícios públicos e administrativos, hotéis, hospitais, e em áreas de entrada de estações de comboio.</p> <p>C4: Zonas em que são possíveis atividades físicas; por exemplo, salões de dança, ginásios, piscinas.</p> <p>C5: Zonas de possível acolhimento de multidões; por exemplo, edifícios para eventos públicos, tais como salas de concertos, salas para atividades desportivas incluindo bancadas, terraços e zonas de acesso; plataformas ferroviárias.</p>
D	Atividades comerciais	<p>D1: Zonas de lojas em geral.</p> <p>D2: Zonas de grandes armazéns.</p>

(1) Consultar a anexo para 5.3.1.1(2), em particular para C4 e C5. Ver a EN 1991 quando for necessário considerar efeitos dinâmicos. Para a Categoria E, ver o Quadro 5.3.

NOTA 1: Dependendo das utilizações previstas, as zonas que seriam normalmente classificadas como C1, C3 e C4 poderão ser classificadas como C2 por decisão do dono de obra e do dono Nacional.

NOTA 2: O dono Nacional poderá estabelecer sobrecargas para A, B, C1 e C3, D1 e D2.

NOTA 3: Ver 5.3.2 para zonas de armazenamento ou de atividades industriais.

Categoria de zonas carregadas	Q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Pavimentos		
Categoria A	2,0	2,0
Categoria B	3,0	4,0
Categoria C		
C1	3,0	4,0
C2	4,0	4,0
C3	5,0	4,0
C4	5,0	7,0
C5	6,0	4,5
Categoria D		
D1	4,0	4,0
D2	5,0	6,0
Vareandas	Ver a Nota 1	Ver a Nota 3
Escadas	Ver a Nota 2	Ver a Nota 3

NOTA 1: Deve adotar-se uma sobrecarga uniformemente distribuída idêntica à do pavimento adjacente, com um mínimo de 5,0 kN/m² numa faixa de 1 m de largura adjacente ao parapeto.

NOTA 2: Deve adotar-se uma sobrecarga uniformemente distribuída idêntica à do pavimento adjacente, com um mínimo de 3,0 kN/m².

NOTA 3: Deve adotar-se uma sobrecarga concentrada idêntica à do pavimento adjacente.

Quadro da EN1991-1-1:2009

Quadro da EN1991-1-1:2009 - Categorias de utilização

As sobrecargas em edifícios são as que resultam da sua ocupação.

As áreas dos pavimentos e das coberturas são classificadas em categorias em função da sua utilização.

Figura 4.7 – Input da sobrecarga de utilização

É indispensável por parte do utilizador definir qual o tipo de apoio a que a laje esta sujeita. Esta informação é dada à folha de cálculo por intermédio de códigos, sendo 1 para simplesmente apoiada, 2 para encastrada ou 3 se o utilizador optar por o segundo fluxo de trabalho onde irá ser feita a introdução manual dos esforços recorrendo ao programa de análise estrutural (Figura 4.8).

Tipo de apoio	
Tipo de apoio:	2
	1
	2
	3

- 1 - Simplesmente apoiada
- 2 - Encastrada
- 3 - Dados do Robot

Figura 4.8 - Input relativo ao tipo de apoio da laje

CAPÍTULO 4

De forma a simplificar os cálculos, a altura útil da secção, d , é calculada subtraindo à altura da laje, h , o valor do recobrimento, c_{total} (Figura 4.9).

Recobrimento das armaduras

Entende-se por recobrimento das armaduras a distância entre a superfície de armadura que fica mais próxima da superfície de betão

$c_{min,dur}$ [mm]	15
$\Delta c_{dur,\gamma}$ [mm]	0
$\Delta c_{dur,st}$ [mm]	0
$\Delta c_{dur,add}$ [mm]	0
(4.2) [mm]	15
$c_{min,b}$ [mm]	12
	10
c_{min} [mm]	15
Δc_{dev} [mm]	10
c_{nom} [mm]	25
c_{Total} [mm]	0,04

$$C_{nom} \text{ [mm]} = C_{min} + 10\text{mm}$$

$$d = 0,16 \text{ m}$$

$$c_{min} = \max \{ c_{min,b}; c_{min,be} + \Delta c_{be,\gamma} + \Delta c_{be,st} + \Delta c_{be,add}; 10 \text{ mm} \}$$

em que:

- $c_{min,b}$: recobrimento mínimo para os requisitos de aderência, ver 4.4.1.2(3);
- $c_{min,be}$: recobrimento mínimo relativo às condições ambientais, ver 4.4.1.2(5);
- $\Delta c_{be,\gamma}$: margem de segurança, ver 4.4.1.2(6);
- $\Delta c_{be,st}$: redução do recobrimento mínimo no caso de utilização de aço inoxidável, ver 4.4.1.2(7);
- $\Delta c_{be,add}$: redução do recobrimento mínimo no caso de protecção adicional, ver 4.4.1.2(8).

Figura 4.9 – Recobrimento das amaduras

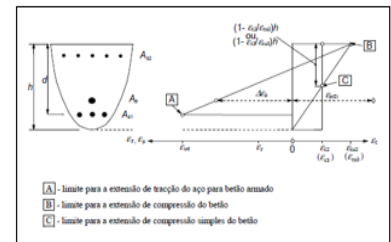
O último passo antes do dimensionamento da laje, será a introdução dos coeficientes parciais relativos às ações (Figura 4.10). Este passo permite o cálculo da carga equivalente correspondente à combinação fundamental. Por defeito, o valor do coeficiente parcial para as ações permanentes é 1,35 e para as ações variáveis é 1,5.

Estado limite último

Combinação de ações

Relativamente à determinação da resistência à flexão última de elementos de betão armado consideram-se como hipótese:

- As secções matêm-se planas;
- A extensão nas armaduras aderentes, em tração ou em compressão, é a mesma da do betão que as envolve;
- A resistência do betão à tração é ignorada;
- As tensões no betão comprimido são obtidas do diagrama tensões-extensões de cálculo;
- As tensões nas armaduras de betão armado são obtidas do diagrama tensões-extensões de cálculo;
- A avaliação das tensões nas armaduras de pré-esforço tem em conta a extensão inicial dessa armadura



Distribuição de extensões admissíveis no estado limite último

Coefficientes parciais relativamente às ações:

Permanete	γ_G	1,35
Variavel	γ_Q	1,5

Combinação fundamental: $\sum_{j=1}^n \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_P P + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{0i} Q_{ki}$ $P_{ed} = 33 \text{ kN/m}^2$

Figura 4.10 – Coeficientes parciais relativos às ações

4.2.2 Resultados do programa

Ao serem introduzidos todos os inputs mencionados, e através dos valores dos esforços atuantes a ferramenta devolve os valores de áreas de aço necessárias para garantir a verificação da segurança ao estado limite último. Uma vez calculadas as áreas de aço, o utilizador pode atribuir, às diferentes zonas armaduras disponíveis na laje, o seu diâmetro.

A Figura 4.11 diz respeito à obtenção dos esforços máximos de flexão na laje em cada direção com recurso às tabelas de Montoya.

Esforços máximos de flexão da laje			
Os esforços obtidos serão segundo as tabelas de Montoya-Meseguer-Moran			
m_{y+} [kN.m/m]=	$0,001 \cdot q \cdot l_y^2$,	84,58	21,08 kN.m/m
m_{x+} [kN.m/m]=	$0,001 \cdot q \cdot l_y^2$,	37,07	9,24 kN.m/m
m_{y-} [kN.m/m]=	$0,001 \cdot q \cdot l_y^2$,	-	- kN.m/m
m_{x-} [kN.m/m]=	$0,001 \cdot q \cdot l_y^2$,	-	- kN.m/m

Figura 4.11 - Obtenção dos esforços máximos na laje com recurso às tabelas de Montoya

Caso o utilizador pretenda dimensionar uma laje encastrada nos quatro bordos as células correspondentes aos momentos negativos serão preenchidas automaticamente, encontrando-se assim sujeita a quatro momentos representativos (Figura 4.12).

Tipo de apoio

Tipo de apoio: 2

- 1 - Simplesmente apoiada
- 2 - Encastrada
- 3 - Dados do Robot

Esforços máximos de flexão da laje L_m em cada direção			
Os esforços obtidos serão segundo as tabelas de Montoya-Meseguer-Moran			
m_{y+} [kN.m/m]=	$0,001 \cdot q \cdot l_y^2$,	27,39	16,33 kN.m/m
m_{x+} [kN.m/m]=	$0,001 \cdot q \cdot l_y^2$,	19,32	11,51 kN.m/m
m_{y-} [kN.m/m]=	$0,001 \cdot q \cdot l_y^2$,	63,55	37,88 kN.m/m
m_{x-} [kN.m/m]=	$0,001 \cdot q \cdot l_y^2$,	55,98	33,37 kN.m/m

a) Escolha do tipo de apoio

b) Obtenção dos esforços

Figura 4.12 – Obtenção dos esforços de uma laje encastrada nos quatro bordos

A definição das verificações regulamentares é feita automaticamente após a inserção dos dados relativos à geometria da laje seguindo os procedimentos adotados no EC2 (Figura 4.13).

Verificações Regulamentares			
Armadura mínima	Armadura máxima	Espaçamento máximo	Espaçamento mínimo
$A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d$	$A_{s,max} = 0,04 \cdot d \cdot b$	$s \leq \begin{cases} 2h \\ 250mm \end{cases}$	$s \geq \{100mm$
$A_{s,min} \geq 0,013b_t d$			
$A_{s,min} = 2,08 \text{ cm}^2/m$	$A_{s,max} = 80 \text{ cm}^2/m$	$s_{max} = 0,25 \text{ m}$	$s_{min} = 0,10 \text{ m}$

Após fendilhação é necessário uma reserva de resistencia por essa razão é tido em conta uma área mínima de armadura principal.
 A quantidade livre entre armaduras deve ser suficiente para permitir realizar a betonagem em boas condições, assegurando-lhes um bom envolvimento pelo betão e a: Em prática não é recomendavel adotar espaçamentos inferiores a 10cm de modo a criar condições para uma adequada colocação e compactação do betão.

Figura 4.13 – Verificações regulamentares segundo o EC2

A definição das armaduras faz-se de uma forma sequencial. O utilizador poderá escolher o diâmetro de armadura que pretende para cada zona da laje. Tem a opção de escolha desde varões com 6 mm de diâmetro até varões com 20 mm. O espaçamento será automaticamente calculado com base no diâmetro escolhido. O valor da área de armadura requerida é indicado junto ao bloco de dimensionamento, como é ilustrado na Figura 4.14.

Armaduras principais de flexão

Armadura na direção y+

$\mu = 0,1633 \quad \mu = \frac{M_{ed}}{b d^2 f_{cd}}$

$\sigma = 0,1837 \quad \sigma = \frac{A_s f_{yd}}{b d f_{cd}}$

$A_{sy+} = 6,76 \text{ cm}^2/m$ Cumpre a armadura mínima

$A_{sy+,cál} = 6,76 \text{ cm}^2/m$

Armadura adotada	
φ Diâmetro:	20 mm
A _s :	7,85 cm ² /m
s:	0,400 m
s _{máx} :	0,250 m
A _{sy+,adot} :	12,57 cm ² /m
Φ 20 // 0,25 m	

Armadura na direção x+

$\mu = 0,1241 \quad \mu = \frac{M_{ed}}{b d^2 f_{cd}}$

$\sigma = 0,1351 \quad \sigma = \frac{A_s f_{yd}}{b d f_{cd}}$

$A_{sx+} = 4,97 \text{ cm}^2/m$ Cumpre a armadura mínima

$A_{sx+,cál} = 4,97 \text{ cm}^2/m$

Armadura adotada	
φ Diâmetro:	16 mm
A _s :	6,28 cm ² /m
s:	0,375 m
s _{máx} :	0,250 m
A _{sx+,adot} :	12,57 cm ² /m
Φ 16 // 0,25 m	

Armadura de cálculo

Escolha do diâmetro

Figura 4.14 - Armaduras principais de flexão

A barra de inserção de dados possibilita a introdução do diâmetro por parte do utilizador. Neste ponto serão definidos os diâmetros para as diferentes zonas da laje bem como os espaçamentos.

Serão gerados avisos automaticamente, como ilustrado na Figura 4.14, onde o utilizador é informado, por exemplo, que o espaçamento não satisfaz a verificação regulamentar e, desta forma, será feito um dimensionamento com base no diâmetro escolhido e pelo maior espaçamento permitido no regulamento. Todo este processo é executado automaticamente.

Relativamente à dispensa, esta também é realizada de uma forma automática tendo em atenção o espaçamento máximo permitido.

A dispensa de armadura é calculada automaticamente, não sendo necessário a inserção nem do diâmetro nem do espaçamento. A ferramenta assume um diâmetro igual ao da armadura principal nessa direção. No exemplo que se segue, com a armadura principal escolhida, $\phi 16 // 0,25$ m, não será possível fazer dispensa, pois o espaçamento máximo regulamentado para a zona de dispensa é de 300mm. O utilizador é informado que com aquela armadura principal escolhida não haverá dispensa (Figura 4.15).

