



Dissertação de Mestrado para a obtenção do Grau de Mestre

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Análise comparativa entre dois Softwares de Cálculo Estrutural

Leandro Jorge Dionísio Sebastião

Instituto Politécnico de Leiria – Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Leiria, setembro de 2019



Dissertação de Mestrado para a obtenção do Grau de Mestre

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Análise comparativa entre dois Softwares de Cálculo Estrutural

Leandro Jorge Dionísio Sebastião

Dissertação de Mestrado sob a orientação do Doutor Hugo Rodrigues, Professor
Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

Instituto Politécnico de Leiria – Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Leiria, setembro de 2019

DEDICATÓRIA

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

A execução deste trabalho não teria sido possível sem a ajuda da minha família, amigos e professores. Não sendo possível incluir tantos nomes em tão pouco espaço, deixarei aqueles que, de alguma forma, estiveram mais presentes.

- Agradeço à minha família, que sempre me apoiou. Sou um sortudo por poder contar convosco, a todos os níveis.
- Aos meus amigos e colegas de curso que me acompanharam durante todo, ou parte do percurso.
- Aos meus professores, desde a escola primária até à universidade. Obrigado por me terem dado as bases necessárias para que pudesse chegar onde cheguei. Em especial ao meu Orientador Hugo Rodrigues, que, com muita paciência e disponibilidade me acompanhou.

Por fim, e não menos importante, agradeço a mim mesmo por, mesmo quando as coisas pareciam mais complicadas, nunca ter desistido.

Muito obrigado!

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo a comparação de dois softwares muito conhecidos no mercado português, o *Robot Structural Analysis* e o Tricalc, programas de cálculo automático.

Foi feita a conceção estrutural de uma moradia unifamiliar, tendo sido modelada de forma semelhante dentro do que os dois programas permitiam, com as mesmas cargas e secções.

Apesar das diferenças entre os dois programas, tanto na modelação como na forma como distribuíam as cargas, observou-se que no caso das lajes a diferença não foi significativa, apesar do Tricalc utilizar o método de grelha e o Robot utilizar o método de elementos finitos. No entanto, para as vigas, pilares, muro de suporte de terras e sapatas, a diferença nos esforços já foi mais significativa, implicando até mesmo reforços diferentes nas vigas e pilares.

Outra diferença que se verificou foi a diferença nas frequências para os modos de vibração. Apesar do primeiro modo de vibração ser muito semelhante, o Tricalc apresenta frequências muito superiores às do Robot a partir do terceiro modo.

A nível de desenhos das armaduras, o Tricalc apresenta desenhos com qualidade. No entanto, os comprimentos de amarração são muito generalizados, não seguindo exatamente o proposto pela norma do Eurocódigo 2.

Palavras chave: Projeto de Estrutura, Software de Cálculo, Modelação, Robot, Tricalc;

ABSTRACT

The objective of this dissertation is to compare two well known softwares in the portuguese market, *Robot Structural Analysis* and Tricalc, automatic calculation programs.

The structural conception of a family house was made, having been similarly modeled within what the two programs allowed, with the same loads and sections considered.

Despite the differences between the two programs, both in the modeling and the way they consider the loads distribution, it was observed that in the case of slabs the difference was not significant, although Tricalc uses the grid method and Robot uses the finite element method. However, for the beams, columns, earth wall and the foundations, the difference in efforts has already been more significant, even implying different reinforcements in the beams and columns.

Another difference was in the frequencies of the vibration modes. Although the first vibration mode is very similar, Tricalc has frequencies much higher than Robot from the third mode.

In terms of reinforcement designs, Tricalc features quality designs. However, the mooring lengths are very vague, not following the Eurocode 2 standard.

Keywords: Structure Design, Calculating software, Modeling, Robot, Tricalc;

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
1 – Introdução	13
1.1 – Introdução ao Tema	13
1.2 – Objetivos	13
1.3 – Organização do documento	13
2 - Softwares de Análise Estrutural	15
2.1 – Robot Structural Analysis Professional	15
2.2 – Tricalc	17
2.3 – CYPECAD	17
2.4 – SAP2000	18
2.5 – Comentários finais	18
3 - Caso de Estudo.....	19
3.1 - Introdução	19
3.2 – Dados de Projeto	20
3.3 – Conceção Estrutural	20
3.4 – Pré-dimensionamento	24
3.4.1 – Lajes	25
3.4.2 – Vigas	25
3.4.3 – Pilares e Muro de Cave	26
3.5 – Definição das cargas	26
3.5.1 – Peso Próprio dos elementos estruturais	27
3.5.2 – Peso Próprio dos revestimentos	27
3.5.3 – Impulso de Terras e água	28
3.5.4 – Escadas	31
3.5.5 – Sobrecargas	31
3.5.6 – Sismo	33
3.5.7 – Vento	38
3.6 – Combinações	48
4 – Hipóteses de Modelação Estrutural consideradas	51
4.1 – Introdução	51
4.2 – Robot Structural	51
4.3- Tricalc	62
5 - Comparação entre Resultados.....	72

5.1 – Introdução	73
5.2 - Lajes	73
5.2.1 – Deslocamentos verticais	74
5.2.2 – Esforços	75
5.2.3 – Dimensionamento	83
5.3 – Pórticos	84
5.3.1 – Deformação	84
5.3.2 – Esforços	85
5.3.3 – Dimensionamento	87
5.4 – Pilares	88
5.4.1 – Deslocamento relativo entre pisos	88
5.4.2 – Esforços	91
5.4.3 – Dimensionamento	95
6.5 – Muro de Suporte de Terras	96
5.5.1 - Esforços	97
5.5.2 – Dimensionamento	101
5.6 – Fundações	102
5.6.1 – Esforços	102
5.6.2 – Dimensionamento	104
5.7 – Modos de Vibração	105
6 – Conclusões	113
7 – REFERÊNCIAS	115
ANEXO I	117
Planta Estrutural da Laje da Cobertura	117
ANEXO II	118
Pórtico dimensionado pelo Tricalc	118
ANEXO III	119
Pórtico dimensionado à mão	119
ANEXO IV	120
Pilar dimensionado pelo Tricalc	120
ANEXO V	121
Pilar dimensionado pelo à mão	121
ANEXO VI	122
Muro de Suporte de Terras dimensionado pelo Tricalc	122
ANEXO VII	123
Muro de Suporte de Terras dimensionado à mão	123
ANEXO VIII	124
Sapata dimensionado pelo Tricalc e à mão	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Templates do Robot.....	16
Figura 2 - Modelo 3D da moradia caso estudo [9].....	19
Figura 3 – Planta de Fundações.....	21
Figura 4 - Planta do Teto da Cave.....	22
Figura 5 – Planta do Teto do R/C.....	22
Figura 6 – Planta do Teto do 1º andar.....	23
Figura 7 - Espectro de Cálculo Sismo tipo 1.....	37
Figura 8 - Espectro de Cálculo Sismo Tipo 2.....	37
Figura 9 – Forma do diagrama de pressão do vento [15].....	42
Figura 10 - Zonas de Pressão [17].....	43
Figura 11 - Pressões positivas e negativas [17].....	44
Figura 12 - Tipo de cobertura em terraço [17].....	45
Figura 13 – Zonas de pressão na cobertura [17].....	46
Figura 14 - Definição dos eixos no Robot.....	52
Figura 15 - Definição dos eixos no Robot.....	53
Figura 16 - Desenho das barras (Vigas ou Pilares).....	53
Figura 17 - Definição da espessura do painel (laje ou muro).....	54
Figura 18 - Colocação do painel no modelo (laje ou muro).....	55
Figura 19 - Definição do espaçamento da malha de elementos finitos.....	55
Figura 20 - Modelação Final no Robot.....	56
Figura 21 - Definição de carga vento.....	57
Figura 22 - Definição de uma carga permanente (Revestimento do Piso).....	57
Figura 23 - Definição da carga das Paredes Exteriores.....	58
Figura 24 - Impulso de Terras no MST.....	58
Figura 25 - Definição dos modos de vibração.....	59
Figura 26 - Definição das cargas que fazem parte da massa.....	60
Figura 27 - Definição da excentricidade da massa.....	61
Figura 28 - Combinação manual para o sismo.....	62
Figura 29 - Introdução dos nós.....	63
Figura 30 - Translação dos nós.....	63
Figura 31 - Definição de lajes.....	64
Figura 32 - Introdução dos Muros de Cave.....	65
Figura 33 - Definição de Impulsos no Tricalc.....	66

Figura 34 - Fichas com armadura estabelecida para vigas.....	67
Figura 35 - Caixa de erros Tricalc.....	67
Figura 36 - Definição de cargas no tricalc.....	68
Figura 37 - Definição do sismo no Tricalc.....	69
Figura 38 - Definição do vento no tricalc.....	69
Figura 39 - Pressão dinâmica do pico no tricalc.....	70
Figura 40 - Caixa de erros geométricos Tricalc.....	70
Figura 41 - Modelo 3D Tricalc.....	71
Figura 42 – Deslocamento vertical na laje da cobertura Robot (cm).....	74
Figura 43 – Deslocamento vertical na laje da cobertura Tricalc (cm).....	75
Figura 44 - Momentos direção x na laje da cobertura Robot (kNm/m).....	77
Figura 45 - Momentos direção x na laje da cobertura Tricalc (kNm/m).....	77
Figura 46 - Momentos direção y na laje da cobertura Robot (kNm/m).....	79
Figura 47 - Momentos direção y na laje da cobertura Ttricalc (kNm/m).....	79
Figura 48 - Esforço Transverso direção x na laje da cobertura Robot (kN/m).....	81
Figura 49 - Esforço Transverso direção x na laje da cobertura Tricalc (kN/m).....	81
Figura 50 - Esforço Transverso direção y na laje da cobertura Robot (kN/m).....	82
Figura 51 - Esforço Transverso direção y na laje da cobertura Tricalc (kN/m).....	83
Figura 52 - Deformações no Pórtico 1 Robot (cm).....	84
Figura 53 - Deformações no Pórtico 1 Tricalc (cm).....	85
Figura 54 - Diagramas de momentos fletores Robot (kNm).....	86
Figura 55 - Diagramas de momentos fletores Tricalc (kNm).....	86
Figura 56 - Diagrama de esforço transverso Robot (kN).....	87
Figura 57 - Diagrama de esforço transverso Tricalc (kN).....	87
Figura 58 - Deformação do pilar para a combinação quadrática completa Robot (cm).....	89
Figura 59 – Deformação do pilar para os cinco modos de vibração Tricalc (cm).....	90
Figura 60 - Esforço axial pilar Robot (kN).....	91
Figura 61 - Esforço axial pilar Tricalc (kN).....	92
Figura 62 - Momentos fletor x em pilar Robot (kNm).....	93
Figura 63 – Momento fletor x em pilar Tricalc (kNm).....	93
Figura 64 - Momentos fletor y em pilar Robot (kNm).....	94
Figura 65 - Momentos fletor y em pilar Tricalc (kNm).....	94
Figura 66 - Esforço de membrana direção x muro Robot (kN/m).....	98
Figura 67 - Esforço de membrana direção y muro Robot (kN/m).....	98
Figura 68 - Momento fletor direção xx muro Robot (kNm/m).....	99

Figura 69 - Momento fletor direção yy muro Robot (kNm/m)	99
Figura 70 - Corte direção xx muro Robot (kNm/m)	100
Figura 71 - Corte direção yy muro Robot (kNm/m)	101
Figura 72 - Reações da sapata Robot (kN).....	103
Figura 73 - Reações da sapata Tricalc (kN).....	104
Figura 74 - Espectro elástico direção x.....	105
Figura 75 - Espectro de calculo direção x	106
Figura 76 - Deformada 1º modo Robot (Esc: 1:0.075 cm).....	107
Figura 77 - Deformada 1º modo Tricalc (S/esc)	107
Figura 78 - Deformada 2º modo Robot (Esc: 1:0.075 cm).....	108
Figura 79 - Deformada 2º modo Tricalc (S/esc)	108
Figura 80 - Deformada 3º modo Robot (Esc: 1:0.075 cm).....	109
Figura 81 - Deformada 3º modo Tricalc (S/esc)	109
Figura 82 - Deformada 4º modo Robot (Esc: 1:0.075 cm).....	110
Figura 83 - Deformada 4º modo Tricalc (S/esc)	110
Figura 84 - Deformada 5º modo Robot (Esc: 1:0.075 cm).....	111
Figura 85 - Deformada 5º modo Tricalc (S/esc)	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categoria de Utilização [19].....	31
Tabela 2 – Categoria de Utilização da cobertura [19].....	32
Tabela 3 – Sobrecarga a aplicar conforme a categoria dos pavimentos interiores [19]	32
Tabela 4 - Sobrecarga a aplicar conforme a categoria da cobertura [19]	33
Tabela 5 – Valores recomendados para o espectro de resposta elástica tipo 1 [2].....	34
Tabela 6 - Valores recomendados para o espectro de resposta elástica tipo 2 [2].....	34
Tabela 7 – Classes de Importância [2].....	35
Tabela 8 – Coeficiente conforme as Classes de Importância [2].....	35
Tabela 9 – Coeficiente de comportamento [2].....	36
Tabela 10 - Coeficientes de pressão exterior [20]	43
Tabela 11 - Pressões obtidas para o Alçado Principal e Posterior	44
Tabela 12 - Pressões obtidas para o Alçado Lateral direito e esquerdo.....	45
Tabela 13 - Coeficientes de pressão para a cobertura [20]	47
Tabela 14 - Pressões obtidas para o Alçado Principal e posterior.....	47
Tabela 15 - Pressões obtidas para o Alçado Lateral direito e esquerdo.....	48
Tabela 16 - Combinação de Ações com base sobrecarga	49
Tabela 17 - Combinação de Ações com base vento	49
Tabela 18 - Resultados dos diagramas Piso Cave.....	95
Tabela 19 - Resultados dos diagramas Piso R/C.....	95
Tabela 20 - Resultados dos diagramas Piso 1º andar.....	95
Tabela 21 - Frequências dos cinco primeiros modos Robot e Tricalc	105

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

1 – Introdução

1.1 – Introdução ao Tema

No presente trabalho apresenta-se a dissertação realizada para conclusão do mestrado de Engenharia Civil – Construções Civas. O projeto utilizado como caso de estudo diz respeito a uma habitação unifamiliar localizada em Salir do Porto, concelho de Caldas da Rainha.

1.2 – Objetivos

O objetivo principal é a aplicação dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Civil, comparando dois softwares de cálculo automático distintos, o Robot e o Tricalc, solidificando os conhecimentos do autor no ramo de estruturas e preparando-o para o mercado de trabalho ao nível de execução de projetos. É de conhecimento geral que a utilização de softwares de cálculo apresentam cada vez mais um papel fundamental no desempenho da atividade de um projetista [1], permitindo análises muito mais precisas, principalmente ao nível do sismo, do que comparando com os métodos utilizados há vinte ou trinta anos atrás, que hoje em dia são utilizados na fase de pré-dimensionamento, como o método das forças sísmicas apresentado no EC8 [2].

1.3 – Organização do documento

O trabalho tem seis capítulos de desenvolvimento, incluindo o presente, sendo o segundo capítulo uma introdução aos softwares existentes no mercado português para além do Robot e do Tricalc. O terceiro capítulo serve para descrever o caso de estudo e apresentar a solução estrutural utilizada, a escolha dos materiais, pré-dimensionamento dos elementos e definição das cargas a utilizar na modelação em software para o dimensionamento da estrutura, o quarto capítulo compara as diferenças observadas na fase de modelação nos dois programas, o quinto capítulo é a discussão dos resultados obtidos ao nível de deslocamentos, esforços e dimensionamento em cada elemento, mas também ao nível dos modos de vibração obtidos, e o sexto capítulo

as conclusões. O trabalho apresenta ainda em anexo os desenhos dos elementos dimensionados à mão pelo autor do projeto e pelo programa Tricalc.

2 - Softwares de Análise Estrutural

No século XX, a aparição do primeiro computador e o avanço contínuo da tecnologia, originou, décadas mais tarde, a aparição dos primeiros softwares de análise estrutural. Estes softwares permitem ao Engenheiro utilizar uma ferramenta que lhe facilita, tanto a produtividade dos seus projetos, como também uma análise mais aprimorada das diversas estruturas com que muita das vezes tem de lidar.

O mercado de softwares de análise estrutural encontra-se em constante atualização, não só devido às normas, como também para facilitar a interação do utilizador com o software.

Exemplos de softwares mais populares nos gabinetes de projeto em Portugal são o CYPECAD, o *Robot Structural Analysis*, o SAP2000 e o Tricalc [3].

Nesta dissertação, o autor irá utilizar o *Robot Structural Analysis 2018* e o Tricalc 7.5, para efeitos de comparação, utilizando o mesmo modelo de conceção estrutural nos dois programas, e as mesmas cargas.

2.1 – Robot Structural Analysis Professional

O software *Robot Structural Analysis Professional* é um software de cálculo automático que permite a simulação e análise de edifícios, inicialmente conhecido por Robot Millenium, criado por André Niznik durante a sua tese de doutoramento no Instituto Francês de Engenharia Civil de Toulouse, em França, no ano 1983 [4]. A empresa *Autodesk* comprou o programa anos depois, interligando este software ao conceito de *Bulding Information Modeling (BIM)* [5].

O software possui uma interface amigável, permitindo ao utilizador desde o início escolher o modelo de cálculo que pretende utilizar dependendo dos elementos estruturais. Na Figura 1 é possível verificar-se o *template* que aparece após se abrir o programa Robot.



Figura 1 – Templates do Robot

Do canto superior esquerdo ao canto inferior direito, os modelos são os seguintes:

Projeto de edifícios; Dimensionamento de Pórticos em 3D; Elementos de casca (que será utilizado neste projeto); Dimensionamento de elementos de treliça em 3D; Dimensionamento de planos 3D; Dimensionamento de pórticos em 2D; Dimensionamento elementos de grelha; Dimensionamento de treliças em 2D; Dimensionamento de estruturas volumétricas; Tensões de estruturas plano em 2D; Deformações planas de estruturas; Dimensionamento de estruturas assimétricas; Dimensionamento de elementos de betão armado; Dimensionamento de ligações; Definição de secções; Dimensionamento de estruturas parametrizadas;

Cada modelo permite uma análise específica a um problema, no entanto, elementos mais complexos como o elemento de casca permite, na sua maioria, responder a todos os outros modelos. Para os efeitos deste trabalho será utilizado o modelo de casca.

O Robot permite várias análises estruturais, entre as quais: a análise estática, a análise modal, a análise modal tendo em conta as forças estáticas, a análise à encurvadura, a análise harmónica e a análise *push over*.

2.2 – Tricalc

O software Tricalc foi desenvolvido pela empresa Arktec, em 1991, sendo o primeiro programa de cálculo matricial espacial, o primeiro programa de cálculo de estruturas com interface gráfico 3D, e o primeiro programa para AEC para Windows, desenvolvido em Espanha [6]. As versões 2.0 e 3.0 foram apresentadas no mesmo ano, em outubro, e a versão 7.5 utilizada para este trabalho foi apresentada em julho de 2012 [6].

A versão 7.5 pretendia responder à necessidade de muitos utilizadores, atualizando diferentes aspetos normativos do programa, bem como incluir novas funções e capacidades [6].

Tricalc calcula estruturas de qualquer material, permite que se trabalhe sobre qualquer plano, em planta ou alçado, permite o pré-dimensionamento automático das secções [7] e, desde a versão 7.0, a análise P-Delta [8].

2.3 – CYPECAD

O CYPECAD foi feito pela empresa espanhola “CYPE Ingenieros S.A.”, tendo sido lançada a sua primeira versão no ano de 1997 para o sistema operativo Windows, e tem sido atualizado frequentemente [9].

O software CYPECAD apresenta vários módulos para compra [10], e cada módulo oferece funções distintas ao utilizador, o que permite a criação de projetos de edifícios em betão armado, misto, estrutura metálica, estrutura em madeira, estrutura pré-esforçadas, entre outros. Tal como o Tricalc, o CYPECAD permite o cálculo automático das armaduras e faz os desenhos. Além disso, possui um módulo de pormenores construtivos base, como por exemplo ligações entre elementos, que auxilia na boa execução dos trabalhos em obra. Os restantes programas não têm esses pormenores construtivos, pelo que são muitas vezes desenhados pelo próprio projetista.

2.4 – SAP2000

O SAP2000 é um programa muito semelhante ao *Robot Structural Analysis*. A análise estrutural é feita com interface tridimensional, e apresenta vários tipos de análise, incluindo linear e não-linear. Ao contrário do Tricalc e do CYPECAD, o SAP2000 não imprime desenhos, sendo mais utilizado para análises de estruturas complexas, tal como o Robot.

Em termos de análise [11], o SAP2000 é um dos programas mais completos no mercado, pois possui a análise estática, linear e independente para uma sequência de carregamentos (como no caso das cargas móveis), análise dinâmica, onde se inclui o cálculo dos modos de vibração através do Ritz ou Eigen vectors (análise modal), análise por espectro de resposta, análise temporal não linear que capta detalhadamente a resposta de uma estrutura a movimentos basais devidos ao sismo e outros tipo de ações como explosões, equipamentos, etc, análise P-Delta, análise à encurvadura, a análise estática não linear (*push over*), análise aos efeitos diferidos no tempo (fluência e retração por exemplo), análise à densidade espectral de potência (resposta da estrutura devido a ações cíclicas) ou em alternativa a análise de solicitações harmónicas [11].

Permite ainda que o utilizador vá analisando a estrutura à medida que o modelo é construído e modificado no programa, mostrando nova forma de deformada, diagramas de esforços e outros resultados durante o processo de modelação [11].

2.5 – Comentários finais

Tendo em conta as vantagens dos programas mencionados, o *Robot Structural Analysis* e o SAP2000 são programas que permitem uma análise mais pormenorizada e avançada de toda a estrutura, tendo como desvantagem o fato de não serem tão produtivos quanto o CYPECAD e o Tricalc a nível de mercado trabalho, devido há facilidade com que ambos os programas permitem obter resultados das armaduras e os pormenores desenhados, e assim, mais projetos feitos por mês.

3 - Caso de Estudo

3.1 - Introdução

O caso de estudo utilizado para este trabalho é de um projeto de uma moradia para habitação, situada em Salir do Porto, no distrito de Leiria. O projeto de arquitetura é composto por cave, rés do chão e primeiro andar, estilo moderna, tipologia T3, com uma área de implantação de 153,68 m². Na Figura 2 é possível verificar-se o modelo 3D original da moradia [12].



Figura 2 - Modelo 3D da moradia caso estudo [12]

Para efeito deste trabalho não foi considerada a piscina e as pérgulas por cima do estacionamento.

A moradia irá ser implantada num terreno extremamente inclinado, pelo que existe a necessidade de considerar um muro de suporte de terras para conter as terras. Em termos de geometria possui uma forma retangular, e apesar de não manter regularidade em altura, o piso mais alto possui menos volumetria, e, portanto, não constitui um problema acrescido em relação aos centros de massa.

As divisões da moradia estão da seguinte maneira:

- Cave: Será utilizada para arrumos, não tendo acesso por meio de automóvel, e possui uma escada de acesso ao piso superior.
- Rés-do-chão: Hall de entrada, uma sala comum, cozinha, um quarto, uma casa de banho e escadas para acesso ao piso superior e inferior, uma varanda e um alpendre.
- 1º andar: Hall à saída das escadas, dois quartos, uma closet, duas casas de banho privativas, um terraço, e escada com acesso ao piso inferior.

Foi considerado para as paredes exteriores o sistema ETICS com tijolos cerâmicos 30x20x22cm, isoladas por EPS 50mm.

3.2 – Dados de Projeto

Não existindo relatório geotécnico, o solo a considerar depende sobretudo da visita ao local, observando pormenores como a marca de pegadas, para avaliar a dureza do solo, a geologia da região e perguntando aos habitantes da vila, se possível à vizinhança, se têm algum conhecimento do tipo de solo encontrado na altura que as suas moradias ou vivendas foram construídas. Por ser um trabalho académico, considerou-se para o solo existente areias densas, como é típico da região. Este tipo de solo implica um melhor comportamento ao nível sismo e oferece uma tensão de cedência maior no cálculo das fundações. Apesar disso, considerou-se 250 KPa para a tensão de cedência do solo por falta de relatório geotécnico, procurando-se assim estar do lado da segurança.

3.3 – Conceção Estrutural

A moradia será executada em betão armado, tendo a solução estrutural adotada resultado de análise conjunta entre a arquitetura e a engenharia, respeitando os limites impostos pela arquitetura, procurando a otimização da estrutura, bem como o cumprimento dos regulamentos e dos critérios de segurança.

A estrutura será porticada nas duas direções, constituída por fundações, pilares, vigas e lajes. A cave terá um muro de suporte de terras na zona em contacto com o solo. A solução estrutural apresentada tentou equilibrar-se as inércias nas duas direções para que o centro de massa e o centro de rigidez fossem o mais próximo possível, com o

intuito de reduzir a torção do edifício provocada pela atividade sísmica, no entanto, como é possível verificar-se pela planta de arquitetura, a estrutura não é regular em planta, nem regular em altura, o que torna a tarefa mais complicada.

As fundações são constituídas por sapatas isoladas, sapatas combinadas e sapata contínua (sapata do muro de suporte de terras). Não foi considerado os lintéis de travamento para facilitar a comparação entre os dois programas.

A estrutura é composta por lajes maciças apoiadas em vigas com secções de altura variável de 30 a 35cm, em geral com largura de 20cm. Em alguns casos, principalmente nas varandas e na laje de cobertura, foram colocadas vigas com maior largura do que altura. O objetivo destas vigas é oferecer rigidez, ao mesmo tempo que alguma resistência aos esforços, sem prejudicar os limites oferecidos pelo projeto de arquitetura, tendo em conta que não será utilizado teto falso no teto do primeiro andar. Estas vigas não têm vãos superiores a 7 metros, por limitações do Estado Limite de Serviço de deformação.

As lajes maciças funcionam em uma e duas direções, conforme se pode verificar nas plantas estruturais que se encontram representadas nas Figuras 3, 4, 5 e 6.

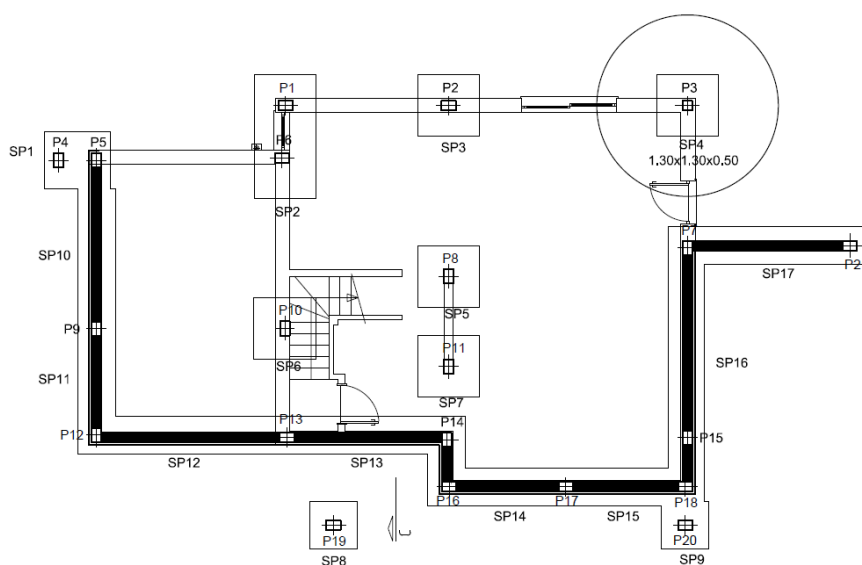
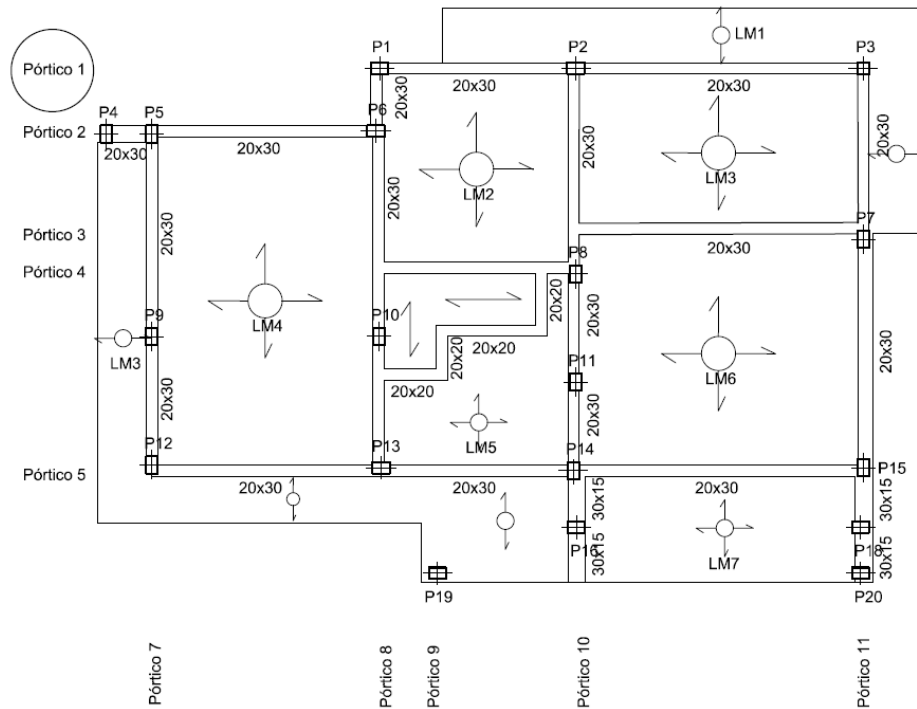
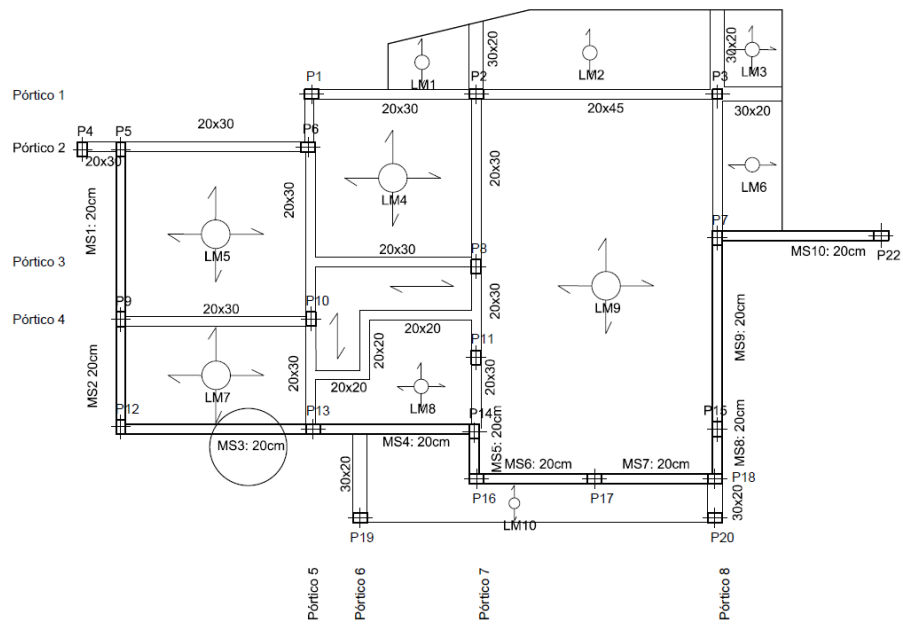


Figura 3 – Planta de Fundações



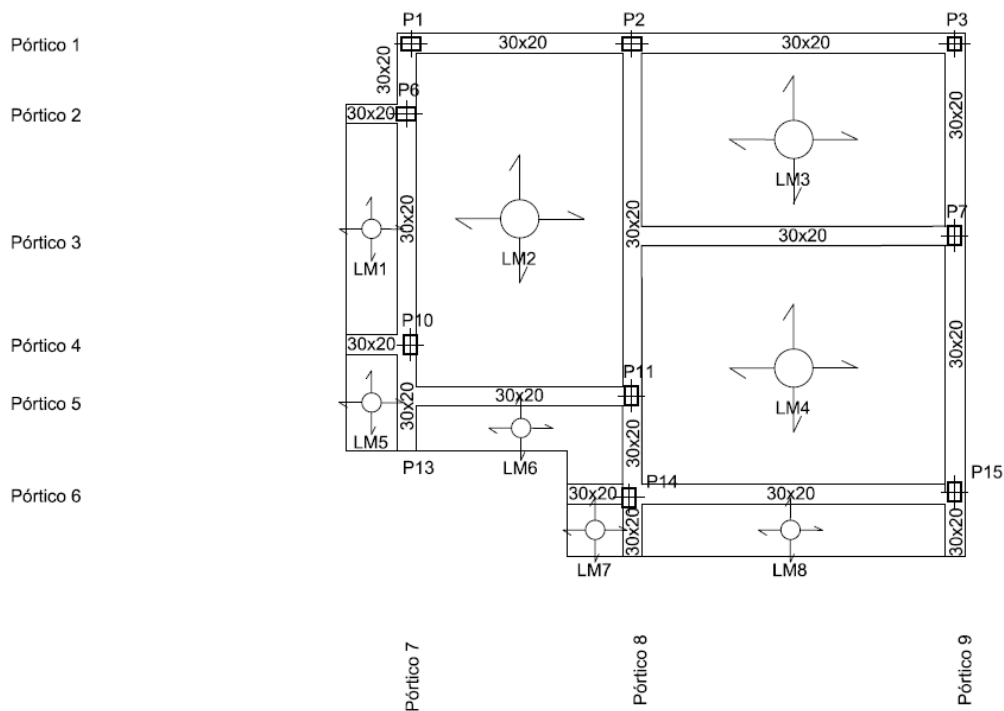


Figura 6 – Planta do Teto do 1º andar

Para efeitos de comparação foram selecionados alguns elementos. Os elementos selecionados foram:

- A Sapata SP4;
- O Pilar P3;
- O MST3;
- O Pórtico 1 do teto do rés do chão;
- A Laje estrutural da cobertura;

Escolheu-se a laje estrutural da cobertura por estar apoiada apenas em vigas rasas, uma vez que o programa Tricalc faz a discretização dessas vigas como se fizesse parte da laje, pelo que seria importante comparar a diferença entre resultados. O pórtico escolhido deve-se ao fato de ser um dos pórticos com maior vão, e como tal será um dos pórticos onde se esperam esforços mais elevados. Por conta do pórtico escolhido, e sendo o Pilar P3 um dos apoios do pórtico, faria sentido analisar todo o elemento, incluindo a Sapata SP4 que pertence ao pilar. O muro de suporte de terras foi escolhido

aleatoriamente dentro dos que tinham maior comprimento até ao pilar, uma vez que os impulsos considerados foram iguais para todos os elementos.

3.4 – Pré-dimensionamento

Depois de definida a conceção estrutural do edifício, realizou-se um pré-dimensionamento dos elementos por forma a obter-se as dimensões mais próximas das suas secções, permitindo assim o cálculo do peso próprio da estrutura para se chegar à solução ideal da forma mais rápida possível.

O pré-dimensionamento para cada elemento foi bastante simplista, tendo sido levado em conta apenas o estado limite de deformação, a geometria, e os centros de massa e rigidez da estrutura, para que, alterando as dimensões dos elementos, estivessem o mais próximo possíveis.

Em termos geométricos, como no caso dos pilares, as alvenarias exteriores limitaram uma das dimensões máximas do pilar a 23 cm (e por isso mantiveram-se 20cm numa das dimensões), ou no caso das vigas das varandas, para que não aparecessem nos tetos exteriores. No interior da moradia foi considerado a utilização de tetos falsos, diminuindo o impacto deste problema nas vigas de maior altura, ainda assim procurou-se limitar o impacto “escondendo” as vigas nas paredes exteriores e interiores sempre que possível.

Tendo em conta a norma NP EN 206-1 [13], LNEC E464-2005 [14], armaduras prNP 4447 [15] e EC2 [16], os materiais considerados para os elementos em betão armado foram:

- Betão – C25/30 para todos os elementos estruturais da obra, com classe XC1 em todos os elementos exceto nas fundações, que terão uma camada de betão de limpeza XC0 C12/15 e o Betão C25/30 classe XC2.
- Aço – A400NR para todos os elementos estruturais da obra.

Recobrimentos:

- 5,0cm fundações;
- 3,0 cm elementos estruturais;

Segundo a especificação do LNEC E 464-2005 Betões, a classe estrutural adotada será a S2.

3.4.1 – Lajes

As lajes são maciças, em geral armadas nas duas direções (Figura 4, 5 e 6), e a altura foi definida com base na expressão 1:

$$h_{laje} \geq L / (30 \text{ a } 35) \quad (1)$$

onde:

L - Menor comprimento da laje (m);

Assim sendo, uma laje de dimensões 4,95x5,00m, terá uma altura definida pelo seu lado menor (4,95m), ou seja, uma laje com altura entre 14.14cm e 16.5cm. Sendo uma laje maciça no interior da moradia, definiu-se como altura mínima de laje 20cm de altura, evitando assim lajes com altura diferentes no mesmo piso.

Seria ainda necessário verificar o momento fletor reduzido, que deve estar entre os valores de 0.10 e 0.20, por forma a evitar uma percentagem de mecanização de armadura superior ao permitido, no entanto, para efeitos deste trabalho, o pré-dimensionamento não foi tão detalhado, uma vez que uma das vantagens do Tricalc em relação ao Robot é o pré-dimensionamento automático e/ou a verificação do pré-dimensionamento escolhido pelo utilizador, como será mencionado no Capítulo quatro.

3.4.2 – Vigas

As vigas foram pré-dimensionadas utilizando a expressão 2, que calcula a altura mínima dependendo do comprimento entre apoios:

$$h_{viga} \geq L / (10 \text{ a } 14) \quad (2)$$

onde:

L - Comprimento entre apoios (m);

Uma viga simplesmente apoiada foi pré-dimensionada utilizando como referência de um valor de 10, enquanto uma viga de um vão intermédio foi utilizada como referência um valor de 14.

Depois de efetuado os cálculos para as vigas com maior vão entre eixos de apoio, foi definido que todas as vigas teriam uma altura de no mínimo 30cm.

Para conclusão do pré-dimensionamento deveria fazer-se manualmente a distribuição de cargas da laje para a viga, no entanto para efeitos deste trabalho não foi feito o pré-dimensionamento da armadura.

3.4.3 – Pilares e Muro de Cave

Sendo o edifício uma moradia, com dois pisos e cave, no caso dos pilares não foi realizada pré-dimensionamento através de expressões, tendo sido limitado uma das dimensões (dependendo da direção) a um máximo de 23cm, e a outra, conforme a necessidade de apoio para as vigas, sendo em geral, 30cm. As secções serão alteradas após os cálculos efetuados pelo programa Tricalc, que confirmará o cumprimento (ou não) dos estados limites, através dos avisos numa caixa de erros do programa que será mencionada no Capítulo 4.

A geometria também variou conforme a rigidez necessária, para aproximar o máximo possível o centro de massa e o centro de rigidez.

Para os restantes elementos não foi executado qualquer tipo de pré-dimensionamento, uma vez que o muro de suporte de terras estava limitado à espessura máxima de 20cm, e as sapatas foram dimensionadas durante o cálculo, tendo em conta a área de contato com o solo e o valor limite de tensão no solo de 250KPa, conforme a norma LNEC E-217(1968) [17].

3.5 – Definição das cargas

A regulamentação utilizada para a determinação das ações, combinações, dimensionamento e verificações de segurança foram:

- Eurocódigo 0 [18]

- Eurocódigo 1 [19][20]
- Eurocódigo 2 [16]
- Eurocódigo 8 [2]

O edifício está sujeito a ações horizontais e verticais, de caráter permanente, variável ou accidental. Para as ações horizontais foram consideradas os impulsos de terras e da água, sismo e o vento, e para as ações verticais o peso próprio da estrutura e as sobrecargas regulamentares.

O peso próprio da estrutura depende dos materiais utilizados e do volume dos elementos, e, portanto, a necessidade do pré-dimensionamento realizado no capítulo anterior.

Não foram consideradas as ações da neve, uma vez que para o local da obra não é necessária a verificação desse tipo de ação. A temperatura, fogo e explosão/choque também não foram consideradas por motivos de simplificação na comparação entre os dois programas.

3.5.1 – Peso Próprio dos elementos estruturais

Sendo a estrutura em betão armado, e o peso volúmico do betão 25 kN/m^3 , o peso próprio dos elementos estruturais consiste no produto entre o peso volúmico e o volume da peça. Os dois softwares de cálculo fazem este cálculo automático, pelo que não é necessário introduzir-se estas ações manualmente.

3.5.2 – Peso Próprio dos revestimentos

O peso próprio dos revestimentos depende das camadas de revestimento dos pisos e do tipo de paredes interiores e exteriores da moradia.

Para o revestimento dos pavimentos interiores foi considerado mosaicos cerâmicos, incluindo 5cm de camada de regularização e teto falso, dando no total [21]: 2.0 kN/m^2

Para o revestimento da cobertura foi considerado betão leve, telas impermeabilizantes, respetivas proteções e teto falso, dando no total [21]: 2.0 kN/m^2

Para as paredes interiores dividiu-se o peso próprio das paredes simples tijolo 30x20x11 cm, cerca de 1.8 kN/m² [21] pela área de pavimento, obtendo-se a seguinte carga por piso: 1.5 kN/m²

As paredes exteriores foram modeladas como uma carga vertical uniformemente distribuída, colocada diretamente sobre as vigas. Apesar de nos pormenores construtivos constar um pano 30x20x22cm, por segurança, assumiu-se que as paredes exteriores seriam duplas com caixa de ar, de tijolo 30x20x15 + tijolo 30x20x11 [18]. Assim sendo, a ação definida é de 9.15 kN/m. Esta consideração deve-se ao fato de ser comum, durante a execução da obra, a existência de alterações ao projeto por solicitação do dono de obra, e como tal, visto que considerando o pano duplo a carga é superior do que utilizando um pano simples 30x20x22cm, o projeto fica do lado da segurança.

3.5.3 – Impulso de Terras e água

As pressões das terras devem ser calculadas a partir do estado de tensão em repouso sempre que não se desenvolverem movimentos relativos entre a estrutura de suporte e o terreno. Uma vez que no presente projeto os muros da cave são travados pela laje superior, significa que esses movimentos relativos não existem, e como tal as pressões podem ser calculadas no estado de tensão em repouso.

Para a quantificação dos impulsos utilizou-se a teoria de Rankine, calculando-se assim o valor do coeficiente de impulso em repouso K_0 com a expressão 3:

$$K_0 = 1 - \text{sen} \varphi' \quad (3)$$

onde:

K_0 – coeficiente de impulso em repouso;

φ' – ângulo de atrito de cálculo;

O ângulo de atrito do solo considerado é de 30°.

Para se obter a tensão horizontal em repouso, é necessário calcular a tensão vertical em repouso através da expressão 4:

$$\sigma_v = \sigma_v' + \mu \quad (4)$$

onde:

σ_v – tensão vertical total;

σ_v' – tensão vertical efetiva;

μ – tensão da água;

Apesar de ser previsto que os muros sejam drenados, e não existir informação sobre a existência de água no local, considerou-se, por motivos de segurança, que existe um impulso de água até 40% da altura, atuando não como carga permanente, mas como carga variável. Assim sendo, ao invés de se considerar a tensão da água na expressão acima, esta considerou-se à parte para que fosse possível aplicar-se outro coeficiente de majoração (o de sobrecarga ao invés do permanente, por opção própria).

Então, tem-se que $\sigma_v = \sigma_v'$ e $\mu = \gamma_w * h$.

Para o cálculo da tensão vertical efetiva desconsiderando-se a existência de água no solo, utiliza-se a expressão 5:

$$\sigma_v' = \gamma * h \quad (5)$$

onde:

σ_v' – tensão vertical efetiva;

γ – peso volúmico das terras;

h – Altura das terras;

O peso volúmico da areia densa ronda os 17 kN/m³, no entanto, para efeitos de cálculo, considerou-se 18 kN/m³, obtendo-se uma tensão vertical efetiva de 46.8 kN/m² para o impulso do solo.

A tensão horizontal efetiva é obtida pela expressão 6:

$$\sigma_h' = K_0 * \sigma_v' \quad (6)$$

onde:

σ_h' – tensão horizontal efetiva;

K_0 – coeficiente de impulso em repouso;

σ_v' – tensão vertical efetiva;

Assim, obteve-se para o impulso das terras no muro, uma carga superficial de 23.4 kN/m².

Para o caso da água a situação é mais simples, uma vez que não se aplica o coeficiente de impulso em repouso, ficando: $\sigma_h' = \sigma_v'$, em que, segundo a expressão 7:

$$\sigma_h' = \sigma_v' = \mu = Y_w * h \quad (7)$$

onde:

σ_h' – tensão horizontal efetiva;

σ_v' – tensão vertical efetiva;

μ – tensão da água;

Y_w – peso volúmico da água;

h – Altura da água (40% da altura do muro);

Obteve-se assim, para a tensão horizontal efetiva da água, um valor de 10.4 kN/m².

3.5.4 – Escadas

Não se considerou as escadas na modelação do software, ficando uma abertura na laje. No entanto, as cargas referentes à mesma foram colocadas no modelo. Para as cargas permanentes contabilizou-se o peso dos degraus, a laje da escada com 20cm de espessura e a sobrecarga regulamentar.

3.5.5 – Sobrecargas

As sobrecargas regulamentares foram quantificadas segundo o Eurocódigo 1 [19], e conforme o anexo nacional. Estas dependem da categoria do edifício, que podem ser definidas através da Tabela 1 e 2:

Tabela 1 - Categoria de Utilização [19]

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 C5 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 2 – Categoria de Utilização da cobertura [19]

Categoria	Utilização específica
H	Coberturas não acessíveis, excepto para operações de manutenção e reparação correntes
I	Coberturas acessíveis com utilizações definidas nas Categorias A a G
K	Coberturas acessíveis para utilizações especiais, tais como aterragem de helicópteros

Com base nas figuras é possível verificar-se que, para os pavimentos interiores a categoria deverá ser a A, uma vez que é uma moradia unifamiliar, enquanto que para a cobertura deverá ser considerada a categoria H, uma vez que não haverá acesso à cobertura exceto por motivos de manutenção.

Com esta informação, e com base na Tabela 3 e 4, é possível identificar a sobrecarga a aplicar que se deve aplicar em cada uma das situações.

Tabela 3 – Sobrecarga a aplicar conforme a categoria dos pavimentos interiores [19]

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

Tabela 4 - Sobrecarga a aplicar conforme a categoria da cobertura [19]

Cobertura	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Categoria H	0,4	1,0

NOTA: A sobrecarga uniformemente distribuída q_k pode actuar em toda ou em parte da área da cobertura.

Para a escada contabilizou-se uma sobrecarga uniformemente distribuída de 3.0 kN/m², para os pavimentos do piso de 2 kN/m² e para a cobertura 0.4 kN/m². As varandas terão uma sobrecarga de 2.0 kN/m², com um mínimo de 5.0 kN/m² numa faixa de 1m de largura adjacente ao parapeito no caso da varanda do rés-do-chão, uma vez que se encontra suspensa.

3.5.6 – Sismo

Considerando que a ação sísmica pode ser relevante em algumas zonas de Portugal, e por ser um fenómeno natural com elevada imprevisibilidade, o cálculo é de extrema importância. Neste trabalho o cálculo da ação do sismo foi feito de acordo com o EC8 [2].

A ação sísmica varia consoante a sismicidade da zona onde a estrutura se encontra, e esta é descrita pelo valor de referência de aceleração máxima na base do terreno, designado por a_{gR} .

Os dois aspetos fundamentais de qualquer análise de um projeto é: Garantir que a estrutura não colapse e limitar ao máximo os danos existentes no edifício.

A ação sísmica pode surgir através de duas configurações espectrais, dependendo se o sismo em análise é um sismo afastado ou próximo (tipo 1 ou tipo 2, respetivamente). Um exemplo de ação sísmica tipo 1 para o caso da moradia apresentada é um sismo com epicentro no mar, a grande distância do continente, tendo uma duração maior que os sismos de tipo 2, mas com frequências predominantemente baixas [1]. A ação sísmica tipo 2 refere-se a sismos com epicentro em terra, com origem nos movimentos das intraplacas, com duração menor do que as do tipo 1, mas com frequências predominantemente altas [1].

A análise sísmica deve ser feita na direção X e Y, e, se a massa em Z o justificar, nas três direções. No caso deste trabalho verificou-se que a percentagem de massa em Z que participava na análise modal era significativa, pelo que também foi considerada.

Os espectros de resposta elástica dependem da localidade, do tipo de terreno, da classe de importância, do coeficiente de comportamento, do amortecimento e da frequência da estrutura em análise.

Como já mencionado anteriormente, a moradia encontra-se em Salar do Porto, próximo das Caldas da Rainha, o que conduz a um espectro tipo 1 para a zona 1.5, e um espectro tipo 2 para a zona de 2.4 [2]. Quanto ao tipo de terreno caracteriza-se pelo tipo B, ou seja, “Depósitos de areia muito compacta, de seixo ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade”. Na Tabela 5 e 6, é possível verificar-se, para o tipo 1 e tipo 2, os valores recomendados para o espectro de resposta elástica tendo em conta o tipo de terreno

Tabela 5 – Valores recomendados para o espectro de resposta elástica tipo 1 [2]

Tipo de terreno	S_{max}	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,1	0,6	2,0
B	1,35	0,1	0,6	2,0
C	1,6	0,1	0,6	2,0
D	2,0	0,1	0,8	2,0
E	1,8	0,1	0,6	2,0

Tabela 6 - Valores recomendados para o espectro de resposta elástica tipo 2 [2]

Tipo de terreno	S_{max}	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,1	0,25	2,0
B	1,35	0,1	0,25	2,0
C	1,6	0,1	0,25	2,0
D	2,0	0,1	0,3	2,0
E	1,8	0,1	0,25	2,0

Além disso, para o caso do tipo 2 em que o valor de cálculo da aceleração à superfície de um terreno é superior a 1m/s^2 , o valor de S_{max} deverá ser calculado através da expressão 8:

$$S = S_{\text{max}} - ((S_{\text{max}} - 1) \times (a_g - 1)) / 3 \quad (8)$$

A classe de importância do edifício também é um fator relevante, uma vez que dependendo do tipo de construção e do seu valor de utilização, ou seja, da sua importância no momento de ocorrência de um sismo (por exemplo, de um hospital), são maiores do que a de um edifício normal, já que se devem manter operacionais antes, durante e após o sismo. O EC8 [2] define as classes de importância conforme a Tabela 7 e 8:

Tabela 7 – Classes de Importância [2]

Classe de importância	Edifícios
I	Edifícios de importância menor para a segurança pública, como por exemplo edifícios agrícolas, etc.
II	Edifícios correntes, não pertencentes às outras categorias.
III	Edifícios cuja resistência sísmica é importante tendo em vista as consequências associadas ao colapso, como por exemplo escolas, salas de reunião, instituições culturais, etc.
IV	Edifícios cuja integridade em caso de sismo é de importância vital para a protecção civil, como por exemplo hospitais, quartéis de bombeiros, centrais eléctricas, etc.

Tabela 8 – Coeficiente conforme as Classes de Importância [2]

Classe de Importância	Acção sísmica Tipo 1	Acção sísmica Tipo 2	
		Continente	Açores
I	0,65	0,75	0,85
II	1,00	1,00	1,00
III	1,45	1,25	1,15
IV	1,95	1,50	1,35

O coeficiente de importância deverá ter-se em conta nas combinações sísmicas, já que irá influenciar diretamente o valor da ação. No caso deste trabalho é um edifício corrente, sendo por isso um edifício com classe de importância II, e, portanto, o coeficiente a utilizar é de 1.00 para a ação sísmica de tipo I e tipo II.

A classe de ductilidade também é um fator importante no sismo, estando dividida em três classes, baixa, média e alta. Esta classe está diretamente relacionada com a capacidade de dissipação de energia, garantindo, durante o sismo, que a estrutura mantenha um comportamento dúctil. No entanto, o aço a utilizar nesta estrutura será o aço normal, de ductilidade baixa, e por isso para o caso em estudo foi considerado uma classe de ductilidade baixa (DCL).

Por fim, o coeficiente de comportamento é o último parâmetro a ter em consideração no momento da definição sísmica. Para uma classe de ductilidade baixa, os valores do coeficiente de comportamento estão entre 1.5 e 2.0, como se pode verificar na Tabela 9:

Tabela 9 – Coeficiente de comportamento [2]

Princípio de projecto	Classe de ductilidade estrutural	Intervalo dos valores de referência do coeficiente de comportamento q
Princípio a) Comportamento estrutural de baixa dissipação	DCL (Baixa)	$\leq 1,5 - 2$
Princípio b) Comportamento estrutural dissipativo	DCM (Média)	≤ 4 também limitado pelos valores do Quadro 6.2
	DCH (Alta)	unicamente limitado pelos valores do Quadro 6.2

E, segundo a expressão 9 retirada do EC8 [2]:

$$q = q_0 \times k_w \geq 1,5 \quad (9)$$

onde:

q – coeficiente de comportamento;

q_0 - valor básico do coeficiente de comportamento em função do tipo do sistema estrutural e da sua regularidade;

k_w - fator que reflete o modo de rotura;

Assim, o valor utilizado para o coeficiente de comportamento foi de 1.5.

No tricalc não é possível verificar-se os dois tipos de sismo em simultâneo, no entanto, tanto pela visualização do espectro (Figura 7 e 8) como pelos esforços obtidos no Robot foi possível verificar-se que o tipo 2 era o mais desvantajoso para a estrutura modelada, assim verificou-se o sismo apenas para o tipo 2 no Tricalc.

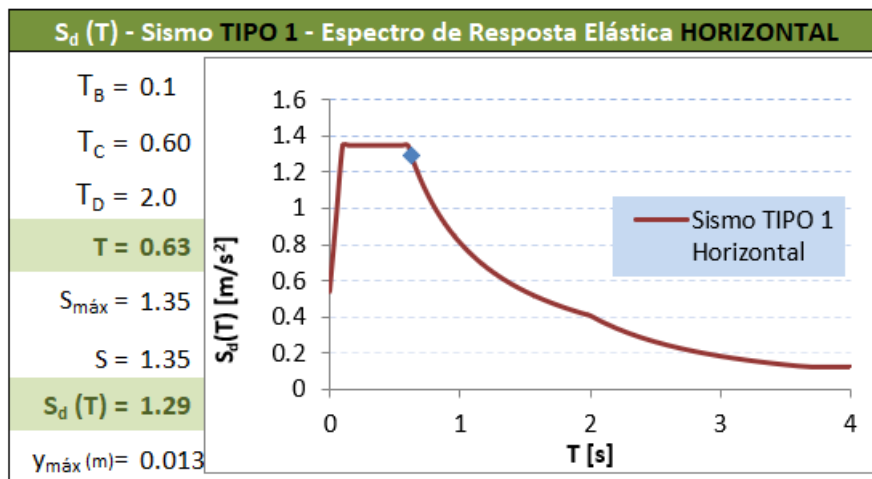


Figura 7 - Espectro de Cálculo Sismo tipo 1

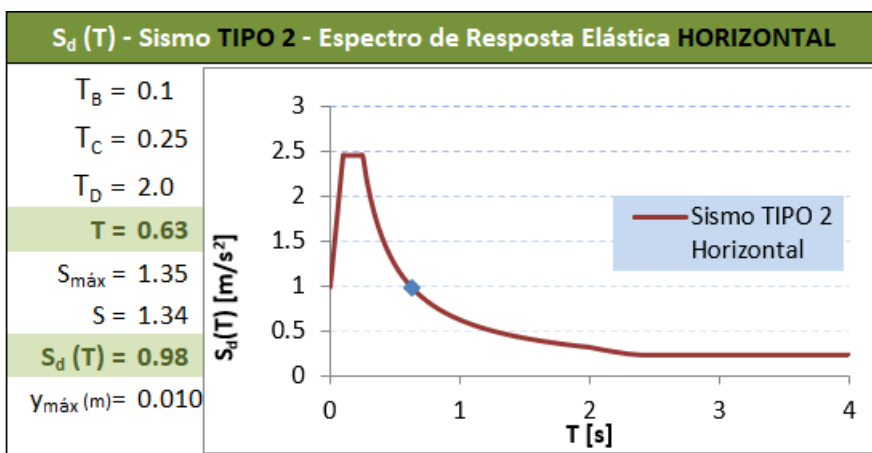


Figura 8 - Espectro de Cálculo Sismo Tipo 2

3.5.7 – Vento

O vento é uma ação variável, e foi considerada segundo a norma do EC1 [20], tendo sido definido um procedimento de cálculo para se obter o valor final da pressão a aplicar nas fachadas. No programa *Robot Structural Analysis 2018* esta carga foi aplicada manualmente, conforme o cálculo, enquanto que no Tricalc colocou-se os mesmos parâmetros, mas a carga foi colocada automaticamente pelo programa.

O primeiro passo é a escolha do valor básico da velocidade de referência do vento, designado pelo EC1 [20] de $v_{b,0}$. Segundo o anexo nacional do EC1 [20], o país está dividido em duas zonas:

Zona A – a generalidade do território, exceto as regiões pertencentes à zona B;

Zona B – os arquipélagos dos Açores e da Madeira, as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5km de largura ou a altitudes superiores a 600m.

A obra está localizada em Salir do Porto, ou seja, situada perto de uma faixa costeira, sendo, portanto, considerado zona B. Conclui-se que o valor de $v_{b,0}$ é 30 m/s.

O segundo passo é o cálculo do valor de referência da velocidade do vento, v_b , através da expressão 10:

$$v_b = C_{dir} \times C_{season} \times v_{b,0} \quad (10)$$

onde,

v_b – valor de referência da velocidade do vento, definido em função da direção do vento e da época do ano a uma altura de 10m acima da superfície de um terreno de categoria II;

C_{dir} – coeficiente de direção;

C_{season} – coeficiente de sazão;

$v_{b,0}$ – valor básico da velocidade de referência do vento;

Segundo o EC1 [20], o valor recomendado para C_{dir} e para C_{season} é de 1.0, portanto o valor de referência é igual ao valor básico, $v_b = v_{b,0}$.

O terceiro passo é o cálculo do coeficiente de rugosidade, C_r , que depende da altura do edifício acima do solo e da categoria do terreno, como se pode verificar na Tabela 6:

Tabela 6 – Categoria do terreno [20]

Categoria de terreno		z_0 [m]	z_{min} [m]
I	Zona costeira exposta aos ventos de mar	0,005	1
II	Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0,05	3
III	Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	8
IV	Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m	1,0	15

NOTA 1: As categorias de terreno II, III e IV estão ilustradas em A.1.
NOTA 2: O coeficiente de rugosidade, $c_r(z)$, é ilustrado na Figura NA.1.

O tipo de terreno, apesar de ser perto da zona costeira, está coberto por edifícios, sendo, portanto, uma zona III, com $z_0 = 0.3$ e $z_{min} = 8$.

Através da expressão 11 e 12, é possível obter-se o coeficiente de rugosidade.

Para $Z \leq z_{min}$:

$$C_r(z) = C_r(z_{min}) \quad (11)$$

$$K_r = 0.19 \times (Z_0 / Z_{0,II})^{0.07} \quad (12)$$

onde,

$Z_{0,II}$ - considerado 0.05;

Z_{max} - considerado 200m;

Assim, mesmo para uma altura do alçado em que a cave tenha carga de vento, como acontece no alçado lateral direito, uma vez que a diferença é apenas de 25cm, adotou-

se como se Z fosse inferior a Zmin para todas as situações, e, portanto, coeficiente de rugosidade é de 0.632.

O quarto passo é o cálculo da velocidade média a uma altura de 8m, através da expressão 13, tendo em conta que o coeficiente de orografia é considerado 1.0, segundo as indicações do EC1 [20].

$$V_m(z) = c_r(z) \times c_o(z) \times v_b \quad (13)$$

Os parâmetros já são conhecidos de expressões interiores, e a velocidade média corresponde a 18.97 m/s.

O quinto passo é o cálculo da intensidade da turbulência à altura z, $I_v(z)$, através da expressão 14:

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad (14)$$

onde,

$$I_v(z_{min}) = \sigma_v / v_m(z) \quad (15)$$

$$\sigma_v = k_r \times v_b \times k_l \quad (16)$$

onde,

k_l – Coeficiente de turbulência, considerado 1.0;

A intensidade da turbulência à altura z é de 0.341, faltando assim calcular, no sexto passo, a pressão dinâmica de pico à altura z, $q_p(z)$. A pressão dinâmica de pico é calculada através da expressão 17:

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times 0.5 \times \rho \times v_m^2(z) \quad (17)$$

onde,

ρ – massa volúmica do ar, dependente da altitude, temperatura e pressão atmosférica da região. O valor recomendado é 1.25 kg/m³.

Através da expressão acima, obteve-se para a pressão dinâmica de pico o valor de 0.761 KPa.

O sexto passo é o cálculo da pressão exterior, através da expressão 18:

$$W_e = q_{p(z_e)} * C_{pe} \quad (18)$$

onde,

(Ze) – altura de referência para a pressão exterior;

Cpe – coeficiente de pressão exterior;

A altura de referência do edifício a ter em conta é definida no EC1 [20], conforme a Figura 9, e considerando as dimensões do edifício, h e b, sendo h a altura e b a largura da fachada do edifício.

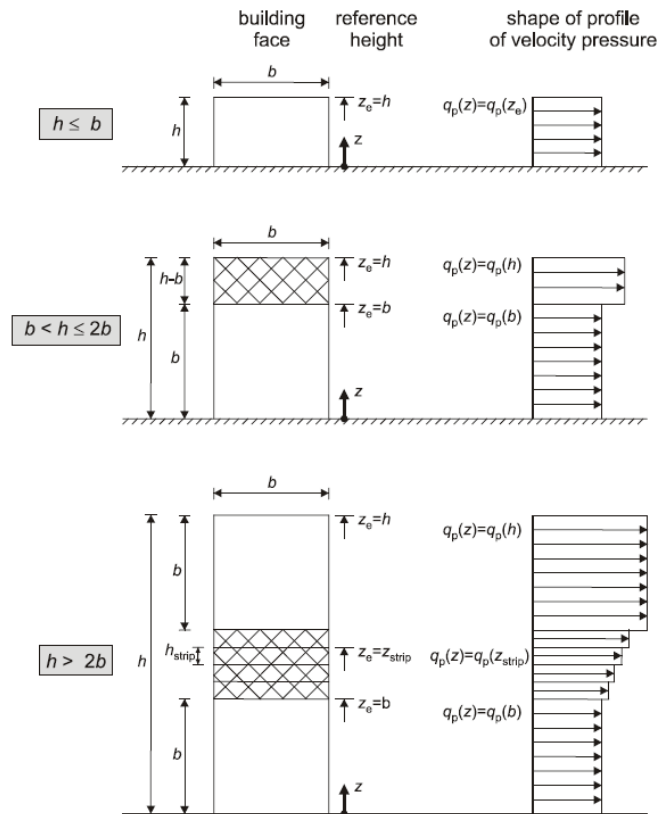


Figura 9 – Forma do diagrama de pressão do vento [15]

A altura do edifício é de 5.65m acima do solo (ou 8.25m contando com a cave), e a largura da fachada para o alçado principal e posterior é de 13.6m e de 10.1m para os alçados laterais direito e esquerdo. Através da figura é possível concluir-se ainda que, dependendo da relação da altura com a largura, poderá ser necessário a consideração da pressão exterior de forma distinta ao longo da altura, no entanto, uma vez que a altura do edifício é sempre inferior às larguras da fachada no caso deste trabalho, encontra-se no caso 1.

Os coeficientes de pressão exterior podem ser definidos para elementos de 1m^2 ou de 10m^2 , dependendo da área das fachadas exteriores, tendo sido neste caso adotado o $C_{pe,10}$, ou seja, para 10m^2 .

Além disso, é necessário, para cada fachada, definir zonas de pressão, como é possível verificar-se na Figura 10.