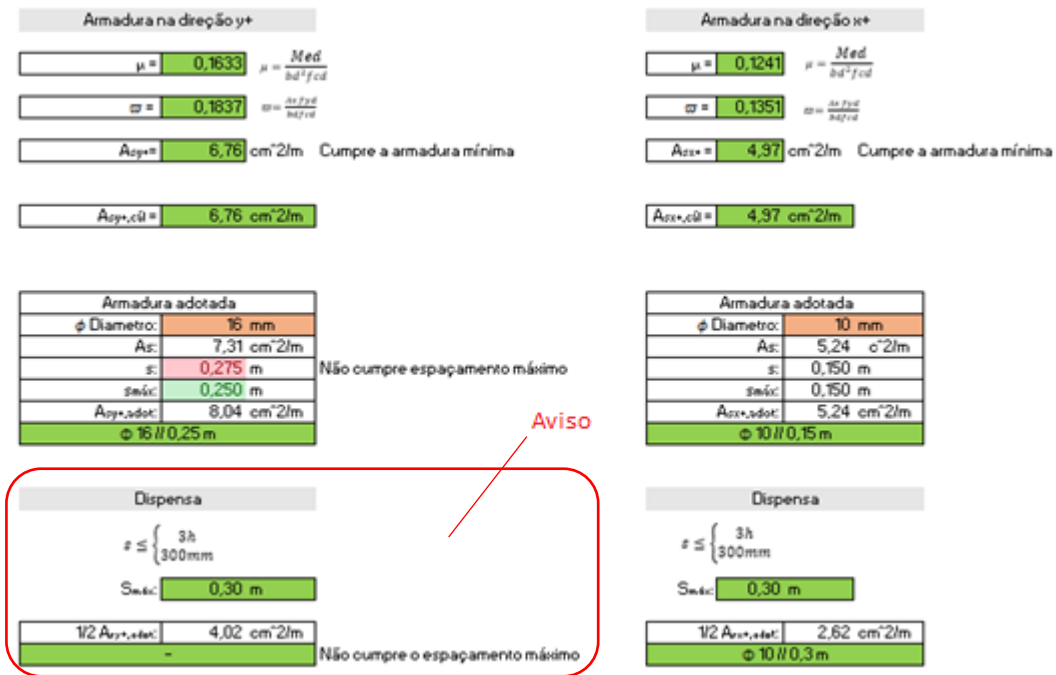
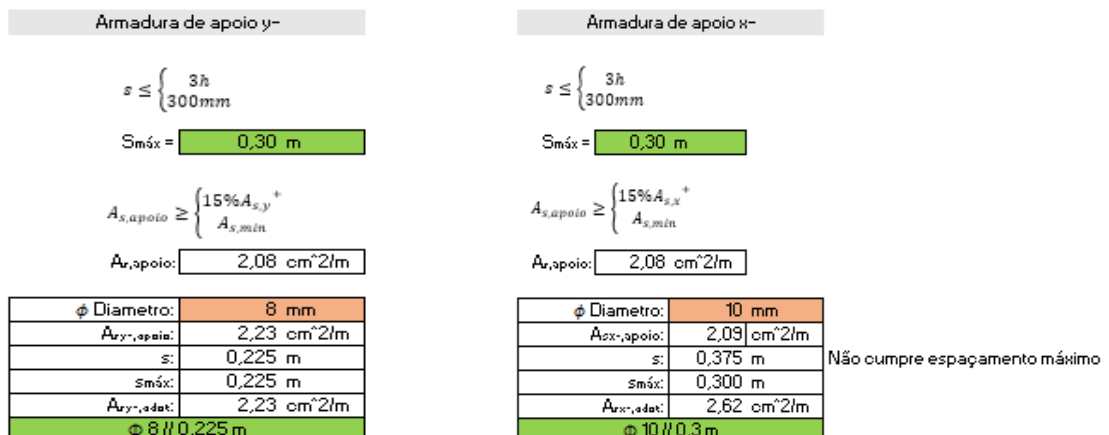


Figura 4.15 – Avisos gerados automaticamente

O procedimento adotado para as restantes zonas (armadura de apoio, distribuição e canto) da laje é idêntico ao adotado para as armaduras principais de flexão. O utilizador terá unicamente de escolher o diâmetro que pretende como é visível na Figura 4.16.



a) Armadura de apoio y^-

Armadura de distribuição y^-

$$s \leq \begin{cases} 3h \\ 300mm \end{cases}$$

$$A_{s,dist} \geq \{20\%A_{s,apoio}$$

φ Diámetro:	6 mm
$A_{s,dist}$:	0,45 cm^2/m
$A_{s,adop}$:	0,71
s:	0,400 m
$s_{máx}$:	0,300 m
$A_{r,adat}$:	0,94 cm^2/m
φ 6 // 0,3 m	

b) Armadura de apoio x^-

Armadura de distribuição x^-

$$s \leq \begin{cases} 3h \\ 300mm \end{cases}$$

$$A_{s,dist} \geq \{20\%A_{s,apoio}$$

φ Diámetro:	6 mm
$A_{s,dist}$:	0,52 cm^2/m
$A_{s,adop}$:	0,71
s:	0,400 m
$s_{máx}$:	0,300 m
$A_{r,adat}$:	0,94 cm^2/m
φ 6 // 0,3 m	

c) Armadura de distribuição y^+

Armadura de canto y^+

$$A_{s,canto} \geq \begin{cases} A_{s,max x} \\ A_{s,max y} \end{cases}$$

$$A_{s,canto} \geq 7,85 \text{ cm}^2/m$$

φ Diámetro:	8 mm
1. (0,1.ly)	0,00 cm^2/m
$A_{s,adop}$:	- cm^2/m
s:	- m
$s_{máx}$:	- m
-	
2. (0,2.ly)	3,93 cm^2/m
$A_{s,adop}$:	4,02 cm^2/m
s:	0,125 m
$s_{máx}$:	0,125 m
φ 8 // 0,125 m	

d) Armadura de distribuição x^+

Armadura de canto x^+

$$A_{s,canto} \geq \begin{cases} A_{s,max x} \\ A_{s,max y} \end{cases}$$

$$A_{s,canto} \geq 7,85 \text{ cm}^2/m$$

φ Diámetro:	6 mm
1. (0,1.ly)	2,62 cm^2/m
$A_{s,adop}$:	2,83 cm^2/m
s:	0,100 m
$s_{máx}$:	0,100 m
φ 6 // 0,1 m	
2. (0,2.ly)	5,24 cm^2/m
$A_{s,adop}$:	2,83 cm^2/m
s:	0,10 m
$s_{máx}$:	0,10 m
φ 6 // 0,1 m	

e) Armadura de canto y^+

Armadura de canto superior

$$A_{s,canto} \geq \begin{cases} A_{s,max x} \\ A_{s,max y} \end{cases}$$

$$A_{s,canto} \geq 7,85 \text{ cm}^2/m$$

φ Diámetro:	10 mm
S:	0,1 cm^2/m
φ 10 // 0,1 m	

f) Armadura de canto x^+

g) Armadura de canto superior

Figura 4.16 – Dimensionamento das diferentes zonas da laje

Para finalizar o dimensionamento é necessário armazenar todos os dados relativos às armaduras. Para o efeito, o utilizador deve utilizar o botão guardar do Excel.

4.2.3 Ligação ao programa Robot Structural Analysis

No software de análise e dimensionamento será feita a modelação da estrutura ou do elemento e será feita uma análise para posteriormente serem obtidos os esforços na laje. Como referido, o software escolhido foi o Robot Structural Analysis 2018. O utilizador terá a opção de fazer a modelação da estrutura no Revit, exportando posteriormente o modelo analítico para o software de análise e dimensionamento. É vantajoso ter o elemento modelado no Revit, agilizando o processo para automatizar a modelação das armaduras.

Em primeiro lugar, é necessário fazer a modelação da estrutura ou do elemento em estudo, começando por definir os materiais e aplicando as cargas na estrutura. É também necessário definir a malha de elementos finitos a usar. O próximo passo será fazer uma análise da estrutura para se obter os esforços atuantes na laje.

Segue-se a introdução dos esforços na folha de cálculo onde será efetuado o dimensionamento das lajes. A introdução dos esforços na folha de cálculo faz-se manualmente. O utilizador terá a opção da introdução entre seis momentos máximos: os dois momentos principais positivos em cada direção, m_x^+ e m_y^+ , e os quatro momentos negativos nos 4 bordos da laje, m_x^- , m_x^- , m_y^- e m_y^- (Figura 4.17).

Foi testado uma outra alternativa de criar a ligação com o Robot, através da importação dos esforços recorrendo ao *Results Connect*, suplemento que é instalado no ato da instalação do software da Autodesk. Esta alternativa fazia com que todo o processo fosse realizado de forma automática. O uso desta abordagem tinha uma desvantagem. Os esforços exportados poderiam não corresponder aos esforços máximos da laje e por isso não foi usada no desenvolvimento desta folha de cálculo.

Esforços máximos de flexão da laje					
Esforços obtidos através do software de análise e dimensionamento Robot 2018					
m_{y+} [kN.m/m]=	27	kN.m/m	$m_{y- (E)}$ [kN.m/m]=	18	kN.m/m
m_{x+} [kN.m/m]=	36	kN.m/m	$m_{y- (D)}$ [kN.m/m]=	27	kN.m/m
			$m_{x- (E)}$ [kN.m/m]=	18	kN.m/m
			$m_{x- (D)}$ [kN.m/m]=	27	kN.m/m

Figura 4.17 – Introdução manual dos esforços obtidos no Robot 2018

4.2.4 Interligação com software de modelação BIM

Uma vez realizado o dimensionamento, segue-se a importação de todos os dados relativos à geometria do elemento bem como todos os resultados obtidos relativamente aos diâmetros escolhidos e os correspondentes espaçamentos para o software onde toda esta informação será processada, o Dynamo. A interligação destes dois softwares ocorre de uma forma direta. No capítulo dedicado à produção automática dos modelos BIM de armaduras será explicado com maior detalhe como é realizada a exportação desses dados.

Paralelamente, e como complemento ao objetivo proposto, foi desenvolvida uma folha no Excel que permite a introdução manual dos resultados obtidos da folha de cálculo automática ou de um outro programa de dimensionamento. Os inputs da folha, são referentes à geometria da laje e ao diâmetro e espaçamento dos varões como é ilustrado na Figura 4.18. A folha terá ligação direta com o algoritmo desenvolvido.

140	h [mm]
4250	ly [mm]
5000	lx [mm]
40	c [mm]
150	lbd, inferior [mm]
100	lbd, superior [mm]
8	Φ Asy+ [mm]
100	// Asy+ [mm]
8	Φ Asx+ [mm]
150	// Asx+ [mm]
200	// Asy+,dispensa [mm]
300	// Asx+,dispensa [mm]
6	Φ Asy- [mm]
175	// Asy- [mm]
6	Φ Asx- [mm]
175	// Asx- [mm]
300	// Asy-,dist
300	// Asx-,dist
8	Φ Asy+, canto inf [mm]
-	// Asy+,canto [mm]
200	// Asy+,canto [mm]
8	Φ Asx+, canto inf [mm]
300	// Asx+,canto [mm]
150	// Asx+,canto [mm]
8	Φ As-, canto [mm]
100	// As-,canto [mm]
Input manual	

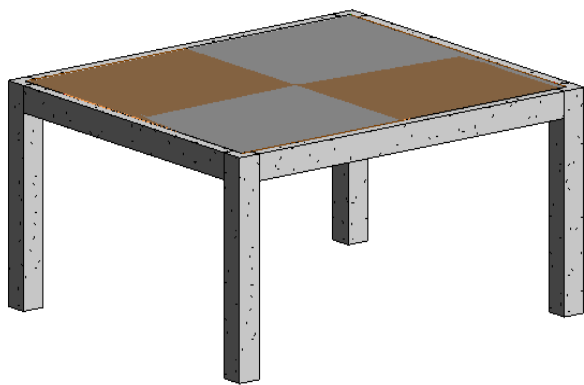
Figura 4.18 - Folha desenvolvida para introdução manual dos resultados obtidos

4.3 CASO PRÁTICO

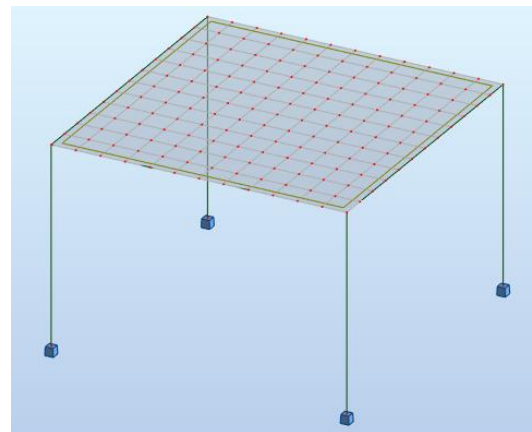
De forma a demonstrar as funcionalidades da folha de cálculo e garantir que foi possível atingir os objetivos definidos, apresenta-se um caso de estudo.

Começou-se por fazer a modelação da estrutura no Revit 2018, tendo sido posteriormente exportado o modelo analítico para o Robot 2018 para se efetuar o seu estudo e fazer uma comparação com os valores obtidos na folha de cálculo (Figura 4.19). É importante fazer a modelação da parte estrutural no Revit, nomeadamente da laje. A automatização da modelação das armaduras será feita neste software. Desta forma foram abrangidos todos os programas do fluxo de trabalho.

Como o caso de estudo é uma laje simplesmente apoiada não era necessário efetuar a análise no Robot uma vez que a folha de cálculo desenvolvida tem capacidade para fazer a análise e o dimensionamento deste tipo de lajes com este tipo de cargas.



a) Modelo Revit 2018



b) Modelo Robot 2018

Figura 4.19 – Estrutura do caso de estudo nos dois softwares

4.3.1 Dimensionamento de uma laje simplesmente apoiada

Pretende-se fazer o dimensionamento, de uma laje maciça de betão armado simplesmente apoiada sujeita à ação do peso próprio, sobrecarga (cobertura em terraço) e restantes cargas permanentes com a configuração indicada na Figura 4.20. Não foram consideradas ações sísmicas, do vento ou acidentais. Os materiais a utilizar são o betão C20/25 e aço S400.

CAPÍTULO 4

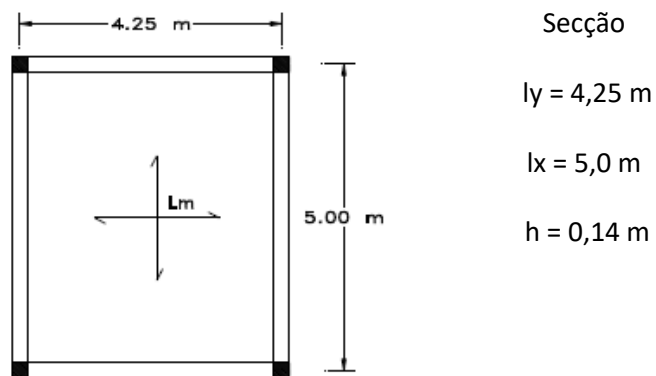


Figura 4.20 – Esquema da laje a dimensionar

Dados:

Tabela 4.1 – Ações

Nome	Valor
Peso próprio (PP) – G	25 kN/m^3
Restantes cargas permanentes (RCP) - G	$4,5 \text{ kN/m}^2$
Sobrecarga - Q	$2,0 \text{ kN/m}^2$

Tabela 4.2 – Propriedades dos materiais

Betão		Aço	
f_{cd}	$13,33 \text{ MPa}$	f_{yd}	348 MPa
f_{ctm}	$2,2 \text{ MPa}$	E_s	200 GPa
E_{cm}	30 GPa		

Tabela 4.3 – Coeficientes parciais relativos aos materiais

Betão γ_c	1,5
Aço γ_s	1,15

Por simplificação de cálculos, considera-se $d = h - 0,04 \text{ m}$. Desta forma:

$$d=0,14-0,04=0,10\text{m}$$

Recorrendo à expressão da armadura mínima tem-se:

$$A_{s,\text{mín}} \geq \begin{cases} 0,26 \times \frac{2,2}{400} \times 1,0 \times 0,10 = 1,43 \text{ cm}^2/\text{m} \\ 0,0013 \times 1,0 \times 0,10 = 1,3 \text{ cm}^2/\text{m} \end{cases}$$

A armadura máxima é dada por:

$$A_{s,\text{máx}} = 0,04 \times 0,14 \times 1,0 = 56 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Segundo a EN1990 as ações de dimensionamento são dadas pela seguinte expressão:

$$p_{Ed} = 1,35 \times (4,5 + 25 \times 0,14) + 1,5 \times 2,0 = 13,8 \text{ kN/m}^2$$

Neste exemplo, a obtenção dos esforços será feita recorrendo às tabelas do Montoya. Considerando-se que $p_{Ed} = 13,8 \text{ kN/m}^2$ e $l_y/l_x = 4,25/5 = 0,85$, os momentos fletores máximos no vão são (Figura 4.21):

$$\begin{cases} m_y^+ = 13,96 \text{ kN.m/m} \\ m_x^+ = 10,60 \text{ kN.m/m} \end{cases}$$

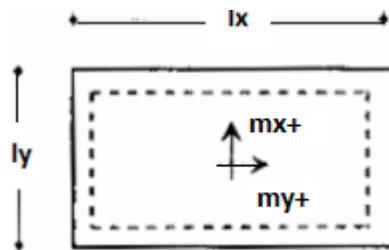


Figura 4.21 - Representação dos momentos segundo Montoya

Da expressão do momento reduzido resultam as seguintes armaduras:

$$\begin{cases} \mu = \frac{13,96}{1,0 \times 0,10^2 \times 13300} = 0,1050 \Rightarrow \omega = 0,111 \Rightarrow A_{s_y}^+ = 4,30 \text{ cm}^2/\text{m} \\ \mu = \frac{10,60}{1,0 \times 0,10^2 \times 13300} = 0,0797 \Rightarrow \omega = 0,0840 \Rightarrow A_{s_x}^+ = 3,20 \text{ cm}^2/\text{m} \end{cases}$$

As armaduras deverão ser posicionadas de acordo com as disposições do ponto 3.4.2. Na Figura 4.22 apresenta-se um resumo de acordo com as tabelas de Montoya.

CAPÍTULO 4

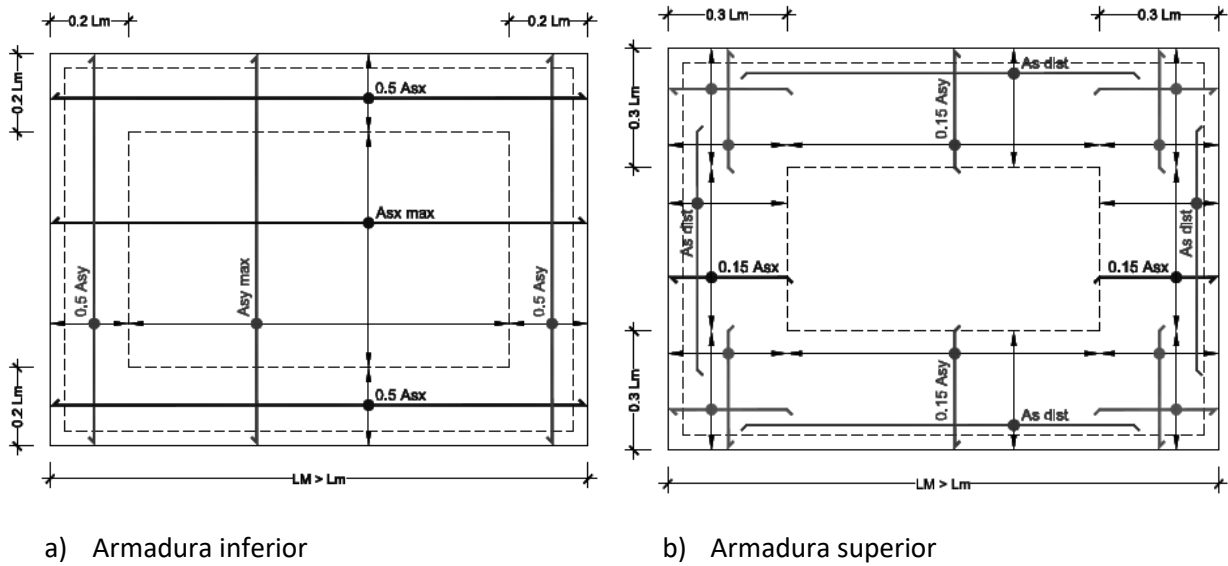


Figura 4.22 – Disposições de armaduras de lajes simplesmente apoiadas

A_{sy}^+ é a armadura paralela ao lado L_m (lado menor) e A_{sx}^+ é a armadura paralela ao lado L_M (lado maior).

Considerando o uso de armaduras com diâmetro de 8 mm nas duas direções principais, o espaçamento definido para as direções y e x foi de 0,10m e 0,15m, respetivamente. A armadura existente de $\phi 8//0.10$ equivale a um valor de $A_{sy}^+ = 5,03\text{cm}^2/m$ e a de $\phi 8//0.15$ equivale a $A_{sx}^+ = 3,35\text{cm}^2/m$.

É adotado uma dispensa de metade da armadura a meio vão. Assim:

$$A_{sy,disp}^+ = 0,50 \times 5,03 = 2,51\text{cm}^2 \Rightarrow \phi 8//0.20\text{m}$$

$$A_{sx,disp}^+ = 0,50 \times 3,35 = 1,68\text{cm}^2 \Rightarrow \phi 8//0.30\text{m}$$

Não foi efetuado o cálculo do comprimento de amarração, l_{bd} no presente exemplo uma vez que não foi implementado na folha cálculo.

A armadura de apoio é 15% da armadura inferior do vão nessa direção tendo ainda que respeitar a armadura mínima. Assim:

$$A_{sy,apoio}^- \geq \begin{cases} 0,15 \times 5,03 = 0,75\text{cm}^2 \\ A_{s,mín} = 1,43\text{cm}^2 \end{cases} \Rightarrow \phi 6//0.175\text{m}$$

$$A_{sx,apoio}^- \geq \begin{cases} 0,15 \times 3,35 = 0,50\text{cm}^2 \\ A_{s,mín} = 1,43\text{cm}^2 \end{cases} \Rightarrow \phi 6//0.175\text{m}$$

A armadura de distribuição terá de ser superior a 20% da armadura de apoio, respeitando tanto o espaçamento máximo como o espaçamento mínimo. Deste modo:

$$A_{sx,dist}^- = 0,20 \times 1,62 = 0,32\text{cm}^2/m \Rightarrow \phi 6//0.30\text{m}$$

Relativamente às armaduras de canto inferiores, na direção y foi adotado a armadura $\phi 8//0.20m$. O prolongamento desta armadura será feito a partir da face inferior do apoio até uma distancia de 0,2 vezes o menor vão. Na direção x foram adotadas as armaduras $\phi 8//0.15m$ e $\phi 8//0.30m$ para serem distribuídas a partir da face do apoio a uma distancia de 0,3 vezes o menor vão. A área de armadura de canto superior terá que ser igual à maior área de armadura inferior, desta forma adotou-se $\phi 8//0.10m$.

4.3.2 Verificação aos Estados Limites de Utilização

Controlo da fendilhação

A combinação a usar será a combinação quase-permanente. O coeficiente parcial da ação variável é $\psi_2 = 0,3$.

Desta forma:

$$p_{Ed} = (3,5 + 4,5) + 0,3 \times 2,0 = 8,6 \text{ kN/m}^2$$

Assim os momentos fletores de cálculo são:

$$m_y^+ = 8,71 \text{ kN.m/m}$$

$$m_x^+ = 6,62 \text{ kN.m/m}$$

O valor do momento de fendilhação é

$$M_{cr} = \frac{1,0 \times 0,14^2}{6} \times 2,2 \times 10^3 = 7,19 \text{ kN.m/m} \leq m_y^+ \Rightarrow \text{Estado II (Fendilhado)}$$

Utilizando a tabela 3.8 do capítulo anterior

$$\rho = \frac{5,03 \times 10^{-4}}{1,0 \times 0,10} = 0,00503 = 0,503\% \quad \left| \begin{array}{l} \xi = 0,320 \\ c_s = 227,7 \\ c_c = 7,0117 \end{array} \right.$$

A posição da linha neutra em estado fendilhado é dada por

$$x = 0,10 \times 0,320 = 0,032 \text{ m}$$

A tensão na armadura é

$$\sigma_s = 227,7 \times \frac{8,71}{1,0 \times 0,10^2} = 198,3 \text{ MPa}$$

O cálculo da distância máxima entre fendas

$$s_{r,max} = 3,4 \times 0,04 + 0,425 \times 0,8 \times 0,5 \times \frac{0,008}{0,0140} = 0,233 \text{ m}$$

CAPÍTULO 4

O cálculo da extensão média relativa entre o aço e o betão

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{198,3 \times 10^3}{200 \times 10^6} - 0,4 \times \frac{2,2 \times 10^3}{200 \times 10^6 \times 0,0140} (1 + 6,45 \times 0,0140) = 0,000649$$

O valor característico da abertura de fendas é

$$w_k = 0,233143 \times 0,000649 = 0,000151 \text{ m} \Rightarrow 0,15 \text{ mm} \leq w_{adm} = 0,3 \text{ mm}$$

Desta forma a segurança ao estado limite de fendilhação está verificada.

Controlo da deformação

Para a flecha instantânea tem-se

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{200}{30} = 6,68 \\ \rho &= \frac{5,03 \times 10^{-4}}{1,0 \times 0,10} = 0,00503 \end{aligned} \right| \Rightarrow \alpha \rho = 0,0335 \Rightarrow \frac{l''}{l'} = 0,188$$

$$a^I \cong a_c = \frac{0,001 \times 8,6 \times 4,25^4}{30 \times 10^6 \times 0,14^3} \times 64,5 = 0,0022 \text{ m}$$

$$a^{II} \cong \frac{l'}{l''} a_c = \frac{1}{0,188} \times 0,0022 = 0,0117 \text{ m}$$

$$\tau = 1 - 0,5 \times \left(\frac{7,19}{8,7} \right)^2 = 0,659$$

Pelo que:

$$a = [(1 - 0,659) \times 0,0022 + 0,659 \times 0,0117] = 0,00845 \text{ m}$$

A flecha a longo prazo é dada por

$$\alpha \rho = 0,0335 (1 + 2,5) = 0,11725 \Rightarrow \frac{l''}{l'} = 0,455$$

$$a_t^I = 3,5 \times 0,0022 = 0,0077 \text{ m}$$

$$a_t^{II} = \frac{1}{0,455} \times 3,5 \times 0,0022 = 0,0169 \text{ m}$$

Pelo que:

$$a_t = (1 - 0,689) \times 0,0077 + (0,689 \times 0,0169) = 0,01375 \text{ m} \leq \frac{4,25}{250} = 0,017 \text{ m}$$

Os resultados obtidos permitem concluir que a deformação está controlada.

4.3.3 Verificação do exemplo recorrendo a folha de cálculo automática

Será feita uma descrição pormenorizada de todos os passos para obter o dimensionamento da laje na folha de cálculo.

1. Definir as secções, os materiais, os coeficientes parciais e o tipo de apoio da laje em estudo como indicado na Figura 4.23.

Definição de secções	
h laje [m]	0,14
lx (lado maior) [m]	5
ly (lado menor) [m]	4,25

a) Definição das secções

Betão C20/25	
f _{ck} [MPa]	20
f _{cd} [MPa]	13,33
f _{ctm} [MPa]	2,2
E _{cm} [GPa]	30

b) Definição do tipo de betão

S400	
f _{yk} [MPa]	400
f _{yd} [MPa]	400
E _s [GPa]	500
ε _{yd}	6,00

c) Definição do tipo de aço

Tipo de apoio	
Tipo de apoio:	1
	1
	2
	3

d) Definição do tipo de apoio da laje

- 1 - Simplesmente apoiada
- 2 - Encastrada
- 3 - Dados do Robot

Figura 4.23 – Inputs iniciais

2. Definir as ações atuantes, restantes cargas permanentes e sobrecarga de utilização.

Ações Permanentes (G)	
Pepo Próprio laje [kPa]	3,5
RCP [kPa]	4,5

Ações Variáveis (Q)	
Sobrecarga [kPa]	2
	2
	3
	4
	5
	6
	7
	8
	9

Figura 4.24 – Definir as ações atuantes

Após estes passos serão apresentados os resultados que levam ao dimensionamento da laje. A folha determina de uma forma automática a carga de dimensionamento bem como todas as verificações regulamentares de acordo com os Eurocódigos como indicado na Figura 4.25.