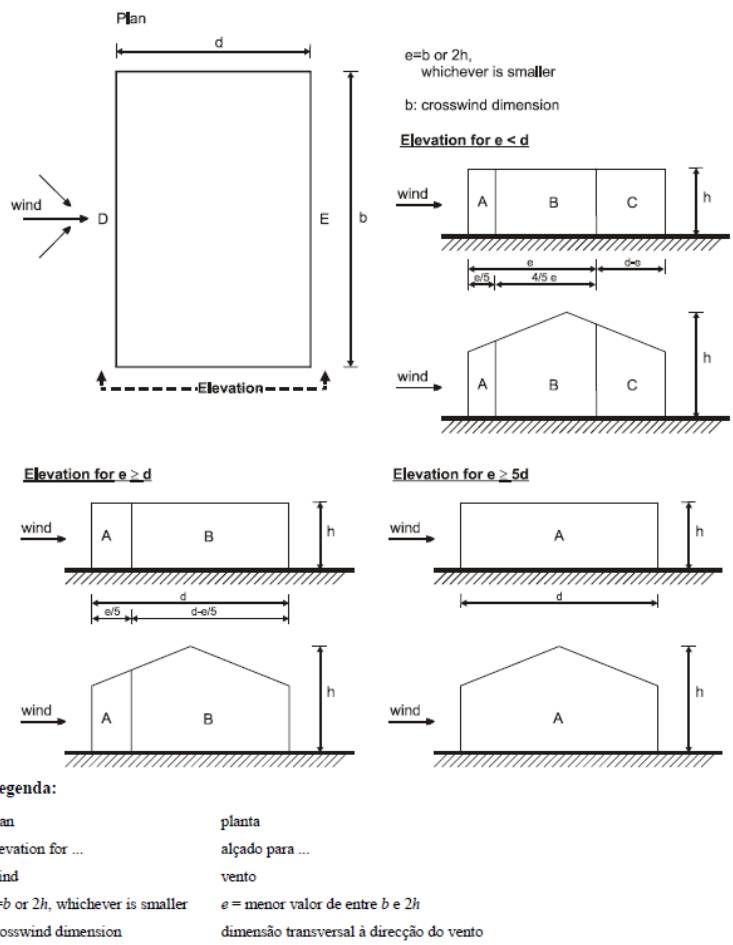


Figura 10 - Zonas de Pressão [20]

Após a definição das zonas de cálculo, procede-se ao cálculo das pressões através do $C_{pe,10}$, utilizando os valores de cálculo recomendados pelo EC1 [20], representados na Tabela 10 e a pressão dinâmica de pico.

Tabela 10 - Coeficientes de pressão exterior [20]

Zona	A		B		C		D		E	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Para casos em que a relação h/d não está tabelada, é necessário interpolar os valores.

Outro fator a ter em conta na pressão exercida pelo vento à moradia é o efeito no seu interior, ou seja, as alterações nas superfícies. Como tal, segundo o EC1, é necessário considerar-se essas alterações, considerando as pressões positivas ou negativas conforme a Figura 11:

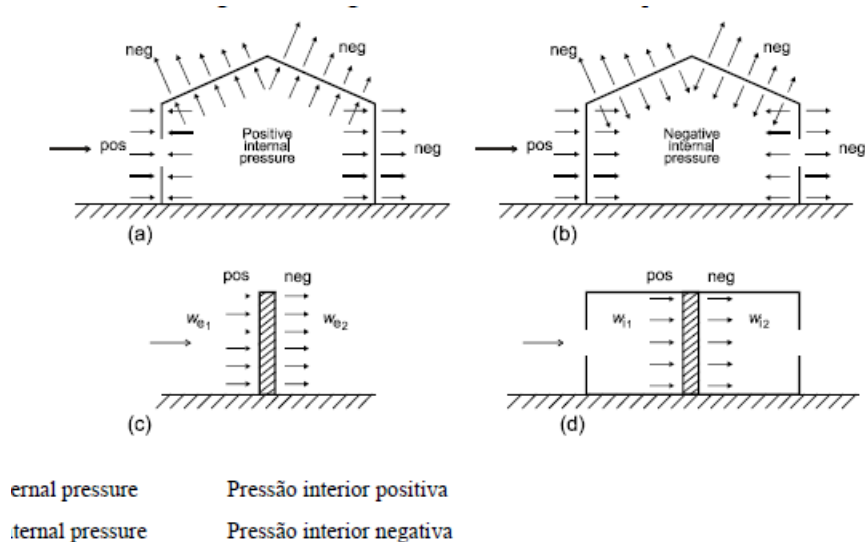


Figura 11 - Pressões positivas e negativas [20]

Quando a pressão no interior for considerada positiva, deverá considerar-se uma ação de +0.2 de coeficiente de pressão, e se negativa, uma ação de -0.3 de coeficiente de pressão, fazendo com que a pressão exercida pelo vento seja a resultante das pressões que é exercida nas faces verticais.

Nas Tabelas 11 e 12 é possível verificar-se um resumo com os valores das pressões obtidas para o caso em estudo nas paredes exteriores.

Tabela 11 - Pressões obtidas para o Alçado Principal e Posterior

Zona	A	B	C	D	E
$C_{pe,10}$	-1.2	-0.8	-0.5	0.7412	-0.3824
W_e (kN/m ²)	-0.913	-0.609	-0.381	0.564	-0.291
W_i (kN/m ²)	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152
	-0.228	-0.228	-0.228	-0.228	-0.228
Pressões (kN/m ²)	-1.066	-0.761	-0.533	0.412	-0.443
	-0.685	-0.381	-0.152	0.793	-0.063

Tabela 12 - Pressões obtidas para o Alçado Lateral direito e esquerdo

Zona	A	B	C	D	E
$C_{pe,10}$	-1.2	-0.8	-0.5	0.722	-0.344
W_e (kN/m ²)	-0.913	-0.609	-0.381	0.550	-0.262
W_i (kN/m ²)	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152
	-0.228	-0.228	-0.228	-0.228	-0.228
Pressões (kN/m ²)	-1.066	-0.761	-0.533	0.397	-0.414
	-0.685	-0.381	-0.152	0.778	-0.033

Além das paredes verticais é necessário ainda dividir em zonas a cobertura, dependendo do tipo, utilizando os mesmos parâmetros obtidos anteriormente. Para o caso da cobertura plana do edifício em estudo, o EC1 [20] considera que é uma cobertura em terraço, ou seja, uma cobertura em que a inclinação varia entre -5° e 5° , conforme a Figura 12:

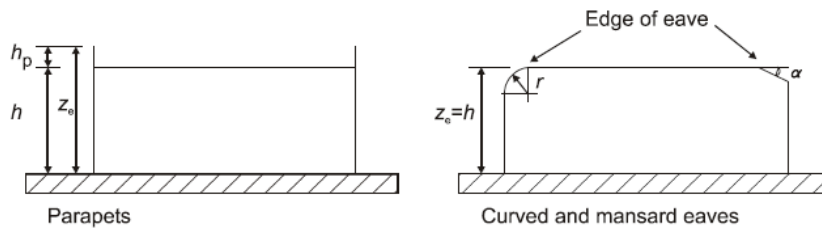


Figura 12 - Tipo de cobertura em terraço [20]

Para uma cobertura em terraço, os zonamentos devem ser feitos conforme a Figura 13:

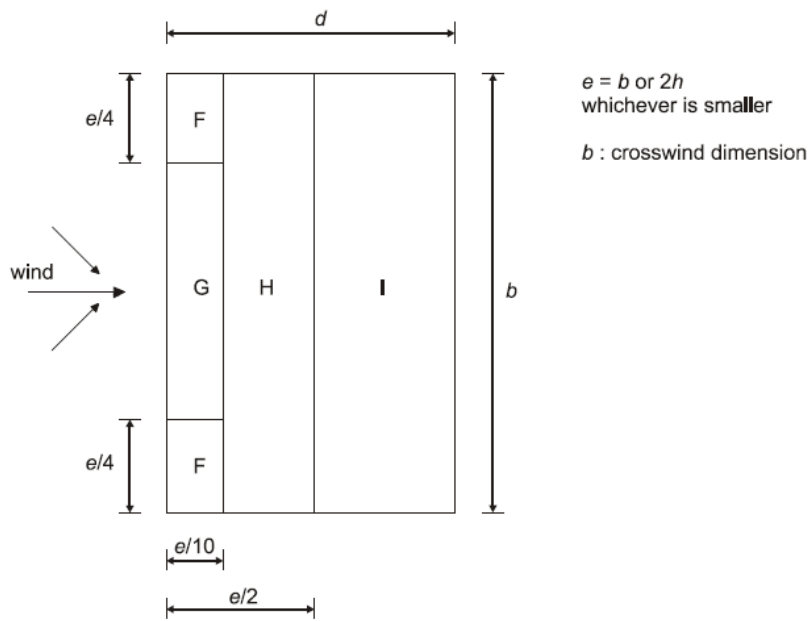


Figura 13 – Zonas de pressão na cobertura [20]

E os coeficientes de pressão ($C_{pe,10}$) foram calculados seguindo a Tabela 13 [20]:

Tabela 13 - Coeficientes de pressão para a cobertura [20]

Tipo de cobertura		Zona							
		F		G		H		I	
		$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
Bordos em aresta viva		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
Com platibanda	$h_p/h=0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
Bordos arredondados	$r/h = 0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8	-0,4		+0,2	-0,2
	$r/h = 0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3		+0,2	-0,2
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3		+0,2	-0,2
Bordos amansardados	$\alpha = 30^\circ$	-1,0	-1,5	-1,0	-1,5	-0,3		+0,2	-0,2
	$\alpha = 45^\circ$	-1,2	-1,8	-1,3	-1,9	-0,4		+0,2	-0,2
	$\alpha = 60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5		+0,2	-0,2

NOTA 1: Para coberturas com platibandas ou com bordos arredondados, poderá ser efectuada uma interpolação linear para valores intermédios de h_p/h e de r/h .

NOTA 2: Para coberturas com bordos amansardados, poderá ser efectuada uma interpolação linear entre $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ e $\alpha = 60^\circ$. Para $\alpha > 60^\circ$, poderá ser efectuada uma interpolação linear entre os valores para $\alpha = 60^\circ$ e os valores para coberturas em terraço com bordos em aresta viva.

NOTA 3: Na Zona I, para a qual são fornecidos valores positivos e negativos, devem ser considerados ambos os valores.

NOTA 4: Para o bordo amansardado propriamente dito, os coeficientes de pressão exterior são fornecidos no Quadro 7.4a "Coeficientes de pressão exterior para coberturas de duas vertentes: direcção do vento 0° ", Zonas F e G, em função da inclinação do bordo.

NOTA 5: Para o bordo arredondado propriamente dito, os coeficientes de pressão exterior são calculados, ao longo do bordo, por interpolação linear entre os valores relativos à parede e à cobertura.

A altura da platibanda da moradia é de 0.50m, e, portanto, h_p/h é 0.10, obtendo-se os $C_{pe,10}$ indicados. As Tabelas 14 e 15 tem o resumo dos valores calculados, conforme a direcção do vento:

Tabela 14 - Pressões obtidas para o Alçado Principal e posterior

Zona	F	G	H	I1	I2
$C_{pe,10}$	-1.2	-0.8	-0.5	0.2	-0.2
We (kN/m2)	-0.913	-0.609	-0.381	0.152	-0.152
Wi (kN/m2)	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152
	-0.228	-0.228	-0.228	-0.228	-0.228
Pressões (kN/m2)	-1.066	-0.761	-0.533	0.000	-0.304
	-0.685	-0.381	-0.152	0.381	0.076

Tabela 15 - Pressões obtidas para o Alçado Lateral direito e esquerdo

Zona	F	G	H	I1	I2
<i>Cpe,10</i>	-1.2	-0.8	-0.7	0.2	-0.2
<i>We (kN/m2)</i>	-0.913	-0.609	-0.533	0.152	-0.152
<i>Wi (kN/m2)</i>	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152
	-0.228	-0.228	-0.228	-0.228	-0.228
Pressões (kN/m2)	-1.066	-0.761	-0.685	0.000	-0.304
	-0.685	-0.381	-0.304	0.381	0.076

3.6 – Combinações

No dimensionamento da estrutura, de acordo com o definido no Eurocódigo 0 [18] foram consideradas as seguintes combinações de ações:

Estados Limites Últimos

Combinação Fundamental:

$$E_d = E \left\{ \sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\}$$

Combinação de ações para situações de projeto sísmicas:

$$E_d = E \left\{ \sum G_{k,j} + A_{Ed} \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \right\}$$

Estados Limites de Serviço

Combinação quase-Permanente:

$$E_d = E \left\{ \sum G_{k,j} + \sum \psi_{2,j} Q_{k,j} \right\}$$

E, como se poderá verificar nas Tabelas 16 e 17, para o vento foi feita as seguintes combinações:

Tabela 16 - Combinação de Ações com base sobrecarga

Estados Limites Últimos (ELU)							
Nº Combinação	Ação Variável Base Sobrecarga "Q"						
	γG*G		γQ*Q		γQ*ψ*W		
	γG	G (kN)	γQ	Q (kN)	γQ	ψ	W (kN)
1º	1,35	G	1,5	Q	1,5	0,6	W Norte
2º	1,35	G	1,5	Q	1,5	0,6	W Sul
3º	1,35	G	1,5	Q	1,5	0,6	W Oeste
4º	1,35	G	1,5	Q	1,5	0,6	W Este
5º	1	G	1,5	Q	1,5	0,6	W Norte
6º	1	G	1,5	Q	1,5	0,6	W Sul
7º	1	G	1,5	Q	1,5	0,6	W Oeste
8º	1	G	1,5	Q	1,5	0,6	W Este

Tabela 17 - Combinação de Ações com base vento

Estados Limites Últimos (ELU)							
Nº Combinação	Ação Variável Base Vento "W"						
	γG*G		γQ*W		γQ*ψ*Q		
	γG	G (kN)	γQ	W (kN)	γQ	ψ	Q (kN)
9º	1,35	G	1,5	W Norte	1,5	1	Q
10º	1,35	G	1,5	W Sul	1,5	1	Q
11º	1,35	G	1,5	W Oeste	1,5	1	Q
12º	1,35	G	1,5	W Este	1,5	1	Q
13º	1	G	1,5	W Norte	1,5	1	Q
14º	1	G	1,5	W Sul	1,5	1	Q
15º	1	G	1,5	W Oeste	1,5	1	Q
16º	1	G	1,5	W Este	1,5	1	Q

Os esforços devido à combinação das componentes horizontais da ação sísmica são calculados utilizando as três combinações seguintes:

$$E_{Edx} "+" 0,3E_{Edy} "+" 0,3E_{Edz}$$

$$0,3E_{Edx} "+" E_{Edy} "+" 0,3E_{Edz}$$

$$0,3E_{Edx} "+" 0,3E_{Edy} "+" E_{Edz}$$

Onde,

"+" - significa "a combinar com";

E_{Edx} , E_{Edy} , E_{Edz} - representa os esforços devido à aplicação da ação sísmica segundo o eixo horizontal x, vertical y, e os esforços devido à aplicação da componente vertical da ação sísmica de cálculo z;

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

4 – Hipóteses de Modelação Estrutural consideradas

4.1 – Introdução

No Capítulo quatro serão apresentadas as diferenças entre as modelações nos dois programas ao nível da introdução da estrutura (modelação), definição e colocação das cargas, combinações e a nível do pré-dimensionamento.

4.2 – Robot Structural

A modelação estrutural da moradia no programa *Robot Structural Analysis 2018* foi feita na opção “casca”. No modelo de casca é possível definir-se elementos de barra para modelar pilares e vigas, mas também de casca para modelar paredes e lajes, chegando-se assim a um modelo o mais próximo possível da realidade através do método dos elementos finitos.

Como tal, os pilares e as vigas foram tratados como elementos barra, o muro de contenção de terras e as lajes de piso foram tratados como elementos de superfície, com uma dimensão de 20 cm, permitindo assim saber os esforços, deslocamentos e as tensões nos elementos em cada malha com maior precisão.

A modelação no programa *Robot Structural Analysis 2018* é facilitada devido à sua interface simples, uma vez que é possível definir-se eixos no início da modelação, tendo sido considerado os eixos ao centro dos pilares em x e y, bem como nas interseções das vigas, e no caso da altura do edifício foi considerado a cota 0 para o piso térreo do edifício, colocando as fundações numa cota negativa (-2.60m) e o teto do rés-do-chão e o teto do primeiro andar em cotas positivas com o respetivo pé direito da moradia. Outra opção para a modelação da estrutura seria importar o ficheiro DWG e colocar nós no centro dos pilares e na zona de união de vigas, no entanto, apesar de ser um método mais simples e rápido, por vezes traz alguns erros que só são visíveis após o cálculo, com pequenos saltos nos diagramas. Ao desenhar a estrutura à mão através das coordenadas dos nós é possível ter-se a certeza que as barras e os pilares estão ligados nos nós certos e corretamente.

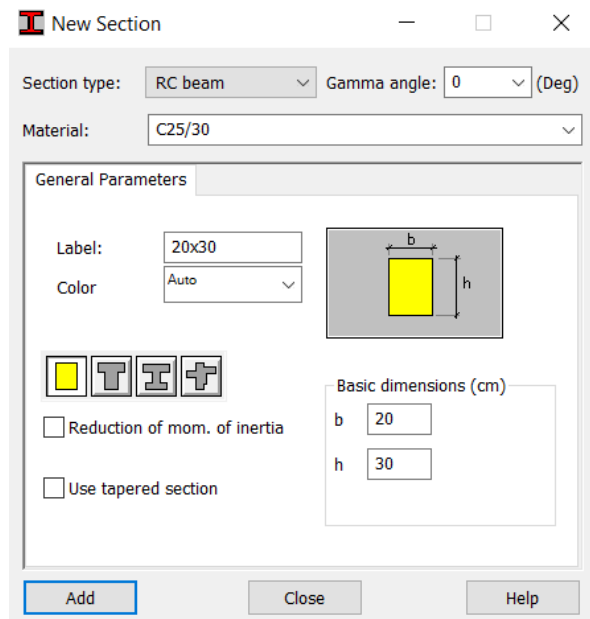


Figura 15 - Definição dos eixos no Robot

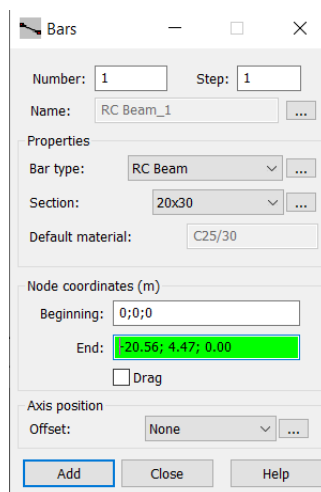


Figura 16 - Desenho das barras (Vigas ou Pilares)

As secções definidas no programa *Robot Structural Analysis* foram, como mencionado no Capítulo três, pré-dimensionadas tendo em conta a verificação ao Estado de Limite de Serviço da deformação, no entanto, depois de calculadas as armaduras, alterou-se a dimensão dos elementos, permitindo assim fazer uma análise comparativa entre os dois programas através das mesmas condições.

Para concluir a modelação no Robot foi ainda necessário definir-se as lajes, os muros de suporte de terras e os apoios.

As lajes são definidas como painéis, após definição do contorno, indicação da espessura e do material, como é possível verificar-se para a Figura 17 e 18. O Robot permite ainda que o utilizador escolha o espaçamento e tipo de malha para os elementos finitos, conforme a Figura 19, dando resultados mais ou menos precisos conforme o espaçamento definido.

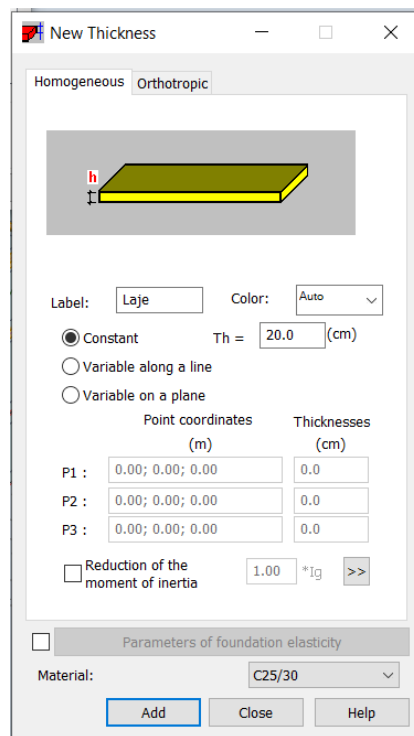


Figura 17 - Definição da espessura do painel (laje ou muro)

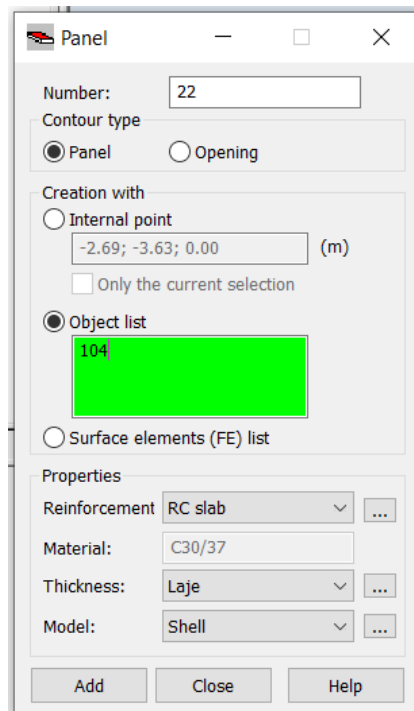


Figura 18 - Colocação do painel no modelo (laje ou muro)

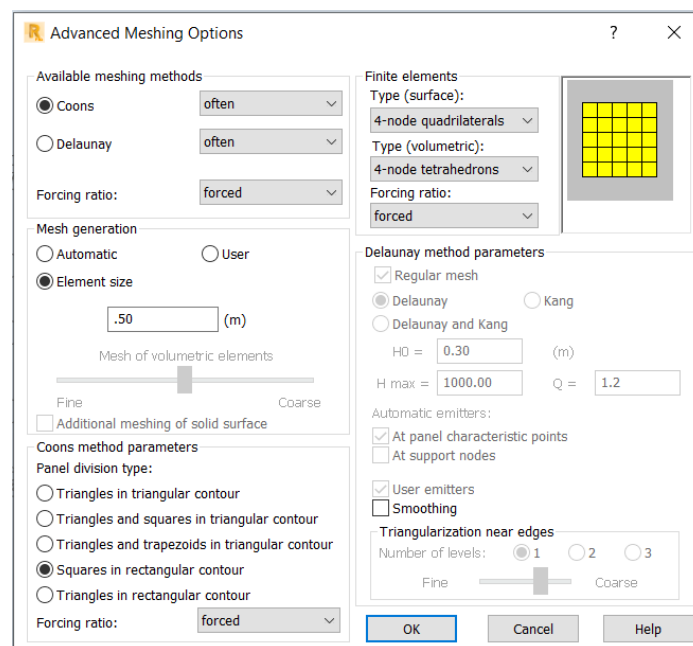


Figura 19 - Definição do espaçamento da malha de elementos finitos

Os apoios definidos foram encastrados, ou seja, a estrutura está fixa e não é permitido qualquer movimento.

A modelação final da estrutura encontra-se representada na Figura 20. Foram ainda colocados *claddings* à volta da estrutura para permitir a aplicação das cargas de vento na estrutura, no entanto, os *claddings* são apenas superfícies de distribuição de cargas, e, portanto, não têm massa nem rigidez.

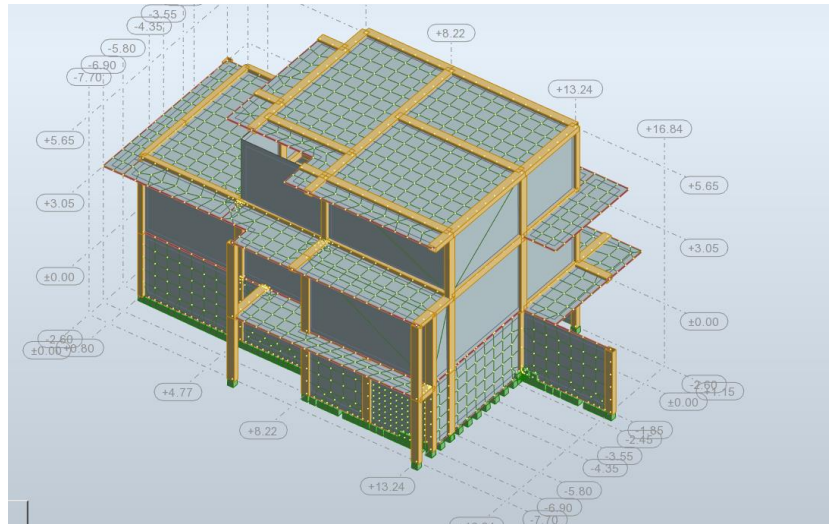


Figura 20 - Modelação Final no Robot

Com a modelação da estrutura concluída, o passo seguinte foi a colocação das cargas definidas no Capítulo três. Para isso, primeiro é necessário definir-se o tipo de carga conforme a Figura 21.

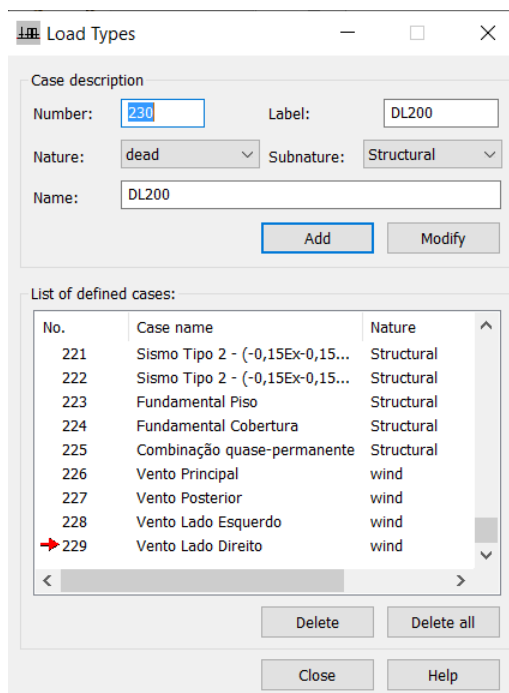


Figura 21 - Definição de carga vento

Depois de definido o tipo de carga, seleciona-se o tipo que se pretende aplicar (por exemplo, as restantes cargas permanentes) e define-se o valor da carga de superfície uniforme para o revestimento do piso, conforme a Figura 22:

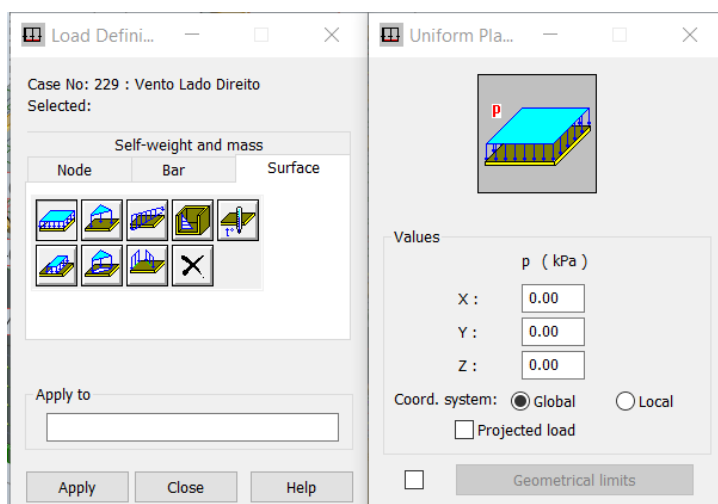


Figura 22 - Definição de uma carga permanente (Revestimento do Piso)

Para o caso da sobrecarga regulamentar e do revestimento do piso, estas foram definidas como cargas uniformes por todo o plano. A carga das paredes exteriores foi definida como sendo uma carga de barra (linear uniforme), conforme a Figura 23, e no caso dos impulsos da água e do solo no muro foram definidos como cargas triangulares, em que no topo do muro da cave é zero, atingindo o máximo valor na máxima profundidade, conforme a Figura 24.

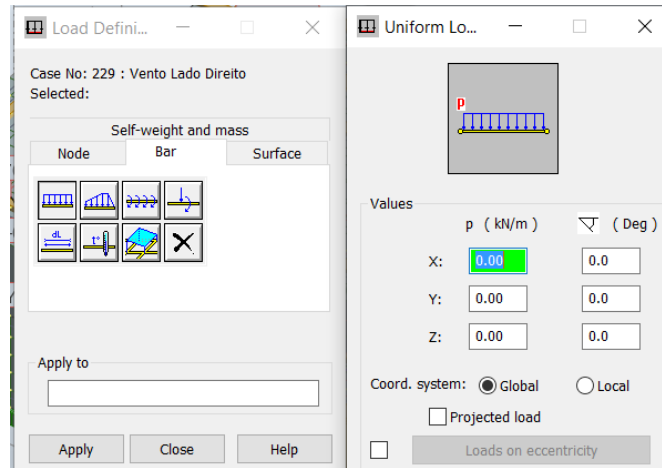


Figura 23 - Definição da carga das Paredes Exteriores

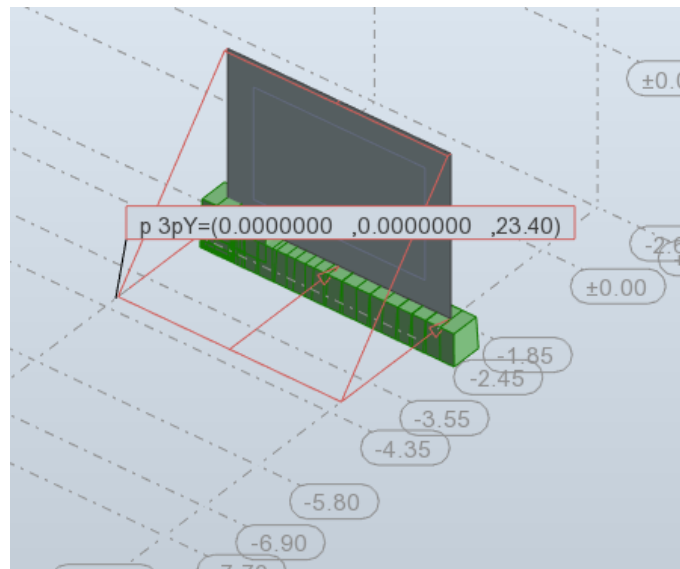


Figura 24 - Impulso de Terras no MST

O peso próprio dos elementos estruturais é calculado automaticamente pelo programa, conforme o volume das secções, e a carga do vento foi colocada da mesma forma que as cargas de superfície mencionadas anteriormente (sobrecarga e restantes cargas permanentes), no entanto, sobre os *claddings* e respeitando as zonas de pressão das fachadas e cobertura definidas no quarto capítulo. Para evitar complicar a modelação, e mesmo a definição de cargas, o zonamento das cargas do vento não foram feitas ao pormenor, mas sempre do lado da segurança, ou seja, as cargas de maior valor foram sempre aplicadas num maior comprimento do que as de menor valor, evitando assim fazer vários *claddings* com diferentes comprimentos nas quatro direcções.

Por fim, o último tipo de carga a definir, mas também uma das mais importantes, é o sismo. No Robot, para definir-se a carga sísmica, primeiro é necessário calcular-se os modos de vibração conforme a Figura 25:

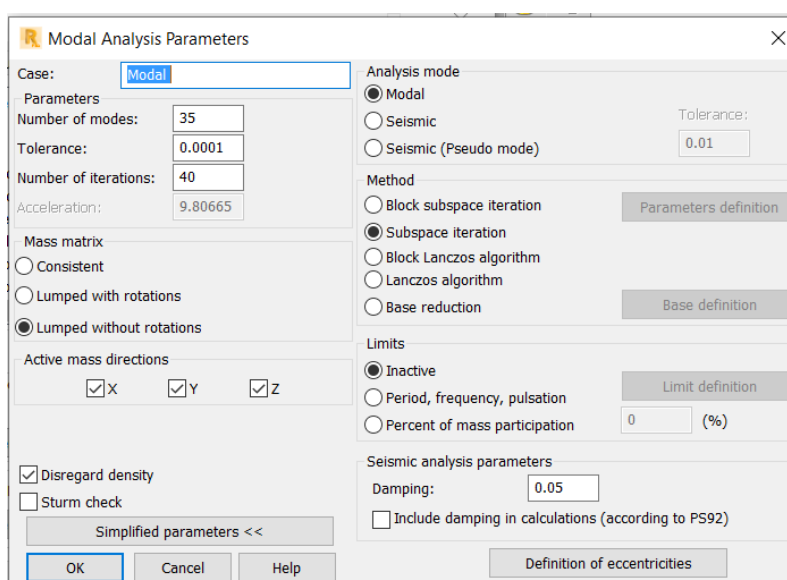


Figura 25 - Definição dos modos de vibração

A análise foi estendida aos 35 modos porque só ao fim de 35 modos é que a estrutura tem 90% ou mais da sua massa a participar em todas as direcções. No entanto, para a análise modal ser feita, primeiro é necessário definir-se as cargas que participam na massa da estrutura, conforme a Figura 26.