CAPÍTULO 4

3. Visualização da carga de dimensionamento e de todas as verificações regulamentares

Coefficientes parciais relativamente às ações:

Permanete	γ_G	1,35
Variavel	γ_Q	1,5

Combinação fundamental: $\sum_{j=1}^n \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$ $P_{sd} = 13,8 \text{ kNm}^2$

a) Carga de dimensionamento

Armadura mínima	Armadura máxima	Espaçamento máximo	Espaçamento mínimo
$A_{s, \min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d$ $A_{s, \min} \geq 0,013 b_t d$	$A_{s, \max} = 0,04 . d . b$	$s \leq \begin{cases} 2h \\ 250\text{mm} \end{cases}$	$s \geq \{100\text{mm}$
$A_{s, \min} = 1,43 \text{ cm}^2/\text{m}$	$A_{s, \max} = 56 \text{ cm}^2/\text{m}$	$s_{\max} = 0,25 \text{ m}$	$s_{\min} = 0,10 \text{ m}$

b) Verificações regulamentares

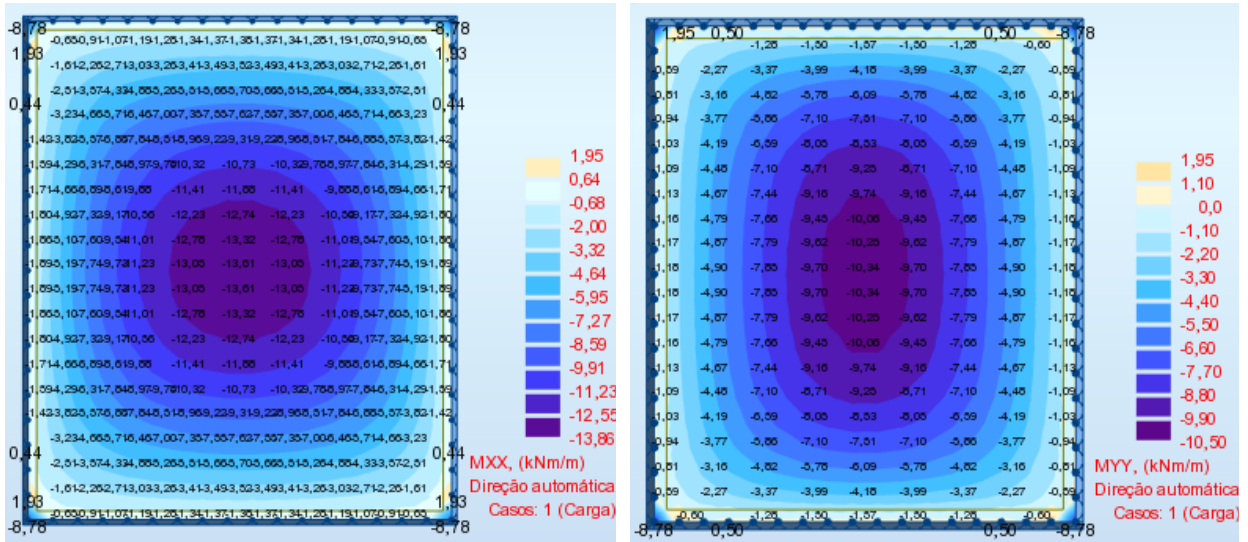
Figura 4.25 – Visualização da carga de dimensionamento e das verificações regulamentares

Será efetuada uma análise dos esforços pelo software Robot com o objetivo de comparar os resultados obtidos com os da folha de cálculo.

Na análise realizada no Robot 2018 obtiveram-se os seguintes esforços ilustrados na Figura 3.26. Os valores máximos segundo o Robot 2018 na direção x e y são 10,50 e 13,86 $kN \cdot m/m$ respetivamente. Nos mapas representados, verifica-se que as zonas de maiores esforços correspondem evidentemente às zonas de maior necessidade de armadura.

É possível verificar que os valores dos momentos máximos obtidos segundo as tabelas de Montoya estão muito próximos dos valores obtidos no programa de análise e dimensionamento (Figura 4.27).

4. Visualização dos esforços obtidos na folha de cálculo e no software Robot 2018



a) Momentos positivos na direção y

b) Momentos positivos na direção x

Figura 4.26 - Esforços obtidos através do software de análise e dimensionamento Robot 2018

m_y+ [kN.m/m]=	$0,001 \cdot q \cdot l_y^2$	56,09	13,98 kN.m/m
m_x+ [kN.m/m]=	$0,001 \cdot q \cdot l_x^2$	42,64	10,63 kN.m/m
m_y- [kN.m/m]=	$0,001 \cdot q \cdot l_y^2$	-	- kN.m/m
m_x- [kN.m/m]=	$0,001 \cdot q \cdot l_x^2$	-	- kN.m/m

Figura 4.27 – Esforços obtidos através das tabelas de Montoya

Como se pode observar os resultados dos esforços são iguais ao calculado em 4.3.1.

Na fase seguinte serão definidos os diâmetros para as diferentes zonas da laje. O utilizador poderá determinar várias soluções possíveis dependendo do diâmetro que usar para cada zona, tendo sempre que respeitar todas as verificações regulamentares bem como os parâmetros de pormenorização. A determinação de uma solução irá depender sempre do Engenheiro projetista. Este deverá fazer uso de todo o seu conhecimento e sentido crítico independentemente do nível de automatização da ferramenta em uso.

Foram escolhidos diâmetros iguais aos calculados no ponto 4.3.1 de forma a ter uma certa coerência na comparação (Figura 4.28).

5. Definição dos diâmetros para as diferentes zonas da laje

Armadura na direção y+

$$\mu = 0,1049 \quad \mu = \frac{Med}{bd^2fcd}$$

$$\omega = 0,1125 \quad \omega = \frac{Asf_yd}{btfcd}$$

$$A_{sy+} = 4,31 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \text{Cumpra a armadura mínima}$$

$$A_{sy+,cál} = 4,31 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura adotada	
φ Diâmetro:	8 mm
As:	5,03 cm ² /m
s:	0,100 m
smáx:	0,100 m
A _{sy+,adot:}	5,03 cm ² /m
φ 8 // 0,1m	

Armadura na direção x+

$$\mu = 0,0797 \quad \mu = \frac{Med}{bd^2fcd}$$

$$\omega = 0,0840 \quad \omega = \frac{Asf_yd}{btfcd}$$

$$A_{sx+} = 3,22 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \text{Cumpra a armadura mínima}$$

$$A_{sx+,cál} = 3,22 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura adotada	
φ Diâmetro:	8 mm
As:	3,35 cm ² /m
s:	0,150 m
smáx:	0,150 m
A _{sx+,adot:}	3,35 cm ² /m
φ 8 // 0,15 m	

a) A_{sy}⁺

Dispensa

$$s \leq \begin{cases} 3h \\ 300\text{mm} \end{cases}$$

$$S_{máx} = 0,30 \text{ m}$$

$$1/2 A_{vy+,adot} = 2,51 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\phi 8 // 0,2 \text{ m}$$

b) A_{sx}⁺

Dispensa

$$s \leq \begin{cases} 3h \\ 300\text{mm} \end{cases}$$

$$S_{máx} = 0,30 \text{ m}$$

$$1/2 A_{vx+,adot} = 1,68 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\phi 8 // 0,3 \text{ m}$$

c) A_{sy,disp}⁺

Armadura de apoio y-

$$s \leq \begin{cases} 3h \\ 300\text{mm} \end{cases}$$

$$S_{máx} = 0,30 \text{ m}$$

$$A_{s,apoio} \geq \begin{cases} 15\% A_{s,y}^+ \\ A_{s,min} \end{cases}$$

$$A_{vy-,apoio} = 1,43 \text{ cm}^2/\text{m}$$

φ Diâmetro:	6 mm
A _{vy-,apoio:}	1,62 cm ² /m
s:	0,175 m
smáx:	0,175 m
A _{vy-,adot:}	1,62 cm ² /m
φ 6 // 0,175 m	

d) A_{sy,disp}⁺

Armadura de apoio x-

$$s \leq \begin{cases} 3h \\ 300\text{mm} \end{cases}$$

$$S_{máx} = 0,30 \text{ m}$$

$$A_{s,apoio} \geq \begin{cases} 15\% A_{s,x}^+ \\ A_{s,min} \end{cases}$$

$$A_{vx-,apoio} = 1,43 \text{ cm}^2/\text{m}$$

φ Diâmetro:	6 mm
A _{sx-,apoio:}	1,62 cm ² /m
s:	0,175 m
smáx:	0,175 m
A _{sx-,adot:}	1,62 cm ² /m
φ 6 // 0,175 m	

e) A_{sy,apoio}⁻

f) A_{sx,apoio}⁻

Armadura de distribuição y-

$$s \leq \begin{cases} 3h \\ 300\text{mm} \end{cases}$$

$$A_{s,dist} \geq 20\%A_{s,apoio}$$

φ Diámetro:	6 mm
A _{s,dist} :	0,32 cm ² /m
A _{s,adop} :	0,71
s:	0,400 m
s _{máx} :	0,300 m
A _{r,adat} :	0,94 cm ² /m
⊕ 6 // 0,3 m	

Armadura de distribuição x-

$$s \leq \begin{cases} 3h \\ 300\text{mm} \end{cases}$$

$$A_{s,dist} \geq 20\%A_{s,apoio}$$

φ Diámetro:	6 mm
A _{s,dist} :	0,32 cm ² /m
A _{s,adop} :	0,71
s:	0,400 m
s _{máx} :	0,300 m
A _{r,adat} :	0,94 cm ² /m
⊕ 6 // 0,3 m	

g) $A_{sy,dist}^-$

Armadura de canto y+

$$A_{s,canto} \geq \begin{cases} A_{s,max x} \\ A_{s,max y} \end{cases}$$

$$A_{s,canto} \geq 5,03 \text{ cm}^2/\text{m}$$

φ Diámetro:	8	n
1. (0,1,ly)	6	cm ² /m
A _{s,adop} :	8	cm ² /m
s:	10	
	12	
	16	
s _{máx} :	20	
-		

2. (0,2,ly)	2,51 cm ² /m
A _{s,adop} :	2,51 cm ² /m
s:	0,200 m
s _{máx} :	0,200 m
⊕ 8 // 0,2 m	

h) $A_{sx,dist}^-$

Armadura de canto x+

$$A_{s,canto} \geq \begin{cases} A_{s,max x} \\ A_{s,max y} \end{cases}$$

$$A_{s,canto} \geq 5,03 \text{ cm}^2/\text{m}$$

φ Diámetro:	8	n
1. (0,1,ly)	6	cm ² /m
A _{s,adop} :	8	cm ² /m
s:	10	
	12	
	16	
s _{máx} :	20	
⊕ 8 // 0,3 m		

2. (0,2,ly)	3,35 cm ² /m
A _{s,adop} :	3,35 cm ² /m
s:	0,15 m
s _{máx} :	0,15 m
⊕ 8 // 0,15 m	

i) $A_{sy,canto}^+$

j) $A_{sx,canto}^+$

Armadura de canto superior

$$A_{s,canto} \geq \begin{cases} A_{s,max x} \\ A_{s,max y} \end{cases}$$

$$A_{s,canto} \geq 5,03 \text{ cm}^2/\text{m}$$

φ Diámetro:	8 mm
s:	0,1 cm ² /m
⊕ 8 // 0,1 m	

k) $A_{s,canto}^-$

Figura 4.28 – Determinação das soluções a adotar para as diferentes zonas da laje

CAPÍTULO 4

As imagens que se seguem ilustram a verificação de segurança ao estado limite de fendilhação, deformação e limitação das tensões, respetivamente.

6. Controlo da fendilhação

Controlo da fendilhação

1. Cálculo dos esforços

Categoria: **A**
 ψ_2 : **0,3**

Combinação quase-permanente: $\sum_{j=1}^n G_{k,j} + "P" + \sum_{i=2}^n \psi_{2,i} Q_{k,i}$ **Ped= 8,6 kN/m²**

Os esforços obtidos serão segundo as tabelas de Montaya-Meseguer-Moran

m_{y+} [kN.m/m] = $0,001 \cdot q \cdot ly^2$, 56,091 **8,71 kN.m/m**
 m_{x+} [kN.m/m] = $0,001 \cdot q \cdot ly^2$, 42,638 **6,62 kN.m/m**

M_{cr} = **7,19 kN.m/m** Estado II (Fendilhado)

Ação	ψ_1	ψ_2	ψ_3
Sobrecarga em edifícios (ver a EN 1991-1-1)			
Categoria A: zonas de habitação	0,7	0,5	0,3
Categoria B: zonas de escritórios	0,7	0,5	0,3
Categoria C: zonas de reunião de pessoas	0,7	0,7	0,6
Categoria D: zonas comerciais	0,7	0,7	0,6
Categoria E: zonas de armazenamento	1,0	0,9	0,8
Categoria F: zonas de tráfego, peso dos veículos ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categoria G: zonas de tráfego, 30 kN < peso dos veículos ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Categoria H: coberturas	0	0	0
Ação da neve em edifícios (ver a EN 1991-1-3) ^{*)}			
- Finlândia, Islândia, Noruega, Suécia	0,70	0,50	0,20
- Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas a altitude $H > 1000$ m acima do nível do mar	0,70	0,50	0,20
- Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas a altitude $H \leq 1000$ m acima do nível do mar	0,50	0,20	0
Ação do vento em edifícios (ver a EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatura (excepto incêndio) em edifícios (ver a EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

NOTA: Os valores de ψ poderão ser definidos no Anexo Nacional.
 *) Para os países não mencionados, considerar as condições locais relevantes.