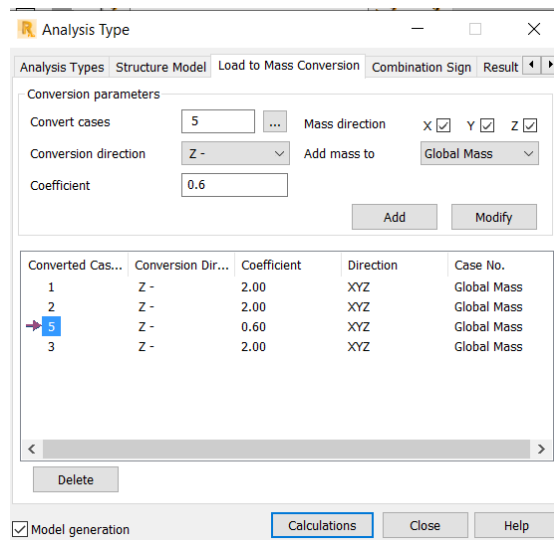


Figura 26 - Definição das cargas que fazem parte da massa

As cargas a participar são a do peso próprio, as restantes cargas permanentes, o impulso de terras (o de água foi considerado variável), e a sobrecarga regulamentar com um coeficiente de 0.3. A razão pela qual os coeficientes estão definidos como “2.0” e “0.6”, ao invés dos fatores corretos “1.0” e “0.3” deve-se à necessidade de, para o cálculo das frequências no Robot, ser necessário considerar-se metade da rigidez.

Para se considerar metade da rigidez, a forma mais rápida é considerando o dobro da massa. No entanto, na comparação de deslocamentos, é necessário ter-se em atenção que os valores a considerar deverão ser metade dos que se encontram representados nos diagramas, principalmente na comparação do deslocamento relativo entre pisos (*drift*).

Com as frequências calculadas é possível definir-se a carga do sismo na estrutura. Na Figura 27, 28 e 29 é possível verificar-se o procedimento para um caso de sismo tipo 1, nas condições mencionadas no Capítulo três.

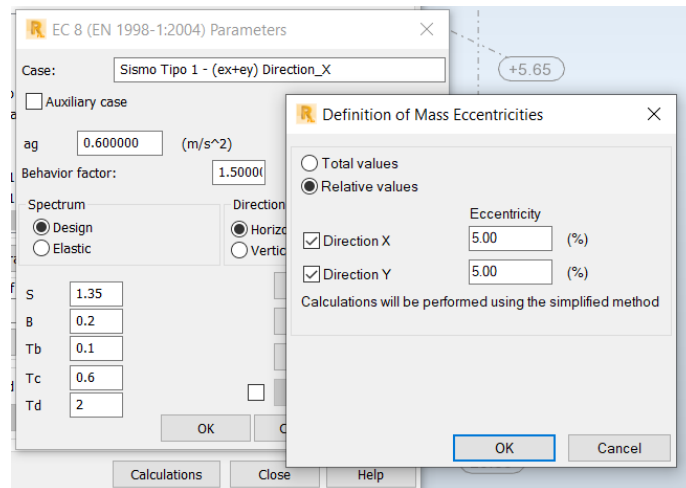


Figura 27 - Definição da excentricidade da massa

Consideraram-se excentricidades de 5% para cada direção do tipo 1 e do tipo 2 da seguinte forma:

- Sismo tipo 1 – (ex+ey), ou seja, (+5%; +5%)
- Sismo tipo 1 – (-ex+ey), ou seja, (-5%; +5%)
- Sismo tipo 1 – (ex-ey), ou seja, (+5%; -5%)
- Sismo tipo 1 – (-ex-ey), ou seja, (-5%; -5%)

As combinações a utilizar estão conforme o definido no capítulo três, como se pode verificar na Figura 28:

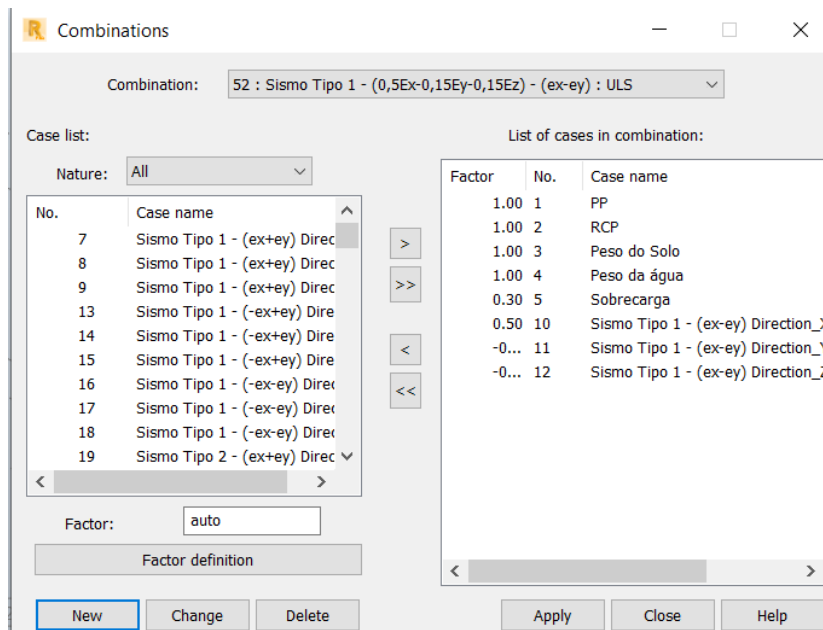


Figura 28 - Combinação manual para o sismo

Para se considerar todos os casos possíveis para cada tipo de sismo no Robot, foram consideradas 192 combinações, sendo que para cada tipo de excentricidade definido foi feita uma combinação considerando as três excentricidades em x, y e z, com coeficientes de 1 e 0.3 conforme a situação. Mais uma vez, devido há consideração do dobro da massa na conversão das cargas para massa, os coeficientes tiveram de ser reduzidos para metade, ou seja, 0.5 para cada direção principal do sismo e excentricidade a considerar, 0.30 para as restantes direções.

4.3- Tricalc

Ao contrário do Robot, o Tricalc é um programa com uma modelação um pouco mais fechada, ou seja, não permite tanta diversidade e métodos de modelar a estrutura. Enquanto que no Robot a modelação é simples, utilizando elementos barra tanto para pilares, como para lintéis de fundação, como para vigas estruturais, o tricalc possui cada um destes em separado e definido de forma diferente. Para iniciar a modelação foi necessário introduzir as plantas dwg preparadas com a conceção da estrutura, e introduzir nós em cada ponto de nascimento dos pilares, conforme a Figura 29.

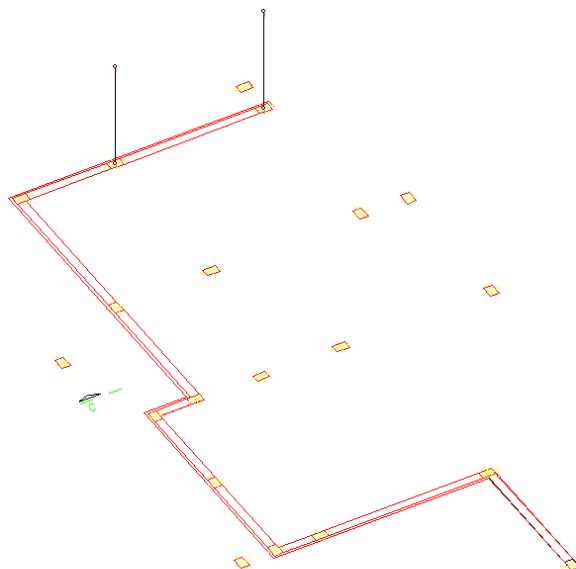


Figura 29 - Introdução dos nós

Para fazer um pilar é necessário fazer a translação do nó (Figura 30), indicando a altura até ao outro piso, e seleccionar todos os nós que se encontravam no centro dos pilares como na imagem acima.

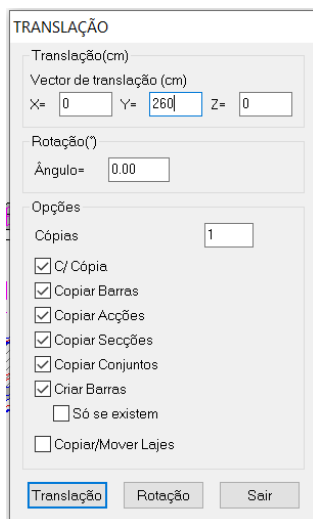


Figura 30 - Translação dos nós

No Tricalc além da colocação de apoios encastrados nas fundações, foi necessário introduzir as opções “Sapatas Isoladas” ou “Sapatas Combinadas” (conforme o tipo de sapata) debaixo dos respetivos pilares. Não foram utilizados lintéis de fundação para que a modelação fosse o mais próximo do modelo do Robot possível.

Além disso, no Robot utiliza-se elementos casca para definir todos os elementos em que seja utilizado o método dos elementos finitos, seja paredes de cave, vigas-parede, lajes maciças, enquanto que no Tricalc cada opção é restrita. Por exemplo, ao selecionar uma laje maciça, o utilizador seleciona o espaçamento das nervuras, as cargas superficiais, a altura e a utilização (ou não) de vigas no contorno da laje (designado pelo programa de vigas de laje fictícias). Estas vigas de laje, mesmo sendo fictícias, não podem estar sobrepostas com as vigas normais, o que obrigou a uma certa adaptação. Como tal, primeiro colocou-se a laje e só depois fizeram-se a ligação dos pontos onde se encontram as vigas, definindo a opção “vigas de laje”. Todas as vigas que não estivessem no interior da laje é que poderiam ser definidas como vigas normais. O Tricalc faz ainda a conversão de todas as vigas no interior da laje em vigas de laje de forma automática, e, caso tenham a mesma altura que a laje, faz a sua discretização.

Além disso, em geral, só se pode colocar uma laje maciça por piso, exceto se houver mudança de espessura de laje ou a preferência de diferentes armaduras-base. Como se pode verificar na Figura 31, é possível ainda, colocar as cargas superficiais existentes logo na definição da laje.

Figura 31 - Definição de lajes

No Robot é aconselhado que as lajes maciças sejam modeladas entre cada contorno de vigas, ou seja, evitar a colocação de uma laje maciça geral, uma vez que ao colocar-se a malha de elementos finitos, muitas das vezes existe erros na malha, nas zonas das vigas, em que deixa de ter a forma de quadrados, passando a ser triângulos, e aparece certas irregularidades. Ao contrário do Robot, o Tricalc utiliza o método de grelha para definir as lajes, pelo que não faz diferença.

Por fim, outra diferença é a colocação dos muros de cave. Mais uma vez, o Tricalc permite definir os muros de cave colocando a espessura, a cota do terreno e definindo o tamanho mínimo da sapata como é possível verificar-se na Figura 32, além de colocar os impulsos das terras e água de forma automático, permitindo ao utilizador definir os diferentes estratos como é possível verificar-se na Figura 33.

Introduzir Muro de Cave / Muro de Contenção

Alturas e Espessuras Mínimas			Muros de cave sobre lajes			
Tramo	Cotas (cm)		Espessura	Posição	Dimensões vigas	
Altura (cm)	Superior	Inferior	na cota st	Cota (cm)	Largura (cm)	Altura
260		-260				

Fixar base Fixar coroamento Larg. acordo espessura muro

Nome: MST1
 Posicionamento: Centrada

Tipo de Muro:
 Muros de Cave
 Muro de contenção (em consola)

Sapata:
 Altura mínima: 30 cm
 Com Ponteira Comprimento mínimo: 0 cm
 Com Calcanhar Comprimento mínimo: cm
 Com Tacão Espessura mínima: cm
 Altura mínima: cm
 Posicionamento: Como o Fuste

Figura 32 - Introdução dos Muros de Cave

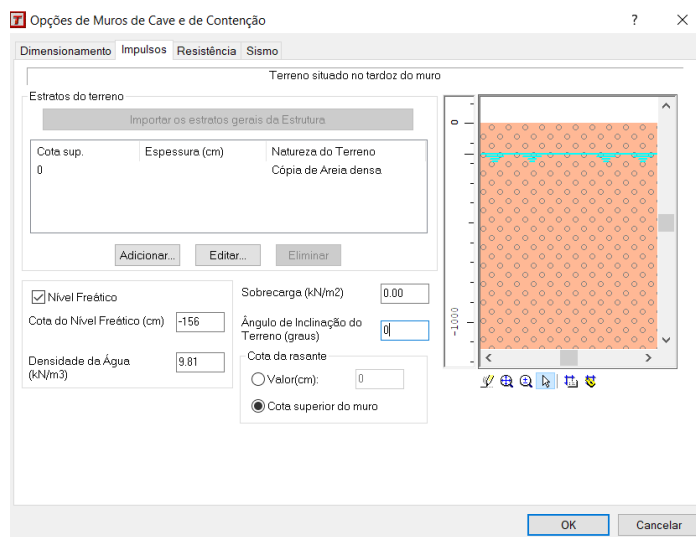


Figura 33 - Definição de Impulsos no Tricalc

O programa permite definir o nível freático, os impulsos, as sobrecargas, os vários estratos do terreno, e até mesmo o ângulo de inclinação do terreno. Sendo isto um caso-exemplo, assumiu-se a existência de nível freático até 40% da altura do muro de cave (permitindo assim alguma segurança). No entanto, mais uma vez é possível verificar-se que é um programa fechado, já que não permite ao utilizador ser ele próprio a colocar os impulsos, o que transmitiria mais confiança na fase de comparar resultados.

No caso do Tricalc, é obrigatório a colocação de “viga” com ficha pré-definida por cima dos muros de suporte de terras, que são secções com armadura já definida escolhida pelo utilizador de uma lista existente como é possível verificar-se na Figura 34:

Selecionar ficha

Nome	Secção	Arm. Superior	Arm. Inferior	Arm. Alma	Estribos	Rigidez Torção(%)
1010FA	BET 10x10	2ø10	2ø10		1esta8//0.30	100
1010TA	BET 10x10	2ø10	2ø10		1esta8//0.15	100
1015FA	BET 10x15	2ø10	2ø10		1esta8//0.30	100
1015TA	BET 10x15	2ø10	2ø10		1esta8//0.15	100
1020FA	BET 10x20	2ø10	2ø10		1esta8//0.30	100
1020TA	BET 10x20	2ø10	2ø10		1esta8//0.15	100
1515FA	BET 15x15	2ø10	2ø10		1esta8//0.30	100
1515FB	BET 15x15	2ø12	2ø12		1esta8//0.30	100
1515TA	BET 15x15	2ø10	2ø10		1esta8//0.15	100
1515TB	BET 15x15	2ø12	2ø12		1esta8//0.15	100
1520FA	BET 15x20	2ø10	2ø10		1esta8//0.30	100
1520FB	BET 15x20	2ø12	2ø12		1esta8//0.30	100
1520TA	BET 15x20	2ø10	2ø10		1esta8//0.15	100
1520TB	BET 15x20	2ø12	2ø12		1esta8//0.15	100
1525FA	BET 15x25	2ø10	2ø10		1esta8//0.30	100
1525FB	BET 15x25	2ø12	2ø12		1esta8//0.30	100
1525FC	BET 15x25	2ø16	2ø16		1esta8//0.30	100
1525TA	BET 15x25	2ø10	2ø10		1esta8//0.15	100
1525TB	BET 15x25	2ø12	2ø12		1esta8//0.15	100
1525TC	BET 15x25	2ø16	2ø16		1esta8//0.15	100
2020FA	BET 20x20	2ø10	2ø10		1esta8//0.30	100
2020FB	BET 20x20	2ø12	2ø12		1esta8//0.30	100
2020FC	BET 20x20	2ø16	2ø16		1esta8//0.30	100

ACEITAR Cancelar

Figura 34 - Fichas com armadura estabelecida para vigas

Como no topo do muro de cave não vai existir viga, o Tricalc solicita ao utilizador que escolha uma armadura e secção, uma vez que não calcula essa armadura. No caso do Robot essas vigas não foram colocadas, assumindo-se a colocação da mesma secção e da mesma armadura no seu contorno.

Importante reforçar que os pré-dimensionamentos foram alterados após o primeiro cálculo Tricalc, uma vez que o programa avisa que algumas secções precisavam de ser alteradas por não verificarem certos Estados Limites. Alguns erros obtidos são como os que se encontram na Figura 35.

```

Plano : 305
Laje L4: É necessário introduzir armadura transversal
Plano : 565
Não se Encontraram Erros
Plano : 0
Vigas de Laje ( ) 2535TB BET 25x35 (3564 - 3568) Resistência ao Esforço Transverso (estribos insuficie...
Vigas de Laje ( ) 2535TB BET 25x35 (3569 - 3576) Resistência à torsão e esforço transversal (esgotament...
Vigas de Laje ( ) 2535TB BET 25x35 (3618 - 3626) Resistência à torsão e esforço transversal (esgotament...
Vigas de Laje ( ) 2535TB BET 25x35 (3651 - 3653) Resistência à torsão e esforço transversal (esgotament...
Vigas de Laje ( ) 2535TB BET 25x35 (3666 - 3669) Resistência à torsão e esforço transversal (esgotament...
Vigas de Laje ( ) 2535TB BET 25x35 (3684 - 3692) Resistência da armadura longitudinal
Resistência a Torsão (esgotamento betão)
Resistência ao Esforço Transverso (estribos insuficie...

```

Figura 35 - Caixa de erros Tricalc

Por exemplo, para evitar a introdução de armadura transversal na laje L4, aumentou-se a espessura diminuindo o efeito do transversal na laje. No caso das vigas de laje que não tinham resistência suficiente à torsão e esforço transversal a solução passa pela

escolha de novas armaduras e secções, diminuindo, por exemplo, o espaçamento entre estribos.

A definição das ações das paredes exteriores nas vigas é feita de forma semelhante ao Robot (Figura 36), no entanto, no caso do sismo e do vento o programa Tricalc faz os cálculos todos automaticamente.

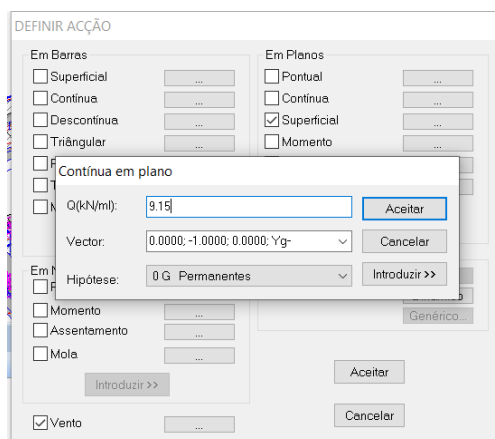


Figura 36 - Definição de cargas no tricalc

Como é possível verificar-se na Figura 37, define-se os parâmetros gerais do sismo referente à zona em questão, mas só é possível analisar cada tipo de sismo de forma individual. Através dos espectros e do Robot verificou-se que o mais desvantajoso era o tipo 2, pelo que só se fez a verificação para o tipo 2 para esta modelação. O valor de aceleração sísmica de referência é dado pelo quociente entre a aceleração sísmica de referência (1.1) [2] pela aceleração gravítica (9.81), dando um valor aproximado de 0.11.

Opções de sismo EN 1998-1:2004

Localização da estrutura

Aceleração sísmica de referência $agR/g =$

Natureza do Terreno

Massas que intervêm no sismo

Utilizar os valores da Norma

Coeficiente redutor η

Fracção das sobrecargas

Fracção acção da neve

Fracção das acções móveis

Tipo de espectro

Tipo 1 Tipo 2

Outros

Cota do terreno cm

Considerar acção sísmica vertical

Tipo de Estrutura

Ductilidade ou capacidade de dissipar energia

Classe de Importância

Material do sistema estrutural contra sismo

Tipologia do sistema estrutural contra sismo

A estrutura é regular em planta
 A estrutura é regular em altura

Factor de comportamento automático

Valor básico do factor de comportamento, q_0

Factor de comportamento, q

Figura 37 - Definição do sismo no Tricalc

Ao retirar as opções de a estrutura ser regular em planta e em altura, uma vez que no caso da nossa estrutura ela é irregular, o comportamento sísmico é diretamente influenciado como se irá verificar no próximo capítulo.

O vento é definido indicando as direções a considerar, o tipo de distribuição e a superfície atuante, conforme a Figura 38.

Acção de vento (Maiús+w)

Direcção

	Vector:	Hipóteses:	Dados:
<input checked="" type="checkbox"/> 1	<input type="text" value="1.0000; 0.0000; 0.0000; Xg+"/>	<input type="text" value="3 W1 Vento"/>	<input type="text" value="..."/>
<input checked="" type="checkbox"/> 2	<input type="text" value="0.0000; 0.0000; 1.0000; Zg+"/>	<input type="text" value="4 W2 Vento"/>	<input type="text" value="..."/>
<input checked="" type="checkbox"/> 3	<input type="text" value="-1.0000; 0.0000; 0.0000; Xg-"/>	<input type="text" value="25 W3 Vento"/>	<input type="text" value="..."/>
<input checked="" type="checkbox"/> 4	<input type="text" value="0.0000; 0.0000; -1.0000; Zg-"/>	<input type="text" value="26 W4 Vento"/>	<input type="text" value="..."/>

Superfícies

Guardar superfície de vento

Nome:

Distribuição

Contínua
 Pontual

Superfície actuante

Fachada
 Estrutura

Separação (cm)

Repartir sobre barras fictícias
 Repartir sobre tirantes

Figura 38 - Definição do vento no tricalc

Para cada direção é possível indicar-se a pressão dinâmica de pico, conforme a Figura 39.

Figura 39 - Pressão dinâmica do pico no tricalc

No final da modelação da estrutura e das ações, o Tricalc possui ainda um sistema semelhante ao Robot, de correção de erros, que permite ao utilizador perceber caso tenha feito algo indesejado, por exemplo, uma união de viga e pilar errado. Como se pode verificar na Figura 40, o programa avisa que existe uma ação superficial que se fora da laje, o que não faz sentido.

```

⚠ PLANO 305: Parte da secção está fora do ábaco, barra: 24
⚠ PLANO 305: Parte da secção está fora do ábaco, barra: 28
⚠ Viga de laje contida em vários pórticos. Viga de laje 65. Porticos P23, P24
⚠ PLANO 305: Acção Superficial 2 Fora da laje
⚠ MuroMST0 sem barras ou vigas de laje em parte do seu perímetro lateral e/ou superior
⚠ MuroMST4 sem barras ou vigas de laje em parte do seu perímetro lateral e/ou superior
*****
0 Erro(s)
6 Advertência(s)
*****

```

Figura 40 - Caixa de erros geométricos Tricalc

Na Figura 41 é possível verificar-se o modelo 3D do Tricalc:

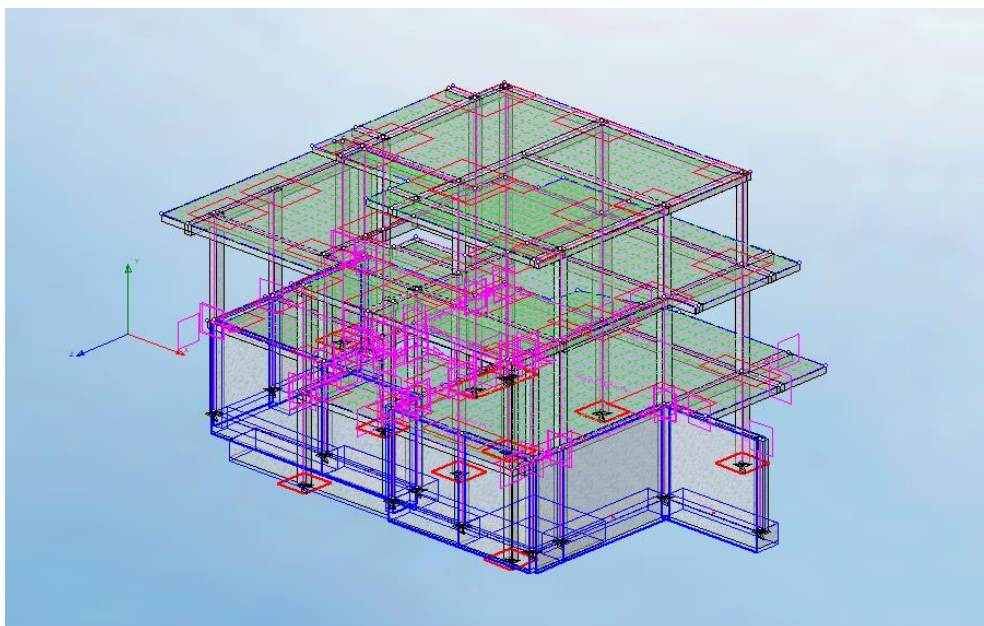


Figura 41 - Modelo 3D Tricalc

Com as modelações feitas nos dois programas foi possível passar-se para a fase principal do trabalho, a comparação dos resultados.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

5 - Comparação entre Resultados

5.1 – Introdução

Com as modelações feitas de forma semelhante, com as mesmas cargas aplicadas e a mesma estrutura, é possível executar-se uma comparação fiável entre os resultados dos dois programas, não só ao nível de esforços e deformações, mas também ao nível de dimensionamento.

Serão comparados os seguintes elementos:

- A Sapata SP4;
- O Pilar P3;
- O MST3;
- O Pórtico 1 do teto do rés r/c;
- A Laje estrutural da cobertura;

Para cada um dos elementos será utilizada a combinação mais desfavorável, ou seja, a combinação que seria utilizada no dimensionamento do elemento. Mais uma vez, e devido há diferença entre os dois programas, nem sempre será possível escolher a mesma combinação nos dois, uma vez que algumas combinações foram tratadas automaticamente pelo Tricalc, enquanto que no Robot foram todas colocadas manualmente. Para as deformações, a combinação a utilizar será a quase-permanente nos dois programas.

Além disso, irá verificar-se a diferença entre os modos de vibração considerados em cada um dos casos.

5.2 - Lajes

Ao contrário dos outros elementos modelados, a laje é considerada de forma diferente nos dois programas: No Robot a laje é tratada com elemento de casca, e o Tricalc 7.5 utiliza elementos de grelha.

5.2.1 – Deslocamentos verticais

Na análise de uma laje, um dos aspetos mais importantes são os deslocamentos verticais, uma vez que estão diretamente relacionados com a deformação da laje, e, portanto, deverá ser inferior ao valor máximo mencionado nos regulamentos para que não afete o funcionamento do edifício nem o conforto dos futuros moradores.

Na Figura 42 e 43 é possível verificar-se o desenho dos mapas a cores, com escalas semelhantes, para o deslocamento de cada ponto da laje de cobertura.

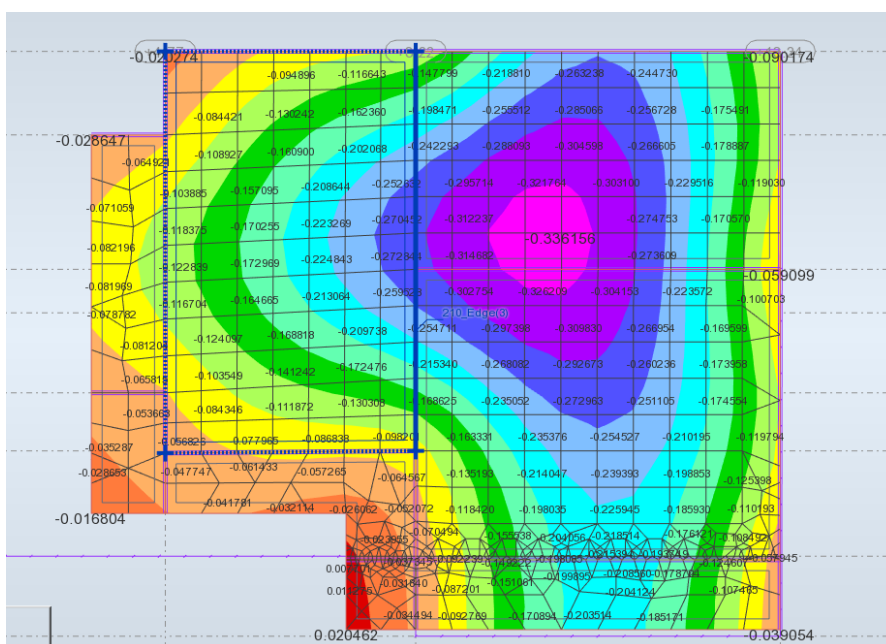


Figura 42 – Deslocamento vertical na laje da cobertura Robot (cm)

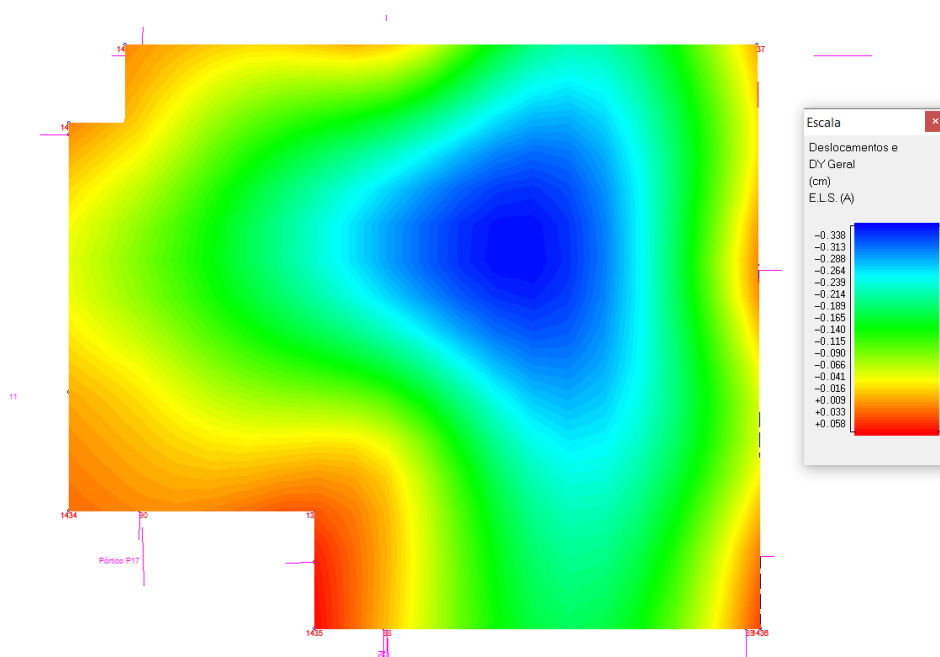


Figura 43 – Deslocamento vertical na laje da cobertura Tricalc (cm)

É possível verificar-se pelos desenhos que os valores dos deslocamentos verticais são muito semelhantes nos dois programas, tanto ao nível da localização dos pontos, como no próprio deslocamento em si. Por exemplo, verifica-se para o valor máximo de deslocamento vertical no Robot que, na zona a roxo, existe um deslocamento vertical de 0.336 cm, enquanto que o valor máximo de deslocamento vertical, representado no Tricalc pela cor azul, é de 0.338 cm.

Outro aspeto a verificar-se nos dois programas é o levantamento da laje nos cantos, representado a vermelho no Robot e no Tricalc, como seria de se esperar uma vez que as cargas na cobertura para a combinação quase-permanente são, na sua grande maioria, cargas verticais com sentido de cima para baixo, o que implica que a laje abaixe na zona do meio e levante nas pontas.

5.2.2 – Esforços

Segundo o EC2 [16], para o dimensionamento correto de uma laje em betão armado aos Estados Limites Últimos, é necessário saber-se os seguintes esforços:

- Momento Fletor em cada uma das direções;
- Esforço Transverso máximo;

Em lajes que forem consideradas armadas em uma direção, ou seja, o quociente entre o lado maior e o lado menor é superior ou igual a dois, o EC2 [16] permite o cálculo da armadura para a direção principal do momento fletor e 20% da armadura principal, na outra direção, designada por armadura de distribuição. Além disso, seriam calculadas as respectivas armaduras de canto e armaduras de bordo livre, evitando o levantamento nas zonas dos apoios. Com o aparecimento de métodos numéricos, é possível saber o esforço em cada ponto da laje, pelo que já não se justifica o cálculo de armaduras de canto, bordo livre e armadura de distribuição à parte, mas ao invés disso analisar-se a laje como um todo, armada nas duas direções, e colocar-se uma armadura igual base nas duas direções com reforços nas zonas de maior esforços. Os programas modernos, como o CYPE e o Tricalc, já o fazem automaticamente, permitindo ainda ao utilizador do software escolher a própria armadura base se assim preferir. Então, para este trabalho, o dimensionamento da laje foi feito de forma semelhante ao procedimento que será feito pelo Tricalc automaticamente.

Outro esforço a considerar é o esforço transversal nas lajes. Apesar de não ser comum a utilização de armaduras de esforço transversal nestes elementos, deve-se verificar o esmagamento do betão nas zonas em que o esforço é máximo. Normalmente a solução passa pelo aumento da espessura de laje, como foi feito neste trabalho.

5.2.1.1 – Momentos Flectores

Na Figura 44 e 45 é possível verificar-se os valores do momento fletor na direção xx, tanto no Tricalc como no Robot.

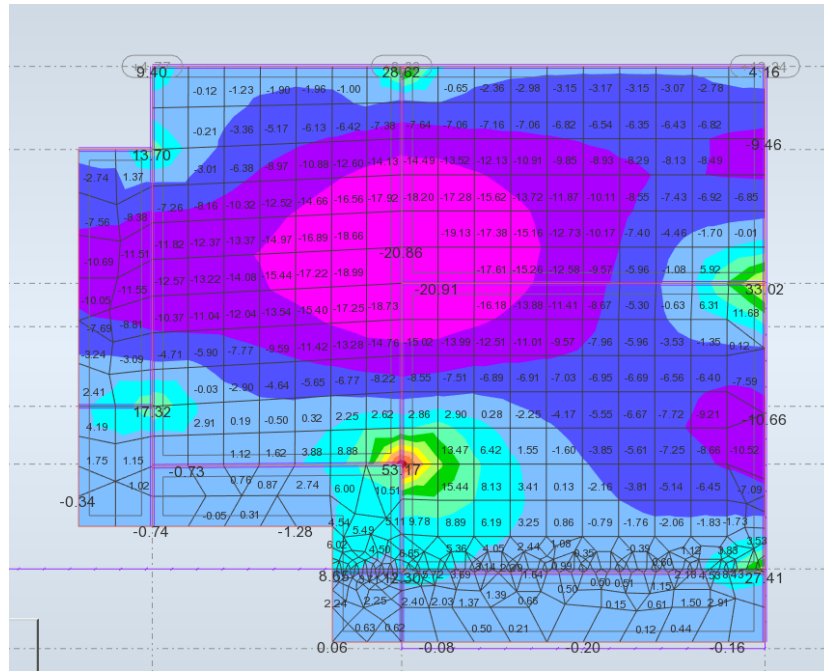


Figura 44 - Momentos direção x na laje da cobertura Robot (kNm/m)

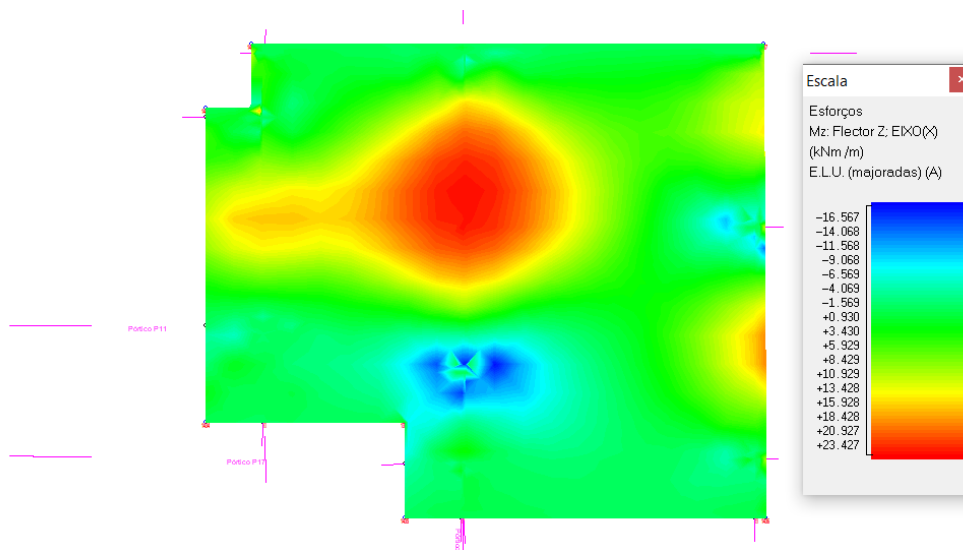


Figura 45 - Momentos direção x na laje da cobertura Tricalc (kNm/m)

Para o momento fletor na direção x, observando os dois mapas de laje, é possível verificar-se a semelhança entre a posição dos valores extremos. O sinal dos esforços é diferente nos dois programas, uma vez que os momentos superiores estão como positivos no Tricalc e como negativos no Robot.

O momento superior de pico nas lajes na zona assinalado era esperado, uma vez que se trata de uma zona em que não existe pilar, tendo sido utilizado uma viga como apoio para outra viga (apoio indireto), e por conta deste pico, é possível observar-se um momento inferior elevado em outra zona com apoio indireto logo abaixo.

Em termos de comparação de valores, para o momento superior no Robot verifica-se um momento de 20.86 kNm/m e no Tricalc um momento de 23.43 kNm/m, ou seja, mais uma vez valores extremos muito aproximados. No entanto, o valor de pico do momento inferior no Robot é de 53.17 kNm/m e no Tricalc de 16.57 kNm/m. Tendo em conta que esse valor de pico do momento inferior se encontra definida na mesma posição dos dois mapas de laje, significa que a diferença entre os valores poderá ser devido a dois motivos:

- A forma como os dois programas modelam a laje, ou seja, o método de elementos finitos e o método de grelha.
- O Tricalc considera as vigas como fazendo parte da laje, ou seja, como sendo um só elemento, enquanto que o Robot trata as vigas e as lajes como elementos diferentes, utilizando a discretização das malhas para a compatibilização.

Isto significa que o valor apresentado no Robot poderá ser exagerado, uma vez que após o cálculo da armadura superior nas duas vigas que se cruzam, esse valor deverá ficar mais baixo. É devido a isso que, no cálculo de estruturas em betão armado, na análise de elementos casca normalmente não se utilizam os valores de pico definidos em zonas como cruzamentos ou de ligação entre pisos, mas sim nos valores extremos que se encontram no centro dos elementos.

Outra diferença identificada é que o Robot apresenta mais valores de pico em cruzamentos de viga que nem sequer são identificados no mapa de laje do Tricalc, mais uma vez reforçando a provável falta de consideração da parte do Robot em tratar as vigas como elementos resistentes àqueles elementos.

Analisando agora a direção yy, nas Figuras 46 e 47 é possível verificar-se os momentos fletores nessa direção para o Robot e Tricalc respetivamente.

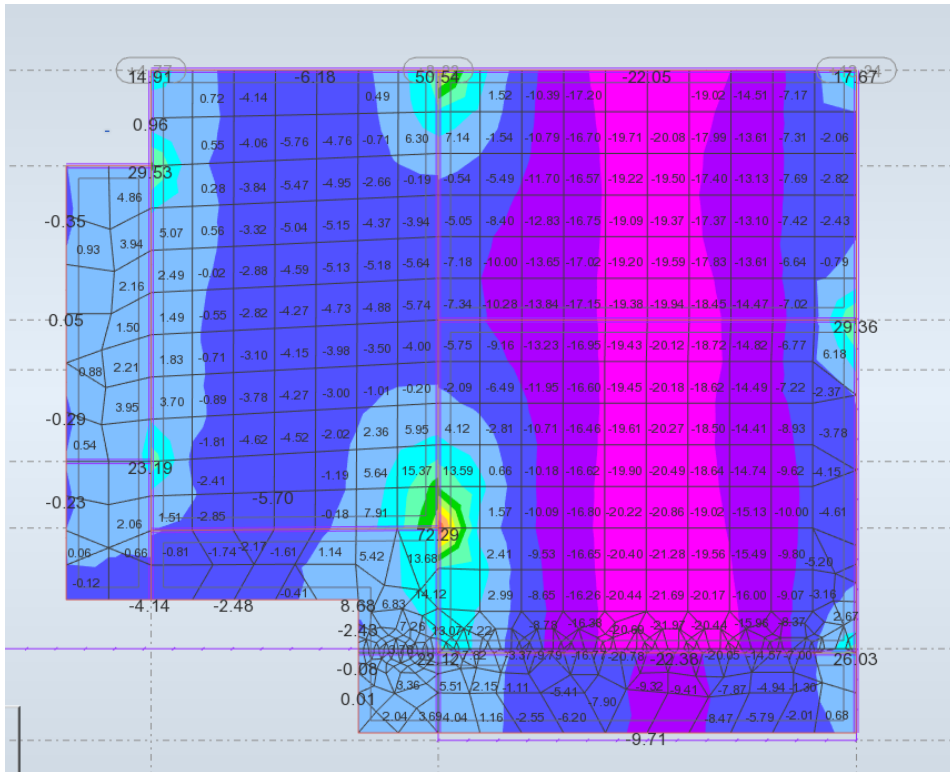


Figura 46 - Momentos direção y na laje da cobertura Robot (kNm/m)

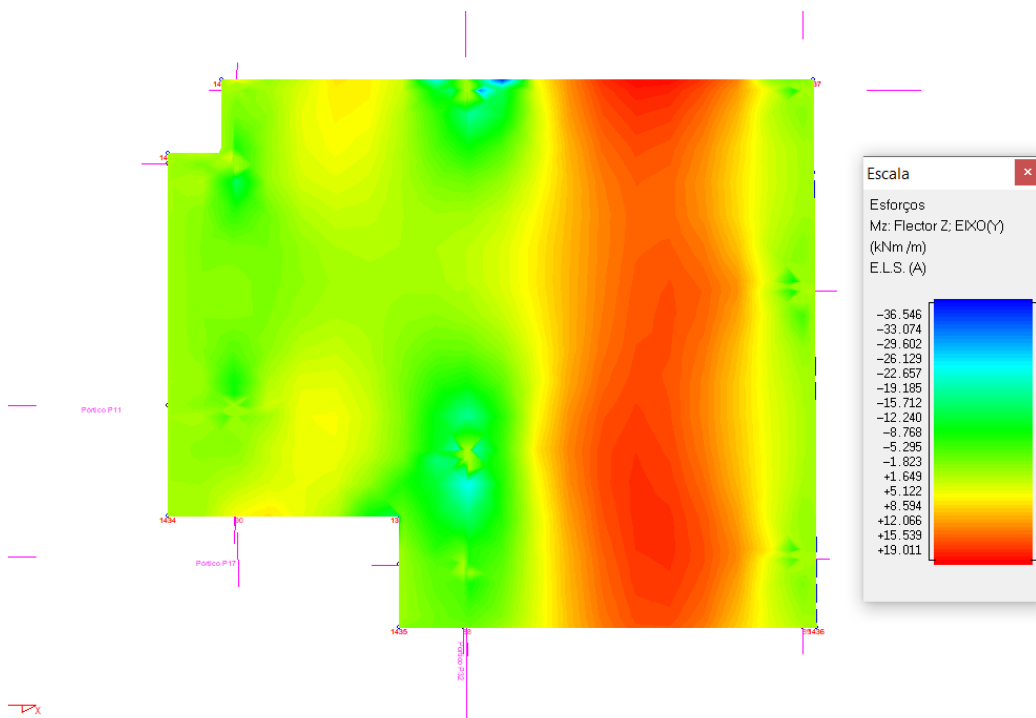


Figura 47 - Momentos direção y na laje da cobertura Tricalc (kNm/m)

Em termos de desenho, mais uma vez existe uma semelhança muito grande entre os dois programas. A zona a roxo representa os momentos superiores maiores no Robot, tal como a zona vermelha no Tricalc. Os pontos de tração, com grandes momentos inferiores, marcados a azul e azul escuro no Tricalc, estão marcadas a laranja no Robot exatamente no mesmo ponto.

Tal como na direção anterior, é possível verificar-se que enquanto o valor de momento fletor extremo superior é muito semelhante, 19.01 kNm/m no Tricalc e 22.05 kNm/m no Robot, nos pontos de tração a diferença é maior, sendo 36.54 kNm/m no Tricalc e 72.29 no Robot. Coincidentemente, ocorre novamente nas zonas de cruzamento de vigas, pelo que as razões propostas anteriormente para a direção x são iguais para a direção y.

Considerando apenas as zonas centrais das lajes, as zonas de momentos superiores e inferiores estão semelhantes nos dois programas.

5.2.1.2 - Esforços Transversos

Tal como indicado anteriormente, apesar de não ser comum a existência de armadura de esforço transversal em lajes vigadas, a verificação ao esmagamento é muito importante, uma vez que o cisalhamento é uma das formas de rotura de uma laje.

Como tal, efetuou-se também a comparação entre os valores de esforço transversal obtidos na laje de cobertura nos dois programas. Na Figura 48 e 49 é possível verificar-se os valores de esforço transversal na direção x, para o Robot e Tricalc respetivamente.

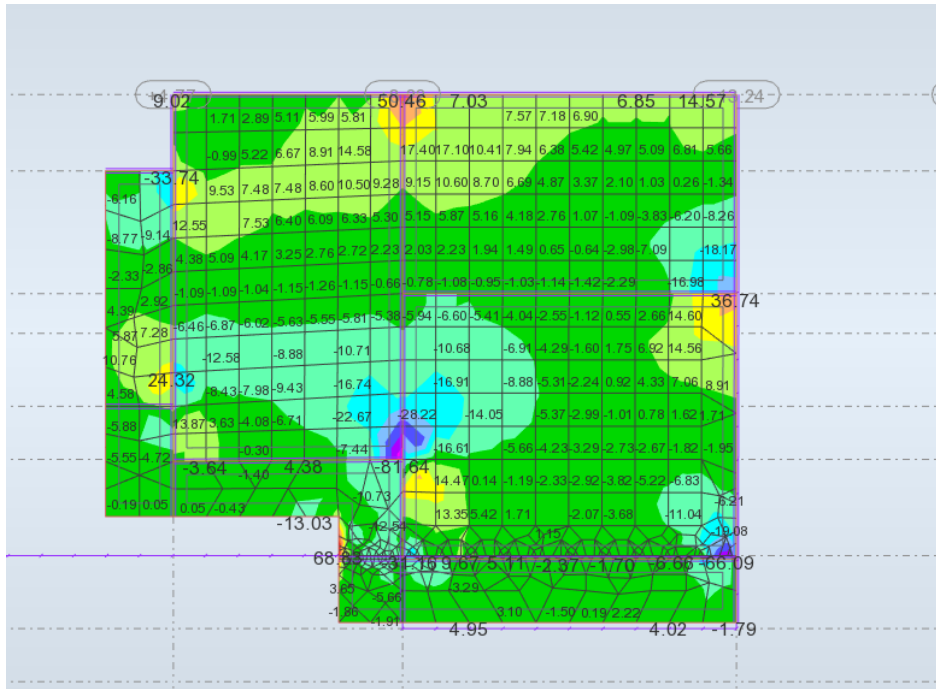


Figura 48 - Esforço Transverso direção x na laje da cobertura Robot (kN/m)

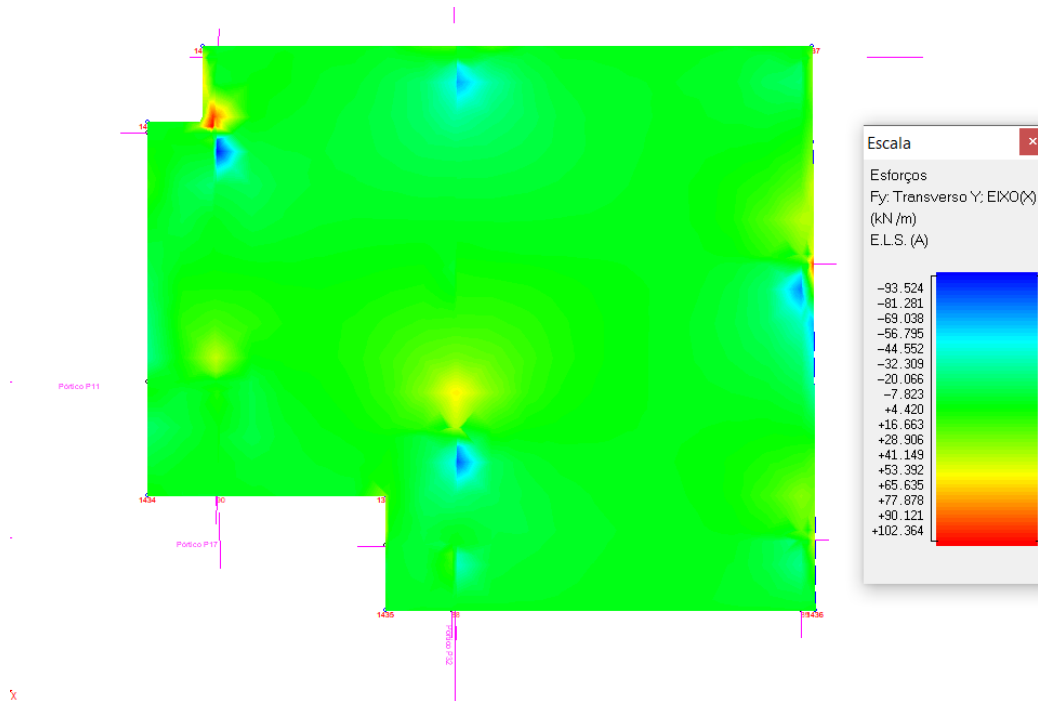
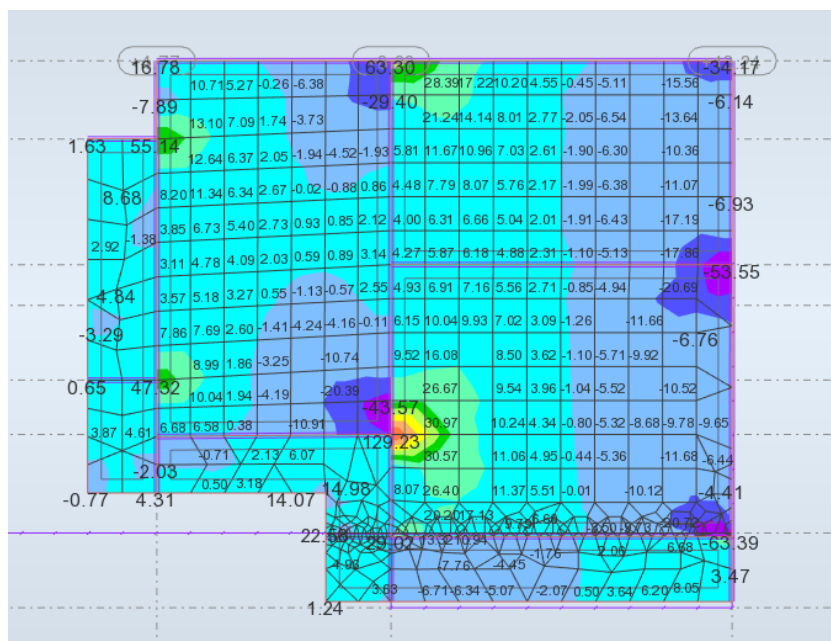


Figura 49 - Esforço Transverso direção x na laje da cobertura Tricalc (kN/m)

Como é possível verificar-se, os valores extremos são mais uma vez coincidentes nos dois mapas, e, novamente, junto aos pontos de cruzamento entre vigas. O valor extremo de compressão obtido é de 93.52 kN/m no Tricalc e 81.64 kN/m no Robot, enquanto que o valor extremo de tração é de 102.36 kN/m no Tricalc, e 50.46 kN/m no Robot, sendo que parece este último valor extremo os mapas de laje diferem na sua localização, bem como no valor, uma vez que o Tricalc apresenta valores muito mais altos que o Robot. Uma vez que o valor extremo do Tricalc se encontra numa zona junto a um pilar, poderá ser necessário a utilização de uma armadura de esforço transverso, como será verificado no dimensionamento.

Analisando agora os esforços de transverso na direção yy, através das Figuras 50 e 51, para o Robot e Tricalc respetivamente:



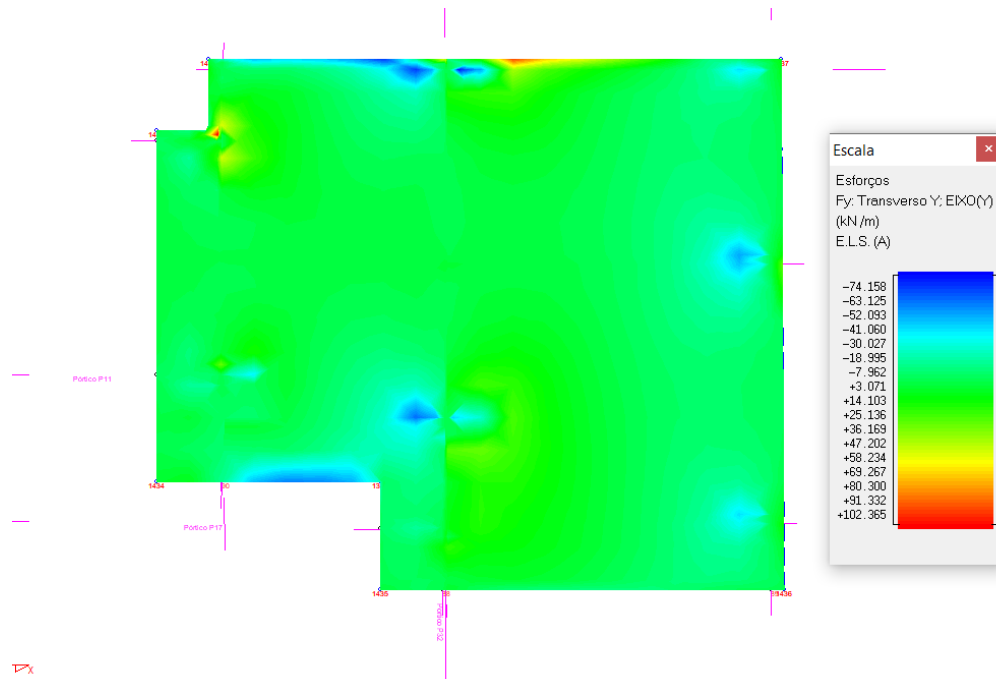


Figura 51 - Esforço Transverso direção y na laje da cobertura Tricalc (kN/m)

De todos os mapas comparados anteriormente, este é o mapa que mais difere entre os dois programas. O Robot apresenta vários valores extremos em locais que não se encontram valores máximos Tricalc, ou seja, as coordenadas dos valores extremos não batem certo nos dois programas. Além disso, o Robot apresenta um valor de esforço transverso muito alto numa zona de cruzamento entre vigas, de 129.53 kN, sendo que o valor mais alto apresentado pelo Tricalc é de 102.37 kN. Para o dimensionamento nenhum destes dois valores foi considerado, uma vez que ambos se encontram em cruzamentos de vigas, em zonas que serão reforçadas pelos estribos das vigas.

5.2.3 – Dimensionamento

Para o dimensionamento serão utilizados os valores obtidos através do Robot, para comparação com o dimensionamento feito pelo programa Tricalc às armaduras longitudinais, e, caso seja necessário, às armaduras de esforço transverso. O dimensionamento foi feito de acordo com o EC2[16].

Foi adotada uma armadura base de $\varnothing 10//15\text{cm}$ para a malha superior e inferior da laje de cobertura. Essa armadura base também foi colocada no Tricalc, pelo que a comparação será nas zonas com valores extremos, onde serão necessários reforços.

Uma vez que os esforços são semelhantes a diferença do dimensionamento não deverá ser significativa. No Anexo I está a planta de cobertura com as respetivas armaduras pormenorizadas calculadas à mão com os esforços obtidos através do Robot.

O peso das armaduras do cálculo à mão na laje de cobertura é de 1387 kg, e o obtido através do Tricalc é de 1393 kg.

5.3 – Pórticos

O Tricalc e o Robot modelam as vigas da mesma forma, ou seja, considerando a viga como um elemento de barra.

Com as mesmas cargas, a única diferença esperada entre os dois programas será a forma como a distribuição de cargas é feita para cada viga, uma vez que o método de grelha e o método dos elementos finitos é diferente no caso das lajes.

5.3.1 – Deformação

Um dos aspetos a analisar nas vigas para o estado de limite de serviço, mais precisamente a combinação quase-permanente, são as deformações da viga.

É muito importante delimitar-se a deformação das vigas para que o edifício funcione corretamente, uma vez que informação exagerada nas vigas poderá levar ao mau funcionamento de vãos exteriores, ou ainda outros problemas.

Na Figura 52 é possível verificar-se as deformações da viga no Robot, e na Figura 53 as deformações no Tricalc.

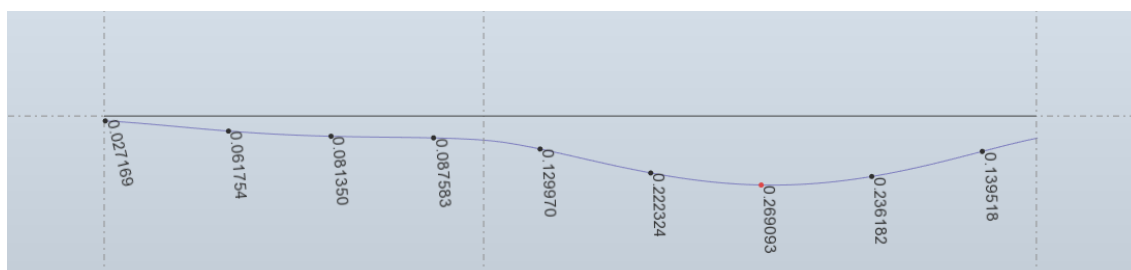


Figura 52 - Deformações no Pórtico 1 Robot (cm)

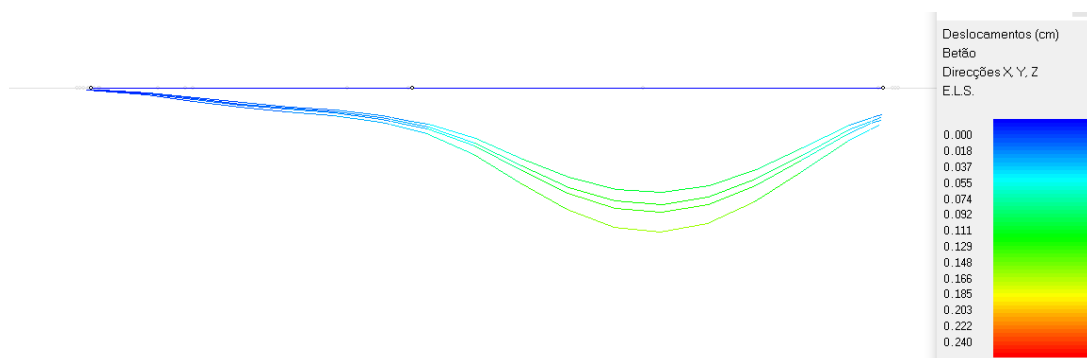


Figura 53 - Deformações no Pórtico 1 Tricalc (cm)

A deformação da viga é muito semelhante, sendo que a diferença entre os dois gráficos se deve apenas à escala utilizada. Por exemplo, a deslocação máxima no Robot é de 0.269 cm e no Tricalc é de 0.240 cm.

5.3.2 – Esforços

O dimensionamento aos Estados Limites Últimos depende do Momento fletor e do Esforço Transverso das vigas.

O momento fletor das vigas depende não só das cargas verticais, como também do sismo. Como tal, o dimensionamento aos estados limites últimos para as vigas, deve ser feito com base na envolvente dos esforços máximos, ou seja, para o conjunto das combinações.

Na Figura 54 é possível verificar-se o diagrama de momentos fletores para a viga no Robot, e na Figura 55 para o Tricalc.

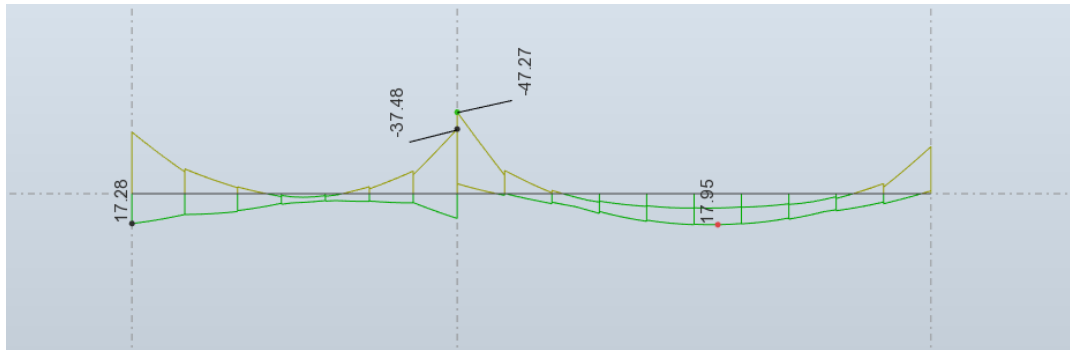


Figura 54 - Diagramas de momentos fletores Robot (kNm)

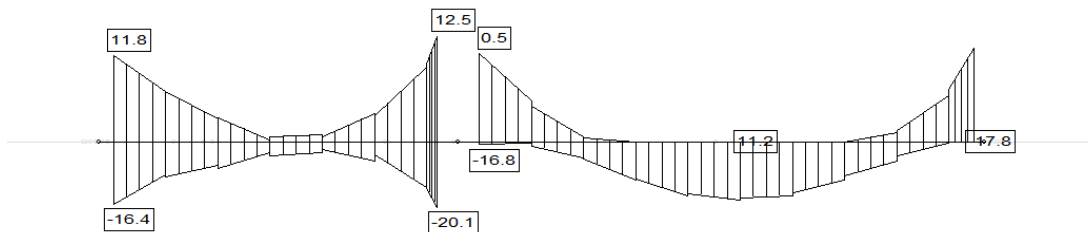


Figura 55 - Diagramas de momentos fletores Tricalc (kNm)

Os diagramas são semelhantes, tendo valores elevados nos apoios devido ao efeito do sismo na viga. Os valores diferem um pouco, sendo bastante semelhante nas extremidades, mas no apoio intermédio a diferença é significativa: Cerca de 35 kNm de diferença no Momento Fletor, que em termos de armadura se vai refletir na necessidade de um reforço superior maior na zona, como se poderá ver no próximo capítulo.

Para o esforço transversal os esforços a comparar também são a envolvente dos esforços.

Na Figura 56 e 57 é possível verificar-se, para o Robot e o Tricalc os respetivos diagramas de esforço transversal.

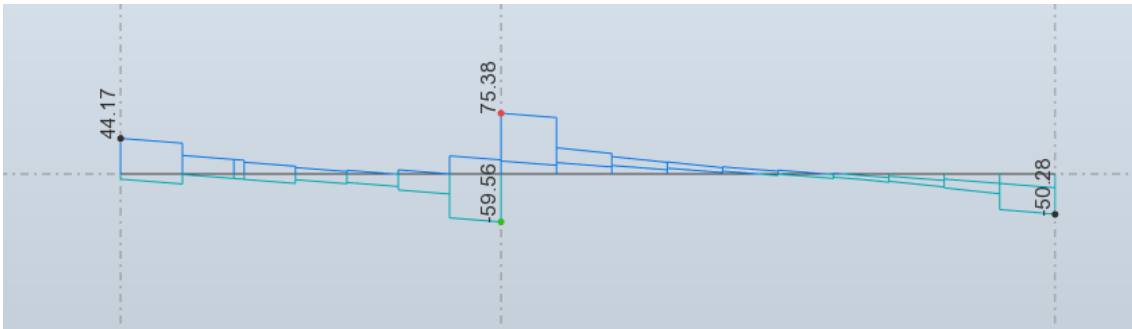


Figura 56 - Diagrama de esforço transverso Robot (kN)

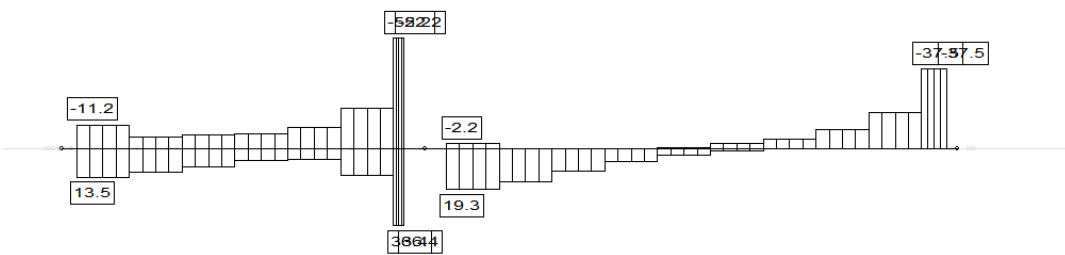


Figura 57 - Diagrama de esforço transverso Tricalc (kN)

Novamente os diagramas são semelhantes, no entanto, o Robot apresenta valores maiores ao longo dos diagramas. Além disso, verifica-se a existência de um “salto” que não apresenta qualquer sentido no apoio intermédio do Tricalc. Uma explicação poderá ser que o Tricalc veja a viga como sendo duas vigas distintas, ao invés de a analisar como um todo.