Valores recomendados para os coeficientes ψ

a) Cálculo dos esforços

2. Cálculo de tensões

(admitir que a secção está fendilhada - estado II, consider-se nestas c

ρ = **0,503**
 ξ = **0,320**
 σ_c = **7,017**
 σ_s = **227,763**

Posição do eixo neutro

$x = \xi \times d =$ **0,03 m**

$\sigma_c = C_c \frac{M_x}{bd^2} =$ **6,11 MPa** Considerar maior momento

$\sigma_s = C_s \frac{M_x}{bd^2} =$ **198,45 MPa** Considerar maior momento

b) Cálculo das extensões

4. Cálculo da extensão média relativa entre o aço e o betão

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_1 \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_s \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} =$ **0,000649**

d) Extensão média relativa entre o aço e betão

3. Cálculo da distância máxima entre fendas

$$h_{c,eff} = \min \left[2,5(h - d); \frac{(h - x)}{3}; \frac{h}{2} \right]$$

$h_{c,eff} =$ **0,036 m**

$\rho_{p,eff} =$ **0,0140**

$$s_{t,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$$

$s_{t,max} =$ **0,233 m**

c) Cálculo da distância máxima entre fendas

5. Cálculo do valor característico da abertura de fendas

$$w_k = s_{t,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$$

$w_k =$ **0,151422 mm** Verifica a segurança

e) Valor característico da abertura de fendas

Figura 4.29 – Estado limite de fendilhação

7. Controlo das deformações

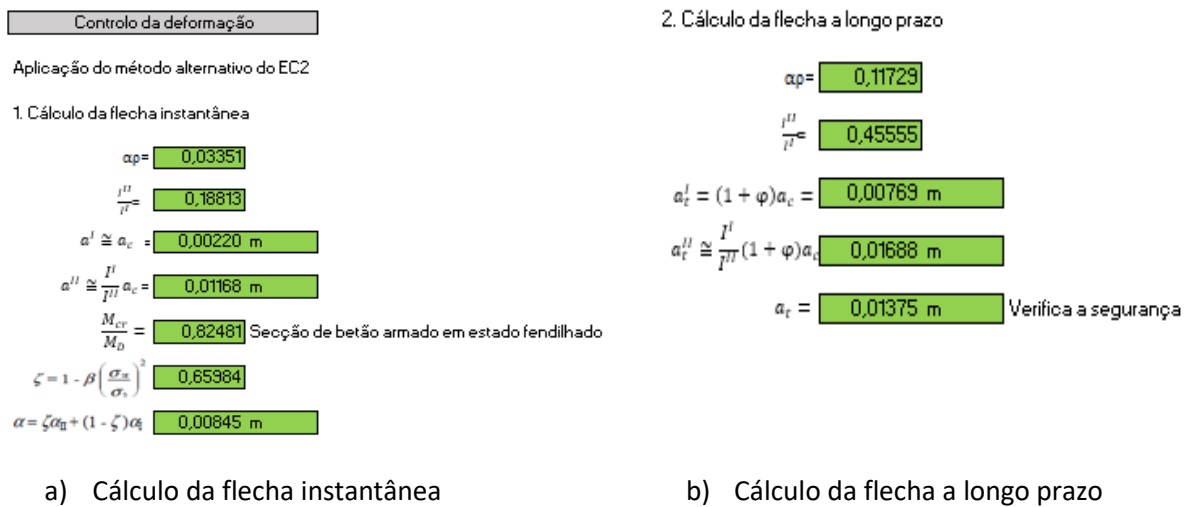


Figura 4.30 – Estado limite de deformação

8. Limitação de tensões

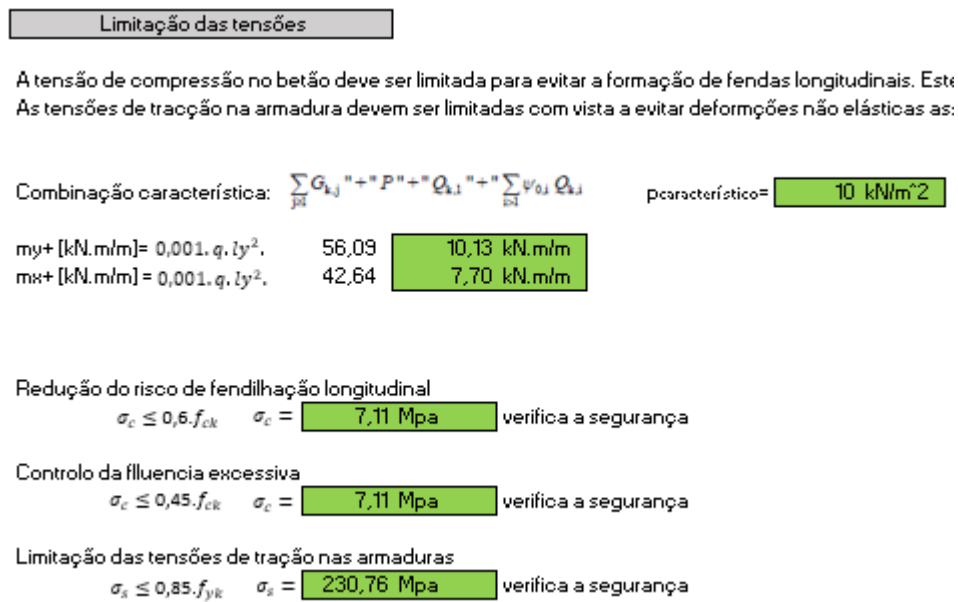


Figura 4.31 – Limitação de tensões

Todas as soluções determinadas estão de acordo com as soluções apresentadas na determinação manual do exemplo.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O recurso a esta ferramenta de dimensionamento é fulcral para atingir o objetivo pretendido. A geometria da laje e todas as soluções de armaduras determinadas para as diferentes zonas serão importados para o algoritmo desenvolvido em Dynamo que irá permitir a pormenorização automática das armaduras.

A folha de cálculo desenvolvida foi validada com um exemplo prático de uma laje simplesmente apoiada, recorrendo a tabelas e ábacos onde se comparou os resultados alcançados via manual e automática.

CAPÍTULO 5

AUTOMATIZAÇÃO DA MODELAÇÃO BIM DE ARMADURAS

O presente capítulo, dedicado à automatização da modelação BIM de armaduras, aborda o desenvolvimento de um algoritmo capaz de automatizar a modelação 3D de armaduras em lajes simplesmente apoiadas. Paralelamente, e como complemento ao objetivo proposto, apresenta-se um algoritmo idêntico para aplicar em lajes encastradas.

A pormenorização de lajes é um processo moroso e repetitivo que requer bastantes horas de trabalho por parte de desenhadores especializados ou até mesmo projetistas. Com o objetivo de aumentar a produtividade deste procedimento, foi programado um algoritmo para executar esta tarefa de uma forma automática. Esta abordagem traz vantagens a todo o processo de design, tornando o procedimento muito mais rápido, oferecendo um maior controlo por parte do Engenheiro e permitindo a este poupar tempo que poderá ser melhor aproveitado em tarefas mais importantes.

No enquadramento descrito, apresenta-se um fluxo de trabalho entre Robot – Excel – Dynamo – Revit. O utilizador terá que introduzir os inputs e as armaduras serão automaticamente pormenorizadas no modelo BIM. Para que tal seja possível, foi necessário programar rotinas em Dynamo capazes de recolher a informação desejada da folha de cálculo, processando-a com o objetivo de criar os modelos de armaduras que serão representados no Revit. Desta forma cria-se um fluxo de trabalho automático.

Uma das desvantagens da utilização desta metodologia prende-se com o investimento inicial em termos de tempo e trabalho para produzir o programa.

De forma a avaliar o algoritmo desenvolvido, decidiu-se criar algo mais exemplificativo e capaz de demonstrar tanto as funcionalidades do programa como garantir que é possível atingir os objetivos definidos, desenvolvendo o caso de estudo do capítulo anterior.

5.1 SOFTWARE DE MODELAÇÃO BIM DE ARMADURAS

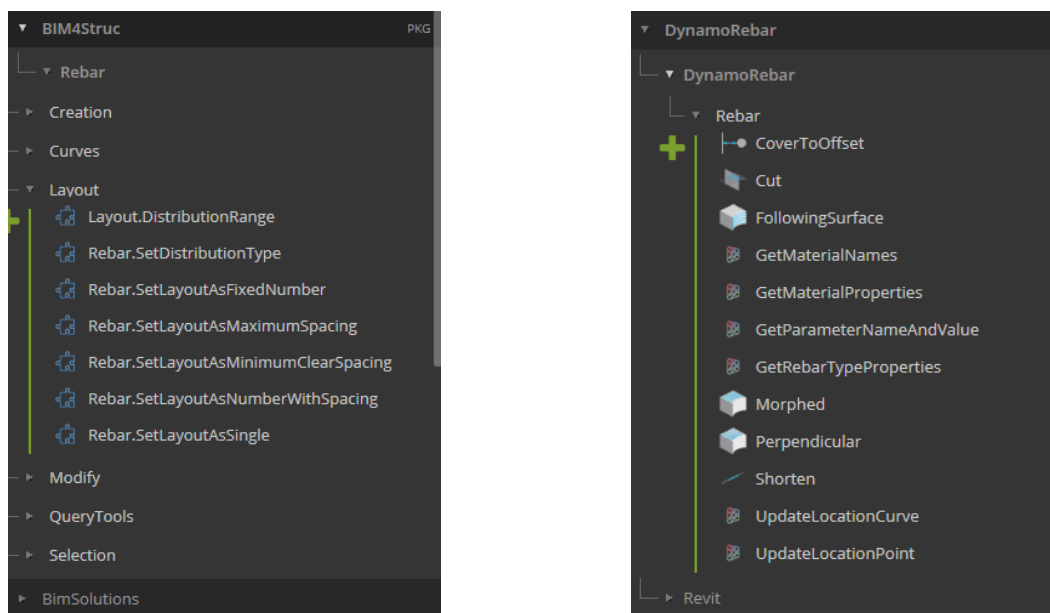
Logo após o conhecimento do tema da presente dissertação, iniciou-se uma pesquisa intensiva de todos os softwares de modelação digital 3D paramétrica que existem. O software escolhido para a automatização da modelação de armaduras foi o Dynamo, constituindo uma ferramenta de linguagem de programação visual disponibilizada como um plug-in para o Revit que permite automatizar tarefas repetitivas. O Dynamo irá fazer a ponte entre a ferramenta de cálculo desenvolvida e o Revit.

A experiência de utilização do Dynamo era nula, o que obrigou o autor a iniciar uma fase de aprendizagem através de tutoriais e da leitura de diversos artigos da autoria do Dieter Vermeulen na página *Revit beyond BIM*, e.g., *Rebar modelling in Revit with Dynamo for blended shapes* [30].

5.1.1 Pacotes do Dynamo utilizados

Para a realização deste trabalho foram utilizados dois pacotes: *Dynamo for rebar* desenvolvido pela *CORE studio* de Thornton Tomasetti e *Bim4Struc.Rebar* desenvolvido por Dieter Vermeulen, da Autodesk (Figura 5.1). A biblioteca destes pacotes contém um conjunto de nós que aumentam a produtividade na modelação de armaduras. Com a combinação destes dois tipos de pacotes é possível a criação de qualquer tipo de armaduras.

A ferramenta dá ainda a possibilidade de criar os seus próprios nós personalizados através da criação de *Custom Nodes*.



a) BIM4Struc

b) Dynamo for rebar

Figura 5.1 – Pacotes do Dynamo utilizados

5.2 PRODUÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS BIM DE ARMADURAS

No trabalho elaborado, foi desenvolvido um algoritmo composto por várias rotinas que está escrito de forma a atingir o objetivo previamente definido, i.e., a automatização da modelação 3D de armaduras no Revit. Para isso são introduzidas uma série de instruções específicas através da utilização de nós.

A utilização deste método garante que todos os elementos criados contêm na sua composição todas as informações relativas à geometria, material e comprimento ficando toda a informação retida no Revit. O código será guardado num ficheiro externo na extensão DYN.

O algoritmo desenvolvido está dividido em 6 partes principais como ilustrado na Figura 5.2.

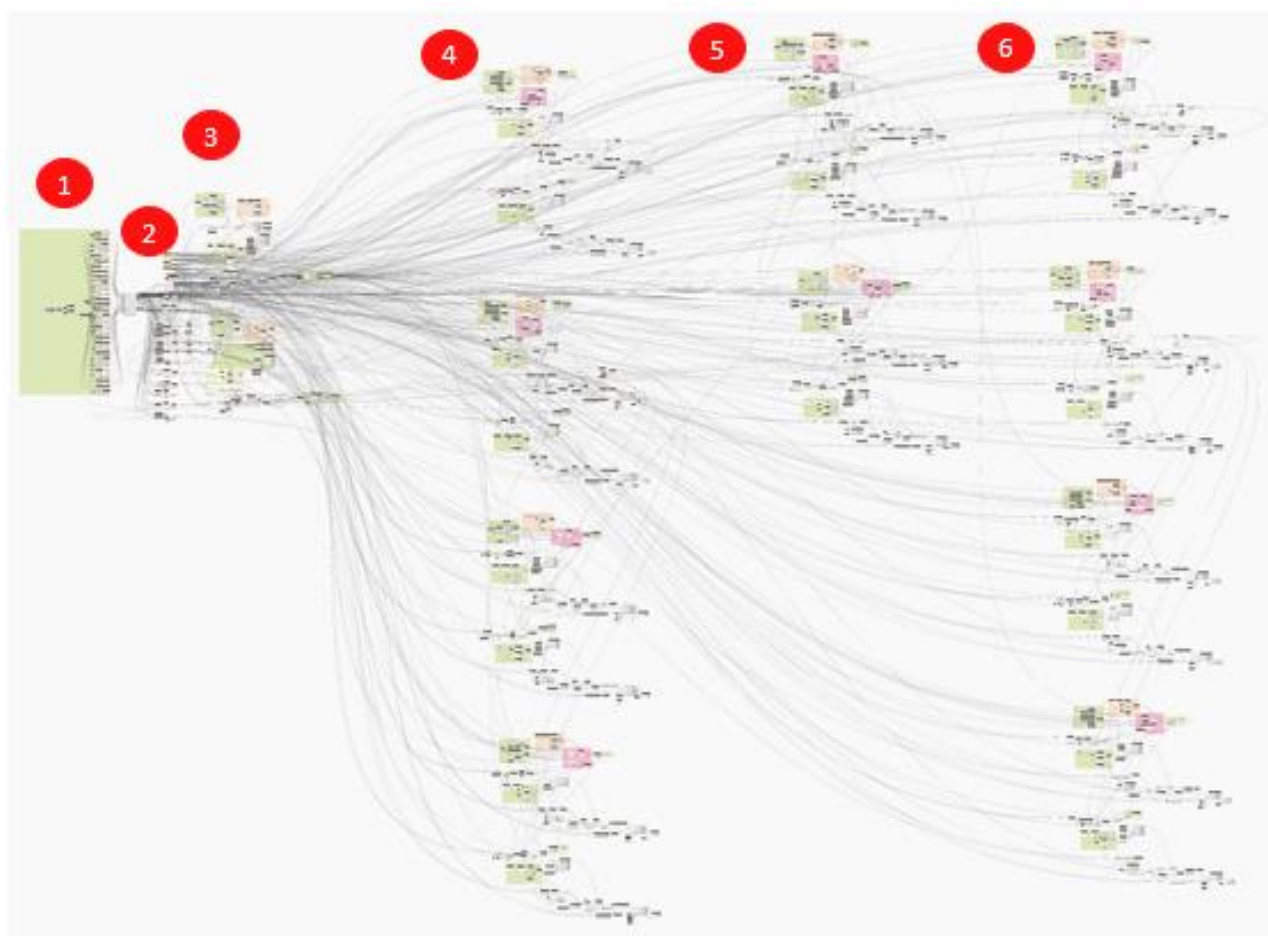


Figura 5.2 - Vista geral do algoritmo desenvolvido

- (1) Exportação dos parâmetros da folha de cálculo automática;
- (2) Inputs do Revit;
- (3) Criação das armaduras principais inferiores;
- (4) Criação das armaduras de canto inferiores;
- (5) Criação das armaduras de apoio;

CAPÍTULO 5

(6) Criação das armaduras de canto superiores.

Para a recolha de dados da folha de cálculo automática, foi utilizada a rotina para Dynamo conforme apresentado na Figura 5.3. A rotina irá procurar no ficheiro *xlsx*, selecionado pelo utilizador, a folha com o nome “*Dados Inputs*” que terá os valores que se pretende importar. Após a importação desses parâmetros é necessário passar por uma fase de tratamento de dados.

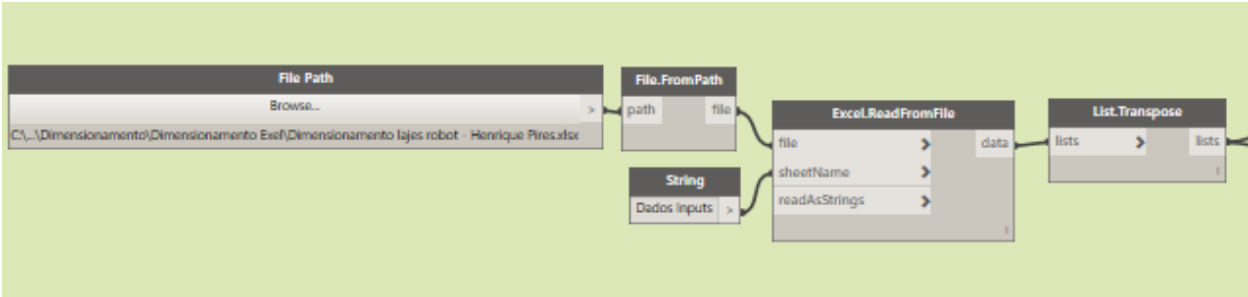


Figura 5.3 - Rotina em Dynamo para importação dos valores do Excel

De modo a controlar quais os dados que foram importados do Excel e de tornar o algoritmo “*user-friendly*”, foi criado um “*code block*” com todos os nomes associados aos parâmetros exportados conforme visível na Figura 5.4. Desta forma, o utilizador, poderá verificar os valores exportados mesmo antes de iniciar a modelação. É possível correr parte do algoritmo, congelando tudo o que está para a frente. O utilizador poderá ainda alterar estes dados se assim for necessário.

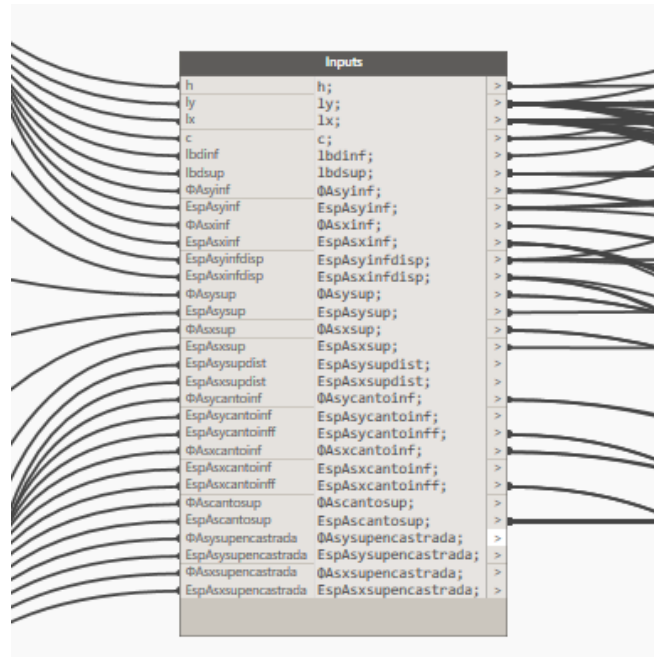


Figura 5.4 – Parâmetros exportados da folha de cálculo automática

O primeiro e único passo que o utilizador terá que definir serão os inputs associados à geometria da laje. São apenas quatro os inputs como é ilustrado na Figura 5.5. O utilizador terá que seleccionar o elemento no Revit que pretende modelar, a face inferior e os dois lados da laje (ly e lx).

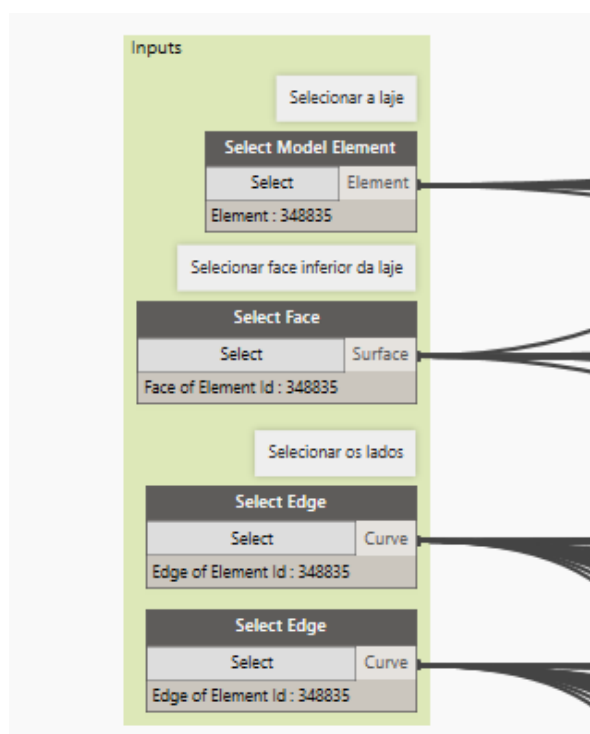


Figura 5.5 - Inputs associados à geometria da laje

Ao seleccionar os dois lados da laje será criada uma linha de referência na perpendicular à linha seleccionada que tem como objetivo representar o percurso das armaduras. Com a seleção da face inferior da laje é criada uma camada no Dynamo com as mesmas dimensões da laje que servirá de referência para a colocação das armaduras como representado a azul na Figura 5.6.

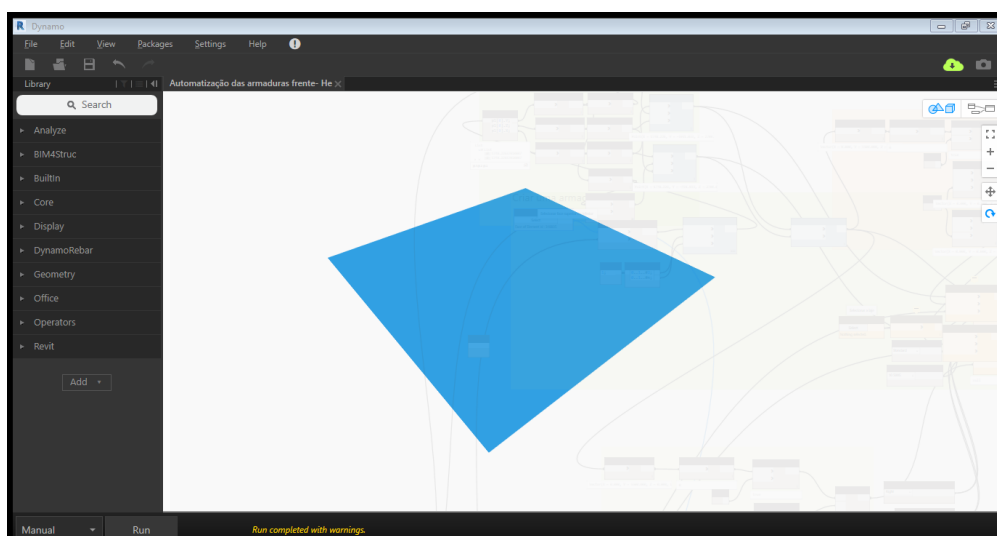


Figura 5.6 – Representação em Dynamo das camadas de referência

CAPÍTULO 5

Após a introdução dos inputs, serão definidos os pontos extremos na camada da laje através do nó *Surface.PointAtParameter* conforme representado na Figura 5.7.

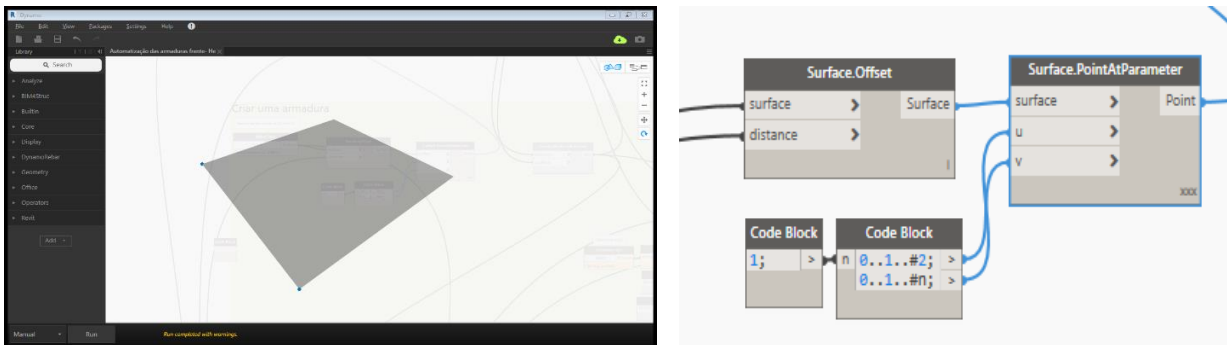


Figura 5.7 – Parte da rotina em Dynamo para definição dos pontos extremos da laje

Definidos os pontos extremos da laje é criada uma reta entre estes através do nó *StartPointEndPoint* (Figura 5.8).

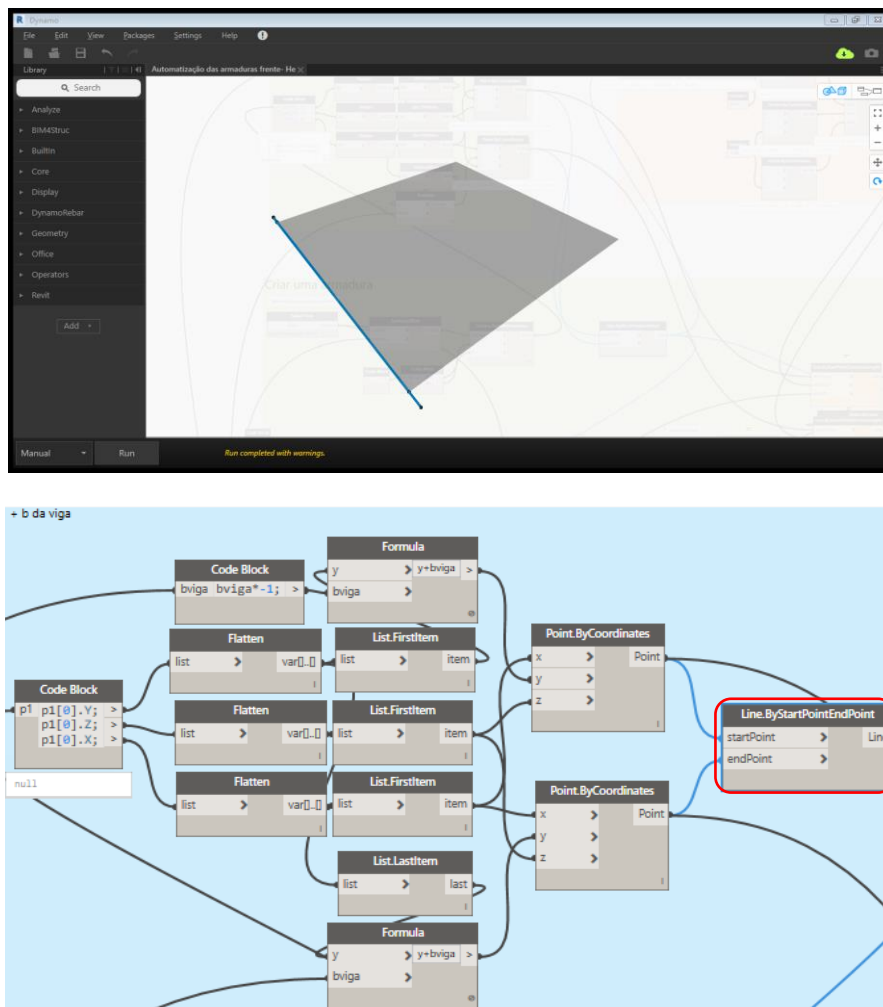


Figura 5.8 – Rotina em Dynamo para definição da linha entre os dois pontos extremos

Nos extremos desta reta serão definidas duas novas retas na perpendicular através do mesmo procedimento. Estas retas representarão o comprimento de amarração das armaduras, l_{bd} que poderá ser manipulado pelo utilizador. Através do nó *Curve.Join*, serão unidas, apresentando uma só linha.

O nó *Rebar.ByCurve* do pacote *Dynamo For Rebar* é usado para transformar a linha criada numa armadura, i.e., num objeto que será parametrizado, representativo de uma armadura (Figura 5.9). O nó terá como dados de entrada além da linha, o id da laje conseguido através do input inicial e o diâmetro da armadura. O vetor representa a direção na qual a armadura será distribuída. A partir deste nó é possível definir qualquer forma de armadura e adiciona-la às definições do Revit.