5.3.3 – Dimensionamento

O dimensionamento das vigas fez-se para os esforços máximos em cada secção. Calculou-se a armadura longitudinal necessária para a parte superior e inferior da viga, e efetuou-se a dispensa de armaduras nas zonas em que já não se justificava a utilização de tanta armadura.

Calculou-se ainda os comprimentos de amarração conforme as equações do EC2, por forma a comparar-se com os comprimentos de amarração desenhados pelo programa Tricalc. No Anexo II é possível verificar-se o pórtico e as armaduras desenhadas pelo Tricalc e no Anexo III o pórtico e as armaduras desenhadas à mão.

É possível verificar-se que, devido há diferença de esforços, existe diferença nos reforços, no entanto, estes são colocados na mesma posição e, portanto, para cada programa, faz sentido e estão corretamente colocadas. No entanto, o Tricalc não respeita os comprimentos de amarração nas extremidades, generalizando as amarrações conforme as secções dos pilares, ao invés de calcular o comprimento de amarração de referência e respeitar o comprimento mínimo que, normalmente, depende da tensão no aço na zona da dispensa de armaduras.

Em termos de peso, o pórtico dimensionado pelo Tricalc apresenta 54.50 kg, enquanto que o pórtico dimensionado à mão apresenta 54.53 kg.

5.4 – Pilares

5.4.1 – Deslocamento relativo entre pisos

Segundo o EC8[2] o deslocamento relativo entre os pisos deve ser limitado para que os pilares não tenham danos nas zonas entre pisos, que normalmente é o local onde a força sísmica é superior devido à massa concentrada dos pisos. Para a Combinação Quadrática Completa a deformação do pilar é dada pela Figura 58 no Robot.

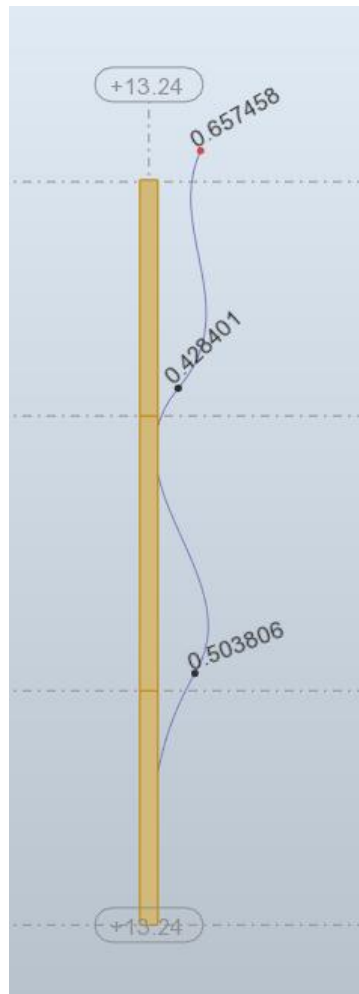


Figura 58 - Deformação do pilar para a combinação quadrática completa Robot (cm)

Apesar de não ser possível executar-se a mesma comparação, uma vez que o Tricalc não permite visualizar a Combinação Quadrática Completa, na Figura 59 é possível verificar-se a deformação para os cinco modos de vibração do pilar.

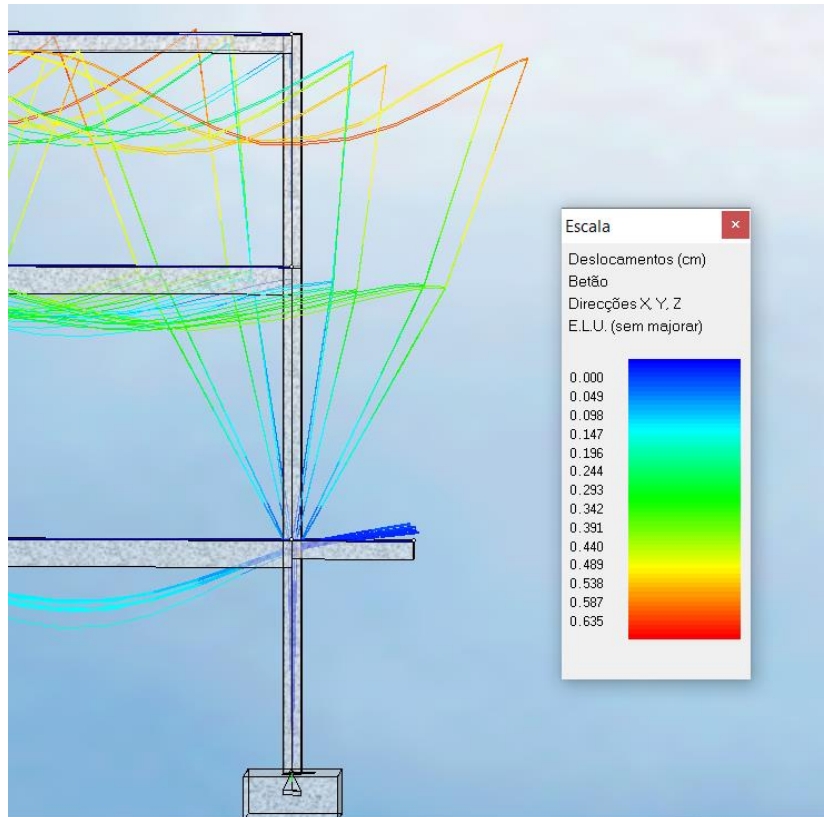


Figura 59 – Deformação do pilar para os cinco modos de vibração Tricalc (cm)

É possível verificar-se o *drift*, e assim perceber se os valores se encontram dentro do limite, através da expressão 19:

Para elementos não estruturais frágeis fixos:

$$d_r \leq 0.005h/v \quad (19)$$

onde,

d_r - deslocamento relativo entre pisos;

h - a altura entre piso (m);

v - coeficiente corretivo do período de retorno, para ação sísmica do tipo 2 é de 0.55;

Como tal, o deslocamento relativo entre pisos máximo é de 0.0236 cm entre o piso 1 e o piso 2, onde a diferença de deslocamentos é maior. O deslocamento relativo obtido para esses pisos é, segundo o diagrama da Figura 58, de 0.088 cm. No entanto, devido ao aumento da rigidez mencionado no Capítulo cinco, é necessário reduzir este valor para metade (0.044 cm), continuando, no entanto, superior ao valor máximo permitido.

Uma solução para o problema é o aumento da rigidez dos pilares, que pode ser conseguido aumentando a secção do pilar de 20x20 para, por exemplo, 30x20.

5.4.2 – Esforços

Os pilares são dimensionados à flexão desviada, ou seja, os esforços a considerar no seu dimensionamento são o esforço axial, e os momentos nas duas direções, x e y.

O esforço axial depende da carga vertical do edifício, que é transferida por meio das lajes para as vigas, das vigas para os pilares, que por sua vez vão ser transferidas às sapatas e ao solo através da sua base. Os momentos dependem das cargas sísmicas e do vento, mas principalmente do sismo, que foram calculadas conforme o capítulo 3.

O esforço axial está representado no Robot na Figura 60, e no Tricalc na Figura 61.

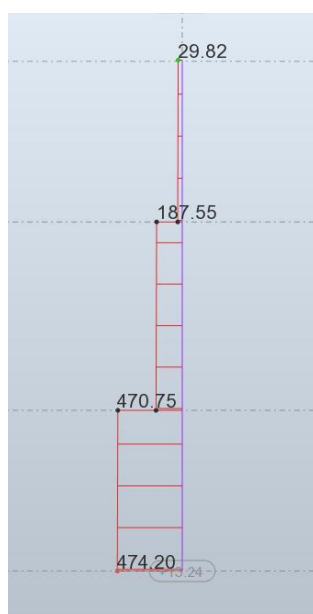


Figura 60 - Esforço axial pilar Robot (kN)

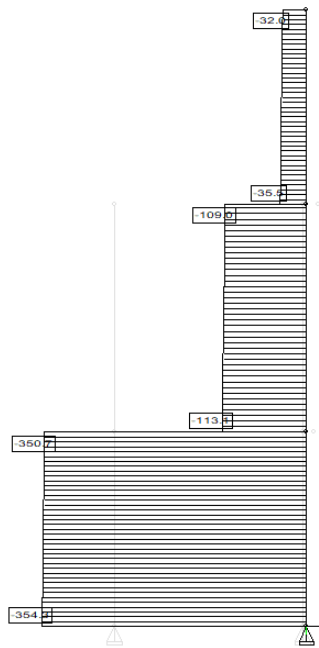


Figura 61 - Esforço axial pilar Tricalc (kN)

Na laje de cobertura a distribuição de cargas foi feita de forma semelhante, e, portanto, a diferença do axial é mínima. Na laje do teto do 1º andar e na laje do teto do rés-do-chão é onde se nota maior diferença, cerca de 80 kN e 20 kN respetivamente. Outra diferença é a consideração, da parte do Robot, de um esforço axial constante entre pisos, como seria de se esperar, uma vez que o esforço axial provém das lajes, enquanto que no Tricalc aumenta ao longo do comprimento. Apesar do aumento não ser significativo, sendo apenas 4kN em cada piso, uma vez que o peso próprio do pilar se mantém constante ao longo dos pisos, poderá dever-se à modelação das cargas sísmicas ou do vento, na qual o utilizador não tem qualquer tipo de interferência no caso do Tricalc.

Já em relação aos Momentos em xx e yy as diferenças são significativas, como se poderá verificar na Figura 62 e 63 em relação aos momentos em x, e na Figura 64 e 65 em relação aos momentos em y.

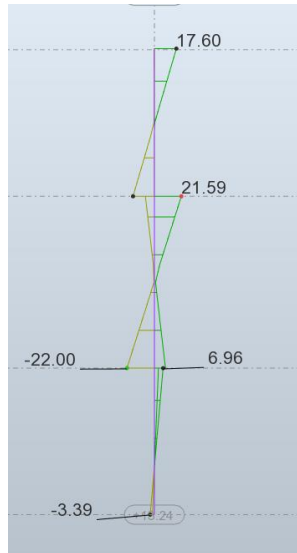


Figura 62 - Momentos fletor x em pilar Robot (kNm)

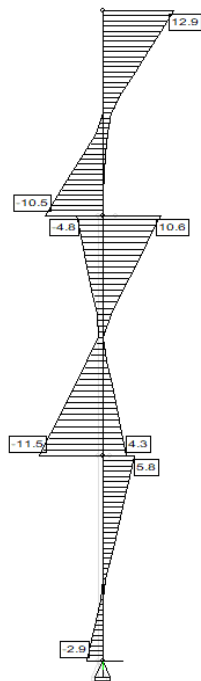


Figura 63 – Momento fletor x em pilar Tricalc (kNm)

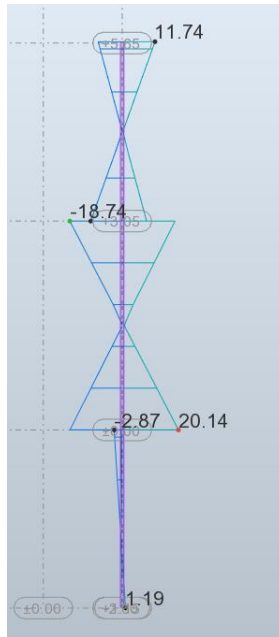


Figura 64 - Momentos fletor y em pilar Robot (kNm)

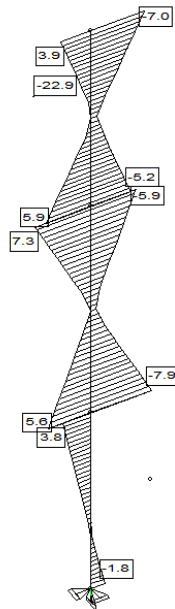


Figura 65 - Momentos fletor y em pilar Tricalc (kNm)

Os resultados dos diagramas de esforços acima encontram-se resumidos nas Tabela 18, 19 e 20 para o piso da cave, rés do chão e primeiro andar respetivamente.

Tabela 18 - Resultados dos diagramas Piso Cave

Programa/Esforços	N(kN)	Mxx (KNm)	Myy (KNm)
Robot	474.20	6.96	2.87
Tricalc	354.90	5.80	3.80

Tabela 19 - Resultados dos diagramas Piso R/C

Programa/Esforços	N(kN)	Mxx (KNm)	Myy (KNm)
Robot	187.55	22.00	20.14
Tricalc	113.40	11.50	7.90

Tabela 20 - Resultados dos diagramas Piso 1º andar

Programa/Esforços	N(kN)	Mxx (KNm)	Myy (KNm)
Robot	29.82	17.60	18.74
Tricalc	35.50	12.90	22.90

Os desenhos dos diagramas são semelhantes, mas os valores dos momentos são diferentes, principalmente no piso intermédio. A diferença era esperada devido há forma distinta como os dois programas definem a ação sismo, incluindo a definição das combinações (manual e automática). Apesar dos valores serem diferentes, o desenho dos diagramas é igual (compressões e trações).

5.4.3 – Dimensionamento

Ao contrário das vigas e da laje, os pilares não são dimensionados para a envolvente dos esforços, mas sim para a combinação mais desfavorável. No entanto, no Tricalc não é possível fazer-se o controlo das combinações do sismo de forma tão eficaz como no Robot, e, portanto, ao contrário do que normalmente se sucede, os pilares também

foram dimensionados à mão para a envolvente de esforços neste trabalho, obtendo-se assim uma comparação com o mesmo critério.

O pilar foi dimensionado até à altura da laje de piso térreo, secção onde se encontra os maiores esforços axiais e os momentos fletores mais reduzidos. O Robot apresenta maior esforço axial ($N= 474.20$ kN), enquanto que o Tricalc apresenta 354.30 kN, mas menores valores de momento fletor ($M_x= 3.39$ kNm/m e $M_y= 2.87$ kNm/m) enquanto que o Tricalc apresenta $M_x = 5.8$ kNm/m e $M_y = 3.8$ kNm/m). Apesar da diferença ser pouca nessa secção, o Tricalc apresentou um dimensionamento automático com varões longitudinais de $8\phi 16$, um pouco exagerado se comparado ao dimensionamento efetuado manualmente pelo autor do projeto, $4\phi 16$. No Anexo IV e Anexo V é possível verificar-se o desenho retirado do Tricalc para o dimensionamento automático e à mão, respetivamente.

A armadura de esforço transversal também cumpre o regulamento do EC8 [2], tanto no dimensionamento à mão como no dimensionamento através do Tricalc, uma vez que:

- O diâmetro da armadura transversal é pelo menos 6mm e $\frac{1}{4}$ da armadura longitudinal;
- O espaçamento longitudinal máximo entre as armaduras de esforço transversal é inferior ao limite imposto pela expressão 20:

$$S_{I,max} = 0.75d(1+\cotg \alpha) \quad (20)$$

onde,

$S_{I,max}$ - é o espaçamento máximo entre as armaduras de esforço transversal;

d - a altura útil da secção;

α - o ângulo dos estribos;

Com uma armadura transversal de $\phi 6//0.15$ m durante todo o comprimento do pilar, tanto o Robot como o Tricalc cumprem o regulamento.

5.5 – Muro de Suporte de Terras

Os muros de suporte de terras são elementos que apresentam esforços axiais, esforços transversos e momentos fletores. O Tricalc modela os muros de suporte de terras com

o método dos elementos finitos, tal como foi utilizado no Robot, no entanto não é possível obter-se os valores dos esforços e deslocamentos.

5.5.1 - Esforços

Os muros de suporte de terras são dimensionados à flexão desviada, ou seja, os esforços a considerar no seu dimensionamento são o esforço axial, e os momentos nas duas direções, xx e yyy.

O esforço axial depende da carga vertical do edifício, que é transferida por meio das lajes para as vigas, das vigas para os pilares e muros de suporte, que por sua vez vão ser transferidas às sapatas e ao solo através da sua base. Os momentos dependem das cargas sísmicas e dos impulsos do solo e da água, mas principalmente dos impulsos, que foram calculadas conforme o capítulo quatro. Os impulsos também são responsáveis pelo aumento do esforço transversal de pico. Ao contrário do que ocorre nos restantes casos, não foi possível retirar-se os valores de esforços do muro de cave no programa Tricalc, pelo que a comparação será feita apenas ao nível do dimensionamento.

O esforço de membrana está representado no Robot na Figura 66 e 67, para cada uma das direções xx e yy.

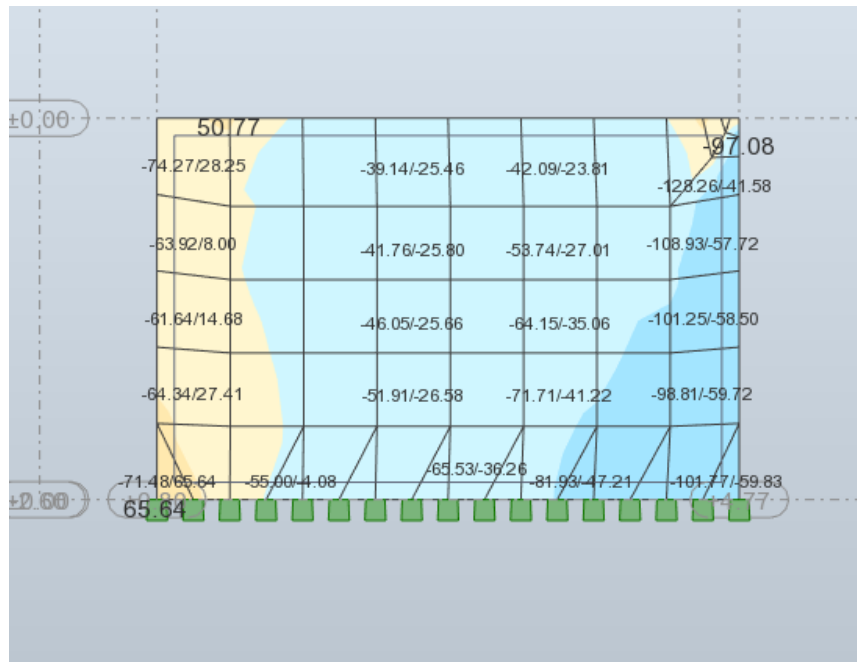


Figura 66 - Esforço de membrana direção x muro Robot (kN/m)

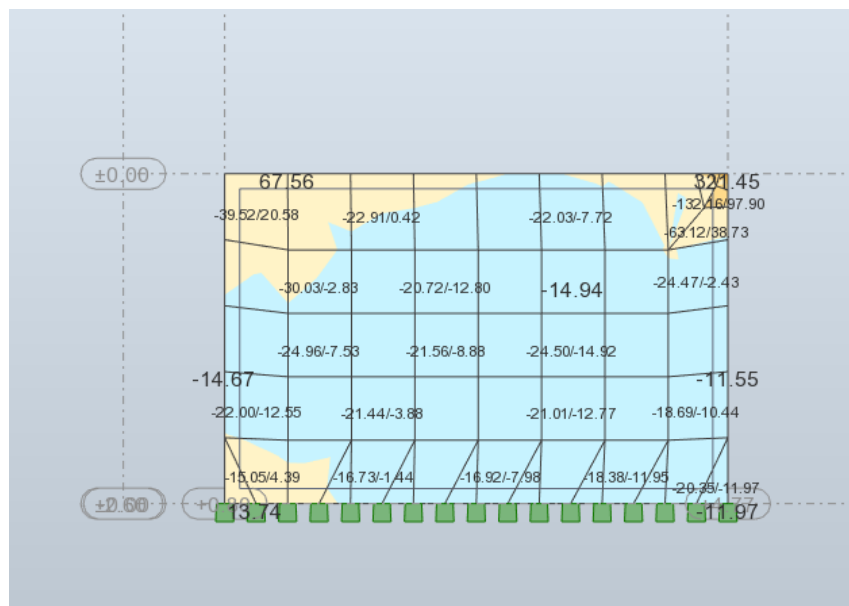


Figura 67 - Esforço de membrana direção y muro Robot (kN/m)

Como se pode verificar o muro apresenta trações e compressões dependendo da zona a considerar, com um esforço de membrana muito alto na direção y, o que significa que existe uma concentração de esforços na localização (321.45 kN).

Na Figura 68 e 69 é possível verificar-se os momentos longitudinais e transversais respetivamente. As figuras apresentam apenas os valores de pico para os quais foram feitos o dimensionamento.

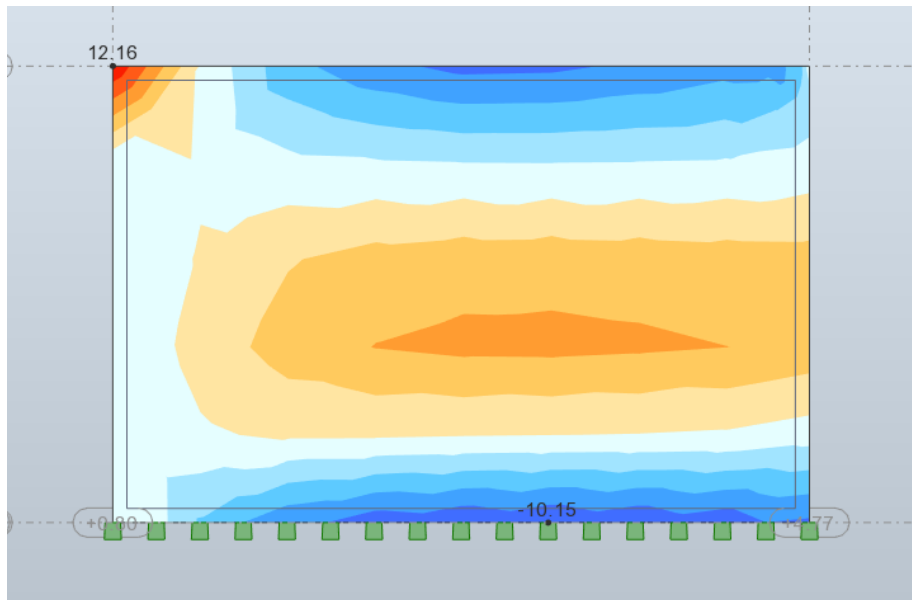


Figura 68 - Momento fletor direção xx muro Robot (kNm/m)

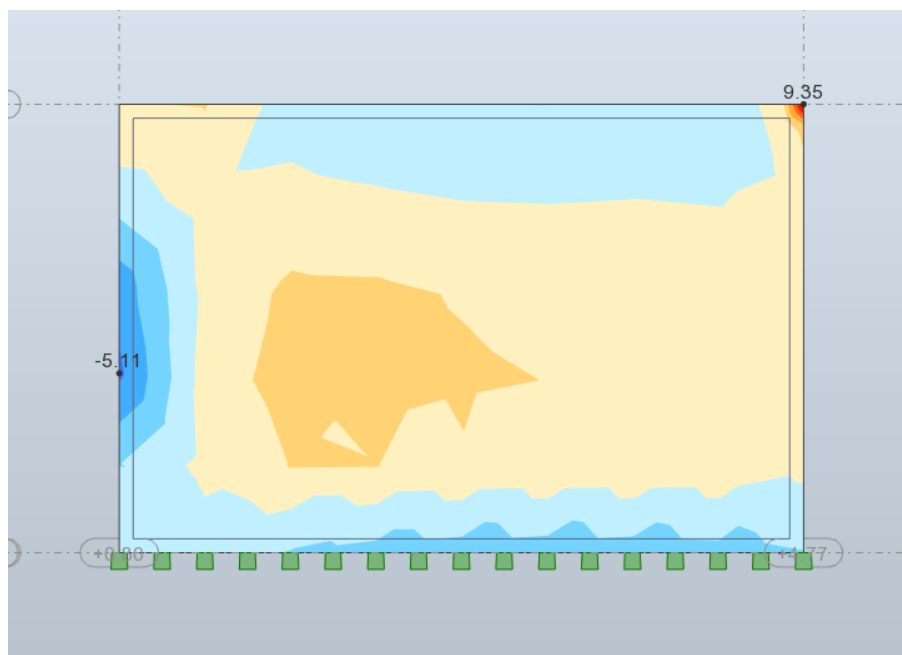


Figura 69 - Momento fletor direção yy muro Robot (kNm/m)

Apesar dos valores de pico dos momentos superiores ser nas extremidades, e não no centro do muro, considerou-se o valor de pico como se tivesse sido no centro do muro e dimensionou-se as armaduras para esse valor.

Em termos de corte devido aos impulsos, encontra-se representado nas Figuras 70 e 71.

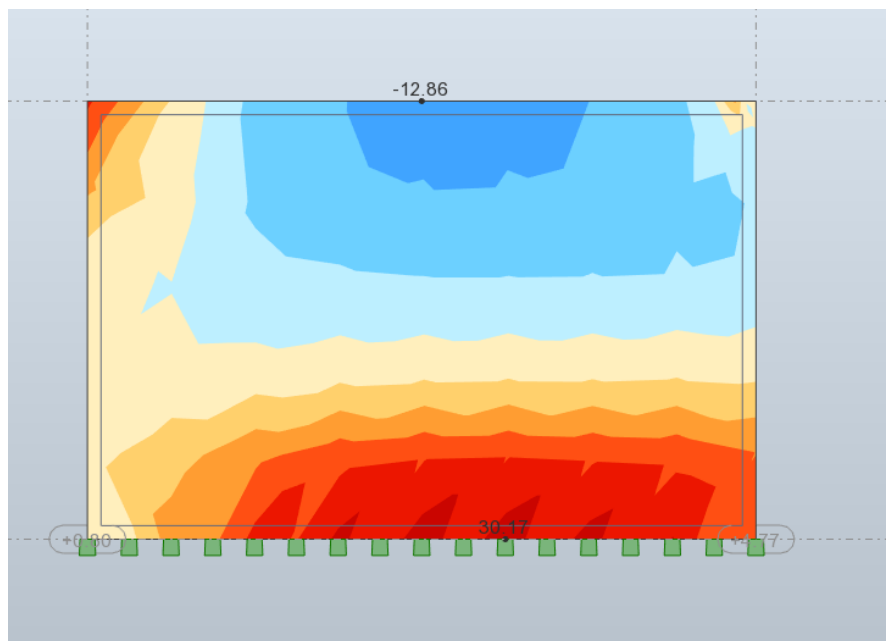


Figura 70 - Corte direção xx muro Robot (kNm/m)

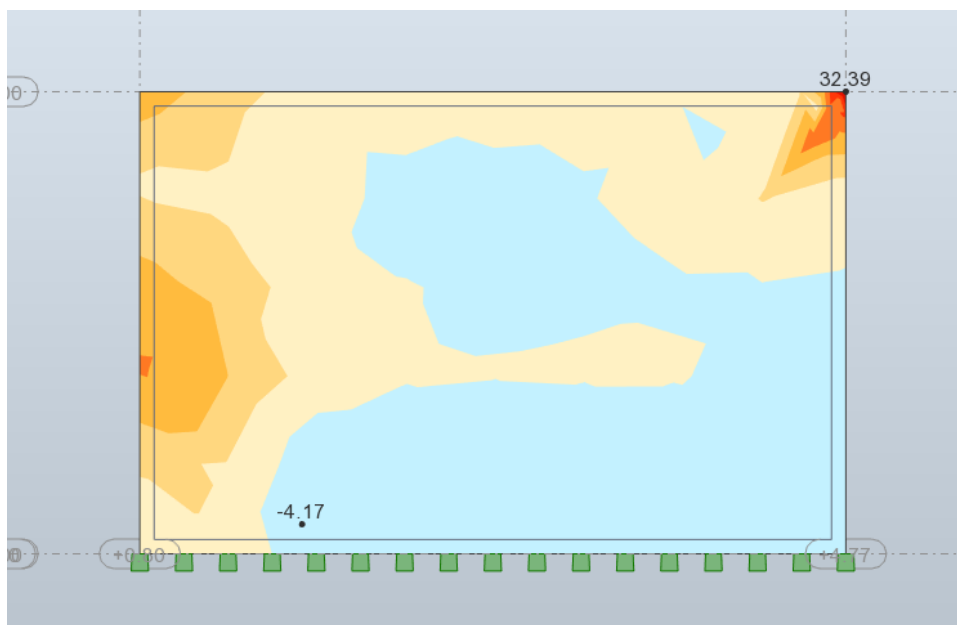


Figura 71 - Corte direção yy muro Robot (kNm/m)

Como se esperava, os valores mais elevados ao longo de x é na face inferior, onde os impulsos da terra e da água são superiores. O muro com 20cm de espessura verifica o esmagamento do betão, pelo que não há necessidade de se aumentar a espessura do mesmo.

5.5.2 – Dimensionamento

Sendo o muro um elemento que sofre esforço axial devido ao peso da estrutura, esforço de corte e de momentos devido aos impulsos e sismo, deve ser dimensionado à flexão desviada e composta, semelhante aos pilares. O dimensionamento da malha longitudinal é feito de forma semelhante ao das lajes, para as duas faces (lateral esquerda e lateral direita).

Como se pode verificar pelas imagens no Anexo VI e Anexo VII, o muro do Tricalc foi dimensionado de forma mais conservativa, apresentado armaduras longitudinais de $\phi 10//0.20\text{m}$ e armaduras transversais $\phi 10//0.10\text{m}$. O peso das armaduras dimensionadas pelo Tricalc é de 384.28 kg.

No caso do muro dimensionado com base nos esforços das figuras representadas acima, retirados do Robot, transversalmente basta uma armadura de $\phi 10//0.20\text{m}$, e na

face exterior do Muro uma armadura longitudinal de $\phi 10//0.15m$. No caso das armaduras dimensionadas à mão o peso é de 285.11 kg, ou seja, 100kg a menos do que o dimensionado pelo Tricalc.

Com estes resultados das armaduras, é possível concluir-se que, apesar de não ser possível obter-se os esforços do Tricalc, devem ter sido claramente superiores aos obtidos pelo Robot, pela necessidade de uma armadura com espaçamento mais próximo.

5.6 – Fundações

As fundações são elementos muito importantes da estrutura, e são responsáveis por conferir a estabilidade necessária a todo o edifício.

Ao contrário dos restantes elementos, as fundações descarregam os esforços dos pilares e dos muros de suporte no solo. É possível modelar essa interação solo-estrutura no Robot e no Tricalc, no entanto, para efeitos do trabalho apresentado, foi considerado que as fundações eram apoios encastrados, ou seja, não permitem o movimento da estrutura em nenhuma das direções. Além disso, apesar de ser comum a utilização de lintéis de travamento para reduzir os assentamentos diferenciais entre as sapatas, para efeitos desta comparação estes elementos também não foram modelados. Como tal, as sapatas são elementos isolados.

5.6.1 – Esforços

As fundações são dimensionadas a partir das reações obtidas nos apoios. Existem a força vertical, as forças horizontais nas duas direções, e os momentos em torno de cada uma das direções.

Interessa comparar o esforço vertical que vem do pilar, e os momentos em x e y, que são os principais momentos para o dimensionamento da sapata.

Na Figura 72 verifica-se as reações obtidas através do programa Robot para a sapata, e na Figura 73 as reações obtidas através do programa Tricalc. No caso do programa Tricalc, as reações estão por hipótese, pelo que para a hipótese mais desfavorável foi escolhido a mesma combinação no Robot.