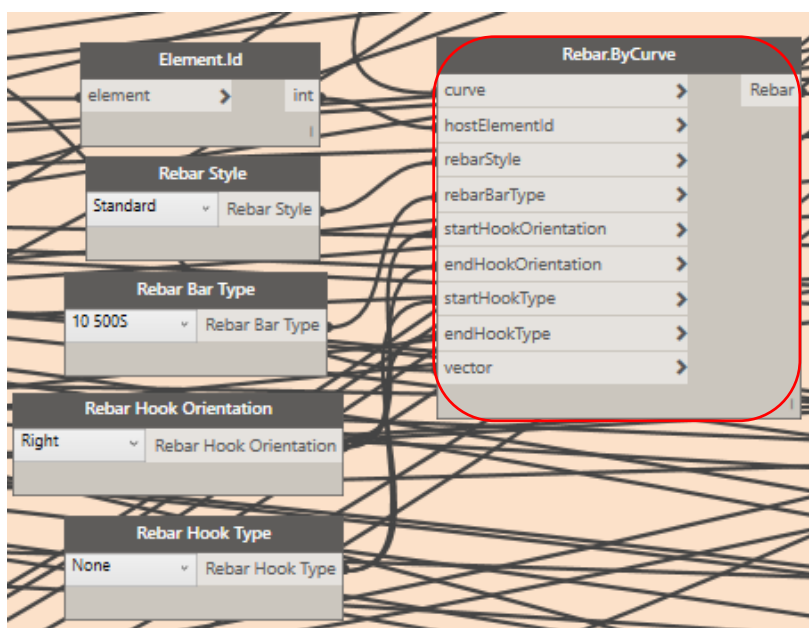


Figura 5.9 – Nó *Rebar.ByCurve* do pacote *Dynamo for rebar*

É necessário agora definir as zonas de distribuição e, para isso, é utilizado o nó *Layout.DistributionRange* do pacote *BIM4Struc.Rebar* (Figura 5.10). A curva de distribuição definida como input nos parâmetros iniciais é dividida em diferentes zonas de acordo com as disposições construtivas indicadas no ponto 3.3.4.2 para lajes simplesmente apoiadas.

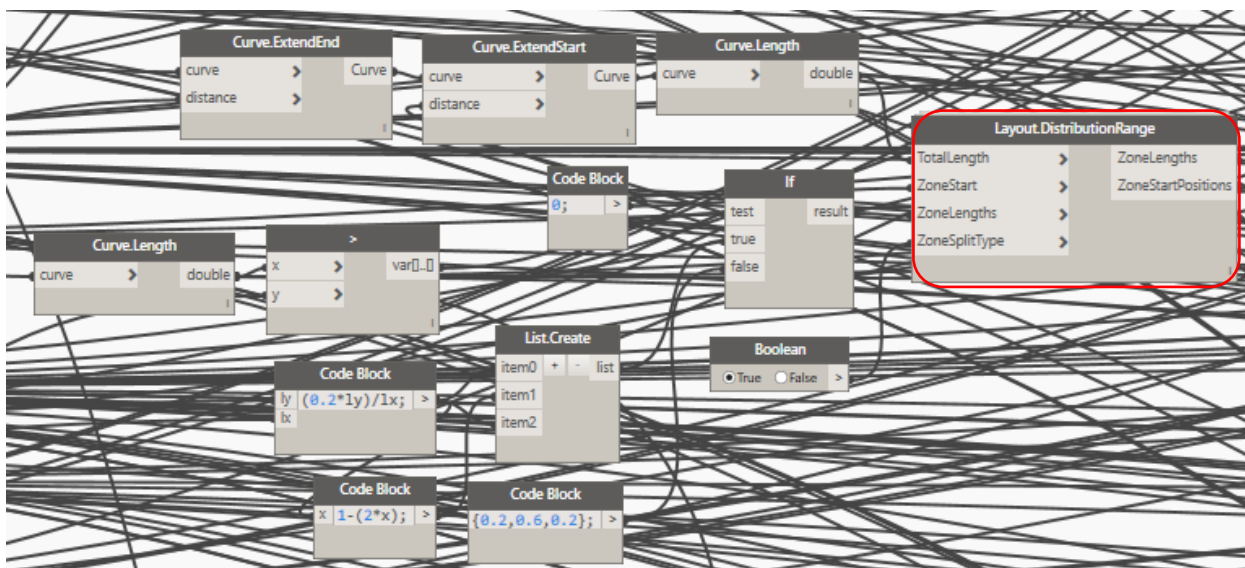


Figura 5.10 – Definição das zonas de distribuição

O espaçamento das armaduras principais inferiores é definido no nó *Rebar.SetLayoutAsMaximumSpacing* do pacote *BIM4Struc.Rebar* através da rotina apresentada na Figura 5.11. A curva de distribuição, a armadura de referência bem como o espaçamento definido na folha de dimensionamento serão dados de entrada no nó. Neste caso as opções “*IncludeFirstBar*” e “*IncludeLastBar*” estão definidas como “*False*” para evitar varões sobrepostos.

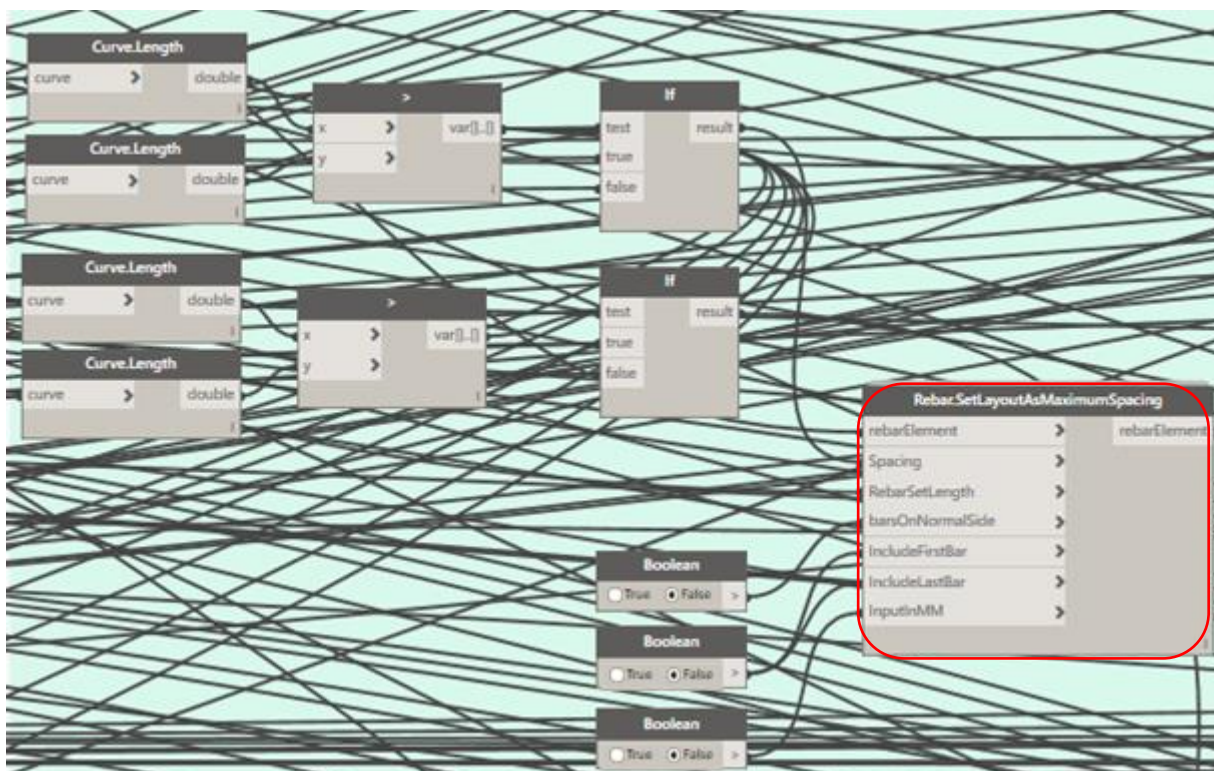


Figura 5.11 - Definição dos espaçamentos das armaduras principais inferiores

No caso das armaduras de apoio e das armaduras de canto o algoritmo calcula automaticamente a quantidade de varões que é necessária para garantir a segurança nas diferentes zonas. O nó *Rebar.SetLayoutAsNumberWithSpacing* do pacote *BIM4Struc.Rebar* irá receber esta informação bem como o espaçamento entre os varões e dispor as armaduras na laje conforme calculado na folha de dimensionamento (Figura 5.12).

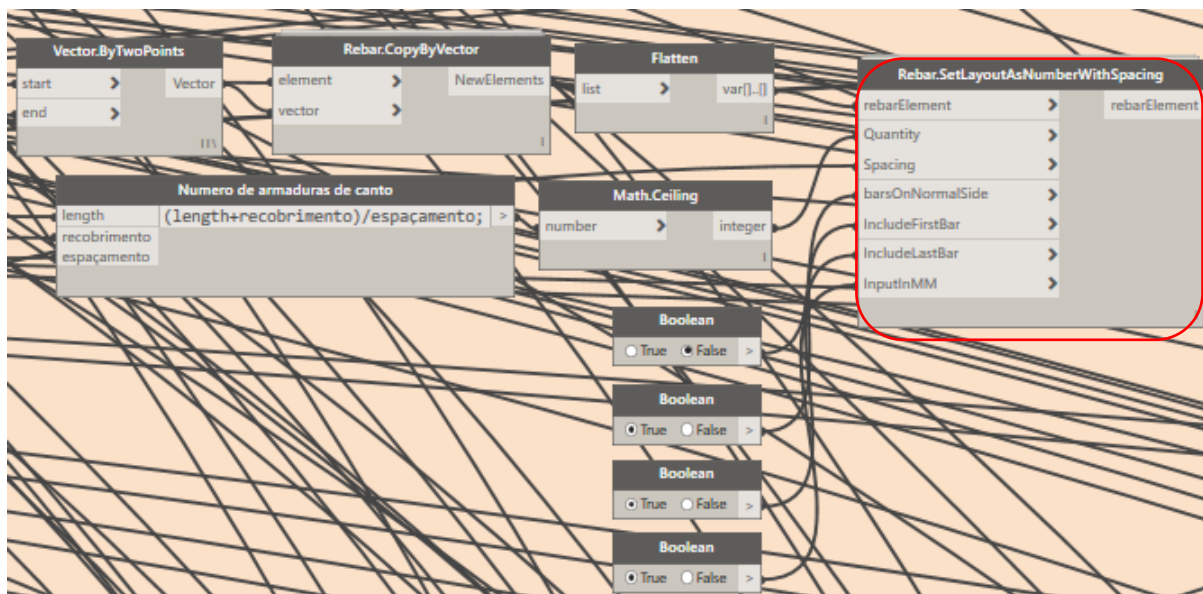


Figura 5.12 – Rotina em Dynamo para definição dos espaçamentos das armaduras de apoio e de canto

O nó *Rebar.SetSolidInView* do pacote *Dynamo For Rebar* permite configurar a representação das armaduras no Revit. A rotina do Dynamo ilustrada na Figura 5.13 possibilita a visualização das armaduras como elementos sólidos na vista 3D. O utilizador poderá seleccionar a vista pretendida no nó *Views*.

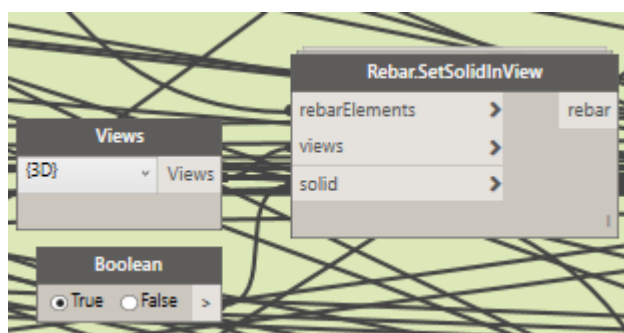


Figura 5.13 – Rotina em Dynamo para configurar a visualização das armaduras

Paralelamente, e como complemento ao objetivo proposto, foi elaborado um algoritmo para automatizar a modelação de armaduras em lajes encastradas nos quatro bordos. O algoritmo desenvolvido, é muito idêntico ao adotado para as lajes simplesmente apoiadas.

Este algoritmo tem a limitação de só pormenorizar as armaduras principais inferiores. A justificação para essa limitação deve-se ao tempo reduzido para a realização do presente relatório.

O algoritmo desenvolvido está dividido em 6 partes principais como ilustrado na Figura 5.14.

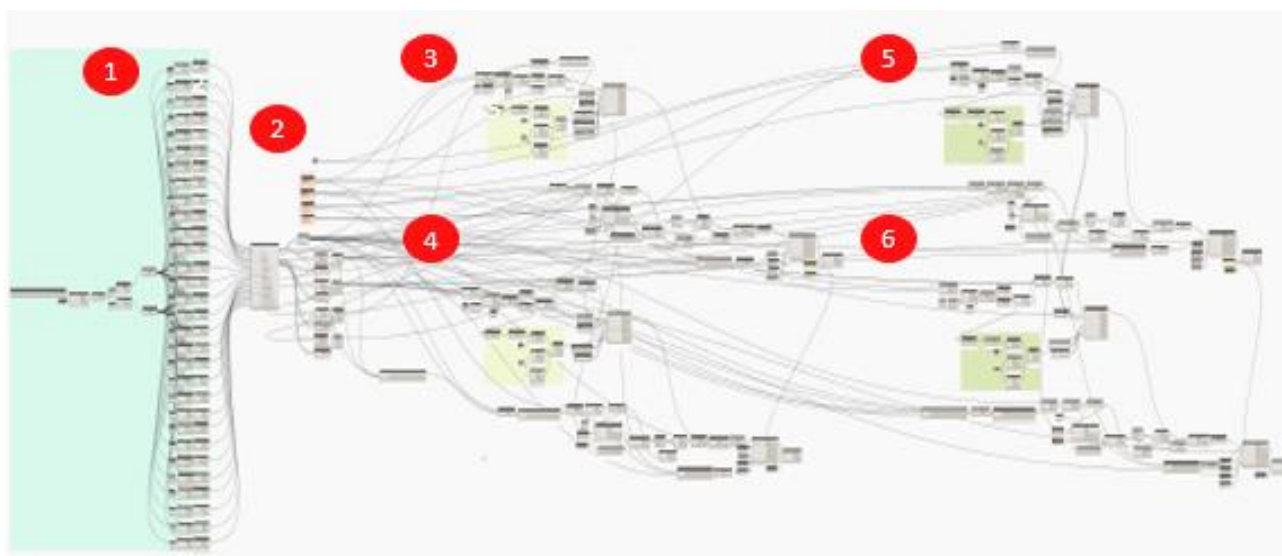


Figura 5.14 - Algoritmo desenvolvido para automatização da modelação de armaduras em lajes encastradas

- (1) Exportação dos parâmetros da folha de cálculo automática;
- (2) Inputs do Revit;
- (3) Criação das armaduras principais inferiores A_{sx} ou A_{sy} ;
- (4) Criação das armaduras na zona de reforço;
- (5) Criação das armaduras principais inferiores A_{sx} ou A_{sy} ;
- (6) Criação das armaduras na zona de reforço.

Recorrendo à automatização da modelação de armaduras no Revit, através do algoritmo desenvolvido, o tempo necessário para obter a pormenorização das armaduras na laje está dependente do tempo que o programa demora a processar toda a informação.

De forma a avaliar e a testar o algoritmo, foi explorado o exemplo da laje simplesmente apoiada do capítulo 4. Na Figura 5.15 estão representados os modelos 3D de armaduras gerados no Revit em diferentes perspetivas.

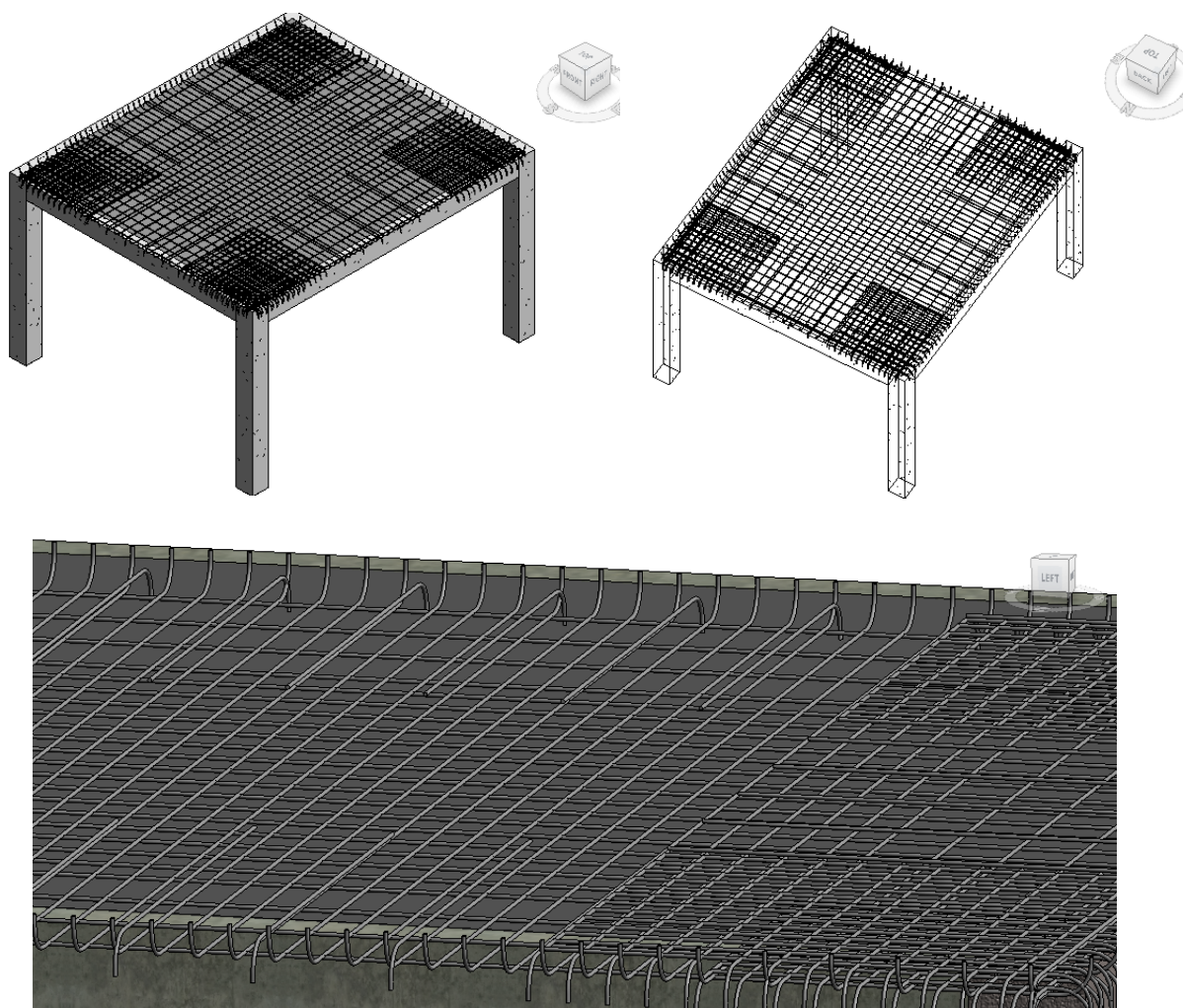


Figura 5.15 – Representação da modelação de armaduras na laje – Dynamo/Revit

5.3 MAPAS DE QUANTIDADES

Uma das vantagens do uso desta metodologia é a capacidade de se poder extrair diversos tipos de informação do modelo. O projetista pode apresentar de um modo fácil e correto, os mapas de quantidade bem como peças desenhadas.

Em relação ao caso de estudo, foi realizado a extração de informação do modelo BIM, de forma a obter mapas de quantidades de volume de betão e quantidade de armaduras.

Assim, o volume total de betão da laje obtido do Revit é igual a $2,975 m^3$.

Relativamente ao mapa de armaduras, obteve-se uma tabela onde se apresenta o comprimento total de varões por diâmetro bem como a sua massa (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Tabela de armaduras

Diâmetro [mm]	Comprimento [m]	Massa [kg]
6	63,878	170,275
8	398,601	1730,78
Total	462,479	1901,01

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES

A programação de algoritmos que auxiliem o engenheiro projetista irá ter sempre um grau de dificuldade elevado, principalmente se pretender alcançar um nível de modelação com qualidade e que corresponda à realidade.

A metodologia proposta neste trabalho, teve por base a criação de uma folha de cálculo automático que permite o dimensionamento da laje e posteriormente o desenvolvimento de um algoritmo em Dynamo para criação das armaduras. Desta forma, foi possível criar um fluxo de trabalho automático para a modelação de armaduras em lajes, respondendo ao objetivo inicial.

Devido à grande limitação nas ferramentas para a automatização de soluções de armaduras, pode-se considerar que os resultados alcançados são bastante proveitosos como se pode verificar no caso de estudo apresentado. Uma das desvantagens da utilização desta metodologia prende-se com o investimento inicial em termos de tempo e trabalho para produzir o algoritmo que está sujeito a dezenas de variáveis e iterações. São evidentes as vantagens relativamente ao método tradicional, nomeadamente no tempo ganho pelo projetista. Os resultados alcançados, com a utilização desta metodologia permite um maior controlo por parte do utilizador bem como uma maior transparência de todo o processo. O tempo que o programa demora a correr e a modelar as armaduras no Revit ainda que seja lento é muito mais rápido comparativamente com o método tradicional. A produção de documentos de medição extraída possui um nível de qualidade bastante bom.

A facilidade de utilização das ferramentas desenvolvidas, torna-as acessíveis a todos, o que permite estender a sua utilização não só a projetistas, mas também a desenhadores especializados. A possibilidade da introdução manual de todas as soluções de armaduras para as diferentes zonas da laje é um exemplo da fácil utilização da ferramenta.

Com a realização deste trabalho verificou-se que através da introdução da programação é possível desenvolver algoritmos que permitem ao projetista criar as suas próprias metodologias de trabalho.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Este trabalho abordou e permitiu a implementação de uma metodologia para automatizar a modelação BIM de armaduras no projeto de estruturas. Apesar de concretizados os objetivos propostos ainda há vários desenvolvimentos futuros que poderiam ser levados a cabo no seguimento desta dissertação:

- Alargar as funcionalidades da folha de cálculo para permitir o dimensionamento tanto de elementos isolados como de elementos com continuidade;
- Criação de um algoritmo em Dynamo com capacidade para modelar diferentes tipos de laje, não estando limitado somente a lajes retangulares;
- Testar a produção automática de desenhos no Revit;
- Otimizar o algoritmo reduzindo o numero de nós o que irá tornar o processo muito mais rápido;
- Criação de um *custom node* onde será introduzido todo o algoritmo ficando apenas as informações relativas aos inputs visíveis, tornando a interface com o utilizador mais intuitiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BIM IS MORE. N.º1 (2016) - Porto : Editorial Director, 2016- . ISSN 2183-7473
- [2] Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241-252.
- [3] Ferraz, M., and Morais, R. (2012). O conceito BIM e a especificação IFC na indústria da construção e em particular na indústria de pré-fabricação em betão. Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [4] Dispenza, K. (2010). The Daily Life of Building Information Modeling (BIM) Retrieved 24/05/2013, 2013. Disponível em: <http://buildipedia.com/aec-pros/design-news/the-daily-life-of-building-information-modeling-bim>
- [5] SOUSA, Raúl Filipe - Adaptação do programa PAC-Pórticos ao EC2 e sua integração com o conceito BIM. Porto : 2015. Tese de Mestrado
- [6] Ferreira, B., Lima, J., Rio, J. & Martins, J.P. (2012). Integração da Tecnologia BIM no Projeto de Estruturas de Betão. Encontro Nacional de BETÃO ESTRUTURAL - BE2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [7] Oliveira, A. F. (2000). Exemplos de referência para o cálculo de estruturas porticadas em betão armado. Braga, Portugal.
- [8] Liu, Y., and Li, S. (2013). Research on Virtual Construction in the Construction Phase and Its 4D LOD Analysis ICCREM 2013 (pp. 289-297).
- [9] Lino, J. C., Azenha, M. and Lourenço, P. (2012). Integração da Metodologia BIM na Engenharia de Estruturas. Encontro Nacional de BETÃO ESTRUTURAL - BE2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [10] Oliveira, Alisson – BIM e os níveis de desenvolvimento [HTML]. Disponível em <http://bimexperts.com.br/bim-e-os-niveis-de-desenvolvimento/>

- [11] Münch, José Ricardo – Nível de Desenvolvimento de Modelos BIM - LoD [HTML]. Disponível em <https://pt.linkedin.com/pulse/n%C3%ADvel-de-desenvolvimento-modelos-bim-lod-jos%C3%A9-ricardo-m%C3%BCnch>
- [12] Gonçalves, Ismael Filipe do Vale – Aplicação do BIM ao projeto de estruturas: Abordagem de programação ao processo de pormenorização de vigas de betão armado. Viana do Castelo : 2014. Dissertação de Mestrado
- [13] Azenha, M. Â., Lino, J. C., Caires, B., & Couto, J. P. (2013). Building Information Modeling: Conceção, Projeto e Construção. Guimarães, Braga, Portugal.
- [14] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). BIM Handbook. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [15] Penalva, Adônis – o que é DESIGN PARAMÉTRICO e por que você deve aprender sobre isso [HTML]. Disponível em <https://carreiradearquitecto.com/2017/02/08/o-que-e-design-parametrico-e-porque-voce-deve-aprender-sobre-isso/>
- [16] NP EN 1991-1-1 2009, Eurocódigo 1 – Ações em estruturas: Parte 1-1 : Ações gerais, pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios. Portugal : IPQ
- [17] Laboratório Nacional de Engenharia Civil [HTML]. Disponível em <http://www.lnec.pt/pt/servicos/normalizacao-e-regulamentacao/normalizacao/ct-115-eurocodigos-estruturais/#se>
- [18] Newton - Consultores de Engenharia, 2017. Disponível em <http://www.newton.pt/pt/software-empresas/calculo-estruturas.aspx>
- [19] MICROSOLRESOURCES. Disponível em <https://www.autodesk.com/products/advance-steel/features>
- [20] Félix, Carlos, Guedes, Paulo and Neves, Tiago. Apontamentos de apoio às aulas de Betão Armado - Disposições Construtivas Relativas a Elementos Estruturais
- [21] Espíndola, Evandro Camarini – A importância do Modelagem de Objetos no Desenvolvimento de Sistemas [HTML]. Disponível em <http://www.linhadecodigo.com.br/artigo/1293/a-importancia-do-modelagem-de-objetos-no-desenvolvimento-de-sistemas.aspx>
- [22] G2 Crowd - Best Building Design and BIM. Disponível em <https://www.g2crowd.com/categories/building-design-and-building-information-modeling-bim>
- [23] Appleton, Júlio. Apontamentos de apoio às aulas de Betão Armado – Estruturas de Betão I.2012 [PDF]. Disponível em <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/bape1/documents/Cap9.7-15Outubro2012.pdf>

- [24] Fudala, Tomasz – Free Form Rebar Distribution in Revit 2018.1 [HTML]. Disponível em <http://blogs.autodesk.com/bim-and-beam/2017/07/12/free-form-rebar-distribution-in-revit-2018-1/>
- [25] Estupe Engineering Solutions, 2007. Disponível em <http://estupeengineeringsolutions.blogspot.pt/2010/12/robot-structural-analysis-novidades.html>
- [26] Tekla - Modelagem para maior eficiência na produção e montagem de armaduras [HTML]. Disponível em <https://www.tekla.com/br/solucoes/fabricantes-de-armaduras>
- [27] Yang, Sheryl – Dynamo and Computational BIM – Part 2: Practical Uses [HTML]. Disponível em <http://the360view.typepad.com/blog/2015/02/dynamo-and-computational-bim-part-2-practical-uses.html>
- [28] Core studio|Thornton Tomasetti, 2017. Disponível em <http://core.thorntontomasetti.com/dynamo-for-rebar/>
- [29] FERNANDES, João Pedro Miranda – Produção Automática de Modelos BIM de Armaduras de Betão Armado – Pormenorização e Medição. Porto : 2016. Tese de Mestrado
- [30] Vermeulen, Dieter – Rebar modelling in Revit with Dynamo – use case by ABT [HTML]. Disponível em <http://autodesk.typepad.com/bimtoolbox/2015/10/rebar-modelling-in-revit-with-dynamo-use-case-by-abt.html>
- [31] NP EN 1992-1-1 2010, Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão: Parte 1-1 : Regras gerais e regras para edifícios. Portugal: IPQ
- [32] Appleton, Júlio – Estruturas de Betão: Volume 1. Orizon : Alfragide, 2013. ISBN 978-972-8620-21-9.
- [33] Costa, António. Apontamentos de apoio às aulas de betão armado; Vol. Estruturas de betão II. 2013
- [34] NP EN 1990 2009, Eurocódigo 0 – Bases para o projeto de estruturas. Portugal : IPQ
- [35] Costa, António. Apontamentos de apoio às aulas de betão armado; Vol. Estruturas de betão I. 2013
- [36] SOUSA, Raúl Filipe - Adaptação do programa PAC-Pórticos ao EC2 e sua integração com o conceito BIM. Porto : 2015. Tese de Mestrado