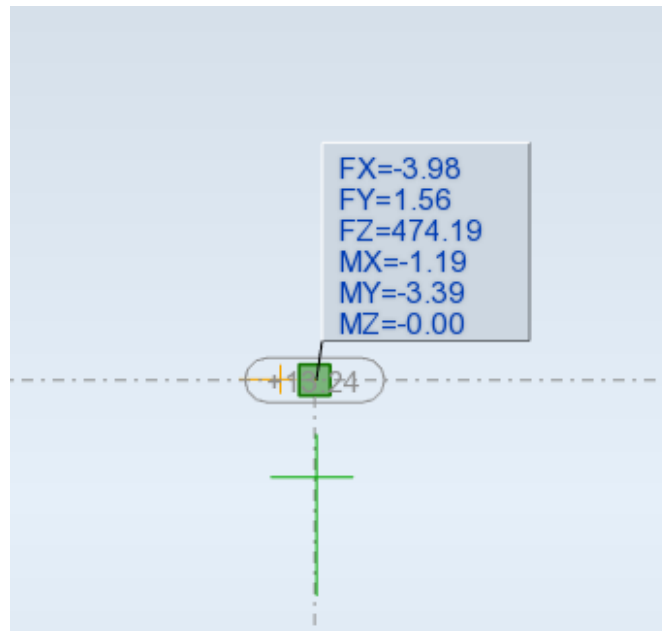


Figura 72 - Reações da sapata Robot (kN)

3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	5	Ex	Mz= +0.0 Fz= +0.0 Mx= -0.0 Fx= +0.1 My= +0.0 Fy= +8.8
3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	6	Ez	Mz= +0.0 Fz= -0.0 Mx= +0.0 Fx= +0.0 My= +0.0 Fy= -12.6
3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	7	Ex2	Mz= -0.0 Fz= +0.1 Mx= -0.0 Fx= +0.1 My= +0.0 Fy= +7.3
3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	8	Ez2	Mz= +0.0 Fz= -0.0 Mx= +0.0 Fx= +0.1 My= +0.0 Fy= -14.6
3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	9	Q3	Mz= -0.0 Fz= +0.1 Mx= +0.0 Fx= +0.0 My= +0.0 Fy= +0.0
3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	10	Q4	Mz= +0.0 Fz= +0.0 Mx= +0.0 Fx= +0.0 My= +0.0 Fy= +0.0
3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	21	T	Mz= +0.0 Fz= +0.0 Mx= +0.0 Fx= +0.0 My= +0.0 Fy= +0.0
3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	22	S	Mz= +0.0 Fz= +0.0 Mx= +0.0 Fx= +0.0 My= +0.0 Fy= +0.0
3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	23	A	Mz= +0.0 Fz= +0.0 Mx= +0.0 Fx= +0.0 My= +0.0 Fy= +0.0
3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	24	Ey	Mz= +0.0 Fz= +0.0 Mx= -0.0 Fx= +0.0 My= +0.0 Fy= +5.4
3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	25	W3	Mz= -0.0 Fz= -0.0 Mx= +0.0 Fx= +0.0 My= +0.0 Fy= +0.0
3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	26	W4	Mz= +0.0 Fz= +0.0 Mx= +0.0 Fx= +0.0 My= +0.0 Fy= +0.0
3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	4+	A	Mz= +0.0 Fz= +0.0 Mx= +0.0 Fx= +0.0 My= +0.0 Fy= +253.4
3	0	xyzxy:	3	BET/20x20	4-	A	Mz= +2.1 Fz= +0.0 Mx= -1.3 Fx= -2.4 My= -0.0 Fy= +0.0
							Mz= +0.0 Fz= -1.5

Figura 73 - Reações da sapata Tricalc (kN)

Os esforços não são semelhantes, obtendo-se para a combinação fundamental no Robot um axial de 474.19 kN, quase o dobro do obtido no tricalc (253.4 kN). Os momentos também não são idênticos, uma vez que no Robot existe Mx e My, enquanto que no Tricalc existe apenas Mz. As diferenças começam no pilar, como mencionado no Capítulo anterior, e uma vez que a sapata mencionada diz respeito a esse pilar, era de prever que existiria uma diferença significativa no esforço axial que chegasse à sapata. Como mencionado anteriormente, esta diferença deverá ser devido à distribuição de carga considerada pelo programa desde as lajes.

5.6.2 – Dimensionamento

O dimensionamento das sapatas foi feito para as mesmas dimensões (1.05x1.05x0.50m) nos dois programas, verificando-se a tensão de segurança para o solo. Ambas as sapatas foram dimensionadas com base na armadura mínima regulamentar, uma vez que os esforços apresentados não eram muito grandes, e como tal a armadura escolhida foi de $\varnothing 12$ af15cm nas duas direções. No Anexo VIII é possível

verificar-se o desenho-pormenor retirado do Tricalc, tendo sido obtido o mesmo dimensionamento que à mão.

5.7 – Modos de Vibração

Outro ponto importante a comparar entre os dois programas é os modos de vibração e as respetivas frequências. Na Tabela 21 é possível verificar-se as frequências retiradas para os primeiros cinco modos no Robot e Tricalc.

Tabela 21 - Frequências dos cinco primeiros modos Robot e Tricalc

Programa/Frequências (Hz)	1º modo	2º modo	3º modo	4º modo	5º modo
Robot	1.59	1.64	2.42	3.60	4.02
Tricalc	1.61	2.56	3.47	6.16	10.39

Como é possível verificar-se, o primeiro modo de vibração é semelhante, mas os restantes modos de vibração são muito diferentes, sendo que os do Robot apresentam frequências muito menores que os apresentados no Tricalc. Isto poderia significar que o Tricalc não considera o Sismo da mesma forma que foi considerado no Capítulo 3, ou seja, os Espetros utilizados deveriam ser diferentes. Como tal, retirou-se do Tricalc os espectros elásticos e de cálculo que o programa considerou na direção x, como pode verificar-se nos gráficos na Figura 74 e 75.

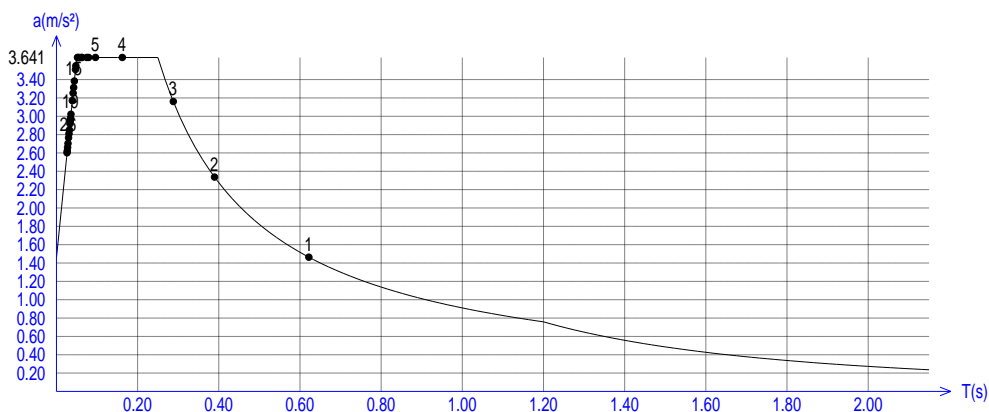


Figura 74 - Espectro elástico direção x

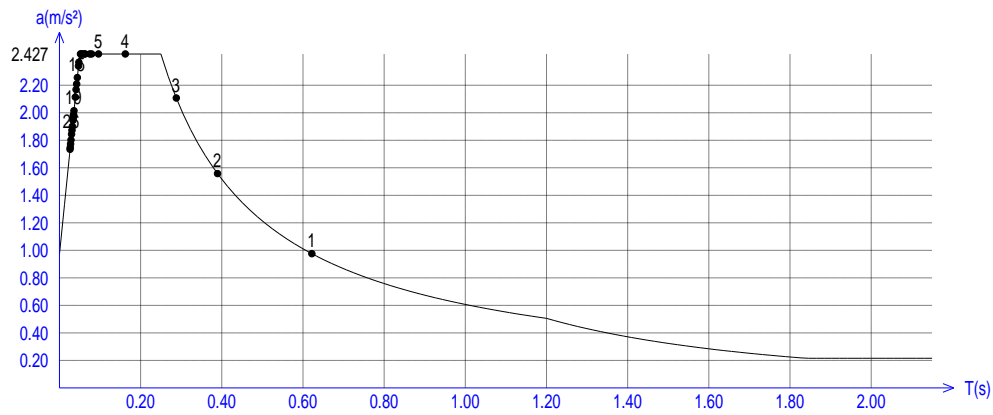


Figura 75 - Espectro de calculo direção x

Comparando com o espectro do Capítulo 3 representado na Figura 8 referente ao tipo de sismo 2, é possível verificar-se que os períodos são semelhantes para a primeira frequência e que o espectro considerado é igual, como tal, a diferença não se deve ao tipo de espectro. Então, é possível que os programas tenham calculado a rigidez de forma distinta, mesmo tendo as mesmas secções em todos os elementos.

Além das frequências, é importante também verificar a deformada do edifício perante um sismo. Na Figura 76 e 77 é possível verificar-se as deformadas obtidas para o primeiro modo no Robot e Tricalc.

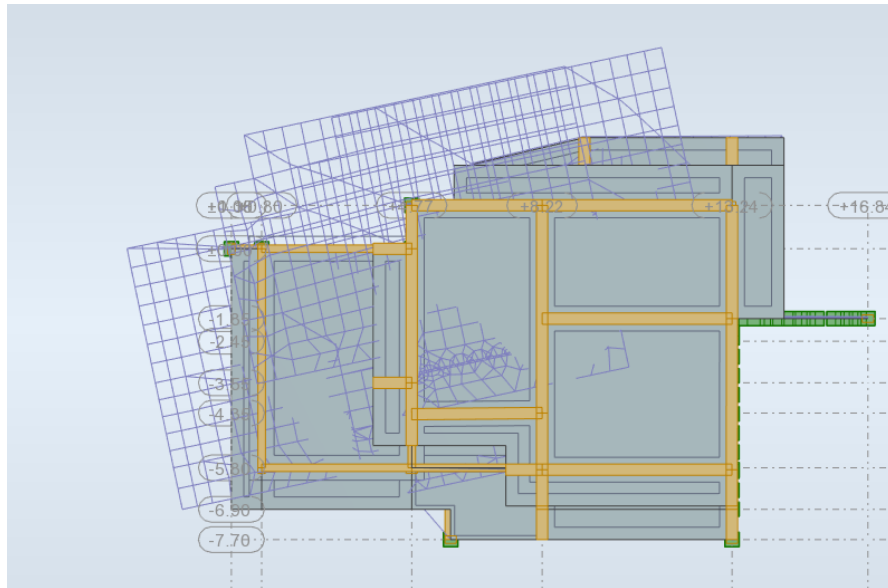


Figura 76 - Deformada 1º modo Robot (Esc: 1:0.075 cm)

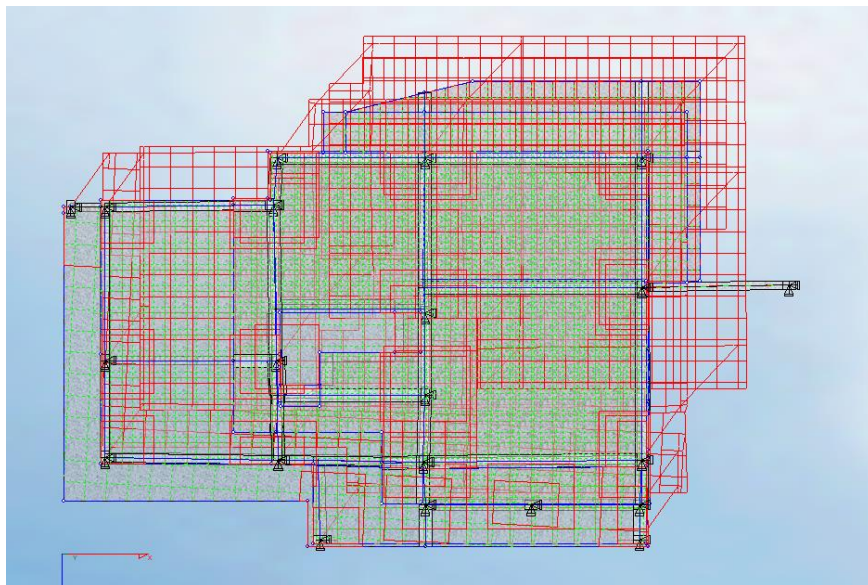


Figura 77 - Deformada 1º modo Tricalc (S/esc)

Apesar das frequências serem semelhantes, a torção do edifício é distinta nas duas figuras. Isso significa que, para o Robot, a rigidez é superior no canto superior esquerdo (tendo como referência a figura), e o Tricalc para o canto superior direito. Tendo em conta que o muro de suporte de terras é o elemento com maior rigidez do edifício (para além da laje), e se encontra da parte de baixo da figura, as soluções deverão diferenciar devido ao centro de rigidez considerado pelos dois programas. O programa Tricalc considera maior rigidez do lado direito da moradia, enquanto que o Robot do lado

esquerdo do edifício. Isto ajuda a concluir que, de facto, um dos problemas para a diferença no valor das frequências terá sido a rigidez.

Para o segundo modo, estão representadas as deformadas na Figura 78 e 79 para o Robot e Tricalc, respetivamente.

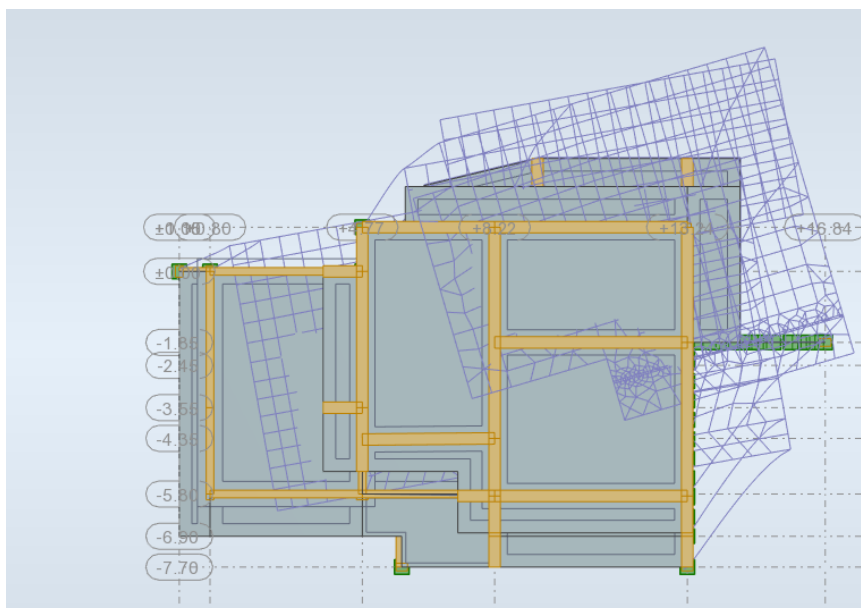


Figura 78 - Deformada 2º modo Robot (Esc: 1:0.075 cm)

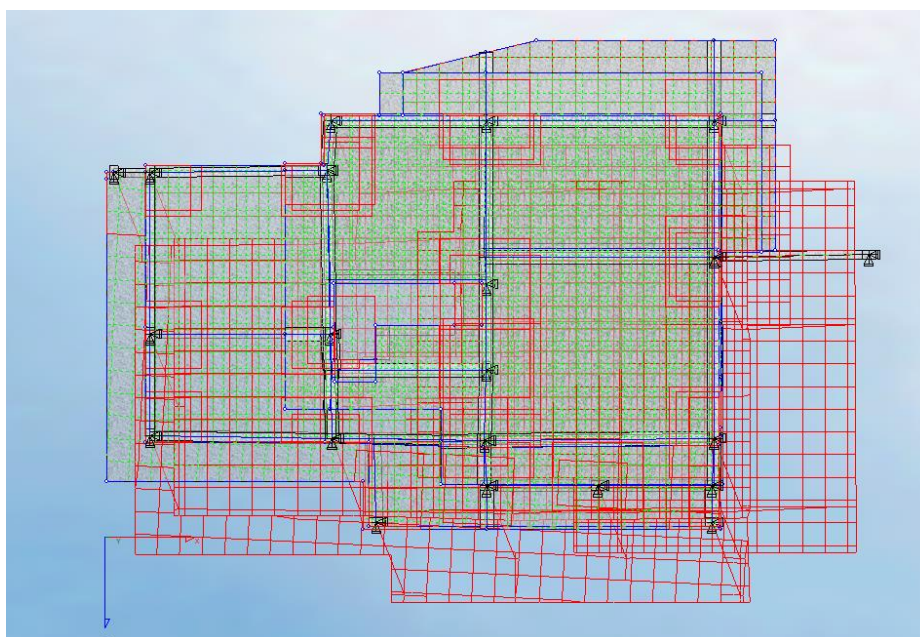


Figura 79 - Deformada 2º modo Tricalc (S/esc)

Na Figura 80 e 81 é possível verificar-se as deformadas obtidas para o terceiro modo no Robot e Tricalc.

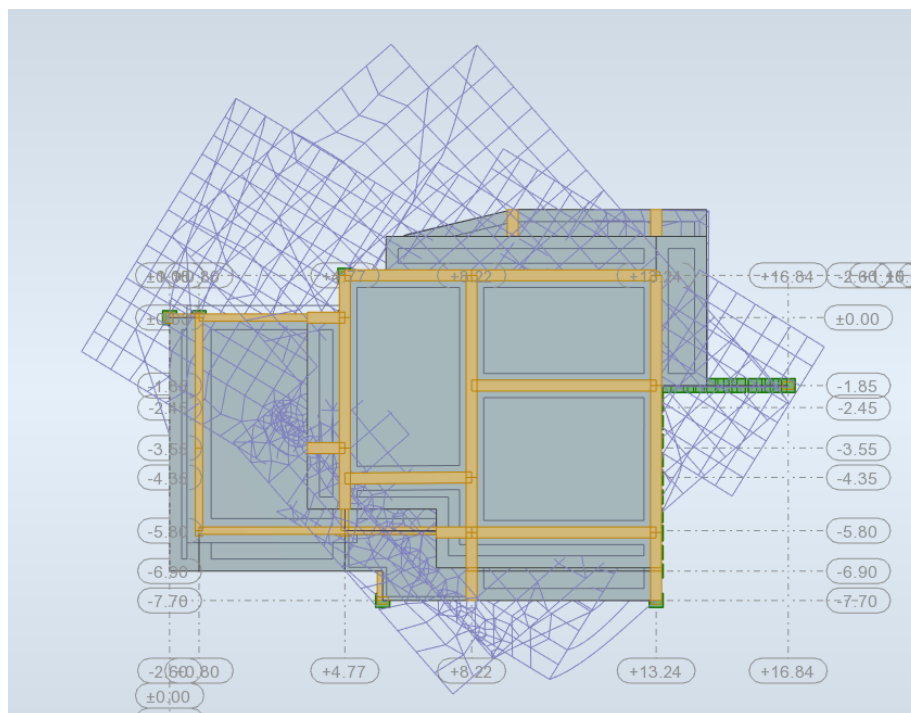


Figura 80 - Deformada 3º modo Robot (Esc: 1:0.075 cm)

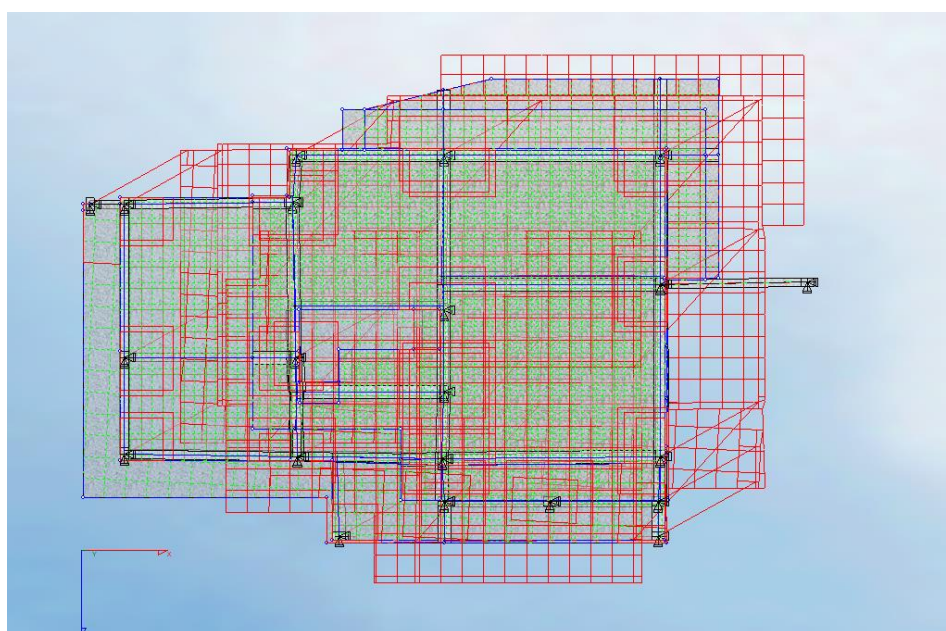


Figura 81 - Deformada 3º modo Tricalc (S/esc)

Na Figura 82 e 83 é possível verificar-se as deformadas obtidas para o quarto modo no Robot e Tricalc.

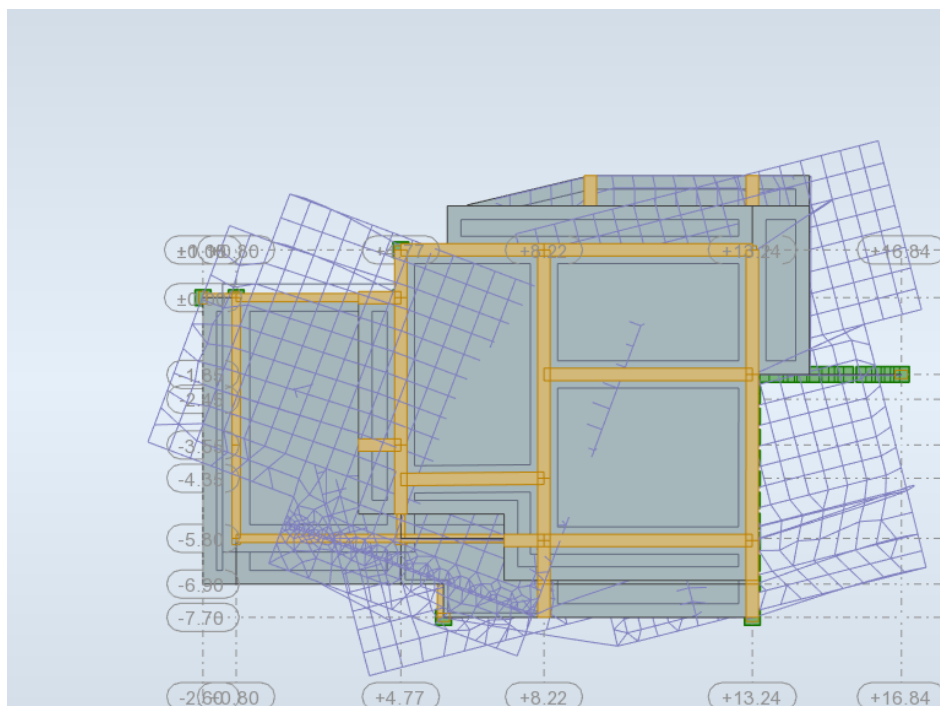


Figura 82 - Deformada 4º modo Robot (Esc: 1:0.075 cm)

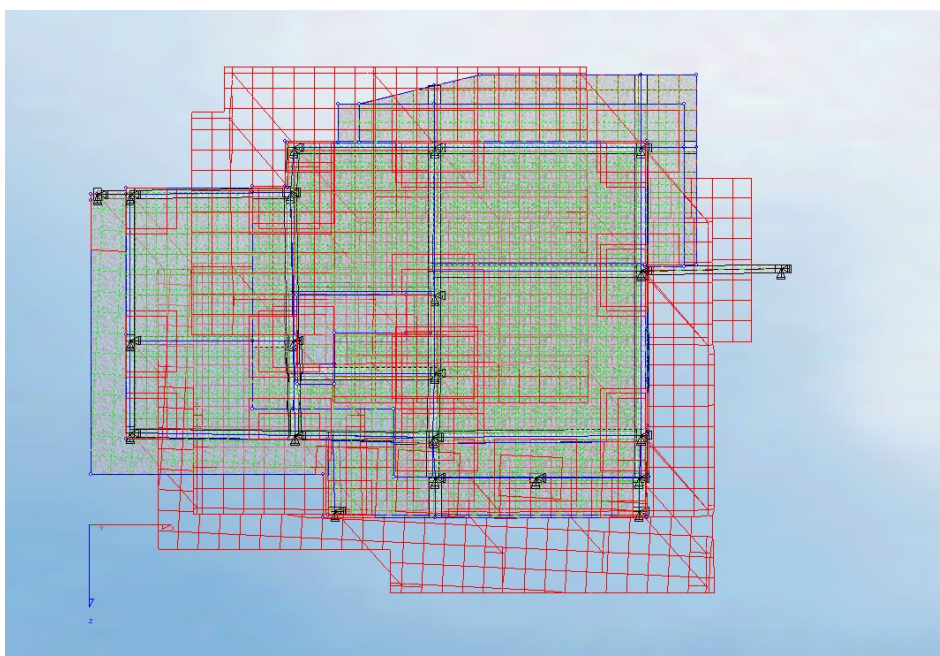


Figura 83 - Deformada 4º modo Tricalc (S/esc)

Na Figura 84 e 85 é possível verificar-se as deformadas obtidas para o quinto modo no Robot e Tricalc.

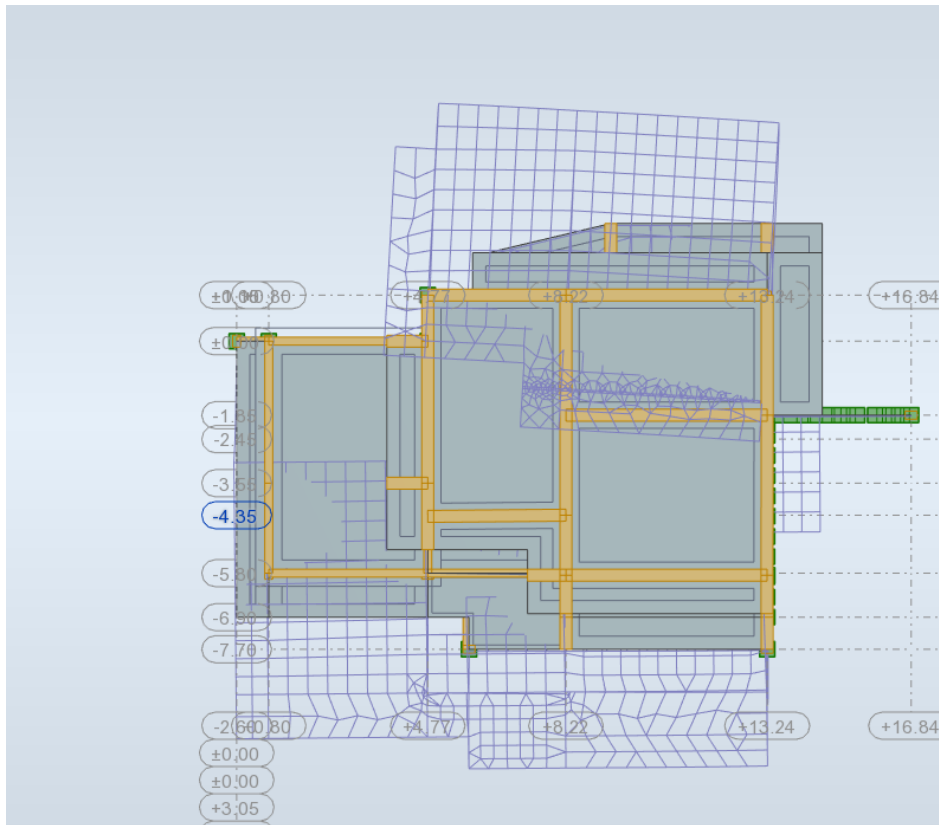


Figura 84 - Deformada 5º modo Robot (Esc: 1:0.075 cm)

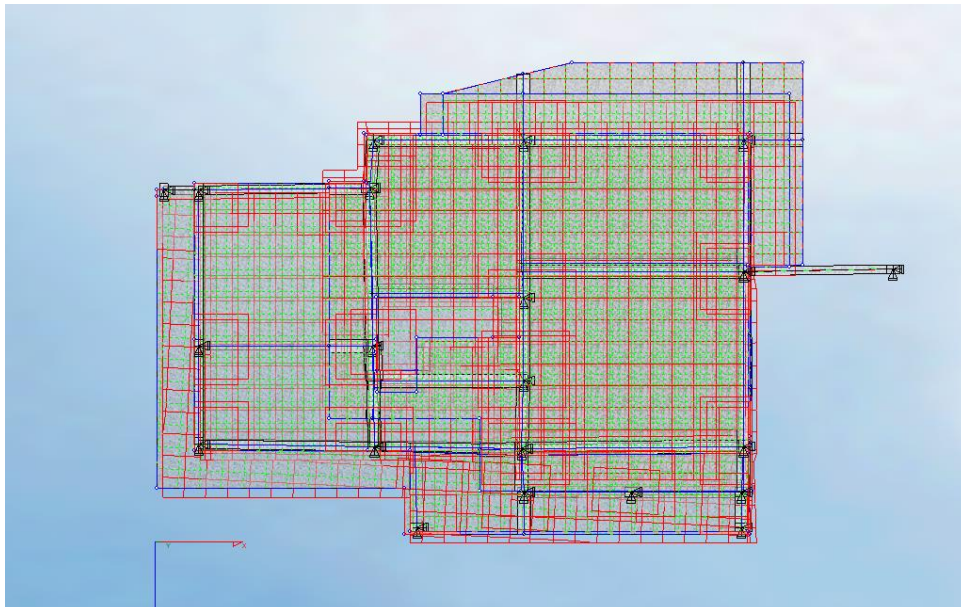


Figura 85 - Deformada 5º modo Tricalc (S/esc)

Os restantes modos continuam a apresentar diferenças, o que se seria de esperar devido há diferença das frequências e da deformada logo no primeiro modo de vibração.

6 – Conclusões

Uma das questões que são muitas das vezes levantadas por Engenheiros recém-licenciados que ambicionem ser projetistas é a necessidade, atualmente, de escolher um software de cálculo automático que permita economizar tempo, além de permitir análises mais complexas e seguras às estruturas.

Os engenheiros que entram em gabinetes de projeto têm a tendência de manter, pela vida fora, o software que aprenderam a utilizar enquanto aprendiam e/ou foram obrigados a utilizar durante o seu trabalho, uma vez que se torna um hábito e é difícil de aprender vários programas distintos, com formas de fazer as coisas distintas.

No entanto, como mencionado na introdução, o objetivo deste trabalho foi direcionado para Engenheiros que, tal como eu, tenham o objetivo de criar um gabinete de projetos com pouca experiência em outros gabinetes e, como tal, sejam forçados a escolher, sem nenhuma experiência de trabalho, um software. No meu caso, utilizei durante a Licenciatura e Mestrado o programa *Robot Structural Analysis*, e durante o tempo que estive há experiência num gabinete utilizei o Tricalc, pelo que decidi ver qual dos dois seria mais rentável e me ofereceria o maior nível de confiança.

O software Robot permite uma maior inserção de dados, permite modelar virtualmente qualquer tipo de estrutura, de forma rápida e simples, permite modificar ações, coeficientes, colocar cargas, combinações, além de uma análise muito pormenorizada de tudo, seja esforços, tensões, deformações, modos de vibração, fatores de segurança (no caso de dimensionamento). Por outro lado, o Tricalc apresenta a vantagem de ser um programa muito mais rentável. Um gabinete de projetos que tenha muitos projetos para executar, o Tricalc é o programa ideal pois além de fazer o cálculo dos esforços, deformações e tensões (ainda de forma menos confiável do que o Robot), calcula as armaduras e faz os desenhos automaticamente, necessitando de muito poucas alterações aos pormenores. Os desenhos do Robot apresentam uma qualidade menor, sendo muito das vezes preferível o cálculo e desenho dos pormenores através do autocad (como feito neste trabalho), o que vai demorar muito mais.

Como tal, se o que se pretende dimensionar são edifícios de muita importância, como pontes, hospitais, escolas, reservatórios, em que é necessária uma análise mais pormenorizada e demorada de todos os pormenores, o Robot é o programa ideal. Se os projetos são de edifícios como moradias, o Tricalc é uma escolha suficiente.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

7 – REFERÊNCIAS

- [1] Nunes, Fábio André, *Projeto de Estabilidade de uma habitação unifamiliar recorrendo a programas de cálculo automático*. 2017. 181f. *Dissertação de Mestrado* – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2017.
- [2] NP EN 1998-1 – Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos; Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios.
- [3] <https://www.forum.engenhariacivil.com/melhor-software-portugues-para-calculo-estrutural-1750.html> acessado a 20 de setembro de 2019.
- [4] Major, Hugo Filipe, *Projeto de estrutura de betão armado – Análise comparativa de dois softwares*. 2016. 116f. *Relatório de Estágio para a obtenção do grau Mestre* – Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2016.
- [5] Tavares, T. M. A. S., (2013) *Análise Comparativa de Modelos de Cálculo Automático no Âmbito do Projeto de Estruturas*. 2013. 153f. *Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em Engenharia Civil – Especialização em Estruturas* - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [6] <http://www.arktec.com/PT/Empresa/Historia/Arktec/ArktecP.aspx> acessado a 1 de agosto de 2019
- [7] <http://www.arktec.com/PT/Produtos/Tricalc/Caracteristicas/Caracteristicas.aspx> acessado 21 de setembro de 2019
- [8] <http://www.arktec.com/PT/Produtos/Tricalc/PDF/Orden2pDelta.pdf> acessado a 21 de setembro de 2019
- [9] http://www.cype.pt/cype_ingenieros/ acessado em 02 de agosto de 2019.
- [10] <http://programas.cype.pt> acessado a 28 de agosto de 2019.
- [11] <https://www.csiportugal.com/software-features/2/sap2000#submenu-top> acessado a 21 de setembro de 2019
- [12] O Casulo, Projeto de Arquitetura. Caldas da Rainha, 2019.
- [13] NP-EN 206-1 2007 – Betão; Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, ICS 91.100.30.
- [14] LNEC – Portugal, E 464-2005, Betões, março de 2005.

[15] prNP 4447 2006 – Aço para armaduras de betão armado – Varões direitos e rolos; ICS 77.140.15; 77.140.60.

[16] NP-EN 1992-1-2 – Eurocódigo 2: Projeto de Estruturas de Betão; Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, ICS -91.080.40.

[17] LNEC – Portugal, E 217-1968, Fundações Diretas Correntes, julho de 1968.

[18] NP EN 1990 – Eurocódigo 0: Bases para o projeto de estruturas, 2009

[19] NP-EN 1991-1-4 – Eurocódigo 1: Ações em estruturas Parte 1-1: Ações gerais – Pesos Volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios, ICS – 91.010.030.

[20] NP-EN 1991-1-4 – Eurocódigo 1: Ações em estruturas Parte 1-4: Ações gerais – Ação do Vento, ICS – 91.010.030.

[21] <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/ee/Tabelas.pdf> acedido a 2 de agosto de 2019

ANEXO I

Planta Estrutural da Laje da Cobertura

ANEXO II

Pórtico dimensionado pelo Tricalc

ANEXO III

Pórtico dimensionado à mão

ANEXO IV

Pilar dimensionado pelo Tricalc

ANEXO V

Pilar dimensionado pelo à mão

ANEXO VI

Muro de Suporte de Terras dimensionado pelo Tricalc

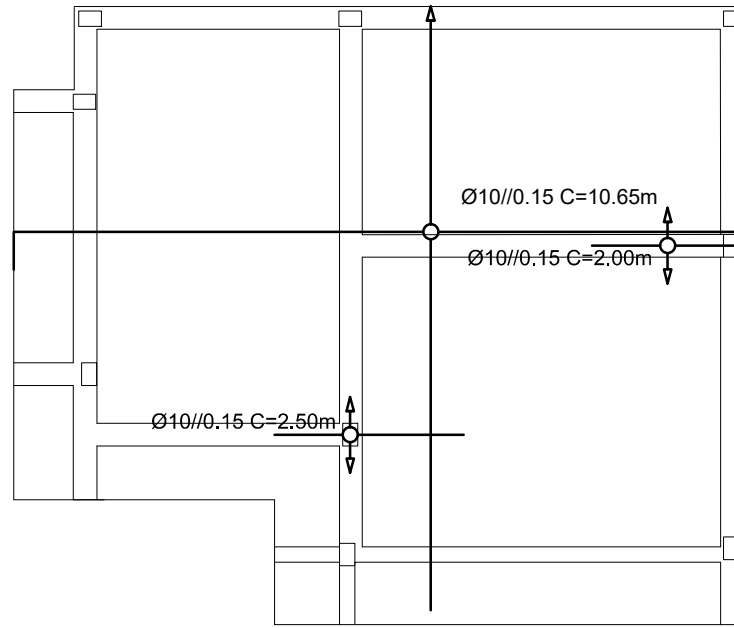
ANEXO VII

Muro de Suporte de Terras dimensionado à mão

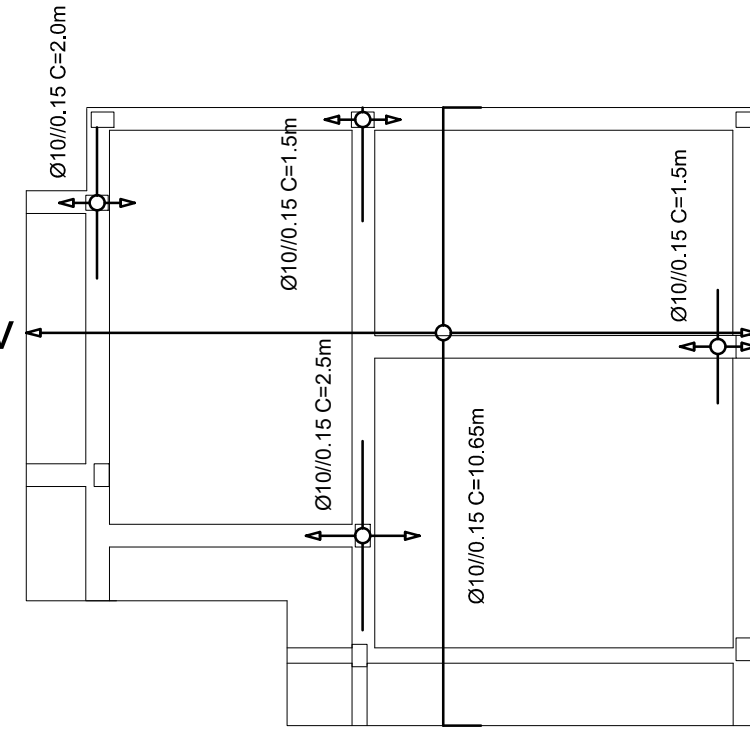
ANEXO VIII

Sapata dimensionado pelo Tricalc e à mão

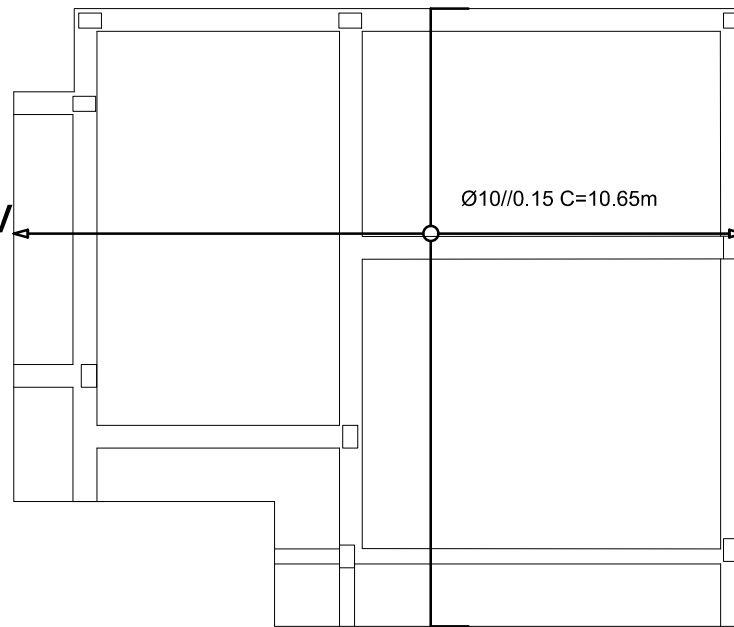
inf long



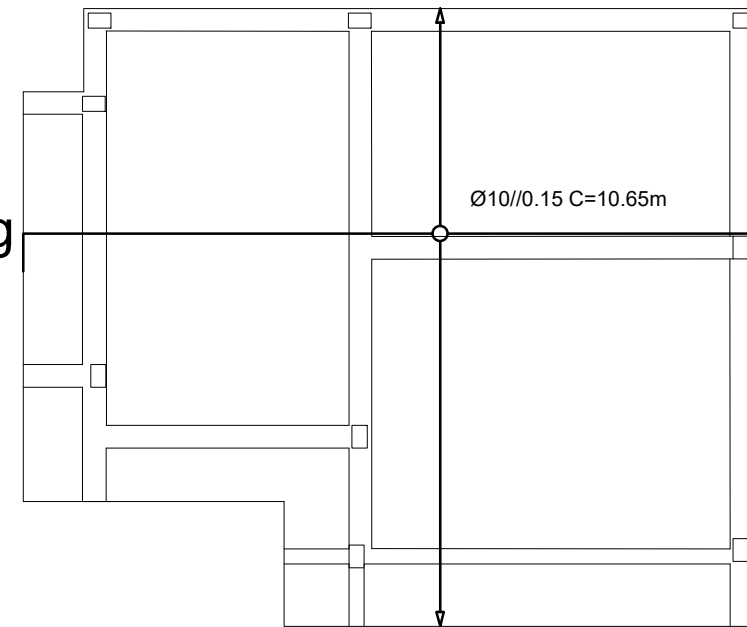
inf transv

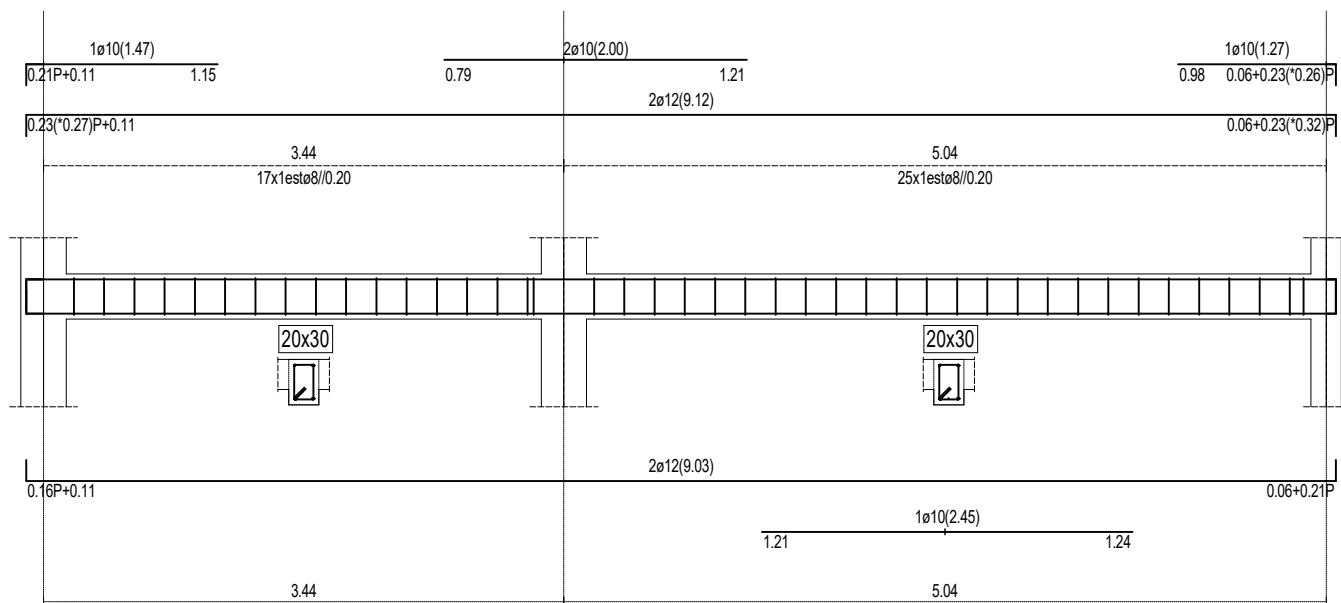


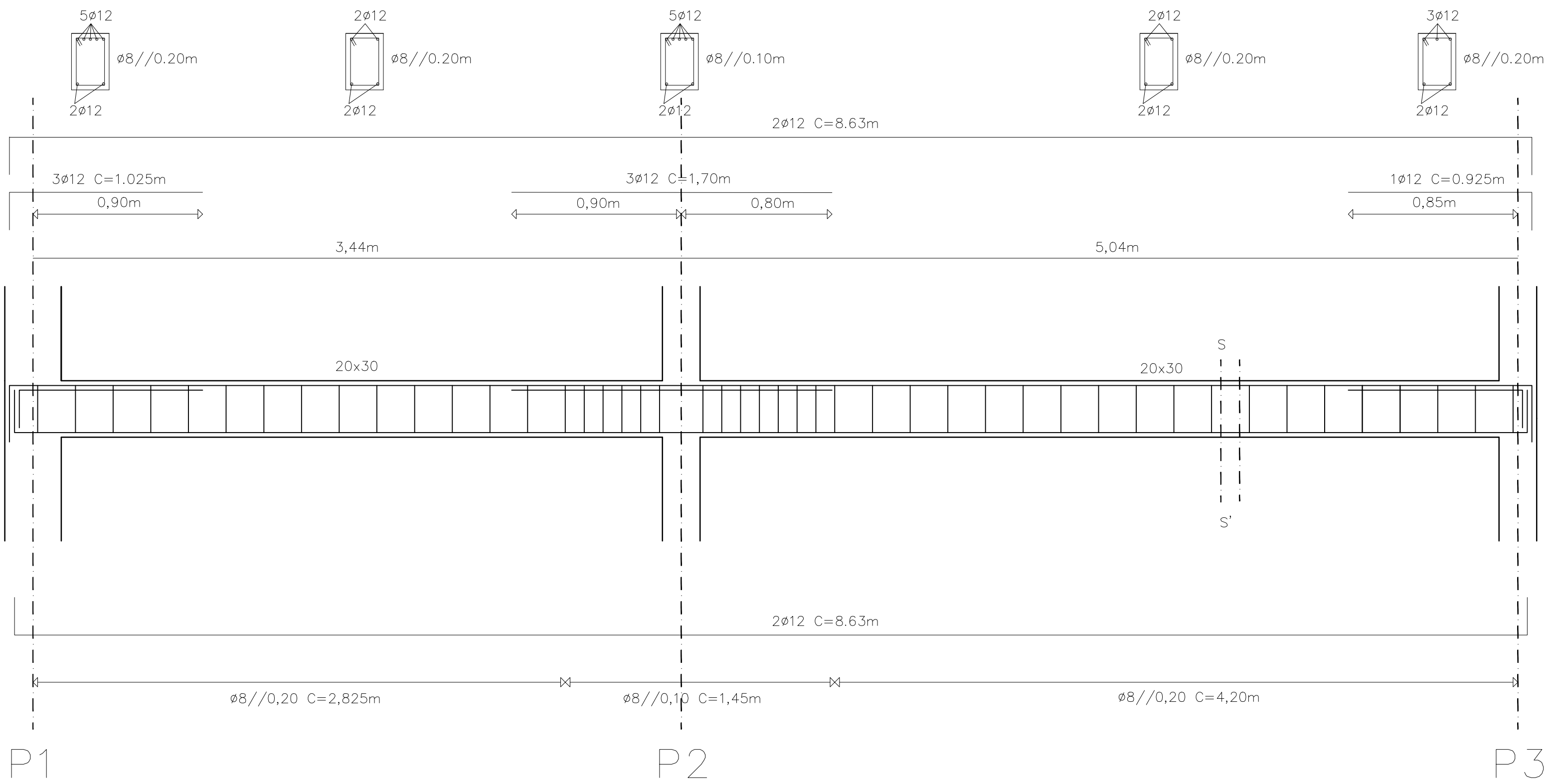
sup transv



sup long

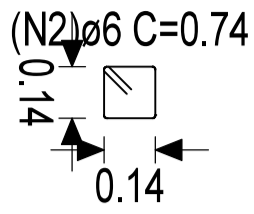
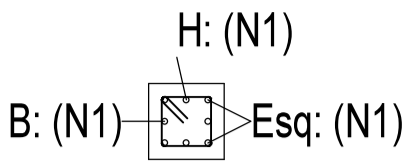






BET 20x20

L=2.60 lb=0.52 ls=0.96



Esq: 4(N1)ø16

B/H: 2x1(N1)ø16/2x1(N1)ø16

0.50 : 5x1est(N2)ø6//0.10

1.90 : 9x1est(N2)ø6//0.20

0.20 : 3x1est(N2)ø6//0.10

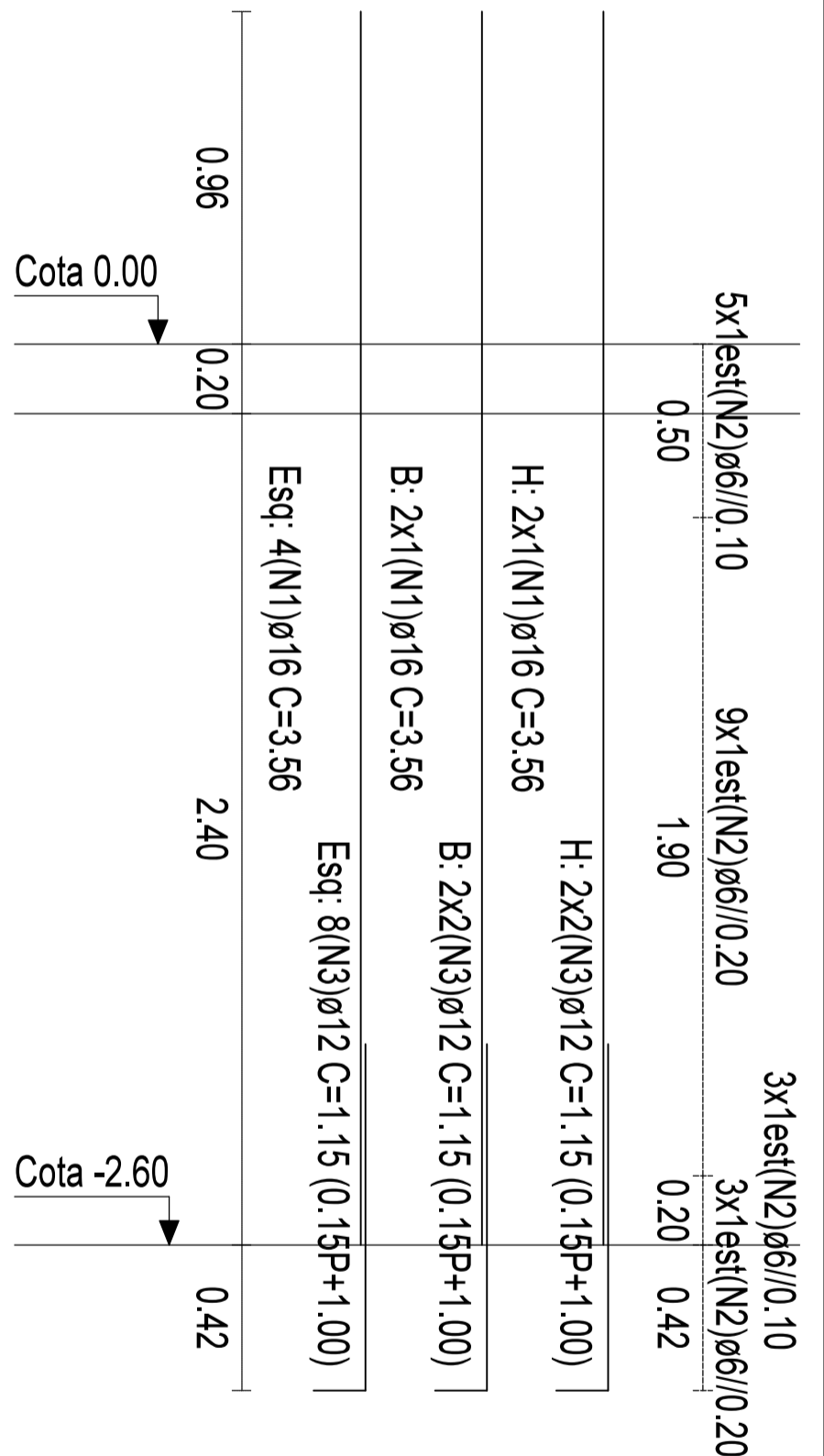
Armadura de Esperas

Esq: 8(N3)ø12

B/H: 2x2(N3)ø12/2x2(N3)ø12

3x1est(N2)ø6//0.20

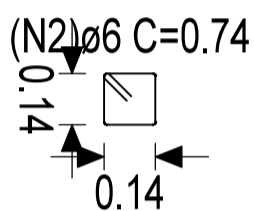
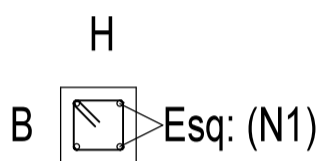
ID	Qt.	Diâm.	Comprimento unitário (m)				Totais	
			Pat.	Comp. Recto	Pat.	Total	(m)	(kg)
Pilares			Aço B400A 400 MPa					
1	8	ø16		3.56		3.56	28.48	46.389
2	20	ø6				0.74	14.80	3.390
3	16	ø12	0.15	1.00		1.15	18.40	16.859
Total+10.0%								73.302
Total+10.0% (kg)								
Aço B400A 400 MPa								
							ø6	3.729
							ø12	18.545
							ø16	51.028
Totais								73.302



TIPOS DE PILARES DA COTA -2.60

Tipo 3/-260 (x1)

BET 20x20
L=2.60 lb=0.52 ls=0.96

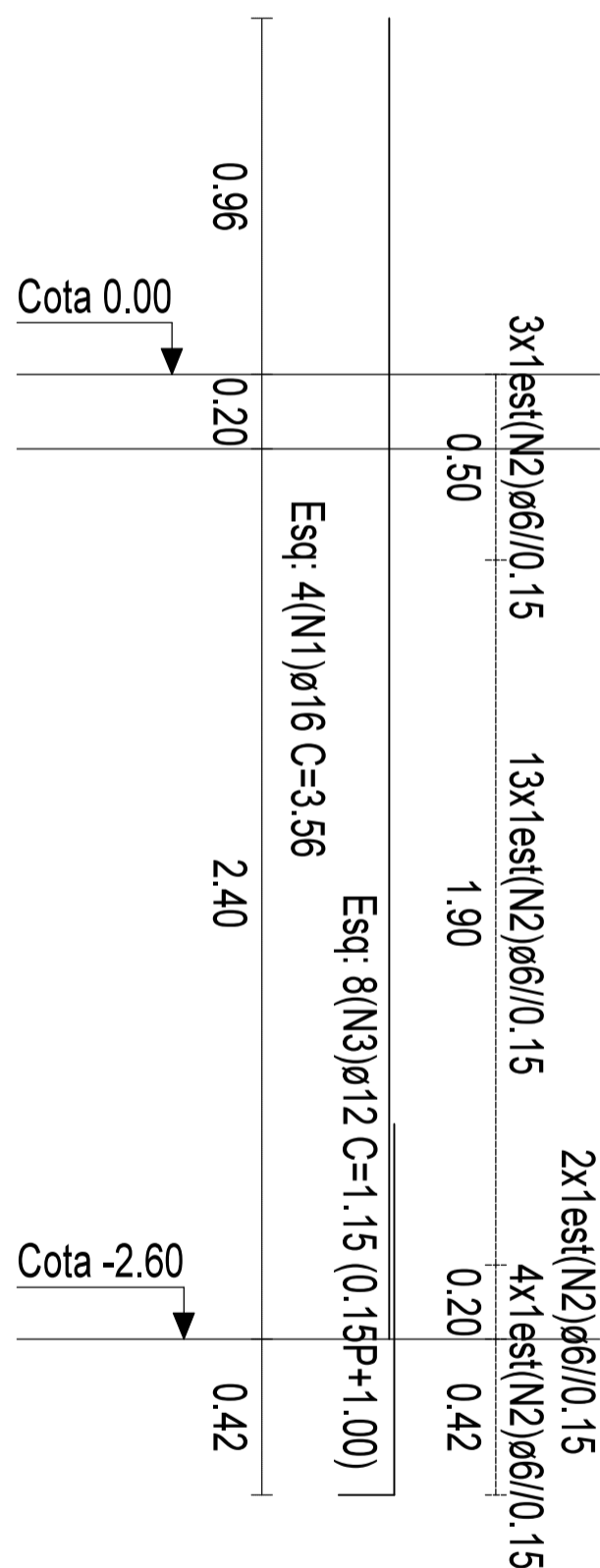


Esq: 4(N1)ø16

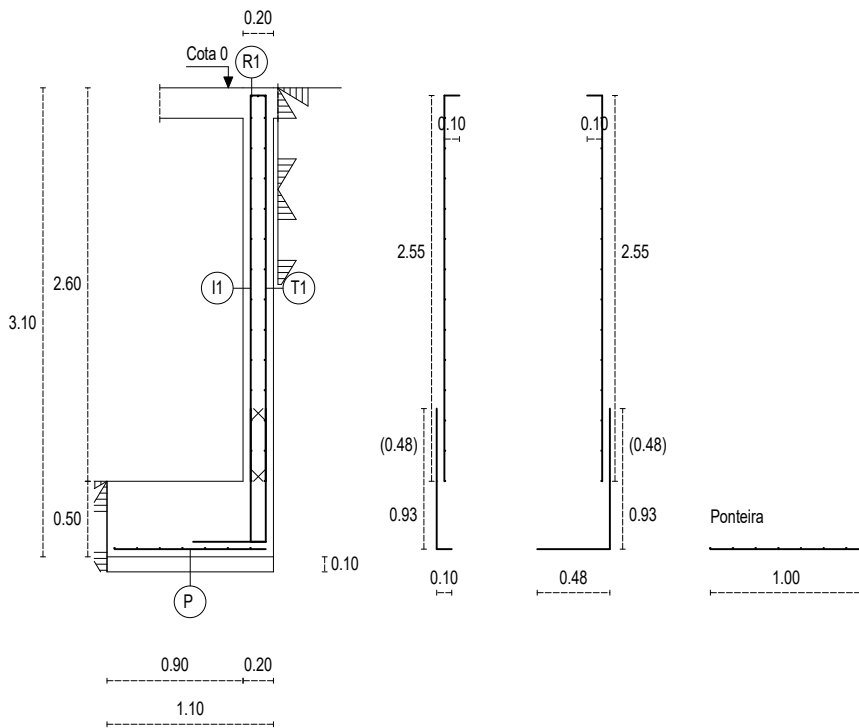
0.50 : 3x1est(N2)ø6//0.15
1.90 : 13x1est(N2)ø6//0.15
0.20 : 2x1est(N2)ø6//0.15
Armadura de Esperas
Esq: 8(N3)ø12

4x1est(N2)ø6//0.15

ID	Qt.	Diâm.	Comprimento unitário (m)				Totais		
			Pat.	Comp. Recto	Pat.	Total	(m)	(kg)	
Pilares			Aço B400A		400	MPa			
1	4	ø16		3.56		3.56	14.24	23.195	
2	22	ø6			0.74	16.28		3.729	
3	8	ø12	0.15	1.00		1.15	9.20	8.429	
Total+10.0%								38.889	
Total+10.0% (kg)									
Aço B400A 400 MPa									
							ø6	4.102	
							ø12	9.272	
							ø16	25.515	
Totais								38.889	



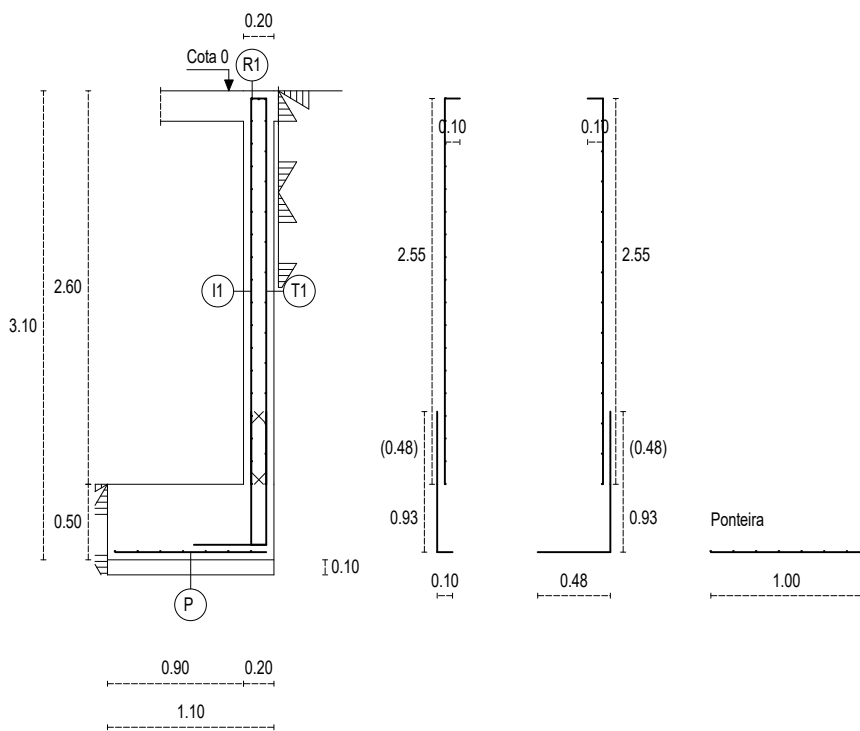
Escala: 1/20



	LONG.(HORZ.)	TRANS.(VERT.)
I1	(N6)ø10//0.20	(N3+N5)ø10//0.10
T1	(N6)ø10//0.20	(N4+N5)ø10//0.10
P	(N2)ø12//0.15	(N1)ø12//0.15
R1	3(N7)ø12	

Comprimento do muro: 4.27 m

Muro	ID	Qt.	Diâm.	Comprimento unitário (m)		Totais		
				Pat.	Comp. Recto	Pat.	Total (m)	(kg)
				Muros de cave		Aço B400A 400 MPa		
Muro MST3	1	29	ø12		1.00	1.00	29.00	26.571
	2	8	ø12		4.17	4.17	33.36	30.565
	3	43	ø10	0.93	0.10	1.03	44.29	28.180
	4	43	ø10	0.93	0.48	1.41	60.63	38.577
	5	86	ø10	0.10	2.55	2.65	227.90	145.005
	6	26	ø10		4.17	4.17	108.42	68.984
	7	3	ø12		4.17	4.17	12.51	11.462
						Total+10.0%	384.279	
						Total+10.0% (kg)		
						Aço B400A 400 MPa		
						ø10	308.821	
						ø12	75.458	
						Totais	384.279	



	LONG.(HORZ.)	TRANS.(VERT.)
I1	(N6)ø10/0.15	(N3+N5)ø10/0.20
T1	(N6)ø10/0.20	(N4+N5)ø10/0.20
P	(N2)ø12/0.15	(N1)ø12/0.15
R1	3(N7)ø12	

Comprimento do muro: 4.27 m

Muro	ID	Qt.	Diâm.	Comprimento unitário (m)		Totais		
				Pat.	Comp. Recto	Pat.	Total	(m)
				Muros de cave		Aço B400A 400 MPa		
Muro MST3	1	29	ø12		1.00	1.00	29.00	26.571
	2	8	ø12		4.17	4.17	33.36	30.565
	3	22	ø10	0.93	0.10	1.03	22.66	14.418
	4	22	ø10	0.93	0.48	1.41	31.02	19.737
	5	44	ø10	0.10	2.55	2.65	116.60	74.189
	6	31	ø10		4.17	4.17	129.27	82.250
	7	3	ø12		4.17	4.17	12.51	11.462
						Total+10.0%	285.112	
						Total+10.0% (kg)		
						Aço B400A 400 MPa		
							ø10	209.654
							ø12	75.458
						Totais		285.112

Sapata 2 Centrada

Pilar 2

Dimensões: 1.30x1.30x0.50 Ang.: 0°

A: I:9Ø12//0.15(0.10P+1.20+0.10P)(0.09;1.21)

B: I:9Ø12//0.15(0.10P+1.20+0.10P)(0.09;1.21)

